

Ověřování SW regulátoru trakčního pohonu přímou mikroprocesorovou simulací

Bakalářská práce

Vypracoval: Joel Matějka

Vedoucí práce: Ing. Jiří Zděnek CSc.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Otevřená informatika – Počítačové systémy

2014



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Joel Matějka**

Studijní program: **Otevřená informatika**
Obor: **Počítačové systémy**

Název tématu česky: **Ověřování SW regulátoru trakčního pohonu přímou mikroprocesorovou simulací**

Název tématu anglicky: **Traction Drive Control SW Verification Using Direct Microprocessor Simulation**

Pokyny pro vypracování:

Zhodnotte důvody a možné přínosy metody přímé mikroprocesorové simulace v oblasti polovodičových měničových výzbrojí. Navrhněte kritéria pro implementaci této simulace (synchronizace výpočtů, měřítka veličin aj.). Simulaci implementujte pro konkrétní řídicí jednotku pohonu trakčního vozidla. Výsledek dokumentujte formou časových průběhů simulovaných veličin trakčního pohonu a proveďte jejich vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:

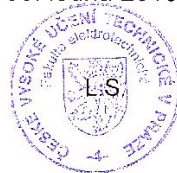
- [1] Dirk, L., Vírúš, M.: *Jazyky C a C++ podle normy ANSI/ISO*. Grada Publishing, Praha, 2. aktualizované vydání, 2011. ISBN: 978-80-247-3917-5.
- [2] Jansa, F.: *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Nakladatelství dopravy a spojů, Praha, 1. vydání, 1980. OD-31-047-80-05-94.
- [3] Pavelka, J., Zděnek, J.: *Elektrické pohony a jejich řízení*. Nakladatelství ČVUT, Praha 2010. ISBN: 978-80-01-04642-5.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Zděnek, CSc. (K 13114)

Datum zadání bakalářské práce: 26. listopadu 2013

Platnost zadání do¹: 30. ledna 2015


Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 26.11.2013

¹ Platnost zadání je omezena na dobu dvou následujících semestrů.

Poděkování

Děkuji Ing. Jiřímu Zděnkovi CSc. za vedení této práce a dále kolektivu pražské pobočky firmy Škoda Electric a.s. za ochotu a věcné připomínky k práci. Dále děkuji rodině a všem, co mě při psaní práce podporovali.

Prohlášení

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

Dne 23. května 2014 v Praze

.....

Abstrakt

Tato bakalářská práce řeší návrh a implementaci real-time simulátoru trakčního pohonu. Z dostupných metod byla vybrána metoda software in loop aplikovaná na řídicí jednotku lokomotivy. Vytvořený simulátor umožňuje ověření regulátoru v době jeho tvorby a minimalizuje riziko chyby při dalších testech na skutečném zařízení. Dovoluje nahrazení soustavy modelem či poskytuje pouze souběžný běh pro kontrolu a následné vylepšení modelu.

Klíčová slova *real-time simulace, software in loop (SIL), trakční pohon*

Abstract

This thesis describes the design and implementation of real-time simulator of traction drive. It was chosen software in loop method from available methods applied to the locomotive control unit. Implemented simulator allows regulator verification during its formation and minimizes probability of failure while testing on real devices. The simulator can replace a real device or run parallel to check and improve mathematical model.

Keywords *real-time simulation, software in loop (SIL), traction drive*

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

© 2014 Joel Matějka. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

MATĚJKA, Joel. *Ověřování SW regulátoru trakčního pohonu přímou mikroprocesorovou simulací*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Jiří Zděnek CSc.

Obsah

1	Úvod	11
2	Úvod do problematiky	11
2.1	Vymezení pojmů	11
2.1.1	Systém	11
2.1.2	Model systému	11
2.1.3	Modelování	12
2.1.4	Simulace	12
2.1.5	Real-time simulace	12
2.1.6	Simulátor	13
2.2	Výhody procesorové simulace	13
2.3	Možné metody real-time simulace	14
2.3.1	Hardware in the loop (HIL)	15
2.3.2	Software in the loop (SIL)	15
2.4	Dostupné simulační nástroje	15
2.4.1	Hardwarová simulační řešení	15
2.4.2	Softwarové simulátory / generátory simulačního kódu	15
2.5	Shrnutí	16
3	Teoretický rozbor řešení	17
3.1	Elektrický pohon	17
3.2	Trakční pohon	17
3.3	Řídicí systém trakčního pohonu	19
3.4	Pracovní stavy regulátoru jednoho podvozku	19
3.5	Pracovní stavy zpětnovazebního regulátoru	21
3.6	Zařazení simulátoru do zpětnovazební regulační smyčky	21
3.7	Omezení simulace	22
3.7.1	Vyhovující numerické metody	22
3.8	Matematický model lokomotivy	23
3.8.1	Stejnoseměrný motor s cizím buzením	23
3.8.2	Model stejnosměrných měničů napětí	25
3.8.3	Model vlaku	27
3.8.4	Simulační schéma	28
3.9	Poměrné jednotky	31
4	Implementace pro konkrétní řídicí jednotku	33
4.1	Dostupný hardware	33
4.2	Vývojové a monitorovací nástroje	34
4.3	Implementace regulátoru	35
4.4	Implementace simulátoru	35
4.4.1	Stavový automat	35
4.4.2	Řešené rovnice	35

4.4.3	Magnetizační charakteristika	36
4.4.4	Zprovoznění regulátoru	36
4.5	Simulační asistent	36
4.6	Ověření funkčnosti regulátoru a simulátoru	38
4.7	Naměřené a nasimulované průběhy	38
5	Závěr	47
6	Seznam použité literatury	49

1 Úvod

Simulace jsou široce využívány pro návrh, analýzu a následnou optimalizaci dynamických systémů již desítky let. V elektrotechnice hrají klíčovou roli pro úspěšný vývoj v mnoha oblastech od návrhu integrovaných obvodů po simulace přenosové soustavy elektrické energie.

Rozvoj výpočetní techniky v posledních letech umožňuje řešit stále složitější problémy v kratším čase. Díky rychlým výpočtům je možné provádět simulace v reálném čase, které mají velký význam při vývoji rozsáhlých regulátorů pro pohony dopravních prostředků, zvláště pak simulace kritických situací.

Zadání práce vychází z aktuálního požadavku firmy Škoda Electric a.s. na simulátor trakčního pohonu. Vyvinutý simulátor bude možno dále využít při návrhu a testování regulátorů pro elektrické pohony.

Obsah práce je rozdělen na tři hlavní části. Po stručném úvodu do problematiky a rešerši existujících řešení následuje teoretická část, ve které je rozebrána architektura regulátoru, matematický model pohonu a správné zařazení simulátoru. Následující část je věnována implementaci simulátoru pro zadanou řídicí jednotku. Závěrem jsou uvedeny dosažené výsledky.

Simulace pohonu v reálném čase je velmi obsáhlé téma, vyžadující znalosti z oblasti výpočetní techniky, matematiky, fyziky, elektrotechniky a regulační techniky. V rámci této bakalářské práce byly stanoveny cíle, které omezují hloubku znalostí jednotlivých disciplín. Cílem práce je porozumět zjednodušenému matematickému modelu a funkčnosti lokomotivy, seznámit se s implementací regulátoru pro konkrétní lokomotivu. Dále navrhnout a implementovat simulátor pro zadanou jednotku s usnadňujícími předpoklady, navrhnout vhodné ovládání a začlenění simulátoru do systému. Pro ověření funkčnosti pak zachytit a zhodnotit průběhy simulací pro různé vstupní parametry.

S cílem práce úzce souvisí také požadavky na implementovaný simulátor. V rámci zjednodušení byly stanoveny následující požadavky. Simulátor bude provádět elektromechanickou simulaci jednoho podvozku lokomotivy a vlaku bez uvažování skluzu (dokonalá adheze). Provoz bude pouze na stejnosměrném systému s konstantním napětím troleje a pomocných zdrojů. Simulátor bude využívat pouze volného výpočetního času jednotky, celkové využití by nemělo přesáhnout 70%.

2 Úvod do problematiky

2.1 Vymezení pojmů

2.1.1 Systém

Slovo systém má v dnešním světě mnoho významů a je velmi obecné. Může to být soustava fyzikální, biologická, společenská apod. V kontextu této práce je systém vnímán jako soustava vzájemně propojených zařízení s definovanými nezávislými vstupními veličinami - vstupy a závislými výstupními veličinami - výstupy. Příkladem může být elektrický motor jehož vstupem je elektrický proud a výstupem otáčky na hřídeli. (Roubal – Hušek, 2011, s. 13)

2.1.2 Model systému

Model systému je zjednodušená interpretace systému, která umožní předvídat jeho chování. Model může být ve formě hmotné například zmenšený model letadla nebo lodě. Pro tuto práci je důležitý jiný

typ modelu, nazývaný matematický, který je sestaven z rovnic popisujících chování systému. Model je vždy pouze aproximací skutečného systému, protože často nelze popsat všechny vlastnosti systému matematicky, nebo by složitost modelu byla nežádoucí. Často jsou pro konkrétní simulaci podstatné pouze některé aspekty a matematický model lze značně zjednodušit. Stále ale zůstává důležitým parametrem přesnost modelu. (Karnopp a kol., 2012, s. 4–8)

2.1.3 Modelování

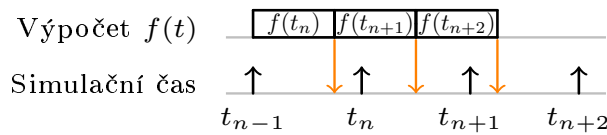
Modelování je proces, při kterém jsou získávány a shromažďovány informace o systému. Správnou organizací a reprezentací těchto dat vzniká model, který může být dále zkoumán a simulován. Cílem modelování je tedy získání náhrady skutečného systému (modelu), který dostatečně odpovídá realitě. (Cellier, 2006, s. 8)

2.1.4 Simulace

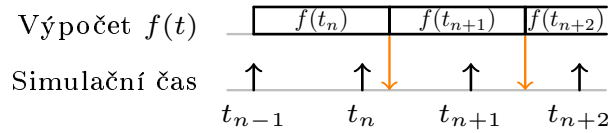
Simulace je výzkumná metoda, jejíž podstata spočívá v nahrazení skutečného systému jeho modelem. Na modelu jsou poté prováděny experimenty, za účelem získání dalších informací o původním systému. Simulace může také sloužit k ověření správnosti sestavení modelu nebo ověření funkčnosti jednotlivých částí systému. (Cellier, 2006, s. 8)

2.1.5 Real-time simulace

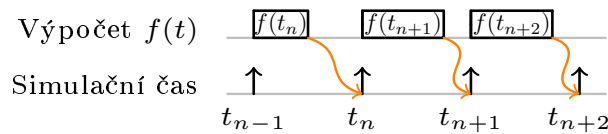
Pro typ simulace v této práci je předpokladem výpočet v diskrétním čase s konstantním časovým krokem (fixed time-step simulation). Pro výpočet v konkrétním časovém okamžiku se vychází z předchozího stavu modelu. Vlastní výpočet vyžaduje určitý čas, který může být kratší nebo delší než časový krok. Při offline simulaci nezáleží na době dokončení jednotlivých výpočtů. Obvykle je cílem získat přesné výsledky celé simulace co nejrychleji a celkový čas záleží především na výpočetním výkonu a složitosti modelu. Naopak u real-time simulace je kritickým parametrem doba výpočtu jednotlivých kroků, která musí být kratší než délka kroku. Pro korektnost simulace je nutné zajistit synchronizaci a obsluhu příslušných vstupů a výstupů v rámci simulačního kroku, jak ukazuje obrázek 1. (Venne a kol., 2010)



(a) Offline simulace rychlejší než reálný čas.



(b) Offline simulace pomalejší než reálný čas.



(c) Synchronizovaná real-time simulace.

Obrázek 1: Porovnání simulačních technik. Inspirováno (Venne a kol., 2010).

2.1.6 Simulátor

Je program, který zajišťuje výpočet simulace.

2.2 Výhody procesorové simulace

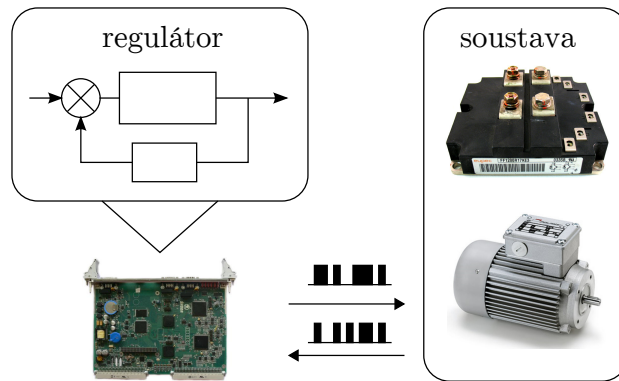
Ověřování softwarového regulátoru pomocí reálných součástkových modelů soustavy nebo přímo na skutečné soustavě představuje u náročnějších pohonů (například pohony lokomotiv) velké časové i finanční nároky a také nutnost sestavení kompletních elektrických obvodů, napájecího systému, zátěží a jejich uvedení do provozu. I po uvedení do provozu je dosažení některých statických nebo dynamických vlastností téměř nemožné. Například z důvodu výkonových mezí jednotlivých zátěžových strojů a napájecího systému. Na hotových vozidlech je také nutno zajistit zkušební trať, zátěžové vozy a vytvořit požadované okolní prostředí.

Napojením simulátoru přímo na příslušné softwarové vstupy a výstupy regulátoru odpadá potřeba fyzických výkonových součástí, které jsou nahrazeny příslušnými modely. Není tedy třeba uvádět do provozu složité fyzické testovací systémy a je možno modely pružně měnit. Také je možné bez rizika poškození provádět jinak náročné kritické testy (například zkrat na kotvě motoru) a kontrolovat funkčnost příslušných ochran.

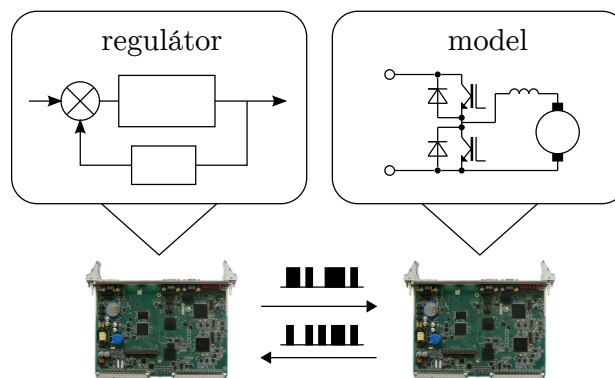
Softwarová simulace samozřejmě nenahradí zkoušky na skutečné soustavě. Zkoušky na reálných měničích a silových obvodech je nutno provést, ovšem provádí se již s modelově ověřeným regulátorem. Minimalizuje se tak riziko vzniku chyb a následných škod při uvádění do provozu. (Šk, 2009b)

2.3 Možné metody real-time simulace

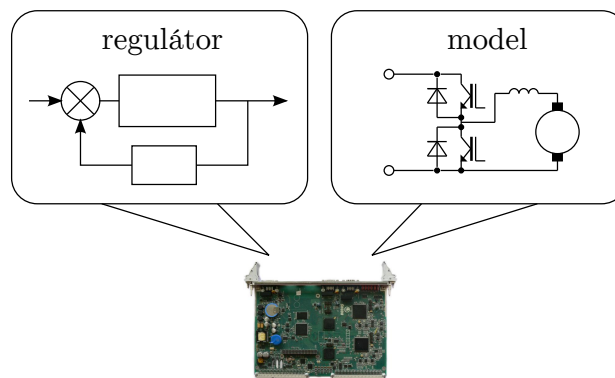
Pro ilustraci a vymezení pojmů lze uvést například systém motoru s regulátorem, ve kterém má být doladěn regulátor. Vlastní ladění je možno provádět přímo na originální soustavě nebo je možné nahradit výkonovou část real-time simulací. Real-time simulátory je možno zpravidla rozdělit na dvě kategorie dle způsobu zapojení na externí hardwarový simulátor (hardware in the loop) a interní softwarový simulátor (software in the loop), jak je zobrazeno na obrázku 2. (Venne a kol., 2010)



(a) Regulátor připojený na skutečnou soustavu.



(b) Simulace hardware-in-loop.



(c) Simulace software-in-loop.

Obrázek 2: Porovnání metod real-time simulace. Inspirováno (Venne a kol., 2010).

2.3.1 Hardware in the loop (HIL)

Regulátor je připojen k externímu real-time simulátoru místo původní výkonové části. Z nutnosti fyzického propojení těchto dvou bloků vyplývají požadavky na mnoho vstupů a výstupů, aby byl simulátor dostatečně univerzální. Výhodou této metody je oddělený výpočet regulátoru a simulátoru.

2.3.2 Software in the loop (SIL)

Regulátor i virtuální soustava je simulována v jedné jednotce. Za výhodu lze označit zachování integrity signálů. Fyzické vstupy a výstupy nejsou použity a načasování s okolním světem tedy není kritické. Celý systém může být snadno přechásován a následně simulován zrychleně nebo zpomaleně bez dopadu na správnost výsledků.

2.4 Dostupné simulační nástroje

Na trhu je dostupných mnoho komplexních a univerzálních simulačních řešení. Pro příklad je uvedeno několik nejpopulárnějších. U každého produktu je uvedeno několik základních technologických informací, možné využití a přibližná cena.

2.4.1 Hardwarová simulační řešení

Kanadská společnost OPAL-RT TECHNOLOGIES je předním vývojářem real-time simulátorů a příslušenství pro HIL testování elektrických a elektromechanických výkonových systémů. Jejich simulátory jsou využívány světovými výrobci dopravních prostředků a průmyslových zařízení. Pro všechny produkty je obslužný simulační software RT-LAB, ke kterému jsou prodávány výkonné hardwarové simulátory rozšiřitelné o mnoho vstupně výstupních modulů. (OPAL-RT, 2014)

Obdobné výkonné hardwarové řešení nabízí více výrobců. Například testovací a měřicí platforma PXI od National Instruments či simulační systém dSPACE od stejnojmenného výrobce. (dSPACE, 2014; NI, 2014)

Cena základních řad simulačních systémů se pohybuje kolem \$ 10 000.

2.4.2 Softwarové simulátory / generátory simulačního kódu

Nejrozšířenějším softwarem pro simulace dynamických systémů je pravděpodobně MATLAB SimulinkTM od společnosti MathWorks. Využívá algoritmy MATLABu pro řešení deiferenciálních rovnic a umožňuje uživateli snadno reprezentovat modely dynamických systémů formou blokových schémat a rovnic. Umožňuje také spouštět modely na různých platformách jako Arduino[®], Raspberry Pi nebo přímou generaci C/C++, HDL, PLC kódu optimalizované pro konkrétní architekturu procesoru, hradlové pole, logický automat. (MathWorks, 2014)

Obdobné řešení nabízí například produkty společnosti Visual Solutions pracující s vizuálním jazykem VisSim, nebo produkt MapleSim společnosti MapleSoft. (VisSim, 2014; MapleSoft, 2014)

Cena řešení od MathWorks je přibližně \$ 15 000, konkurenční produkty se pohybují kolem \$ 7 000.

2.5 Shrnutí

Metoda procesorové simulace umožňuje zhodnotit koncepci a funkčnost regulačního softwaru v době jeho tvorby bez nutnosti fyzického zařízení. Existuje mnoho společností, které se problematikou simulace dynamických systémů zabývají a nabízejí komplexní řešení. Produkty a jejich výstupy jsou příliš obecné a stavěné na řešení velmi složitých problémů a v neposlední řadě značně finančně náročné.

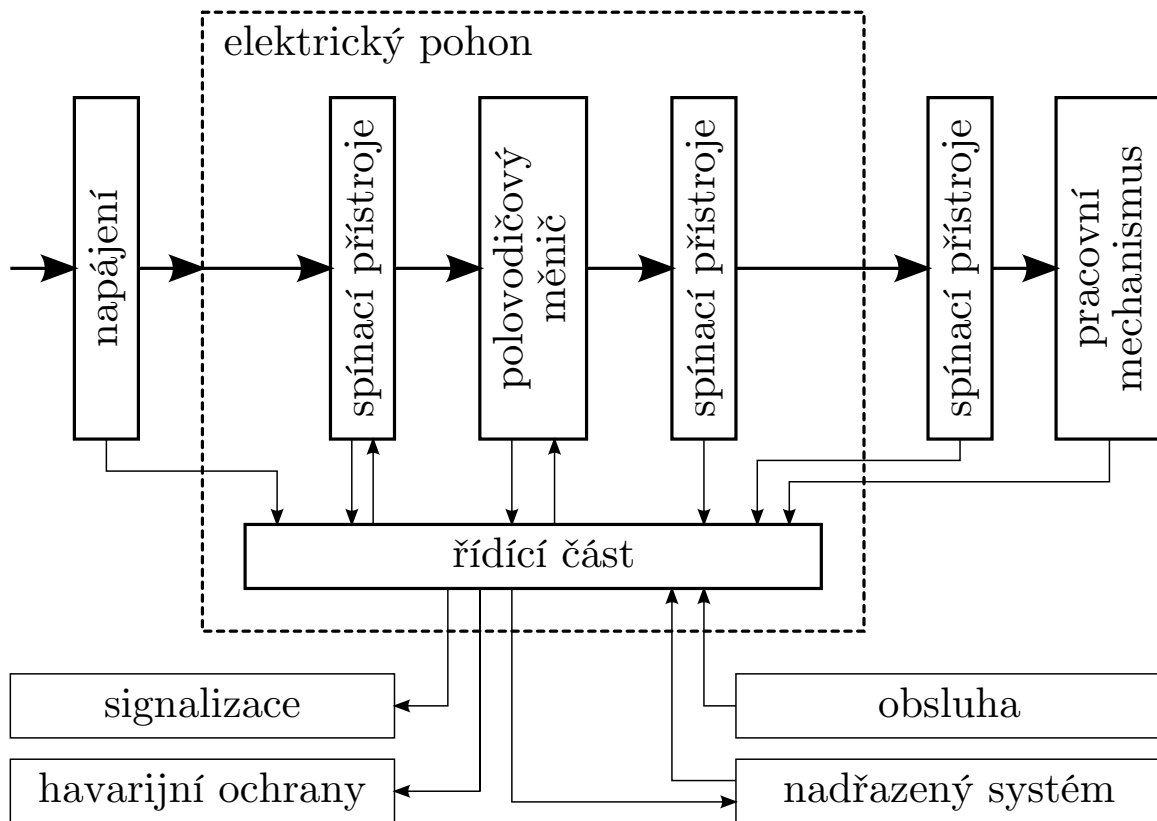
Vygenerovaný kód pro simulaci pomocí některého výše uvedeného softwaru zajistí korektní výpočet na cílovém procesoru, nezajistí ovšem správné začlenění do regulátoru a nesplňuje firemní konvence pro programátorský kód. Kromě nutnosti správně začlenit nový kód do stávajícího programu je zde také požadavek naučit se pracovat se simulačním softwarem a vytvořit v něm model.

Pro simulace značně složitých a typově odlišných systémů by pravděpodobně investice do některého z existujících simulačních řešení byla velkým přínosem. Pro jednorázovou simulaci relativně jednoduchého systému je výhodnější napsat simulátor vlastní.

3 Teoretický rozbor řešení

3.1 Elektrický pohon

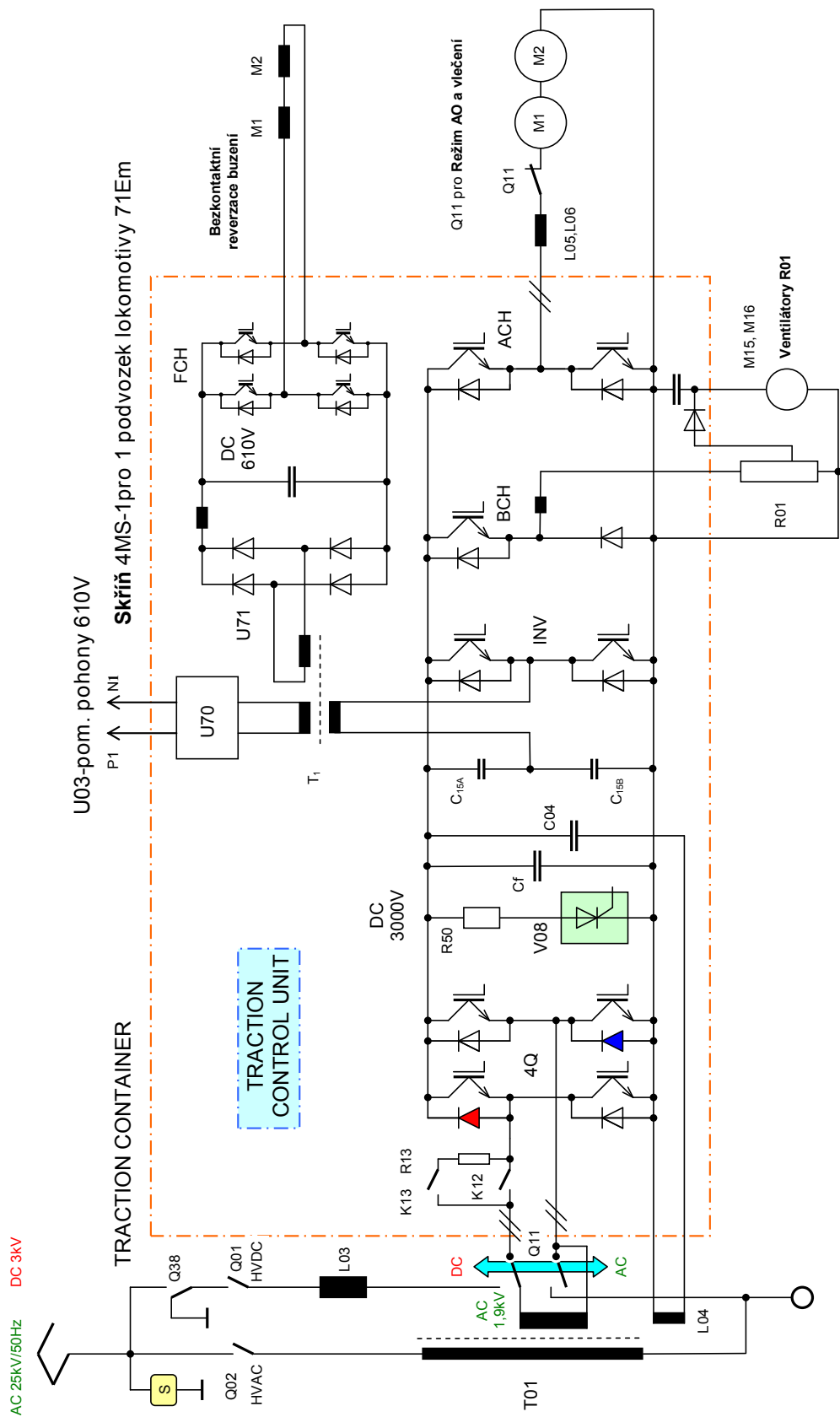
Dle (Pavelka – Zděnek, 2010) je elektrický pohon "soustava vytvořená z vhodné kombinace elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a pro vytváření, přenos a zpracování signálů, řídicích tuto elektromechanickou přeměnu, jejíž vstupní řídicí signály jsou určeny obsluhou nebo nadřazeným řídicím, regulačním nebo automatizačním členem a jejíž výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu". Strukturu elektrického pohonu je možno znázornit blokovým schématem na 3.



Obrázek 3: Blokové schéma elektrického pohonu.

3.2 Trakční pohon

Slovo trakce má dle slovníku spisovného jazyka českého (Havránek a kol., 2014) význam tažné síly. Přívlastek trakční slouží k odlišení hnacího pohonu od jiných. Trakční pohon může být elektrický, parní nebo motorový. V této práci bude trakčním pohonem míněn pouze elektrický. Schéma trakčního pohonu splňuje schéma elektrického pohonu. Pro příklad je na obrázku 4 uvedeno principiální schéma konkrétního pohonu lokomotivy Škoda 71Em. Tato lokomotiva bude předmětem následujícího rozboru a implementace.

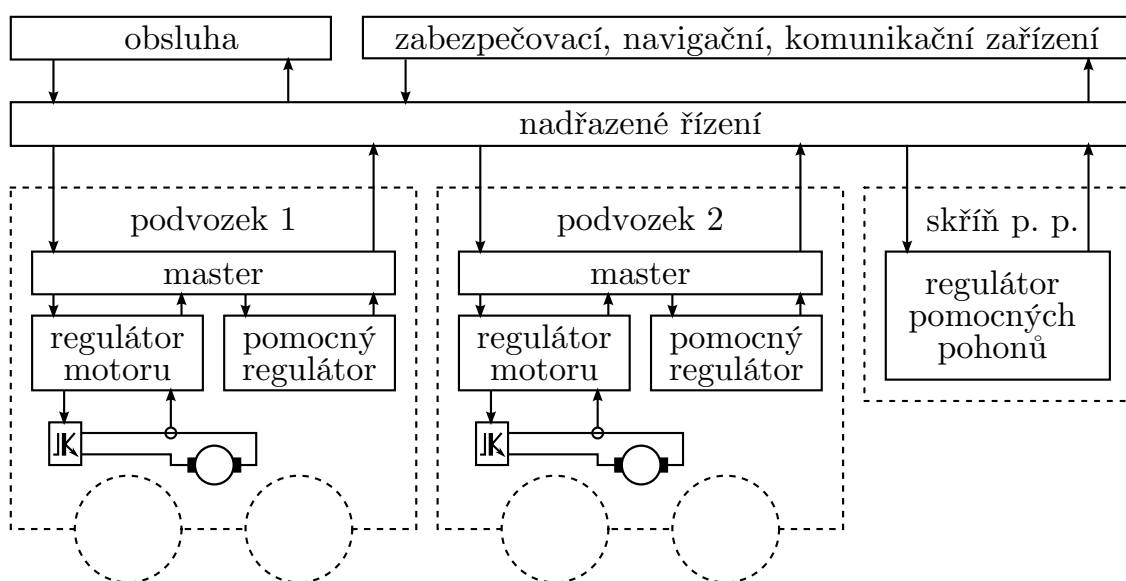


Obrázek 4: Principiální schéma pohonu lokomotivy Škoda 71Em.

3.3 Řídicí systém trakčního pohonu

Regulátory v komplexních monitorovacích a řídicích systémech jsou obvykle organizovány hierarchicky. Jeden nebo více digitálních regulátorů je na nejnižší úrovni, přímo závislých na fyzickém zařízení. Výstupy regulátorů na vyšších úrovních jsou referenčními vstupy nižších úrovní. Regulátory nejvyšších úrovní obvykle tvoří rozhraní s obsluhou. (Liu, 2000, s. 10–12)

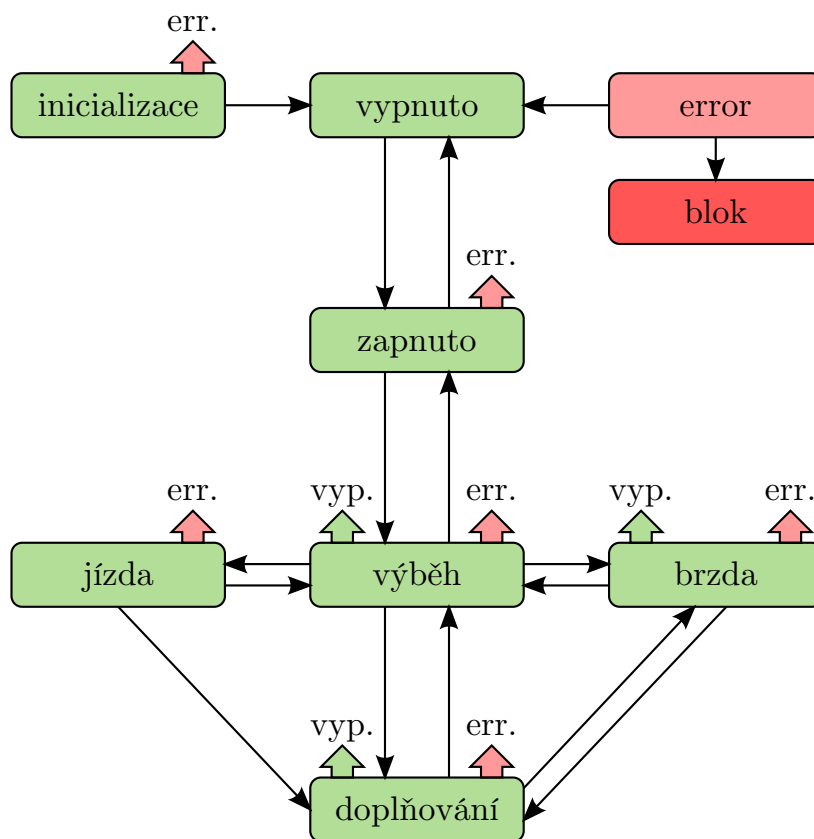
Příkladem lze uvést víceúrovňový řídicí systém lokomotivy Škoda 71Em, který je složen z více propojených bloků. Na nejvyšší úrovni je nadřazené řízení, do kterého vstupují požadavky od strojvedoucího, případně zabezpečovacího či navigačního zařízení. Nadřazené řízení předá požadavky jednotlivým podvozkům, kde je práce dále rozdělena do dvou podřízených jednotek, sbírajících data a ovládající výkonové prvky. Na úrovni podvozků je také regulátor pro pomocné pohony. Všechny bloky jsou propojeny průmyslovou sběrnicí CAN. Na obrázku 5 je zobrazena zjednodušená hierarchie představeného systému.



Obrázek 5: Zjednodušená hierarchie řídicího systému Škoda 71Em.

3.4 Pracovní stavy regulátoru jednoho podvozku

Regulátor trakčního pohonu může pracovat v některém z následujících stavů přehledně vyobrazených na obrázku 6. Diagram vychází z provozních stavů lokomotivy Škoda 71Em a je zobecněn. Nezahrnuje nouzové režimy pro jízdu a dočasné stavy pro nabíjení a vybíjení napájecích filtrů, dále nejsou zobrazeny podmínky pro přechody. Stručný popis stavů je v tabulce 1. Pro jiné trakční pohony se mohou stavy nepatrně lišit. Regulátory pracující na vyšších úrovních mají více provozních stavů a nejsou předmětem této práce. (Šk, 2009c)



Obrázek 6: Zjednodušený diagram stavů logického řízení.

Název stavu	Popis
Inicializace	Počáteční stav podvozku po zapnutí napájení řídicí jednotky.
Vypnuto	Stav s vypnutými hlavními vypínači stejnosměrného i střídavého systému.
Zapnuto	Pohon je připojen na napájecí napětí. Střídavé nebo stejnosměrné.
Výběh	Pohon jede setrvačností zvoleným směrem. Má zablokované kotevní měniče, nepůsobí tedy hnací síla. Záleží na součtu trakčních odporů, zda soustava zpomaluje nebo zrychluje.
Jízda	Pohon působí na soustavu tažnou silou.
Brzda	Pohon působí na soustavu brzdou silou motorové brzdy nebo nezávislé odporové brzdy. Brzdění může být rekuperační nebo ztrátové do odporníku, záleží na aktuálním napětí elektrické sítě. Správné rozložení zajišťuje brzdový měnič. Na soustavu mohou působit kromě elektrických brzd také mechanické.
Doplňování	Pohon je dočasně odpojen od napájecího napětí a z pohybové energie jsou napájeny pomocné pohony vozidla.
Error	Stav po zásahu ochrany vyžadující zásah obsluhy nebo automatický zásah nadřazeného řízení.
Blok	Stav po zásahu ochrany, kdy není povolen žádný vnější zásah pro návrat do normálního stavu a je třeba vyřadit podvozek.

Tabulka 1: Popis stavů regulátoru jednoho podvozku.

3.5 Pracovní stavy zpětnovazebního regulátoru

Zpětnovazební regulátor je jedním ze základních prvků řízení trakčního pohonu a je podřízen regulátoru podvozku. Pro simulátor jsou důležité jeho provozní stavy, ze kterých vychází provozní stavy simulátoru a příslušné matematické rovnice. Stavy jsou opět stručně popsány v tabulce 2.

Název stavu	Popis
Inicializace	Výchozí stav po zapnutí. Počáteční nastavení regulátoru.
Klid	Regulátor čeká na požadavek ke změně stavu.
Výběh / Jízda / Brzda	Probíhá regulace výstupních veličin poměrného otevření měničů na základě požadavku poměrného tahu.
Doplňování	Probíhá regulace poměrného otevření měničů na základě požadavků na spotřebu pomocných zdrojů.
Blok	V tomto stavu všechny regulované veličiny bezpečně přechází na nulové hodnoty. Následuje vyřazení podvozku.

Tabulka 2: Možné stavy zpětnovazebního regulátoru.

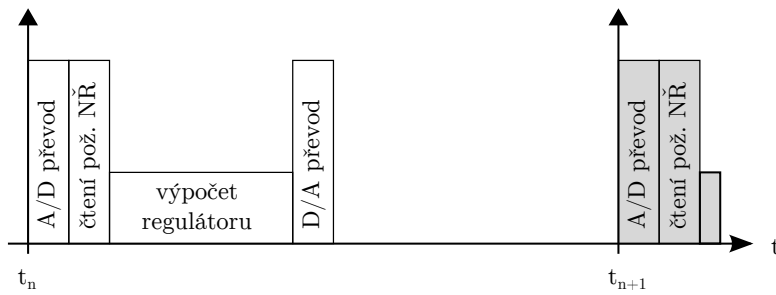
3.6 Zařazení simulátoru do zpětnovazební regulační smyčky

Řídicí systém vykonává cyklicky posloupnost operací, které zajišťují správnou funkčnost regulace. Před zařazením simulátoru do řídicího cyklu je nutno detailně analyzovat stávající řešení především z hlediska spotřebovaného času a synchronizace. Nezbytnou podmínkou pro hard real-time systémy je dodržení všech časových termínů, které se zařazením simulace nesmí změnit, je tedy nutno využít pouze volný procesorový čas. Z hlediska synchronizace je důležité číst a předkládat data regulátoru tak, aby byla v okamžik čtení správná.

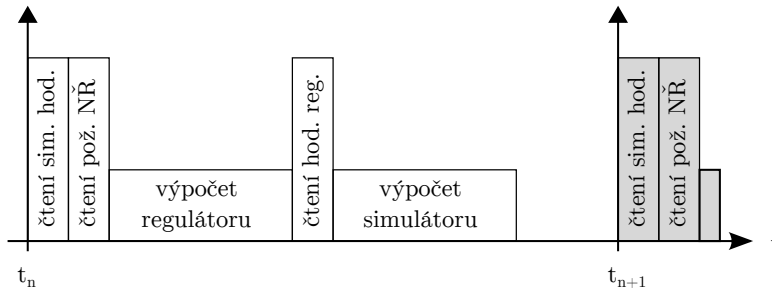
Řídicí cyklus se skládá z následující posloupnosti operací:

- Čtení z AD převodníků a jiných senzorů, filtrace, přepočítání hodnot do požadovaných měřítek.
- Čtení požadovaných hodnot z nadřazeného řízení.
- Výpočet regulátoru.
- Zápis do DA převodníků a akčních členů.
- Komunikace s nadřazeným systémem.

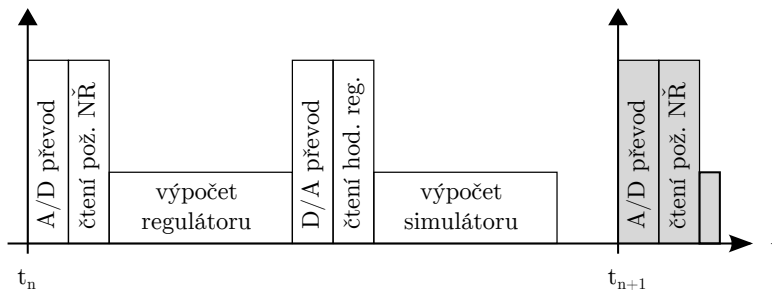
Simulaci lze rozdělit do tří kroků. Čtení vstupů, vlastní výpočet, zápis na výstup / předložení hodnot vstupu regulátoru. Důležitým aspektem při implementaci je, zda má výsledek simulace nahradit původní systém, nebo pouze běžet souběžně a tedy přímo neovlivňovat regulátor. V případě nahrazení není třeba provádět AD a DA převody. Na obrázku 7 jsou vyobrazeny předpokládané časové průběhy výpočtu bez simulátoru, se simulátorem nahrazujícím systém a souběžně běžícím. (Cellier, 2006, s. 479–482)



(a) Řídící cyklus bez simulátoru



(b) Řídící cyklus se simulátorem nahrazujícím měřené hodnoty



(c) Řídící cyklus se souběžně běžícím simulátorem

Obrázek 7: Zařazení výpočtu simulátoru do řídicího cyklu zpětnovazebního regulátoru

3.7 Omezení simulace

Z požadavků na real-time simulaci je zřejmé, že nelze provádět libovolné typy simulací. Pomalá offline simulace znamená velké náklady, ovšem i pozdní výsledky mohou mít hodnotu. Nedodržení termínů v real-time simulaci implikuje nulovou hodnotu výsledků a narušení synchronizace celého systému. Proto musí být výpočty v jednom simulačním kroku omezeny. Je zřejmé, že toto omezení ovlivní přesnost simulace.

3.7.1 Vyhovující numerické metody

Předpokladem pro simulaci je existující matematický popis systému rovnicemi, které mají být řešeny. Pokud není možné nalézt analytické řešení rovnic, je nutno využít některou z numerických metod. Analýza vyhovujících numerických metod vychází z (Cellier, 2006, s. 482–486).

- Vícekrokové metody využívají výsledku předchozích iterací k výpočtu přesnější aproximace. Tato myšlenka je založena na předpokladu, že diferenciální rovnice jsou spojité. Bohužel mnoho real-time simulací získává vstupní data z reálného světa a nejsou zcela spojité. V některých případech mohou dávat chybné výsledky. Proto nejsou více-krokové metody vhodné pro tento typ aplikace.
- Explicitní jednokrokové metody splňují všechny požadavky real-time simulace. Jejich výpočetní čas je relativně malý a konstantní. Potřebný strojový čas lze snadno odhadnout. Jsou vhodné pro systémy s nespojitostmi, protože nevyužívají informace z minulosti.

Tyto metody mají ovšem problémy s tuhými systémy, které reagují na skokové změny pozvolna (stiff systems). Diskutabilním řešením je upravit model, tak aby byla tuhost menší.

- Implicitní jednokrokové metody jsou navrženy pro účinné řešení tuhých a diferenciálních algebraických systémů. V tomto případě jsou nelineární systémy rovnic řešeny každý simulační krok, což vyžaduje použití Newtonovy nebo obdobné iterační metody. Počet iterací nelze odhadnout a tudíž nelze odhadnout ani potřebný výpočetní čas simulačního kroku. Lze omezit počet iterací Newtonovy metody, pak je ovšem nutno zohlednit dopad na stabilitu.
- Metody vyšších řádů. Ve většině real-time aplikací jsou vzorkovací periody malé ve srovnání s měřítkem času systému a požadovaná přesnost je obvykle poměrně nízká. Důležitým důvodem pro použití malé vzorkovací periody je schopnost pojmout vstupní data, která nemohou být interpolována, v reálném čase.
- Metody s proměnným časovým krokem. V real-time simulaci není možné měnit délku časového kroku z důvodu požadované synchronizace. Vzorkovací frekvence je přísně omezena specifikací real-time systému.

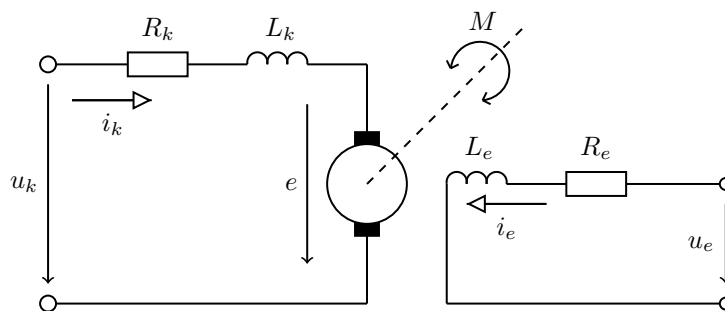
Po analýze vlastností metod lze mezi vhodné kandidáty zařadit explicitní metody nízkých řádů. Tyto metody fungují správně, pokud není systém tuhý, nedochází k nespojitostem a jsou k dispozici vhodné rovnice. V elektrotechnické praxi se ovšem velmi často vyskytují snadno řešitelné problémy, případně lze bez velkých nepřesností model systému zjednodušit a není třeba využít výpočetně náročných numerických metod.

3.8 Matematický model lokomotivy

Principiální schéma lokomotivy bylo již nastíněno na obrázku 4. Nyní následuje rozbor jednotlivých částí pohonu důležitých pro simulaci.

3.8.1 Stejnoseměrný motor s cizím buzením

Matematický model stejnosměrného motoru s cizím buzením vychází ze zjednodušeného schématu na obrázku 8. Schéma obsahuje všechny veličiny a parametry důležité pro analýzu chování pohonu.



Obrázek 8: Obvodové schéma stejnosměrného motoru s cizím buzením.

Stejnoseměrný motor je složen ze dvou galvanicky oddělených elektrických obvodů - budícího a kotevního. Odpor R_k , R_e a indukčnost L_e představují parametry kotevního a budícího obvodu. Kotevní obvod je napájen z vnějšího napětového zdroje napětím u_k a protékán kotevním proudem i_k . Budící obvod je napájen z jiného vnějšího napětového zdroje napětím u_e . Budící proud i_e procházející závity budícího vinutí vyvolá v magnetickém obvodu magnetický tok ϕ . Otáčením rotoru v magnetickém poli ϕ se do kotevního vinutí indukuje napětí e . Vzájemným působením magnetického toku ϕ a kotevního proudu i_k vzniká elektromagnetický moment M , který rotor urychluje.

Matematický model stejnosměrného cize buzeného motoru je určen soustavou rovnic (1) až (6) popisujících vztahy mezi veličinami u_k , i_k , e , u_e , i_e , magnetickým tokem ϕ , hnacím momentem M , zátěžným momentem M_Z a otáčivou rychlostí motoru ω .

$$u_k = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + e \quad (1)$$

$$u_e = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt} \quad (2)$$

$$M - M_Z = J_C \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

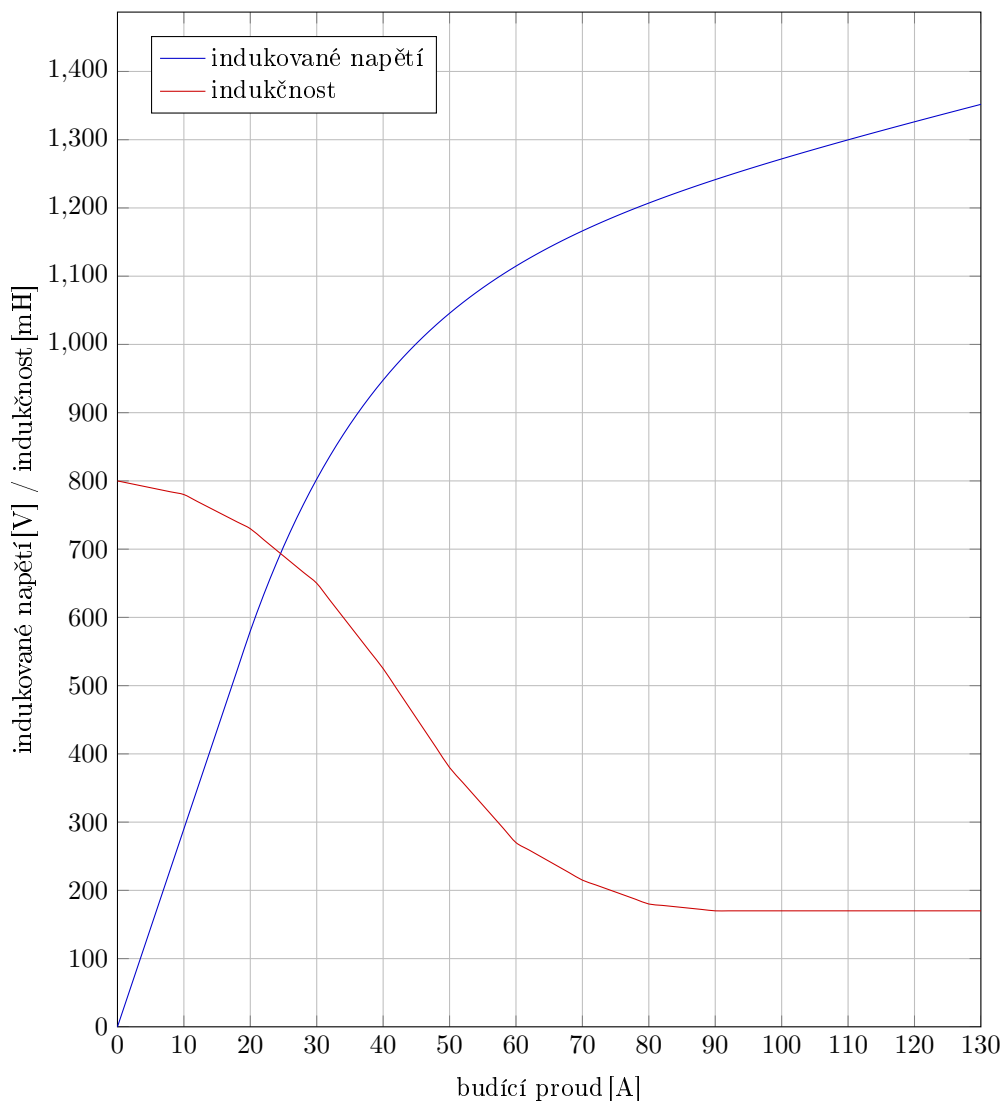
$$e = kC\phi\omega \quad (4)$$

$$M = kC\phi i_k \quad (5)$$

$$\phi = f(i_e) \quad (6)$$

Veličina C v rovnicích (4) a (5) není konstantou, záleží na magnetizační charakteristice a na velikosti budícího proudu. Konstanta k je závislá na konstrukčních veličinách motoru. Moment zátěžný je určen v části o modelu vlaku.

Funkce $f(i_e)$ je magnetizační charakteristika magnetického obvodu vyjadřující nelinearitu mezi budícím proudem a magnetickým tokem. Magnetizační charakteristika má hysterezní charakter, který bude v rámci zjednodušení modelu zanedbán. Magnetizační charakteristika motoru 1AL4542FiR využívaného v rozbírané lokomotivě je na obrázku 9 a vychází z (Šk, 2010).



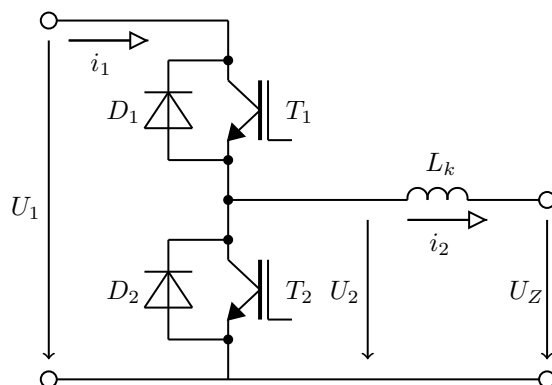
Obrázek 9: Magnetizační charakteristika motoru 1AL4542FiR.

Kotva stejnosměrného stroje se při zatížení jeví jako cívka, jež je protékána stejnosměrným proudem. Způsobený magnetický tok kotvy působí na magnetický tok budícího vinutí a posouvá neutrální osu stroje. Tento jev se nazývá reakce kotvy. Negativní důsledky lze účinně odstranit přidáním kompenzačního vinutí a dalšími konstrukčními úpravami strojů. Zmíněný motor je velmi precizně vyráběný, proto je reakce kotvy zanedbatelná.

V lokomotivě Škoda 71Em jsou zapojeny dva stejnosměrné cize buzené motory sériově. Vinutí jednotlivých motorů na sebe působí zanedbatelnou vzájemnou indukčností, proto zapojení matematický model nemění, je nutno pouze započítat příslušné parametry dvakrát. (Pavelka – Zděnek, 2010; Voženílek a kol., 2011, s. 66–67, s. 25–29)

3.8.2 Model stejnosměrných měničů napětí

Měniče, nazývány též pulsní měniče, či choppers mění vstupní konstantní stejnosměrné napětí U_1 na výstupní proměnné stejnosměrné napětí U_{2AV} . Obvodové schéma dvoukvadrantového měniče využitého pro regulaci napětí u_k je na obrázku 10.



Obrázek 10: Obvodové schéma dvoukvadrantového pulsního měniče.

Dvojice tranzistorů T_1 a T_2 s příslušnými diodami umožňuje průtok proudu v obou směrech. Pro analýzu funkce měniče lze tranzistory nahradit spínači.

Při práci ve snižovacím režimu ($U_1 > U_2$) je po dobu t_{T1on} otevřen tranzistor T_1 a protéká jím proud do zátěže (obvod kotvy, obvod buzení). Po vypnutí tranzistoru prochází proud i_2 přes zpětnou diodu D_2 . Po uplynutí periody T se tranzistor opět otevře. Pro střední hodnotu výstupního napětí $U_{2(AV)}$ platí vztah (7), kde a je poměrné otevření - střída pulsní šířkové modulace.

$$U_{2(AV)} = U_1 \frac{t_{T1on}}{T} = U_1 a \quad (7)$$

V rekuperačním režimu činnosti ($U_1 < U_2$) se stává indukované napětí na kotvě rotoru zdrojem energie. Sepnutím tranzistoru T_2 narůstá proud i_2 , tlumivka L akumuluje energii. Po vypnutí T_2 tlumivka L indukuje napětí, které je přičteno k napětí na kotvě. Pokud napětí přesahuje U_1 , je přes zpětnou diodu D_1 dodána energie nahromaděná v tlumivce. Zdroj na straně U_1 musí být schopen dodanou energii přijmout. O přijetí energie se stará v lokomotivě Škoda 71Em brzdový měnič. Lze rekuperovat zpět do sítě, mařit energii pomocí brzdového měniče na odporníku nebo kombinovat. Regulator brzdového a vstupního měniče rozhoduje na základě aktuálního lokálního napětí sítě. Pro napětí na výstupu měniče platí v případě rekuperačního režimu vztah (8).

$$U_{2(AV)} = U_1 \frac{t_{T1off}}{T} = U_1 (1 - a) \quad (8)$$

V kotevním obvodu jsou zapojeny dva dvoukvadrantové měniče paralelně pracující v protifázi, čímž dochází k vyhlazení proudu protékajícím kotvou.

Pro napájení budícího obvodu je využit čtyřkvadrantový měnič, který vznikne zapojením zátěže mezi dva dvoukvadrantové měniče. Čtyřkvadrantový měnič umožňuje reverzaci výstupního napětí, čímž lze docílit změny směru otáčení motoru.

Statický přenos měniče je lineární, zesílení vyplývá z rovnice (7). Reakce na požadavek změny střídý ovšem není okamžitá. Časové zpoždění τ se pohybuje mezi nulou a maximální dobou mezi pulzy PWM modulátoru danou vzorcem (9). Frekvence pulsní šířkové modulace měničů v probíraném pohonu je 300 Hz.

$$\tau = \frac{1}{2f} = 1,6 \text{ ms} \quad (9)$$

Výsledný přenos stejnosměrného měniče napětí je:

$$G = \frac{a}{1 + \tau} \quad (10)$$

Další součásti pohonu na obrázku 4 nejsou součástí požadované simulace, proto nebudou podrobněji rozbírány. (Pavelka – Zděnek, 2010, s. 72–76)

3.8.3 Model vlaku

Pohybová rovnice vlaku (11) je sestavena pro hmotný bod hmotnosti m v těžišti vlaku a složena ze síly tažné F_t [N], urychlující síla působící na vlak F_a [N] a síly způsobené trakčními odpory F_o [N].

$$F_t \pm F_a - F_o = 0 \quad (11)$$

Tažná síla je dána aktuálním stavem a charakteristikou hnacího vozidla. Vychází z matematického modelu motoru a následného převodu při přenosu na soukolí. Mezi tažnou silou a momentem motoru platí vztah (12), kde p je převod mezi motorem a soukolím, D je průměr kola a η je účinnost převodovky.

$$F_t = \frac{pM}{\pi D} \eta \quad (12)$$

Trakční odpory lze rozdělit na:

- Vozidlové odpory a síly, zahrnující všechny složky mechanických odporů. Tyto odpory jsou způsobeny smykovým a valivým třením pohybujících se částí a třením o vzduch, dále setrvačnými silami, silami vyvozenými točivými momenty trakčních motorů a síly brzdné, pokud jejich výslednice působí proti směru jízdy.
- Traťové odpory a síly způsobené spádovými a směrovými změnami koleje.

Pro výpočet jízdního odporu, závislého na druhu vozidla a rychlosti jízdy je využito empirických vzorců pro měrný odpor p_o připadající na 1 kN tíhy vozidla. Ve vzorcích je zahrnuto konstantní smykové tření v ložiskách, valivé tření lineárně závislé na rychlosti a tření o vzduch kvadraticky závislé na rychlosti. V tabulce 3 jsou uvedeny různé vzorce v závislosti na typech vlakových souprav. Rychlost je dosazována v km/h.

druh vlaku	hmotnost [t]	jízdní odpor [N/kN]
nákladní z plně ložených dvounápravových vozů	1000 až 1500	$p_0 = 1,8 + 0,03 \frac{v}{10} + 0,018 \left(\frac{v}{10}\right)^2$
nákladní z plně ložených čtyřnápravových vozů	1000 až 1500	$p_0 = 1,4 + 0,003 \left(\frac{v}{10}\right)^2$
osobní ze čtyřnápravových vozů, 2/3 obsazených	500 až 720	$p_0 = 1,35 + 0,08 \frac{v}{10} + 0,033 \left(\frac{v}{10}\right)^2$
elektrická lokomotiva s podvozky typu Bo'Bo'	80	$p_0 = 5 + 0,0524 \left(\frac{v+12}{10}\right)^2$

Tabulka 3: Jízdní odpory vlakových souprav.

Při jízdě do stoupání přistupuje k jízdním odporům také složka odporu sklonu trati. Pro měrný odpor sklonu trati p_s [N/kN] platí vzorec (13), ve kterém lze pro malé sklony nahradit \sin za \tan a značně zjednodušit výpočet.

$$p_s = 1000 \sin(\pm\alpha) \approx 1000 \tan(\alpha) = \frac{h}{l} \quad [\text{m/km}] = s \quad [\%] \quad (13)$$

Měrný odpor oblouku p_r je nepřímo závislý na poloměru oblouku a je dán vztahem (14), kde r je poloměr oblouku.

$$p_r = \frac{650}{r - 55} \quad (14)$$

Tři výše uvedené poměrné odpory tvoří společně sílu trakčních odporů F_o , danou vztahem (15).

$$F_o = (p_o + p_r + p_s)mg \quad [\text{N}] \quad (15)$$

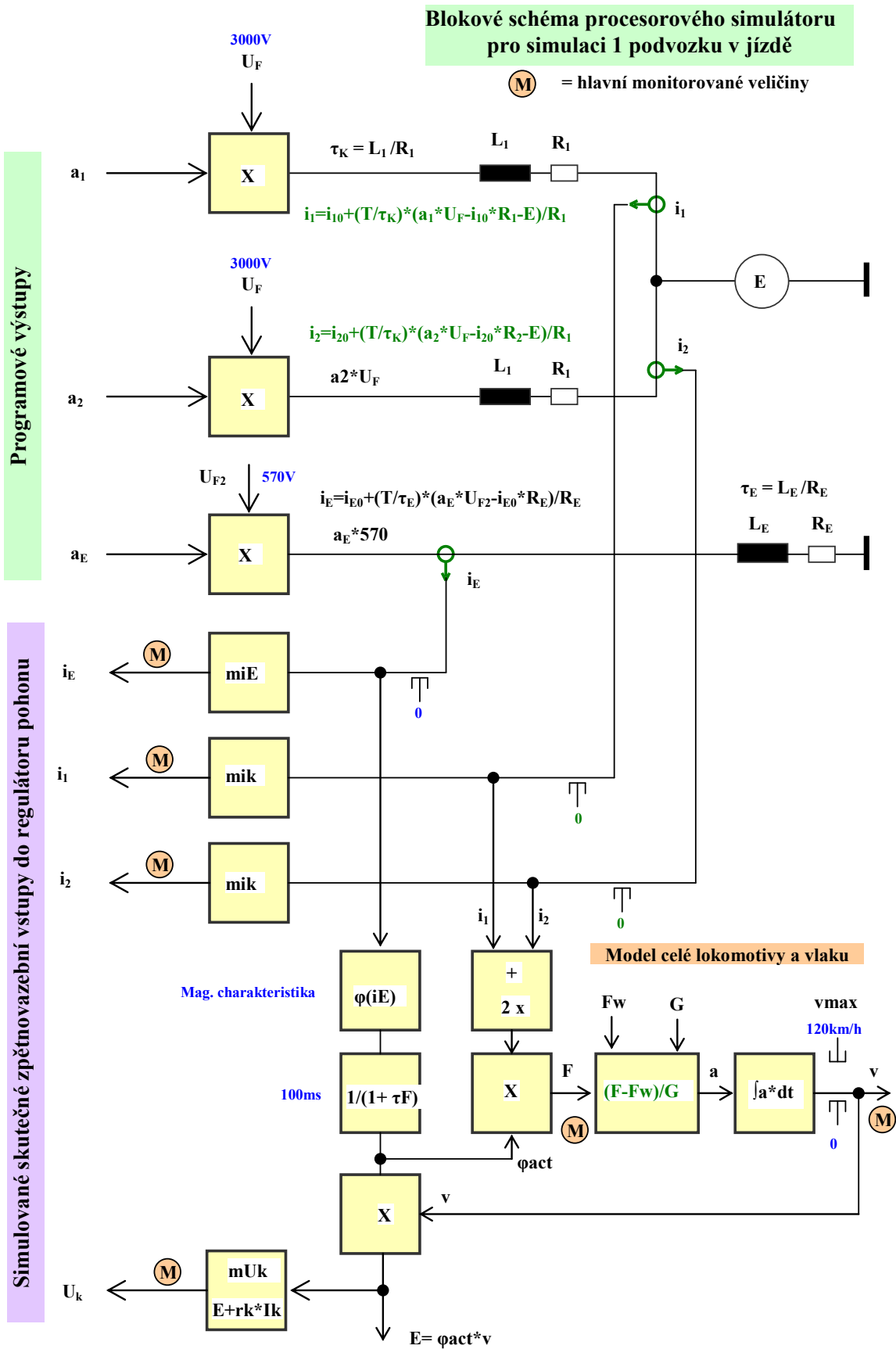
Brzdná síla mechanických brzd je modelována pouze zvýšením smykového tření v ložiskách u příslušného typu vlaku a není uvažován případný skluz.

Při pohybu kolejového vozidla se tažnou nebo brzdou silou narušuje ve styčné ploše mezi kolem a kolejnicí statické tření a dochází k rozdílu mezi obvodovou rychlostí kola a rychlostí vozidla. Nastává adhezní skluz, který je užitečný v případě zvyšující se tečné síly zároveň se skluzem. Překoná-li však velikost skluzu mez adheze např. změnou tažné síly nebo zmenšením součinitele tření, nastane neúčinný skluz a tečná síla značně klesá. Užitečný skluz a mez adheze se mění s rychlostí, ovšem nelineárně a nepravidelně. Nereagování na neúčinný skluz vede k mimořádnému mechanickému namáhání všech členů zajišťujících přenos momentu a může vést k jejich zničení. V rámci této práce není požadováno modelování skluzu, proto není skluz v modelu zohledněn. (Jansa, 1980, s. 28–54)

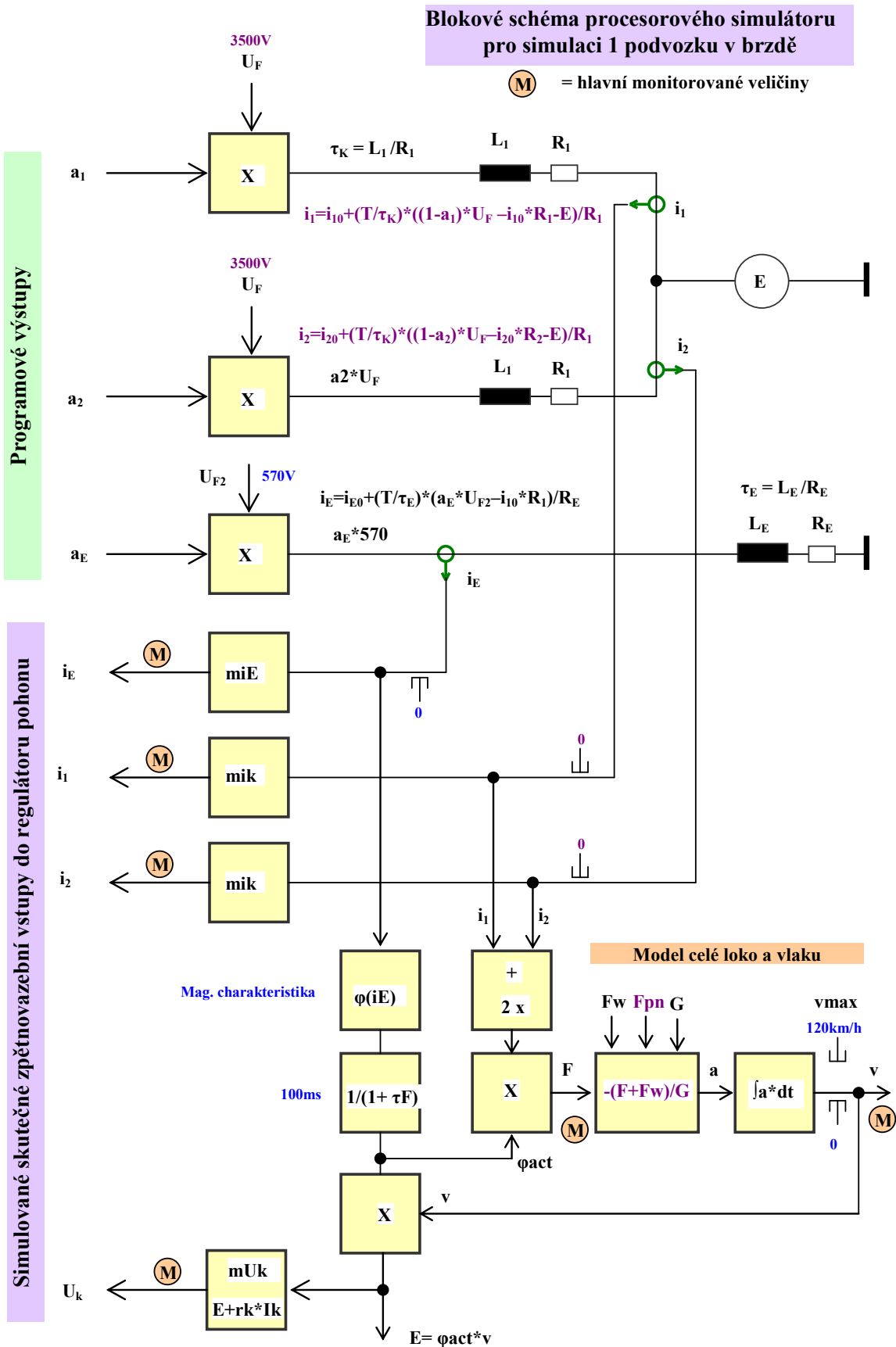
3.8.4 Simulační schéma

Z výše uvedených modelů lze sestavit celkové simulační schéma pohonu. Při znalosti parametrů všech komponentů lze po úvaze schéma zanedbáním částí zjednodušit a usnadnit simulační výpočet, či naopak doplnit model o poznatky získané měřeními a zkušenostmi. Schéma pro simulaci jednoho podvozku lokomotivy Škoda 71Em v jízdě a brzdě je na obrázku 11 a 12. Indukčnost kotvy motoru je přibližně 5 % z indukčnosti vyhlazovacích tlumivek, proto bude její vliv na výsledný průběh proudu minimální a je i s odporem kotvy zahrnuta v L_1 a R_1 . Je přidáno zpoždění 100 ms mezi budícím proudem a magnetickým tokem vycházející z měření. Zpoždění měničů lze zanedbat vzhledem k jejich pracovní frekvenci. Celkovou tažnou sílu je nutno vynásobit při implementaci simulátoru dvěma, jelikož druhý podvozek se bude chovat téměř identicky jako simulovaný.

Při výběhu je vlak brzděn pouze trakčními odpory, simulační schéma zůstává stejné jako při jízdě. V režimu doplňování platí schéma pro brzdění. Ze simulačních schémat vychází implementace simulátoru. (Šk, 2009a)



Obrázek 11: Blokové schéma pro simulaci jednoho podvozku v jízdě.



Obrázek 12: Blokové schéma pro simulaci jednoho podvozku v brzdě.

3.9 Poměrné jednotky

V technické praxi, zejména v matematických modelech a regulátorech jsou často rovnice upraveny ze soustavy absolutních jednotek do soustavy takzvaných poměrných jednotek. Tato úprava má výhodu v porovnatelnosti výsledků pro různá výkonově odlišná zařízení. V mnoha případech dochází také k formálnímu zjednodušení vztahů. V regulační technice má užívání poměrných jednotek dopad na řádově shodné hodnoty parametrů regulátorů.

Vlastní převod rovnice z absolutních hodnot do poměrných probíhá snadno vydělením rovnice v absolutních jednotkách vztažnou jednotkou. Pro příklad lze uvést konverzi rovnice kotevního obvodu cize buzeného motoru.

$$u_k = R_d i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + e \quad (16)$$

Zvolená vztažná hodnota je jmenovité napětí U_{kN} a jmenovitý proud I_{kN} , proto jsou všechny členy vyděleny jmenovitým napětím U_{kN} .

$$\frac{u_k}{U_{kN}} = \frac{R_k i_k}{U_{kN}} + \frac{L_k \frac{di_k}{dt}}{U_{kN}} + \frac{e}{U_{kN}} \quad (17)$$

V podělené rovnici se nachází odpor R_k , indukčnost L_k a proud kotevního obvodu i_k pro něž využijeme následujících vztahů pro impedanci a reaktanci.

$$Z_{kN} = \frac{U_{kN}}{I_{kN}} \Rightarrow U_{kN} = Z_{kN} I_{kN}; \quad X_k = \omega_N L_k \Rightarrow L_k = \frac{X_k}{\omega_N} \quad (18)$$

Po dosazení do (17) získává rovnice tvar (19).

$$\frac{u_k}{U_{kN}} = \frac{R_k}{Z_{kN}} \frac{i_k}{I_{kN}} + \frac{\omega_N L_k}{Z_{kN}} \frac{d \frac{i_k}{I_{kN}}}{\omega_N dt} + \frac{e}{U_{kN}} \quad (19)$$

Nyní lze zavést poměrné hodnoty veličin, definovaných následujícími vztahy.

$$i_{kP} = \frac{i_k}{I_{kN}} \quad \text{poměrný proud kotvy} \quad (20)$$

$$u_{kP} = \frac{u_k}{U_{kN}} \quad \text{poměrné napájecí napětí} \quad (21)$$

$$e_{kP} = \frac{e}{U_{kN}} \quad \text{poměrné indukované napětí} \quad (22)$$

$$r_{kP} = \frac{R_k}{Z_{kN}} \quad \text{poměrný odpor} \quad (23)$$

$$x_{kP} = \frac{X_k}{Z_{kN}} = \frac{\omega_N L_k}{Z_{kN}} \quad \text{poměrná reaktance} \quad (24)$$

Po dosazení nových veličin do rovnice (19) přejde na tvar (25), ve kterém se vyskytují bezrozměrné jednotky vyjma času t .

$$u_{kP} = r_{kP} i_{kP} + \frac{x_{kP}}{\omega_N} \frac{di_{kP}}{dt} + e_{kP} \quad (25)$$

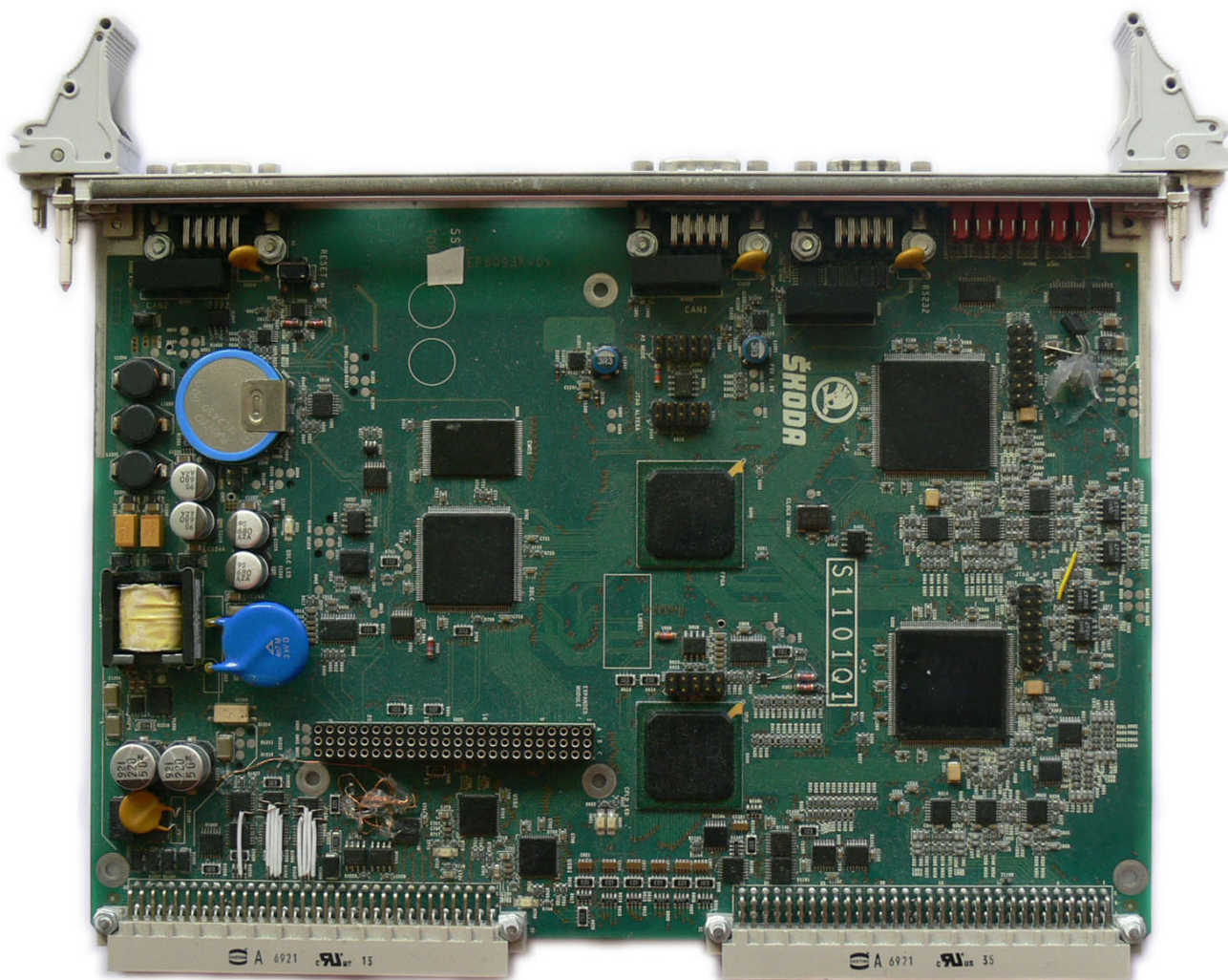
Hodnoty zavedených veličin (20) až (24) se pohybují v rozmezí mezi 0 a 1. V programátorské praxi je pro reprezentaci poměrných hodnot využít rozsah celého čísla, čímž je při celočíselných výpočtech zlepšena přesnost výsledku. (Pavelka – Zděnek, 2010, s. 171–172)

4 Implementace pro konkrétní řídicí jednotku

Před konkrétním zadáním proběhla s odborníky ze společnosti Škoda Electric a. s. diskuse ohledně vhodné realizace simulátoru. Po zvážení všech aspektů hardwarového a softwarového simulátoru byla vybrána softwarová varianta. Rozhodujícím faktorem byla náročnost zpracování dostatečně univerzálního hardwarového simulátoru, který by splnil požadavky na množství různých druhů metalických a optických rozhraní. Dalším významným argumentem pro softwarové řešení byla značná rezerva výpočetního výkonu v řídicích jednotkách Škody Electric a. s., která umožňuje bezproblémové zařazení simulátoru běžícího paralelně se všemi stávajícími úlohami.

4.1 Dostupný hardware

Pro implementaci simulátoru byla zvolena existující již nasazená řídicí jednotka regulátoru S1101Q1, která je součástí řízení lokomotiv Škoda 71Em a stará se o dynamiku pohonu jednoho podvozku. Jak již bylo zmíněno v části 3.3, v lokomotivě jsou tyto jednotky dvě a jsou podřazeny regulátorům vyšší úrovně. Samotné desky jsou součástí stavebnicového systému, který umožňuje univerzálnější využití regulátoru.



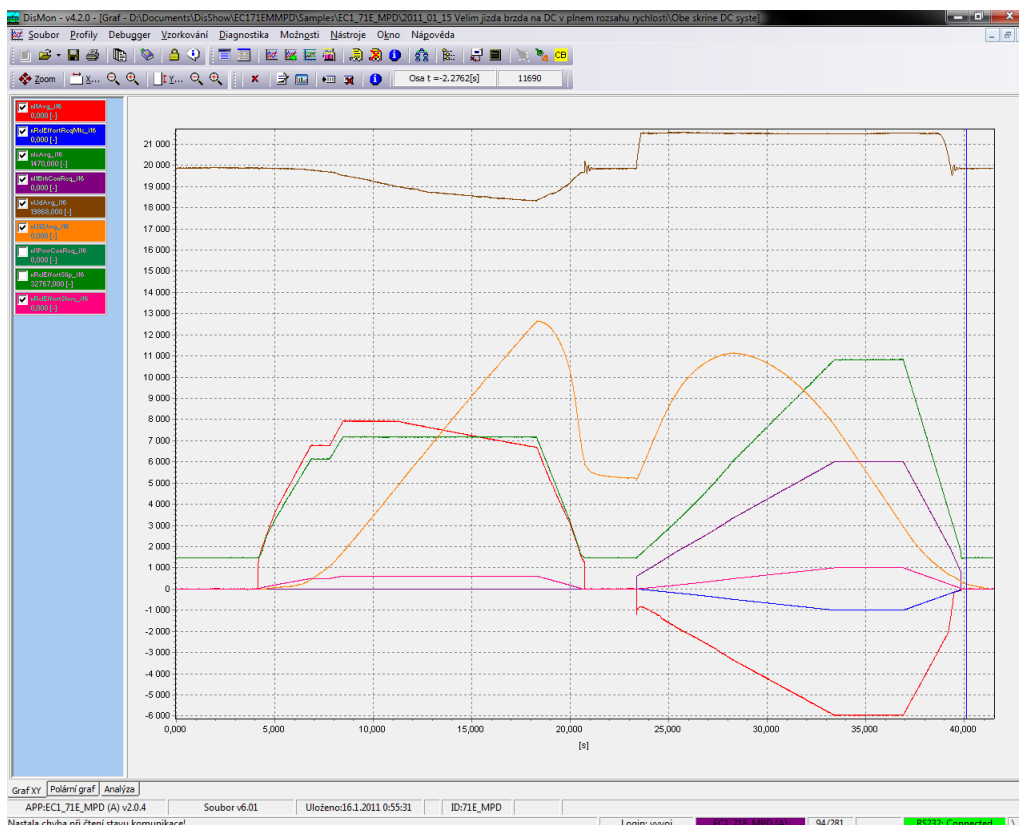
Obrázek 13: Fotografie řídicí jednotky S1101Q1.

Deska regulátoru obsahuje dva signálové procesory TMS320F28335 od firmy Texas Instruments (TI) s taktovací frekvencí 150 MHz. Jeden je určen primárně k regulaci, druhý je podpůrný, obsluhující komunikace. Procesory jsou 32-bitové s floating-point jednotkou a jsou určeny k řízení v real-time aplikacích. Obsahují řadu standardizovaných rozhraní (CAN, SPI, I2C, SCI), 16kanálový 12bitový AD převodník, 18× PWM, 6kanálové DMA. Ke každému procesoru je připojena rychlá RAM paměť a hradlové pole, přes které přistupují ke komunikačním rozhraním. (TI, 2012)

4.2 Vývojové a monitorovací nástroje

Návrh procesoru od TI je optimalizován pro C/C++ a Assembler a pro vývoj je doporučeno vývojové prostředí Code Composer Studio (CCS) s překladačem C2000 od stejnojmenné firmy. Řídicí software je naprogramován většinou v jazyce C s časově a výpočetně kritickými částmi v Assembleru. Pro vývoj bylo využito doporučených nástrojů, proto je zvoleno identické prostředí a překladač pro začlenění simulátoru.

Pro nahrávání programu do procesoru a následné ladění je využit vývojový a monitorovací nástroj DisMon společnosti Škoda Electric, není tedy možné provádět ladění přímo v kódu. Nahrávání probíhá přes galvanicky oddělenou servisní sériovou linku, přivedenou dle aktuálního nastavení kabelu ke konkrétnímu procesoru. Tímto spojením lze také přenášet hodnoty mapovaných proměnných a následně textově či graficky zobrazit. Přes monitorovací program je možno snadno ovládat pohon a sledovat výstupní hodnoty a grafy. Náhled DisMonu je na obrázku 14.



Obrázek 14: Náhled vývojového a monitorovacího nástroje DisMon.

4.3 Implementace regulátoru

Na programování real-time systémů pro řízení vozidel jsou kladeny vysoké bezpečnostní nároky. Systému musí vždy fungovat bezpečnostní mechanismy a musí se chovat předvídatelně i v kritických situacích.

Procesor pro realizaci simulátoru periodicky spouští tři různé smyčky s odlišnou periodou. Nejrychlejší má periodu 1,6 ms a největší prioritu. Stará se o rychlé měření a zpětnovazební regulaci. Další smyčky s větší periodou provádějí bezpečnostní kontroly a další operace s nižší prioritou.

Všechny řídicí mechanismy s výhodou zajišťují stavové automaty, které mají definované přechody mezi stavy a chovají se předvídatelně. Zpětnovazební regulátor je také realizován stavovým automatem se stavy probranými v části 3.5, ze kterých vychází také implementace simulátoru.

4.4 Implementace simulátoru

Procesor, vykonávající regulační a simulační výpočty má 32bitovou float-point jednotku, proto je možné pro vlastní výpočet využít čísla s plovoucí řádovou čárkou základní přesnosti normy IEEE 754 a rovnice s absolutními jednotkami, nebo poměrné jednotky a počty převážně v celých číslech. Byla zvolena první varianta.

Základním stavebním kamenem simulátoru je stavový automat který kopíruje aktuální stav zpětnovazebního regulátoru. Dle požadovaného stavu simulátoru jsou voleny rovnice, pro předpočítání stavových veličin pro další periodu.

4.4.1 Stavový automat

Implementace stavového automatu je rozdělena na část společnou, vykonávanou nezávisle na stavu automatu a na část specifickou pro aktuální stav.

Při obsluze stavového automatu je zavolána procedura obsluhující start stavového automatu, v tomto případě využita pouze pro načtení stavu regulátoru. Dále je na základě načteného stavu zavolána příslušná výpočetní procedura. Po skončení výpočtů nastává opět společná část, ve které jsou data korektně zkonvertována a připravena na přenos do vstupu regulátoru.

Posloupnost volání a rozhodování dle stavu je pro přehlednost implementována pomocí makra, které zavolá příslušné metody ve správném pořadí.

4.4.2 Řešené rovnice

Řešené rovnice pro příslušné stavy vycházejí ze simulačních schémat v části 3.8.4. Poměrné otevření a_1 , a_2 a a_e jsou čteny z výstupních proměnných regulátoru a příslušně přepočteny.

Nejprve je proveden výpočet středních hodnot napětí výstupů měničů. Efekt těchto hodnot je připočten v rovnicích pro budící proud a proud kotvou. Při výpočtu kotevního proudu je zohledněno indukované napětí z minulého cyklu simulátoru. Dále je proveden výpočet aktuálního magnetického toku z budícího proudu se zohledněním zpoždovacího členu prvního řádu. Indukované napětí kotev pro další krok je získáno s využitím aktuálního magnetického toku, aktuální rychlosti a aktuálního kotevního proudu. Tažná síla je vypočtena z aktuálního magnetického toku, proudu kotev a vynásobena převodem a účinníkem. Následně jsou vypočteny trakční odpory a síla mechanické brzdy. Síly po odečtení tvoří zrychlení, které je integrováno ve výslednou rychlost.

4.4.3 Magnetizační charakteristika

Magnetizační charakteristika je v programu reprezentována pomocí pole o 64 prvcích a při výpočtu požadovaného indukovaného napětí kotvy je využita lineární aproximace mezi dvěma nejbližšími prvky pole.

4.4.4 Zprovoznění regulátoru

Jednou z obtížnějších částí implementace je ošetření chybových stavů vzniklých vypojením desky ze skříně. Ošetření hardwarových ochran je nutno zajistit pomocí připojeného konektoru emulujícího zapojení ve skříní.

Zprovoznění zpětnovazebního regulátoru vyžadovalo ošetření všech požadavků na přechod do stavu blok. Tyto přechody jsou nyní podmíněny bitem kontrolního slova simulačního asistenta. Pro ovládání jsou podmíněně přepisovány hodnoty kontrolního slova a poměrného tahu z nadřazeného řízení.

4.5 Simulační asistent

Vzhledem k mnohým požadavkům a zdlouhavým procesům při manuálním rozběhu regulátoru je naprogramován simulační asistent, který částečně nahrazuje úlohy vyšších vrstev řízení, ošetřuje chyby vzniklé chybějícím hardwarem a umožňuje pomocí jednoho kontrolního slova a zadaného poměrného tahu snadno ovládat virtuální pohyby simulovaného vlaku. Umožňuje také chod jednotky bez simulátoru nebo volbu paralelního běhu.

Kontrolní slovo má asistenta strukturu zobrazenou na obrázku 15 a popsanou v tabulce 4. Využito je pouze horních 8 bitů z 16, horní bity jsou zvoleny v důsledku zobrazení v monitorovacím programu.

15	14	13	12	11	10	9	8
ENABLE	START/RST	DIR1	DIR2			REPLCTRL	REPLAN

Obrázek 15: Struktura řídicího slova simulačního asistenta.

bit	název	popis
15	ENABLE	povoluje simulátor
14	START/RST	inicializuje a restartuje simulátor
13	DIR1	požadavek směru 1
12	DIR2	požadavek směru 2
9	REPLCTRL	povoluje přepis kontrolních hodnot
8	REPLAN	povoluje přepis naměřených hodnot hodnotami simulátoru
–	INIT VAL	výchozí hodnoty všech bitů jsou nulové

Tabulka 4: Význam bitů řídicího slova simulačního asistenta.

Bit START/RST se automaticky vrací do nulové hodnoty pro provedení inicializace simulátoru. Zapnutím bitu REPLACEAN dojde k vyřazení analogových vstupů jednotky a je přerušeno spojení s fyzickou soustavou. Zapnutím bitu REPLACECTRL dojde k nahrazení požadavků nadřazeného řízení

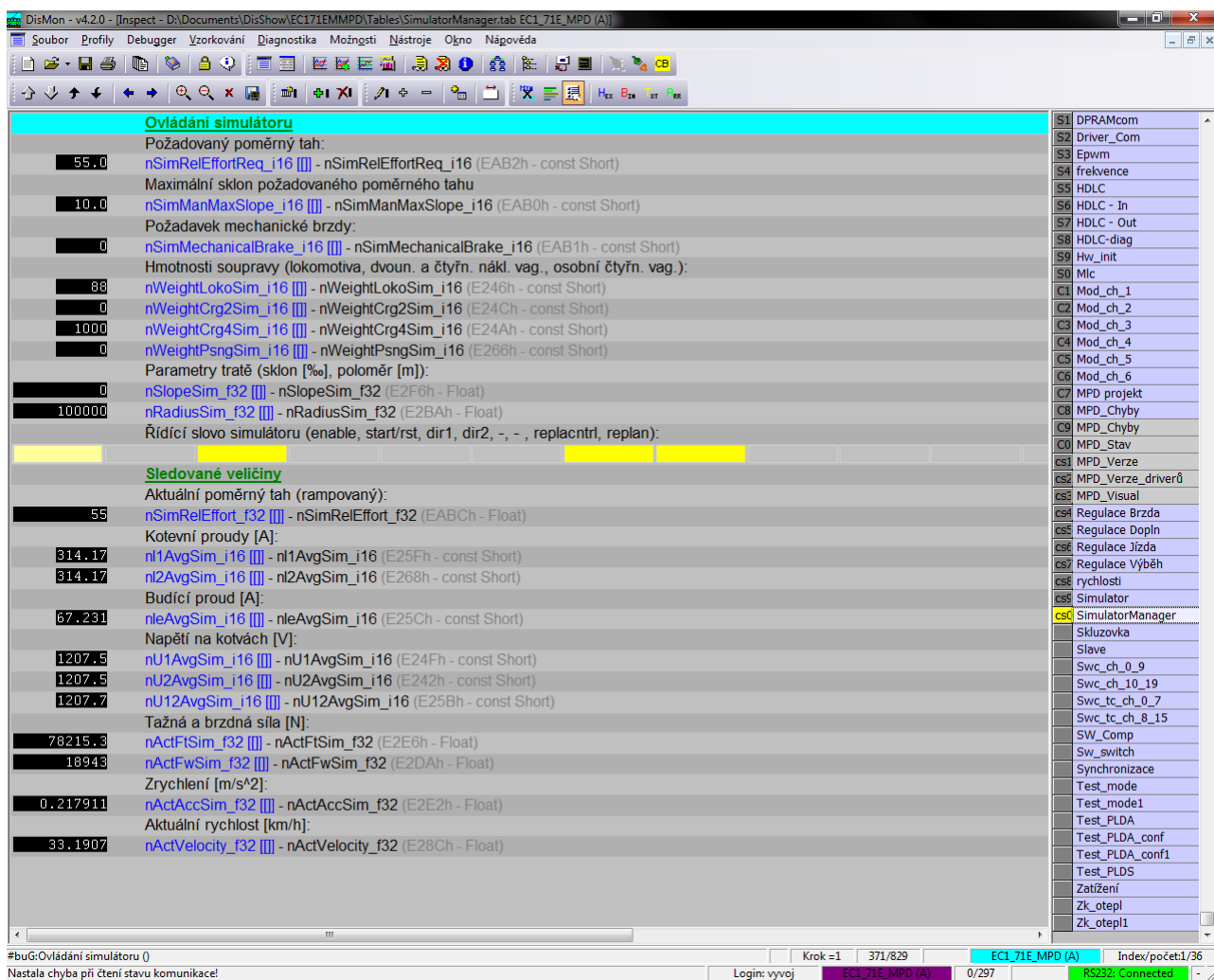
požadavky asistenta, proto jsou záměrně tyto bity odděleny. Pro spuštění simulátoru souběžně s řízením fyzického zařízení musí být bity nulové a počítané veličiny jsou pouze informativní.

Proměnnou požadovaného poměrného tahu lze zadat od -100 % do 100 %, asistent hodnotu zpracuje a vyhodnotí požadavek jízdy, brzdy nebo výběhu.

Dále je možné pomocí asistenta nastavit parametry vlaku a tratě. Vlak lze složit z lokomotivy a libovolné kombinace dvounápravových nákladních, čtyřnápravových nákladních a čtyřnápravových osobních vozů. Stačí zadat počet tun u požadovaného typu vozu a souprava je upravena. Výchozí nastavení je 88 t pro lokomotivu, 1500 t pro čtyřnápravové nákladní vozy. U tratě lze nastavit sklon [%o] a poloměr oblouku [m].

Mechanická brzda byla naimplementována pouze přidáním smykového tření. Parametrem mechanické brzdy je proměnná, která je dále vynásobena tíhou vozidla a přičtena k trakčním odporům.

Asistent je realizován pomocí jedné obrazovky DisMonu, kde jsou připraveny všechny potřebné kontrolní a zobrazované proměnné. Náhled je na obrázku 16.



Obrázek 16: Náhled obrazovky simulačního asistenta.

4.6 Ověření funkčnosti regulátoru a simulátoru

K implementaci byla vybrána jednotka již existující lokomotivy a existují záznamy ze zkoušky skutečného vozidla. Správnost simulátoru a modelu je ověřena porovnáním nasimulovaných průběhů s průběhy naměřenými na zkušebním okruhu. Pro ověření a následné úpravy modelu je vhodné provést také zkoušku přímo na vozidle. Program DisMon umožňuje přenos požadovaných veličin v reálném čase a pomocí obrazovky simulačního asistenta je možné simulátoru zadávat libovolné požadavky dle aktuálního stavu simulovaného pohonu.

4.7 Naměřené a nasimulované průběhy

Vybrané průběhy z ověřování regulátoru pro lokomotivu Škoda 71Em jsou podkladem pro ověření simulátoru. Na obrázcích 17 až 24 jsou průběhy dokumentující funkčnost simulátoru i regulátoru. U obrázků 18 až 23 je vždy vykreslen naměřený a poté nasimulovaný průběh. K dalším dvěma nejsou k dispozici podklady ze zkušebního okruhu. Simulované grafy obvykle trvají nepatrně déle oproti naměřeným, pravděpodobně v důsledku nepřesného modelu trakčních odporů, který je univerzální pro uspořádání podvozků lokomotivy, nikoli pro přesný typ.

Na obrázku 17 je průběh jízdy mezi stanicemi pro lokomotivu o hmotnosti 88 t s naloženými čtyřnápravovými nákladními vozy o hmotnosti 1000 t.

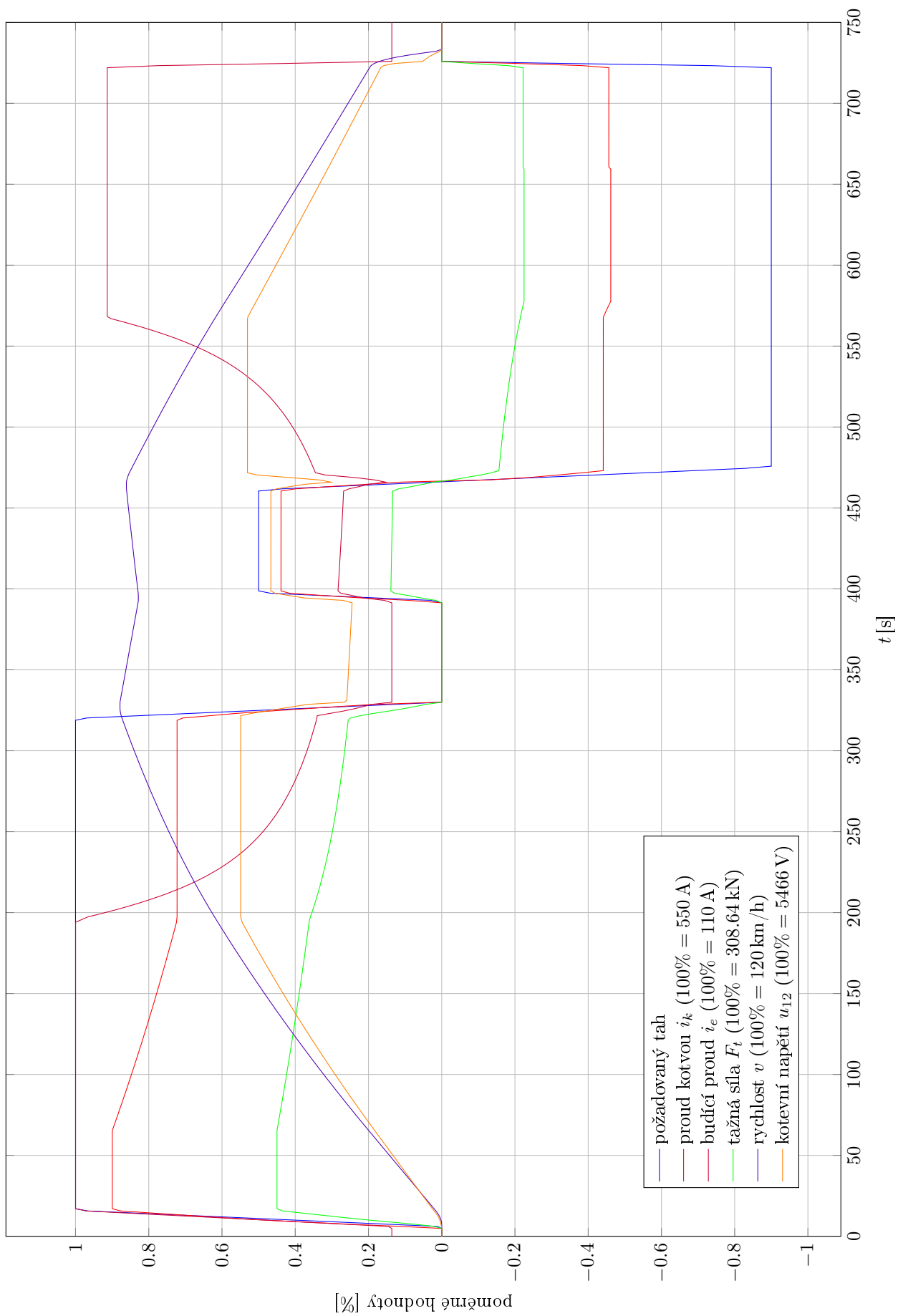
Další průběhy týkají již pouze samostatné lokomotivy bez zátěžových vozů. Na obrázku 18 a 19 je trakční a brzdová charakteristika lokomotivy 71Em v závislosti na čase pro plný rozsah provozní rychlosti. U simulovaného průběhu je odlišný průběh poměrného tahu v brzdě, který bylo obtížné pomocí asistenta nasimulovat. Přesto je viditelná shoda hodnot téměř po celou dobu simulace. Při brzdění skutečné lokomotivy omezuje nadřazené řízení požadovaný poměrný tah v závislosti na maximálním výkonu brzdy a stará o souběžné mechanické brzdění.

Další dva obrázky 20 a 21 zobrazují průběhy jízdy, výběhu a brzdy. Po přechodu do výběhu je vidět, že napětí na kotvách motorů je v simulaci menší než naměřené a rychleji se ustálí, což je důsledek zanedbání hystereze magnetizační charakteristiky motoru.

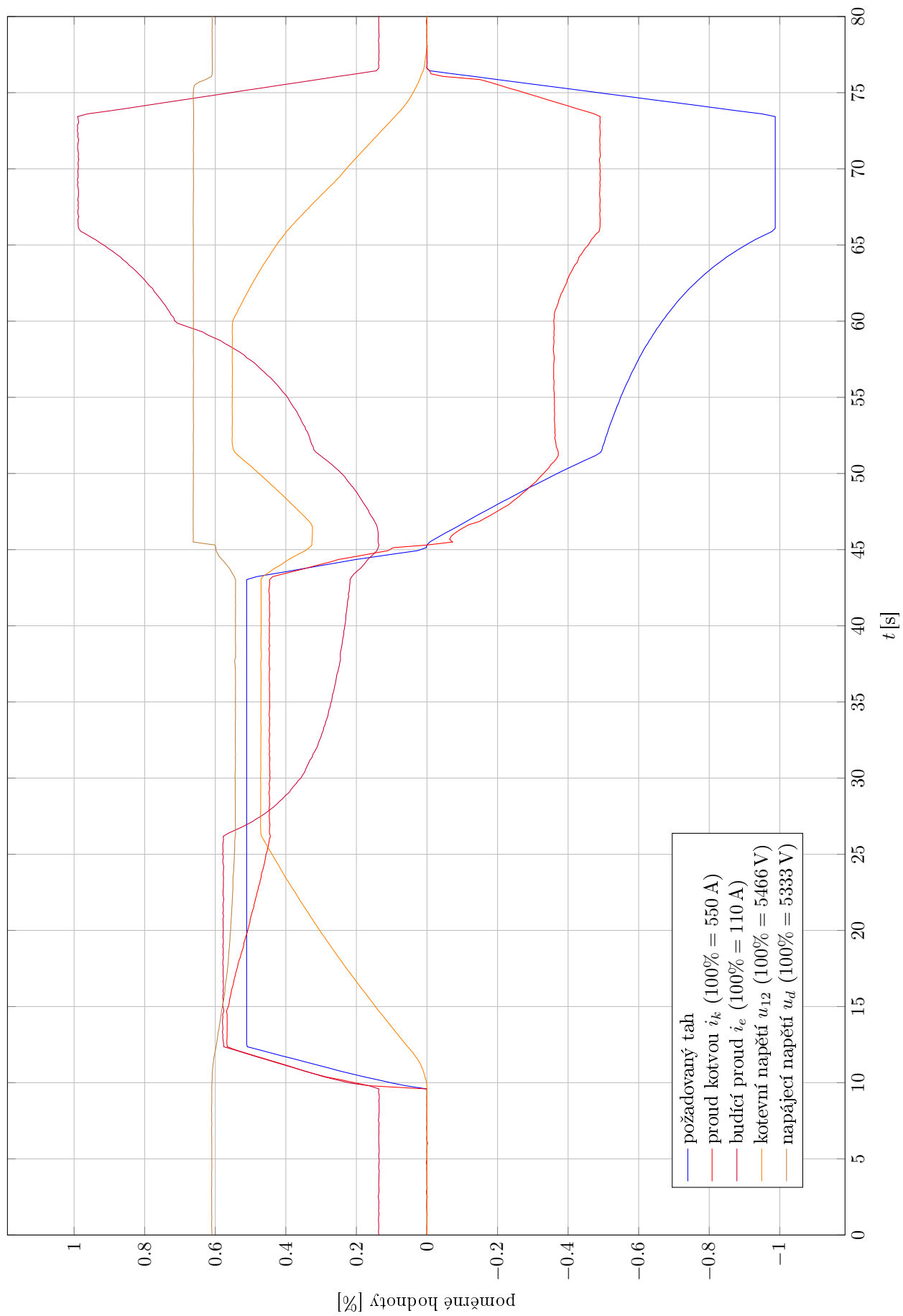
Obrázek 22 a 23 zobrazuje zrychlení lokomotivy z 80 km/h na 90 km/h. Naměřené a simulované průběhy jsou opět velmi podobné.

Častým testem regulátoru je také tzv. metoda "kvedlání", která je zobrazena na obrázku 24. Při ní dochází k častým změnám poměrného tahu.

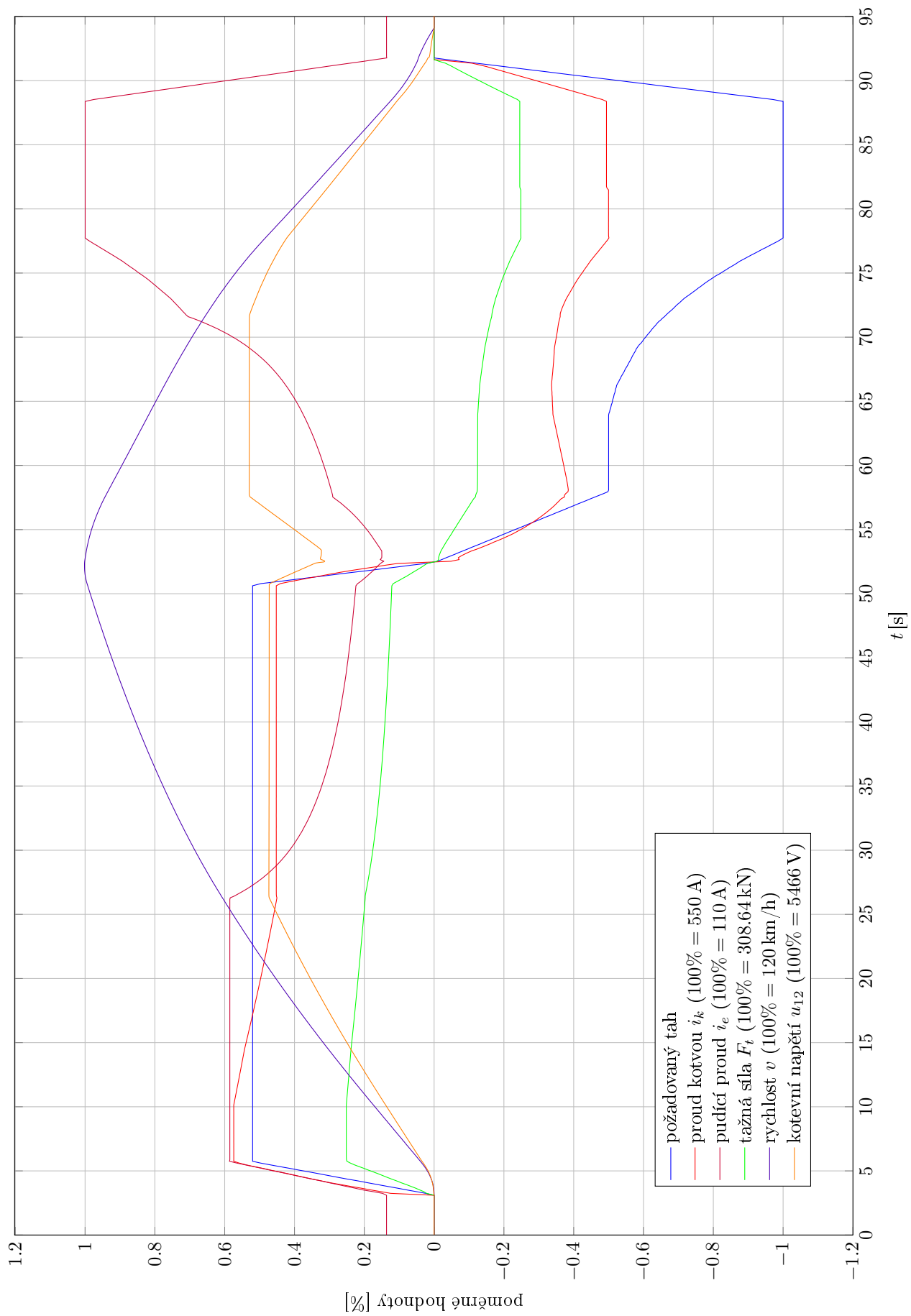
Při simulaci je předpokladem konstantní napájecí napětí U_d , které ve skutečnosti konstantní není. V naměřených grafech jsou vidět značné změny napětí závislé na lokálním odběru výkonu. Pro přesnější simulaci by bylo vhodné také tento jev zohlednit do modelu.



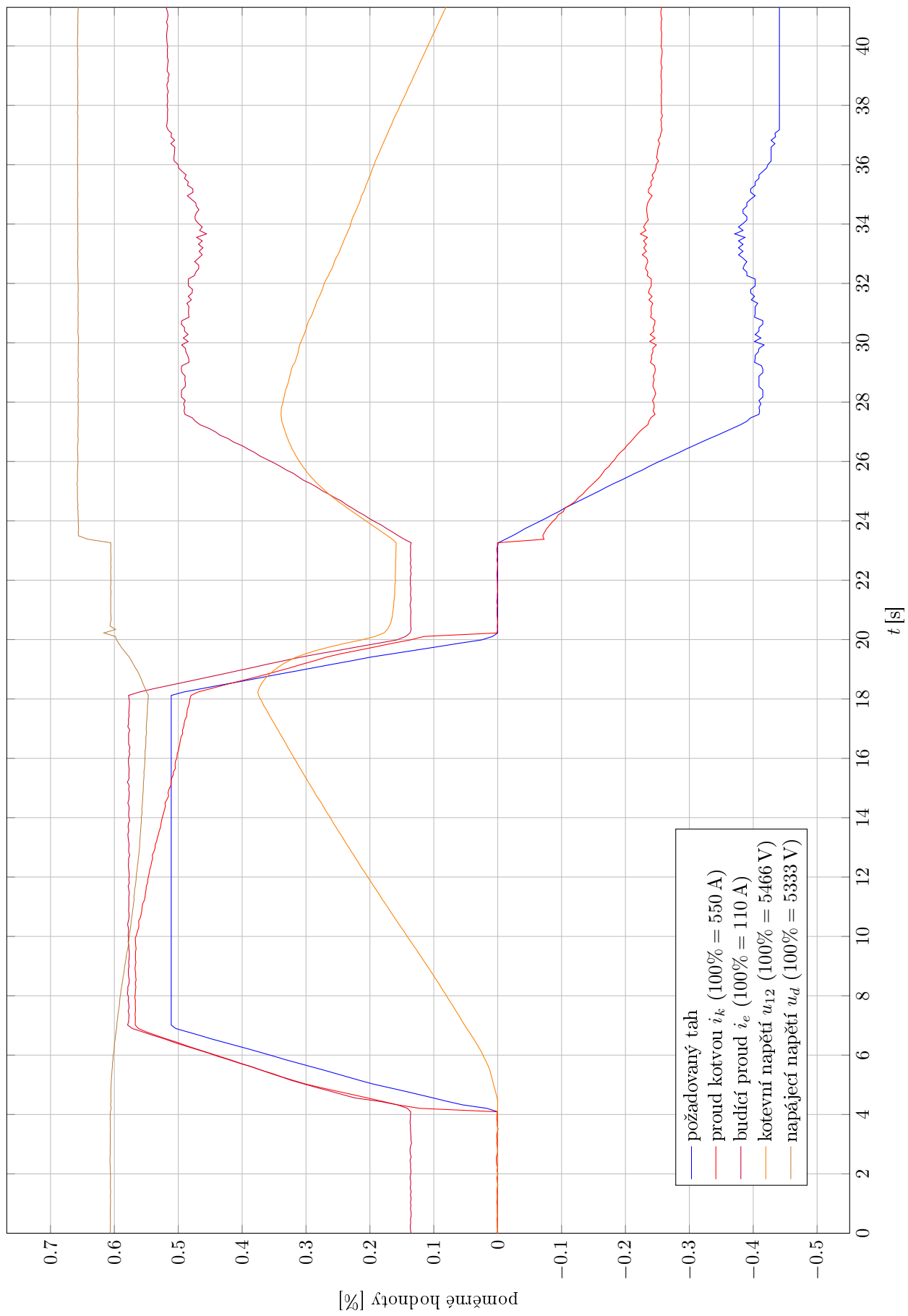
Obrázek 17: Nasimulovaný průběh pro jízdu vlaku složeného z lokomotivy o hmotnosti 88 t a naložených čtyřnápravových nákladních vozů o hmotnosti 1000 t



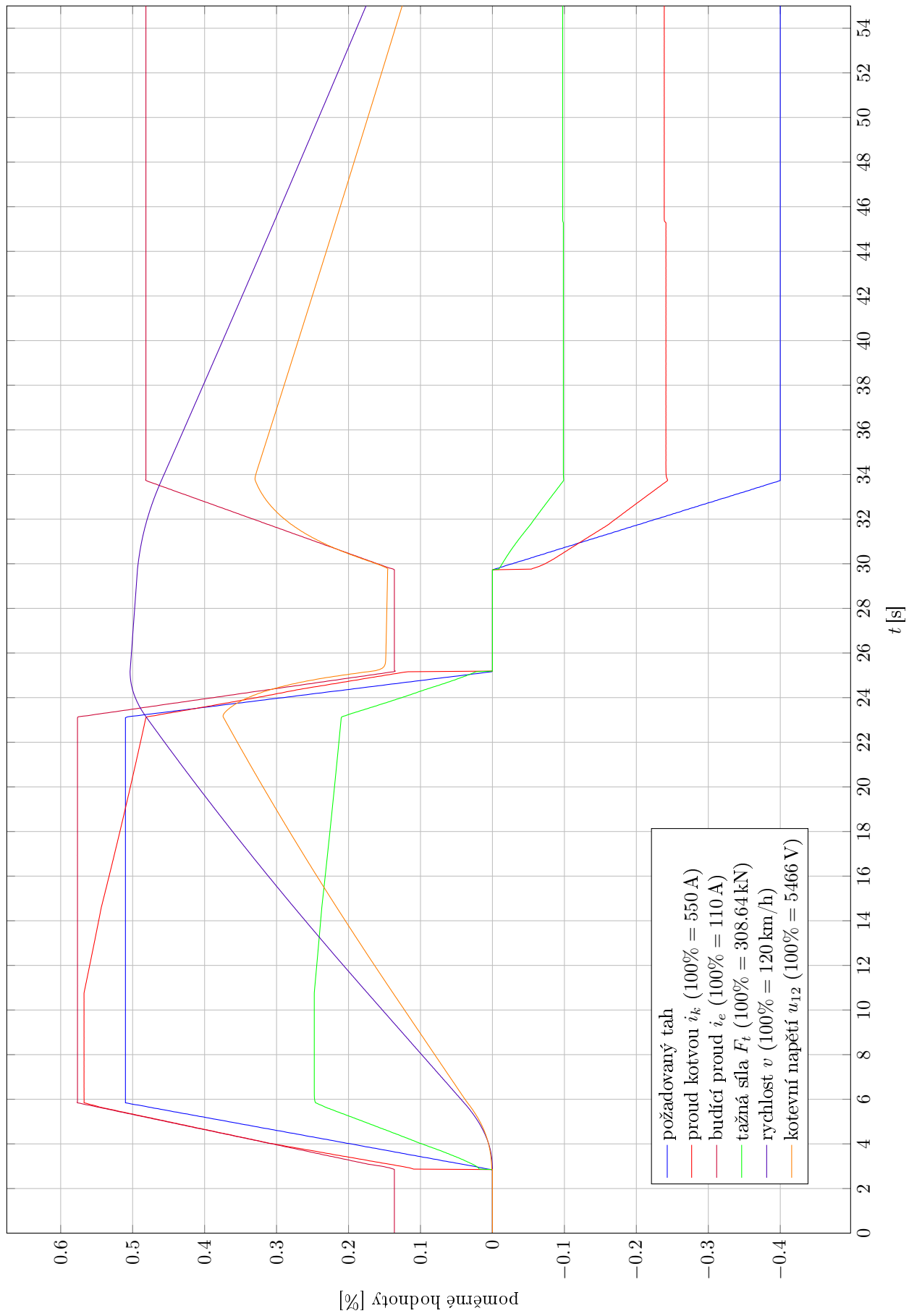
Obrázek 18: Naměřené trakční a brzdivé charakteristiky v závislosti na čase



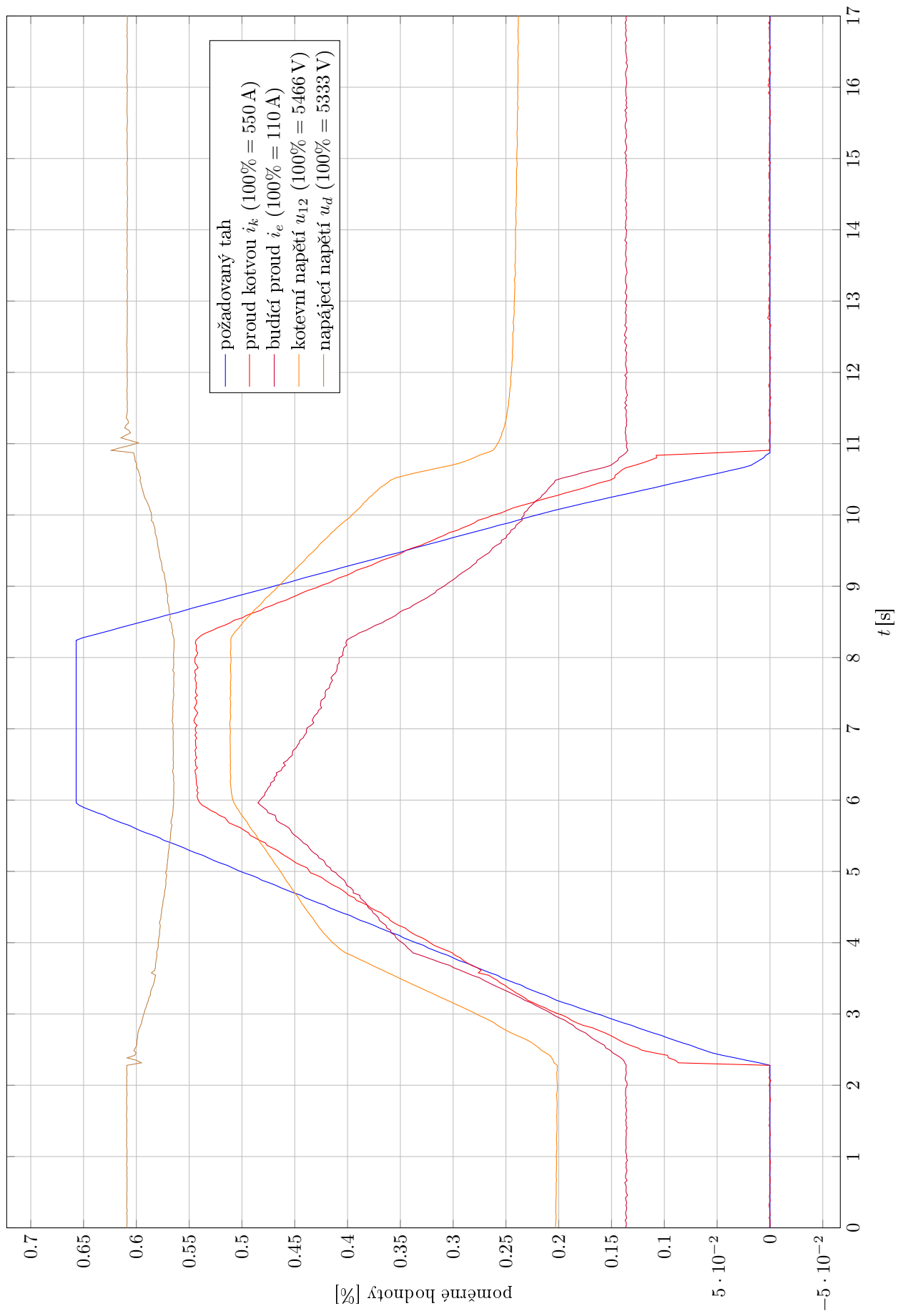
Obrázek 19: Nasimulované trakční a brzdomé charakteristiky v závislosti na čase



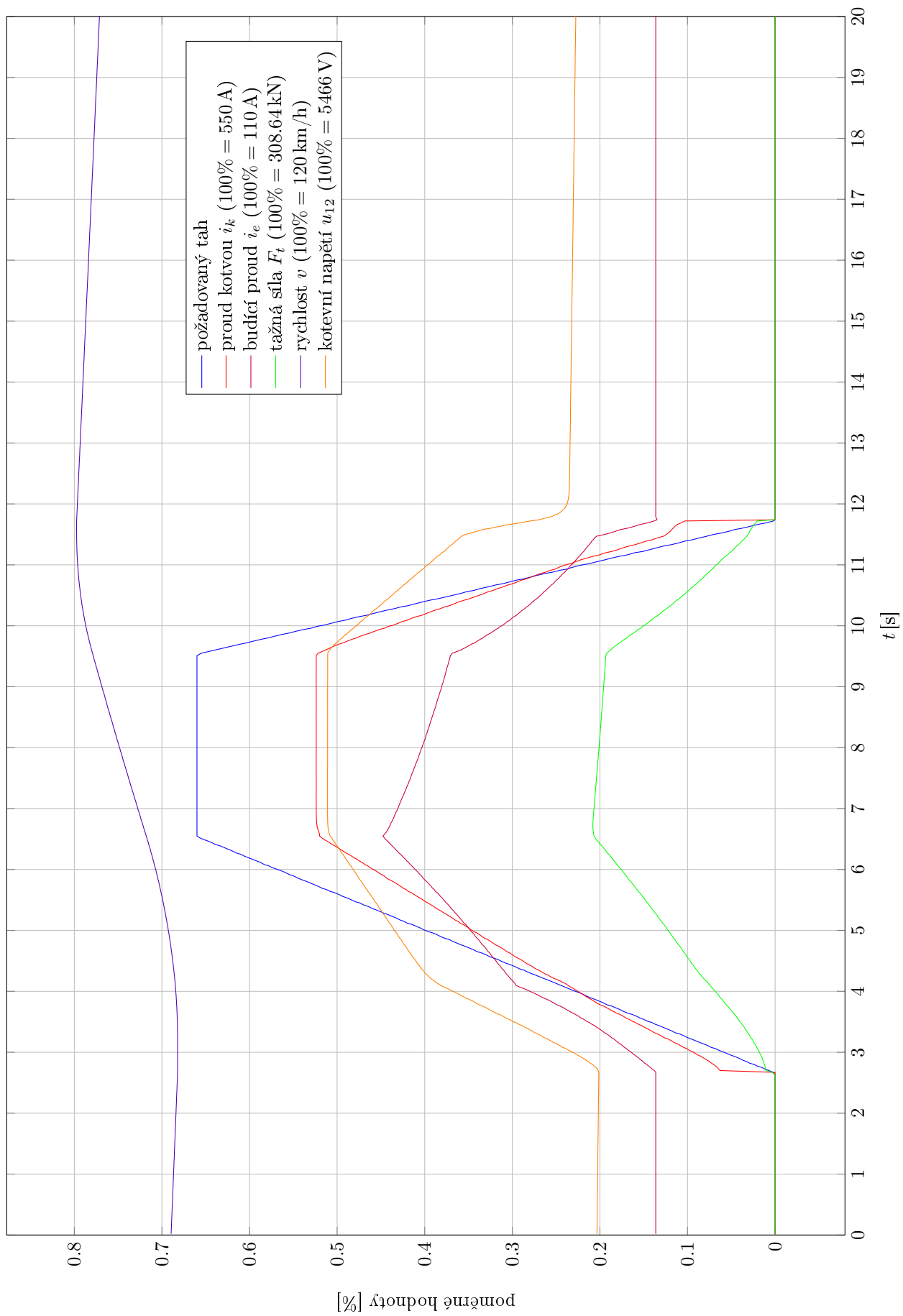
Obrázek 20: Naměřený průběh jízdy, výběhu a brzdy



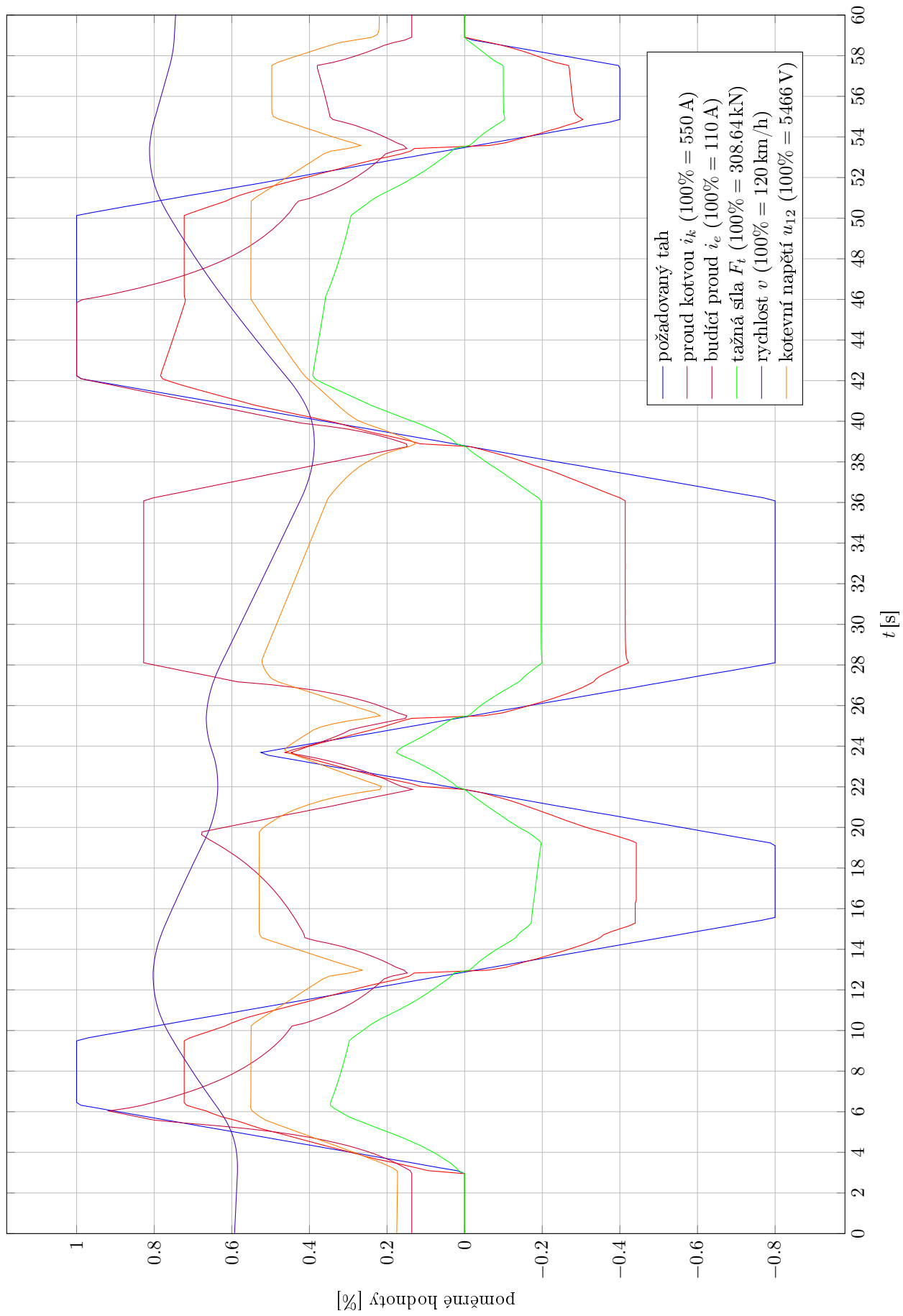
Obrázek 21: Nasimulovaný průběh jízdy, výběhu a brzdy



Obrázek 22: Naměřený průběh zrychlení z 80 km/h na 90 km/h



Obrázek 23: Nasimulovaný průběh zrychlení z 80 km/h na 90 km/h



Obrázek 24: Nasimulovaná metoda kvedlání při počáteční rychlosti 60 km/h

5 Závěr

V úvodu práce byly rozebrány výhody a aktuální dostupné metody real-time simulace a pro konkrétní problém byla vybrána metoda software in loop. Dále byl popsán trakční pohon se stejnosměrným cize buzeným motorem, jeho specifika pro simulovanou lokomotivu a správné zařazení simulátoru do regulační smyčky.

Hlavním cílem práce byla realizace simulátoru pro konkrétní řídicí jednotku. Tento cíl se podařilo splnit. Byl navržen a implementován simulátor nahrazující reálnou soustavu či běžící souběžně s ní. Výsledek práce lze dále využít pro testování regulátorů pohonů obdobného typu, případně ke zdokonalení matematického modelu soustavy.

Využitý matematický model je zjednodušený, přesto pro základní ověření regulátoru postačuje. V návaznosti na tuto práci by bylo vhodné zahrnout do modelu pokles napájecího napětí při odběru a naopak zvýšení při rekuperaci. Případně také implementovat simulaci režimu doplňování, který v důsledku předpokladu konstantního napájecího napětí nebyl zpracován. Dále lze doplnit možnosti testování regulace při skokových změnách vstupních napětí, také možnosti simulace skluzových charakteristik a různých krizových situací.

6 Seznam použité literatury

- CELLIER, F. E. *Continuous system simulation*. Springer, 2006. 643 s. ISBN 03-872-6102-8.
- DSPACE. *Hardware-in-the-loop simulators and simulator-specific hardware for ECU testing* [online]. 2014. [cit. 13. 5. 2014]. Dostupné z: http://www.dspace.com/en/ltd/home/products/hw/simulator_hardware.cfm.
- HAVRÁNEK, B. a kol. *Slovník spisovného jazyka českého* [online]. 2014. [cit. 13. 5. 2014]. Dostupné z: <http://ssjc.ujc.cas.cz/>.
- JANSA, F. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Nakladatelství dopravy a spojů, 1980. 312 s.
- KARNOPP, D. – MARGOLIS, D. L. – ROSENBERG, R. C. *System dynamics, modeling and simulation of mechatronic systems*. 6 vyd. Wiley, 2012. 636 s. ISBN 978-047-0889-084.
- Aplikační data AC-DC lokomotivy Škoda 71Em*. Škoda Electric a.s., Praha, 2010. Nepublikováno.
- Blokové schéma procesorového simulátoru*. Škoda Electric a.s., Praha, 2009a. Nepublikováno.
- Návrh, ověření a optimalizace SW regulátoru pohonu pomocí procesorové simulace*. Škoda Electric a.s., Praha, 2009b. Nepublikováno.
- Diagram stavů 71E-TCU*. Škoda Electric a.s., Praha, 2009c. Nepublikováno.
- LIU, J. W. *Real-time systems*. Prentice Hall, 2000. 610 s. ISBN 01-309-9651-3.
- MAPLESOFT. *Real-Time Simulation* [online]. 2014. [cit. 13. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.maplesoft.com/solutions/engineering/AppAreas/RealTime.aspx>.
- MATHWORKS. *Simulink Real-Time Overview* [online]. 2014. [cit. 13. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/simulink-real-time/>.
- NI. *Internetové stránky společnosti National Instruments* [online]. 2014. [cit. 13. 5. 2014]. Dostupné z: <http://czech.ni.com/hardware-in-the-loop>.
- OPAL-RT. *Internetové stránky společnosti OPAL-RT* [online]. 2014. [cit. 13. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.opal-rt.com>.
- PAVELKA, J. – ZDĚNEK, J. *Elektrické pohony a jejich řízení*. ČVUT, 2010. 241 s. ISBN 978-80-01-04642-5.
- ROUBAL, J. – HUŠEK, P. *Regulační technika v příkladech*. BEN - technická literatura, 2011. 276 s. ISBN 978-80-7300-260-2.
- TI. *TMS320F28335 Delfino Microcontroller* [online]. 2012. [cit. 13. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/tms320f28335>.

VENNE, P. – PAQUIN, J.-N. – BÉLANGER, J. *The What, Where and Why of Real-Time Simulation* [online]. opal-rt.com, 2010. [cit. 13.5.2014]. Dostupné z: <<http://www.opal-rt.com/technical-document/what-where-and-why-real-time-simulation>>.

VISIM. *Real-Time Simulation* [online]. 2014. [cit. 13.5.2014]. Dostupné z: <http://www.vissim.com/solutions/real-time_simulation.html>.

VOŽENÍLEK, P. – NOVOTNÝ, V. – MINDL, P. *Elektromechanické měniče*. 2 vyd. ČVUT, 2011. 219 s. ISBN 978-80-01-04875-7.