



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MATEMATICKÝ MODEL HNACÍHO ÚSTROJÍ MOTOROVÉHO VOZIDLA

MATHEMATICAL MODEL OF MOTOR VEHICLE DRIVING GEAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR MAREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR PORTEŠ, Dr.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Marek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Matematický model hnacího ústrojí motorového vozidla

v anglickém jazyce:

Mathematical Model of motor vehicle driving gear

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sestavení modelu hnacího ústrojí vozidla a provedení simulačního výpočtu.

Cíle diplomové práce:

Cílem je vytvořit matematický model hnacího ústrojí vozidla včetně spojky a převodového ústrojí v softwarovém prostředí Matlab/Simulink a případně SimScape.

Seznam odborné literatury:

Reimpell,J.;Stoll,H.;Edward,A., The automotive chassis - engineering principles. Arnold, London 1996. ISBN 0-340-61443-9.

Vlk, F. Dynamika motorových vozidel. Nakladatelství a zasilatelství vlk, Brno 2001, ISBN 80-238-5273-6

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Porteš, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 21.11.2009



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

Diplomová práce popisuje vytváření matematického modelu hnacího ústrojí motorového vozidla v prostředí softwarových programů MATLAB / Simulink. Výsledky jsou prezentovány v grafech průběhů získaných ze simulace průjezdu vozidla zvolenou trati. Parametry vstupující do modelu pochází z příslušného souboru a lze je kdykoli změnit, aby odpovídaly konkrétnímu vozidlu.

Annotation

The subject of my master's thesis is creating a mathematical model of motor vehicle driving gear using the software programs MATLAB / Simulink. The results are presented via graphs of the data gained from the simulation of a car driving on a determined track. The parameters used in the model come from a specific file and they can be changed anytime in order to correspond with the particular vehicle.

Klíčová slova

matematický model, MATLAB, Simulink, hnací ústrojí, motorové vozidlo

Key words

mathematical model, MATLAB, Simulink, driving gear, motor vehicle

Bibliografická citace

MAREK, P. *Matematický model hnacího ústrojí motorového vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 101 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem *Matematický model hnacího ústrojí motorového vozidla* vypracoval samostatně, na základě svých znalostí, uvedené literatury a za pomoci vedoucího diplomové práce Ing. Petra Porteše, Dr.

V Brně dne:

.....
Podpis

Poděkování

Tímto velmi děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Portešovi, Dr. za osobní přístup a cenné rady během konzultací. Děkuji i ostatním vyučujícím, jejichž působení mě při studiu pozitivně ovlivňovalo. Vděčný jsem také své rodině za podporu při studiu, svým virtuálním přátelům, kteří mi byli vždy nablízku při samotném psaní této práce, některým spolužákům za příjemné chvíle studentského života a vůbec všem, kteří ve mě věřili a třeba jen náznakem vyjádřili svou podporu. Nakonec bych rád „poděkoval“ asi všem ostatním lidem.

Obsah

Úvod	11
1 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ	12
1.1 MATLAB	12
1.1.1 Uživatelské prostředí MATLABu	13
1.2 Simulink	14
1.2.1 Modelování.....	15
1.2.2 Popis funkce použitých bloků	16
2 MODELOVÁNÍ HNACÍHO ÚSTROJÍ.....	22
2.1 Spojka.....	22
2.1.1 Základní struktura modelu spojky.....	25
2.1.2 Třecí model.....	26
2.1.3 Hmota a tlumení za spojkou.....	27
2.1.4 Podíl převodových poměrů N_0/N_t	28
2.1.5 Prokluzování.....	31
2.1.6 Zamknuto.....	35
2.1.7 Řízení třecích režimů.....	36
2.1.8 Spojitý signál.....	39
2.2 Prokluz kol.....	40
2.2.1 Zatížení náprav	41
2.2.2 Síla jízdních odporů na kole	43
2.2.3 Třecí model.....	46
2.2.4 Prokluz.....	48
2.2.5 Uražené dráhy.....	49
2.3 Ovládání vozidla.....	50
2.3.1 Detekce řazení	52
2.3.2 Řazení.....	57
2.3.3 Motor	58
2.3.4 Průběhy ovládacích veličin	60
3 VSTUPNÍ PARAMETRY.....	66
3.1 Použité parametry a jejich hodnoty	67
3.1.1 Motor	67
3.1.2 Převodové poměry.....	67
3.1.3 Setrvačné hmoty jednotlivých částí hnacího ústrojí.....	68
3.1.4 Omezení přilnavosti pneumatik.....	68
3.1.5 Charakteristické rozměry vozidla.....	68
3.1.6 Torzní tuhosti a tlumení spojovacích částí hnacího ústrojí	69
3.1.7 Spojka.....	69

3.1.8 Jízdní odpory.....	70
3.1.9 Další parametry.....	71
4 PŮBĚH SIMULACE A ZOBRAZOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	72
5 VÝSLEDKY, GRAFY A JEJICH ROZBOR.....	76
5.1 Celkový průběh simulace.....	76
5.2 Rozjezd vozidla.....	83
5.3 Řazení a podřazování	86
5.4 Změna charakteru vozovky.....	89
5.5 Podřazování při brzdění motorem.....	91
Závěr	94
Seznam použitých zdrojů	95
Seznam použitých zkratek a symbolů	96
Seznam obrázků	99
Seznam tabulek	100
Seznam příloh.....	101

Úvod

Předmětem diplomové práce je vytvoření matematického modelu hnacího ústrojí motorového vozidla v softwarovém prostředí MATLAB / Simulink. První kapitola se zabývá použitými programy a jejich pracovním prostředím, vysvětlením základního principu při modelování v Simulinku a popisem funkce všech bloků, které byly do modelu zařazeny. Ve druhé kapitole je zpracováno samotné vytváření modelu a princip jeho fungování, popis zahrnutých matematických rovnic, nastavení jednotlivých bloků – jedná se o hlavní kapitolu celé práce. Je rozčleněna na tři části, které odpovídají hlavním strukturám modelu. Následující kapitoly pak popisují vstupní parametry, se kterými byla prováděna simulace, způsob vykreslování grafů z průběhů signálů získaných při simulaci a nakonec jsou prezentovány schopnosti modelu zobrazením celkového průběhu simulace a několika detailů ze specifických úseků tohoto průběhu.

Směr dalšího postupu práce se během tvorby modelu několikrát změnil. Prvotní představa spočívala ve vymodelování dvou systémů, kdy měl být jeden tuhý a druhý pružný. Jsou to pojmy, které popisují charakter spojovacích dílů mezi jednotlivými částmi hnacího ústrojí. Pružný model by tedy uvažoval i s tuhostí a tlumením těchto spojovacích dílů. Celá soustava by se pak při zatížení mohla rozkmitat obdobně jako u reálných vozidel. Nejprve byl tedy vytvořen jednoduchý tuhý systém bez spojky, kde byla jedna hlavní rovnice dynamického pohybu hmoty vozidla s hmotou hnacího ústrojí k ní redukovanou. Probíhalo zde řazení (při dosažení definované rychlosti) okamžitou změnou převodového poměru a tím i otáček motoru přímým výpočtem podle aktuální rychlosti vozidla. Do výpočtu byl zařazen i jízdní odpor vzduchu a odpor valení. V diplomové práci tato jednoduchá verze modelu tuhého systému není uvedena pro dostatek ostatních materiálů práce. Další myšlenkou bylo získání reálných vstupních parametrů ze studentské formule ústavu. Od těchto nápadů (vytváření pružného modelu a zahrnutí parametrů formule) bylo ale ustoupeno a následující postup byl směřován k vylepšování modelu původního tuhého systému i nad rámec zadání diplomové práce.

Dosažené výsledky v podobě vlastností zahrnutých do modelu, které jsou prezentovány v grafech příslušné kapitoly, shrnuje závěr, kde je také popis možného využití vytvořeného modelu.

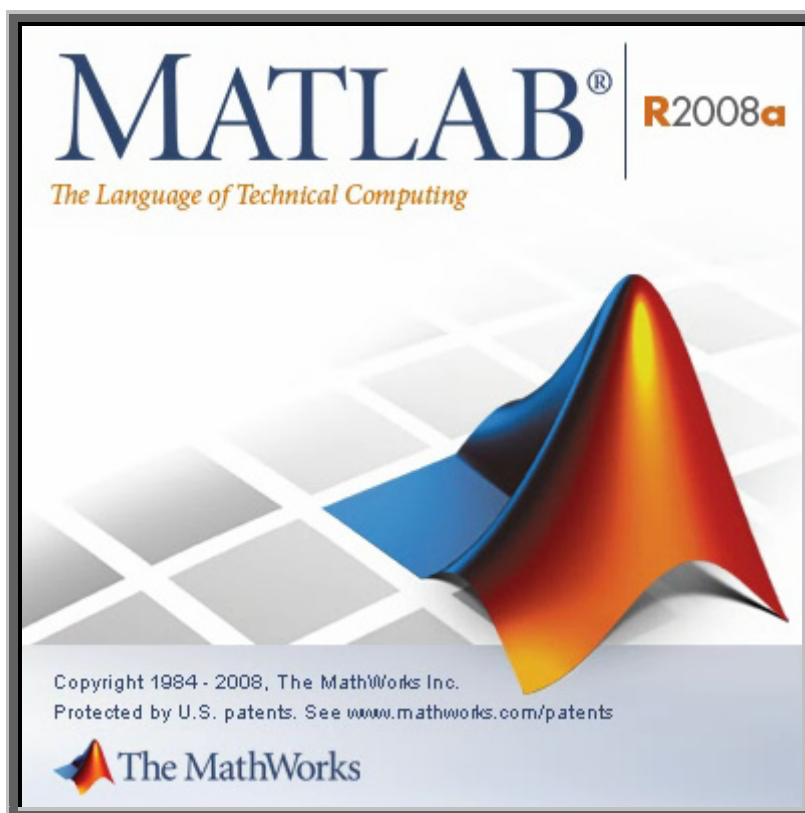
1 PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ

V práci je využito programu MATLAB / Simulink ve verzi R2008a pro vytváření modelu, případně MathCad k úpravě matematických rovnic použitých pro popis jeho dynamických vlastností.

1.1 MATLAB

Název MATLAB má původ v anglickém pojmu *MATrix LABoratory*. Slovy výhradního českého distributora, firmy HUMUSOFT s.r.o.: „MATLAB je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, paralelní výpočty, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. MATLAB je nástroj jak pro pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací.“ [1]

Výpočetní systém MATLAB, vyvinutý v roce 1984 firmou The MathWorks, Inc. v USA, se během uplynulých let stal celosvětovým standardem v oblasti technických výpočtů a simulací ve sféře vědy, výzkumu, průmyslu i v oblasti vzdělávání. Původně byl určen pro operační systém UNIX a tato skutečnost se promítla do jednoduchého základního komunikačního rozhraní v podobě příkazové řádky. Poskytuje svým uživatelům grafické a výpočetní nástroje, specializované knihovny funkcí spolu s výkonným programovacím jazykem čtvrté generace. Knihovny jsou svým rozsahem využitelné v různých oblastech lidské činnosti. [1, 2]

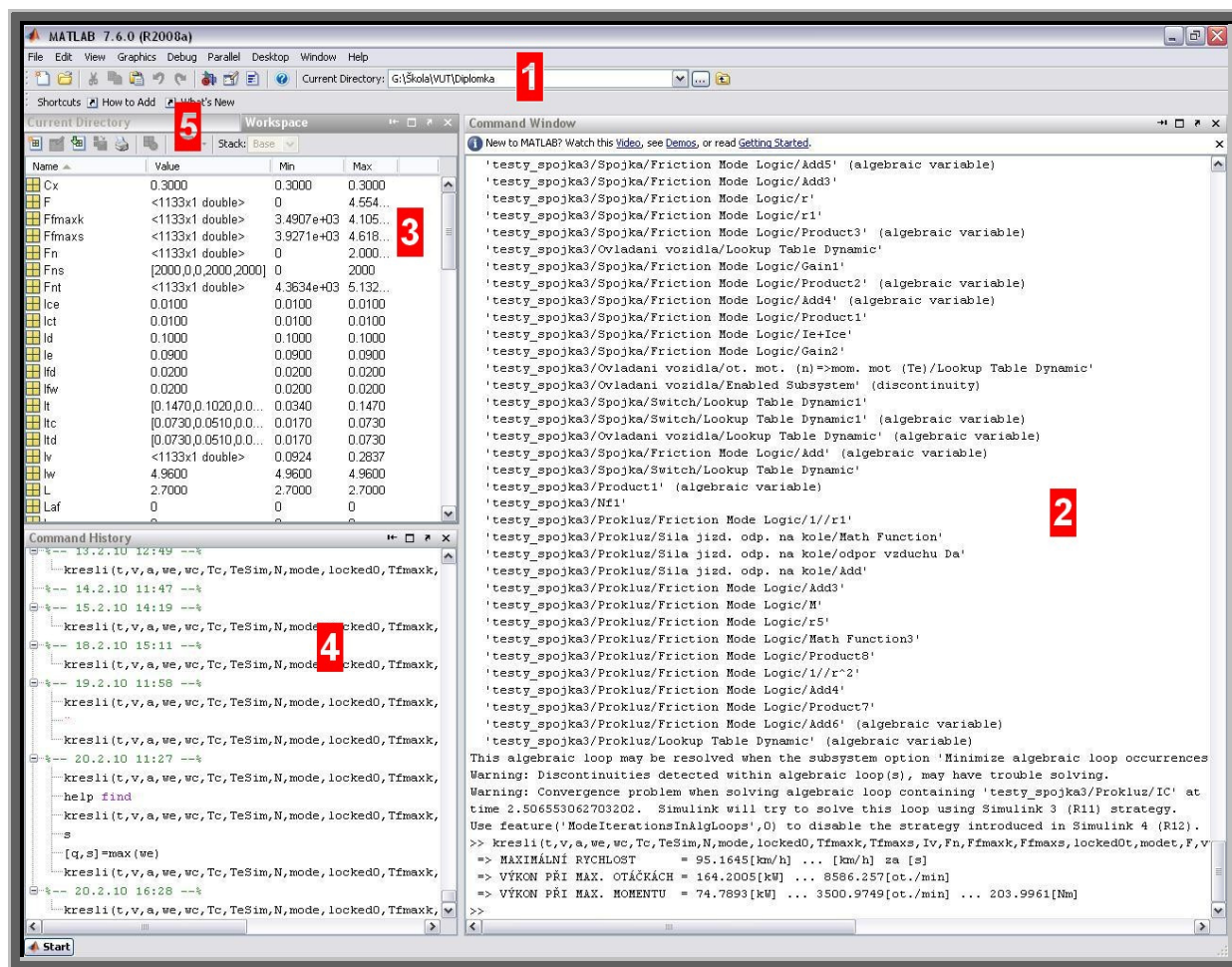


Obr. 1.1 Uvítací okno MATLABu

Jde o interaktivní systém se základním datovým typem vícerozměrného pole. Díky své architektuře je MATLAB vhodný pro relativně snadné řešení mnoha technických úloh, speciálně takových, které vedou na vektorovou nebo maticovou formulaci, v kratším čase než řešení v klasických jazycích jako je C nebo FORTRAN. Jeho jazyk je totiž oproti nim jednodušší. Za nejsilnější stránku MATLABu je považováno rychlé výpočetní jádro s optimálními algoritmy. MATLAB byl implementován na všech významných platformách (Windows, Linux, Solaris, Mac). [1, 2]

1.1.1 Uživatelské prostředí MATLABu

Po spuštění MATLABu se zobrazí hlavní okno prostředí s několika podokny. V horní části okna se na panelu nástrojů nastavuje pracovní adresář (*obr. 1.2, poz. 1*), kam jsou ukládány vytvořené soubory a také odtud načítány volané soubory. Pokud je na některý soubor (např. s uživatelem vytvořenou funkcí) odkazováno, musí být uložen právě v tomto adresáři. Podokna v nižší části je možné jednotlivě skrývat nebo maximalizovat, stejně jako je to běžné v jiných aplikacích. Praktické je automatické doskakování podoken do určitých poloh tak, aby se využil celý prostor obrazovky. Ve správě pracovního prostoru, dostupné z položky hlavní nabídky *Desktop*, je užitečný příkaz *Desktop Layout / Default*, který nastaví podokna do původních pozic.

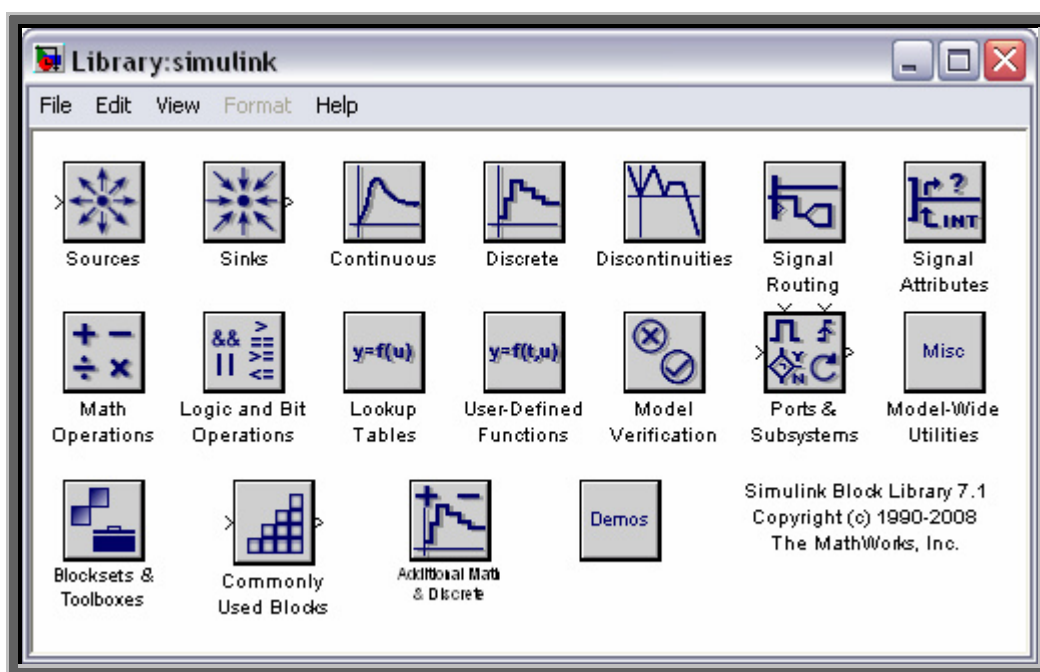


Obr. 1.2 Uživatelské prostředí MATLABu

Hlavním pracovním podoknem uživatelského prostředí je *Command Window* (obr. 1.2, poz. 2), kde probíhá převážná část komunikace mezi uživatelem a MATLABem. Slouží pro zadávání příkazů, zobrazování informací pro uživatele, vypisování chybových hlášení a varování. V podokně *Workspace* (obr. 1.2, poz. 3) jsou vypisovány všechny vytvářené proměnné. Jejich obsah lze zobrazit poklepnutím myši, kdy se otevře podokno *Variable Editor* v podobě tabulky. Název dalšího podokna *Command History* (obr. 1.2, poz. 4) napovídá, že se zde ukládají dříve použité příkazy z *Command Window*. Při opakovaném používání příkazů je vhodné vrátit se k nim poklepnutím myši v *Command History* nebo stiskem šipky nahoru na klávesnici (pokud je aktivní *Command Window*). Poslední standardně otevřené podokno *Current Directory* (obr. 1.2, poz. 5) zobrazuje celý obsah pracovního adresáře nastaveného v horním panelu.

1.2 Simulink

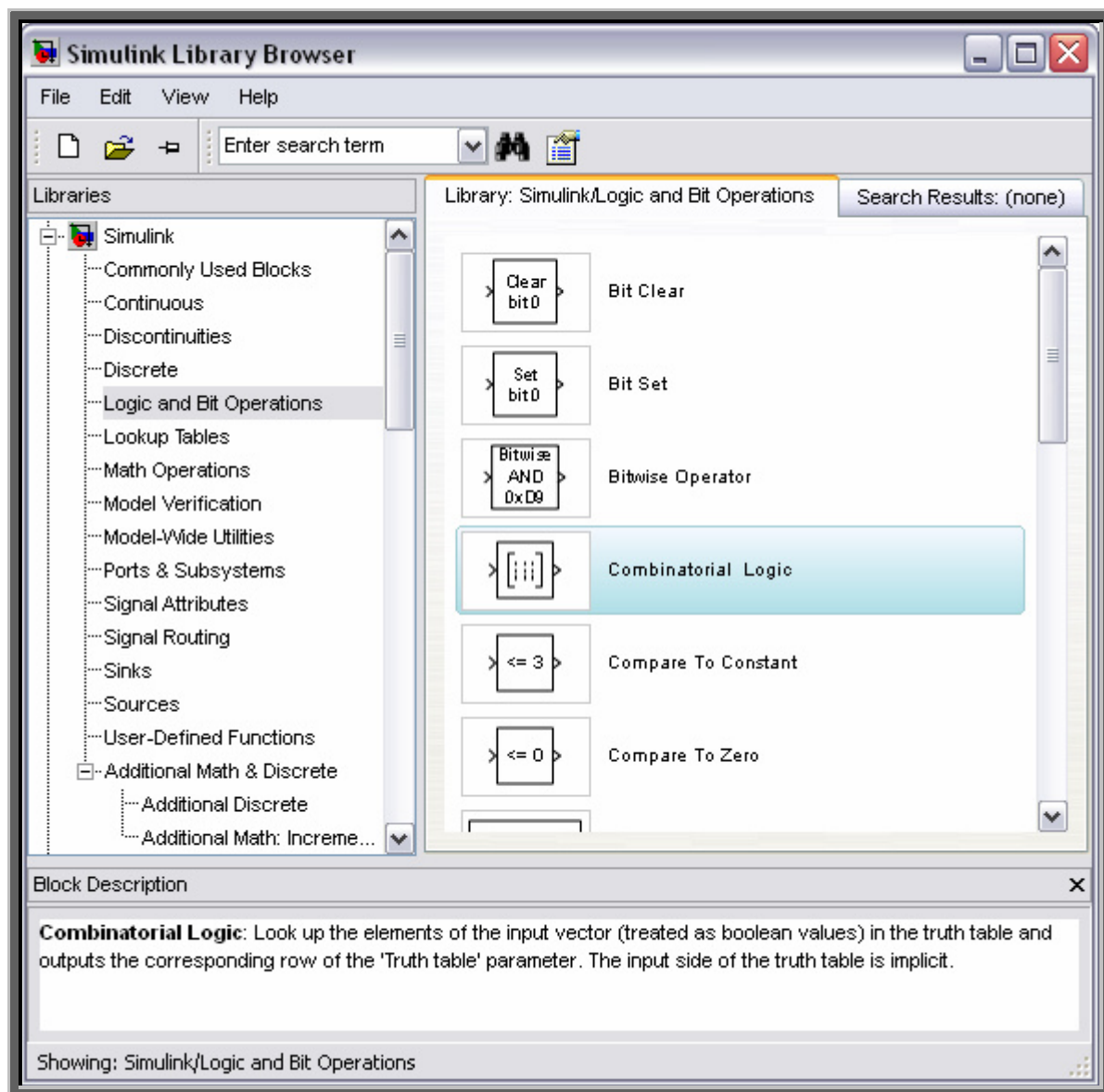
Slovy distributora: „Simulink je nadstavba MATLABu pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.“ [3]



Obr. 1.3 Grafické zobrazení základní knihovny bloků Simulink

Kromě standardních úloh dovoluje Simulink simulovat i rozsáhlé "stiff" systémy s efektivním využitím paměti počítače. Pomocí Simulinku a jeho grafického editoru lze vytvářet modely lineárních, nelineárních, v čase diskretních nebo spojitých systémů přesouváním funkčních bloků myši. Simulink také umožňuje spouštět určité části simulačního schématu na základě výsledku logické podmínky. Otevřená architektura Simulinku vedla ke vzniku knihoven bloků, nazývaných blocksety, které rozšiřují základní knihovnu bloků

Simulinku (obr. 1.3 a obr. 1.4) a umožňují použití programu v příslušných vědních a technických oborech. Knihovny je možné rozšiřovat i o vlastní bloky, vytvořené uživatelem. Hierarchická struktura modelů umožňuje koncipovat i velmi složité systémy do přehledné soustavy subsystémů prakticky bez omezení počtu bloků. Simulink, stejně jako MATLAB, dovoluje připojovat funkce napsané uživateli v jazyce C. [3]



Obr. 1.4 Prohlížeč knihoven bloků Simulinku

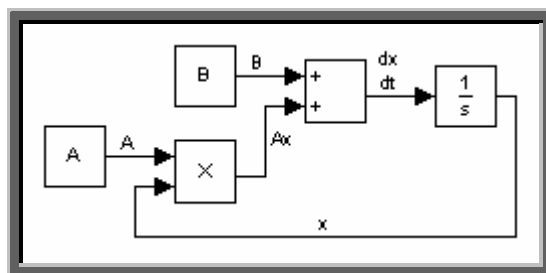
1.2.1 Modelování

Prostředí Simulinku a MATLABu jsou provázaná a lze se např. zadáváním hodnot v Simulinku odvolávat na proměnné v MATLABu. Pro vytvoření modelu je nejprve potřeba sestavit matematický popis dynamického systému. Samotné modelování pak v Simulinku probíhá přetahováním bloků z knihovny do okna modelu a pospojováním jejich vstupů a výstupů pomocí myši. Každý výstup bloku může být připojen na libovolný počet vstupů, ale

ke sdružování výstupů je třeba použít další blok(y). Vložené bloky mají nastavitelné příslušné parametry a další vlastnosti, velikost jejich značky je nastavitelná roztahováním v rozích pomocí myši. Jednotlivé bloky nebo i větší části modelu lze standardním způsobem kopírovat a usnadnit si tak práci při použití stejných částí na více místech v modelu.

Princip sestavování rovnic v Simulinku vysvětluje jednoduchý příklad:

$$\dot{x} = Ax + B.$$



Obr. 1.5 Příklad sestavení jednoduché rovnice

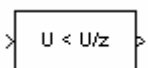
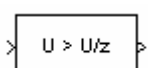
Model zde tvoří uzavřenou smyčku. Jakákoli proměnná z rovnice je dostupná vyvedením příslušného signálu, který je představován tenkými spojovacími čarami mezi jednotlivými bloky, jeho napojením na další spojovací čáry a bloky.

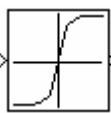
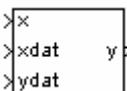
1.2.2 Popis funkce použitých bloků

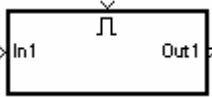
Při tvorbě modelu byly používány pouze bloky ze základní knihovny Simulinku. Pokud mají bloky víc vstupů a/nebo výstupů, jsou Simulinkem číslovány vzestupně směrem shora dolů nebo zleva doprava. Při vyplňování parametrů bloků se lze odvolávat na proměnné z prostředí *Workspace*. Popis bloků je uveden v tab. 1.1.

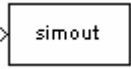
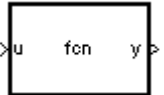
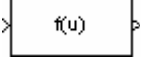
Tab. 1.1 Seznam bloků použitých v modelu se stručným popisem funkce

Umístění v knihovně	Název	Značka	Popis funkce
Continuous	Derivative		Výstupem je časová derivace vstupního signálu.
	Integrator		Integruje vstupní signál. V parametrech lze nastavit resetování bloku vnějším signálem pro různý charakter resetujícího signálu, počáteční stav bloku (může být nastaven vnitřně nebo z vnějšího signálu), limity pro výstup integrálu a údaje o skutečném omezení v zobrazitelném výstupu <i>saturation port</i> , zobrazení stavového výstupu <i>state port</i> .

Umístění v knihovně	Název	Značka	Popis funkce
Discontinuities	Relay		Výstupní signál představují hodnoty definovatelné pro stavy "zapnuto" nebo "vypnuto". Mezi nimi blok přepíná v závislosti na hodnotě vstupního signálu, která je porovnávána se zvolenými hodnotami pro přechod do obou stavů. Stav bloku není ovlivněn, pokud je vstupní signál mezi těmito zvolenými hodnotami.
	Hit Crossing		Detekuje, když vstupní signál přejde přes stanovenou hodnotu ve zvoleném směru. V tom okamžiku je na výstupu signál s hodnotou 1, jinak 0.
Discrete	Memory		Aplikuje zpoždění o jeden iterační krok. Výstupem je předchozí vstup.
Logic and Bit Operations	Compare To Constant		Porovnává vstupní signál se zvolenou konstantou. Pokud je splněna zadaná podmínka porovnání, je na výstupu signál <i>True</i> . Jinak je výstupem <i>False</i> .
	Detect Decrease		Při změně aktuálního vstupního signálu oproti minulému v předchozím iteračním kroku směrem dolů vyšle na výstup v tomto kroku signál <i>True</i> .
	Detect Increase		Při změně aktuálního vstupního signálu oproti minulému v předchozím iteračním kroku směrem nahoru vyšle na výstup v tomto kroku signál <i>True</i> .
	Combinatorial Logic		Vektor vstupního signálu představuje vstupní hodnoty logické tabulky. Její velikost pak odpovídá počtu prvků vektoru. Výstupem je příslušná zadaná hodnota z výsledků tabulky pro danou kombinaci vstupních hodnot. Blok pracuje se signály 0 a 1 libovolného datového typu.
	Interval Test		Pokud je hodnota vstupního signálu mezi zvolenou horní a dolní hranicí, je na výstupu signál <i>True</i> , jinak <i>False</i> .

Umístění v knihovně	Název	Značka	Popis funkce
	Logical Operator		Umožňuje nastavit počet vstupů a zvolit parametr <i>Operator</i> , který bude se vstupy pracovat (AND, OR, NAND, NOR, XOR, NOT).
	Relational Operator		Aplikuje zvolený porovnávací operátor na vstupní signály, vyhodnotí pravdivost podmínky a posílá na výstup <i>True</i> nebo <i>False</i> .
Lookup Tables	Lookup Table		Během simulace porovnává vstupní řídicí signál s parametrem <i>Vector of input values</i> a podle zvolené vyhledávací metody parametru <i>Lookup method</i> přiřadí na výstup hodnotu z parametru <i>Table data</i> .
	Lookup Table Dynamic		Funkce je stejná jako u předchozího bloku. Navíc je možné během simulace dynamicky měnit hodnoty v tabulce.
Math Operations	Abs		Výstupem je absolutní hodnota vstupního signálu.
	Gain		Násobí vstupní signál nastavenou hodnotou.
	Math Function		Tento blok aplikuje na vstupní signál vybranou matematickou funkci.
	Product		Násobí nebo dělí vstupy. V parametru bloku <i>Number of inputs</i> lze určit počet vstupů pro násobení, nebo znaky * a / zvolit charakter každého vstupu. Počet těchto znaků odpovídá množství vstupů.
	Sign		Funkce signum. Pro záporný vstup je na výstupu hodnota -1, pro kladný 1 a pro nulový 0.
	Sum		Přičítá nebo odečítá vstupní signály. Stejně jako u bloku <i>Product</i> se pomocí parametru nastavuje číslem počet vstupů pro sčítání nebo znaky + a - charakter každého vstupu.

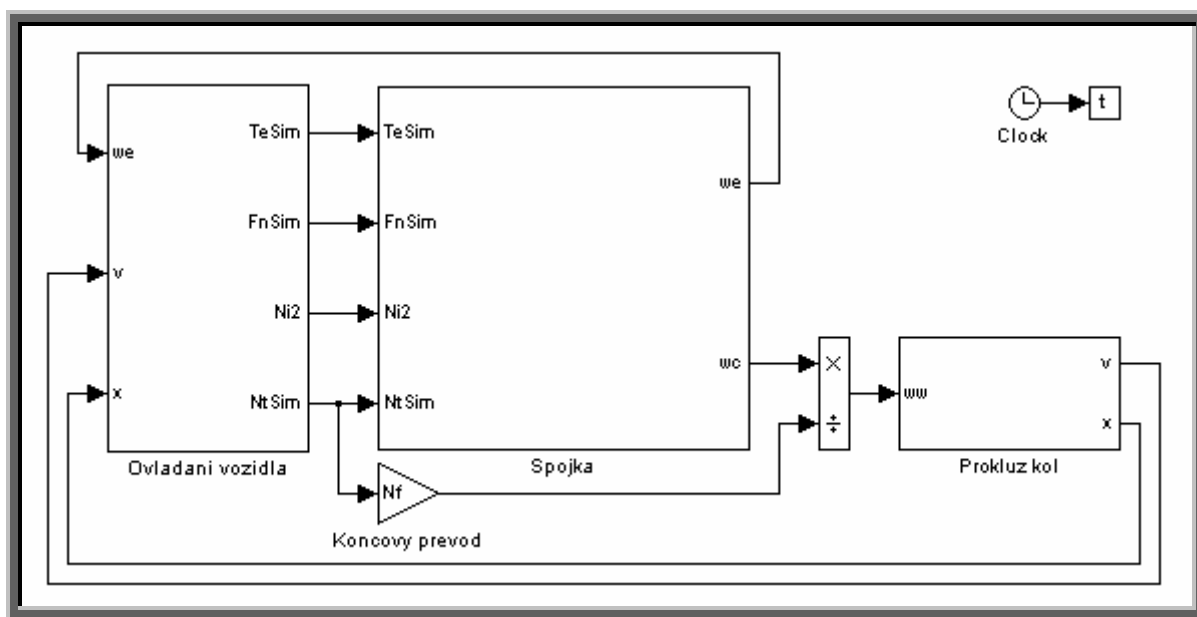
Umístění v knihovně	Název	Značka	Popis funkce
	Trigonometric Function		Aplikuje na vstupní signál zvolenou funkci.
Ports & Subsystems	Enable Port		Umístěním do bloku <i>Subsystem</i> z něj vytváří <i>Enabled Subsystem</i> . Umožňuje resetovat nebo ponechat stavy bloků při každé aktivaci subsystému, nebo zobrazit výstup řídicího signálu.
	Enabled Subsystem		Subsystem aktivovaný řídicím signálem při jeho hodnotě větší než 0. Jeho výstupy lze nastavit pro držení poslední hodnoty nebo resetování na hodnotu parametru <i>Initial output</i> v době, kdy není subsystem aktivní.
	Inport		Vytváří vstupy do subsystémů.
	Outport		Vytváří výstupy ze subsystémů.
	Subsystem		Prispívá k přehlednosti u složitějších modelů, usnadňuje práci s dílčími celky modelu.
Signal Attributes	Data Type Conversion		Převádí datový typ signálu.
	Initial Condition		Určuje počáteční hodnotu signálu při startu simulace nebo při resetování subsystému.
Signal Routing	Bus Creator		Vytváří "vícevláknový" signál ze svých vstupů a tím zpřehledňuje jeho rozvedení v modelu. Lze nastavit počet i název vstupů, podle kterého se identifikují při dalším použití.
	Bus Selector		Slouží k výběru potřebných signálů a jejich vyvedení dál do modelu.
	From		Přijímá signál z bloku <i>Goto</i> se shodným parametrem <i>Goto Tag</i> .

Umístění v knihovně	Název	Značka	Popis funkce
	Goto		Posílá signál do bloků <i>From</i> se stejným parametrem <i>Goto Tag</i> . Lze nastavit viditelnost tohoto signálu pro bloky <i>From</i> na <i>local</i> (pro daný subsystém), <i>global</i> (pro všechny úrovně subsystémů) a <i>scoped</i> .
	Manual Switch		Umožňuje manuálně přepínat mezi vstupními signály mimo průběh simulace.
	Mux		Skládá vstupní signály do tvaru vektoru nebo matice.
	Switch		Při splnění volitelné podmínky signálu ze vstupu 2 propouští vstup 1, jinak je na výstupu signál ze vstupu 3.
Sinks	To Workspace		Zapisuje vstupní signál v požadovaném formátu a se zadaným jménem proměnné do hlavního pracovního prostředí MATLABu.
Sources	Clock		Výstupním signálem je aktuální čas v průběhu simulace.
	Constant		Na výstupu je hodnota zvolená parametrem <i>Constant value</i> , kde může být i vektor nebo matice.
	Repeating Sequence Interpolated		Výstupem je časový průběh zadané sekvence signálů. Parametr <i>Vector of output values</i> určuje hodnotu signálu a <i>Vector of time values</i> udává čas tohoto signálu. V čase mezi zadanými body je výstupní hodnota signálu určována vyhledávací metodou volenou parametrem <i>Lookup Method</i> .
User-Defined Functions	Embedded MATLAB Function		Umožňuje používat příkazy MATLABu pro vytvoření požadované funkce.
	Fcn		V parametru <i>Expression</i> tohoto bloku lze použít vybrané funkce a operátory, vstupní signál má pojmenování <i>u</i> .

Umístění v knihovně	Název	Značka	Popis funkce
Additional Math & Discrete/ Additional Discrete	Unit Delay Enabled External IC		Běžně je výstupem signál u zpožděný o jeden iterační krok a počáteční stav je dán vstupním signálem IC . Pokud je na vstupu E (enable) signál <i>False</i> , je blok vypnutý a jeho výstup se nemění s výjimkou resetování.
	Unit Delay External IC		Na výstupu je signál u zpožděný o jeden iterační krok a signál IC udává počáteční hodnotu, kterou blok posílá na výstup při každém resetování.

2 MODELOVÁNÍ HNACÍHO ÚSTROJÍ

Celý model je koncipován jako tuhý systém. Jeho základní částí je spojka, na kterou jsou napojeny subsystémy *Ovládání vozidla* a *Prokluz kol*. Princip použitého modelu spojky je inspirován technickými příklady výrobce [4]. Všechny proměnné použité v modelu jsou uloženy v souboru *Parametry.m*, odkud se automaticky načítají při každém spuštění simulace. Pohled na vnější strukturu modelu je na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Model hnacího ústrojí vozidla

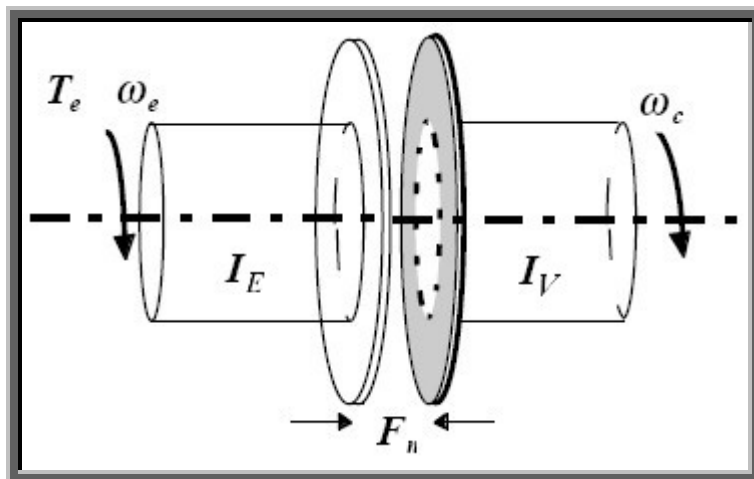
2.1 Spojka

Model spojky je řešen jako dva rotující kotouče, každý s celkovou hmotou příslušné strany hnacího ústrojí vozidla redukovanou na otáčky kotouče. V provozu nastávají dva režimy: *prokluzování*, kdy jsou úhlové rychlosti obou kotoučů různé; a *zamknuto*, kdy se oba kotouče otáčejí společně. Důležité je pak správné přepínání mezi těmito režimy na základě aktuálních provozních podmínek. Model zahrnuje i takový stav, kdy jsou otáčky vystupující ze spojky vyšší než otáčky vstupující a vozidlo je pak přenášeno momentem spojky brzděno.

Jsou dva způsoby pro řešení představeného problému:

1. Počítat moment přenášený spojkou v každém okamžiku a dál v modelu použít přímo jeho hodnotu.
2. Použít dva dynamické modely a přepínat mezi nimi v příslušném okamžiku.

Díky všestrannosti Simulinku je možné modelovat oba přístupy, v této práci je použito řešení druhé. Zde je třeba řídit příslušné počáteční stavy při přepínání mezi oběma dynamickými modely – druhý musí začít v tom stavu, kde skončil první. Schematické zobrazení spojky je na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Konfigurace spojky

Spojku popisují následující proměnné (index *e* nebo *E* značí stranu s motorem):

- T_e $\Rightarrow$ hnací moment motoru,
- F_n $\Rightarrow$ normálová síla mezi třecími kotouči spojky,
- F $\Rightarrow$ síla přenášená mezi koly vozidla a vozovkou,
- I_E, I_V $\Rightarrow$ momenty setrvačnosti příslušných částí hnacího ústrojí vozidla redukované na otáčky kotoučů spojky,
- k_E, k_V $\Rightarrow$ tlumení příslušných částí hnacího ústrojí vozidla redukované na otáčky kotoučů spojky,
- μ_k, μ_s $\Rightarrow$ kinetický a statický součinitel tření,
- ω_e, ω_v $\Rightarrow$ úhlové rychlosti kotoučů spojky,
- r_1, r_2 $\Rightarrow$ vnitřní a vnější poloměr třecích kotoučů,
- r $\Rightarrow$ poloměr kola vozidla,
- T_c $\Rightarrow$ moment přenášený spojkou,
- T_f $\Rightarrow$ třecí moment potřebný k tomu, aby spojka zůstala v režimu *zamknuto*,
- η_{tf} $\Rightarrow$ celková účinnost převodovky a koncového převodu,
- N_{tf} $\Rightarrow$ celkový př. poměr převodovky a koncového převodu (zvláště N_t a N_f).

Rovnice popisující režim *prokluzování* spojky jsou

$$\begin{aligned} I_E \dot{\omega}_e &= T_e - k_E \omega_e - T_c, \\ I_V \dot{\omega}_v &= \eta_{tf} T_c - k_V \omega_v - \frac{Fr}{N_{tf}}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Třecí moment spojky je funkcí jejich rozměrů, třecího součinitele a normálové síly:

$$\begin{aligned} T_{fmax} &= \iint_A \frac{r \times F}{A} da \\ &= \frac{F_n \mu}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr d\theta \end{aligned}$$

$$= \frac{2}{3} RF_n \mu, R = \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2}. \quad (2.2)$$

Když spojka prokluzuje, model používá kinetický součinitel tření a přenáší se celý třecí moment:

$$T_{fmaxk} = \frac{2}{3} RF_n \mu_k, \\ T_c = \text{sign}(\omega_e - \omega_c) T_{fmaxk}. \quad (2.3)$$

Při uzamknuté spojce platí $\omega_e = \omega_c = \omega$ a momenty setrvačnosti na obou stranách se sčítají, spojka se otáčí jako jeden celek. Pro popis režimu *zamknuto* jsou převedeny obě rovnice (2.1) do jedné:

$$(I_E + I_V) \dot{\omega} = \eta_{tf} T_e - (k_E + k_V) \omega - \frac{Fr}{N_{tf}}. \quad (2.4)$$

Moment přenášený spojkou při režimu *zamknuto* se získá dosazením zrychlení $\dot{\omega}$ z rovnice (2.4) za $\dot{\omega}_e$ do rovnice (2.1) a vyjádřením T_c (s využitím programu MathCad):

Given

$$(I_E + I_V) \cdot \alpha = \eta_{tf} T_e - (k_E + k_V) \cdot \omega - \frac{F \cdot r}{N_{tf}} \\ \omega \cdot (k_E + k_V) - T_e \cdot \eta_{tf} + \frac{F \cdot r}{N_{tf}} \\ \text{Find}(\alpha) \rightarrow - \frac{\omega \cdot (k_E + k_V) - T_e \cdot \eta_{tf} + \frac{F \cdot r}{N_{tf}}}{I_E + I_V}$$

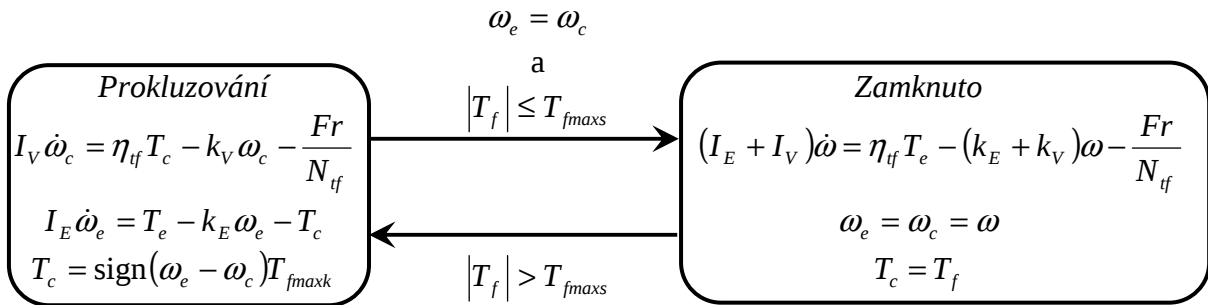
Given

$$I_E \left[\frac{\omega \cdot (k_E + k_V) - T_e \cdot \eta_{tf} + \frac{F \cdot r}{N_{tf}}}{I_E + I_V} \right] = T_e - k_E \cdot \omega_e - T_c \\ \text{Find}(T_c) \rightarrow T_e - k_E \cdot \omega_e + \frac{I_E \left[\omega \cdot (k_E + k_V) - T_e \cdot \eta_{tf} + \frac{F \cdot r}{N_{tf}} \right]}{I_E + I_V}, \\ T_c = T_f = T_e - k_E \omega_e + \frac{I_E \left[\omega(k_E + k_V) - \eta_{tf} T_e + \frac{Fr}{N_{tf}} \right]}{I_E + I_V}. \quad (2.5)$$

Spojka zůstává v režimu *zamknuto*, dokud velikost momentu T_f nepřekročí hodnotu maximálního momentu statického tření T_{fmaxs} , kde

$$T_{fmaxs} = \frac{2}{3} RF_n \mu_s. \quad (2.6)$$

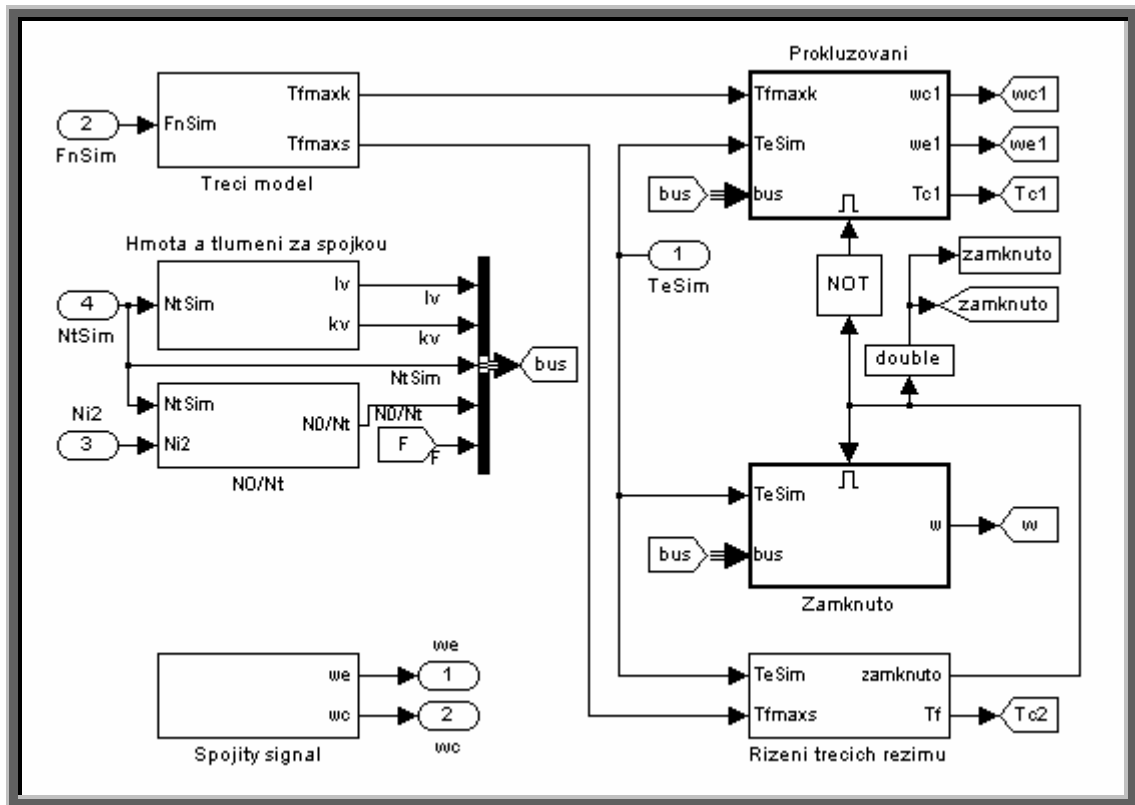
V režimu *prokluzování* spojka zůstává tak dlouho, dokud neplatí rovnice $|T_f| \leq T_{fmax}$ a zároveň dokud se nesrovnají úhlové rychlosti obou kotoučů. K vyrovnání těchto rychlostí dochází vlivem setrvačnosti hmot až poté, co začne platit zmíněná rovnice. Přepínání režimů je tedy potřeba řídit ještě signálem sledujícím rovnost úhlových rychlostí kotoučů. Teprve až jsou tyto rychlosti shodné, přepne se spojka zpět do režimu *zamknuto*.



Obr. 2.3 Stavový diagram popisující přepínání mezi režimy spojky

2.1.1 Základní struktura modelu spojky

Hlavním principem simulačního modelu (obr. 2.4) je využití aktivovaných subsystémů (*Enabled Subsystem*, tab. 1.1) *Prokluzování* a *Zamknuto*. Jejich činnost je řízena ovládacím signálem z bloku *Řízení třecích režimů* podle podmínek uvedených na obr. 2.3. Aby docházelo ke správnému střídání režimů spojky, jsou oba aktivované subsystémy řízeny



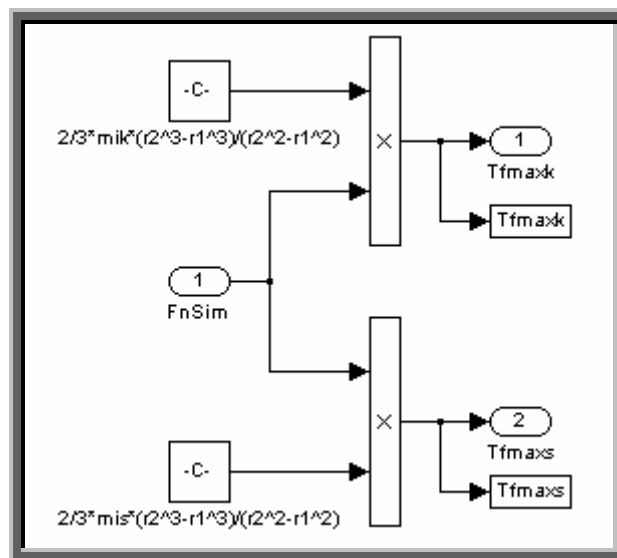
Obr. 2.4 Základní struktura modelu spojky

stejným signálem a do řídicího vstupu subsystému *Prokluzování* vstupuje tento signál s opačnou hodnotou. Další subsystém, *Třecí model*, určuje aktuální třecí momenty T_{fmaxk} a T_{fmaxs} v závislosti na průběhu normálové síly F_{nSim} na spojce během simulace. Subsystém *Hmota a tlumení za spojkou* udává průběh setrvačných hmot a tlumení příslušné části hnacího ústrojí (od spojky ke kolům vozidla) v závislosti na aktuálním převodovém poměru převodovky N_{iSim} . Dále je v modelu potřeba pro správný průběh řazení signál z bloku *NO/Nt*, který v průběhu simulace dynamicky určuje podíl předchozího a současného zařazeného převodového poměru. Poslední subsystém s názvem *Spojité signály* vytváří z příslušné dvojice signálů jedné veličiny (rozdělené střídáním činnosti obou aktivovaných subsystémů) jeden spojitý signál.

Pro snadnější rozvedení potřebných signálů do (aktivovaných) subsystémů slouží blok *Bus Creator* (tab. 1.1). Protože Simulink umožňuje použití bloků *Goto* a *From* přes hranici aktivovaného subsystému jen pro případy připojení bloku *Goto* ke stavovému výstupu (*state port*) jiného bloku, je třeba vést signál bloku *Bus Creator* do aktivovaného subsystému zvenčí přes běžný vstup. Ze stejného důvodu musí být z aktivovaného subsystému vyvedeny přes běžné výstupy i výstupní signály. Až poté mohou být rozvedeny s bloky *Goto/From*. Vstupní signály bloku *Bus Creator* jsou pojmenovány pomocí poklepání myši na černou čáru znázorňující vedení signálu. V blocích *Bus Creator* a *Bus Selector* se pak signály těmito názvy identifikují.

2.1.2 Třecí model

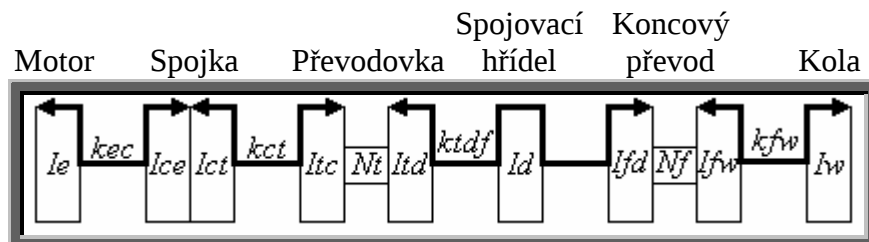
Výpočet kinetického a statického třecího momentu probíhá podle rovnic (2.3) a (2.6). Konstantní proměnné a jejich vztahy jsou zadány do bloků *Constant*, kam se načítají ze souboru *Parametry.m*. Proměnné, které se v průběhu simulace dynamicky mění, jsou do rovnic v modelu zahrnuty propojením jejich signálu s dalšími bloky (v tomto případě násobení – *Product*). Průběhy třecích momentů T_{fmaxk} a T_{fmaxs} jsou ukládány do prostředí MATLABu *Workspace* pomocí bloků *To Workspace*. Vstupy a výstupy subsystému tvoří bloky *Inport* a *Outport*. Subsystém *Třecí model* je znázorněn na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Třecí model

2.1.3 Hmota a tlumení za spojkou

Z důvodu zvoleného způsobu řešení spojky, kdy je celé hnací ústrojí modelováno jako dva kotouče spojky se setrvačnou hmotou a tlumením příslušné strany ústrojí, je potřeba jednotlivé hmoty a tlumení redukovat na otáčky kotoučů spojky. Rozložení setrvačných hmot, jejich tlumení a převodů je uvedeno na *obr. 2.6*.



Obr. 2.6 Zvolené rozložení setrvačných hmot I , tlumení k a míst převodů v hnacím ústrojí N

Před spojkou (bráno po směru toku výkonu) je to jednoduché, protože zde není žádný převod, který by dané veličiny měnil. Stačí sečíst setrvačnou hmotu motoru a přední části spojky ($I_E = I_e + I_{ce}$), tlumení je pak pro tuto celkovou hmotu zadáno přímo ($k_E = k_{ec}$). Za spojkou probíhá redukce setrvačných hmot (ve směru od konce ústrojí) jejich sečtením v úseku se stejnou úhlovou rychlostí a podělením druhou mocninou překračovaného převodového poměru. Tento vztah k převodovému poměru vychází z definice rotační setrvačné hmoty jako $[kgm^2]$. Převodovým poměrem se pak násobně změní hodnota délky, v tomto případě hned dvakrát vlivem druhé mocniny metru. Redukce tlumení probíhá stejně jako u setrvačných hmot, i když z jiného důvodu. Jednotkou tlumení je totiž

$$\left[\frac{Nm}{rad/s} \right],$$

takže se moment v čitateli dělí a úhlová rychlost ve jmenovateli násobí převodovým poměrem. Ve výsledku je i hodnota tlumení podělena druhou mocninou převodového poměru. Výsledné rovnice pro rotační setrvačné hmoty a tlumení za spojkou jsou

$$I_V = \frac{\frac{I_w + I_{fw}}{N_f^2} + I_{fd} + I_d + I_{td}}{N_t^2} + I_{tc} + I_{ct},$$

$$k_V = \frac{\frac{I_{fw}}{N_f^2} + k_{tdf}}{N_t^2} + k_{ct}.$$

V modelu (*obr. 2.7*) je postupováno podle výše uvedených rovnic. Protože se při řazení střídají v činnosti různá spoluzabírající kola v převodovce, je rotační setrvačná hmota převodovky definována samostatně pro každý zařazený převodový poměr ve dvou hodnotách. Dynamické přiřazování hodnot rotační setrvačné hmoty převodovky během simulace k aktuálnímu převodovému poměru zajišťují bloky *Lookup Table*. Tento blok potřebuje mít v parametru *Vector of input values* rostoucí hodnoty. V souboru s parametry pro model je ale převodový poměr zadán sestupně (první převodový stupeň znamená nejvyšší poměr), proto

jsou v parametrech *Vector of input* obou bloků *Lookup Table* zapsány hodnoty matice N_t pozpátku:

$$[N_t(5,2), N_t(4,2), N_t(3,2), N_t(2,2), N_t(1,2)].$$

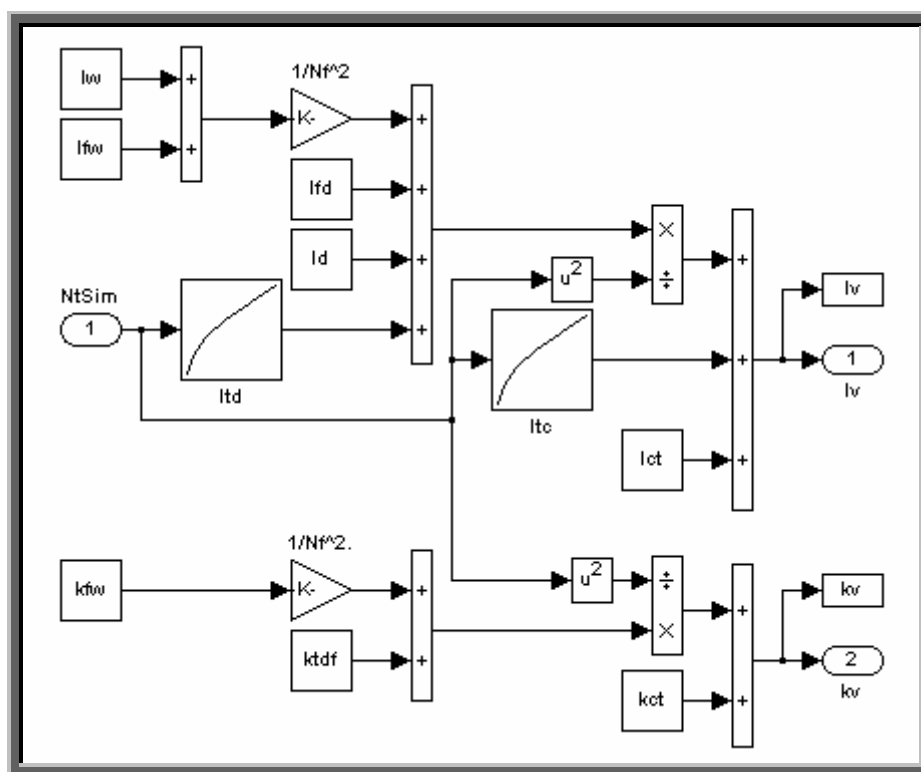
První číslice v kulaté závorce udává řádek a druhá sloupec matice N_t . Pro získání odpovídajících hodnot z bloku *Lookup Table* musí být stejně seřazeny i hodnoty parametru *Table data*. Setrvačné hmotě I_{td} přísluší zápis

$$[I_{td}(5), I_{td}(4), I_{td}(3), I_{td}(2), I_{td}(1)],$$

druhé části setrvačné hmoty převodovky I_{tc} pak

$$[I_{tc}(5), I_{tc}(4), I_{tc}(3), I_{tc}(2), I_{tc}(1)].$$

Parametr *Lookup method* obou bloků *Lookup Table* je nastaven jako *Use Input Below*.

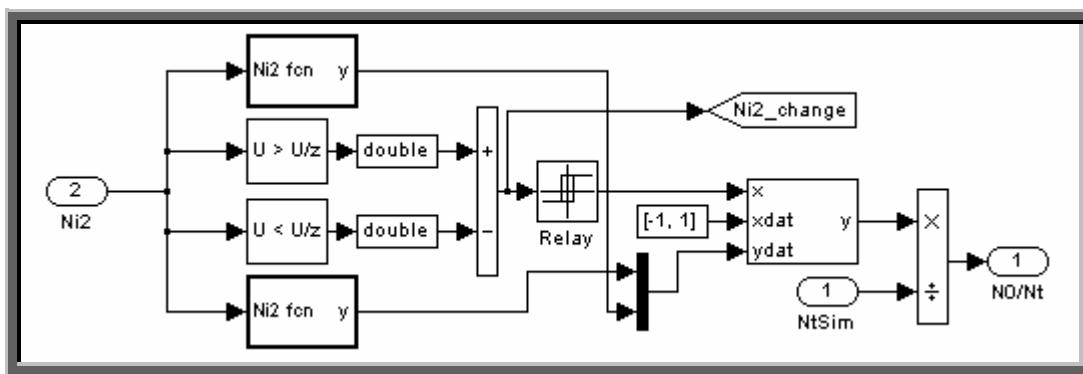


Obr. 2.7 Model výpočtu setrvačné hmoty a jejího tlumení za spojkou

2.1.4 Podíl převodových poměrů N_0/N_t

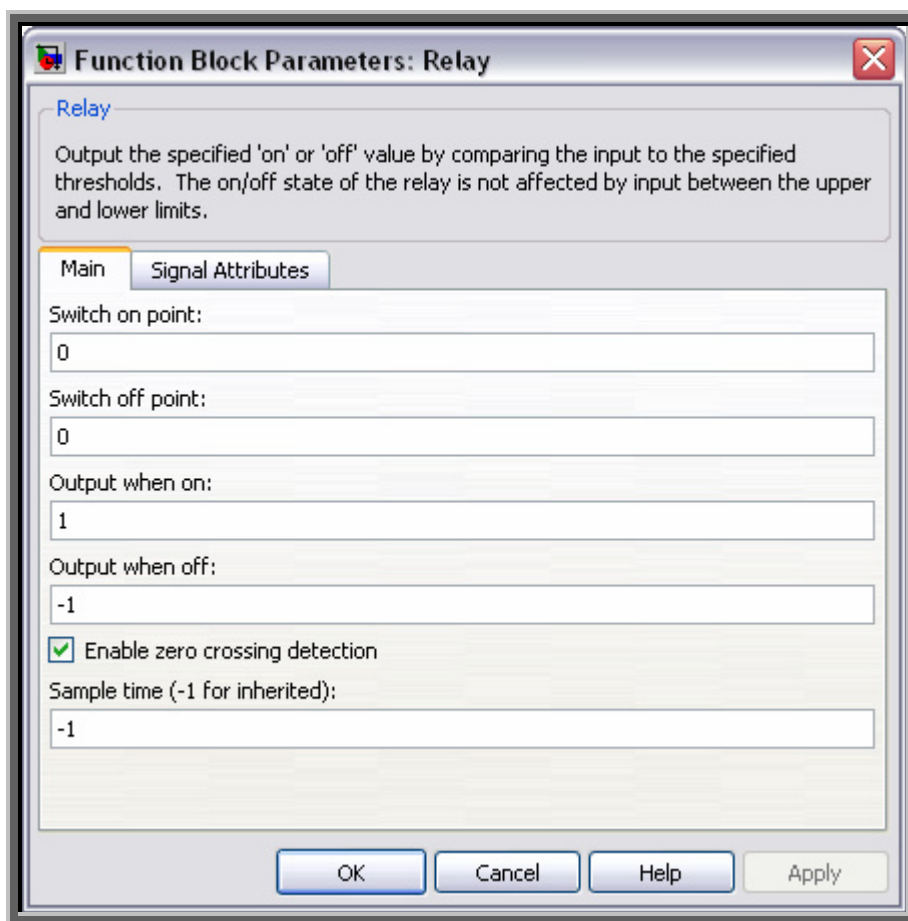
Jde o podíl předchozího a současného zařazeného převodového poměru. Potřeba tohoto signálu vychází z nutnosti měnit otáčky hnacího ústrojí při řazení. Změnou převodového poměru se totiž změní také otáčky ω_c hnacího ústrojí mezi spojkou a převodovkou. Kolikrát je menší nově zařazený převodový poměr oproti předchozímu, tolikrát se zmenší i otáčky ω_c :

$$\omega_c = \frac{N_{tSim} \omega_{c0}}{N_0}.$$



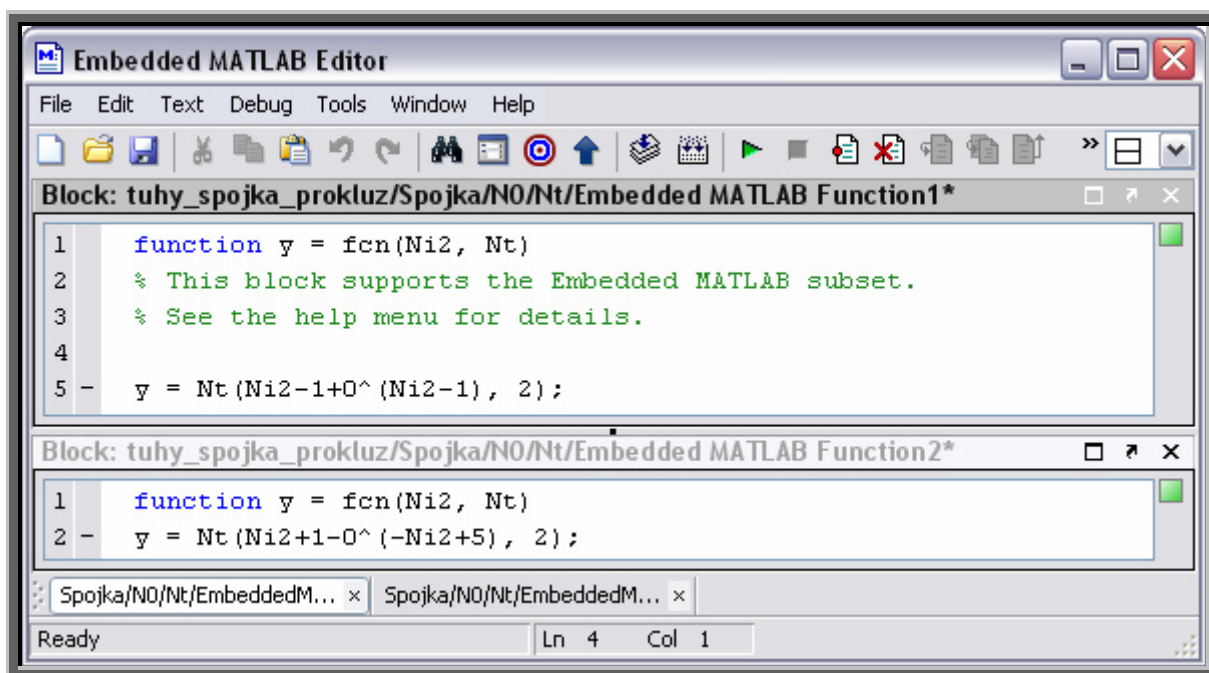
Obr. 2.8 Model podílu převodových poměrů N_0/N_t

Hlavním problémem této části modelu (obr. 2.8) je získání signálu s předchozím zařazeným převodovým poměrem. Průběžně se počítají obě možnosti, tj. že se na aktuální převodový stupeň řadilo shora nebo zdola. Pomocí bloků *Embedded MATLAB Function* je ze signálu s údajem o aktuálním zařazeném převodovém stupni vytvářen signál s příslušným převodovým poměrem. V horním bloku je výstupem převodový poměr stupně o jedna nižšího, než je aktuální zařazený převodový stupeň. V dolním bloku je výstupem naopak převodový poměr stupně o jedna vyššího. Dalším úkolem je tedy rozhodnout, jestli se řadilo nahoru nebo dolů. K tomu slouží bloky *Detect Decrease* a *Detect Increase*. Každý z nich při zjištění své podmínky vyšle na výstup místo logické nuly (*False*) jedničku (*True*). Zvláštní



Obr. 2.9 Nastavení parametrů bloku *Relay*

případ nastává na začátku simulace, kdy ještě není k dispozici údaj o předchozí hodnotě signálu. Vstupní signál je v těchto blocích porovnáván s parametrem *Initial condition*. Blok *Detect Decrease* má tuto hodnotu nastavenou na 1 a blok *Detect Increase* na 0. Tím je zajištěno, že při spuštění simulace bude vybrán signál z horního bloku *Embedded MATLAB Function*. Logické výstupy detekčních bloků jsou pak převedeny na běžné číslo pomocí bloků *Data Type Conversion*. Z těchto dvou řídicích signálů lze snadno udělat jeden jejich odečtením, jelikož podmínky jejich detekce nikdy nenastávají současně (nelze zároveň řadit shora i zdola). Výsledný řídicí signál rozesílá blok *Goto* (parametr *Tag Visibility* nastaven na *global*) pod názvem N_{i2_change} do dalších částí modelu. Zde tento signál vyhodnocuje blok *Relay*, nastavení jeho parametrů je na obr. 2.9. Tento blok drží svůj poslední stav, dokud nedojde k překlopení opačným detekčním blokem, než který spustil současný stav. Tím je k dispozici plynulý signál s informací o směru posledního řazení. Tohoto signálu využívá blok *Lookup Table Dynamic*, aby správně vybíral mezi signály převodového poměru pro řazení shora nebo zdola. Pokud má na vstupu x hodnotu -1 (díky detekování poklesu zařazeného stupně blokem *Detect Decrease*), posílá na výstup y první prvek vektoru, který je vytvářen blokem *Mux*. Na výstupu tedy bude signál dolního bloku *Embedded MATLAB Function*, který představuje předchozí převodový poměr pro případ podřazení. Nakonec je předchozí převodový poměr podělený tím aktuálním a výsledek je jediným výstupem celého subsystému.

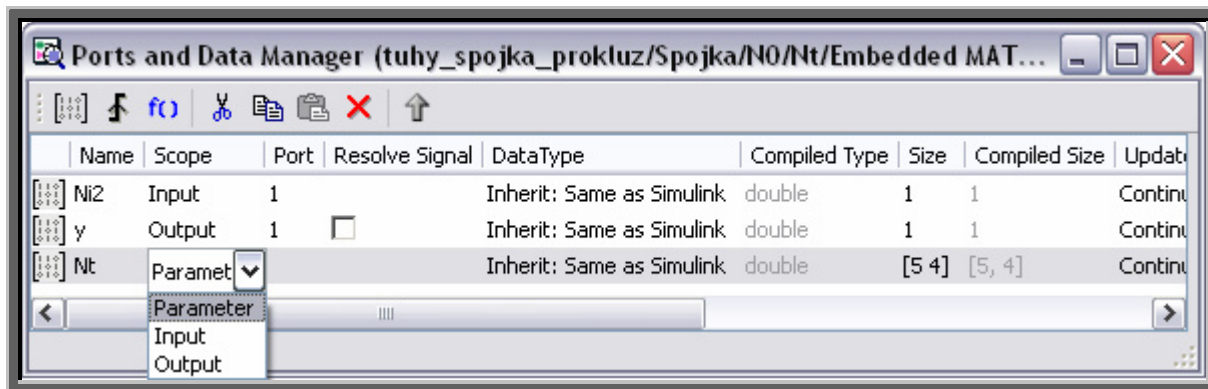


Obr. 2.10 Pracovní okno bloku *Embedded MATLAB Function*

Pro zápis funkce do bloků *Embedded MATLAB Function* je třeba poklepáním myši na blok otevřít okno editoru (obr. 2.10). Nejprve je třeba nastavit charakter vstupů a výstupů z nabídky *Tools / Edit Data/Ports* (nebo klepnutím na ikonu v panelu nástrojů), obr. 2.11. Vstupem je signál N_{i2} , který představuje aktuální zařazený převodový stupeň, a přísluší mu tedy označení *Input*. Další použitá proměnná N_t (nese mj. ve druhém sloupci informace o všech převodových poměrech) je načítána z prostředí *Workspace* a je označena jako *Parameter*. Dále musí být u N_t v kolonce *Size* přepsána hodnota 1 na [5 4], aby zadaný rozměr

parametru N_t souhlasil s rozměrem proměnné, na kterou odkazuje. Výstupem je signál y s příslušnou hodnotou převodového poměru a je označen jako *Output*. Všechny nastavené proměnné bloku jsou nyní v okně pro zápis funkce automaticky zapsány do tvaru $y = fcn(N_{i2}, N_t)$ a v řádku pod tímto zápisem je už definována požadovaná závislost. Zelené řádky se znakem % na začátku slouží pouze k popisu a nemají význam pro výpočty. Na obr. 2.10 nahoře je zápis funkce pro blok *Embedded MATLAB Function*, který je na obr. 2.8 v horní pozici:

$$y = N_t (N_{i2}-1+0^{(N_{i2}-1)}, 2);$$



Obr. 2.11 Ports and Data Manager bloku *Embedded MATLAB Function* z nabídky Tools / Edit Data/Ports

Tímto se k výstupu přiřadí převodový poměr z matice N_t v jejím druhém sloupci. Výsledné číslo, udávající v matici souřadnici pro řádek, zároveň představuje převodový stupeň. Proto je možné zapsat souřadnici pro načtení převodového poměru stupně o jedna nižšího (oproti současnému zařazenému stupni N_{i2}) rozdílem $N_{i2}-1$. Při tomto zápisu ale dochází ke kolizi při zařazeném prvním stupni, protože je odkazováno na neexistující souřadnici matice v nultém řádku. Proto je k číslu řádku ještě přičítána jednička pro případ, kdy je hodnota rozdílu $N_{i2}-1$ nulová. Toho je docíleno přičtením $0^{(N_{i2}-1)}$. V druhém bloku *Embedded MATLAB Function* z dolní pozice na obr. 2.8 je funkce zapsána jako (obr. 2.10 dole)

$$y = N_t (N_{i2}+1-0^{(-N_{i2}+5)}, 2);$$

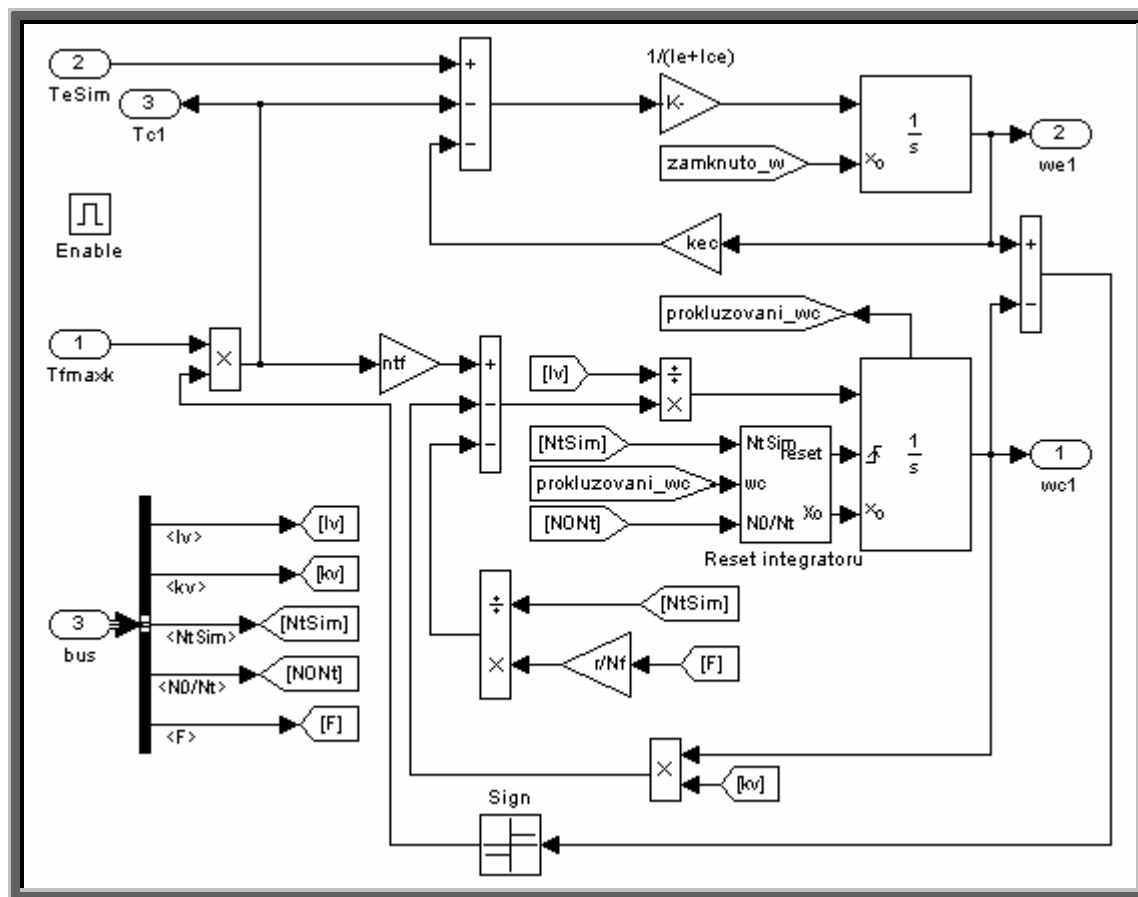
Ze stejného důvodu jako u horního bloku je číslo řádku opět upravováno pro případ, kdy je odkazováno mimo rozsah matice, tj. při zařazeném 5. stupni. Odečtením $0^{(-N_{i2}+5)}$ se v potřebné chvíli upraví číslo řádku z hodnoty 6 na 5. Znaménka v závorce nelze zapsat opačně, protože by při záporném exponentu došlo k dělení nulou.

2.1.5 Prokluzování

Tento aktivovaný subsystém (obr. 2.12) provádí výpočet úhlových rychlostí obou kotoučů spojky podle rovnic (2.1) a momentu přenášeného spojkou (2.3), vše pro režim *prokluzování* (obr. 2.3). Značení proměnných v modelu je následující:

- $I_E = I_e + I_{ce}$,
- $I_V = I_v$,
- $T_c = T_{c1}$,
- $k_E = k_{ec}$,
- $k_V = k_v$,
- $N_0/N_t = N_0N_t$,
- $\omega_e = \omega_{e1}$,
- $\omega_c = \omega_{c1}$,
- $\eta_{tf} = \eta_t$.

Část signálů potřebných v rovnicích je do aktivovaného subsystému přivedena běžnými vstupy jako jednotlivé signály, ostatní jsou tedy vedeny přes sběrnici *bus*. Signál sběrnice je rozložen blokem *Bus Selector* na jednotlivé signály a ty rozvádí dál v rámci tohoto subsystému bloky *Goto*.



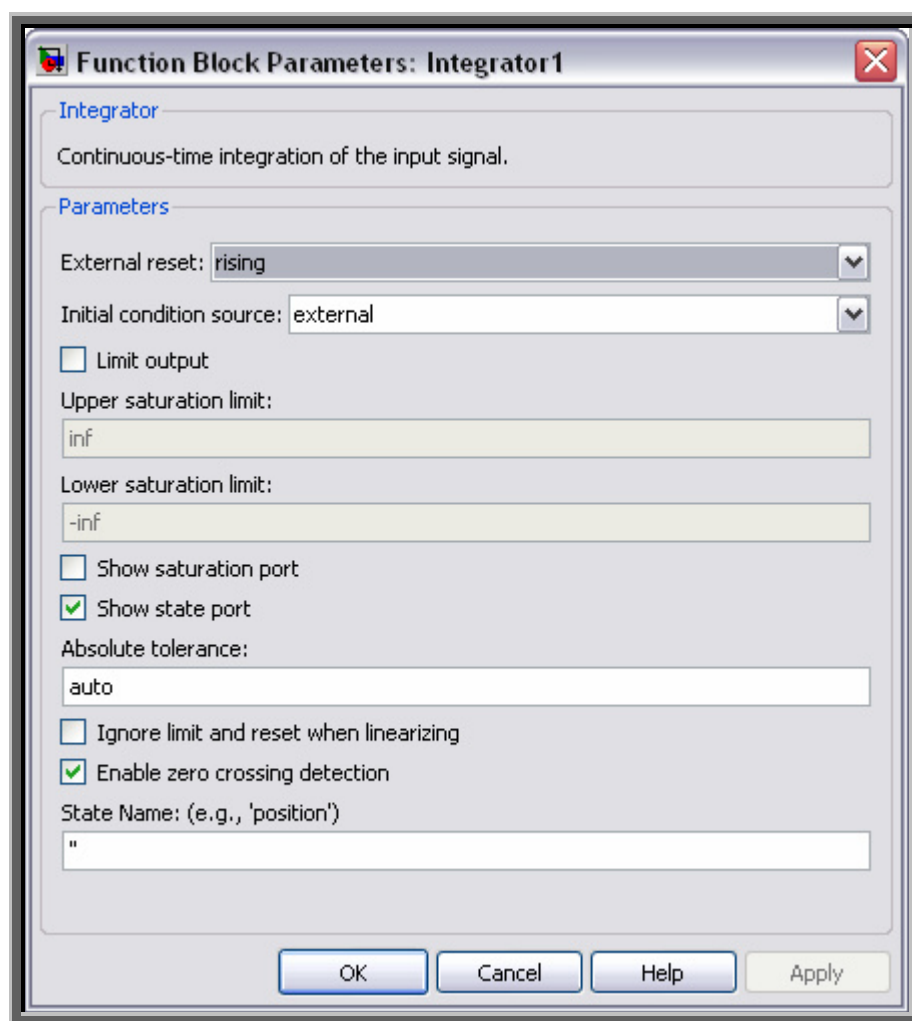
Obr. 2.12 Subsystém Prokluzování

Důležité je v této části modelu správné nastavení a řízení integračních bloků. Pro integrátor úhlového zrychlení motoru stačí přenastavit parametr *Initial condition source* z *internal* na *external*. Vnější zdroj počátečního stavu je v tomto případě blok *From* s *Tag*-em *zamknuto_w*. Znamená to, že při spuštění režimu spojky *prokluzování* začne tento integrační blok výpočet při takové rychlosti, u které přerušil své výpočty aktivovaný subsystém pro režim *zamknuto*.

Složitější je nastavení a řízení integračního bloku úhlového zrychlení druhého kotouče spojky (obr. 2.13). Jeho otáčky se totiž mění při každé změně převodového poměru, jak je popsáno v prvním odstavci kap. 2.1.4. Tato změna otáček je v modelu řešena resetováním příslušného integračního bloku na požadované otáčky. Setrvačná energie rotačních hmot, která se takto při změně otáček vymaže, je zanedbatelná. Nastavení tedy zahrnuje zadání parametrů:

- *External reset: rising* → Resetuje integrál (výpočet začne z hodnoty signálu *Initial condition* ve vstupu x_0), pokud se signál *reset* změní ze záporného čísla nebo z nuly na kladné číslo.

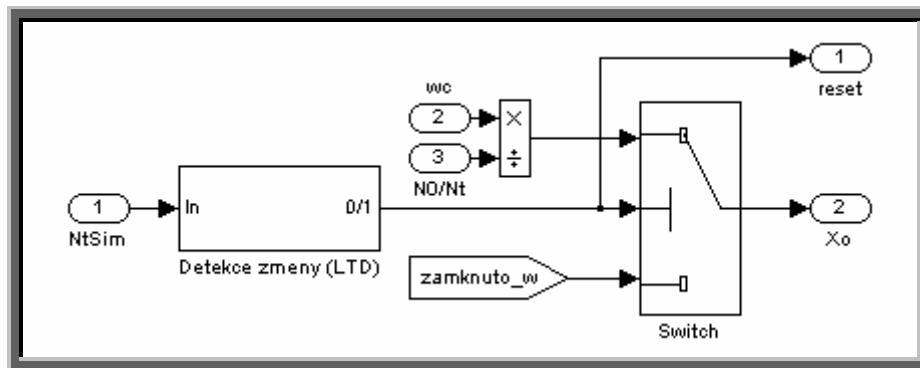
- *Initial condition source*: *external* → Stejně jako u prvního integračního bloku umožňuje použít pro počáteční stav místo pevné hodnoty vnější signál, který se může dynamicky v průběhu simulace měnit.
- *Show state port* → Zatrhnutím se zapne další výstup z bloku, kde je shodný signál s hlavním výstupem – s jedinou výjimkou. Při resetování bloku v nynějším časovém kroku je na výstupu *state port* hodnota, která by se objevila na hlavním výstupu, pokud by nebyl blok resetován. Aktuální hodnota integrace se totiž na výstupu *state port* objevuje v časovém kroku dříve než na hlavním výstupu. Použitím tohoto výstupu lze předcházet vytváření algebraických smyček v případech sebe-resetování bloků *Integrator* a při řízení počátečních stavů integrátorů z jednoho aktivovaného subsystému do dalšího.



Obr. 2.13 Nastavení integrátoru s výstupem *wc1*

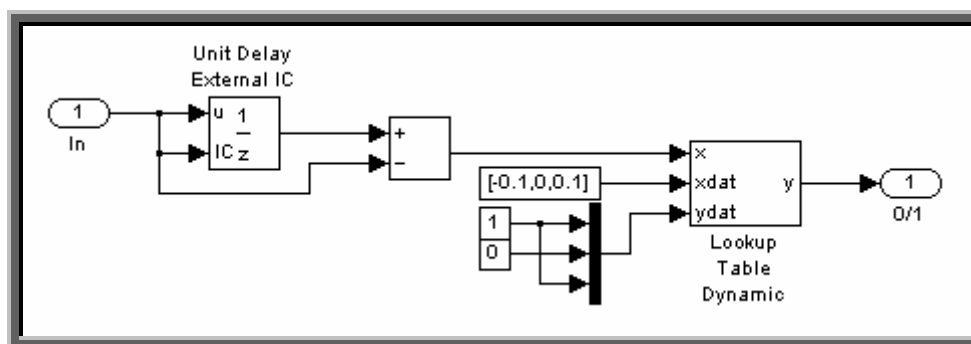
Řízení integrátoru obstarává subsystém *Reset integrátoru* (obr. 2.14). Aby bylo možné měnit otáčky při řazení a zároveň umožnit přepínání režimů spojky, je třeba střídat signály vstupu x_0 bloku *Integrator*. V okamžiku přecházení musí mít signál *Initial condition* integrátoru hodnotu podílu úhlové rychlosti ω_c z posledního iteračního kroku se signálem $N0/Nt$ (viz. popis v prvním odstavci kap. 2.1.4). Signál ω_c je veden z výstupu *state port* integrátoru přes

blok *Goto* s *Tag*-em *prokluzování_wc*. Mimo okamžik přecházení má signál x_o klasicky hodnotu úhlové rychlosti z posledního iteračního kroku integrátoru z aktivovaného subsystému *Zamknuto* pro načtení počátečního stavu při přepnutí režimů spojky. Tento signál je veden (stejně jako u integrátoru s výstupem *we1*) z bloku *From* s *Tag*-em *zamknuto_w*.

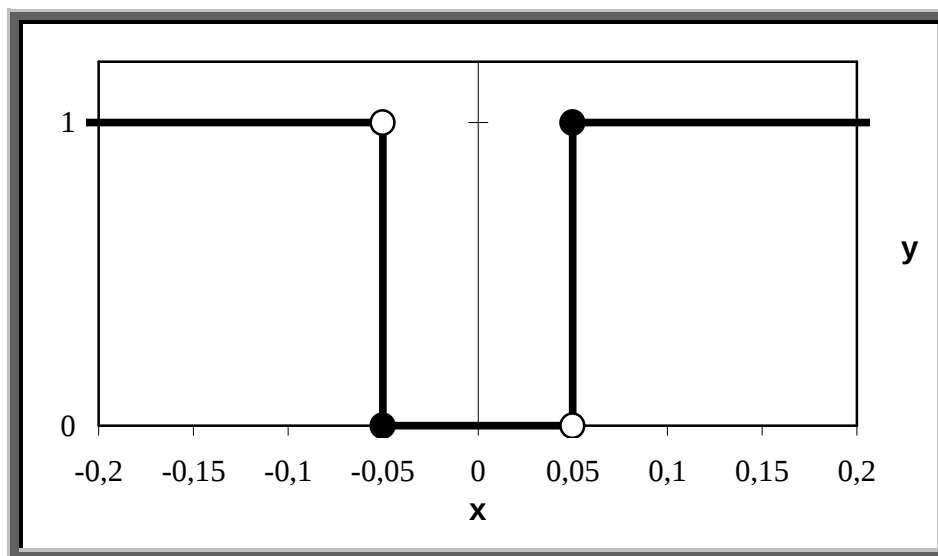


Obr. 2.14 Subsystém Reset integrátoru pro režim prokluzování

Úkol zjišťování, kdy dochází k přecházení, má na starost subsystém *Detekce změny (LTD)* (obr. 2.15). Nabízí se sice použití samostatného bloku Simulinku *Detect Change*, ale při jeho zapojení model nefunguje správně. Je to způsobeno charakterem jeho výstupu (k resetování docházelo 2x hned po sobě) a faktem, že tento blok nemá vstup pro externí počáteční stav (k resetování docházelo také při každém aktivování subsystému *Prokluzování*). Princip použité detekce změny využívá bloku *Unit Delay External IC* k získání signálu s hodnotou předchozího iteračního kroku. Vstupní signál zároveň definuje i počáteční stav. Tím je zajištěno, že se při spuštění celého aktivovaného subsystému *Prokluzování* počítá se stejnou hodnotou předchozí iterace, jako je ta současná, a není tak zjištěna změna signálu při každém aktivování tohoto subsystému. V další části modelu je změna současné hodnoty signálu oproti předchozí dána rozdílem obou hodnot. Blok *Lookup Table Dynamic* je pak řízen tímto signálem a rozhoduje, jestli došlo ke změně vstupního signálu do subsystému. Závislost výstupu y na vstupu x bloku *Lookup Table Dynamic* je na obr. 2.16. Hodnoty mezí pro přepnutí výstupu y musí být dostatečně malé, aby byla zaregistrována změna vstupního signálu. Zde se jedná o změnu převodového poměru, kde je změna sousedních hodnot vždy větší než zvolená mez 0.1 (resp. 0.05). Blok *Lookup Table Dynamic* má parametr *Lookup Method* nastaven na *Use Input Nearest*. Při detekování změny vstupního signálu do subsystému je výstupem hodnota 1 a to až do doby dalšího iteračního kroku, kdy je výstupním signálem opět hodnota 0.



Obr. 2.15 Subsystém Detekce změny (LTD)

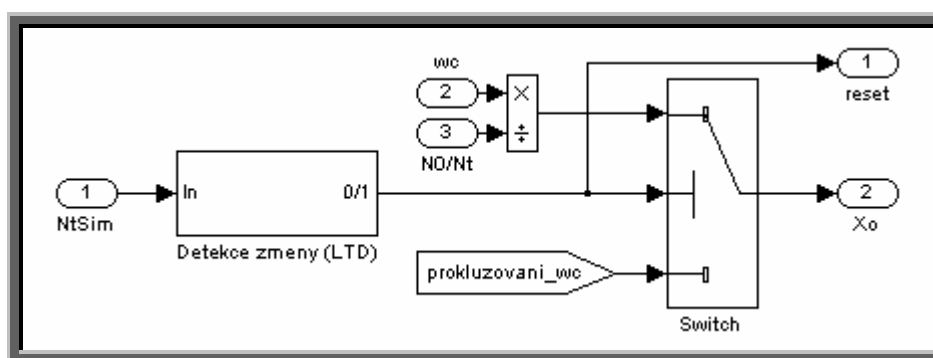


Obr. 2.16 Graf závislosti výstupu y na vstupu x bloku *Lookup Table Dynamic*

Výstup subsystému *Detekce změny (LTD)* je signálem, který resetuje integrátor, a zároveň řídicím signálem bloku *Switch* pro rozhodování, která hodnota počátečního stavu x_0 bude použita. Nastavení bloku *Switch* zahrnuje zadání parametru *Criteria for passing first input* na $u2 \approx 0$. Tento zápis znamená, že při vstupním signálu různém od nuly bude na výstup puštěn první vstup tohoto bloku a při nulové hodnotě vstupu poslední.

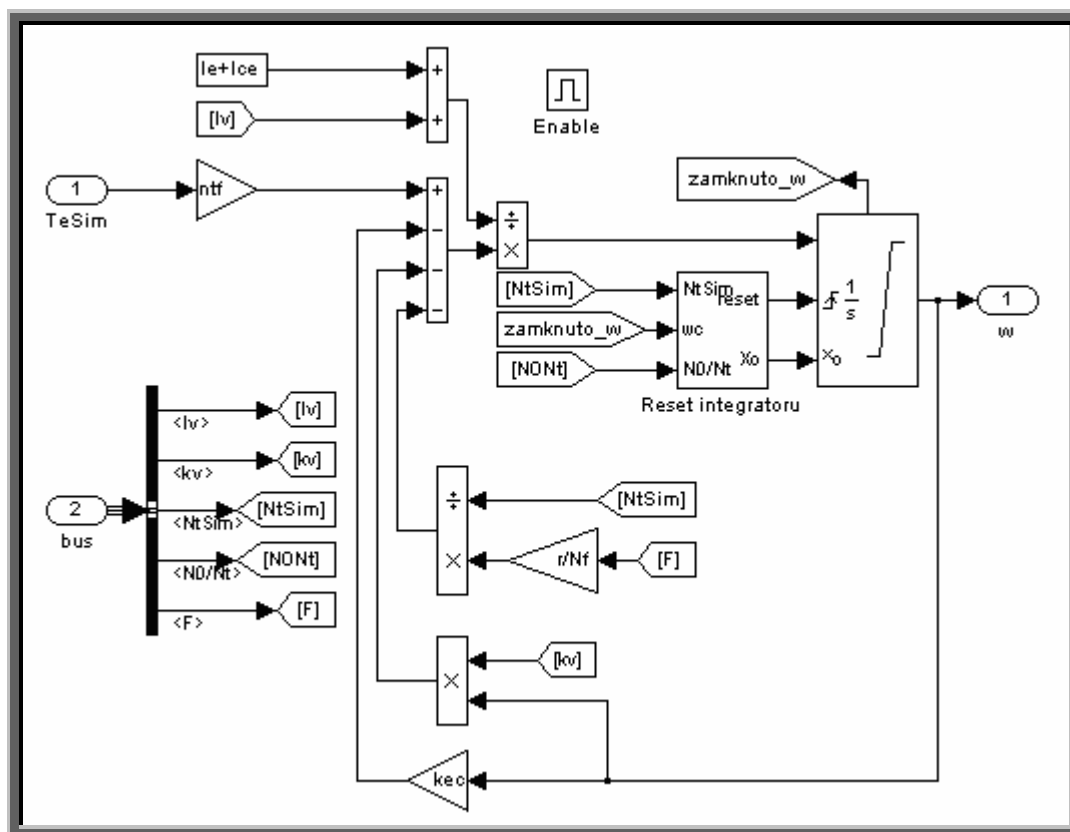
2.1.6 Zamknuto

Druhý aktivovaný subsystém (obr. 2.18) části modelu *Spojka* má na starost výpočet společné úhlové rychlosti obou kotoučů spojky při režimu *zamknuto* podle rovnice (2.4). Přehled rovnic obou režimů a podmínek jejich přepínání je na obr. 2.3. V modelu tohoto režimu již nefiguruje blok *Sign*, protože při zamknuté spojce není třeba měnit smysl přenášeného momentu rozdílem úhlových rychlostí kotoučů spojky, jako tomu bylo u režimu *prokluzování*. Moment přenášený spojkou v této rovnici vůbec nefiguruje a je modelován v subsystému *Řízení třecích režimů*. Označení proměnných je zde stejné jako u subsystému *Prokluzování*. Shodné je také řízení integrátoru, kde jsou jen upraveny názvy některých použitých signálů. Signálu z výstupu *state port* bloku *Integrator* přísluší v bloku *Goto*



Obr. 2.17 Subsystém Reset integrátoru pro režim *zamknuto*

pojmenování *zamknuto_w*. Název musí totiž souhlasit s *Tag*-em použitým v bloku *From*, který řídí vstup x_0 bloku *Integrator* (obr. 2.14 a 2.12) v prvním aktivovaném subsystému *Prokluzování*. Stejně je přejmenován *Tag* bloku *From*, který vstupuje do zdejšího subsystému *Reset integrátoru* (obr. 2.17), z *prokluzování_wc* na *zamknuto_w*. Nakonec je stejným principem záměny změněn i parametr *Goto Tag* bloku *From*, který je v subsystému *Reset integrátoru*, ze *zamknuto_w* na *prokluzování_wc*. Což je jediná změna tohoto subsystému oproti tomu, který je použitý v režimu *prokluzování*.

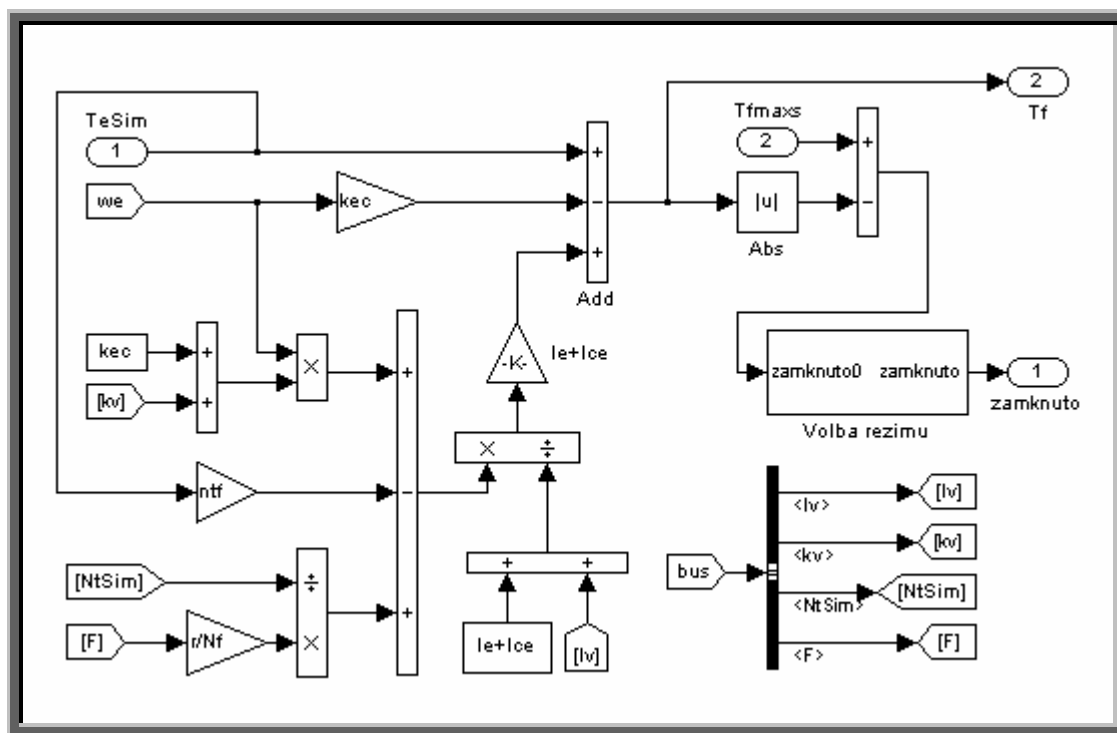


Obr. 2.18 Subsystém *Zamknuto*

2.1.7 Řízení třecích režimů

Přepínání mezi režimy *prokluzování* a *zamknuto* obstarává subsystém s názvem *Řízení třecích režimů*. Signál sběrnice *Bus* (stejně jako některé další signály) je zde přiveden přímo přes blok *From*, protože už se nejedná o aktivovaný subsystém a není proto potřeba přivádět signály přes vstupní bloky *Inport*. Vymodelovaná rovnice z obr. 2.19 v levé části před blokem s názvem *Add* odpovídá vztahu (2.5) pro výpočet momentu T_c přenášeného spojkou v režimu *zamknuto* (neboli T_f). Tento vztah udává při jakémkoli třecím režimu, jaký by byl přenášený moment uprostřed soustavy hnacího ústrojí, kdyby se měl přenášet v režimu *zamknuto* při aktuálních otáčkách motoru ω_e . Pokud tento moment přeroste hodnotu třecího momentu T_{fmax} a spojka zrovna pracuje v režimu *zamknuto*, dojde k jejímu přepnutí do režimu *prokluzování*. Signál T_f je pak vyveden ze subsystému, kde je s pojmenováním T_{c2} rozveden blokem *Goto* jako moment spojky v režimu *zamknuto* (obr. 2.4). V tomto subsystému je následně absolutní hodnota $T_f(T_c)$ odečtena od třecího momentu T_{fmax} . Tím vznikl signál *zamknuto0*, který podle svého vztahu k nule pomáhá řídit přepínání režimů spojky (v souladu s podmínkami řízení na

obr. 2.3). Dalším faktorem, který ovlivňuje řízení režimů spojky, je rozdíl úhlových rychlostí obou jejích kotoučů. Tyto dva řídicí signály zpracovává subsystém *Volba režimu* (obr. 2.20), kde jsou vyhodnoceny, a výstupním signálem je pak řídicí signál s názvem *zamknuto*, který ovládá řídicí vstupy obou aktivovaných subsystémů – *Prokluzování* a *Zamknuto*.



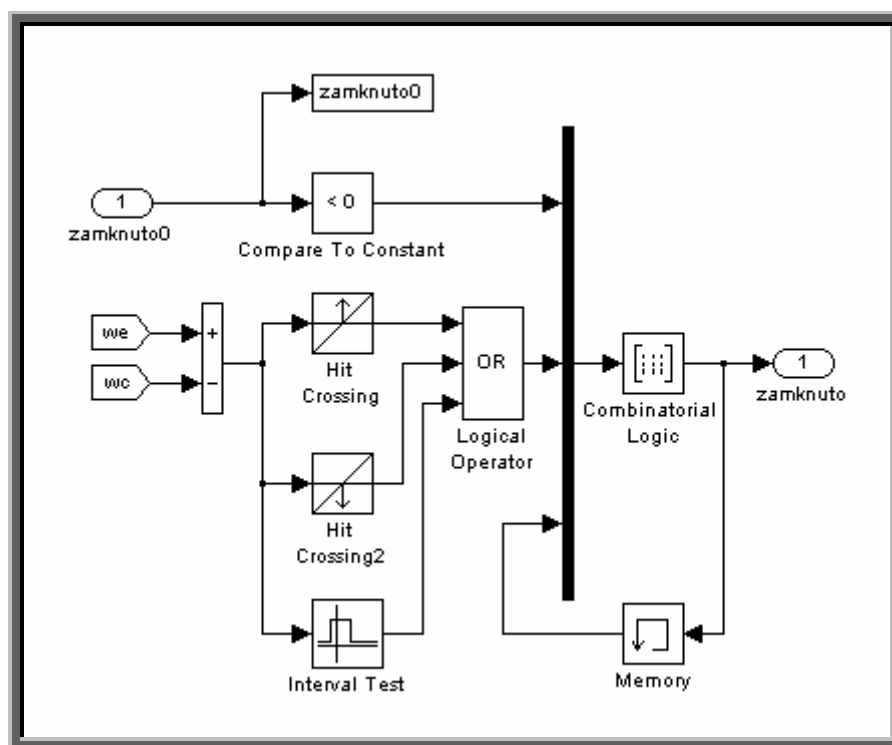
Obr. 2.19 Subsystém Řízení třecích režimů

Vyhodnocování provozních kombinací stavů řídicích signálů probíhá pomocí bloku *Combinatorial Logic*. Ten představuje logickou tabulku, jejíž sloupec výsledků tvoří množinu hodnot, které jsou podle stavu vstupních signálů vybírány jako výstup bloku. Vstupní signály tedy jsou:

1. *zamknuto0* → Blok *Compare To Constant* zjišťuje vztah tohoto signálu k nule. Pokud je jeho hodnota menší než nula (dle podmínek na obr. 2.3), je výstupem bloku signál *True* (v ostatních případech je na výstupu *False*). Spojka pak musí být v režimu *prokluzování*. Při kladné nebo nulové hodnotě signálu *zamknuto0* je o režimu spojky rozhodnuto podle aktuální kombinace se stavů dalších řídicích signálů.
2. $\omega_e - \omega_c$ → Účelem tohoto signálu je zjistit, jestli jsou srovnané otáčky obou kotoučů spojky. Rozdíl těchto úhlových rychlostí je zpracováván celkem třemi bloky. Každý z nich při zjištění, že signál splňuje danou podmínku, vyše na svůj výstup signál *True*. Sjednocení těchto tří signálů do jednoho řídicího zajišťuje blok *Logical Operator*, který má nastaveny 3 vstupy a parametr *Operator* na *OR*. Kdykoli je tedy alespoň 1 vstupní signál *True*, vyše tento blok *True* také na svůj výstup. První dvě podmínky jsou definovány bloky *Hit Crossing*. Jeden má nastaven parametr *Hit crossing offset* na -0.01, druhý 0.01 a *Hit crossing direction* je u obou bloků jako *either*. Pomocí těchto bloků dojde při překročení zadané hodnoty rozdílu úhlových rychlostí (blízkému nule) k přepnutí z režimu

prokluzování do zamknuto. Aby pak byla správně detekována nulová rychlost, je zde ještě třetí blok, *Interval Test*, který má při hodnotě vstupního signálu v intervalu $(-0.01, 0.01)$ na svém výstupu *True*. Důvodem pro takovéto vyhodnocování rozdílu úhlových rychlostí místo použití jednoho bloku *Hit Crossing* s nastavením obousměrné detekce překračování nulové hodnoty je, že takové řízení reagovalo až po nějaké době, přičemž vstupní signál (rozdíl úhlových rychlostí) kolísal kolem nuly. Navíc se při těchto kolísavých průbězích ω_e a ω_c neustále přepínal směr přenášeného momentu spojky. Ve zvoleném řešení musí být hranice intervalu pro detekování nastaveny dostatečně velké, aby řídicí signál při simulaci vždy alespoň v jednom výpočetním kroku spadl do tohoto intervalu, přičemž Simulink v tomto místě automaticky aplikuje svůj minimální časový krok. U použitých bloků *Hit crossing* Simulink počítá kroky před a po překročení definované hodnoty, a proto musí být nastavená obousměrná detekce, aby stačil jen jeden časový krok, kdy musí být hodnota řídicího signálu v daném intervalu.

3. *memory* → Posledním signálem, potřebným pro zvolení aktuálního režimu spojky, je informace o jejím režimu v předchozím iteračním kroku. Jednoduše stačí vést výstup bloku *Combinatorial Logic* přes blok *Memory* jako další řídicí signál. Režim *zamknuto* má hodnotu *True* a *prokluzování False*.



Obr. 2.20 Volba režimu

Sloučení řídicích signálů do vektoru obstarává blok *Mux*. Pořadí jeho vstupů je odshora dolů, horní signál je tedy zároveň prvním prvkem vektoru. Logiku řízení pak definuje logická tabulka (tab. 2.1). Sloupec výsledků je pro každou kombinaci vyplněn na základě úvahy podle významu jednotlivých řídicích signálů. Pokud je v prvním sloupci hodnota 1, musí být výsledný signál vždy 0 (*prokluzování*). K nulám v prvním sloupci vždy přísluší, s výjimkou prvního řádku, výsledek 1. První řádek je totiž případ, kdy byla spojka naposledy v režimu

prokluzování, ale ještě nedošlo ke srovnání otáček kotoučů spojky. Pro nastavení bloku *Combinatorial Logic* stačí do parametru *Truth table* zapsat sloupec výsledků *zamknuto*:

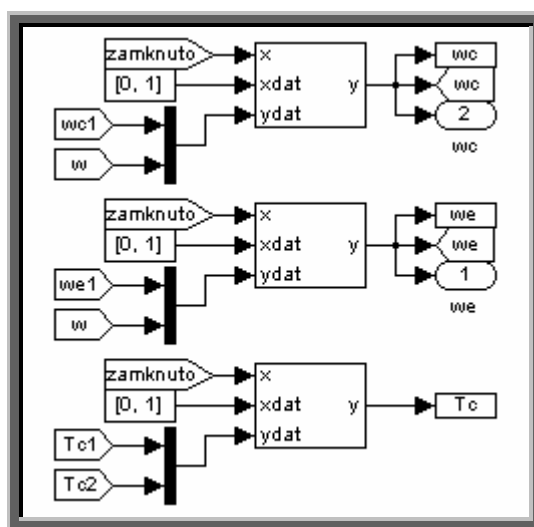
[0;1;1;1;0;0;0;0].

Tab. 2.1 Logická tabulka pro řízení režimů spojky

1.	2.	3.	zamknuto
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

2.1.8 Spojitý signál

Použitým principem spojky, kdy se mezi sebou střídají dva aktivované subsystémy, se rozdělují jednotlivé počítané veličiny do dvou signálů. K získání jednoho spojitého signálu každé veličiny je potřeba zároveň se střídáním režimů spojky střídát i vstupní signály, které zapisují do sloučené proměnné. K tomu lze použít bloky *Lookup Table Dynamic* (obr. 2.21).

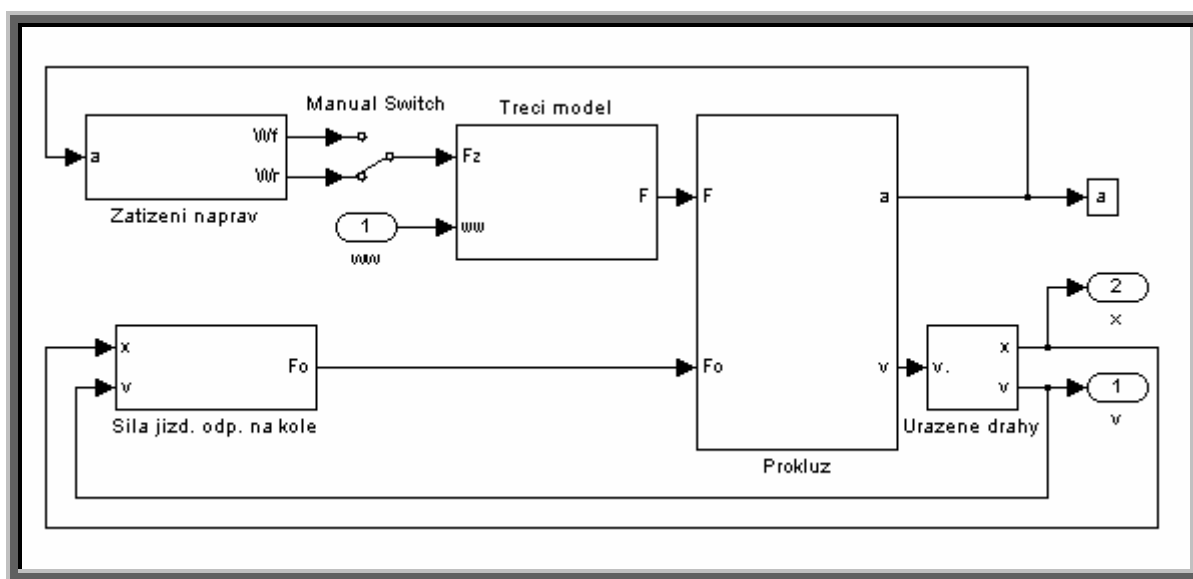


Obr. 2.21 Subsystém Spojitý signál

Ty totiž umožňují dynamicky v průběhu simulace měnit hodnoty v tabulce, které jsou posílány na výstup. Řídicím signálem x bloku *Lookup Table Dynamic* u všech tří slučovaných proměnných, ω_e , ω_k a T_c , je signál *zamknuto*, který řídí také samotné přepínání činnosti aktivovaných subsystémů. Hodnoty vektoru *xdat* odpovídají dvěma možným stavům řídicího signálu 0 a 1. Vektor *ydat* je složen ze dvou prvků, přičemž první představuje signál vytvořený činností subsystému *Prokluzování* a signál druhého prvku pochází ze subsystému *Zamknuto*. Vytvoření vektoru *ydat* ze simulovaných signálů obstarává blok *Mux*. Bloky *Lookup Table Dynamic* mají nastavený parametr *Lookup Method* na *Use Input Below*. Pro jejich správnou činnost je možné v tomto případě použít jakoukoli vyhledávací metodu kromě interpolací. Nakonec je spojitý signál všech veličin ukládán do proměnné v prostředí *Workspace* pomocí bloku *To Workspace*. Obě úhlové rychlosti kotoučů spojky jsou pak ještě vyvedeny ze subsystému bloky *Outport* a také rozvedeny do modelu pomocí bloků *Goto* (parametr *Tag Visibility* je nastaven na *global*).

2.2 Prokluz kol

Druhá výpočetní část modelu hnacího ústrojí vozidla má název *Prokluz kol* (obr. 2.22). Důvodem takového pojmenování je, že se zde modeluje přenos sil mezi hnacími koly a vozovkou. Tyto síly působí z jedné strany přes kola na hnací ústrojí vozidla a z druhé strany také na setrvačnou hmotu vozidla, jejíž urychlování je řešeno právě v této části modelu. Základní struktura *Prokluzu kol* se skládá z několika subsystémů. Prvním je *Zatížení náprav*, kde probíhají výpočty normálových sil na vozovku u přední a zadní nápravy v závislosti na jízdní dynamice a stoupání vozovky. Blokem *Manual Switch* lze dvojklikem přepnout na požadovanou hnací nápravu, která bude uvažována v simulaci. Signál dál pokračuje jako normálová síla hnací nápravy do subsystému *Třecí model*. Zde je na základě této normálové síly a hodnoty prokluzu počítána aktuální síla, ať už kladná nebo záporná, mezi koly a vozovkou. K výpočtu hodnoty prokluzu je potřeba také signál s úhlovou rychlostí kol (přepočítané na obvodovou rychlost) pro porovnání s rychlostí vozidla. Úhlová rychlost kol je přivedena blokem *Inport* a dál pokračuje jako druhý vstup do subsystému *Třecí model*. Další

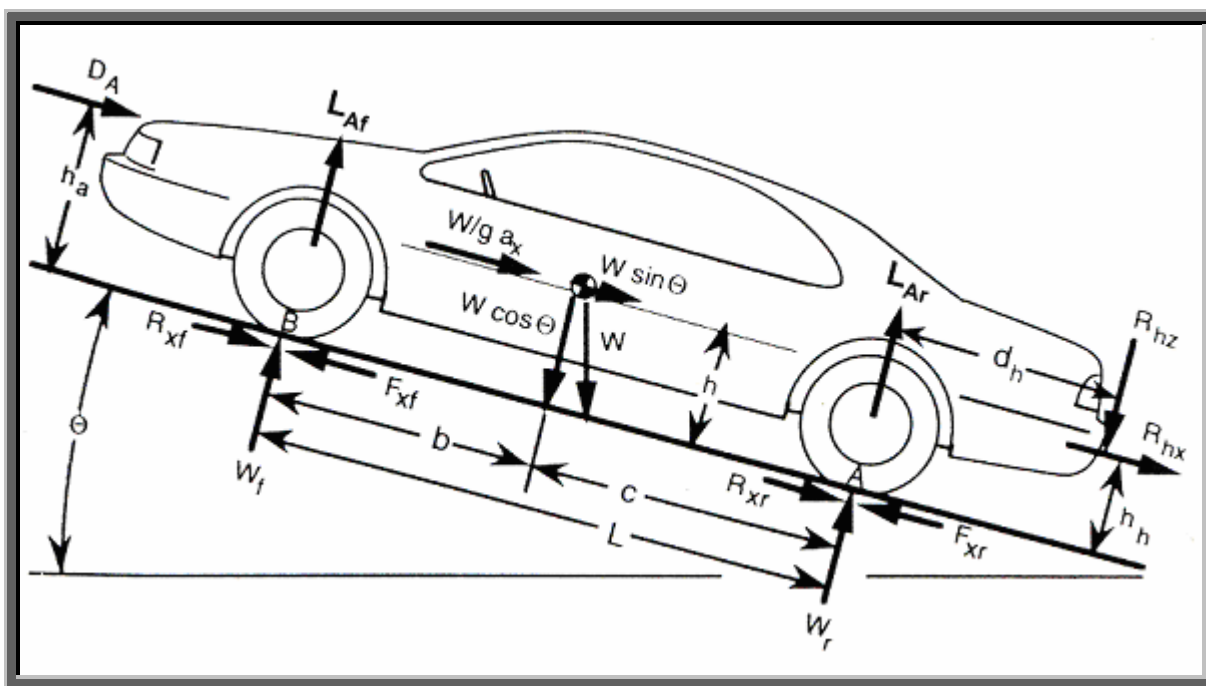


Obr. 2.22 Základní struktura subsystému *Prokluz kol*

subsystém, *Síla jízdních odporů na kole*, má na výstupu součet všech brzdných sil, které při jízdě působí na vozidlo, v závislosti na aktuální rychlosti vozidla. V posledním subsystému *Prokluz* je sestavena rovnice dynamického pohybu hmoty vozidla při působení hnací síly a jízdních odporů. Oba výstupní signály subsystému *Prokluz* jsou pak ukládány k dalšímu použití v MATLABu pomocí bloků *To Workspace*. U signálu s rychlostí se tak děje v následujícím subsystému *Uražené dráhy*, kde jsou počítány průběhy tří uražených drah – ve směru vodorovném, svislém a dráha dle tvaru vozovky. Všechny tyto signály jsou ukládány do prostředí *Workspace*. Rychlost je odtud rozvedena blokem *Goto* (parametr *Tag Visibility: global*) a spolu s dráhou dle tvaru vozovky tvoří výstupy pro subsystém *Uražené dráhy* i *Prokluz kol*.

2.2.1 Zatížení náprav

Výpočty zatížení přední a zadní nápravy jsou založeny na rovnicích, které vychází z obr. 2.23, kde jsou zakresleny potřebné rozměry vozidla a působící síly. Výsledné síly W_f a W_r jsou pak vyjádřeny z momentové rovnováhy k bodům A a B. Podélné hnací síly F_{xf} , F_{xr} a síly valivého odporu R_{xf} , R_{xr} se do momentové rovnováhy neuvažují, protože směřují přímo do bodů A a B, takže k nim tyto síly mají nulové rameno i moment. Uvažují se síly jízdního odporu vzduchu D_a , setrvačné síly od hmoty vozidla při zrychlování nebo zpomalování, síla W od tíhového zrychlení s působištěm v těžišti vozidla, vztlačové síly L_{Af} , L_{Ar} a síly působící v tažném zařízení R_{hz} , R_{hx} .



Obr. 2.23 Charakteristické rozměry vozidla a síly, které na něj působí [5]

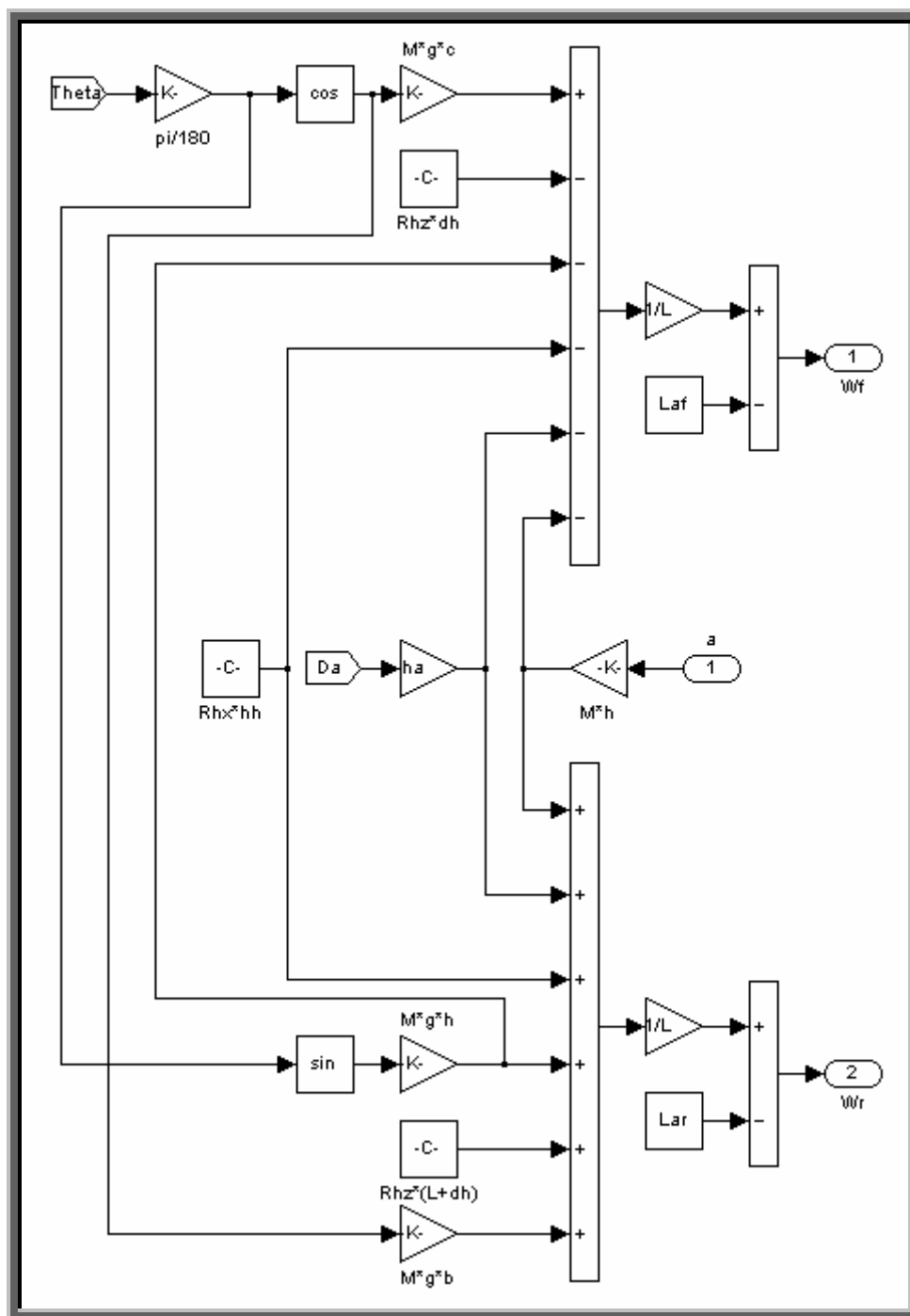
Momentová rovnováha k bodu A pro výpočet síly na přední nápravě je:

$$D_A h_a + L_{Af} L + W_f L + \frac{W}{g} a_x h + W \sin(\theta) h - W \cos(\theta) c + R_{hz} d_h + R_{hx} h_h = 0.$$

Úpravou této rovnice je vyjádřeno W_f :

$$W_f L = W \cos(\Theta) c - D_A h_a - L_{Af} L - \frac{W}{g} a h - W \sin(\Theta) h - R_{hz} d_h - R_{hx} h_h,$$

$$W_f = \frac{W \cos(\Theta) c - D_A h_a - \frac{W}{g} a h - W \sin(\Theta) h - R_{hz} d_h - R_{hx} h_h}{L} - L_{Af}.$$



Obr. 2.24 Model pro výpočet zatížení náprav

Analogicky platí také momentová rovnováha k bodu B pro výpočet síly na zadní nápravě:

$$D_A h_a + \frac{W}{g} ah + W \sin(\Theta)h + W \cos(\Theta)b - L_{Ar} L - W_r L + R_{hz} (L + d_h) + R_{hx} h_h = 0.$$

Rovnice je opět upravena pro vyjádření W_r :

$$W_r L = D_A h_a + \frac{W}{g} ah + W \sin(\Theta)h + W \cos(\Theta)b - L_{Ar} L + R_{hz} (L + d_h) + R_{hx} h_h,$$

$$W_r = \frac{D_A h_a + \frac{W}{g} ah + W \sin(\Theta)h + W \cos(\Theta)b + R_{hz} (L + d_h) + R_{hx} h_h}{L} - L_{Ar}.$$

Získané rovnice jsou vymodelované na obr. 2.24. Síla od jízdního odporu vzduchu D_a a průběh úhlu stoupání vozovky Θ jsou generovány v subsystému *Síla jízdních odporů na kole* a sem je přivádí bloky *From*. Jednotlivé sčítané členy z vyjádřených rovnic jsou pak do modelu zadány parametrem *Constant value* v blocích *Constant* nebo pomocí bloků *Gain*.

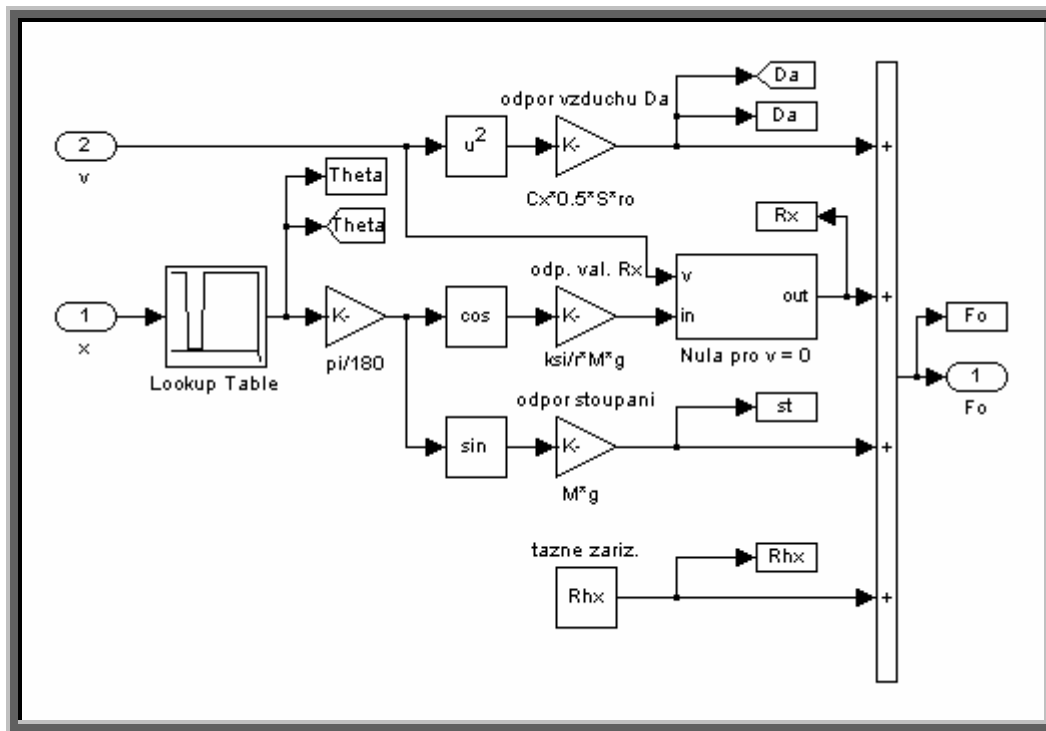
Použité veličiny v této části modelu znamenají:

- $L \Rightarrow$ rozvor náprav,
- $b \Rightarrow$ vzdálenost těžiště od přední nápravy,
- $c \Rightarrow$ vzdálenost těžiště od zadní nápravy,
- $h \Rightarrow$ vzdálenost těžiště od vozovky,
- $h_a \Rightarrow$ vzdálenost působíště odporu vzduchu od vozovky,
- $h_h \Rightarrow$ vzdálenost působíště tažného zařízení od vozovky,
- $d_h \Rightarrow$ vzdálenost působíště tažného zařízení od zadní nápravy,
- $L_{af} \Rightarrow$ aerodynamický vztlak působící na přední nápravu vozidla,
- $L_{ar} \Rightarrow$ aerodynamický vztlak působící na zadní nápravu vozidla,
- $R_{hz} \Rightarrow$ vertikální síla působící v tažném zařízení,
- $R_{hx} \Rightarrow$ podélná síla působící v tažném zařízení,
- $M \Rightarrow$ hmotnost vozidla,
- $g \Rightarrow$ tíhové zrychlení,
- $\Theta \Rightarrow$ úhel stoupání vozovky. Protože je zadáný ve stupních, musí být v modelu přepočítán na radiány vynásobením hodnotou $\pi/180$.

2.2.2 Síla jízdních odporů na kole

Do výsledné síly jízdních odporů F_o , vztažené na obvod kola, jsou zahrnuty tyto síly:

- odpor vzduchu D_a ,
- valivý odpor R_x ,
- odpor stoupání,
- síla v tažném zařízení R_{hx} .



Obr. 2.25 Subsystem Síla jízdních odporů na kole

Odpor vzduchu se mění s druhou mocninou rychlosti vozidla, jak vyjadřuje výpočtová rovnice [6]:

$$D_a = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad [N], \quad (2.7)$$

kde je $C_x \Rightarrow$ součinitel odporu vzduchu [-],
 $\rho \Rightarrow$ hustota vzduchu [kg/m^3],
 $v \Rightarrow$ rychlost vozidla [m/s],
 $S \Rightarrow$ čelní plocha vozidla v průmětu do roviny kolmé k podélné ose vozidla [m^2].

Velikost valivého odporu už na rychlosti nezávisí a při jízdě je konstantní. K zahrnutí valivého odporu od všech čtyř kol do výpočtu stačí zadat jako normálovou sílu k vozovce součet jednotlivých sil od každého kola. Rovnice odporu valení je vyjádřena vztahem [7]:

$$R_x = \xi \frac{W}{r} \quad [N], \quad (2.8)$$

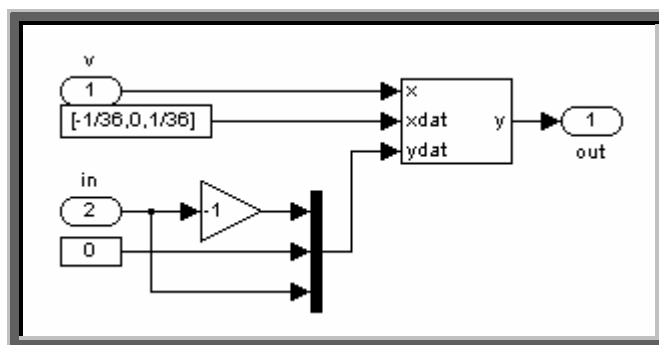
$$W = Mg \cos(\Theta) \quad [N],$$

kde je $\xi \Rightarrow$ rameno valivého odporu [m],
 $W \Rightarrow$ normálová síla k vozovce od všech kol [N],
 $M \Rightarrow$ hmotnost vozidla [kg],
 $g \Rightarrow$ gravitační zrychlení [m/s^2],
 $\Theta \Rightarrow$ úhel stoupání vozovky [rad],
 $r \Rightarrow$ poloměr kol vozidla [m].

Odpor stoupání musí být uvažován při jakémkoli náklonu vozovky, kdy je část síly od tíhového zrychlení promítnuta do směru jízdy. Funkcí sinus je zajištěna změna znaménka při záporném úhlu stoupání. Velikost je vyjádřena rovnicí:

$$F_{st} = Mg \sin(\Theta) \quad [N]. \quad (2.9)$$

Poslední uvažovanou silou jízdních odporů je síla v tažném zařízení R_{hx} . Je zahrnuta především pro úplnost. Při skutečné jízdě se její velikost mění v závislosti na dynamice jízdy, což není předmětem řešení této práce. Zadání poslední síly je tedy omezeno zápisem konstanty.



Obr. 2.26 Řízení valivého odporu

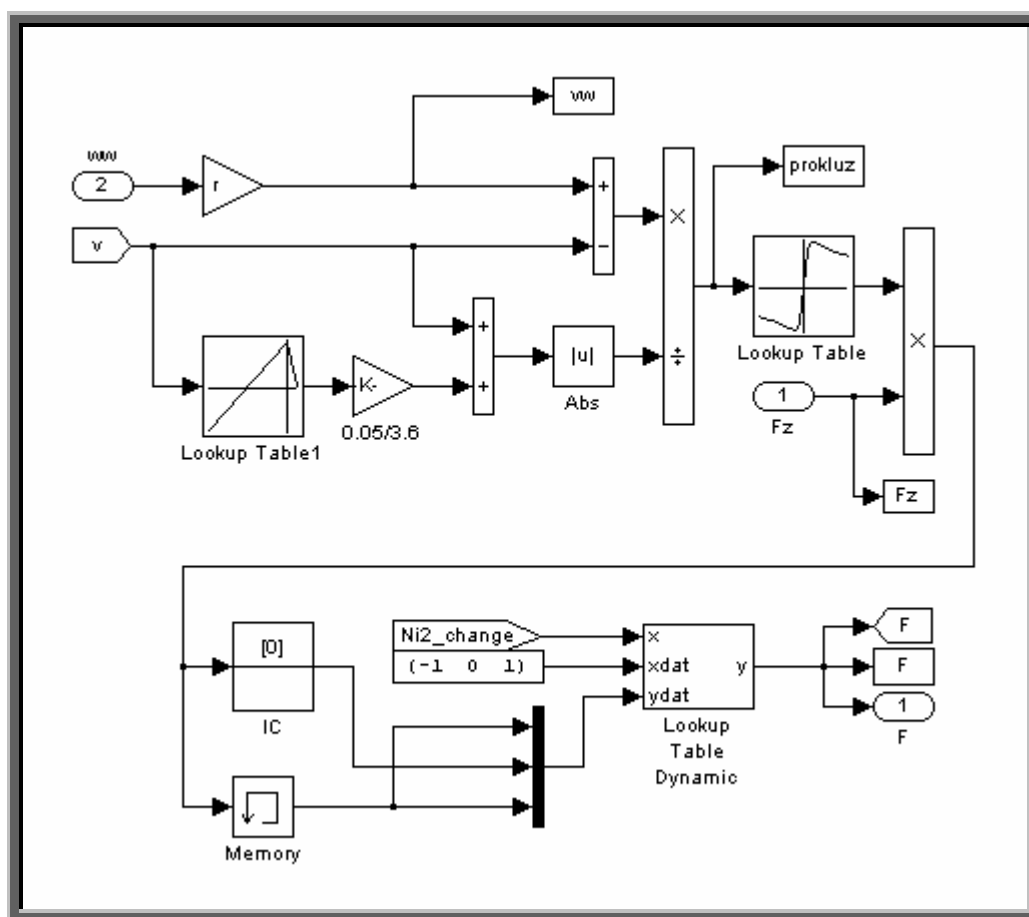
V modelu (obr. 2.25) jsou konstantní proměnné jednotlivých rovnic (2.7), (2.8) a (2.9) zapsány do bloků *Gain*, sílu v tažném zařízení pak určuje parametr v bloku *Constant*. Druhou mocninu rychlosti v rovnici odporu vzduchu počítá blok *Math Function*, který má parametr *Function* nastaven jako *square*. Další odpory, valení a stoupání, jsou závislé na aktuálním úhlu naklonění vozovky. Průběh tohoto úhlu *Theta* v závislosti na skutečné ujeté dráze (dle tvaru vozovky) generuje blok *Lookup Table*, jehož parametr *Vector of input values* je zadán jako *xTheta*, *Table data: Theta0* a *Lookup method: Interpolation-Use End Values*. Goniometrické funkce sinus a cosinus jsou zastoupeny pomocí bloků *Trigonometric Function*, do kterých vstupuje průběh úhlu *Theta* po převedení na radiány vynásobením hodnotou $\pi/180$. Dále je v modelu řízena síla valivého odporu, která musí být nulová, pokud je nulová i rychlost vozidla a k žádnému valení tedy nedochází. Toho je docíleno subsystémem *Nula pro v=0* (obr. 2.26), který posílá nulovou hodnotu valivého odporu při rychlosti vozidla v intervalu $(-0,05; 0,05)$ km/h a mění znaménko této odporové síly při couvání (musí působit vždy proti směru jízdy). Parametr *Lookup Method* použitého bloku *Lookup Table Dynamic* je nastaven na *Use Input Nearest*, tzn. že při hodnotě řídicího signálu *x* (rychlost) mezi body charakterizovanými ve vektoru *xdat* blok použije hodnotu bližšího bodu. V případě hraniční hodnoty řídicího signálu je uvažováno zaokrouhlení směrem nahoru (průběh závislosti vstupu *x* na výstupu *y* má stejný charakter jako na obr. 2.16). Couvání vozidla nastává jen v krátkém okamžiku při rozjezdu vozidla do kopce a dosažená záporná rychlost je tak malá, že změnu znaménka u síly odporu vzduchu lze zanedbat (při rychlosti 5 km/h je hodnota odporové síly vzduchu přibližně 1 N). Průběhy všech jednotlivých odporových sil, celkové odporové síly a průběh úhlu stoupání vozovky jsou ukládány do pracovního prostředí *Workspace* použitím bloků *To Workspace*. Navíc velikosti odporu vzduchu D_a a úhlu stoupání vozovky *Theta* rozvádí bloky *Goto* do dalších částí modelu. Parametr *Tag Visibility* je v obou případech zadán jako *global* a umožňuje tak viditelnost rozesílaných proměnných v celém modelu.

2.2.3 Třecí model

Účelem tohoto subsystému (obr. 2.27) je získání signálu s průběhem síly mezi hnacími koly vozidla a vozovkou. Při působení hnací nebo brzdné síly na kolech vozidla dochází vždy k určitému prokluzu kol a to i při volné jízdě, kdy na kolech působí jen síly jízdních odporů. Závislost mezi prokluzem kol a velikostí působící síly mezi koly a vozovkou se stanovuje na základě měření. Pro konkrétní pneumatiku je tento vztah zadán grafem s průběhem síly vzhledem k velikosti prokluzu (obr. 2.28). Výpočet hodnoty prokluzu určuje rovnice

$$P = \frac{r\omega_w - v}{v} \quad [-], \quad (2.10)$$

kde je $r \Rightarrow$ poloměr hnacích kol [m],
 $\omega_w \Rightarrow$ úhlová rychlost hnacích kol [rad/s],
 $v \Rightarrow$ rychlost vozidla [m/s].



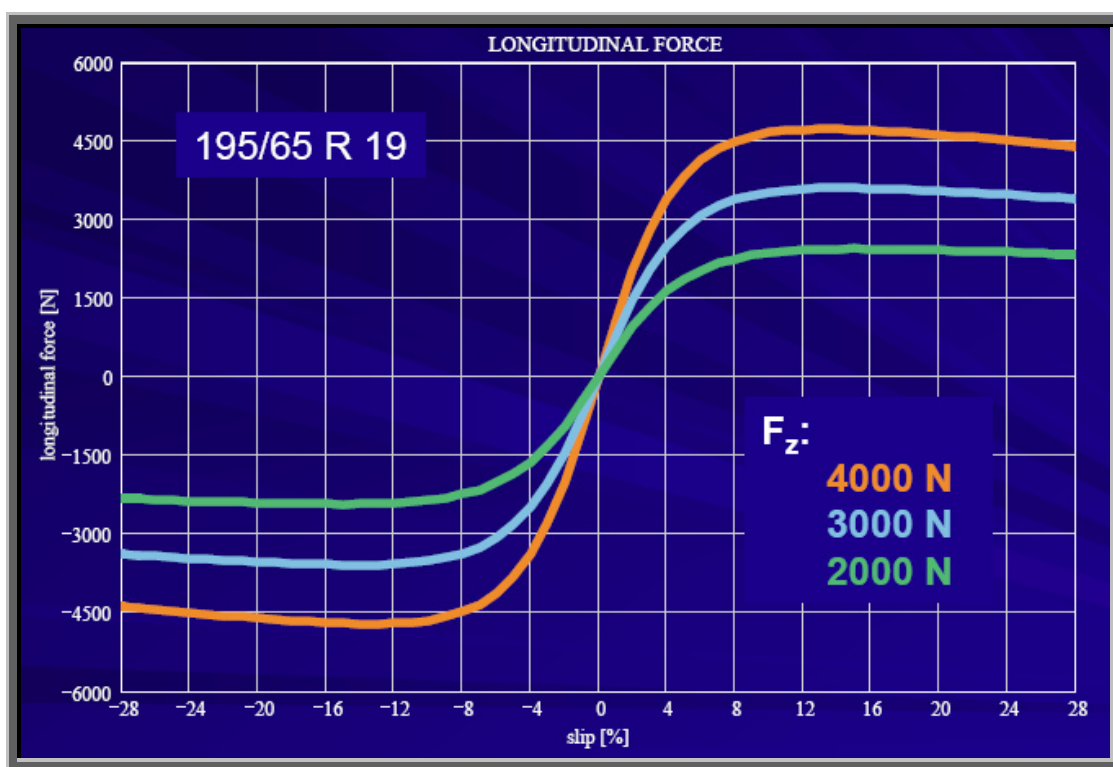
Obr. 2.27 Subsystém Třecí model

Hodnota prokluzu musí být pro začátek simulace upravována, protože dochází k situaci, kdy je rychlost vozidla stále nulová při nenulové obvodové rychlosti hnacích kol a ve výpočtovém vztahu (2.10) by se pak dělilo nulou. Řešení problému pomocí přičítání malé hodnoty k aktuální rychlosti ve jmenovateli sice vyřeší problém s dělením nulou, ale hodnota prokluzu v této chvíli vyskočí na příliš vysoké číslo. Hnací síla pak odpovídá tomuto prokluzu

a je proto také nereálně vysoká. Při rozjíždění a postupném zvětšování hnací síly uvolňováním spojky se tedy musí prokluz zvětšovat postupně a s ním i odpovídající hnací síla. Během simulace dochází ke vzájemnému ovlivňování mezi prokluzem a hnací silou – ta urychluje (zpomaluje) hnací ústrojí a také vozidlo. Rozdílem rychlostí těchto dvou členů je pak stanoven prokluz a k němu příslušná hnací síla. Pokud je hnací síla moc velká, prokluz se sníží, protože při rozjíždění tato síla zpomaluje hnací ústrojí a urychluje vozidlo. Tím dojde i ke snížení hnací síly. Tato regulace funguje v obou směrech a dochází tak k automatickému přizpůsobování prokluzu a hnací síly podle aktuálního stavu celé soustavy. Aby tedy hnací síla v začátku rozjíždění odpovídala skutečnosti, je k aktuální rychlosti ve jmenovateli rovnice (2.10) přičítána hodnota $0.05/3.6\text{m/s}$ a to až do dosažení rychlosti 0.5km/h . Takové opatření zajistí:

- dostatečně malou hodnotu prokluzu pro začátek rozjezdu,
- zmenšení rozdílu dvou po sobě jdoucích hodnot prokluzu v sousedních výpočtových krocích simulace.

Druhý bod je důležitý z toho důvodu, že při rychlých změnách velikosti prokluzu dochází ke kolísání hnací síly kolem skutečné hodnoty (zejména při nízké rychlosti). Přičtením dané hodnoty k rychlosti ve jmenovateli se zjemní skoky automatické regulace hnací síly a ta pak lépe odpovídá skutečnosti. Pro zesílení tohoto efektu je v začátku simulace zvolena hodnota maximálního časového kroku 0.0001s (jinak 0.01s), protože i ten ovlivňuje velikost změn v sousedních iteračních krocích. V okamžiku, kdy přestane zkreslování prokluzu, dojde k jeho drobné změně, která je zanedbatelná. Výsledkem tedy je, že do rychlosti vozidla 0.5km/h dochází k určitému zkreslování prokluzu a dalších signálů, které s ním souvisí. Nad touto rychlostí vše odpovídá daným rovnicím a zadaným hodnotám.



Obr. 2.28 Průběh závislosti síly mezi koly a vozovkou na prokluzu [8]

V modelu řídí zmíněné zkreslování blok *Lookup Table1*. Zajišťuje přiřítání zvolené hodnoty z bloku *Gain* tím, že jeho výstupním signálem je 1, -1 nebo 0. Znaménka odpovídají aktuálnímu směru rychlosti vozidla a nulová hodnota vypíná zkreslování po dosažení rychlosti zadané parametrem *vp0* (ze souboru *Parametry.m*). Nastavení bloku *Lookup Table* je:

- *Vector of input values*: [-1,0,vp0/3.6],
- *Table data*: [-1,1,0],
- *Lookup method*: Use Input Below.

Díky absolutní hodnotě před dělicí větví bloku *Product* je směr hnací síly určen rozdílem obvodové rychlosti hnacích kol a rychlosti vozidla. V bloku *Lookup Table* dochází podle hodnoty prokluzu k volbě podílu normálové síly F_z a vynásobením s její hodnotou vzniká signál s průběhem hnací síly F . Parametry bloku *Lookup Table* jsou nastaveny:

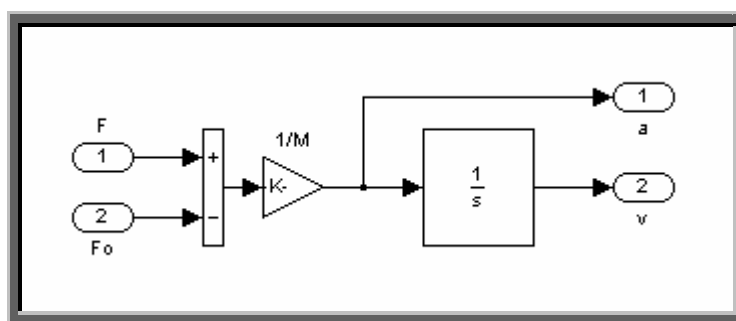
- *Vector of input values*: slip,
- *Table data*: mikt,
- *Lookup method*: Interpolation-Use End Values.

Ve spodní části subsystému jsou do signálu hnací síly vkládány bloky *Initial Condition* nebo *Memory* pro přerušení algebraických smyček. K tomu účelu by stačil i samotný blok *Initial Condition*, ale v okamžiku řazení docházelo ke zkreslování hnací síly. Proto je v těchto výpočetních krocích vřazován blok *Memory*, který použije hodnotu z předchozího kroku. Signál N_{i2_change} pochází ze subsystému $N0/N_t$ a určuje okamžiky řazení. Podle něj se řídí blok *Lookup Table Dynamic*, který má nastavený parametr *Lookup Method* na *Use Input Below*. Pro urychlení průběhu simulace je možné vřadit jen samotný blok *Memory*, čímž dojde k zanedbatelnému zkreslení vlivem použití hodnoty hnací síly F z minulého výpočetního kroku.

2.2.4 Prokluz

Signály v této části modelu dále pokračují do subsystému *Prokluz*. Jeho úkolem je řešit pohybovou rovnici, kde působí síla mezi koly a vozovkou na hmotu vozidla, které je tak urychlováno nebo zpomalováno. Tato rovnice je dána vztahem

$$Ma = F - F_o, \quad (2.11)$$



Obr. 2.29 Subsystém Prokluz

kde je $M \Rightarrow$ hmotnost vozidla $[kg]$,
 $a \Rightarrow$ zrychlení vozidla $[m/s^2]$,
 $F \Rightarrow$ síla mezi koly a vozovkou působící na vozidlo $[N]$,
 $F_o \Rightarrow$ síla jízdních odporů působících na vozidlo $[N]$.

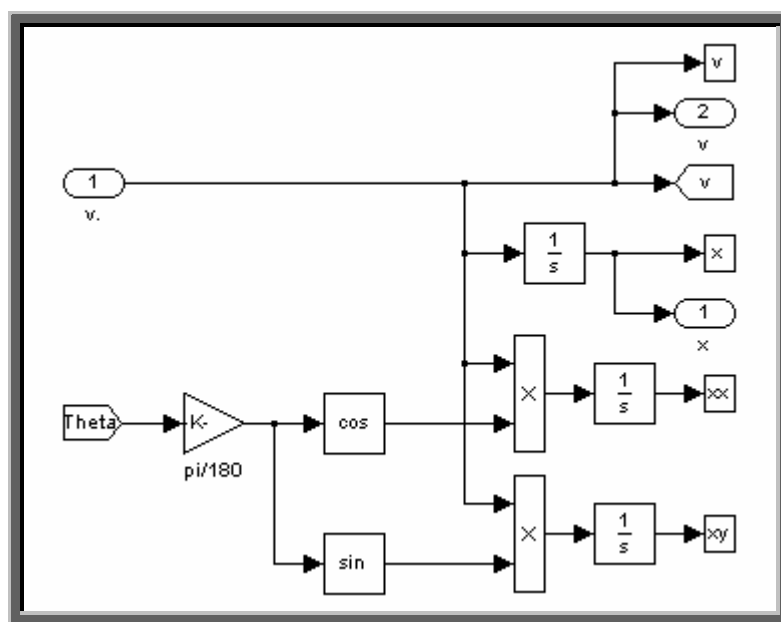
Do modelu této rovnice (obr. 2.29) vstupují působící síly přes bloky *Inport* a do výstupních bloků *Outport* vede rychlost vozidla v a zrychlení a . Podělení hmotou M zajišťuje blok *Gain* a následnou integraci *Integrator*.

2.2.5 Uražené dráhy

Poslední subsystém (obr. 2.30) části modelu *Prokluz kol* počítá průběhy tří ураžených drah:

- ve směru vodorovném,
- ve směru svislém,
- průběh skutečně ураžené dráhy vozidlem podle tvaru zakřivení vozovky ve svislé rovině.

Jediným vstupem subsystému z bloku *Inport* je rychlost vozidla v . Průběh úhlu stoupání vozovky θ je přiveden ze subsystému *Síla jízdních odporů na kole* blokem *From*. Z průběhu rychlosti v a případně úhlu θ , který je převedený blokem *Gain* na radiány, jsou pak integrací získány průběhy jednotlivých drah. Skutečně ураžená dráha určená tvarem vozovky vychází přímo ze signálu s průběhem rychlosti v v bloku *Inport*. Dráhy ve svislém a vodorovném směru vznikají integrací rychlostí promítnutých do těchto směrů. Průběh vodorovné rychlosti je získán vynásobením původní rychlosti cosinem úhlu θ a u svislé rychlosti je stejně použita funkce sinus. Tyto funkce modelují bloky *Trigonometric Function*. Průběhy všech drah a původní rychlosti jsou pak ukládány bloky *To Workspace* a původní dráha tvoří výstup subsystému spolu s rychlostí, která je dál rozvedena blokem *Goto*.



Obr. 2.30 Subsystém Uražené dráhy

2.3 Ovládání vozidla

Poslední částí modelu hnacího ústrojí je *Ovládání vozidla* (obr. 2.31). Ovládáním se rozumí řízení velikosti normálové síly na spojce, hodnoty točivého momentu motoru (vynásobením průběhu z momentové charakteristiky podílem z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, neboli ovládání škrticí klapky) a volba převodových stupňů pro řazení během jízdy. Vstupními signály z bloků *Inport* jsou aktuální rychlost vozidla v , skutečná uražená dráha vozidlem dle tvaru vozovky x a úhlová rychlost motoru ω_e .

Signál v je řídicím signálem bloku *Lookup Table*, kde je na základě rychlosti v zvolen pracovní (ne pro okamžité zařazení) převodový stupeň N_i . Nastavení tohoto bloku (obr. 2.32) zahrnuje zadání parametrů

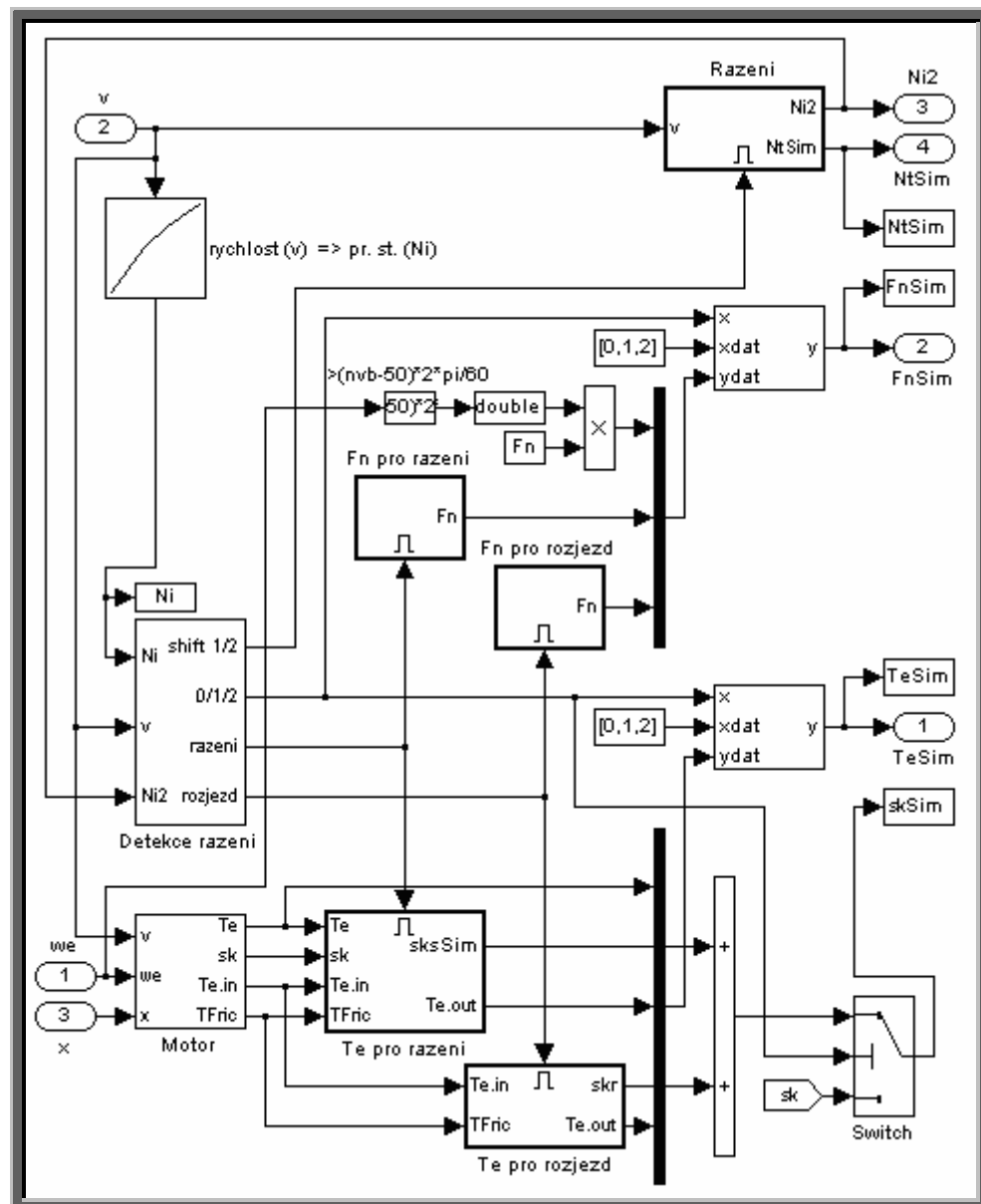
- *Vector of input values*: $N_t(:,4)/3.6$
- *Table data*: $N_t(:,3)$,
- *Lookup method*: Use Input Below.

Zapsané vektory se načítají z matice N_t v souboru *Parametry.m*. Dvojtečka v závorce znamená výběr všech řádků a následující číslo značí sloupec. Protože jsou v matici N_t zadány rychlosti v jednotkách km/h , je nutné načtené hodnoty v prvním parametru převést na základní jednotku m/s dělením hodnotou 3.6. Parametr *Lookup method* je nastaven jako *Use Input Below*. Dál signál rychlosti v vstupuje také do subsystémů *Řazení*, *Motor* a spolu s výstupním signálem bloku *Lookup Table*, pracovním převodovým stupněm N_i , tvoří vstupy subsystému *Detekce Řazení*. Zde probíhá volba průběhů ovládacích veličin podle jízdního režimu (*rozjezd*, *jízda* a *řazení*). Signál výstupu *shift 1/2* aktivuje při své kladné hodnotě subsystém *Řazení*, kde dochází ke zvolení aktuálního řazeného převodového stupně N_{i2} a převodového poměru N_{tsim} podle rychlosti vozidla. Hodnota 1 nebo 2 tohoto řídicího signálu určuje, jestli dojde k podřazení nebo zařazení. Signály posledních dvou výstupů *řazení* a *rozjezd* aktivují subsystémy s průběhy pro požadovaný jízdní režim. Druhý výstupní signál *0/1/2* subsystému *Detekce řazení* pak svou hodnotou 0, 1 nebo 2 řídí dva bloky *Lookup Table Dynamic*, které vybírají průběhy normálové síly spojky F_n a momentu motoru T_e pro aktuální jízdní režim:

- $0 \Rightarrow jízda \rightarrow$ Při běžné jízdě, kdy se neřadí a nejedná se o rozjíždění, jsou aktivované subsystémy s průběhy ovládacích veličin F_n a T_e díky nulové hodnotě řídicích signálů *rozjezd* a *řazení* vypnuty. Bloky *Lookup Table Dynamic* v této chvíli posílají na své výstupy signály z prvních vstupů bloků *Mux*. To znamená maximální hodnotu normálové síly spojky F_n (z bloku *Constant*) v případě, kdy jsou otáčky motoru vyšší než volnoběžné (jinak spojka vypne), a moment motoru T_e podle průběhu momentové charakteristiky a otevření škrticí klapky v závislosti na průběhu požadované rychlosti nebo aktivování omezovače otáček. Vynulování normálové síly spojky F_n je realizováno násobením její hodnoty s výstupem bloku *Compare To Constant*. Ten je řízen úhlovou rychlostí motoru ω_e a při poklesu otáček větším než $50min^{-1}$ pod volnoběžné otáčky n_{vb} vyšle na svůj výstup místo původního *True* signál *False*. Následně dojde k převodu tohoto signálu blokem *Data Type Conversion* na hodnotu 0 a násobení s hodnotou normálové síly spojky F_n blokem *Product*.
- $1 \Rightarrow řazení \rightarrow$ Tento režim se aktivuje dosažením zvolené rychlosti pro řazení, což signalizuje pracovní převodový stupeň N_i . Změnou hodnoty signálu N_i se zároveň spustí režim *řazení*. Hodnota 1 signálu *řazení* aktivuje subsystémy F_n

pro řazení a T_e pro řazení. Zbývající dva aktivované subsystémy zůstávají vypnuté, protože jsou ovládány řídicím signálem *rozjezd*. Na výstupech bloků *Lookup Table Dynamic* jsou nyní signály z druhých vstupů bloků *Mux* s průběhy pro řazení.

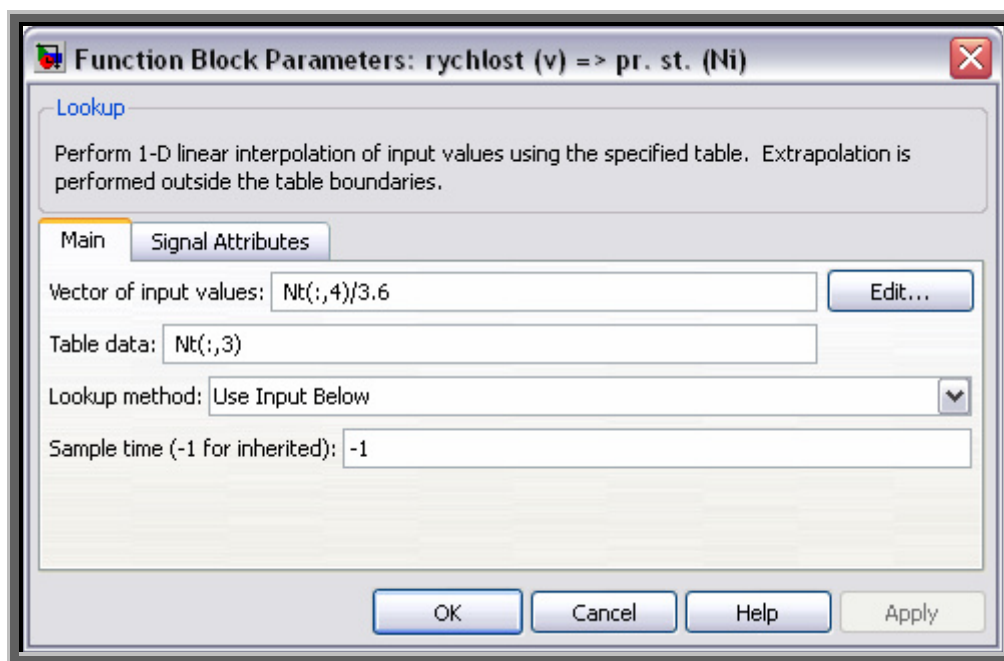
- 2 $\Rightarrow$ *rozjezd* $\rightarrow$ Je automaticky v činnosti pouze v začátku simulace po dobu trvání průběhu ovládacích veličin. Hodnota 1 řídicího signálu *rozjezd* spustí aktivované subsystémy F_n pro *rozjezd* a T_e pro *rozjezd*. Zbylé dva aktivované subsystémy jsou vypnuté, protože je řídí signál *řazení*.



Obr. 2.31 Základní struktura subsystému Ovládání vozidla

V nastavení parametru *Lookup Method* bloků *Lookup Table Dynamic* je zvoleno *Use Input Below*. Do vstupu *xdat* je pak u obou bloků veden signál z bloku *Constant* s vektorem

[0,1,2].



Obr. 2.32 Nastavení bloku Lookup Table pro volbu pracovního převodového stupně N_i

Další dva vstupní signály, úhlová rychlost motoru ω_e a skutečná uražená dráha vozidlem dle tvaru zakřivení vozovky ve svislé rovině x , pokračují do subsystému *Motor*. Zde je v závislosti na aktuální úhlové rychlosti motoru ω_e zvolen příslušný točivý moment T_e podle zadané charakteristiky motoru, dále tu probíhá výpočet brzdného momentu motoru a řízení škrticí klapky pro dosažení požadované rychlosti nebo pro omezování maximálních otáček motoru. Souvislý průběh signálu škrticí klapky sk_{Sim} je generován v pravé dolní části subsystému. Blokem *Switch* dochází k přepínání průběhů, které jsou v danou chvíli aplikovány. Při režimu *jízda* je platný průběh ze subsystému *Motor* a k bloku *Switch* je přiveden blokem *From*. V ostatních režimech (*rozjezd* a *řazení*) je brán průběh z příslušných aktivovaných subsystémů. V modelu jsou průběhy škrticí klapky obou režimů sečteny, protože subsystémy s jejich průběhy nejsou nikdy aktivovány současně a při vypnutém stavu mají na výstupech nulovou hodnotu. Blok *Switch* pak stačí nastavit pro přepínání mezi režimem *jízda* a ostatními režimy, což zajišťuje řízení signálem $0/1/2$ a nastavení parametru *Criteria for passing first input*: $u2 \sim 0$.

Na výstupech celého subsystému *Ovládání vozidla* jsou signály s průběhy ovládacích veličin F_{nSim} , T_{eSim} a také signály řazení N_{tSim} , N_{i2} . K dalšímu použití jsou tyto signály s označením *Sim*, průběh škrticí klapky sk_{Sim} a průběh pracovního převodového stupně N_i ukládány do prostředí MATLABu pomocí bloků *To Workspace*.

2.3.1 Detekce řazení

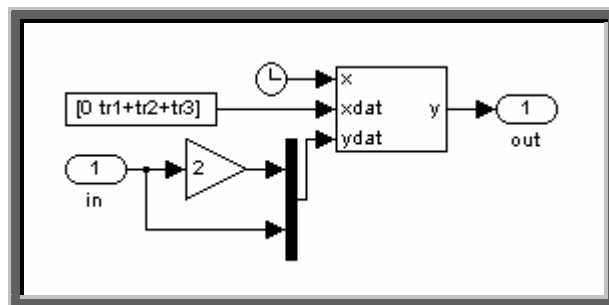
Tento subsystém (obr. 2.33) rozhoduje o aktuálním jízdním režimu vozidla – *rozjezd*, *jízda*, *řazení*. Řídicím signálem je zde pracovní převodový stupeň N_i a aktuálně zařazený převodový stupeň N_{i2} . Rozdíl hodnot těchto signálů je řídicím signálem bloku *Lookup Table Dynamic*. V okamžiku dosažení definované rychlosti řazení dojde ke změně signálu N_i , přičemž signál aktuálního zařazeného převodového stupně N_{i2} zůstává stejný. Blok *Lookup*

subsystémů, jak je popsáno výše. Dál signál pokračuje ze subsystému *Znásobení v začátku* do dvou bloků *Fcn*. U aktivovaného subsystému *Časování pro rozjezd* je nastaven parametr *Expression*:

$$0^{(2-u)}.$$

Druhý blok *Fcn* u *Časování pro řazení* má parametr *Expression* zadán jako

$$0^{(1-u+2*0^{(2-u)})}.$$



Obr. 2.34 Subsystém *Znásobení v začátku*

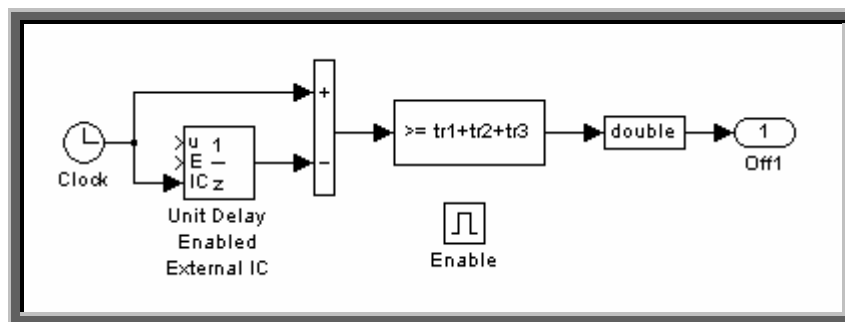
Tyto funkce zajistí, že budou spuštěny vždy jen ty aktivované subsystémy s průběhy ovládacích veličin a časováním, které odpovídají danému režimu jízdy. Výstupní signály bloků *Fcn* vystupují zároveň ze subsystému *Detekce řazení* přes bloky *Outport* pod názvy *rozjezd* a *řazení* a vedou tudíž k aktivovaným subsystémům s průběhy F_n a T_e . Spuštění režimu *rozjezd* v začátku simulace, kdy signály N_i a N_{i2} jsou stejné, zajišťuje blok *Initial Condition* vysláním hodnoty 1 (parametr *Initial value*) při startu simulace.

Subsystém *Časování pro rozjezd* (obr. 2.35) má jediný úkol – vypnout jízdní režim *rozjezd* a přejít tak na režim *jízda* po uplynutí doby působení příslušných průběhů ovládacích veličin F_n a T_e . V modelu je zachycen čas při spuštění aktivovaného subsystému blokem *Unit Delay Enabled External IC*. K tomu stačí vést do vstupu počátečního stavu *IC* signál s časovým průběhem simulace z bloku *Clock*. V okamžiku spuštění subsystému je hodnota tohoto signálu poslána na výstup bloku a nemění se, dokud nedojde k znovuzapnutí celého subsystému. Aby došlo k resetování stavů všech bloků při opětovném aktivování subsystému, je třeba nastavit parametr *States when enabling* bloku *Enable* na *reset*. Následně je doba od spuštění subsystému získána rozdílem aktuálního času simulace z bloku *Clock* a času, kdy byl spuštěn subsystém. Tento signál pak řídí blok *Compare To Constant*, který po dosažení stanovené hodnoty vstupního signálu pošle na svůj výstup signál *True*. Kvůli dalším operacím s tímto signálem je převeden pomocí bloku *Data Type Conversion* na běžné číslo. Doba do vypnutí režimu *rozjezd* je dána součtem dílčích časů, které definují průběh ovládacích veličin F_n a T_e . Parametr *Constant value* bloku *Compare To Constant* je tedy zapsán jako

$$tr1+tr2+tr3.$$

Význam jednotlivých časů popisuje kap. 2.3.4. Nakonec zbývá nastavit parametry bloku *Outport* s názvem *Off*:

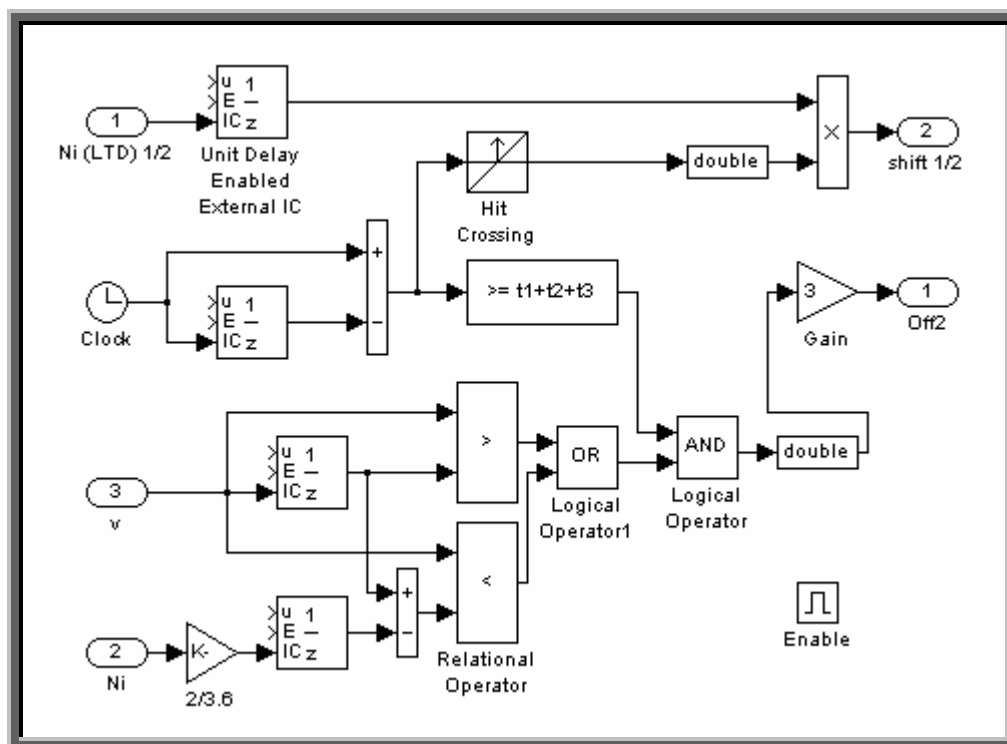
- *Output when disabled*: reset,
- *Initial output*: 0.



Obr. 2.35 Subsystem Časování pro rozjezd

Funkcí druhého aktivovaného subsystému Časování pro řazení (obr. 2.36) je vyslání těchto časově řízených signálů s hodnotou 1, 2 nebo 3:

- *shift 1/2* → Po uplynutí stanovené doby od aktivování subsystému Časování pro řazení tento signál získá hodnotu 1 nebo 2 (pro podřazení nebo zařazení) a tím aktivuje subsystém Řazení (obr. 2.37), čímž dojde k okamžité změně převodového poměru N_{tSim} a převodového stupně N_{i2} .
- *Off2* → Slouží pro vypnutí režimu řazení po uplynutí doby působení průběhů ovládacích veličin pro řazení a zároveň při splnění jedné z dalších dvou podmínek pro ukončení tohoto režimu. Jakmile signál *Off2* získá hodnotu 3, vyšle blok *Add* (obr. 2.33) vždy součet s hodnotou ≤ -1 do řídicího vstupu bloku *Relay*. Ten se přepne do vypnutého stavu a posílá na výstup hodnotu 0 (režim jízda). Zároveň tím dojde i k vypnutí aktivovaného subsystému Časování pro řazení.



Obr. 2.36 Časování pro řazení

Stavy všech signálů, které vstupují do subsystému *Časování pro řazení*, a signálu aktuálního času simulace z bloku *Clock* jsou při aktivování tohoto subsystému uloženy do bloků *Unit Delay Enabled External IC*. Okamžik zařazení, který je určen uplynutím zvolené doby od aktivování subsystému – od spuštění režimu *řazení*, je stanoven parametrem *Hit crossing offset* v bloku *Hit Crossing*, kde je odkazováno na konstantu ze souboru *Parametry.m* s názvem

tshift.

Druhý parametr tohoto bloku, *Hit crossing direction*, je zvolen jako

rising.

V okamžiku překročení stanovené doby pro zařazení vyšle blok *Hit Crossing* na svůj výstup signál *True*. Ten je blokem *Data Type Conversion* převeden na hodnotu 1 a vynásobením se signálem N_i (*LTD*) $1/2$ vzniká signál *shift 1/2*, který při své nenulové hodnotě provede okamžité podřazení/zařazení. Řízení vypínacího signálu *Off2* už je složitější, protože ho ovlivňuje víc faktorů. Ukončení režimu *řazení* je řízeno následujícími podmínkami:

- Uplynutí doby, která je potřebná k celému průběhu ovládacích veličin. Tato doba je určena součtem dílčích časů, které tyto průběhy definují.
- Překročení rychlosti, při které byl spuštěn režim *řazení*.
- Poklesnutí rychlosti pod hodnotu o 2x tolik *km/h* nižší, než byla rychlost při spuštění režimu *řazení*, na kolikátý převodový stupeň se bude řadit/podřazovat.

První podmínka musí být splněna vždy a u zbývajících dvou, jejichž současné splnění se navzájem vylučuje, musí být splněna jedna z nich. Logické řízení těchto podmínek zajišťují dva bloky *Logical Operator* s parametry *Operator* nastavenými na *OR* a *AND*. Splnění první podmínky určuje blok *Compare To Constant*, který má nastavené parametry *Operator* a *Constant value* jako

$\geq t_1+t_2+t_3$.

Zbývajících dvě podmínky jsou detekovány pomocí bloků *Relational Operator*, kde stačí nastavit příslušný parametr s porovnávacím znakem. Aby rychlost u spodního bloku *Relational Operator* byla snížena o správnou hodnotu v jednotkách *km/h*, je signál N_i násoben blokem *Gain* s hodnotou stejnojmenného parametru

$2/3.6$.

Díky zvolenému způsobu řízení pro vypnutí režimu *řazení* je možné realizovat automatické řazení vozidla během simulace při jízdě kopcovitým terénem. Např. v situaci, kdy je vozidlo schopno ještě mírně zrychlovat na aktuální převodový stupeň a dosáhne tedy hraniční rychlosti pro spuštění režimu *řazení* na vyšší stupeň, začne vozidlo po zařazení zpomalovat. Až rychlost dostatečně poklesne, což by se při alespoň minimálním zrychlení na nově zařazený převodový stupeň nestalo, dojde k ukončení režimu *řazení*. Nyní vozidlo jede s takovým zařazeným převodovým stupněm, který nekoresponduje s rychlostí vozidla. Signály N_i a N_{i2} jsou různé a jejich záporný rozdíl způsobí opětovné aktivování režimu *řazení* s cílem podřadit. Jakmile uplyne definovaná doba průběhů, může už být rychlost vozidla pod hranicí pro vypnutí režimu *řazení*, protože podřazením dojde k odebrání energie z pohybu vozidla pro urychlení motoru. Ať už rychlost pod tuto hranici poklesne nebo ne, bude vozidlo dál

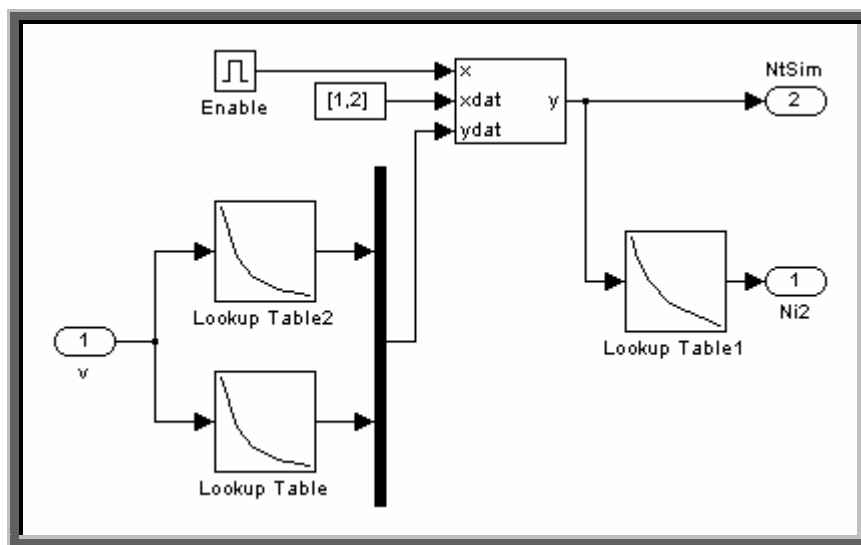
zrychlovat s aktuálním převodovým stupněm. Buď v režimu *řazení* k rychlosti, při které byl spuštěn, nebo v režimu *jízda* až k hraniční rychlosti pro další řazení. Správný průběh popsané situace by nebyl možný bez použití bloku *Memory* (obr. 2.33). Při jeho vyřazení dojde v okamžiku vyslání vypínacího signálu *Off2* k okamžitému vypnutí subsystému *Časování pro řazení*. A to znamená, že se vypínací signál *Off2* fyzicky v modelu vůbec neobjeví. V průběhu popsané jízdní situace, kdy má dojít k opětovnému aktivování režimu *řazení*, ve skutečnosti nedojde k vypnutí tohoto režimu (u aktivovaných subsystémů s průběhy ovládacích veličin) a reaguje jen aktivovaný subsystém *Časování pro řazení* tím, že se resetuje. Vřazením bloku *Memory* nedojde k sebe-vypnutí tohoto subsystému okamžitě, ale až v dalším časovém kroku. Vypínací signál se tak během jednoho časového kroku opravdu v modelu objeví a dojde k resetování všech potřebných subsystémů.

2.3.2 Řazení

Aktivovaný subsystém *Řazení* (obr. 2.37) slouží pro generování signálů s aktuálním převodovým poměrem N_{tSim} a převodovým stupněm N_{i2} . Při každém aktivování subsystému vyberou dva levé bloky *Lookup Table* odpovídající hodnoty signálu N_{tSim} na základě rychlosti vozidla v , každý pro jeden směr řazení (horní blok podřazení, spodní zařazení). Podle hodnoty řídicího signálu z bloku *Enable* (signál *shift 1/2*) je pak blokem *Lookup Table Dynamic* přebírán signál pro odpovídající směr řazení a výstupem je simulovaný průběh převodového poměru N_{tSim} . Podle něj nakonec ještě třetí blok *Lookup Table* přiřazuje signál aktuálního převodového stupně. Hodnoty N_{tSim} a N_{i2} jsou pak drženy na výstupech i po vypnutí subsystému, což zajišťuje nastavení příslušných parametrů bloků *Output*:

- *Output when disabled*: held,
- *Initial output* (N_{tSim}): $N_t(1,2)$,
- *Initial output* (N_{i2}): $N_t(1,3)$.

Nastavením počátečního výstupu jsou určeny hodnoty pro začátek simulace, kdy je uvažován rozjezd na první převodový stupeň. Zápis odkazuje na matici N_t ze souboru *Parametry.m*.



Obr. 2.37 Aktivovaný subsystém *Řazení*

U bloku *Enable* je třeba zatrhnout volbu *Show output port* a zvolit *reset* u parametru *States when enabling*. Bloky *Lookup Table* mají nastaveny parametry dle tab. 2.2. U bloku *Lookup Table1* je nutné zapsat každý prvek vektoru pro parametry *Vector of input values* a *Table data* zvlášť, protože hodnoty prvků v těchto vektorech musí být rostoucí. Zde se jedná o hodnoty převodového poměru a ty jsou zadány v matici N_t (její druhý sloupec), uložené v souboru *Parametry.m*, sestupně – vyšší převodový stupeň znamená nižší převodový poměr. Proto je třeba tyto hodnoty zapsat pozpátku a to i ve výstupním vektoru (třetí sloupec matice N_t).

Tab. 2.2 Nastavení parametrů pro bloky *Lookup Table* subsystému Řazení

Parametr / Blok	Lookup Table	Lookup Table1	Lookup Table2
Vector of input values	Nt(:,1)/3.6	[Nt(5,2),Nt(4,2),Nt(3,2),Nt(2,2),Nt(1,2)]	Nt(:,4)/3.6
Table data	Nt(:,2)	[Nt(5,3),Nt(4,3),Nt(3,3),Nt(2,3),Nt(1,3)]	Nt(:,2)
Lookup method	Use Input Below		

2.3.3 Motor

V tomto subsystému (obr. 2.38) je v závislosti na aktuální úhlové rychlosti motoru ω_e zvolen odpovídající točivý moment T_e na základě zadané charakteristiky motoru. Přiřazování probíhá v příslušném bloku *Lookup Table* s parametrem *Vector of input values* zapsaným jako

$$T_e(:,1),$$

kde je odkazováno na matici T_e ze souboru *Parametry.m*. V prvním sloupci této matice jsou zadané otáčky za minutu, a proto je hodnota signálu ω_e přenásobena výrazem $60/(2\pi)$ z bloku *Gain*, aby odpovídaly jednotky. Druhý vektor v parametru *Table data* odkazuje na druhý sloupec matice T_e , kde jsou zadány hodnoty točivého momentu:

$$T_e(:,2).$$

Parametr *Lookup method* tohoto bloku je nastaven na *Interpolation-Use End Values*, což zajistí interpolování dat při hodnotě řídicího signálu mezi zadanými body charakteristiky. Při překročení dolní nebo horní hranice hodnot zadaných bodů je na výstupu hodnota nejbližšího (koncového) bodu.

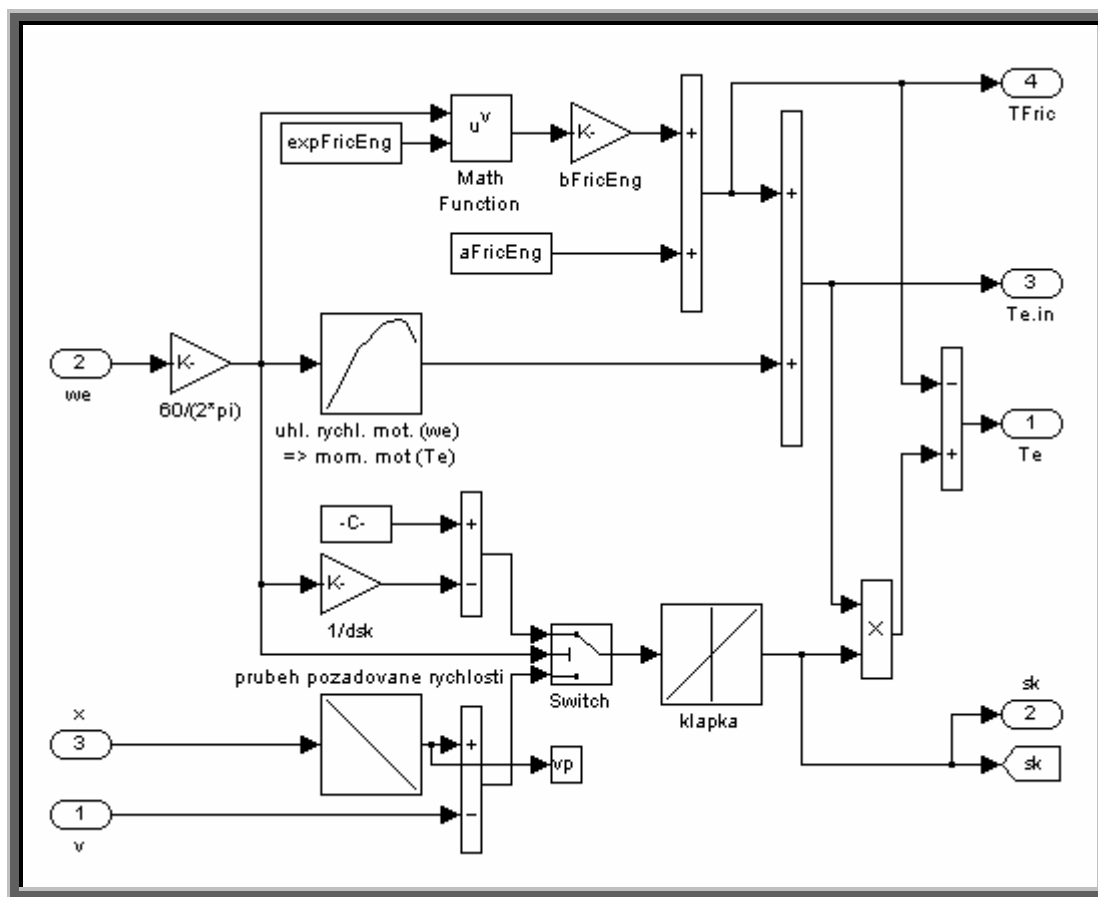
Dále tu probíhá výpočet brzdného momentu motoru a řízení škrticí klapky pro dosažení požadované rychlosti nebo pro omezování maximálních otáček motoru. Výpočtová rovnice brzdného momentu [9] má tvar

$$T_{Fric} = aFricEng + bFricEng \left(\frac{60}{2\pi} \omega_e \right)^{\exp FricEng} [Nm]. \quad (2.12)$$

Brzdný moment je následně přičten k zadané charakteristice motoru, která je při měření zaznamenána bez tohoto brzdného momentu, a výsledný signál tak představuje průběh

skutečného momentu, který vzniká spalováním v motoru. Po jeho vynásobení s podílem otevření škrticí klapky z intervalu $\langle 0,1 \rangle$ v dolní části subsystému a odečtení plného brzdného momentu vznikne signál T_e se skutečným průběhem momentu motoru, který urychluje nebo zpomaluje příslušné setrvačné hmoty hnacího ústrojí. Jízdní režimy *rozjezd* nebo *řazení* mají vlastní průběh škrticí klapky, a proto ze subsystému vystupují ještě signály T_{Fric} a $T_{e,in}$ k provedení tohoto výpočtu v aktivovaných subsystémech s průběhy hnacího momentu motoru pro tyto jízdní režimy. Průběh v režimu *řazení* je ovlivněn ještě poslední hodnotou škrticí klapky před svým spuštěním, proto je na výstupu subsystému také tento signál $\dot{s}_k$. Řízení škrticí klapky probíhá v bloku *Lookup Table* s názvem *klapka*, kde jsou nastaveny tyto parametry:

- *Vector of input values:* $[-20 \cdot ts \ 20 \cdot ts]$,
- *Table data:* $[0 \ 1]$,
- *Lookup method:* Interpolation-Use End Values.



Obr. 2.38 Subsystém Motor

V prvním parametru jsou zadány okrajové hodnoty regulačního rozsahu kolem nuly a ve druhém příslušná hodnota klapky. Vstupním řídicím signálem je vždy rozdíl požadované a aktuální hodnoty. V případě rychlosti – pokud je požadována vyšší rychlost, než kterou se vozidlo zrovna pohybuje, má rozdíl kladnou hodnotu a klapka uvolňuje plný výkon. Tím se rychlost vozidla blíží k požadované hodnotě a řídicí signál se zmenšuje. Až se hodnota rozdílu těchto rychlostí dostane pod $20 \cdot ts$ (ts je hodnota maximálního časového kroku ze souboru

Parametry.m, $t_s = 0.01$), začne se interpolací zmenšovat i klapka dokud se neustálí na rovnovážné hodnotě, kdy je zrychlení vozidla nulové. Takto probíhá regulace v obou směrech a požadovaná rychlost je při popsaném nastavení vždy dosažena s přesností $\pm 0.72 \text{ km/h}$. Stejný princip funguje i u omezování otáček motoru na maximální hodnotu z posledního bodu momentové charakteristiky v proměnné T_e . Slouží k tomu stejný blok *Lookup Table*, jen je do jeho řídicího vstupu veden upravený rozdíl požadovaných a aktuálních otáček motoru. O použitém řídicím signálu rozhoduje blok *Switch*, který má nastaveny následující parametry:

- *Criteria for passing first input*: $u_2 \geq \text{Threshold}$,
- *Threshold*: $T_e(\text{length}T_e, 1) - 40 * t_s * \text{dsk}$.

Jeho řídicím signálem jsou otáčky motoru. Při dosažení hodnoty z druhého parametru přepne regulaci škrticí klapky na dosažení otáček motoru o $\text{dsk} * t_s * 20 \text{ min}^{-1}$ menších, než je údaj posledního bodu charakteristiky ($\text{dsk} = 300$, $t_s = 0.01$). To je střední hodnota v rozsahu otáček, kdy dochází k přizpůsobování škrticí klapky. V bloku *Constant* je pak zapsána hodnota $(T_e(\text{length}T_e, 1) - \text{dsk} * t_s * 20) / \text{dsk}$, aby otáčky odpovídaly rozsahu v bloku *Lookup Table* s názvem *klapka*. Stejně jsou upraveny i aktuální otáčky motoru zápisem $1/\text{dsk}$ v bloku *Gain*. Zvolené úpravy znamenají řídicí rozsah otáček $\pm \text{dsk} * t_s * 20 \text{ min}^{-1}$. Regulování otáček může být vypnuto spuštěním režimu *řazení* nebo poklesnutím otáček motoru pod hodnotu spouštění regulace i při plné klapce. Tím se znovu aktivuje regulování klapky pro dosažení požadované rychlosti, jejíž průběh vystupuje z dalšího bloku *Lookup Table*, kde jsou nastaveny parametry

- *Vector of input values*: x_v ,
- *Table data*: $v_0/3.6$,
- *Lookup method*: Interpolation-Use End Values.

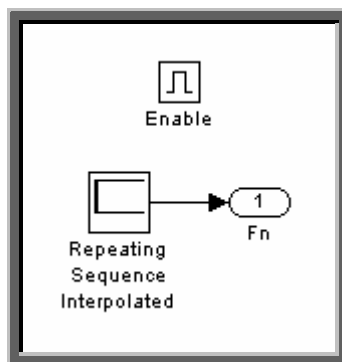
Použité proměnné opět odkazují na hodnoty ze souboru *Parametry.m*. Výstupní signál tohoto bloku je ukládán pro další použití do pracovního prostředí *Workspace* pod názvem *vp*.

2.3.4 Průběhy ovládacích veličin

Průběhy normálové síly na spojce F_n a hnacího momentu motoru T_e pro jízdní režimy *rozjezd* a *řazení* jsou generovány pomocí bloků *Repeating Sequence Interpolated*, s výjimkou průběhu v aktivovaném subsystému T_e pro *řazení*, kde je použitý blok *Lookup Table Dynamic*. Tyto bloky jsou umístěné v samostatných aktivovaných subsystémech, aby při každém jejich znovuspuštění došlo k resetování stavu bloku a průběhu dané ovládací veličiny od začátku sekvence. Parametr *States when enabling* bloků *Enable* je proto v každém aktivovaném subsystému nastaven na *reset*.

Oba aktivované subsystémy s průběhy normálové síly spojky F_n jsou stejné (obr. 2.39) s výjimkou nastavení parametrů bloku *Repeating Sequence Interpolated*. Oba mají sice shodně nastavenou vyhledávací metodu v parametru *Lookup Method* na *Interpolation-Use End Values*, ale liší se nastavení ostatních parametrů. Pro jízdní režim *rozjezd* je nastavení následující:

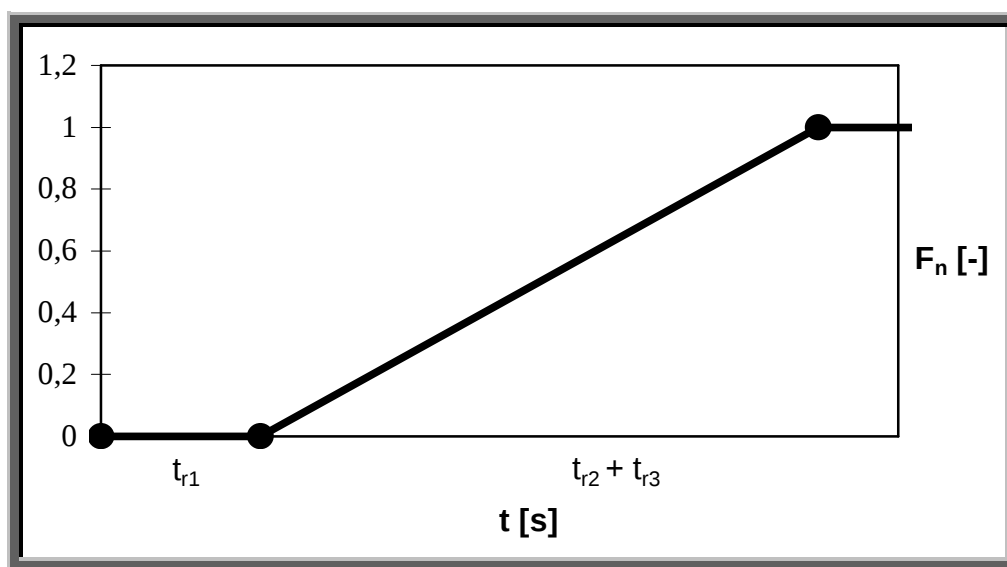
- *Vector of output values*: F_{nr} ,
- *Vector of time values*: t_{cr} .



Obr. 2.39 Aktivovaný subsystém s průběhem normálové síly spojky F_n pro řazení

Nastavení těchto parametrů u jízdního režimu řazení je pak:

- *Vector of output values:* Fns,
- *Vector of time values:* tcs.



Obr. 2.40 Časový průběh podílu normálové síly spojky F_n pro rozjezd

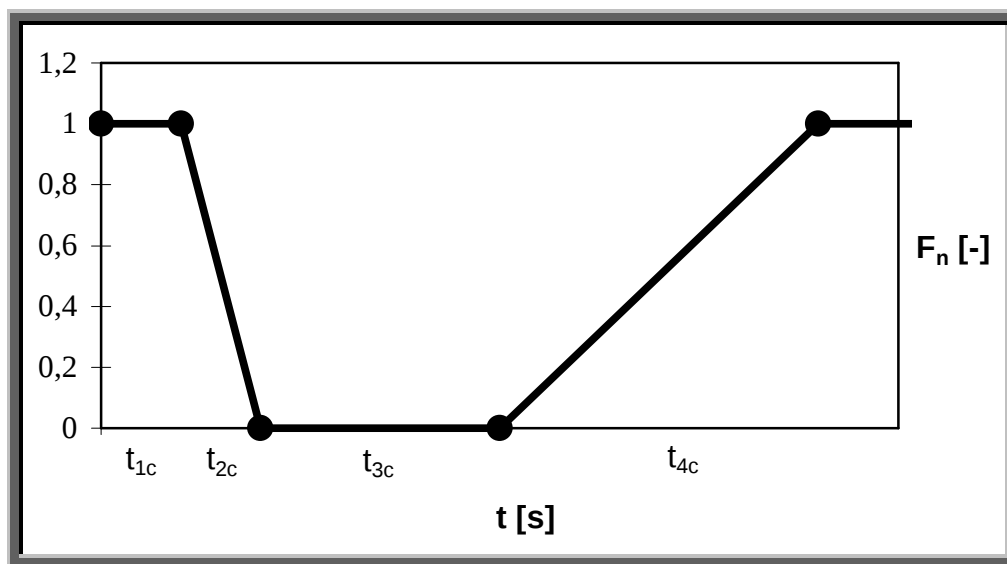
Ve vektorech *Vector of output values* jsou zadány hodnoty bodů (černé tečky v grafech) z průběhu normálové síly spojky F_n pro rozjezd (obr. 2.40) a řazení (obr. 2.41). Tyto hodnoty znamenají, jaký podíl síly F_n je v daném čase aplikován. Vektory *Vector of time values* pak udávají časovou polohu těchto charakteristických bodů. Ta je zapsána vždy jako součet dílčích časů jednotlivých částí zakřivení grafu. Význam částí průběhu normálové síly F_n pro rozjezd je:

- t_{r1} $\Rightarrow$ čas do začátku uvolňování spojky při rozjezdu,
- $t_{r2} + t_{r3}$ $\Rightarrow$ doba postupného uvolňování spojky při rozjezdu.

Při režimu *řazení* mají jednotlivá zakřivení průběhu normálové síly spojky F_n tento význam:

- $t_{1c} \Rightarrow$ čas do začátku vyšlapávání spojky při řazení,
- $t_{2c} \Rightarrow$ čas vyšlapávání spojky při řazení,
- $t_{3c} \Rightarrow$ doba vyšlápnuté spojky při řazení,
- $t_{4c} \Rightarrow$ čas pouštění spojky při řazení.

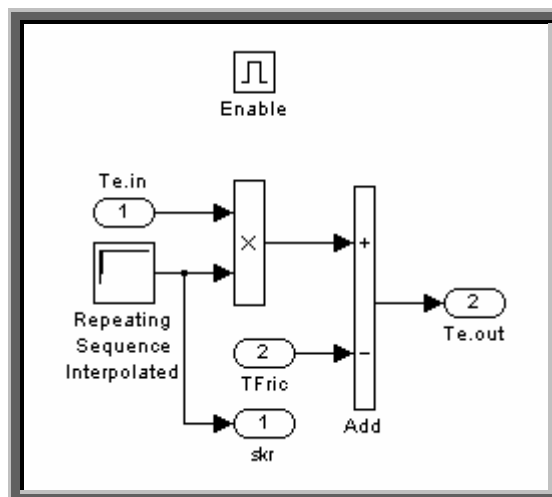
V samotných průbězích pro režim *řazení* je definován ještě další bod a to v čase 100s za posledním viditelným bodem v grafech. Důvodem použití takového průběhu je samotný princip přerazování na jiný převodový stupeň. Nejprve je při dosažení určité rychlosti spuštěn režim *řazení* pomocí rozdílu pracovního převodového stupně N_i a aktuálního zařazeného převodového stupně N_{i2} . Poté vždy dochází ke změně rychlosti vozidla oproti rychlosti, při které byl tento režim spuštěn, protože na vozidlo působí jízdní odporové síly. K řazení tedy dochází při této odlišné rychlosti, a proto musí být podle ní volen i další převodový stupeň. Aktuální převodový poměr N_{tSim} a převodový stupeň N_{i2} je tak při zařazování řízen podle nižších rychlostí než pracovní převodový stupeň N_i . Dále musí vozidlo ještě v režimu *řazení* překonat rychlost, při které byl tento režim spuštěn (nebo zpomalit pod hraniční rychlost a aktivovat tak podřazování), protože by jinak chybně došlo k jeho opětovnému aktivování. V průběhu režimu *řazení* totiž nemá detekce rozdílu signálů N_i a N_{i2} žádný vliv. Než vozidlo dosáhne jedné z ukončovacích rychlostí, je potřeba držet průběhy ovládacích veličin na posledních hodnotách a předejít opakování celého průběhu blokem *Repeating Sequence Interpolated*. K tomu slouží právě prodloužení průběhů režimu *řazení* pomocí přídatného bodu charakteristiky.



Obr. 2.41 Časový průběh normálové síly spojky F_n pro řazení

Aktivované subsystémy s průběhy hnacího momentu motoru T_e už jsou pro oba řízené jízdní režimy podstatně odlišné. U jízdního režimu *rozjezd* (obr. 2.42) je průběh definován opět blokem *Repeating Sequence Interpolated*, který má zapsané tyto parametry:

- *Vector of output values:* skr,
- *Vector of time values:* ter.

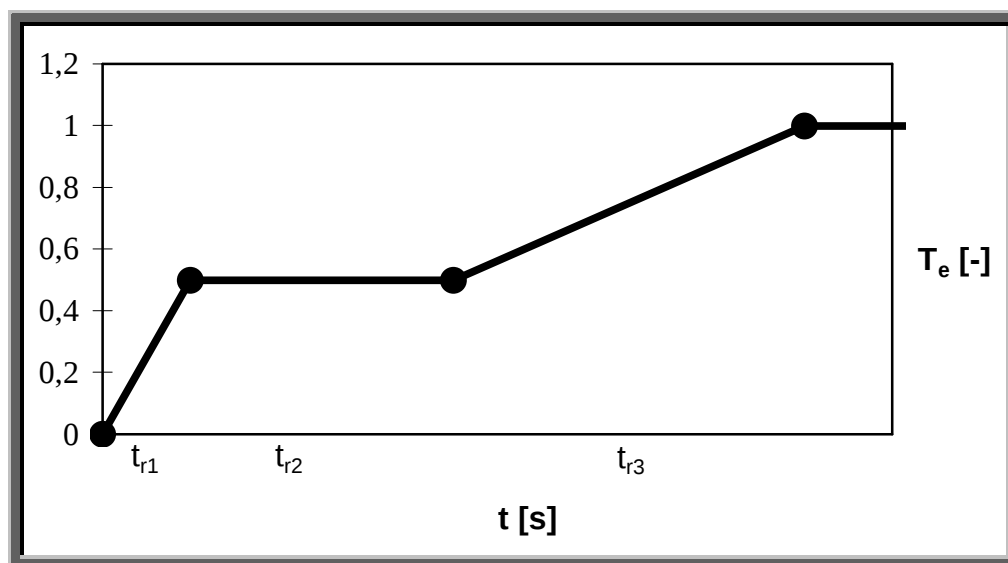


Obr. 2.42 Aktivovaný subsystém s průběhem momentu motoru T_e pro rozjezd

Průběh hnacího momentu $T_{e.out}$ je generován vynásobením aktuálního plného momentu ze signálu $T_{e.in}$ (v závislosti na otáčkách podle momentové charakteristiky a brzdného momentu motoru) s podílovou hodnotou v intervalu $\langle vb, 1 \rangle$ z bloku *Repeating Sequence Interpolated* a odečtením plného brzdného momentu motoru T_{Fric} . Parametr vb zastupuje hodnotu škrticí klapky pro vyrovnání brzdného momentu motoru při jeho volnoběžných otáčkách a je vypočítán v souboru *Parametry.m*. Časy popisující tento průběh jsou stejné jako u průběhu normálové síly spojky F_n . Jejich význam pro jízdní režim *rozjezd* (obr. 2.43) je:

- t_{r1} $\Rightarrow$ doba náběhu poloviční hodnoty momentu motoru při rozjezdu,
- t_{r2} $\Rightarrow$ čas držení poloviční hodnoty momentu motoru při rozjezdu,
- t_{r3} $\Rightarrow$ doba náběhu na plný moment motoru při rozjezdu.

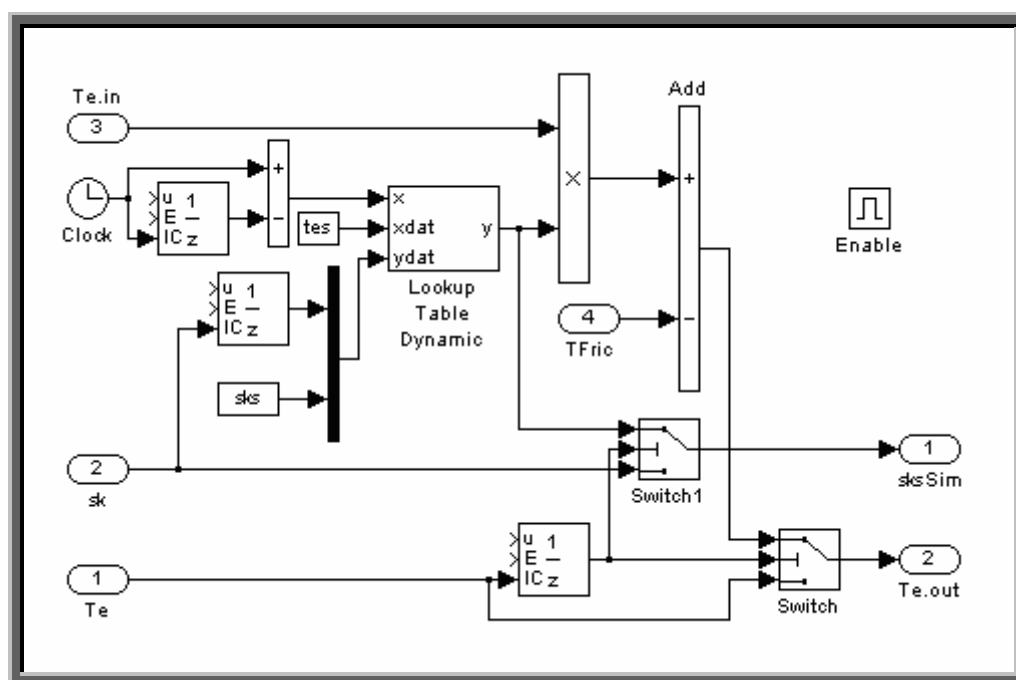
Výstupní blok *Outport* signálu sk_r má kvůli vytváření spojitého průběhu škrticí klapky nastaven parametr *Output when disabled* na *reset* a *Initial output*: 0.



Obr. 2.43 Časový průběh hnacího momentu motoru T_e pro rozjezd

U jízdního režimu *řazení* je průběh hnacího momentu generován v aktivovaném subsystému *Te pro řazení* (obr. 2.44). Počáteční hodnotu škrticí klapky je zde potřeba měnit podle její poslední hodnoty před spuštěním režimu *řazení* a k tomu slouží blok *Lookup Table Dynamic*. Jeho řídicím signálem je čas od počátku aktivování subsystému. Ten je získán jako rozdíl aktuálního času simulace a času, při kterém byl subsystém aktivován (je zachycen blokem *Unit Delay Enabled External IC*). Vstup *xdat* je určen z bloku *Constant*, který odkazuje na vektor t_{es} s časovými údaji o průběhu ovládací veličiny. Vektor vstupu *ydat* je složen blokem *Mux*, kde je první hodnota určená stavem signálu škrticí klapky před spuštěním subsystému (opět zachycuje blok *Unit Delay Enabled External IC*) a další body jsou zapsány v proměnné sk_s . Další postup je stejný jako u režimu *rozjezd*. O výsledné klapce a hnacím momentu rozhodují dva bloky *Switch*, které jsou řízeny poslední hodnotou hnacího momentu před spuštěním subsystému. Při brzdění motorem je totiž nežádoucí, aby byl v činnosti původní průběh klapky, který končí s plným výkonem. Proto jsou při zjištění záporné hodnoty hnacího momentu v posledním okamžiku před spuštěním subsystému posílány na výstup signály škrticí klapky a hnacího momentu z režimu *jízda* (původní hodnoty ze subsystému *Motor*). Nastavení obou bloků *Switch* je stejné:

- *Criteria for passing first input:* $u_2 \geq \text{Threshold}$,
- *Threshold:* 0.



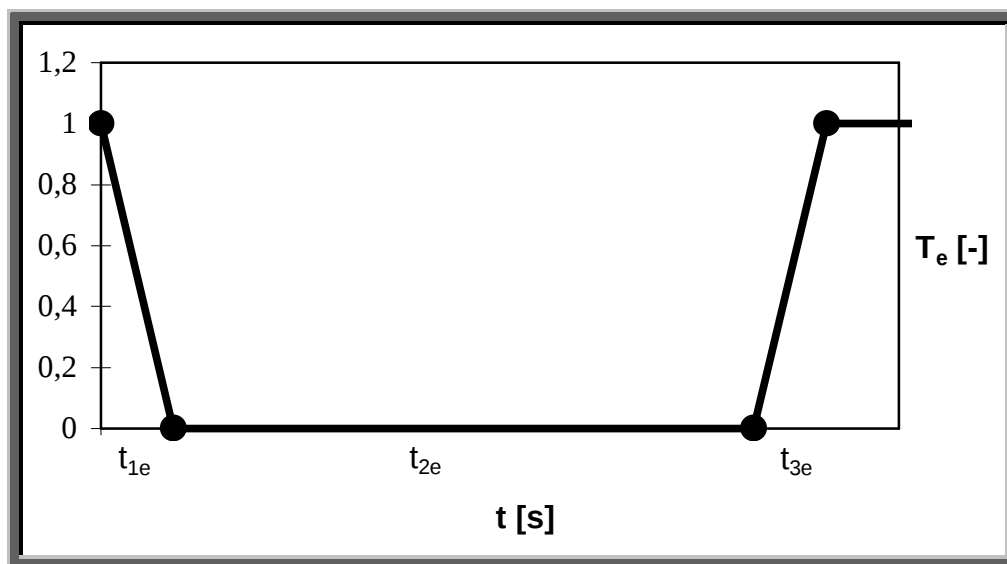
Obr. 2.44 Aktivovaný subsystém s průběhem momentu motoru T_e pro řazení

Průběh hnacího momentu motoru T_e (obr. 2.45) je u jízdního režimu *řazení* složen ze tří křivek. Charakteristické body průběhu popisují tyto časy:

- $t_{1e} \Rightarrow$ doba uvolňování plynového pedálu při řazení,
- $t_{2e} \Rightarrow$ čas uvolněního plynového pedálu při řazení,
- $t_{3e} \Rightarrow$ doba pro plné sešlápnutí plynového pedálu při řazení.

Nakonec je třeba ještě nastavit parametry výstupního bloku *Outport* s názvem $šk_{sSim}$, aby byl správně vytvářen spojitý signál s průběhem škrticí klapky během celé simulace. Nastaveny jsou tedy tyto parametry:

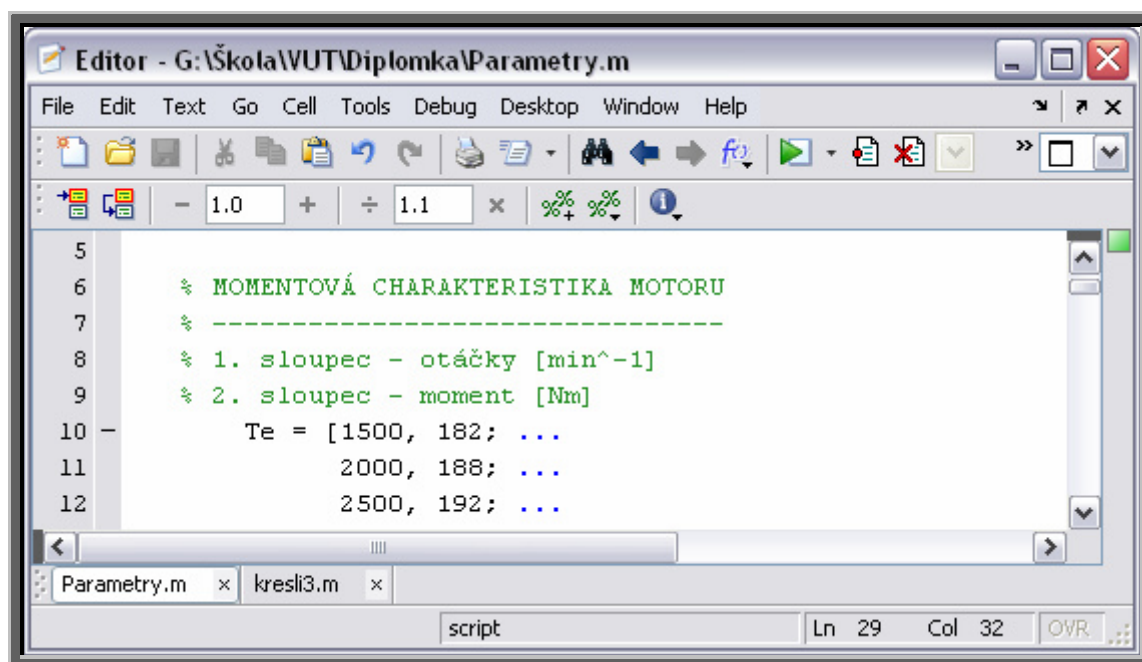
- *Output when disabled: reset,*
- *Initial output: 0.*



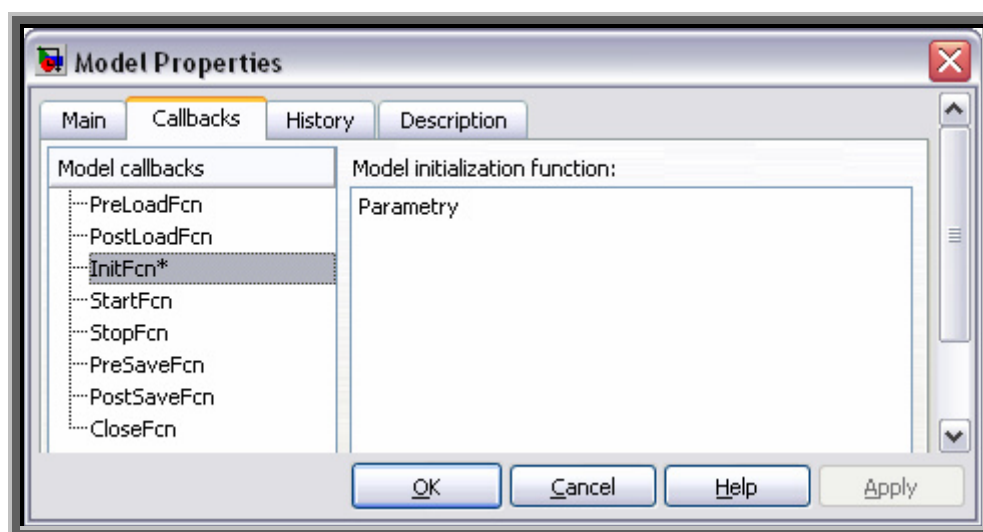
Obr. 2.45 Časový průběh hnacího momentu motoru T_e pro řazení

3 VSTUPNÍ PARAMETRY

Všechny hodnoty, se kterými model počítá, jsou uloženy v souboru *Parametry.m*. Zvolené parametry nepatří jednomu konkrétnímu vozidlu, ale byly vybrány tak, aby přibližně odpovídaly skutečnosti. Náhled editoru tzv. m-souborů je na *obr. 3.1*. Automatické spuštění m-souboru s parametry a jejich načtení před každou simulací lze nastavit přímo v modelu (soubor s příponou *.mdl*). Kliknutím pravým tlačítkem myši na plochu se otevře nabídka, kde je třeba zvolit položku *Model Properties*. V tomto okně je lišta *Callbacks* a v jejím levém sloupci nabídka *InitFcn* (*obr. 3.2*). Pak stačí do pravé části vepsat jméno požadovaného souboru (bez přípony: *Parametry*), který musí být uložen v pracovním adresáři.



Obr. 3.1 Okno editoru m-souborů



Obr. 3.2 Nabídka nastavení Model Properties

3.1 Použité parametry a jejich hodnoty

Pro úplnost je uvedena i část *Torzní tuhosti a tlumení spojovacích částí hnacího ústrojí*. V modelu je ale do výpočtů zahrnuto jen tlumení jednotlivých hmot hnacího ústrojí a tuhost není uvažována. Původní návrh totiž obsahoval i vymodelování pružného systému, ale během práce byla zvolena cesta vylepšování tuhého systému.

Následující podkapitoly jsou výpisem ze souboru *Parametry.m*, kam byly uloženy zvolené hodnoty vstupující do modelu.

3.1.1 Motor

```
% MOTOR
% -----
% Momentová charakteristika
% 1. sloupec - otáčky [min^-1]
% 2. sloupec - moment [Nm]
Te = [800, 162.698; ...
      1200, 178.968; ...
      1600, 196.594; ...
      2000, 216.931; ...
      2400, 237.268; ...
      2800, 245.403; ...
      3200, 257.605; ...
      3600, 268.452; ...
      4000, 271.164; ...
      4400, 272.519; ...
      4800, 268.452; ...
      5200, 244.047; ...
      ];
% Počet bodů charakteristiky [-]
lengthTe = length(Te);
% Koeficient pro úpravu regulačního rozsahu omezovače otáček [-]
dsk = 300;
% Konstanty pro brzdny moment [-]
aFricEng = 4.838;
bFricEng = 3.485e-4;
expFricEng = 1.3;
% Volnoběžné otáčky [min^-1]
nvb = 850;
% Podíl momentu motoru pro volnoběh [-]
vb = (aFricEng+bFricEng*nvb^expFricEng)/Te(1,2);
```

3.1.2 Převodové poměry

```
% PŘEVODOVÉ POMĚRY
% -----
% Převodovka
% 1. sloupec: rychlost určující př. stupeň NtSim a př. poměr Ni2 při
%   zařazování [km/h]
% 2. sloupec: př. poměr [-]
% 3. sloupec: př. stupeň [-]
% 4. sloupec: rychlost určující pracovní př. stupeň Ni (spouštění režimu
%   řazení) a hodnoty NtSim a Ni2 při podřazování [km/h]
```

```
Nt = [ 0, 4.28, 1, 0; ...  
      43, 2.79, 2, 45; ...  
      69, 1.83, 3, 72; ...  
      102, 1.36, 4, 106; ...  
      141, 1, 5, 146; ...  
      ];  
% Koncový převod [-]  
Nf = 2.92;
```

3.1.3 Setrvačné hmoty jednotlivých částí hnacího ústrojí

```
% SETRVAČNÉ HMOTY JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ HNACÍHO ÚSTROJÍ  
% -----  
% Hmotnost auta [kg]  
M = 1000;  
% dále jednotky [kg*m^2]  
% Motor  
Ie = 0.09;  
% Spojka  
Ice = 0.01;  
Ict = 0.01;  
% Převodovka (It = [0.147, 0.102, 0.079, 0.056, 0.034])  
Itc = [0.073, 0.051, 0.040, 0.028, 0.017];  
It d = [0.073, 0.051, 0.040, 0.028, 0.017];  
% Spojovací hřídel  
Id = 0.1;  
% Koncový převod  
Ifd = 0.02;  
Ifw = 0.02;  
% Kola a hnací hřídele  
Iw = 4*1.24;
```

3.1.4 Omezení přilnavosti pneumatik

```
% OMEZENÍ PŘILNAVOSTI PNEUMATIK  
% -----  
% Vektory hodnot průběhu podílu kolmé síly na hnací nápravu v závislosti  
% na velikosti prokluzu [-]  
mikt = [-0.7 -0.71 -0.72 -0.73 -0.75 -0.77 -0.79 -0.81 -0.83 -0.855 ...  
        -0.88 -0.9 -0.92 -0.94 -0.96 -0.98 -1 -0.97 -0.8 -0.4 0 0.4 ...  
        0.8 0.97 1 0.98 0.96 0.94 0.92 0.9 0.88 0.855 0.83 0.81 ...  
        0.79 0.77 0.75 0.73 0.72 0.71 0.7];  
slip = -1:0.05:1;  
% Rychlost, do které bude prokluz zkreslován [km/h]  
vp0 = 0.5;
```

3.1.5 Charakteristické rozměry vozidla

```
% CHARAKTERISTICKÉ ROZMĚRY VOZIDLA  
% -----  
% Rozvor náprav [m]  
L = 2.7;  
% Vzdálenost těžiště od přední nápravy [m]  
b = 1.2;
```

```
% Vzdálenost těžiště od zadní nápravy [m]
c = L-b;
% Vzdálenost těžiště od vozovky [m]
h = 0.45;
% Vzdálenost působíště odporu vzduchu od vozovky [m]
ha = 0.7;
% Vzdálenost působíště tažného zařízení od vozovky [m]
hh = 0.4;
% Vzdálenost působíště tažného zařízení od zadní nápravy [m]
dh = 0.7;
% Aerodynamický vztlak působící na přední nápravu vozidla [N]
Laf = 0;
% Aerodynamický vztlak působící na zadní nápravu vozidla [N]
Lar = 0;
% Vertikální síla působící v tažném zařízení [N]
Rhz = 0;
% Podélná síla působící v tažném zařízení [N]
Rhx = 0;
```

3.1.6 Torzní tuhosti a tlumení spojovacích částí hnacího ústrojí

```
% TORZNÍ TUHOSTI A TLUMENÍ SPOJOVACÍCH ČÁSTÍ HNACÍHO ÚSTROJÍ
% -----
% jednotky: tuhost c [N*m/rad]
%           tlumení k [N*m/(rad/s)]
% motor => spojka
c1 = 0;
kec = 0;
% spojka => převodovka
c2 = 0;
kct = 0;
% převodovka => koncový převod
c3 = 0;
ktdf = 0;
% koncový převod => kola
c4 = 0;
kfw = 0;
```

3.1.7 Spojka

```
% SPOJKA
% -----
% Malý a velký průměr třecích kotoučů spojky [m]
r1 = 0.16;
r2 = 0.19;
% Kinematický a statický součinitel tření spojky [-]
mik = 1;
mis = 1.5;
% Maximální normálová síla na spojce [N]
Fn = 2000;

% ROZJEZD
% Doba náběhu poloviční hodnoty momentu motoru [s],
% čas do začátku uvolňování spojky [s]
tr1 = 0.2;
```

```
% Doba poloviční hodnoty momentu motoru [s],
% první část doby postupného uvolňování spojky [s]
tr2 = 0.3;
% Doba náběhu na plný moment motoru [s],
% druhá část doby postupného uvolňování spojky [s]
tr3 = 0.4;
% Časové řízení momentu motoru
ter = [0 tr1 tr1+tr2 tr1+tr2+tr3 tr1+tr2+tr3+100];
skr = [vb 0.5 0.5 1 1];
% Časové řízení normálové síly na spojce
tcr = [0 tr1 tr1+tr2+tr3 tr1+tr2+tr3+100];
Fnr = [0 0 Fn Fn];

% ŘAZENÍ
% Doba uvolňování plynového pedálu [s]
t1e = 0.1;
% Čas uvolnění plynového pedálu [s]
t2e = 0.8;
% Doba sešlapávání plynového pedálu [s]
t3e = 0.1;
% Čas do začátku vyšlapávání spojky [s]
t1c = 0.1;
% Čas vyšlapávání spojky [s]
t2c = 0.1;
% Doba vyšlápnuté spojky [s]
t3c = 0.3;
% Čas pouštění spojky [s]
t4c = 0.4;
% Časová prodleva zařazení př. stupně [s]
tshift = t1c+t2c+t3c;
% Časové řízení momentu motoru
tes = [0 t1e t1e+t2e t1e+t2e+t3e t1e+t2e+t3e+100];
sks = [ vb vb 1 1];
% Časové řízení normálové síly na spojce
tcs = [0 t1c t1c+t2c t1c+t2c+t3c t1c+t2c+t3c+t4c t1c+t2c+t3c+t4c+100];
Fns = [Fn Fn 0 0 Fn Fn];
```

3.1.8 Jízdní odpory

```
% JÍZDNÍ ODPORY
% -----
% Součinitel odporu vzduchu[-]
Cx = 0.3;
% Čelní plocha vozidla v průmětu kolmém ke směru jízdy [m^2]
S = 2.8;
% Hustota prostředí (vzduch) [kg/m^3]
ro = 1.23;
% Rameno valivého odporu [m]
ksi = 0.0016;
% Úhel stoupání vozovky [°] podle ujeté dráhy [m]
xTheta = [0 1680 1700 1720];
Theta0 = [10 10 0 -1.5];
```

3.1.9 Další parametry

```
% DALŠÍ PARAMETRY
% -----
% Poloměr kola [m]
  r = 0.32;
% Celková účinnost [-]
  ntf = 0.8;
% Gravitační zrychlení [m/s^2]
  g = 9.80665;
% Maximální časový krok simulace [s]
  ts = 0.01;
% Průběh požadované rychlosti vozidla [km/h] podle ujeté dráhy [m]
  xv = [3100 3120];
  v0 = [200 60];
```

4 PŮBĚH SIMULACE A ZOBRAZOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Nastavení výpočtů simulace je dostupné v okně modelu z nabídky *Simulation / Configuration Parameters*. Zde je potřeba zapsat parametr *Max step size* jako hodnotu 0.0001 a po uplynutí určité doby simulovaného času jej přepsat na *ts*. Začátek simulace musí být totiž řešen po menších časových krocích, protože by jinak při nízké rychlosti vozidla docházelo k velkým změnám sousedních hodnot některých signálů. Čas, po kterém už není nutný tak jemný krok, závisí na vstupních parametrech a je zjišťován z výsledků simulace. V dalším průběhu simulace je pak po uplynutí problematického času ručně přepsána hodnota parametru *Max step size* a potvrzena volbou *Apply*.

Podobně jako u souboru s parametry je vytvořen i soubor s příponou *.m* pro vykreslování grafů ze získaných hodnot. Je zde zaspána funkce, do které vstupují proměnné uložené během simulace do prostředí *Workspace*.

```
function kresli(t,vw,v,vp,a,we,wc,Tc,TeSim,NtSim,zamknuto, ...  
    zamknuto0,Tfmaxk,Tfmaxs,Iv,FnSim,Fz,F,prokluz,skSim,x,Theta,Te,xx, ...  
    xy,Fo,Da,Rx,st,Nf,Nt,r,ntf)  
  
% Tloušťka čar [body]  
lw0 = 1;  
lw = 2;  
lw2 = 2;  
  
figure (1)  
    subplot(4,2,1)  
    plot(t,vw*3.6,'r',t,v*3.6,'b',t,vp*3.6,'k','LineWidth',lw)  
    grid on  
    set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')  
    xlabel('t [s]')  
    ylabel('v [km/h]')  
    title('Rychlost')  
    legend('Obv. rychl. kola','Rychlost vozidla','Požadovaná rychlost',...  
        'Location','Best')  
    ylim([min(v)*3.6 max(vw)*3.6])  
  
    subplot(4,2,2)  
    plot(t,a,'LineWidth',lw)  
    grid on  
    set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')  
    xlabel('t [s]')  
    ylabel('a [m/s^2]')  
    title('Zrychlení')  
    ylim([min(a) max(a)])  
  
    subplot(4,2,3)  
    plot(t,60*we/(2*pi),'b',t,60*wc/(2*pi),'r','LineWidth',lw)  
    grid on  
    set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')  
    xlabel('t [s]')  
    ylabel('n [min^-1]')  
    title('Otáčky')  
    legend('ne (motoru)', 'nc (ze spojky)', ...  
        'Location','Best','Orientation','vertical')  
    ylim([min(wc) max(wc)].*60/2/pi)
```

```
subplot(4,2,4)
plot(t,TeSim,'b',t,Tc,'r','LineWidth',lw)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('T [N*m]')
title('Hnací momenty')
legend('Te (motoru)', 'Tc (spojky)', ...
       'Location', 'Best', 'Orientation', 'vertical')
ylim([min(Tc) max([max(TeSim),max(Tc)])])

subplot(4,2,5)
plot(t,skSim*600,'r',t,prokluz*100,'b','LineWidth',lw)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('klapka*6, prokluz [%]')
title('Otevření škrticí klapky a prokluz hnacích kol')
legend('Klapka', 'Prokluz', 'Location', 'Best')
ylim([min(prokluz)*100 max([max(prokluz),max(skSim)])*100])

subplot(4,2,6)
plot(t,Tfmaxk,'r',t,Tfmaxs,'g',t,zamknuto0,'k',t,zamknuto*50,'b', ...
     'LineWidth',lw)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('Tf [N*m]')
title('Třecí momenty a řídící moment spojky')
legend('Tfmaxk (kinetický)', 'Tfmaxs (statický)', ...
       'Řídící (zamknuto0)', 'Location', 'Best')
ylim([-50 max(Tfmaxs)])

subplot(4,2,7)
plot(t,NtSim,'b',t,Iv*50,'b--',t,FnSim/100,'r','LineWidth',lw)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('NtSim [-], Iv*50 [kg*m^2], FnSim/100 [N]')
title('Př. poměr, rot. setrv. hmota za spojkou a norm. síla na spojce')
legend('Př. poměr', 'Setrv. hmota', 'Norm. síla', 'Location', 'Best')

subplot(4,2,8)
plot(t,F,'b',t,Fz,'r','LineWidth',lw)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('F [N]')
title('Hnací síla a normálová síla hnané nápravy')
legend('Hnací síla', 'Normálová síla', 'Location', 'Best')
ylim([min(F) max([max(F),max(Fz)])])

figure (2)
subplot(4,2,1)
plot(t,x,'b',t,Theta*100,'r','LineWidth',lw2)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('x [m], Theta*100 [°]')
```

```
title('Ujetá dráha a úhel stoupání vozovky')
legend('Ujetá dráha', 'Úhel stoupání', 'Location', 'Best')
ylim([min([min(x),min(Theta*100)]) max(x)])

subplot(4,2,2)
plot(Te(:,1),Te(:,2),'b','LineWidth',lw2)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('n [min^-1]')
ylabel('Te [Nm]')
title('Průběh momentu motoru')

subplot(4,2,3)
plot(t,xy,'b','LineWidth',lw2)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('xy [m]')
title('Vertikálně ujetá dráha v čase')
ylim([min(xy) max(xy)])

subplot(4,2,5)
plot(xx,xy,'b','LineWidth',lw2)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('xx [m]')
ylabel('xy [m]')
title('Charakter terénu')
xlim([min(xx) max(xx)])
ylim([min(xy) max(xy)])

subplot(4,2,7)
plot(t,Fo,'b',t,Da,'r',t,Rx,'g',t,st,'k','LineWidth',lw2)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('t [s]')
ylabel('F [N]')
title('Síly jízdních odporů')
legend('Celková', 'Odpor vzduchu', 'Odpor valení', ...
       'Odpor stoupání', 'Location', 'Best')
ylim([min([min(Fo),min(Da),min(Rx),min(st)]) ...
       max([max(Fo),max(Da),max(Rx),max(st)])])

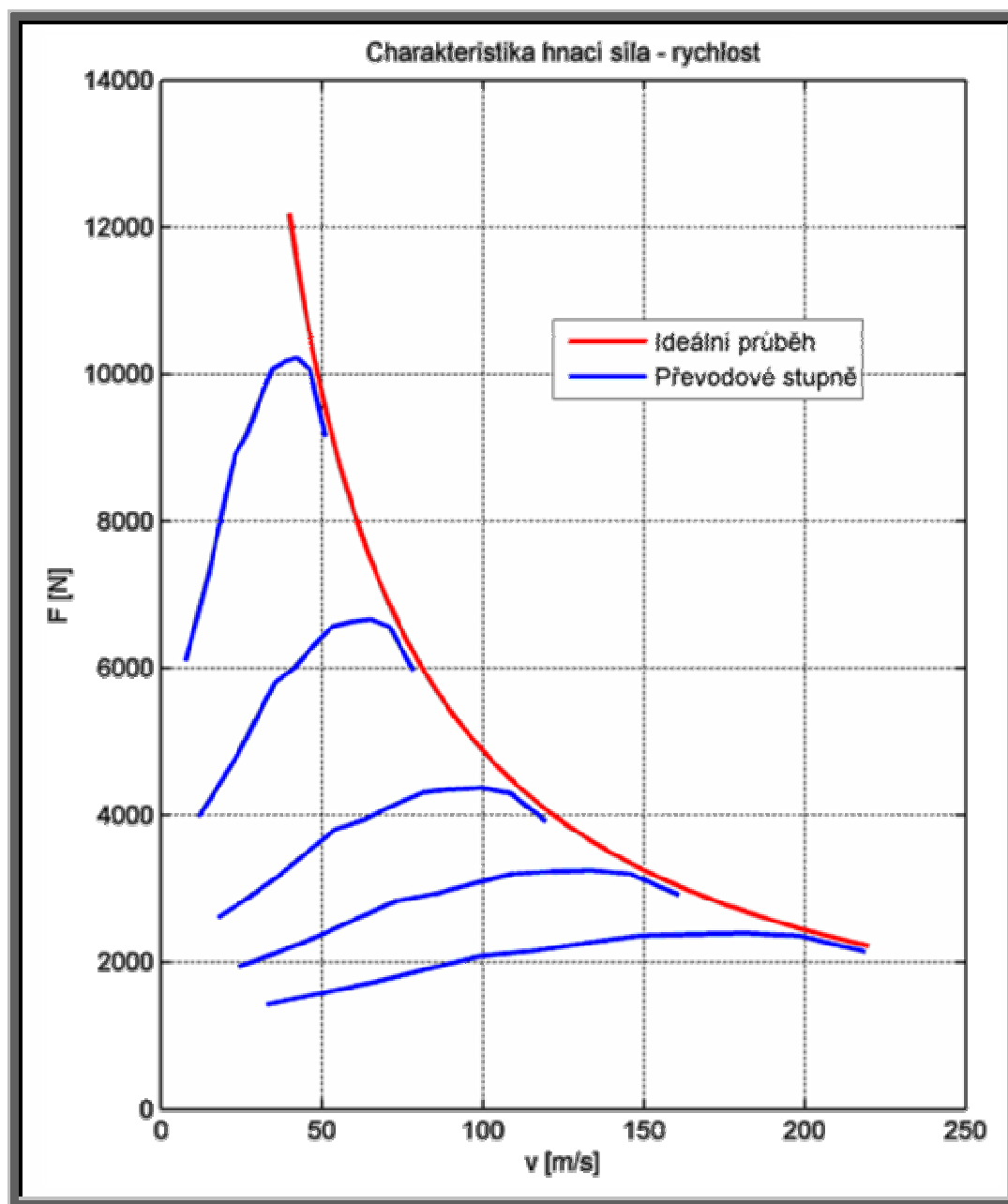
subplot(4,2,[4 8])
plot(40:2:220, 3.6*max(Te(:,1).*Te(:,2))*2*pi/60./(40:2:220),'r', ...
     Te(:,1)/Nf/Nt(1,2)*2*pi*r*3.6/60, Te(:,2)*ntf*Nf*Nt(1,2)/r,'b',...
     Te(:,1)/Nf/Nt(2,2)*2*pi*r*3.6/60, Te(:,2)*ntf*Nf*Nt(2,2)/r,'b',...
     Te(:,1)/Nf/Nt(3,2)*2*pi*r*3.6/60, Te(:,2)*ntf*Nf*Nt(3,2)/r,'b',...
     Te(:,1)/Nf/Nt(4,2)*2*pi*r*3.6/60, Te(:,2)*ntf*Nf*Nt(4,2)/r,'b',...
     Te(:,1)/Nf/Nt(5,2)*2*pi*r*3.6/60, Te(:,2)*ntf*Nf*Nt(5,2)/r,'b',...
     'LineWidth',lw2)
grid on
set(gca,'LineWidth',lw0,'GridLineStyle','--')
xlabel('v [m/s]')
ylabel('F [N]')
title('Charakteristika hnací síla - rychlost')
legend('Ideální průběh', 'Převodové stupně', 'Location', 'Best')
```

```
[o,p]=max(Te(:,1).*Te(:,2));  
[q,s]=max(Te(:,2));  
  
disp([' => MAXIMÁLNÍ RYCHLOST      = ', num2str(max(v)*3.6), ...  
      '[km/h] ... ', num2str(3.6*v(find(v*3.6>100, 1))), '[km/h] za ', ...  
      num2str(t(find(v*3.6>100, 1))), '[s]']);  
disp([' => MAXIMÁLNÍ VÝKON        = ', num2str(o*2*pi/60000), ...  
      '[kW] ... ', num2str(Te(p,1)), '[ot./min] ... ', num2str(Te(p,2)), ...  
      '[Nm]']);  
disp([' => VÝKON PŘI MAX. MOMENTU = ', num2str(q*Te(s,1)*2*pi/60000), ...  
      '[kW] ... ', num2str(Te(s,1)), '[ot./min] ... ', num2str(q), '[Nm]']);  
  
end
```

5 VÝSLEDKY, GRAFY A JEJICH ROZBOR

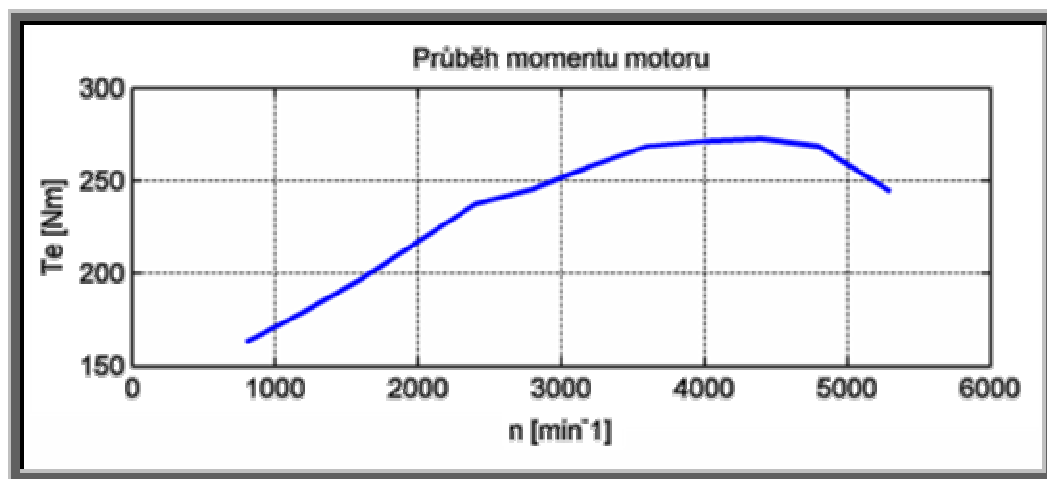
Nejprve jsou uvedeny celkové průběhy jednotlivých signálů pro orientační přehled o simulaci. Vstupní parametry byly zvoleny tak, aby grafy zobrazovaly co nejvíc možných situací, které při jízdě nastávají. Délka trvání simulace je 150s. Protože se zobrazované hodnoty mění dost rychle, dochází v tomto pohledu k jejich zkreslování vlivem aliasingu. Další část práce detailněji rozebírá konkrétní úseky z průběhu celé simulace.

5.1 Celkový průběh simulace



Obr. 5.1 Graf charakteristiky hnací síla - rychlost

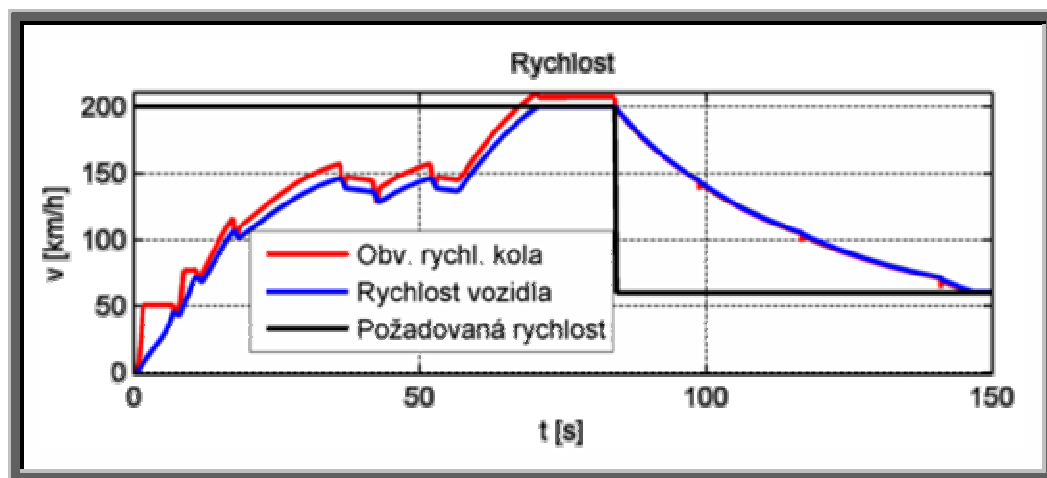
První dva grafy na obr. 5.1 a 5.2 vychází přímo ze zadaných parametrů a k jejich zobrazení není třeba spouštět simulaci. Charakteristika hnací síly na rychlosti vypovídá o nastavení jednotlivých převodů a křivka ideálního průběhu představuje dokonalou převodovku s účinností 1 (beze ztrát) při plynulé změně převodového poměru. V tomto ideálním průběhu si motor celou dobu drží otáčky, při kterých má maximální výkon. Průběhy jednotlivých převodů pak svým tvarem odpovídají grafu s průběhem momentu motoru na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Graf s průběhem momentu motoru

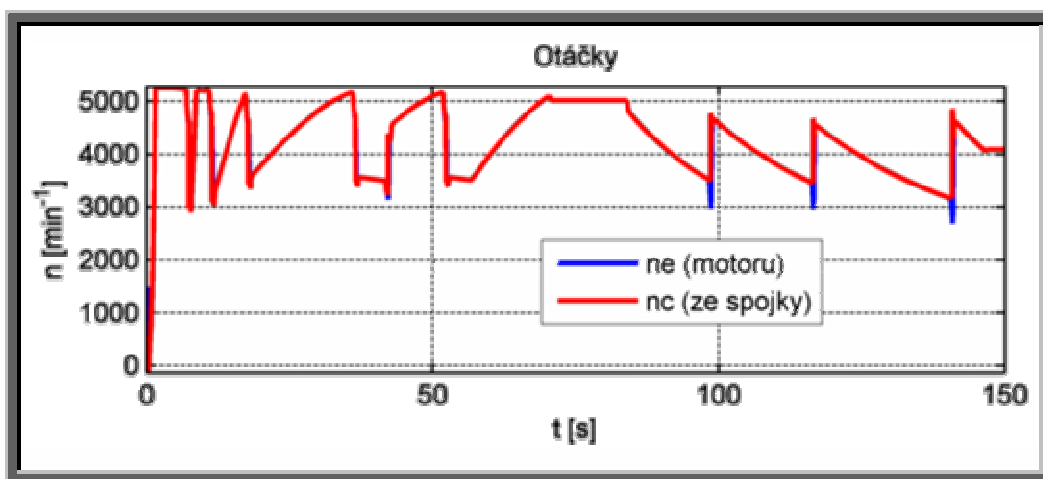
Spuštěním vykreslovací funkce se zároveň zobrazí v okně *Command Window* informace o maximální dosažené rychlosti a času zrychlování na 100 km/h. Druhý údaj není naprosto přesný kvůli konečné velikosti časového kroku a pochází tedy z prvního výpočetního bodu po překročení této rychlosti. Informace ve zbylých dvou řádcích vychází pouze ze vstupních parametrů simulace.

=> MAXIMÁLNÍ RYCHLOST	= 199.8207[km/h] ... 100.0601[km/h] za 16.39[s]
=> MAXIMÁLNÍ VÝKON	= 135.4497[kW] ... 5300[ot./min] ... 244.047[Nm]
=> VÝKON PŘI MAX. MOMENTU	= 125.5677[kW] ... 4400[ot./min] ... 272.519[Nm]



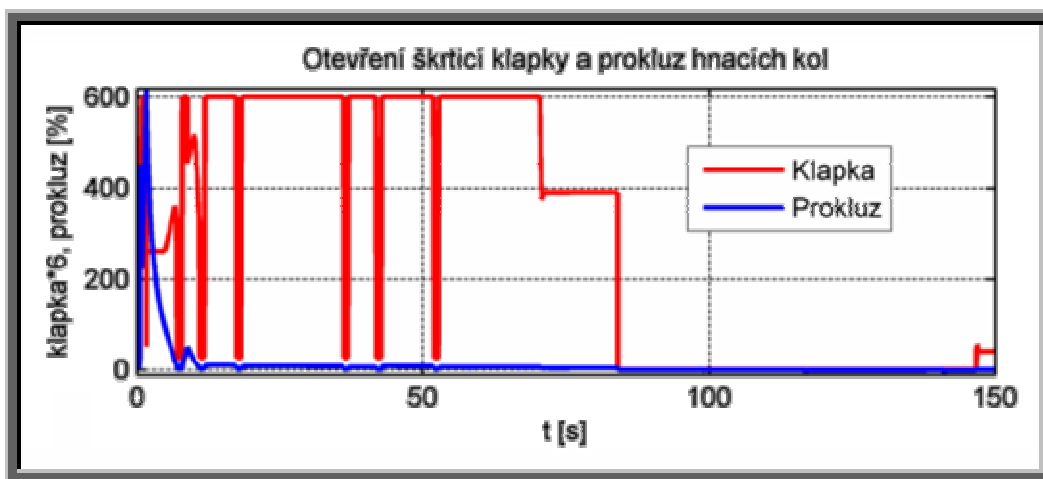
Obr. 5.3 Graf rychlostí

V grafu s rychlostmi na obr. 5.3 jsou průběhy obvodové rychlosti kola, rychlosti vozidla a požadované rychlosti, kterou se vozidlo snaží dosáhnout ovládáním škrticí klapky. Při jízdě na první dva převodové stupně dochází k vysokému prokluzu a vytočení motoru až do maximálních otáček, které jsou omezovány opět přes škrticí klapku. Průběh otáček motoru a výstupního kotouče spojky zobrazuje graf na obr. 5.4. Je zde vidět, že k řazení dochází vždy těsně pod hranicí maximálních otáček motoru a spodní hranice otáček neklesá přibližně pod 3000 min^{-1} , takže je motor při jízdě vždy v oblasti nejvyššího točivého momentu. Práci motoru v tomto režimu lze nastavit ve vstupních parametrech pomocí převodových poměrů a okamžiků řazení.



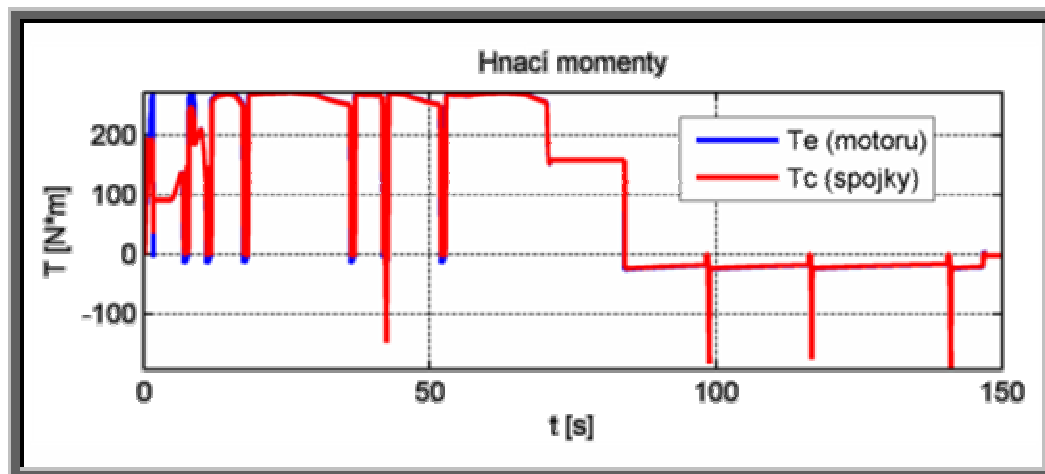
Obr. 5.4 Graf otáček

V dalším grafu na obr. 5.5 je průběh otevření škrticí klapky a prokluzu hnacích kol. Hodnoty klapky jsou zde kvůli přehlednosti 6x zvětšeny. Místa kde je klapka odchýlena od krajních hodnot (nebo v druhé polovině simulace, kde je nulová) dochází k regulaci buď od omezovače otáček nebo tempomatu. V místech krátkého poklesnutí na hodnotu škrticí klapky pro volnoběžné otáčky dochází k řazení. Druhá zobrazená veličina, prokluz, odpovídá poměrům rychlostí v grafu na obr. 5.3.



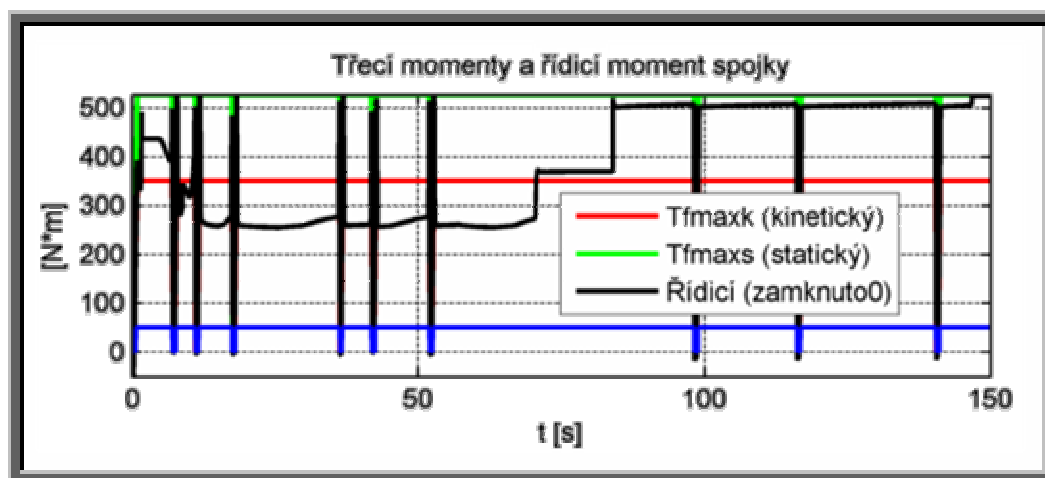
Obr. 5.5 Graf otevření škrticí klapky a prokluzu hnacích kol

Hnací moment motoru a moment přenášený spojkou je v grafu na obr. 5.6. Průběhy odpovídají škrtkové klapce a zadané momentové charakteristice motoru ve vstupních parametrech. Při prokluzování spojky dochází k přenášení kinetického třecího momentu a tím k vyrovnávání otáček motoru a navazující části hnacího ústrojí. To se projevuje např. při podřazování u brzdění motorem (v druhé polovině simulace) krátkodobým zvýšením brzdného momentu (záporná hodnota hnacího momentu) než se patřičně urychlí motor.



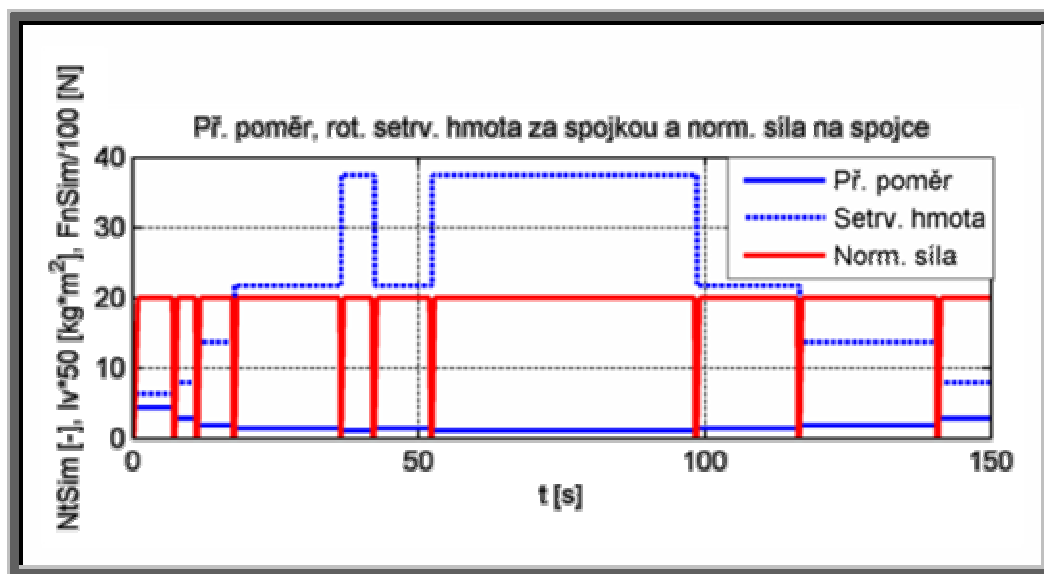
Obr. 5.6 Graf hnacích momentů

Třecí momenty (graf na obr. 5.7) se v simulaci mění jen s normálovou silou spojky a platí, že statický třecí moment při nenulové normálové síle je vždy větší než kinetický. Řídicí moment s černou barvou je pak jedním ze signálů, které rozhodují o režimu spojky. Při jeho záporné hodnotě spojka vždy prokluzuje. Poslední signál s modrou barvou je v grafu 50x zvětšený (v simulaci má hodnotu 1 nebo 0), aby byla v celkovém pohledu rozeznatelná jeho změna, a v modelu řídí aktivované subsystémy s rovnicemi režimů spojky *zamknuto* a *prokluzování*.



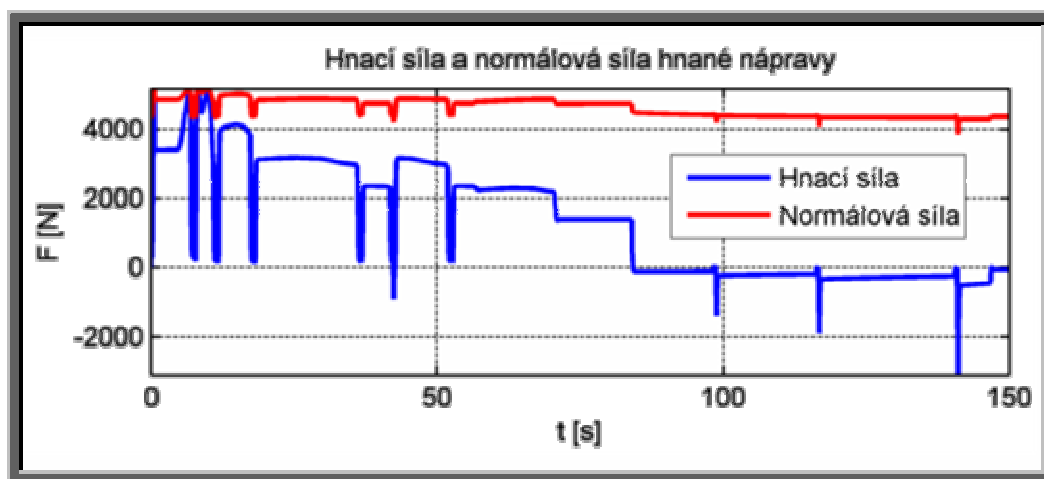
Obr. 5.7 Graf třecích momentů spojky, jejího řídicího momentu a řídicího signálu pro přepínání režimů spojky (modře)

Na obr. 5.8 je graf s průběhy dalších tří signálů. Normálová síla spojky znázorňuje, kdy a jak se pracuje se spojkou – při rozjezdu a řazení. V grafu jsou její hodnoty 100x zmenšeny, aby korespondovaly s hodnotami ostatních signálů. Signál převodového poměru se mění vždy v příslušném okamžiku režimu řazení a odpovídají mu pak i setrvačné hmoty za spojkou, jejichž hodnoty v grafu jsou 50x zvětšeny.



Obr. 5.8 Graf převodového poměru, setrvačných hmot za spojkou a normálové síly spojky

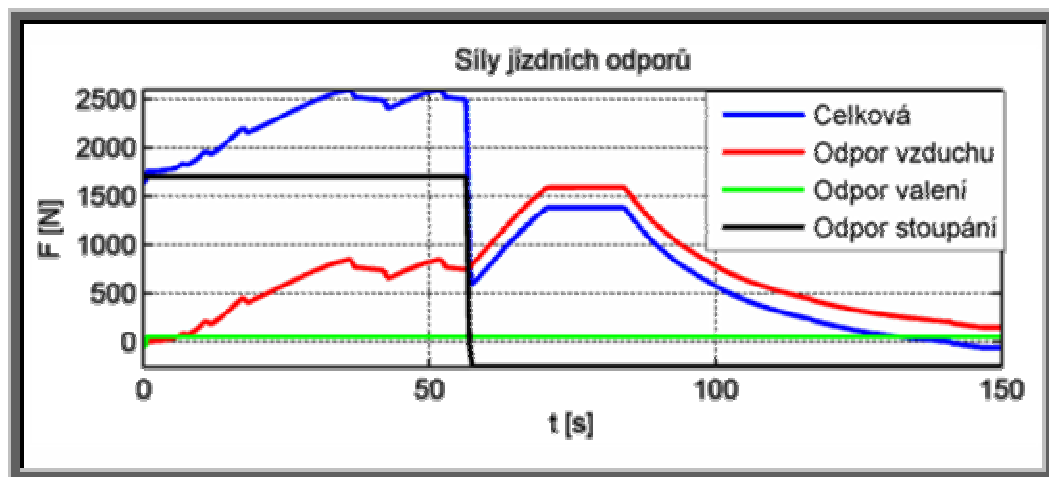
Hnací sílu a normálovou sílu hnané nápravy zobrazuje graf na obr. 5.9. Hnací síla je daná přímo velikostí prokluzu z obr. 5.5. Tvar normálové síly pak odpovídá hnací síle a během simulace se mění jen podle její hodnoty.



Obr. 5.9 Graf hnací síly a normálové síly na hnané nápravě

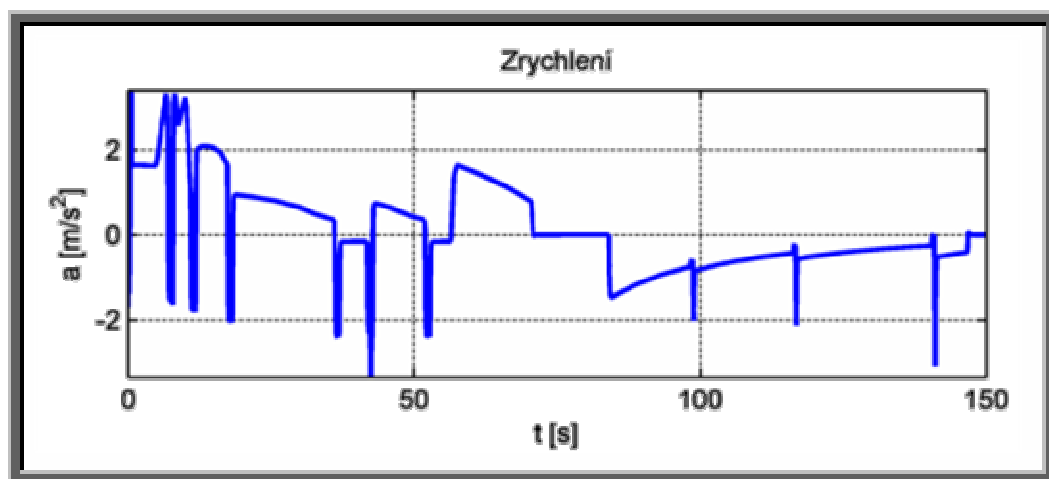
Další síly, které působí na hmoty vozidla, jsou síly jízdních odporů v grafu na obr. 5.10. Síla odporu vzduchu odpovídá svým charakterem signálu s rychlostí vozidla. Odpor valení je

při jízdě konstantní, mění se jen znaménko jeho hodnoty podle směru jízdy, a síla od stoupání vozovky závisí na zadaném průběhu úhlu od stoupání vozovky (obr. 5.12). Celková síla je pak součtem všech dílčích sil.



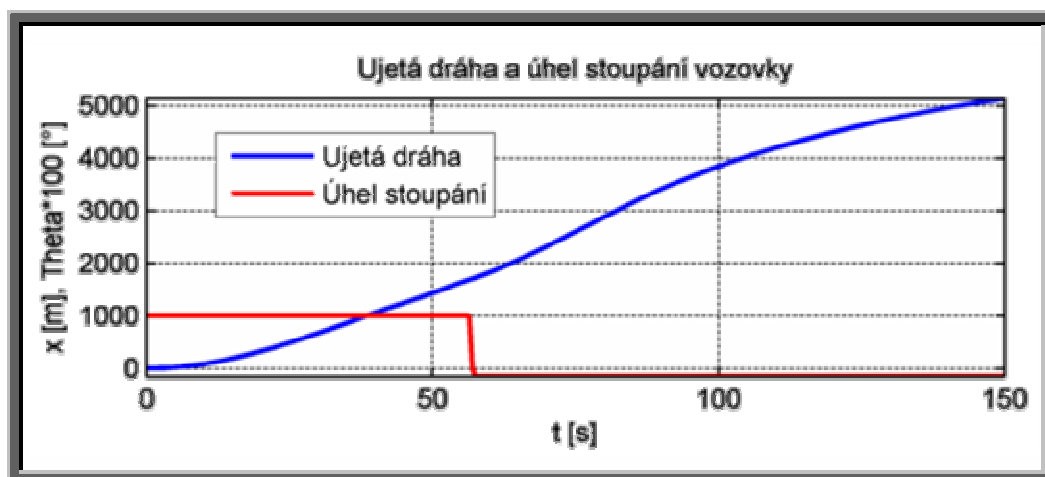
Obr. 5.10 Graf se silami jízdních odporů

Hnací a odporové síly působí na hmotu vozidla, které je jejich výslednicí urychlováno nebo zpomalováno, jak zobrazuje graf na obr. 5.11. Krátkodobé výkyvy zrychlení jsou způsobeny řazením, stejně jako u průběhu hnací síly. Pokud je zrychlení nulové, znamená to, že je pomocí regulace škrtkic klapky dosažena a udržována požadovaná rychlost vozidla.

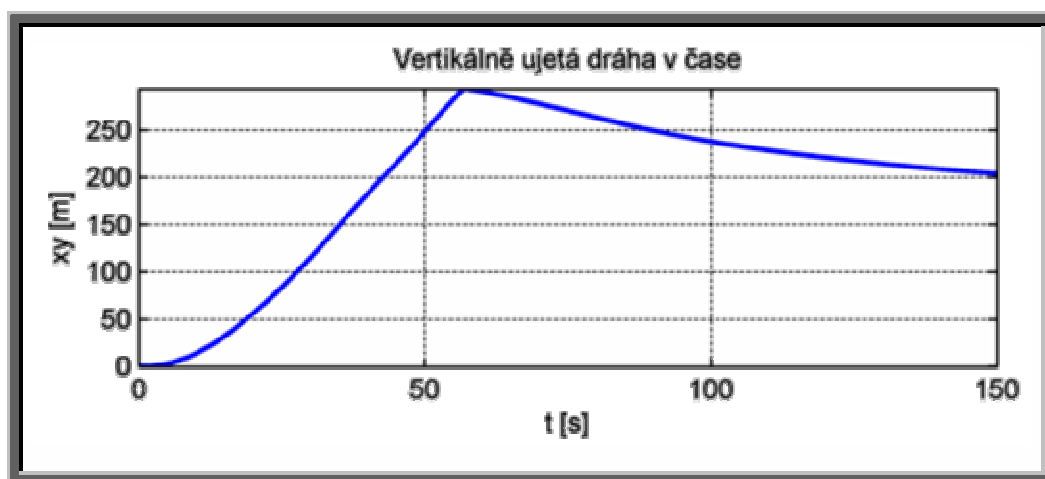


Obr. 5.11 Graf zrychlení

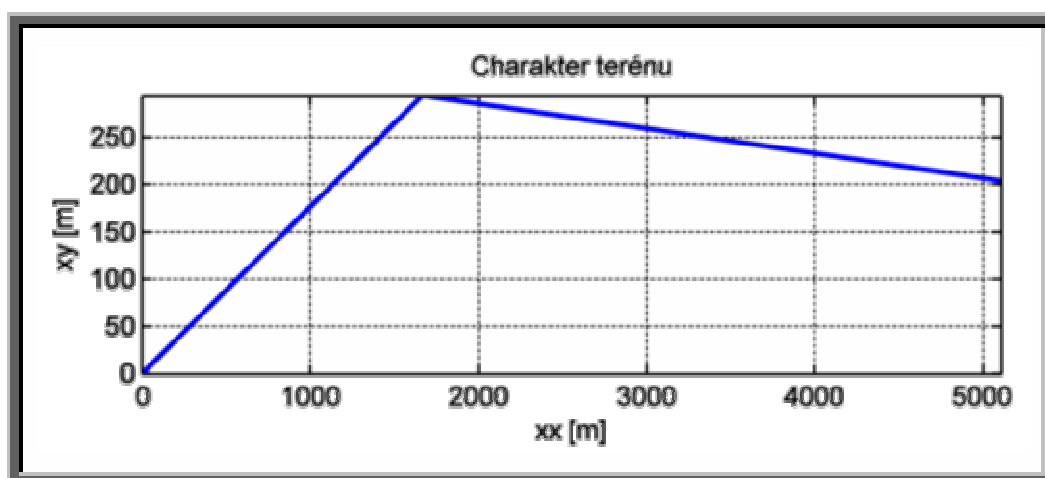
Poslední tři grafy zobrazují informace o terénu projížděného úseku. Na obr. 5.12 je vykreslena celková uražená dráha podle tvaru vozovky a úhel stoupání vozovky, který je ale v grafu 100x zvětšený, aby byl jeho průběh rozeznatelný. Graf na obr. 5.13 zobrazuje průběh vertikálně uražené dráhy v závislosti na čase. Udává, jak vysoko od místa startu se vozidlo v daném čase nachází. Poslední graf na obr. 5.14 zobrazuje průběh terénu. Je to závislost vertikálně uražené dráhy na dráze vodorovné. Při vyrovnaní měřítek na obou osách by zobrazená křivka odpovídala skutečnému tvaru vozovky dle zadaných vstupních parametrů.



Obr. 5.12 Graf ураженé dráhy a úhlu stoupání vozovky



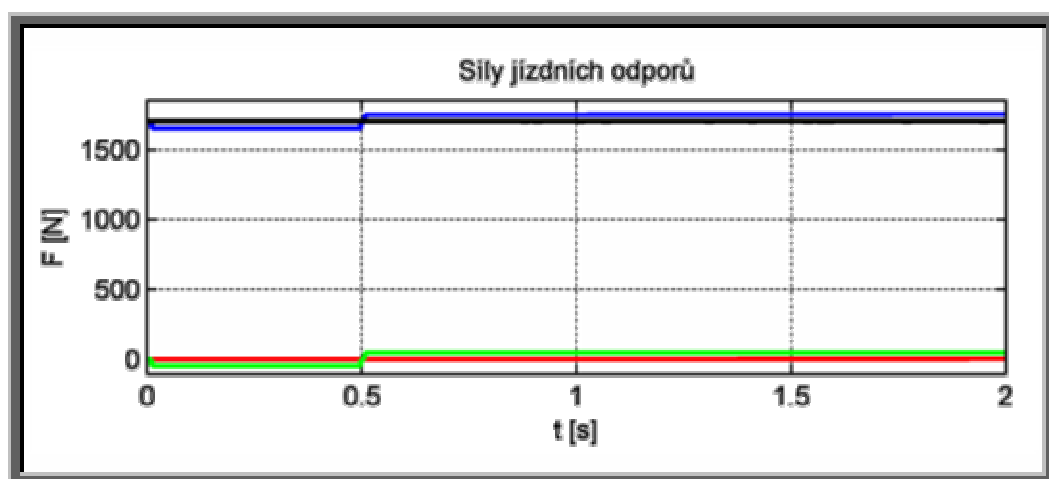
Obr. 5.13 Graf s vertikálně ураženou dráhou v čase



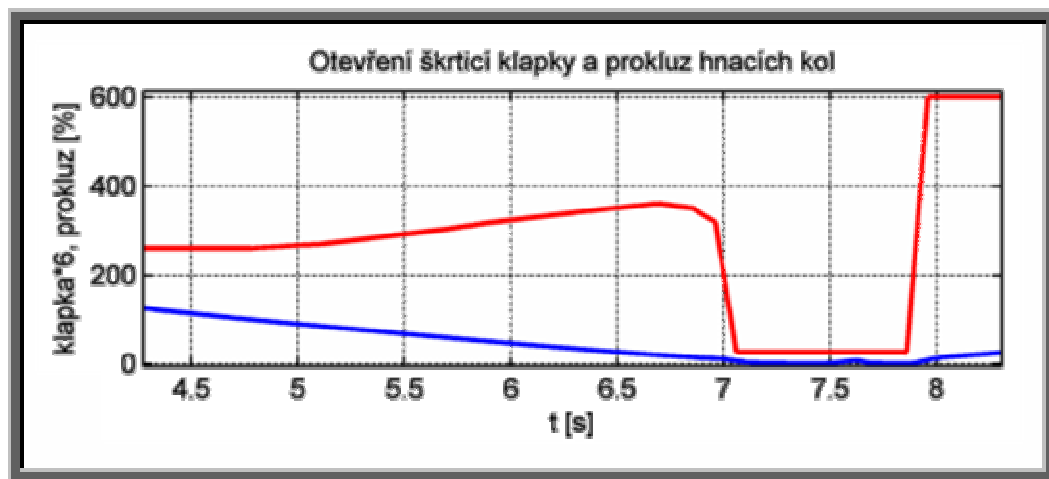
Obr. 5.14 Graf charakteru projetého terénu

5.2 Rozjezd vozidla

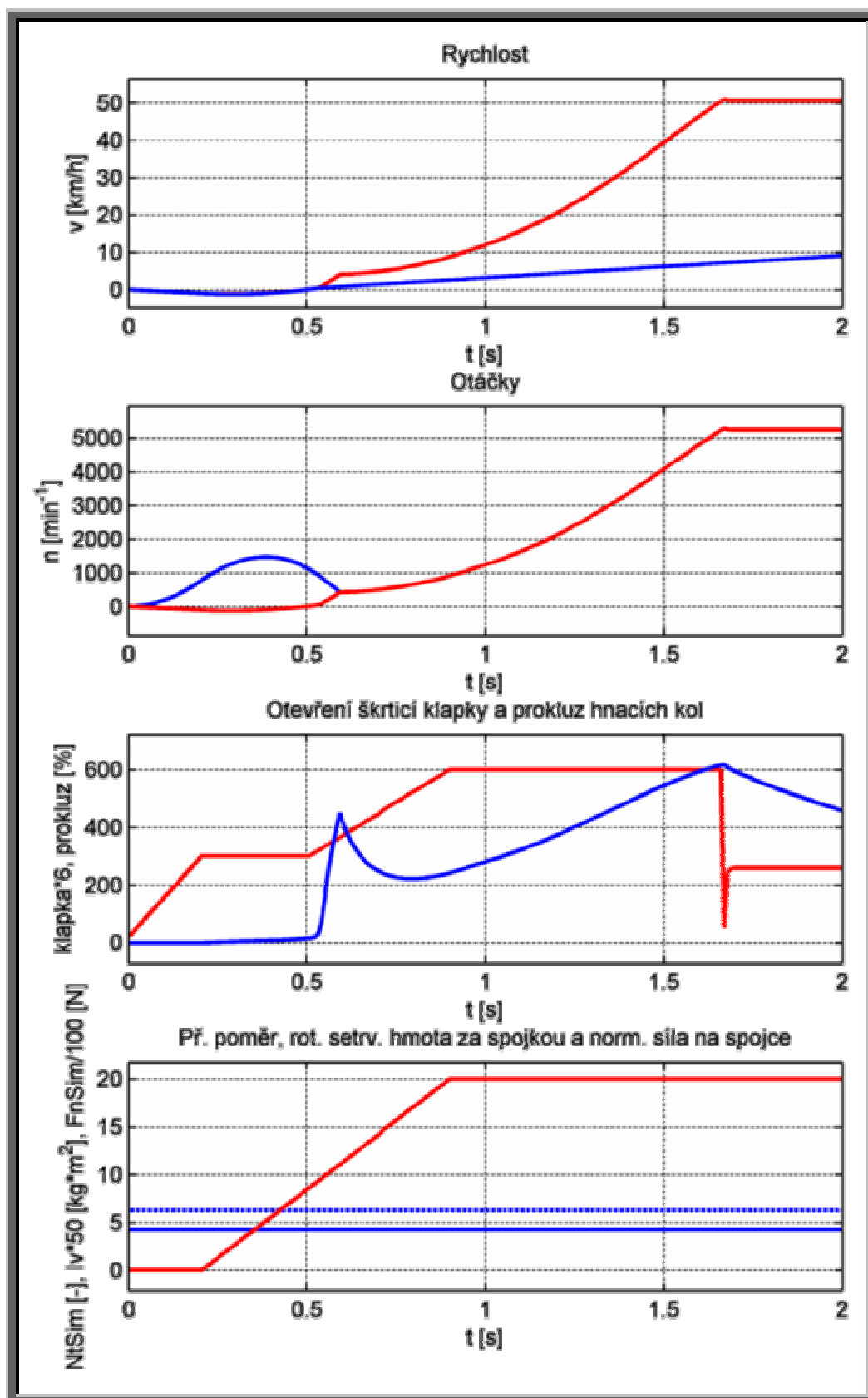
Při rozjíždění vozidla v kopci dochází nejprve k couvání, protože ještě není vytočený motor a uvolněná spojka. To se v grafech projevuje zápornou rychlostí vozidla, zápornými otáčkami hnacího ústrojí, zápornou silou valivého odporu v grafu na obr. 5.15, záporným zrychlením a malou kladnou hnací silou v okamžiku, kdy ještě motor není v záběru. Hnací síla v této chvíli vzniká působením setrvačnosti hnacího ústrojí proti zápornému zrychlování vozidla. Síla valivého odporu v grafu na obr. 5.15 začíná působit až po dosažení určité malé rychlosti, aby nebyla započítávána i při stojícím vozidle. Dva spodní grafy na obr. 5.17 červeně zobrazují průběhy ovládacích veličin při rozjezdu. Těsně po uplynutí času 0.5s, kdy znovu začal růst hnací moment přenášený spojkou, vzroste hnací síla, kterou jsou schopny přenést pneumatiky na vozovku, na maximum a dojde k „utržení“ hnacích kol od vozovky. Prudce vzroste prokluz a klesá hnací síla podle charakteristiky pneumatik. Po dosažení koncového bodu této charakteristiky zůstává přenášená síla konstantní. Obvodová rychlost kol se stále zvyšuje, až do dosažení maximálních otáček motoru, kdy dojde k aktivaci regulace otáček pomocí škrticí klapky. K výkyvu klapky při aktivování omezovače dochází vlivem jejího automatického přizpůsobování. V grafu hnacích momentů na obr. 5.18 se



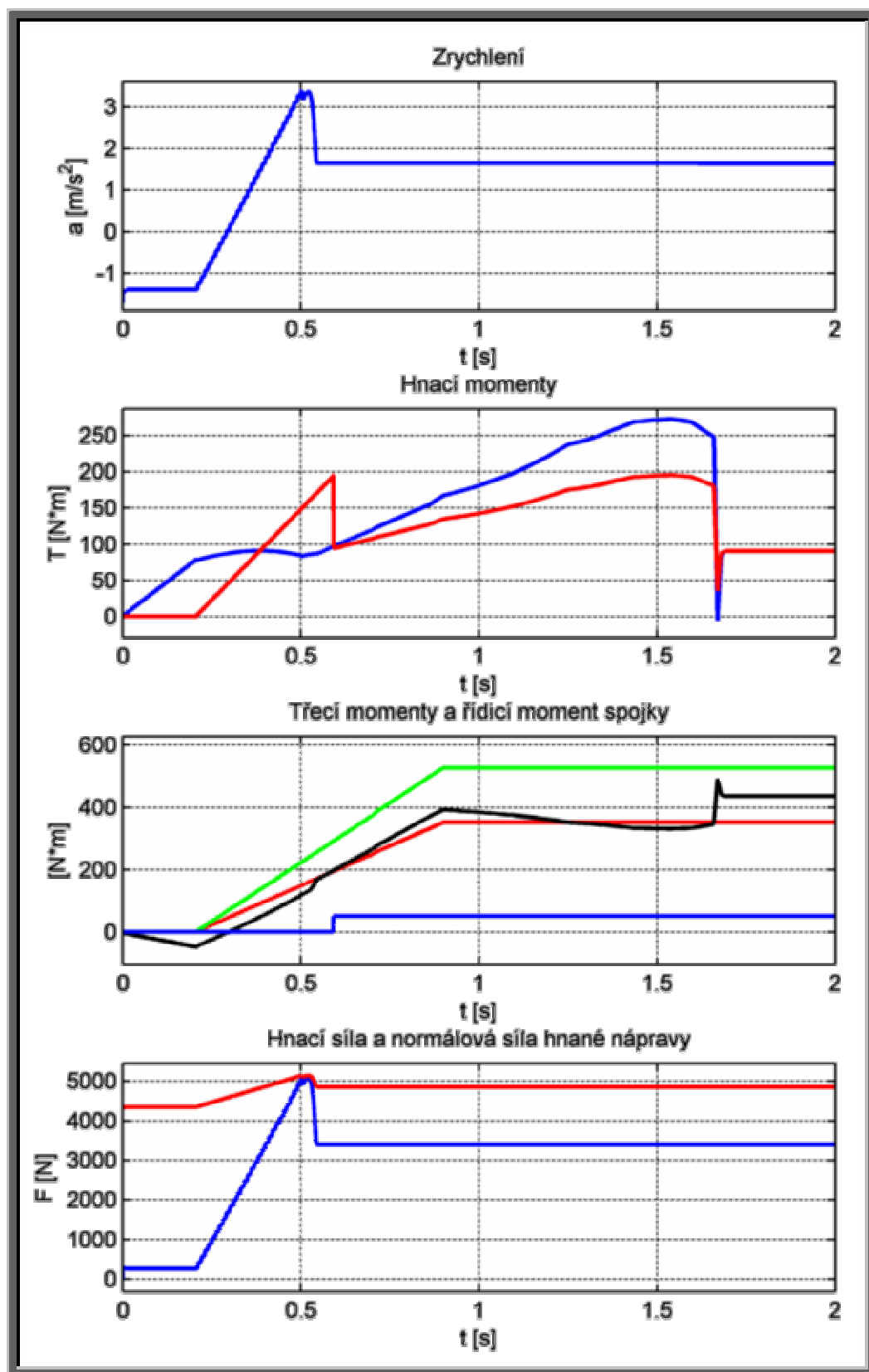
Obr. 5.15 Graf sil jízdních odporů v oblasti rozjezdu



Obr. 5.16 Graf otevření škrticí klapky a prokluzu hnacích kol v oblasti prvního řazení



Obr. 5.17 Grafy v oblasti rozjezdu



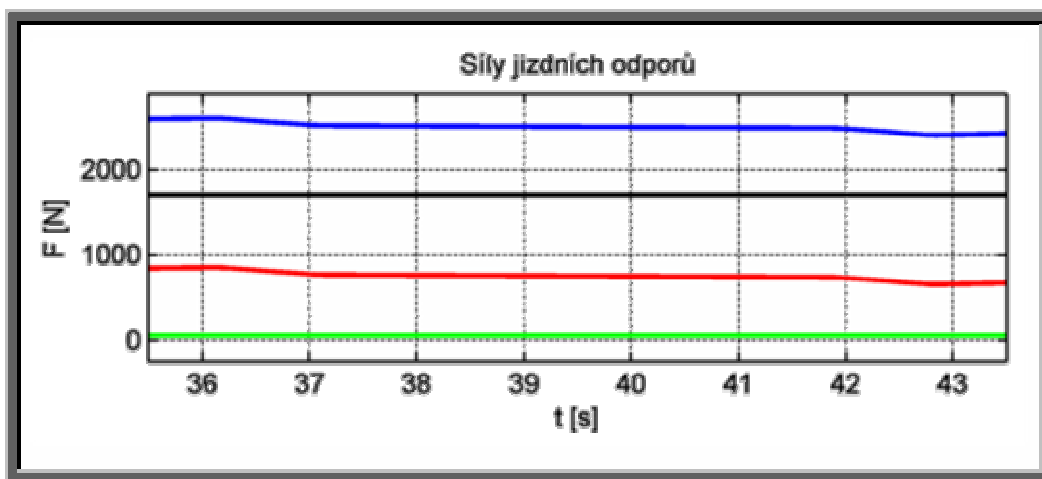
Obr. 5.18 Grafy v oblasti rozjezdu

řídí průběh hnacího momentu motoru otáčkami podle momentové charakteristiky. Rozdíl mezi hnacím momentem motoru a momentem přenášeným spojkou dál do hnacího ústrojí je způsoben úbytkem tohoto momentu při zvyšování otáček motoru. V oblasti regulace na maximální otáčky motoru už mezi nimi není žádný rozdíl, protože má celá soustava hnacího ústrojí nulové zrychlení a tím tedy konstantní otáčky. Žádná energie už pak není spotřebovávána na urychlování částí hnacího ústrojí a to co přijde z motoru (po zmenšení vlivem účinnosti) zase odchází přes kola na vozovku. Vozidlo je dál urychlováno touto silou a díky konstantním otáčkám hnacího ústrojí se zmenšuje rozdíl mezi rychlostí vozidla a obvodovou rychlostí hnacích kol. Tím dochází ke zmenšování prokluzu a až se jeho hodnota dostane z kraje zpět mezi zadané body charakteristiky, zvětší se síla přenášená hnacími koly. Pak je tedy z hnacího ústrojí odebírána tato větší síla a regulátor škrticí klapky musí přidat plyn, aby splnil svůj úkol udržení konstantních otáček motoru na maximální hodnotě (obr. 5.16). Režim této regulace je přerušen dosažením rychlosti vozidla pro řazení a průběh klapky přejde do tohoto režimu navázáním na předchozí stav.

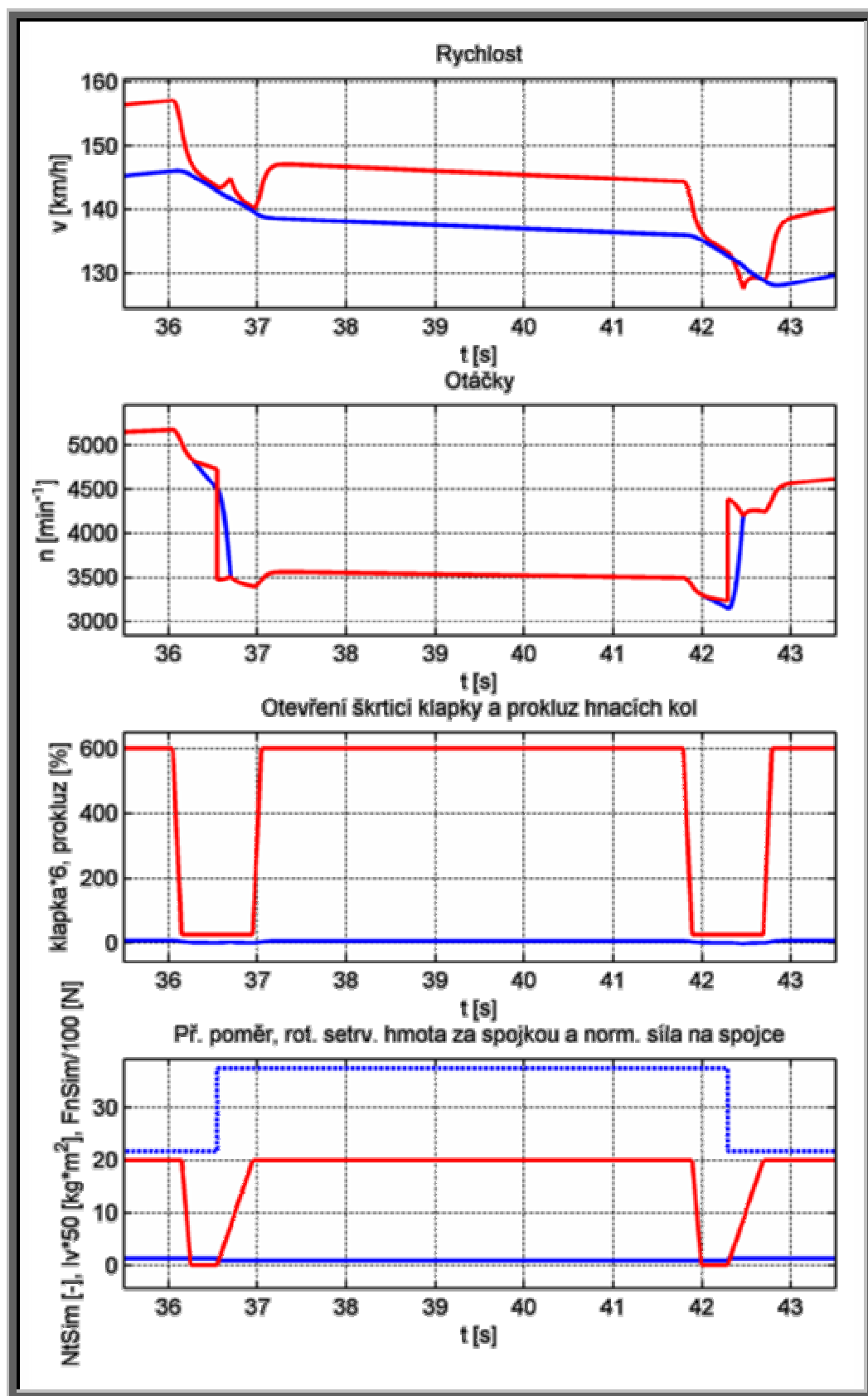
5.3 Řazení a podřazování

Vybraný úsek znázorňuje situaci, kdy vozidlo jede do kopce a má zařadit vyšší převodový stupeň. Moment na hnacích kolech už pak ale nestačí na další zrychlování a vozidlo zpomaluje. Až dosáhne hraniční rychlosti, dochází k podřazení zpět na předchozí převodový stupeň. Na obr. 5.19 je graf s průběhem sil jízdních odporů při popsané situaci. Mění se zde pouze síla odporu vzduchu podle rychlosti (spolu s celkovou odporovou silou).

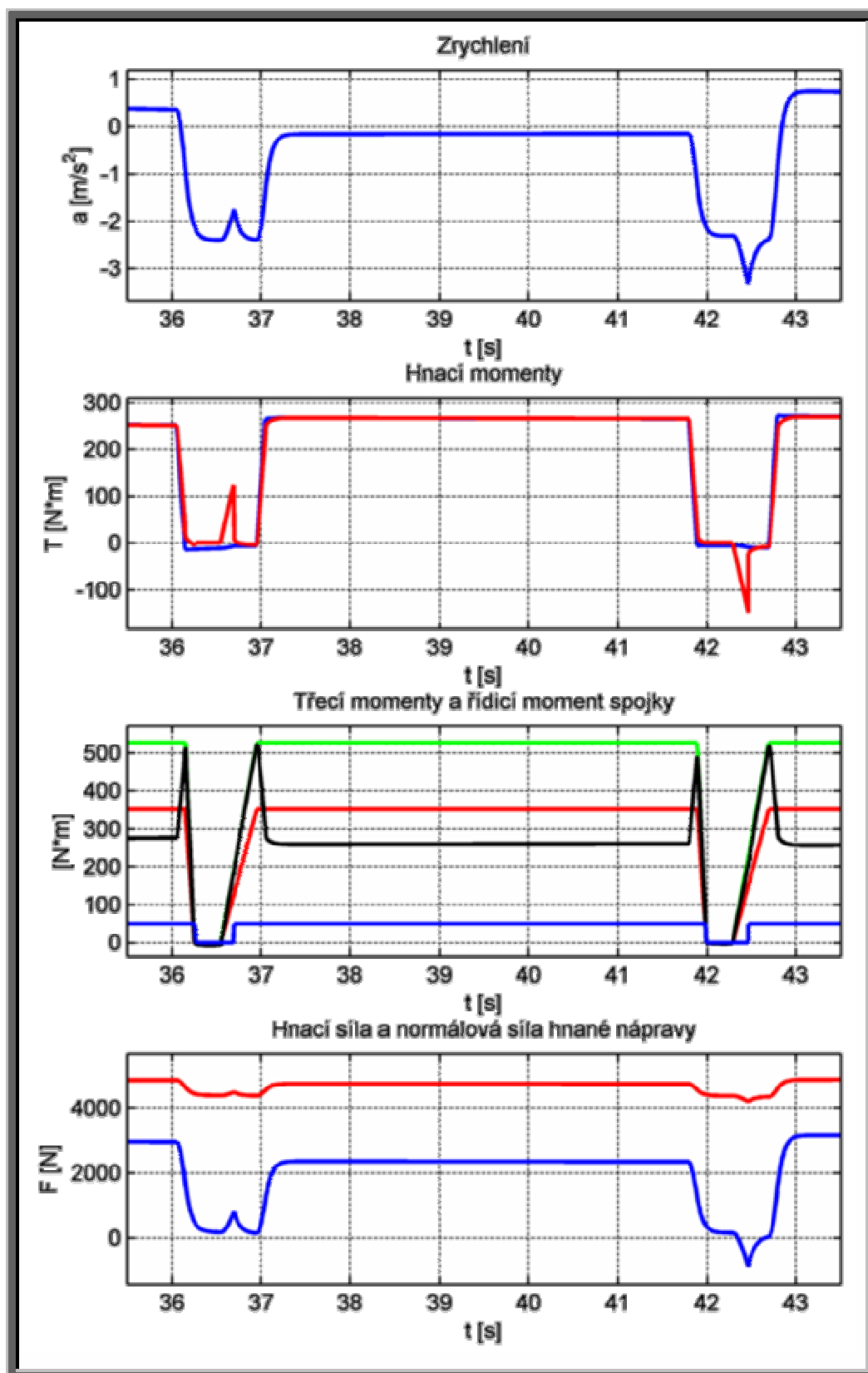
Dosažením definované rychlosti řazení se aktivují průběhy ovládacích veličin a tím klesá hnací síla spolu s prokluzem a zrychlením. Jakmile pokles v průběhu normálové síly na spojce způsobí její přechod do režimu prokluzování, oddělí se otáčky motoru a navazující části hnacího ústrojí. Motor je nyní zpomalován svým brzdným momentem při volnoběžné škrticí klapce. Od okamžiku změny převodového poměru je spojka uvolňována a otáčky motoru klesají rychleji, protože jeho setrvačné hmoty odevzdávají svou energii spojce. To se projeví v grafu hnacích momentů (obr. 5.21) nárůstem momentu přenášeného spojkou, zrychlením i hnací síly. Stejně probíhá i podřazování s tím rozdílem, že je vozidlo setrvačnými hmotami motoru brzděno, protože dochází k jeho urychlování z kinetické energie vozidla.



Obr. 5.19 Grafy v oblasti rozjezdu

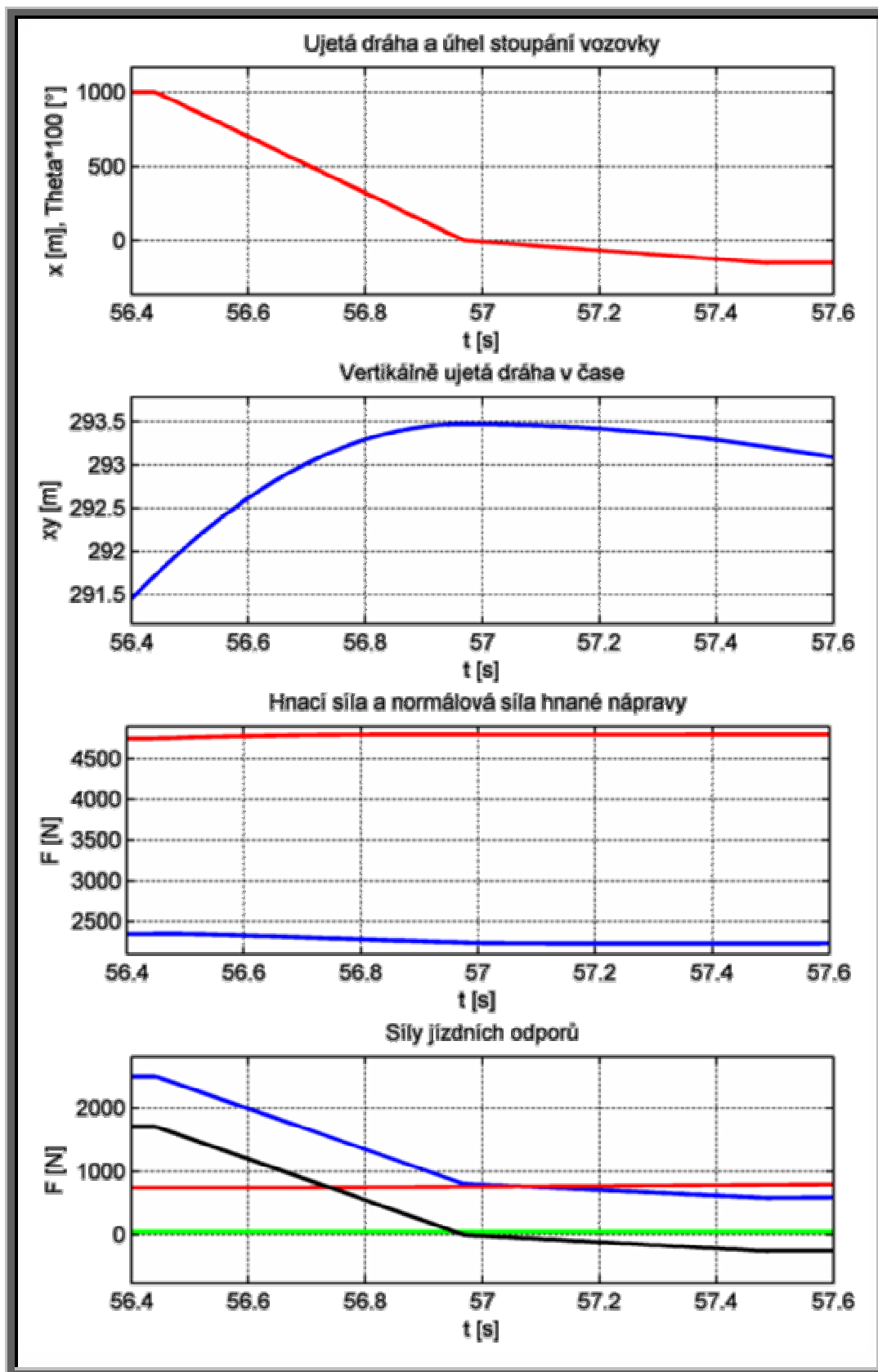


Obr. 5.20 Grafy v oblasti přeřazování

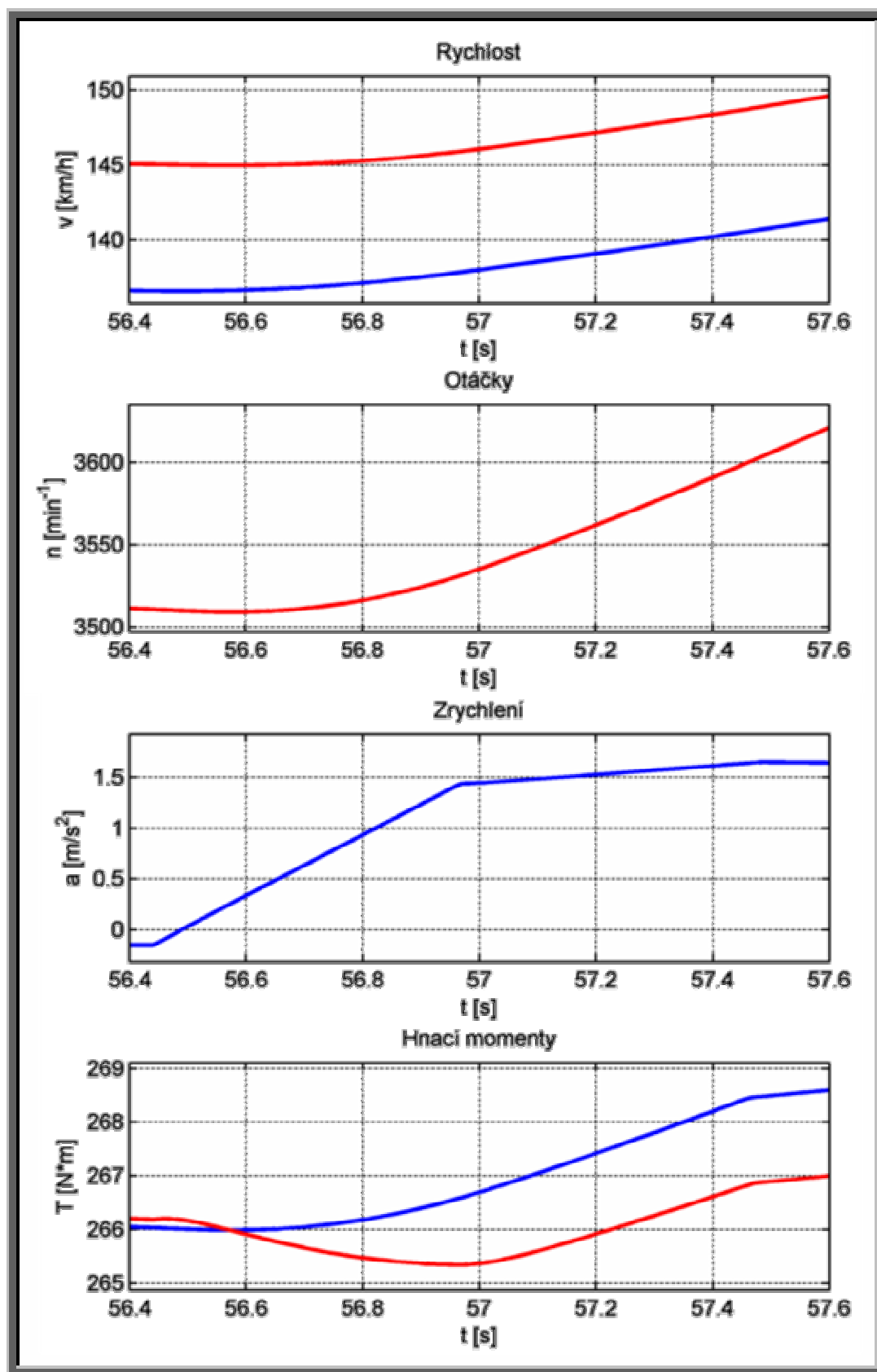


Obr. 5.21 Grafy v oblasti přerazování

5.4 Změna charakteru vozovky



Obr. 5.22 Grafy v oblasti změny charakteru vozovky

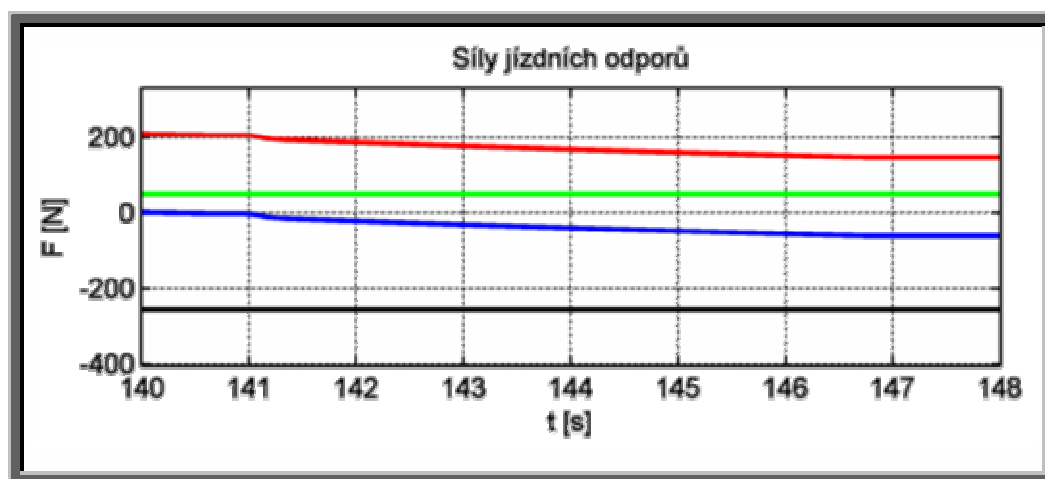


Obr. 5.23 Grafy v oblasti změny charakteru vozovky

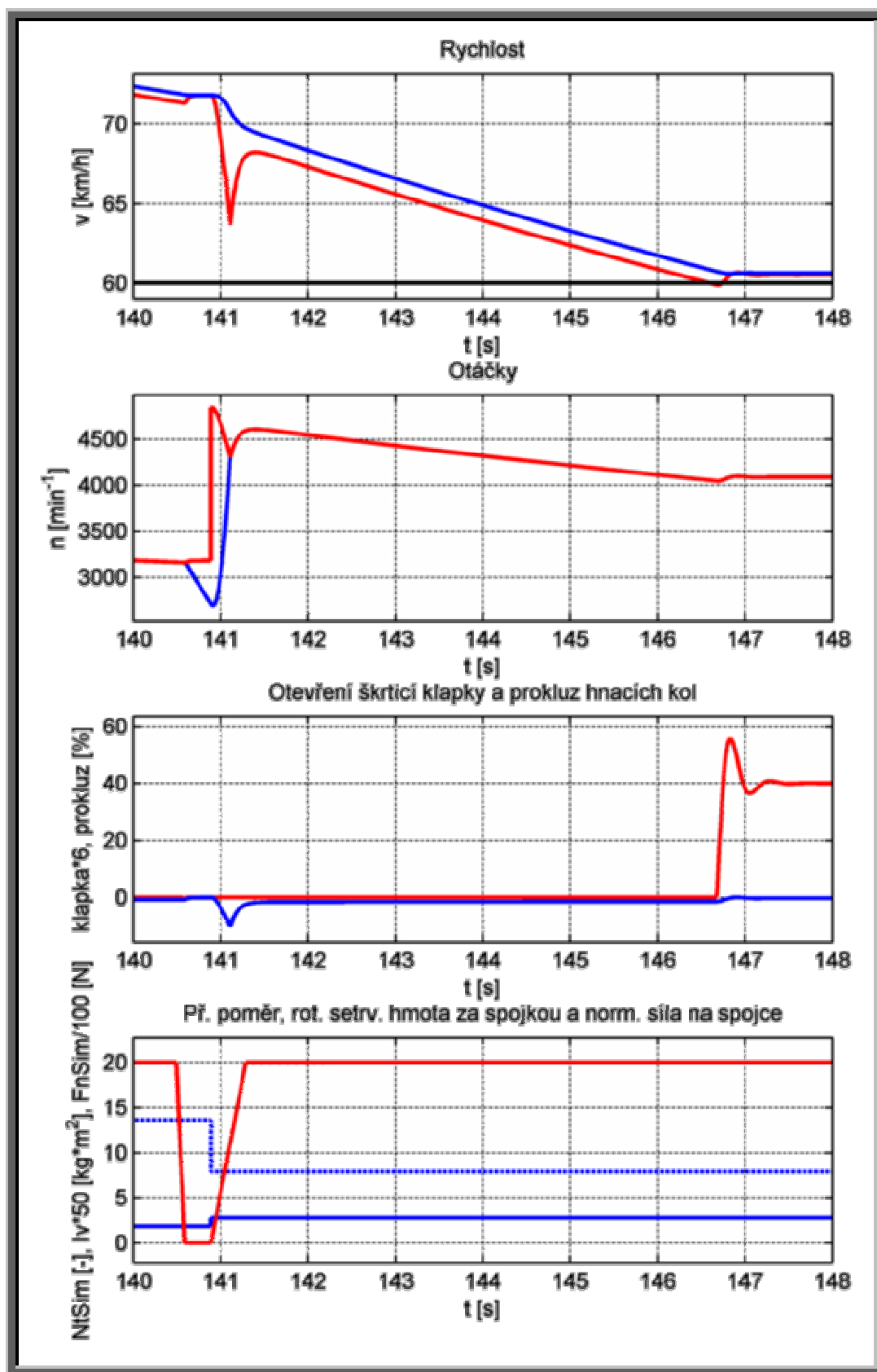
Vertikální tvar vozovky se v modelu mění plynule podle průběhu úhlu jejího stoupání. Tvaru křivky tohoto úhlu stoupání pak odpovídá i průběh odporové síly od stoupání vozovky (černě na *obr. 5.22*) a také má vliv na podobný charakter zrychlení vozidla (*obr. 5.23*), které je ale ovlivněno ještě hnací silou (modře na *obr. 5.22*). Zajímavý je průběh hnacích momentů ve spodním grafu na *obr. 5.23*, kdy je v úseku zpomalování vozidla moment přenášený spojkou větší než hnací moment motoru. Je to způsobeno právě zpomalováním, kdy motoru klesají otáčky a kinetická energie jeho hmot je tak předávána do dalších částí hnacího ústrojí. Ze stejného principu vychází i další část tohoto grafu, kdy je naopak větší hnací moment motoru. Dochází zde totiž k urychlování a část hnacího momentu motoru se spotřebuje na jeho samotné urychlení. Rozdíl v charakteru průběhů hnacího momentu přenášeného spojkou a hnací síly na kolech je dán zase tím, že se část energie spotřebovává na urychlení hnacího ústrojí za motorem až ke kolům.

5.5 Podřazování při brzdění motorem

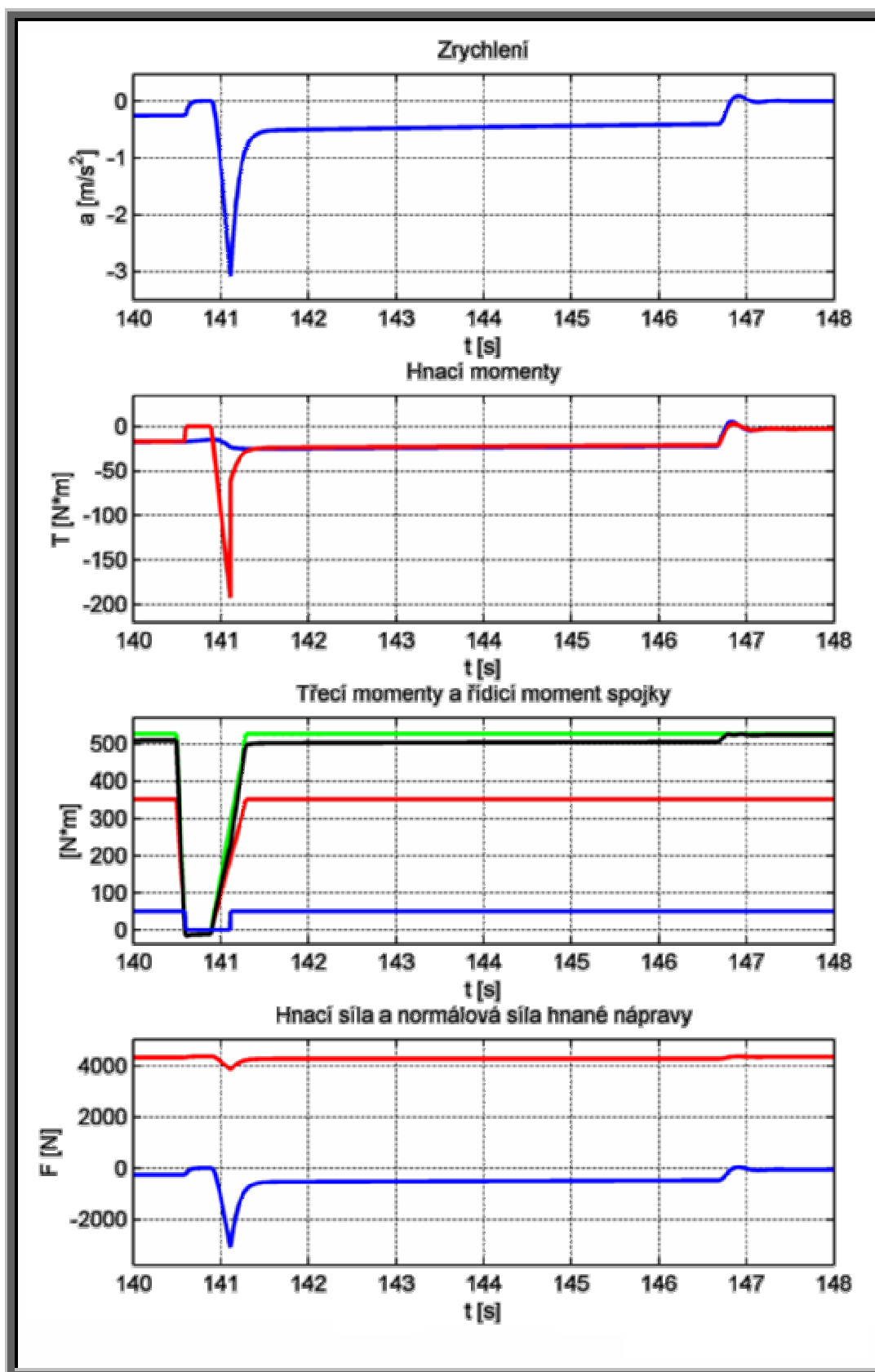
Zobrazený úsek představuje zařazení nižšího převodového stupně při brzdění motorem a nakonec dosažení požadované rychlosti. Graf na *obr. 5.24* znázorňuje průběh jízdních odporů, kde se mění jen síla odporu vzduchu (a celková odporová síla) vlivem zpomalování vozidla. Změny všech křivek v oblasti řazení jsou spuštěny poklesem rychlosti vozidla na řadící rychlost, čímž dojde k aktivování režimu *řazení* s příslušnými průběhy ovládacích veličin. Jedná se o průběh normálové síly na spojce v grafu na *obr. 5.25* dole (červeně) a průběh škrticí klapky (také červeně nad předchozím zmíněným grafem), který normálně při řazení (mimo situace při brzdění motorem) končí s plným výkonem, je nyní držen na nulové hodnotě. Rozpojením spojky se tedy hnací síla přiblíží nule a klesne i prokluz přízpůsobením obvodové rychlosti hnacích kol k rychlosti vozidla. Motor je zpomalován svým brzdícím momentem a jeho otáčky klesají. To se děje až do podřazení a tedy změny převodového poměru, současně vzrostou otáčky hnacího ústrojí mezi spojkou a převodovkou. Od tohoto okamžiku je uvolňována spojka a tím se odebírá kinetická energie vozidla pro urychlení motoru na otáčky navazující části hnacího ústrojí. V grafech tím dojde ke krátkodobému snížení hnací síly, zrychlení, prokluzu, hnacího momentu a prudšímu snížení rychlosti vozidla. Stejně veličiny pak vzrostou při snížení rychlosti na požadovanou a automatickém přízpůsobení škrticí klapky pro vyrovnání všech odporů a udržení této rychlosti.



Obr. 5.24 Grafy se silami jízdních odporů v oblasti podřazování při brzdění motorem



Obr. 5.25 Grafy v oblasti podřazování při brzdění motorem



Obr. 5.26 Grafy v oblasti podřazování při brzdění motorem

Závěr

Cíl této diplomové práce, vytvořit v programu MATLAB Simulink matematický model hnacího ústrojí motorového vozidla, byl splněn ve všech bodech. Simulační model zahrnuje přenos hnací síly přes spojku a změnu převodového poměru pomocí převodovky, jak je uvedeno v zadání práce. Při její tvorbě bylo nezbytné důkladné seznámení s pracovním prostředím programů MATLAB / Simulink a porozumění funkcím jednotlivých bloků základní knihovny Simulinku.

Nad rámec zadání práce je v modelu navíc počítáno i s prokluzováním hnacích kol vůči vozovce podle zadané charakteristiky pneumatik, kdy je velikost normálové síly na hnací nápravě během simulace počítána z rovnic dynamického pohybu vozidla. Je zde také zahrnuta možnost volby mezi pohonem na přední nebo zadní nápravu. Dál model umožňuje zadání průběhu úhlu stoupání vozovky v závislosti na vodorovně uražené dráze a tím tedy definování vertikálního profilu tratě pro průjezd vozidlem. Při těchto úpravách modelu vznikla nutnost vytvoření systému automatického ovládání veličin pro řízení jízdy vozidla. Jedná se o normálovou sílu na spojce, otevření škrticí klapky a volbu převodových poměrů při řazení. K tomuto účelu model přepíná mezi třemi jízdními režimy: *rozjezd*, *řazení* a *jízda*, pro které jsou definovány průběhy zmíněných veličin. V režimu *jízda* pak dochází k regulaci škrticí klapky, aby vozidlo dosáhlo a udržovalo rychlost ze zadaného průběhu požadované rychlosti. Další regulování škrticí klapky probíhá při omezování maximálních otáček motoru. Model motoru uvažuje také jeho brzdňý moment, který se nejprve přičítá k zadané momentové charakteristice. Tím vznikne průběh celkového momentu od působení spalovacího procesu. Po následném vynásobení podílem otevření škrticí klapky a odečtení celého brzdňého momentu je k dispozici skutečný hnací moment motoru pro uvažování v simulaci. Takový model motoru je pak možné použít při jízdě pro brzdění motorem, což je jedna z oblastí ve výsledcích průběhu simulace. V režimu *rozjezd* musí být průběh ovládacích veličin takový, aby měl motor při jeho ukončení vyšší otáčky než volnoběžné. Při nižších otáčkách pak totiž model automaticky rozpojí kotouče spojky.

Výsledky práce jsou prezentovány jako grafy s průběhy signálů získaných ze simulace. Vstupní parametry byly nastaveny tak, aby tyto grafy zobrazovaly různé situace, které při jízdě nastávají a model s nimi počítá. Kapitola s výsledky je rozdělena na několik částí, které se zabývají konkrétním místem z průběhu celé simulace. Rozebrány byly průběhy v oblasti rozjezdu vozidla, řazení a podřazování, změny charakteru vozovky a podřazování při brzdění motorem. Pro ověření věrohodnosti těchto výsledků by ještě bylo třeba je experimentálně ověřit.

Pro správný chod simulace bylo potřeba do modelu zahrnout určité zkreslení prokluzu a tím i dalších souvisejících signálů při rychlosti vozidla do 0.5km/h. Dalším zkreslením je započítání valivého odporu až od rychlosti 0.05km/h. A nakonec dochází ještě k nepřesnosti u přepínání pracovních režimů spojky, kdy je při rozdílu úhlových rychlostí kotoučů spojky do 0.01rad/s (přibližně 0.1min⁻¹) uvažováno jejich pevné spojení. Jinak vše probíhá podle popsaných rovnic a vstupních parametrů. Zajímavostí je, že v určitém stádiu modelu bylo při jeho spuštění v různých verzích Simulinku zjištěno odlišné chování.

Možnosti využití vytvořeného modelu jsou široké. Usnadňuje např. návrh převodových poměrů pro konkrétní pohonnou jednotku, kdy lze zajistit řazení při určitých otáčkách a rychlosti vozidla. Dále pro každý průběh momentové charakteristiky a další parametry vozidla model podá informace o jeho dynamických vlastnostech. Je to např. doba zrychlení 0-100km/h, maximální dosažitelná rychlost, porovnání pohonu přední a zadní nápravy při jízdě konkrétní tratí, vliv ovládání spojky a plynového pedálu během řazení, brzdňý účinek u brzdění motorem apod.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *MATLAB – jazyk pro technické výpočty* | Humusoft [online]. c2010. [cit. 2010-02-14]. Dostupný z WWW: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/matlab/>.
- [2] DUŠEK, F. *MATLAB a SIMULINK: úvod do používání*. Pardubice, 2000. 146 s. Univerzita Pardubice v Pardubicích. Skripta.
- [3] *Simulink - Simulace a Model-Based Design* | Humusoft [online]. c2010. [cit. 2010-02-14]. Dostupný z WWW: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/simulink/>.
- [4] The MathWorks, Inc. *Using Simulink and Stateflow in Automotive Applications* [online]. Natick, MA USA: The MathWorks, Inc., 1998. [cit. 2010-02-21]. Simulink-stateflow technical examples. Dostupný z WWW: <http://www.mathworks.com/mason/tag/proxy.html?dataid=229&fileid=559>.
- [5] PORTEŠ, P. *Vehicle Dynamics: Axle Loads*. Brno, 2006. 6 s. ÚADI FSI VUT v Brně. PDF. Přednáška č.2.
- [6] Odpor vzduchu. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikimedia Foundation, 2001- , strana naposledy edit. 2010-02-08 [cit. 2010-03-15]. Česká verze. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Odpor_vzduchu.
- [7] Valivý odpor. *Wikipedie : otevřená encyklopedie* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikimedia Foundation, 2001- , strana naposledy edit. 2009-03-22 [cit. 2010-03-15]. Česká verze. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Valivý_odpor#Valiv.C3.BD_odpor.
- [8] PORTEŠ, P. *Vehicle Dynamics: Tires*. Brno, 2006. 58 s. ÚADI FSI VUT v Brně. PDF. Přednáška č.6.
- [9] PORTEŠ, PETR. Engine. [elektronická pošta]. Message to: Marek Petr. 24 March 2010 [cit. 2010-03-24]. Osobní komunikace.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Proměnné

a	$[m/s^2]$	$\Rightarrow$ zrychlení vozidla,
b	$[m]$	$\Rightarrow$ vzdálenost těžiště od přední nápravy,
c	$[m]$	$\Rightarrow$ vzdálenost těžiště od zadní nápravy,
C_x	$[-]$	$\Rightarrow$ součinitel odporu vzduchu,
D_a	$[N]$	$\Rightarrow$ síla odporu vzduchu,
d_h	$[m]$	$\Rightarrow$ vzdálenost působíště tažného zařízení od zadní nápravy,
F	$[N]$	$\Rightarrow$ síla přenášená mezi koly vozidla a vozovkou,
F_n	$[N]$	$\Rightarrow$ normálová síla mezi třecími kotouči spojky,
F_o	$[N]$	$\Rightarrow$ síla jízdních odporů působících na vozidlo,
F_{st}	$[N]$	$\Rightarrow$ síla odporu stoupání,
F_{xf}	$[N]$	$\Rightarrow$ hnací síla mezi koly přední nápravy a vozovkou,
F_{xr}	$[N]$	$\Rightarrow$ hnací síla mezi koly zadní nápravy a vozovkou,
F_z	$[N]$	$\Rightarrow$ normálová síla mezi hnací nápravou a vozovkou,
g	$[m/s^2]$	$\Rightarrow$ tíhové zrychlení,
h	$[m]$	$\Rightarrow$ vzdálenost těžiště od vozovky,
h_a	$[m]$	$\Rightarrow$ vzdálenost působíště odporu vzduchu od vozovky,
h_h	$[m]$	$\Rightarrow$ vzdálenost působíště tažného zařízení od vozovky,
I_{ce}	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti části spojky na straně motoru,
I_{ct}	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti části spojky na straně převodovky,
I_d	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti spojovacího hřídele,
I_e	$[Nm]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti hmoty motoru,
I_E, I_V	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ momenty setrvačnosti příslušných částí hnacího ústrojí vozidla redukované na otáčky kotoučů spojky,
I_{fd}	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti části koncového převodu na straně spojovacího hřídele,
I_{fw}	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti části koncového převodu na straně hnacích kol,
I_{tc}	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti části převodovky na straně spojky,
I_{td}	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti části převodovky na straně spojovacího hřídele,
I_w	$[kgm^2]$	$\Rightarrow$ moment setrvačnosti všech kol vozidla i s jejich hřídeli,
k_{ct}	$[Nms/rad]$	$\Rightarrow$ tlumení spojených hmot částí spojky a převodovky,
k_E, k_V	$[Nms/rad]$	$\Rightarrow$ tlumení příslušných částí hnacího ústrojí vozidla redukované na otáčky kotoučů spojky,
k_{ec}	$[Nms/rad]$	$\Rightarrow$ tlumení spojených hmot motoru a části spojky,
k_{fw}	$[Nms/rad]$	$\Rightarrow$ tlumení spojených hmot části koncového převodu a kol vozidla,
k_{tdf}	$[Nms/rad]$	$\Rightarrow$ tlumení spojených hmot části převodovky, spojovacího hřídele a části koncového převodu,
L	$[m]$	$\Rightarrow$ rozvor náprav,
L_{af}	$[N]$	$\Rightarrow$ aerodynamický vztlak působící na přední nápravu vozidla,
L_{ar}	$[N]$	$\Rightarrow$ aerodynamický vztlak působící na zadní nápravu vozidla,
M	$[kg]$	$\Rightarrow$ hmotnost vozidla,
μ_k, μ_s	$[-]$	$\Rightarrow$ kinetický a statický součinitel tření,
N_{tf}	$[-]$	$\Rightarrow$ celkový př. poměr převodovky a koncového převodu (zvláště N_t a N_f),

P	$[-]$	$\Rightarrow$ prokluz kol hnací nápravy,
Θ	$[^\circ]$	$\Rightarrow$ úhel stoupání vozovky,
r	$[N]$	$\Rightarrow$ poloměr kol vozidla,
R	$[m]$	$\Rightarrow$ charakteristický rozměr spojky,
ρ	$[kg/m^3]$	$\Rightarrow$ hustota vzduchu,
r_1, r_2	$[N]$	$\Rightarrow$ vnitřní a vnější poloměr třecích kotoučů,
R_{hx}	$[N]$	$\Rightarrow$ podélná síla působící v tažném zařízení,
R_{hz}	$[N]$	$\Rightarrow$ vertikální síla působící v tažném zařízení,
R_{xf}	$[N]$	$\Rightarrow$ síla valivého odporu mezi koly přední nápravy a vozovkou,
R_{xr}	$[N]$	$\Rightarrow$ síla valivého odporu mezi koly zadní nápravy a vozovkou,
S	$[m^2]$	$\Rightarrow$ čelní plocha vozidla v průmětu do roviny kolmé k podélné ose vozidla,
T_c	$[Nm]$	$\Rightarrow$ moment přenášený spojkou,
T_e	$[Nm]$	$\Rightarrow$ hnací moment motoru,
T_f	$[Nm]$	$\Rightarrow$ třecí moment potřebný k tomu, aby spojka zůstala v režimu <i>zamknuto</i> ,
T_{fmaxk}	$[Nm]$	$\Rightarrow$ kinetický součinitel tření spojky,
T_{fmaxs}	$[Nm]$	$\Rightarrow$ statický součinitel tření spojky,
v	$[m/s]$	$\Rightarrow$ rychlost vozidla,
W	$[N]$	$\Rightarrow$ normálová síla k vozovce od všech kol,
ω_{c0}	$[rad/s]$	$\Rightarrow$ úhlová rychlost kotouče spojky v posledním časovém kroku,
ω_e, ω_c	$[rad/s]$	$\Rightarrow$ úhlové rychlosti kotoučů spojky, označení bez indexu znamená stejné otáčky obou kotoučů,
W_f	$[N]$	$\Rightarrow$ kolmá síla mezi přední nápravou a vozovkou,
W_r	$[N]$	$\Rightarrow$ kolmá síla mezi zadní nápravou a vozovkou,
ω_w	$[rad/s]$	$\Rightarrow$ úhlová rychlost kol hnací nápravy,
ξ	$[m]$	$\Rightarrow$ rameno valivého odporu,
η_{tf}	$[-]$	$\Rightarrow$ celková účinnost převodovky a koncového převodu,

Signály

$0/1/2$	$[-]$	$\Rightarrow$ řídicí signál pro volbu průběhů ovládacích veličin,
F_{nSim}	$[N]$	$\Rightarrow$ signál s průběhem normálové síly spojky,
<i>memory</i>	$[-]$	$\Rightarrow$ řídicí signál pro volbu režimu spojky s informací o režimu v předchozím kroku,
$N0$	$[-]$	$\Rightarrow$ signál s průběhem předchozího převodového poměru,
$N0/Nt$	$[-]$	$\Rightarrow$ signál s průběhem poměru předchozího a aktuálního převodového poměru,
N_i	$[-]$	$\Rightarrow$ signál s pracovním převodovým stupněm,
$N_i (LTD) 1/2$	$[-]$	$\Rightarrow$ signál určující směr řazení,
N_{i2}	$[-]$	$\Rightarrow$ signál s průběhem aktuálního zařazeného převodového stupně,
N_{i2_change}	$[-]$	$\Rightarrow$ signál s průběhem řídicího signálu pro okamžik řazení,
N_{tSim}	$[-]$	$\Rightarrow$ signál s průběhem aktuálního převodového poměru,
<i>Off1</i>	$[-]$	$\Rightarrow$ signál pro vypnutí jízdního režimu rozjezd,
<i>Off2</i>	$[-]$	$\Rightarrow$ signál pro vypnutí jízdního režimu řazení,

<i>prokluzování_wc</i>	[-]	⇒ signál s úhlovou rychlostí kotouče spojky na straně ke kolům vozidla v režimu <i>prokluzování</i> z výstupu <i>state port</i> příslušného bloku <i>Integrator</i> ,
<i>rozjezd</i>	[-]	⇒ signál aktivující subsystémy s průběhy ovládacích veličin pro rozjezd,
<i>řazení</i>	[-]	⇒ signál aktivující subsystémy s průběhy ovládacích veličin pro řazení,
<i>shift 1/2</i>	[-]	⇒ signál k provedení řazení nahoru nebo dolů,
$\dot{\theta}_k$	[-]	⇒ signál s průběhem podílu otevření škrticí klapky při režimu <i>jízda</i> ,
$\dot{\theta}_{kSim}$	[-]	⇒ signál s průběhem podílu otevření škrticí klapky,
$\dot{\theta}_{sSim}$	[-]	⇒ signál s průběhem podílu otevření škrticí klapky v režimu <i>řazení</i> ,
T_{c1}	[Nm]	⇒ signál s průběhem momentu spojky v režimu <i>prokluzování</i> ,
T_{c2}	[Nm]	⇒ signál s průběhem momentu spojky v režimu <i>zamknuto</i> ,
$T_{e.in}$	[Nm]	⇒ signál s průběhem hnacího momentu motoru včetně hodnoty brzdného momentu,
$T_{e.out}$	[Nm]	⇒ signál s průběhem hnacího momentu motoru pro režim <i>rozjezd</i> nebo <i>řazení</i> ,
T_{Fric}	[Nm]	⇒ signál s průběhem brzdného momentu motoru,
Θ	[rad]	⇒ signál s průběhem úhlu stoupání vozovky Θ ,
v_p	[m/s]	⇒ signál s průběhem požadované rychlosti vozidla,
x	[m]	⇒ skutečná uražená dráha vozidlem dle tvaru vozovky,
xx	[m]	⇒ vodorovně uražená dráha,
xy	[m]	⇒ svisle uražená dráha,
<i>zamknuto_w</i>	[rad/s]	⇒ signál se společnou úhlovou rychlostí obou kotoučů spojky v režimu <i>zamknuto</i> z výstupu <i>state port</i> příslušného bloku <i>Integrator</i> ,
<i>zamknuto0</i>	[Nm]	⇒ řídicí signál pro volbu režimu spojky charakterizující přenášený moment,

Proměnné, které zde nejsou popsány, vysvětluje kap. 3.1.

Seznam obrázků

Obr. 1.1	Uvítací okno MATLABu	12
Obr. 1.2	Uživatelské prostředí MATLABu	13
Obr. 1.3	Grafické zobrazení základní knihovny bloků Simulink.....	14
Obr. 1.4	Prohlížeč knihoven bloků Simulinku	15
Obr. 1.5	Příklad sestavení jednoduché rovnice	16
Obr. 2.1	Model hnacího ústrojí vozidla.....	22
Obr. 2.2	Konfigurace spojky	23
Obr. 2.3	Stavový diagram popisující přepínání mezi režimy spojky	25
Obr. 2.4	Základní struktura modelu spojky	25
Obr. 2.5	Třecí model.....	26
Obr. 2.6	Zvolené rozložení setrvačných hmot I, tlumení k a míst převodů v hnacím ústrojí N.....	27
Obr. 2.7	Model výpočtu setrvačné hmoty a jejího tlumení za spojkou.....	28
Obr. 2.8	Model podílu převodových poměrů N_0/N_t	29
Obr. 2.9	Nastavení parametrů bloku Relay	29
Obr. 2.10	Pracovní okno bloku Embedded MATLAB Function	30
Obr. 2.11	Ports and Data Manager bloku Embedded MATLAB Function z nabídky Tools/Edit Data/Ports	31
Obr. 2.12	Subsystem Prokluzování	32
Obr. 2.13	Nastavení integrátoru s výstupem wc1.....	33
Obr. 2.14	Subsystem Reset integrátoru pro režim prokluzování.....	34
Obr. 2.15	Subsystem Detekce změny (LTD)	34
Obr. 2.16	Graf závislosti výstupu y na vstupu x bloku Lookup Table Dynamic.....	35
Obr. 2.17	Subsystem Reset integrátoru pro režim zamknuto	35
Obr. 2.18	Subsystem Zamknuto	36
Obr. 2.19	Subsystem Řízení třecích režimů	37
Obr. 2.20	Volba režimu	38
Obr. 2.21	Subsystem Spojitý signál	39
Obr. 2.22	Základní struktura subsystému Prokluz kol	40
Obr. 2.23	Charakteristické rozměry vozidla a síly, které na něj působí [5].....	41
Obr. 2.24	Model pro výpočet zatížení náprav	42
Obr. 2.25	Subsystem Síla jízdních odporů na kole	44
Obr. 2.26	Řízení valivého odporu	45
Obr. 2.27	Subsystem Třecí model	46
Obr. 2.28	Průběh závislosti síly mezi koly a vozovkou na prokluzu [8].....	47
Obr. 2.29	Subsystem Prokluz	48
Obr. 2.30	Subsystem Uražené dráhy	49
Obr. 2.31	Základní struktura subsystému Ovládání vozidla	51
Obr. 2.32	Nastavení bloku Lookup Table pro volbu pracovního převodového stupně N_i	52
Obr. 2.33	Detekce řazení	53
Obr. 2.34	Subsystem Znásobení v začátku.....	54
Obr. 2.35	Subsystem Časování pro rozjezd.....	55
Obr. 2.36	Časování pro řazení	55
Obr. 2.37	Aktivovaný subsystém Řazení	57
Obr. 2.38	Subsystem Motor.....	59
Obr. 2.39	Aktivovaný subsystém s průběhem normálové síly spojky F_n pro řazení.....	61

Obr. 2.40 Časový průběh podílu normálové síly spojky F_n pro rozjezd.....	61
Obr. 2.41 Časový průběh normálové síly spojky F_n pro řazení	62
Obr. 2.42 Aktivovaný subsystém s průběhem momentu motoru T_e pro rozjezd.....	63
Obr. 2.43 Časový průběh hnacího momentu motoru T_e pro rozjezd	63
Obr. 2.44 Aktivovaný subsystém s průběhem momentu motoru T_e pro řazení.....	64
Obr. 2.45 Časový průběh hnacího momentu motoru T_e pro řazení	65
Obr. 3.1 Okno editoru m-souborů	66
Obr. 3.2 Nabídka nastavení Model Properties	66
Obr. 5.1 Graf charakteristiky hnací síla - rychlost.....	76
Obr. 5.2 Graf s průběhem momentu motoru	77
Obr. 5.3 Graf rychlostí	77
Obr. 5.4 Graf otáček.....	78
Obr. 5.5 Graf otevření škrtkové klapky a prokluzu hnacích kol.....	78
Obr. 5.6 Graf hnacích momentů.....	79
Obr. 5.7 Graf třecích momentů spojky, jejího řídicího momentu a řídicího signálu pro přepínání režimů spojky (modře).....	79
Obr. 5.8 Graf převodového poměru, setrvačných hmot za spojkou a normálové síly spojky .	80
Obr. 5.9 Graf hnací síly a normálové síly na hnané nápravě	80
Obr. 5.10 Graf se silami jízdních odporů.....	81
Obr. 5.11 Graf zrychlení	81
Obr. 5.12 Graf uražené dráhy a úhlu stoupání vozovky	82
Obr. 5.13 Graf s vertikálně uraženou dráhou v čase	82
Obr. 5.14 Graf charakteru projetého terénu	82
Obr. 5.15 Graf sil jízdních odporů v oblasti rozjezdu.....	83
Obr. 5.16 Graf otevření škrtkové klapky a prokluzu hnacích kol v oblasti prvního řazení.....	83
Obr. 5.17 Grafy v oblasti rozjezdu.....	84
Obr. 5.18 Grafy v oblasti rozjezdu.....	85
Obr. 5.19 Grafy v oblasti rozjezdu.....	86
Obr. 5.20 Grafy v oblasti přerazování.....	87
Obr. 5.21 Grafy v oblasti přerazování.....	88
Obr. 5.22 Grafy v oblasti změny charakteru vozovky	89
Obr. 5.23 Grafy v oblasti změny charakteru vozovky	90
Obr. 5.24 Grafy se silami jízdních odporů v oblasti podřazování při brzdění motorem	91
Obr. 5.25 Grafy v oblasti podřazování při brzdění motorem.....	92
Obr. 5.26 Grafy v oblasti podřazování při brzdění motorem.....	93

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Seznam bloků použitých v modelu se stručným popisem funkce	16
Tab. 2.1 Logická tabulka pro řízení režimů spojky	39
Tab. 2.2 Nastavení parametrů pro bloky Lookup Table subsystému Řazení	58

Seznam příloh

Soubory:

- kresli.m
- Parametry.m
- tuhy_spojka_prokluz_teren_klapka.mdl