



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MODEL ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY SE STEJNOSMĚRNÝM POHONEM

MODEL OF ELECTRIC DIRECT CURRENT LOCOMOTIVE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Januška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Adam Januška

ID: 186102

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Model elektrické lokomotivy se stejnosměrným pohonem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznámit se s problematikou odporové a tyristorové regulace výkonu elektrických stejnosměrných lokomotiv
2. Vytvořit schéma stejnosměrné lokomotivy s odporovou a tyristorovou regulací pohonu.
3. Ověřit správnou funkci modelu a zpracovat výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Skalický, J., Teorie řízení 1, 2002, Brno

[2] Čapoun, J., Pavelka, J., Ryant, J., Elektrické regulační pohony s tyristory, 1981, SNTL, Nakl. technické literatury

[3] Pavelka, J., Čeřovský, Z., Javůrek, J., Elektrické pohony, 2001, České vysoké učení technické

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá dvěma způsoby řízení otáček trakčních motorů na stejnosměrných lokomotivách. V této práci jsou popsány hlavní prvky silových obvodů dvou lokomotiv, které mají rozdílné řízení otáček motoru. Prvním typem řízení je odporové řízení, které je simulováno na lokomotivě řady E 499.2 (150). Tato regulaci je porovnávána s tyristorovým řízením na lokomotivě řady E 499.3 (163). V práci je dále odsimulován rozjezd těchto lokomotiv. Simulace probíhá v prostředí Simulink, který je nástavbou programu Matlab.

Klíčová slova

Řízení trakčního motoru, simulace, lokomotiva, trakční motor

Abstract

In this bachelors thesis you can find two ways of controlling direct-current traction motors in locomotives. The main power circuits of two locomotives, which have different motor speed control, are described in this work. The first type of control is the resistors switching control, which is simulated on the E 499.2 locomotiv series (150 series). This controlling is compared to thyristor circuit control used in E 499.3 (163) locomotiv series. The simulation is made in the Simulink environment, which is the extension of the Matlab program.

Keywords

Controlling traction motors, simulation, lokomotiv, traction motor

Bibliografická citace:


JANUŠKA, A. *Model elektrické lokomotivy se stejnosměrným pohonem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 41s.
Vedoucí práce: Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Simulace elektrické lokomotivy se stejnosměrným pohonem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **10. května 2018**


.....
podpis autora

Obsah

Úvod	1
Popis simulovaných lokomotiv	2
2.1 Lokomotiva řady 150/151	2
2.1.1 Trakční motory řady 150	3
2.1.2 Odporové řízení	4
2.2 Lokomotiva řady 163/162	6
2.2.1 Trakční motory řady 163	8
2.2.2 Kotevní pulzní měniče PULS DELTA A	9
2.2.3 Pulzní měnič buzení BATYR DELTA A	10
Teoretický rozbor	11
3.1 Stejnoseměrný motor	11
3.1.1 Stejnoseměrný sériový motor	14
3.1.2 Stejnoseměrný motor s cizím buzením	16
3.2 Trolejové a zpětné vedení	18
Praktická část	20
4.1 Výpočet parametrů	21
4.1.1 Výpočet parametrů vedení	21
4.1.2 Výpočet vozidlového odporu	22
4.2 Praktická část lokomotivy 150	24
4.2.1 Výpočet parametrů trakčního motoru	24
4.2.2 Obvod lokomotivy 150	26
4.2.3 Naměřené výsledky lokomotivy 150	28
4.3 Praktická část lokomotivy 163	31
4.3.1 Výpočet parametrů trakčního motoru (163)	31
4.3.2 Obvod lokomotivy 163	32
4.3.3 Naměřené výsledky lokomotivy 163	33
Závěr	36
Literatura	38
Seznam symbolů, veličin a zkratek	40
Seznam příloh	41
Příloha 2	

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Typový výkres lokomotivy řady 150.....	2
Obr. 2.2: Rozdělení odporníků	5
Obr. 2.3: Typový výkres lokomotivy řady 163.....	6
Obr. 2.4: Hlavní vypínač lokomotivy řady 163	7
Obr. 2.5: Uložení trakčního motoru.....	8
Obr. 2.6: Zjednodušené schéma PM kotev.....	9
Obr. 2.7: Schéma PM buzení.....	10
Obr. 3.1: Řez stejnosměrným čtyřpólovým motorem.....	11
Obr. 3.2: Princip stejnosměrného motoru	12
Obr. 3.3: Charakteristika sériového motoru	14
Obr. 3.4: Zapojení sériového motoru	15
Obr. 3.5: Zapojení cize buzeného motoru	16
Obr. 3.6: Charakteristika cize buzeného motoru v závislosti na změně U_a	17
Obr. 3.7: Charakteristika cize buzeného motoru v závislosti na změně I_b	17
Obr. 3.8: Průřez trolejovým drátem.....	18
Obr. 3.9: Průřez širokopatní kolejnicí	18
Obr. 3.10: Princip oboustranného napájení úseku.....	19
Obr. 4.1: Spínací program lokomotivy 150	27
Obr. 4.2: Průběh otáček motoru TM1 (150)	28
Obr. 4.3: Průběh rychlosti lokomotivy (150)	28
Obr. 4.4: Průběh momentu motoru TM1 (150)	29
Obr. 4.5: Průběh proudu kotvou motoru TM1 (150)	29
Obr. 4.6: Průběh ztrátového výkonu na odpornících (150).....	30
Obr. 4.7: Průběh otáček motoru TM1 (163)	33
Obr. 4.8: Průběh rychlosti lokomotivy (163)	33
Obr. 4.9: Průběh momentu motoru TM1 (163)	34
Obr. 4.10: Průběh proudu buzením motoru TM1 (163)	34
Obr. 4.11: Průběh proudu kotvou motoru TM1 (163).....	35
Přílohy:	
Obr. 5.1 : Schéma silového obvodu lokomotivy 150.....	i
Obr. 5.2: Obvod lokomotivy 150 v simulinku.....	ii
Obr. 5.3: Složení trakčního motoru	iii
Obr. 5.4: Schéma silového obvodu lokomotivy 163.....	iv
Obr. 5.5: První část obvodu lokomotivy 163 v simulinku	v
Obr. 5.6: Druhá část obvodu lokomotivy 163 v simulinku.....	vi
Obr. 5.7: Řízení kotev lokomotivy 163 v simulinku.....	vii

Seznam tabulek

Tab. 1: Odpory trolejového vedení a kolejnice	21
Tab. 2: Koeficienty pro výpočet vozidlového odporu	23
Tab. 3: Rozložení časových intervalů jízdních stupňů.....	23
Tab. 4: Vypočítané odpory budícího vinutí	25

ÚVOD

Česká republika je jeden ze států Evropy, který je rozdělen podle druhu napájecího napětí na železnici na dva hlavní systémy – stejnosměrné napětí 3 kV a střídavé napětí 25 kV o frekvenci 50 Hz. Z tohoto důvodu musely být v historii zkonstruovány lokomotivy pracující s napájením stejnosměrným, střídavým a později i lokomotivy pro oba systémy.

Napájecí systém ovšem nebyl jediným kritériem, které lokomotiva musela splňovat. Mezi další důležité faktory patří například maximální rychlost nebo uzpůsobení v provozu podle typu nákladu a typu tratě.

Na českých i mezinárodních železnicích se používá mnoho typů elektrických lokomotiv, které používají rozdílné typy řízení otáček motoru. Ty závisí na technické vyspělosti v době vývoje lokomotivy, druhu napájecího napětí, typu trakčních motorů a dalších faktorech. Tato semestrální práce se zabývá dvěma ze tří nejvíce zastoupených typů řízení otáček, které se používají u elektrických lokomotiv na českých železnicích.

V prvním případě se jedná o odporové řízení otáček motoru. Práce má dokázat, že toto řízení je velice nevhodné, a proto se v dnešní době lokomotivy tohoto typu nevyvíjí a i jejich provoz se na železnicích zastavuje.

Druhým typem řízení otáček, kterým se tato práce zabývá, je řízení velikosti napětí na svorkách motoru pomocí tyristorových měničů. Tento typ řízení je mnohem hospodárnější než řízení odporové, ovšem stroje tohoto typu byly vytlačeny modernější technologií spínání tranzistorem.

Řízení napětí na svorkách motoru pomocí spínání tranzistorových měničů je nejmodernější způsob řízení otáček. S vývojem IGBT tranzistorů, které se dají použít právě pro elektrickou trakci, došlo k rozhodnutí, že tyristorové řízení je zastaralé, a proto se lokomotivy s tyristorovou regulací přestaly vyrábět.

POPIS SIMULOVANÝCH LOKOMOTIV

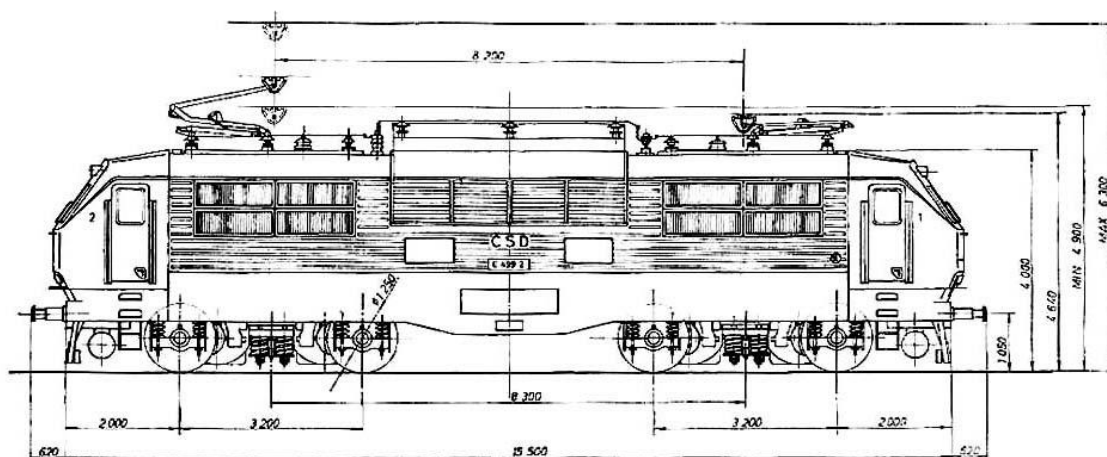
2.1 Lokomotiva řady 150/151

Elektrická lokomotiva řady 150 a její zrekonstruovaná verze 151 patří do druhé generace lokomotiv vyráběných ve Škodě Plzeň. Lokomotivy této řady byly vyrobeny v roce 1978, aby nahradili lokomotivy řady 140/141 kvůli jejich nedostatečnému výkonu. Jedná se o lokomotivu uzpůsobenou pro provoz na stejnosměrném systému 3 kV.

Design této řady byl převzat z řady 350, která obsahuje navíc části určené pro provoz na střídavém systému. To vedlo ke značnému odlehčení konstrukce především díky těžkému transformátoru, který lokomotiva 150 na stejnosměrné trakci nepotřebovala. Tato lokomotiva byla vyvíjena zejména pro provoz na rychlíkových tratích právě kvůli vysokému výkonu a maximální rychlosti 120 km/h a později 140 km/h a 160 km/h.

Lokomotivní skříň z oceli je uložena na dvou dvounápravových podvozcích s dvojitým vypružením. Primární i sekundární vypružení je tvořeno ocelovými pružinami doplněnými hydraulickými tlumiči pro zklidnění podvozku při chodu. V každém podvozku jsou uloženy dva odpružené trakční motory AL 4741 FIT, které přenáší točivý moment na nápravový převod.

Stroj je vybaven dvěma polo-pantografovými sběrači, které slouží k odběru proudu z troleje. Hlavní lokomotivní vypínač s vypínací schopností 12 kA funguje na elektromagnetickém principu.[1][2]



Obr. 2.1: Typový výkres lokomotivy 150 [2]

2.1.1 Trakční motory řady 150

Řada 150 je vybavena čtyřmi trakčními motory AL 4741 FIT. Tyto motory jsou šesti-pólové kompenzované s buzením zapojeným v sérii s kotvou. Ventilace trakčních motorů je cizí. U starších typů lokomotiv byl používán právě stejnosměrný sériový motor kvůli jeho otáčkové charakteristice, která je velice výhodná v elektrické trakci. Tyto motory jsou umístěné přímo na podvozku, a tudíž dochází k individuálnímu pohonu dvojkolí.

Vždy dva motory jsou zapojeny natrvalo do série, čímž tvoří jednu motorovou skupinu. Tyto dvě motorové skupiny můžeme dále zařadit sériově, což se používá při nižších rychlostech, nebo paralelně. V případě lokomotivy 150 probíhá přepojení motorových skupin ze sériového na paralelní spojení na 33. řídicím stupni. Toto zapojení do dvou motorových skupin předchází nepojízdnosti lokomotivy při poruše jedné motorové skupiny.

Lokomotiva disponuje i režimem elektrodynamické brzdy, která pracuje do rozjezdových odporů, které jsou zároveň i odporníky brzdovými. V režimu elektrodynamické brzdy jsou motory buzeny z cizího zdroje a výkon brzdy je úměrný rychlosti lokomotivy. Z tohoto důvodu je při rychlostech menších než 45 km/h již plně nahrazen pneumatickou brzdou. Elektrodynamická brzda může vyvolat brzdící sílu až 120kN. [1][2]

Obvod trakčních motorů lokomotivy se nalézá v příloze.

Technické parametry:

Jmenovitý výkon	1000 kW
Hodinový výkon	1050 kW
Jmenovité otáčky	1075 ot./min
Jmenovité napětí	1500 V
Trvalý proud	715 A
Maximální proud	1250 A
Minimální buzení	30%

2.1.2 Odporové řízení

Elektrická lokomotiva řady 150 je vybavena odporovým řízením výkonu. Toto řízení je tvořeno předřadným odporníkem zapojeným v sérii s každou motorovou skupinou. Jedná se o velmi technicky jednoduché provedení a v dnešní době je již tento způsob řízení zastaralý. Velikost odporu je závislá na zadaném jízdním stupni, který ovládá strojvedoucí. Odporníky slouží jak k rozjezdu, tak k brzdění. Při brzdění se energie maří v těchto odpornících ve formě tepla. Odporové články jsou vyrobeny z fechralových pásků, což dovozuje dlouhodobější zatížení.

Odporníky se nachází na střeše a jsou chlazeny ventilátory napájenými z odbočky těchto odporníků. Z toho plyne vyšší chlazení při větších zařazených odporech. [1][2]

Lokomotiva je vybavena celkem padesáti šesti stupni, přičemž 1. stupeň je kontrolní. Stupeň 2. až 27. slouží k řízení otáček při sériovém zapojení motorů. K přepojování odporu slouží stykače, které zapojují části odporu do obvodu podle předem nastavených spínacích programů, které jsou ukázány na obrázku (4.1) na straně 27. Při rozjezdu se snižuje zařazený odpor až do 27. Stupně. Posledním stupněm v sériovém zapojení je právě 27. stupeň, který se nazývá hospodárný. Při tomto stupni je odporník kompletně vyzkratován, a tudíž nedochází k žádným energetickým ztrátám. Právě z důvodu energetický ztrát je doporučen provoz právě na 27. a při vyšších rychlostech na 51. jízdním stupni.

Následují stupně 28. – 32., kdy je zapojován odbuzovací odporník paralelně s budícím vinutím motorů. Tím dochází zeslabování hlavního magnetického pole motorů a zvýšení momentu. Odpor těchto šuntů se pohybuje od 1 do 54,2 mΩ.

33. stupeň slouží k přepojení motorových skupin do paralelního zapojení. Následují jízdní stupně 34. až 51., které fungují na stejném principu jako 2. až 27. stupeň.

Na 52. až 56. stupni dochází opět k odbuzování motorů zařazováním odbuzovacích odporů. [1][2]

Schéma silových obvodů lokomotivy řady 150 je přiloženo v příloze.

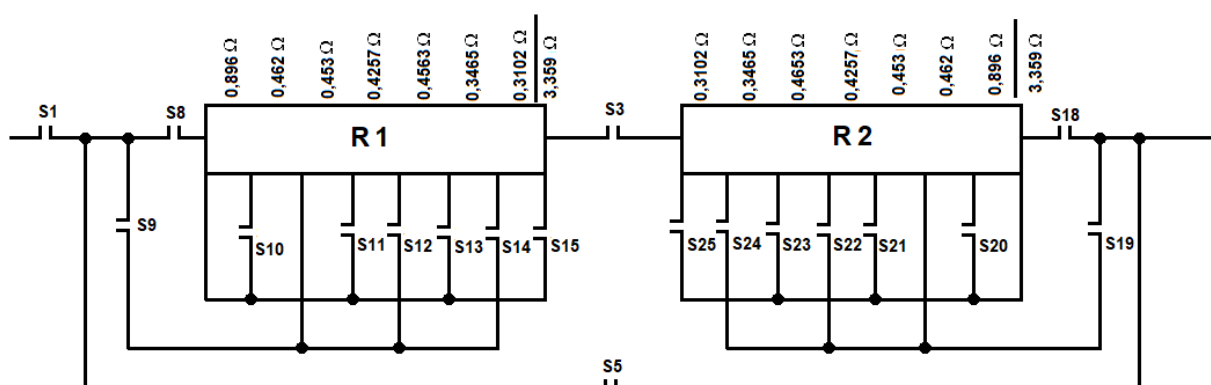
Technické parametry:

Hlavní trakční odporník 5RTL [1]

Jmenovité napětí	3 kV
Dovolené oteplení	800 °C
Celkový odpor	3,359 Ω
Hmotnost	607 kg

Odbuzovací odporník 20 RLS [1]

Jmenovité napětí	3 kV
Dovolené oteplení	600 °C
Maximální odpor	54,2 mΩ
Hmotnost	57,6 kg



Obr. 2.2: Rozdělení odporníků [1]

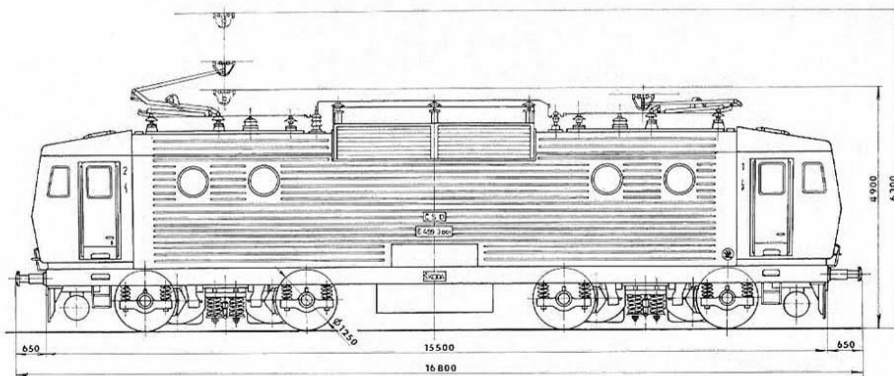
2.2 Lokomotiva řady 163/162

Elektrická lokomotiva řady 163 je dalším nástupcem zastaralých lokomotiv s odporovým řízením jako jsou řady 140/141. Tento nástupce plně vycházel z lokomotivy řady 363 vypuštěním částí určených pro jízdu na střídavém systému. Výroba začala v roce 1984, a jelikož se jednalo o zjednodušenou verzi řady 363, nemusel být vytvořen testovací prototyp. V roce 1990 byla vyrobena vylepšená verze pod označením 162, která díky změně nápravového převodu zvyšovala maximální rychlost ze 120km/h na 140 km/h. [4]

V roce 2011 byly některé kusy řady 163 zrekonstruovány pro provoz s řídicím vozem řady Bfhpvee295 s přezdívkou Sysel. Vznikla tak zrekonstruovaná verze 163 WTB, která se odlišovala od svého předchůdce převodějším schopností komunikace přes digitální rozhraní. Tato komunikace probíhá jak mezi přístroji v samotné lokomotivě, tak i pomocí UIC sběrnice mezi jinou lokomotivou WTB nebo řídicím vozem. K tomu musela být lokomotiva vybavena elektronickým systémem, který slouží jako překladač mezi staršími analogovými částmi lokomotivy a novými digitálními částmi, jako je kamerový systém, moderní ochrany, diagnostika a komunikační systém.

Lokomotivy řady 163 byly navrženy jak pro provoz na osobních, tak nákladních vlacích. Řada 162 byla dále nasazována na rychlíkové a dálkové spoje. Po zmodernizování na řadu 163 WTB byly nasazovány s řídicími vozy jako vratné soupravy, které odstraňovali problémy spojenými s obratem souprav. Díky tomu může strojvedoucí ovládat připojenou lokomotivu z řídicího vozu. [4][5]

V počátcích nasazení řad 163, 162 a 163 WTB stroje vykazovaly mnoho problémů. Ty byly způsobeny množstvím elektroniky v silových i řídicích obvodech, které bylo na tehdejší dobu neobvykle mnoho. Až na tyto počáteční problémy jsou tyto řady považovány za velmi kvalitní stroje, které jsou bez větších obtíží provozovány na českých, slovenských i italských kolejích dodnes.



Obr. 2.3: Typový výkres lokomotivy řady 163 [4]

Odběr proudu je zajišťován dvěma polo-pantografovými sběrači, které jsou ovládány pneumaticky. Odtud vede proud k výkonovému elektromagnetickému hlavnímu vypínači s vypínací schopností 12 kA.

Pro napájení pomocných pohonů, jako jsou kompresory ventilátory atd., slouží sdružený pulzní měnič UNIPULS 80A, který snižuje trolejové napětí 3 kV na 600 V a na 440 V. [4] [6]

Vybavení lokomotivy protiskluzovou ochranou umožňuje jízdu na mezi adheze. Tato ochrana reguluje tah tak aby nedošlo k prokluzu kol jak v režimu jízda, tak při brzdění.

Na lokomotivě jsou dvě sady odporových rámců s fechralovými pásky, ze kterých se skládá odporník. Na této řadě lokomotiv slouží pouze jako brzdový odporník, do kterého se maří energie při brzdění elektrodynamickou brzdou. Odporník je chlazen ventilátorem, který je napájen z odbočky tohoto odporu. Proto otáčky tohoto ventilátoru jsou úměrné úbytku napětí na odporníku. V případě poškození odporníku a přerušení může na ventilátoru dojít k nebezpečnému zvýšení napětí, a proto musí být EDB okamžitě vyřazeno z činnosti. [6]

Obvod trakčních motorů této lokomotivy je přiloženo v příloze.



Obr. 2.4: Hlavní vypínač lokomotivy řady 163 [4]

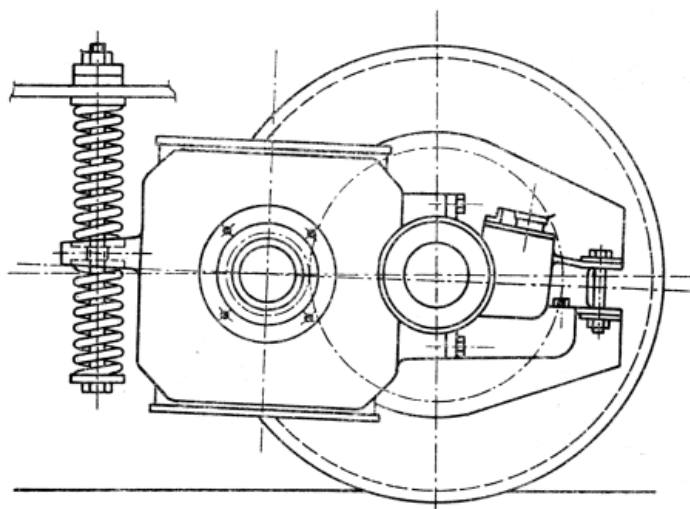
2.2.1 Trakční motory řady 163

Lokomotivy řady 163 mají uloženy 4 trakční motory v podvozcích. Vždy jeden motor pohání jedno dvojkolí. Jedná se o šesti-pólové kompenzované stejnosměrné trakční motory AL 4542FiR s cizím buzením a cizí ventilací. Cizí ventilace je u trakčních motorů výhodnější, proto aby bylo chlazení motoru dostatečné i při nižších rychlostech.

Kotvy motorů jednoho podvozku jsou zapojeny v sérii a tvoří tak motorovou skupinu. Vzniklé dvě motorové skupiny jsou k sobě zapojené paralelně. Jde tedy o sérioparalelní zapojení trakčních motorů, které je takto zapojeno natrvalo. Tyto kotvy jsou napájeny ze čtyř kotevních pulzních měničů, které jsou vůči sobě fázově posunuté pro rovnoměrnější tažnou sílu a odběr z trolejového vedení. Buzení trakčních motorů je napájeno z budících pulzních měničů. [6]

Technické parametry:

Trvalý výkon	765 kW
Jmenovité napětí kotvy	1300 V
Trvalý proud	750 A
Maximální proud	1100 A
Trvalé otáčky	935 ot/min
Maximální otáčky	1890 ot/min
Proud buzení	110 A
Minimální buzení	30%



Obr. 2.5: Uložení trakčního motoru [7]

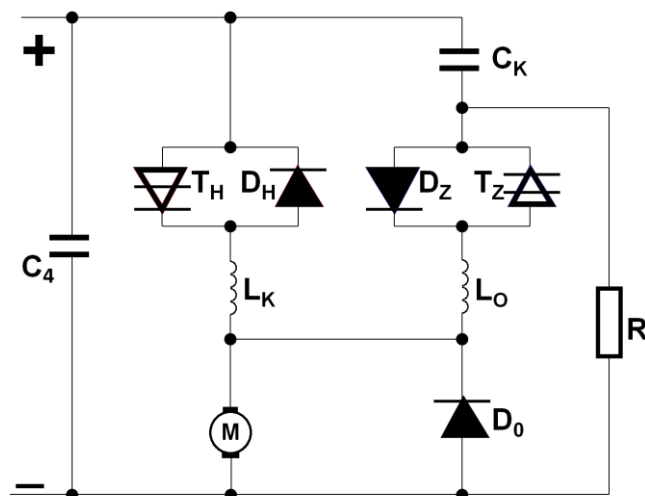
2.2.2 Kotevní pulzní měniče PULS DELTA A

K řízení otáček trakčních motorů slouží kotevní a budící pulzní měnič. PULS DELTA A je pulzní měnič, který napájí kotvy trakčního motoru v režimu jízdy a udržuje kotevní proud v režimu brzdy. Skládá se celkem ze čtyř měničů, kde dva vždy napájí jednu motorovou skupinu. Pro rovnoměrné rozložení výkonu motorů a rovnoměrný odběr proudu z trolejového vedení jsou tyto měniče vzájemně posunuty o 90 stupňů elektrických.

Pulzní řízení se zpětnou regulací dovoluje plynulou regulaci otáček za pomoci rychlého a téměř bezztrátového spínání tyristorů. Napětí na kotvách trakčních motorů řídíme počtem sepnutí tyristorů, tudíž frekvencí spínání, a délkou těchto sepnutí. Tímto spínáním řídíme střední hodnotu výstupního napětí měniče. Jelikož měnič pracuje se stejnosměrným napětím, tyristor se nedokáže opět sám uzavřít. Z tohoto důvodu je k měniči paralelně zapojen zhášecí obvod, skládající se z komutačního kondenzátoru, tlumivky a zhášecího tyristoru. Tento LC obvod vytvoří zápornou půlvlnu, po které hlavní tyristor přejde do blokovacího stavu. [4][6]

Pulzní měnič na lokomotivě řady 163 pracuje ve třech frekvencích spínání – 33,37 Hz, 100 Hz a 300 Hz. Frekvenční regulace je doplněna plynulou šířkovou regulací, která plynule zvětšuje dobu sepnutí tyristoru neboli střídu. Zvětšování střídy měniče je uskutečňováno zpožděním otevření zhášecího tyristoru za hlavním tyristorem, tudíž je řízena dobou přivedení impulsu na zhášecí tyristor.

Rozjezd lokomotivy začíná na frekvenci 33,37 Hz, na které se zvětšuje střída od hodnoty 0,011 až do hodnoty 0,0344. Poté začne měnič pracovat s frekvencí 100 Hz. Stejný postup se opakuje až do střídy 0,103. Dále měnič změní frekvenci na 300 Hz a zvyšuje střídu do 0,9. Poté přejde měnič opět na frekvenci 100 Hz pro snížení ztrát na prvcích a nastupuje řízení výkonu pomocí regulace napětí budícího vinutí. [4] [6]



Obr. 2.6: Zjednodušené schéma PM kotev [25]

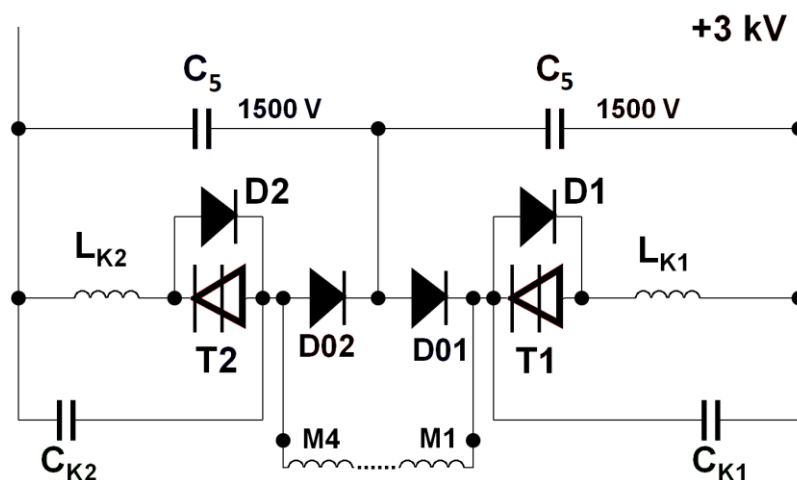
2.2.3 Pulzní měnič buzení BATYR DELTA A

Po dosažení maximálního otevření hlavních kotevních tyristorů na frekvenci 300 Hz probíhá další regulace výkonu pomocí odbuzování trakčních motorů. Budící vinutí trakčních motorů jsou natrvalo zapojeno do série. Měnič je napájen z hlavního filtru lokomotivy. Ten se skládá z kapacitního děliče o napětí $2 \times 1,5$ kV. Kondenzátory jsou olejové o kapacitě $80 \mu\text{F}$.

Měnič buzení má podobné zapojení jako kotevní. Ovšem oproti kotevnímu měničovi neobsahuje zhašecí tyristor. K vypnutí hlavního tyristoru tudíž dochází za stejnou dobu, která je dána parametry paralelního LC obvodu. Tento měnič tudíž pracuje pouze na principu změny frekvence spínání. Měnič snižuje frekvenci spínání od 900 Hz, což odpovídá plnému buzení 110 ampér, až na frekvenci zhruba 200 Hz, což odpovídá minimálnímu buzení 33 ampér. Toto snižování probíhá skokově s krokem 33,34 Hz. [4][6][15]

Pulzní řízení se používá zejména kvůli nízkým ztrátám při rozjezdech. Ovšem ztráty na prvcích jsou trvalé oproti lokomotivám s odporovým řízením, které nemají téměř žádné ztráty při jízdě na hospodárném stupni. Výhodou tyristorového řízení otáček je i možnost spolupráce s automatickou regulací a možnost udržování jízdy na mezi adheze. Proto lokomotiva řady 163 používá zpětnovazební regulaci, která má za úkol udržet poměrný tah lokomotivy nastavený strojvedoucím.

V režimu brzdy je zachován směr proudu procházející kotvou trakčního motoru a směr proudu procházející budícím vinutím je opačný. Z trakčních motorů se stanou cize buzená dynama. K tomu slouží přepojovače směrů v obvodu budícího vinutí. Do obvodu kotvy trakčních motorů je zapojen brzdový odporník, ve kterém se maří brzdná energie. [4][6][15]



Obr. 2.7: Schéma PM buzení [25]

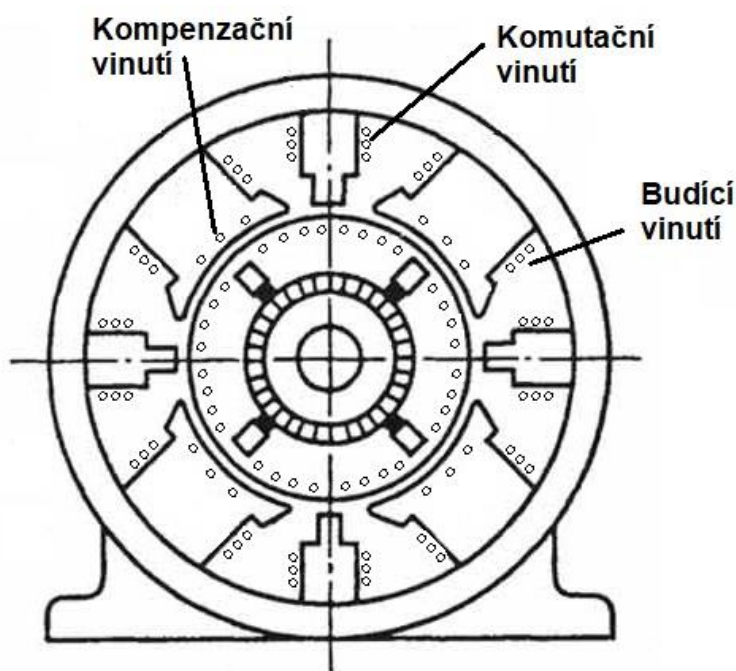
TEORETICKÝ ROZBOR

3.1 Stejnosměrný motor

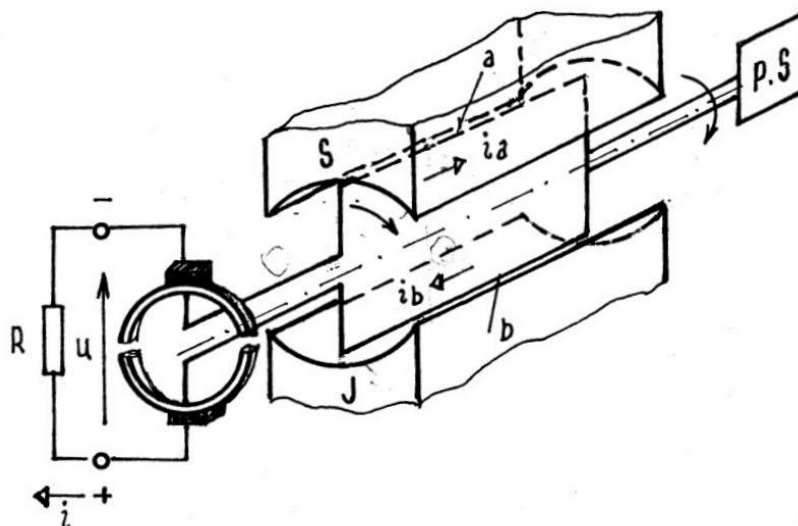
Stejnosměrné stroje patří mezi první elektrické motory, které byly vyrobeny. Vynikají především menšími rozměry než stroje střídavé. Dále pak mají velký záběrný moment při nízkých otáčkách, což je právě důvodem využití stejnosměrných sériových motorů v trakci. [8]

Stejnosměrný motor se skládá ze statoru a rotoru. Stator obsahuje budící vinutí uložené v drážkách na pólech a je napájené stejnosměrným proudem. Napájením budícího vinutí vzniká magnetické pole statoru.

Rotor, který je kotvou motoru, obsahuje vinutí s cívkami rozloženými po okraji. Tyto cívky jsou napájeny z komutátoru, který zajišťuje přivádění správně orientovaného proudu tak, aby na rotor začal působit točivý moment souhlasného smyslu. Tento moment působící na rotor vzniká interakcí budícího magnetického pole statoru a magnetického pole rotoru. Jelikož rotor se vůči statorovému magnetickému poli neustále pohybuje, komutátor z lamel, na které dosedají uhlíkové kartáče, musí měnit polaritu tohoto proudu. Nevýhodou komutátoru je třetí uhlíkových kartáčů o lamely. Tím dochází k opotřebení kartáčů a může vznikat jiskření. [9] [8]



Obr. 3.1: Řez stejnosměrným čtyřpólovým motorem



Obr. 3.2: Princip stejnosměrného motoru [8]

Pro vnitřní moment stroje platí:

$$M_i = \frac{p \cdot N \cdot \Phi \cdot I_a}{2 \cdot a \cdot \pi}, \quad (3.1)$$

kde M_i je vnitřní moment motoru, p je počet pólových dvojic motoru, N je počet vodičů v kotvě, Φ je velikost magnetického budícího toku ve vzduchové mezeře, I_a je proud kotvy, $2a$ je počet paralelních větví vinutí kotvy. [8]

Jelikož vinutí kotvy a počet pólů stroje se nemění, můžeme si vyjádřit konstantu stroje $k = \frac{p \cdot N}{2 \cdot a \cdot \pi}$ a vztah můžeme upravit následovně:

$$M_i = k \cdot \Phi \cdot I_a \quad (3.2)$$

Indukované napětí kotvy U_i získáme ze vztahu pro elektrický výkon P_{el} a pomocí vztahu (3.1.2):

$$P_{el} = \omega \cdot M_i = \omega \cdot k \cdot \Phi \cdot I_a = U_i \cdot I_a, \quad (3.3)$$

kde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ a n je počet otáček rotoru za sekundu. [8]
Z toho napětí U_i :

$$U_i = k \cdot \Phi \cdot \omega \quad (3.4)$$

Jelikož vinutí má určitý reálný odpor R a indukčnost L , bude napětí na svorkách motoru U_a větší o úbytek na tomto vinutí, o úbytek napětí na kartáčích komutátoru a úbytek napětí vlivem reakce kotvy:

$$U_a = U_i + R \cdot I_a + L \frac{\delta I_a}{\delta t} + \Delta U_K + \Delta U_{RK}, \quad (3.5)$$

kde $\frac{\delta I_a}{\delta t}$ je změna proudu v čase, ΔU_k je úbytek napětí na kartáčích komutátoru a ΔU_{RK} je úbytek napětí vlivem reakce kotvy.

Při ustáleném chodu motoru můžeme zanedbat přírůstek proudu v čase a vztah se zjednoduší:

$$U_a = U_i + R \cdot I_a + \Delta U_K + \Delta U_{RK} \quad (3.6)$$

Reverzace chodu stejnosměrného motoru probíhá změnou polarit napětí budícího vinutí nebo samotného vinutí kotvy. Při reverzaci motoru při nenulových otáčkách přejde motor do brzdového režimu, kdy energie vyvinutá brzděním je spotřebována v brzděním odporu, který je připojen na svorky kotvy motoru. [8]

3.1.1 Stejnosměrný sériový motor

Stejnosměrný sériový motor je pojmenovaný podle zapojení buzení a kotvy motoru do série. To má za následek, že magnetický budící tok Φ je závislý na proudu kotvy I_a .

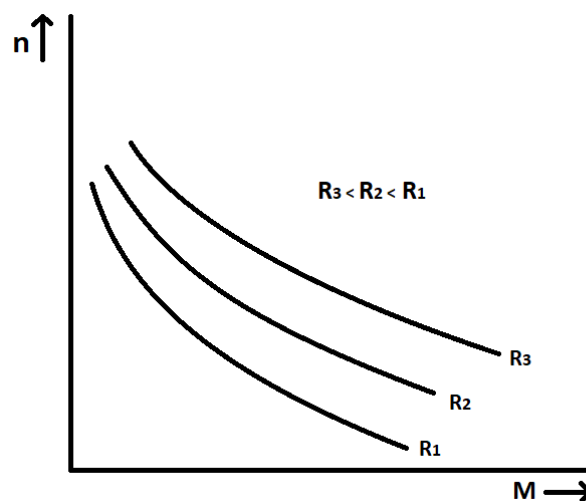
Můžeme zavést zjednodušení, že $M = M_i$, $\Phi = k_\Phi \cdot I_b$ a $k_\Phi + k = c_\Phi$, kde k_Φ je konstanta sycení stroje. Dále pro sériové zapojení stejnosměrného motoru platí $I_b = I_a$, poté se dá moment motoru vyjádřit:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_a = k \cdot k_\Phi \cdot I_a^2 = c_\Phi \cdot I_a^2 \quad (3.7)$$

Po dosazení proudu z rovnice pro otáčky motoru dostaneme závislost otáček na momentu motoru:

$$\omega = \frac{U_a}{\sqrt{M \cdot c_\Phi}} - \frac{R_a}{c_\Phi}, \quad (3.8)$$

Z této rovnice lze vidět, že závislost otáček na momentu motoru má charakteristiku hyperboly. Zároveň z tohoto vztahu lze vidět, že motor nesmí pracovat bez zatěžovacího momentu. To by způsobilo zvýšení otáček do takové míry, že by hrozilo poškození motoru. V neposlední řadě lze vidět, že je tato charakteristika vhodná pro elektrickou trakci díky velkému záběrnému momentu při nízkých otáčkách, a tudíž například při rozjíždění soupravy, kdy je potřeba vyvinutí velkého momentu pro překročení velkých setrvačných sil. Naopak při vyšších rychlostech již tento moment není potřeba. Z tohoto vztahu vychází i řízení otáček pomocí zařazování předřadného odporu do série s trakčním motorem. [8][10]



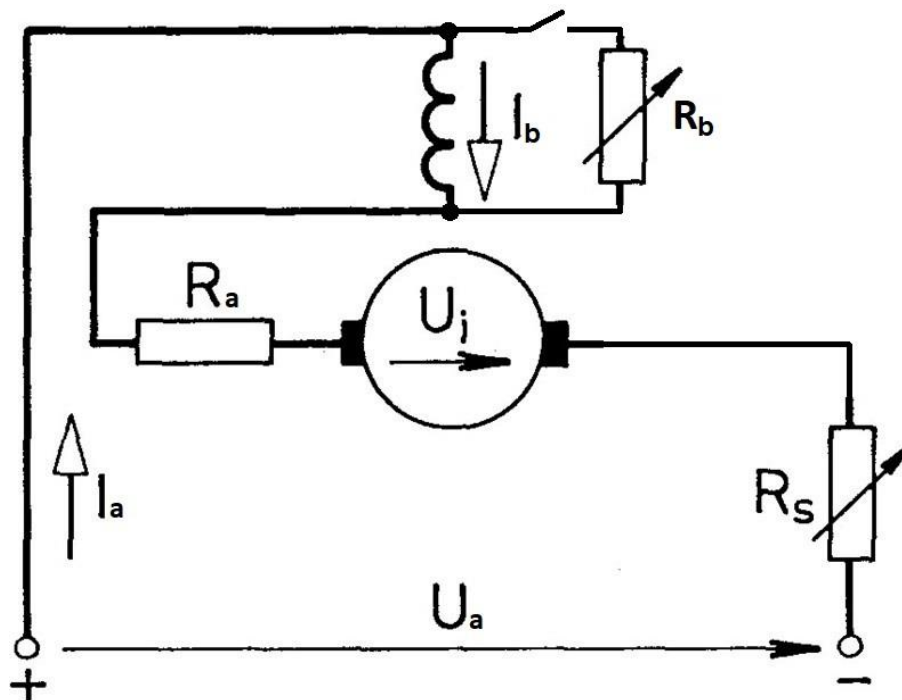
Obr. 3.3: Charakteristika sériového motoru [12]

Tato charakteristika platí pro $I_a = I_b$, kde I_b je proud budícím vinutím, tedy pro 100% buzení. Dalšího zvýšení otáček lze dosáhnout odbuzováním motoru snížením proudu procházejícího budícím vinutím při zachování stejné velikosti proudu kotvy. Odbuzování sériového motoru je možné zapojením odporu paralelně s budícím vinutím. Tím dojde k rozdělení protékajícího proudu v poměru odporů větví. Zapojení pro takový způsob odbuzování je vidět na obrázku (3.4).

Jelikož již neplatí, že $I_a = I_b$, tak při změně proudu budícího vinutí lze moment motoru popsat vztahem:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_a = k \cdot k_\Phi \cdot I_b \cdot I_a = c_\Phi \cdot I_b \cdot I_a \quad (3.9)$$

, tedy vnitřní moment motoru je závislý jak na velikosti proudu procházejícím kotvou, tak na velikosti proudu procházejícím budícím vinutím.



Obr. 3.4: Zapojení sériového motoru [10]

3.1.2 Stejnosměrný motor s cizím buzením

Stejnosměrný motor s cizím buzením je takový motor, kdy kotva a budící vinutí jsou napájeny z odlišných zdrojů, které na sobě nejsou závislé. Těmito zdroji bývají nejčastěji měniče. Řízení probíhá jak změnou napětí na kotvě a to buď změnou předřadného odporu v obvodu kotvy, nebo změnou napájecího napětí.

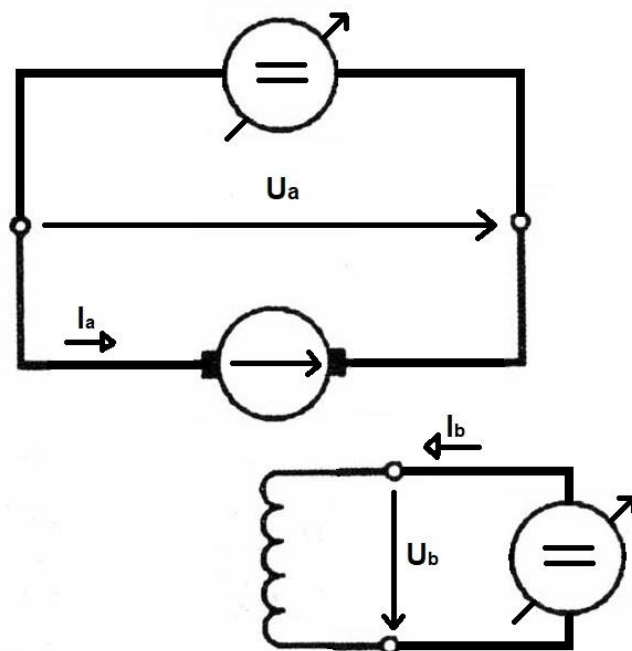
Odbuzování motoru probíhá buď změnou proudu buzení, který řídí měnič, nebo zařazováním paralelního odporu. Řízení měničem dovoluje plynulejší řízení a zmenšení energetických ztrát při odbuzování. Ovšem jelikož měnič musí pracovat i v případě 100% buzení, vznikají ztráty na prvcích měniče v době, kdy by regulace paralelním odporem neměla ztráty žádné. [8][13]

Pro momentovou charakteristiku platí:

$$\omega = \frac{U_a}{c_\Phi \cdot I_b} - \frac{R_a}{c_\Phi^2 \cdot I_b^2} \cdot M, \quad (3.10)$$

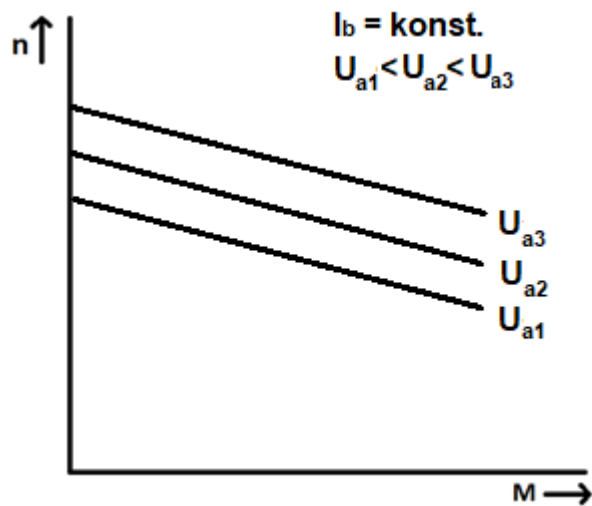
kde je ω úhlová rychlost otáčení motoru, U_a je napájecí napětí kotvy, c_Φ je konstanta motoru, I_b je proud procházející budícím vinutím, R_a je odpor kotvy, M je moment.

Z rovnice (3.10) vidíme způsoby řízení otáček motoru, kterými jsou změna napájecího napětí kotvy, snižování proudu budícím vinutím (odbuzování) a změna předřadného odporu kotvy. [11]



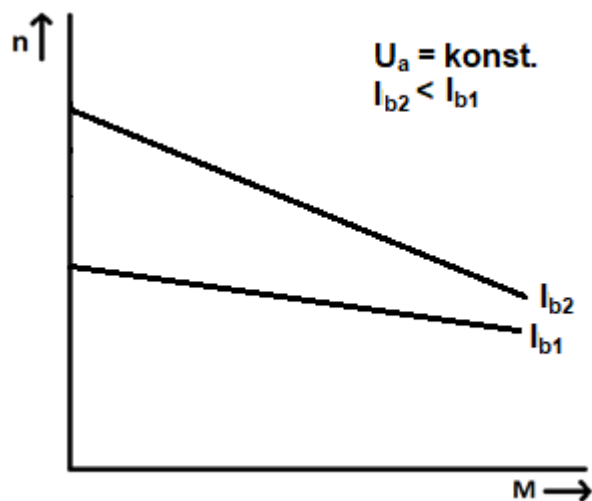
Obr. 3.5: Zapojení cize buzeného motoru

Z obrázku (3.6) lze vidět, že při zvýšení napájecího napětí kotvy se zvýší otáčky za předpokladu konstantního buzení a odporu kotvy R_a . Tohoto využívá řízení otáček pomocí kotevního měniče.



Obr. 3.6: Charakteristika cize buzeného motoru v závislosti na změně U_a [11]

Obrázek (3.7) ukazuje, že se při snížení proudu budícího vinutí, tedy odbuzení motoru, zvýší otáčky motoru a charakteristika změní sklon. Z toho plyne, že pokud je kotva motoru napájena, nesmí dojít k odpojení napájení budícího vinutí nebo by otáčky vzrostly natolik, že by došlo k poškození motoru. Z tohoto důvodu má každý motor hranici odbuzení, která je dána konstrukcí stroje nebo poháněným zařízením.



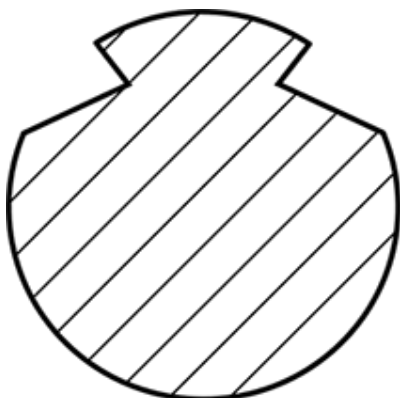
Obr. 3.7: Charakteristika cize buzeného motoru v závislosti na změně I_b [11]

3.2 Trolejové a zpětné vedení

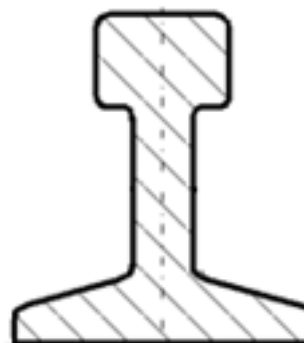
Trolejové vedení slouží k přívodu elektrické energie k lokomotivě, odkud je energie dále přenášena do vozidla pomocí sběrače. Trolejové vedení je uloženo nad jízdní dráhou lokomotivy ve výšce přibližně 5,5 m nad kolejnicí. Jelikož ke kontaktu sběrače a vedení musí docházet za jízdy, dochází ke tření a opotřebování trolejového vedení a třecí plochy sběrače. Aby docházelo k rovnoměrnému opotřebení třecí plochy sběrače, bývá trolejové vedení posunuto střídavě o 25-35 cm na obě strany od osy koleje. [14]

V železniční dopravě se používá vedení řetězovkové, které se skládá z trolejového drátu přenášejícího elektrickou energii a nosného ocelového lana. Důvodem použití tohoto typu vedení je zajištění téměř konstantní výšky vedení, která je důležitá pro nepřerušovaný kontakt sběrače i při větších rychlostech vozidla. Vedení nesou kotevní stožáry, které jsou buď železobetonové, příhradové nebo trubkové.

Trolejový drát má specifický tvar, který je speciálně uzpůsobený pro jeho funkci. Tvar vychází z kruhového průřezu vybaveného dvěma postraními výsečemi, sloužících k pevnému uchopení svorkami. Zároveň musí být vodič uchopen tak, aby svorky nezasahovaly do dráhy sběrače. Vodič je tvořen z elektrovodné mědi nebo z mědi s příměsí kadmia, hořčíku nebo stříbra pro vyšší pevnost, která se může zvýšit z 355 MPa až na 520 MPa. Průřezy vodiče se liší podle předpokládaného typu zatížení a druhu napájecího systému. Pohybují se od 50 mm² do 150 mm². [16][17]



Obr. 3.8: Průřez trolejovým drátem [20]

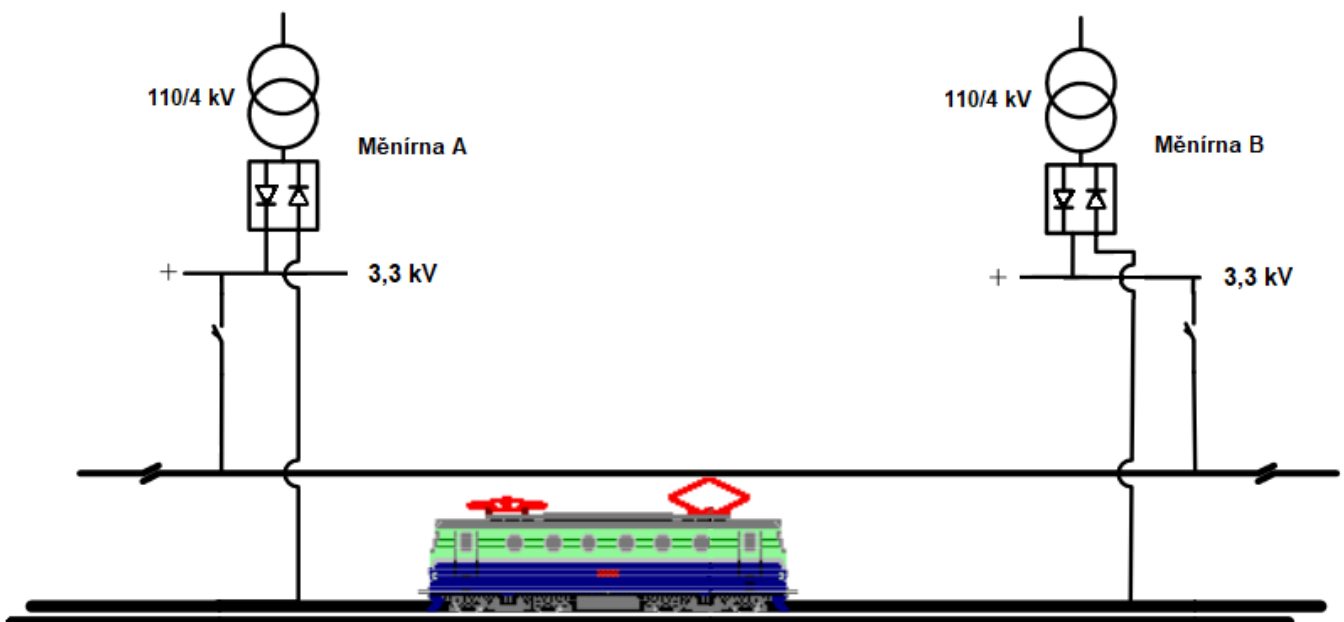


Obr. 3.9: Průřez širokopatní kolejnicí [19]

V případě stejnosměrného napájecího systému o hladině 3 kV je trolejové vedení napájené z trakčních měníren, které upravují napětí z distribuční sítě o velikosti 110 kV nebo 22 kV na potřebnou úroveň stejnosměrného napětí na trakčním vedení. Nejprve dochází k transformaci napětí 110/22 kV a poté na 22/4 kV nebo dochází k transformaci přímé 110/4 kV. Poté je napětí usměrněno pomocí dvanácti-pulzního usměrňovače. Jelikož se počítá s úbytky napětí na vedení, napájí stanice trakční vedení napětím 3,3 kV. [18] [20]

Trakční vedení je rozděleno na více samostatných úseků, kde každý úsek je napájen jednostranně nebo oboustranně a kde každý úsek na širé trati měří 20 až 25 km. Jednostranné napájení se uplatňuje většinou ve stanicích a krátkých úsecích kvůli své jednoduchosti. Měnírna, ležící na rozhraní dvou úseků, napájí oba tyto úseky. Každý úsek je tedy napájen z jedné měnírny na jednom místě. V případě oboustranného napájení je každý úsek napájen ze dvou měníren – každá napájí úsek z jednoho okraje. To snižuje úbytky napětí na vedení spojené s délkou vedení. Úseky jsou mezi sebou propojeny spínacími stanicemi, které zvyšují spolehlivost napájení. [18] [20]

Po průchodu proudu lokomotivou se elektrický obvod uzavírá zpět do měnírny přes zpětné vedení. Jako toto vedení slouží pojezdová ocelová kolejnice, která vede elektrický proud k nejbližšímu místu u trakční měnírny, odkud dále proud pokračuje zpětnými kabely do měírny. Pro zlepšení vodivosti ve styku dvou kolejnic se používají kolejové propojky. [20]



Obr. 3.10: Princip oboustranného napájení úseku [18]

PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části této bakalářské práce je odsimulován případ rozjezdu lokomotivy řady 150 a 163. Simulace bere v potaz několik zjednodušení, které usnadňují samotné výpočty.

Simulovaná lokomotiva se rozjíždí po kolejovém úseku dlouhém 20 kilometrů, který je napájen oboustranně ze dvou měníren, jež napájí úsek konstantním stejnosměrným napětím o hodnotě 3,3 kV. Jedná se tedy o tvrdé zdroje. Dalším zjednodušením simulace je, že se při rozjezdu poloha lokomotivy vůči napájecím stanicím ani jiným bodům nemění. Vzdálenost od napájecích stanic je konstantní a to přesně 10 km od obou měníren. Sklon tratě je pro zjednodušení traťových odporů nulový. Lokomotiva má připojené 4 vagóny typu A¹⁵¹ o hmotnosti 40 tun každý [26]. Na délce celého úseku se nenachází jiné elektrické hnací vozidlo, které by ovlivňovalo napěťové poměry v troleji. Měděný trolejový drát na celém simulovaném úseku má průřez 150 mm² a zpětné vedení je realizováno kolejnicí UIC 60. Při simulaci se nepočítá s bludnými proudy zpětného vedení, s přechodovými odpory kontaktů jak sběrače, tak stykačů sloužících k vyřazování odporníků, počítá se se 100% účinností převodu a v poslední řadě se počítá s hodnotami odporů při teplotě 20°C.

Obvody pro obě simulace se nalézají v příloze na disku a v příloze na konci této práce.

4.1 Výpočet parametrů

4.1.1 Výpočet parametrů vedení

Pro výpočet odporu trolejového vedení mezi lokomotivou a napájecími stanicemi byly použity údaje z tabulky [1].

Průřez trolejového vedení	Odpor troleje [Ω/km]	Hmotnost kolejnice [kg/m]	45	56	65
		Odpor kolejnice [Ω/km]	0,0284	0,0236	0,0204
Cu 100 mm ²		0,180	0,210	0,204	0,200
Cu 120 mm ²		0,150	0,180	0,174	0,170
Cu 150 mm ²		0,120	0,150	0,114	0,110

Tab. 1: Odpor trolejového vedení a kolejnice [16]

Odpor trolejového drátu mezi lokomotivou a měnírnou A ($R_{A \text{ trolej}}$) je stejný jako mezi lokomotivou a měnírnou B ($R_{B \text{ trolej}}$). Z odporu trolejového drátu na kilometr R pro měděné vedení o průřezu 150 mm² a vzdálenosti lokomotivy od měníren l , které je 10 kilometrů, se výsledný odpor vypočítá:

$$R_{A \text{ trolej}} = R_{B \text{ trolej}} = R \cdot l = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \Omega$$

Zpětné vedení se skládá z kolejnice UIC 60, která má průřez 76,7 cm². [21] Vzdálenost od lokomotivy k měnírně je opět 10 kilometrů a odpory kolejnice jsou tedy stejné. Z rezistivity oceli ρ , která činí 0,248 μΩm [22], se vypočítá výsledný odpor kolejnice:

$$R_{A \text{ kolej}} = R_{B \text{ kolej}} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,248 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{7,67 \cdot 10^{-3}} = 0,323 \Omega$$

V zapojení simulovaného obvodu jsou odpory $R_{A \text{ kolej}}$ a $R_{B \text{ kolej}}$ zapojeny mezi zdroji stejnosměrného napětí, které zastupují napájecí stanice, a vývodem z trakčních motorů lokomotivy. Stejným způsobem jsou zapojeny i odpory reprezentující odpor trolejového vedení $R_{A \text{ trolej}}$ a $R_{B \text{ trolej}}$ mezi měnírnou a připojením lokomotivy k troleji.

4.1.2 Výpočet vozidlového odporu

Proti pohybu lokomotivy působí vozidlový odpor. Pro praktické výpočty se používá empirických vztahů v podobě polynomu druhého stupně:

$$O_v = (a + b \cdot V + c \cdot V^2) \cdot m \cdot g \quad (4.3.1)$$

kde O_v je vozidlový odpor, a , b , c jsou empiricky zjištěné koeficienty [23], V je rychlost soupravy v km/h, m je hmotnost v kg, g je gravitační zrychlení.

Vidíme, že dva členy této rovnice jsou závislé na rychlosti. Hodnoty koeficientů a , b , c jsou zjištěny z tabulky (3) pro typ vozidla Bo'Bo', kterými jsou právě simulované lokomotivy, a drobně upraveny. [2][23]

Tudíž pro vozidlový odpor lokomotivy 150 při rychlosti lokomotivy 100 km/h platí:

$$O_{vl} = (1,5 \cdot 10^{-3} + 0 \cdot 100 + 5,51 \cdot 10^{-7} \cdot 100^2) \cdot 82400 \cdot 9,81 = 5666 \text{ N}$$

Jelikož lokomotiva má připojené 4 čtyřnápravové vagony o hmotnosti 40 tun, odpor těchto vagonů bude [23]:

$$\begin{aligned} O_{vv} &= (1,35 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-6} \cdot 100 + 3,3 \cdot 10^{-7} \cdot 100^2) \cdot 4 \cdot 40\,000 \cdot 9,81 \\ &= 8554 \text{ N} \end{aligned}$$

Celkový vozidlový odpor pro tuto soupravu tedy je součet odporu lokomotivy a vagonů:

$$O_v = O_{vl} + O_{vv} = 5666 + 8554 = 14\,220 \text{ N}$$

Vozidlový odpor lokomotivy řady 163 se počítá stejným způsobem. Jediná odlišnost je váha lokomotivy.

Vozidlový odpor převedený na zátěžný moment je v simulinku proveden ve zpětné vazbě v bloku trakčního motoru TM.

Typ vozidla	Popis	Koeficienty součinitele vozidlového odporu x 10 ⁻³		
		a	b	c
Vybrané konstrukce HV				
Bo´Bo´		2,8	0	0,00085
Co´Co´		2,8	0,02	0,0004
B´B´		2,5	0	0,0055
MJ	motorová jednotka	3	0	0,00037
EJ	elektrická jednotka	2,45	0,0123	0,000414
Vybrané řady HV				
140, 141		3,6	0,002	0,0006
181, 182		3,8	0,02	0,0004
230		1,4	0	0,00056
460		2,2	0,015	0,00038
726		2,2	0	0,00192
751		2,8	0	0,00085
770		3	0	0,0008

Tab. 2: Koeficienty pro výpočet vozidlového odporu

stupeň	čas [s]				
1	0-0,3	21	44-46	41	88-90
2	0,3-4	22	46-48	42	90-92
3	4-8	23	48-50	43	92-94
4	8-12	24	50-52	44	94-96
5	12-14	25	52-54	45	96-98
6	14-16	26	54-56	46	98-100
7	16-18	27	56-58	47	100-102
8	18-20	28	58-65	48	102-104
9	20-22	29	65-67	49	104-106
10	22-24	30	67-69	50	106-108
11	24-26	31	69-71	51	108-110
12	26-28	32	71-73,2	52	110-115
13	28-30	33	73,2-73,2	53	115-117
14	30-32	34	73,2-76	54	117-119
15	32-34	35	76-78	55	119-121
16	34-36	36	78-80	56	121-123
17	36-38	37	80-82		
18	38-40	38	82-84		
19	40-42	39	84-86		
20	42-44	40	86-88		

Tab. 3: Rozložení časových intervalů jízdních stupňů

4.2 Praktická část lokomotivy 150

4.2.1 Výpočet parametrů trakčního motoru

Z jmenovitých hodnot trakčního motoru AL 4741 FIT a pomocí vztahu (3.3) lze vypočítat jmenovitý moment motoru:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{1 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1075}{60}} = 8883 \text{ Nm}$$

Vypočítaný jmenovitý moment motoru je třeba znát pro výpočet konstanty c_ϕ motoru podle vztahu (3.1.7):

$$c_\phi = \frac{M_n}{I_a^2} = \frac{8883}{715^2} = 0,0174 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

Redukovaný moment setrvačnosti J_{red} trakčního motoru lze vypočítat pomocí vztahu pro zachování energie:

$$m \cdot v^2 = J_{\text{red}} \cdot \omega_m^2 \quad (4.1)$$

kde m je hmotnost poháněné hmoty, v je rychlost soupravy a ω_m je úhlová rychlost otáčení hřídele motoru. Úpravou tohoto vztahu pomocí známého nápravového převodu lokomotivy a poloměru kola lokomotivy lze vypočítat redukovaný moment setrvačnosti působící motoru. Z technických parametrů lokomotivy [2] byla zjištěna hmotnost lokomotivy $m = 82,4 \text{ t}$, poloměr neopotrebovaného kola $r_k = 625 \text{ mm}$ a nápravový převod $i = 2,441$.

$$J_{\text{red}} = \frac{m \cdot r_k^2}{i^2} = \frac{82400 \cdot 0,625^2}{2,441^2} = 5402 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Moment setrvačnosti samotného motoru, lze kvůli velkému momentu setrvačnosti lokomotivy zanedbat.

Při výpočtu reálného odporu budícího vinutí R_b se vychází ze znalostí poměrného odbuzení trakčního motoru při jednotlivých odbuzovacích stupních a z velikosti odporů v odbuzovacích větvích, které jsou spínány podle spínacího programu stykačů na obrázku (4.1). Poměrné odbuzení trakčních motorů je znázorněné na trakční charakteristice lokomotivy 150, která se nachází v příloze této práce. [1]

Pomocí znalostí proudového děliče lze vypočítat odpor budících vinutí $2R_b$ (odbuzovací odpory jsou zařazeny paralelně ke dvěma budícím vinutím, odpor budícího vinutí jednoho motoru je poloviční) jako:

$$2G_b = \frac{1}{2R_b} = \frac{\frac{I_b}{I_a} \cdot G_{SH}}{(1 - \frac{I_b}{I_a})} \quad (4.2)$$

kde $2G_b$ je elektrická vodivost dvou budících vinutí, pro kterou platí $2G_b = \frac{1}{2R_b}$, $\frac{I_b}{I_a}$ je poměrné odbuzení motoru při určitém šuntovacím stupni a G_{SH} je elektrická vodivost v dané paralelní odbuzovací větvi, pro kterou platí $G_{SH} = \frac{1}{R_{SH}}$.

Šuntovací stupeň	I_b/I_a [%]	R_{SH} [mΩ]	$2R_b$ [mΩ]
28/52	76	61,1	9,645
29/53	58	26,5	9,595
30/54	47	16,9	9,530
31/55	38	12,15	9,900
32/56	30,5	8,1	9,225
			9,579

Tab. 4: Vypočítané odpory budícího vinutí

Z výpočtů vychází odpor buzení jedné motorové skupiny 9,579 mΩ. Pro jeden motor tudíž 4,7895 mΩ.

Vypočítané hodnoty berou v potaz zeslabovací tlumivku s reálným odporem 6,9 mΩ a indukčností 5,2 mH, která je zařazena v každé šuntovací větvi kvůli zeslabení přechodných jevů při skokové změně odporu.

Ze vztahů (3.4), (3.6) a při zanedbání úbytku na kartáčích motoru a vlivem reakce kotvy lze vypočítat odpor kotvy R_a :

$$U_i = k \cdot \Phi \cdot \omega = c_\Phi \cdot I_a \cdot \omega = 0,0174 \cdot 715 \cdot 2\pi \cdot \frac{1075}{60} = 1400 \text{ V}$$

$$R_a = \frac{U_a - U_i}{I_a} - R_b = \frac{1500 - 1400}{715} - 4,7895 \cdot 10^{-3} = 0,135 \text{ Ω}$$

4.2.2 Obvod lokomotivy 150

Simulace lokomotivy probíhá v programu Matlab Simulink verze 2014a. Celý obvod se nachází v příloze této práce.

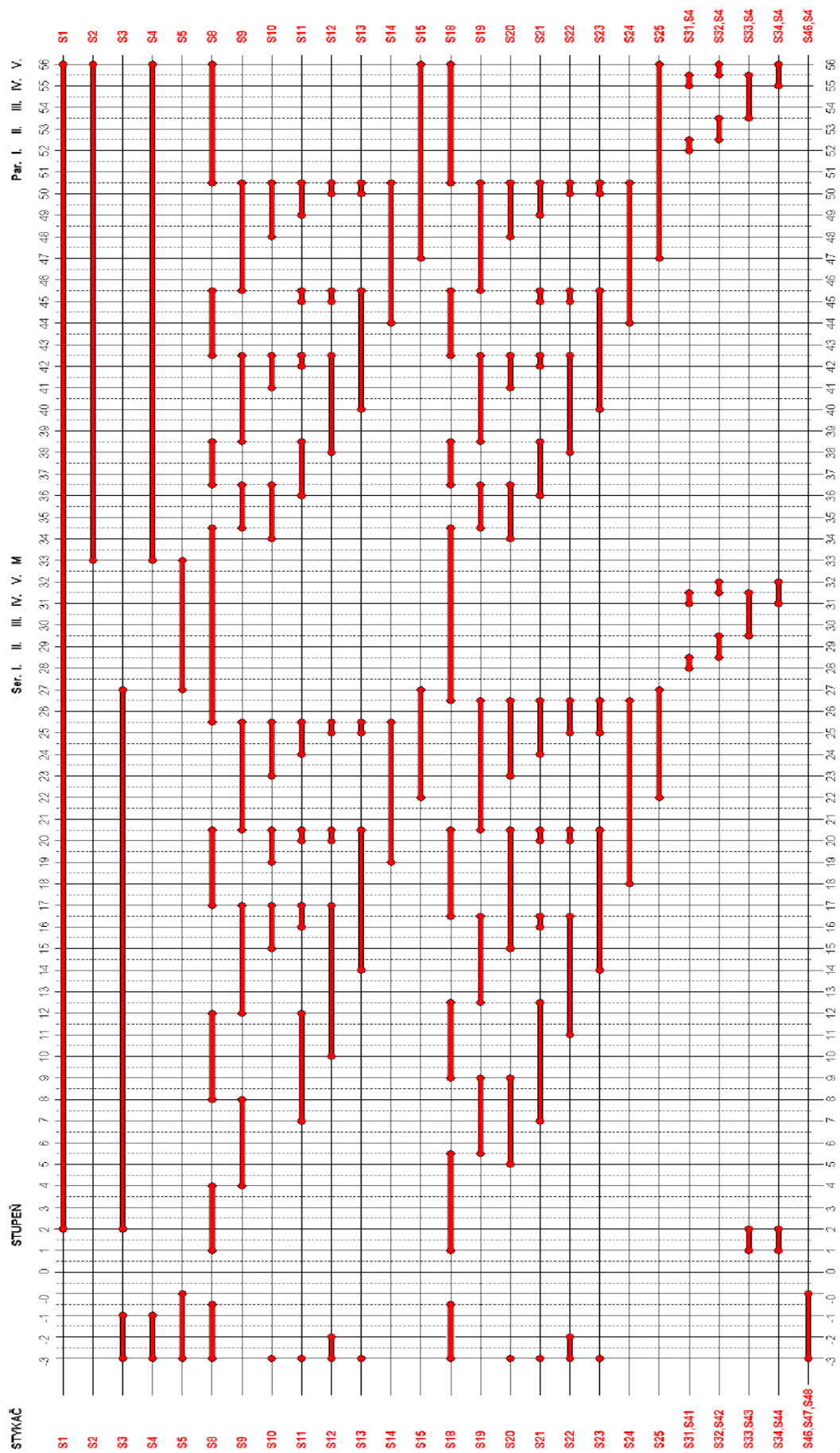
Lokomotiva je napájena ze dvou měníren A, B o napětí 3,3kV, tudíž na vedení je trvalé přepětí 10%. Mezi body připojení lokomotivy leží odpory $R_{Atrolej}$, $R_{Btrolej}$, které symbolizují odpor troleje mezi lokomotivou a zdroji napětí, a odpory R_{Akolej} a R_{Bkolej} , které symbolizují odpor kolejnice.

Obvod lokomotivy začíná ampérmetrem AM1, který měří proud odebíraný lokomotivou. V sériovém zapojení následují 2 trakční motory, které tvoří první motorovou skupinu. Svorky kotvy jsou označeny A+, A- a svorky buzení F+ a F-. Paralelně budícím vinutím jedné motorové skupiny je zapojena zeslabovací tlumivka L_{SH1} a L_{SH2} o indukčnosti 5,2 mH a odporu 6,9 m Ω sloužící k zamezení skokové změny proudu, který se rozloží budícím vinutím a touto paralelní větví. Rozložení tohoto proudu závisí na připojeném odbuzovacím odporu R_{b1} až R_{b10} , které podle jízdního stupně odbuzují motor až do 30,5 % původního buzení. Zapojení těchto odporů řídí stykače S_{b1} až S_{b10} , které spínají podle zařazeného jízdního stupně. Trakční motor se skládá z větve kotvy, která obsahuje odpor vinutí R_a , indukčnost vinutí L_a , ampérmetr, který měří proud procházející kotevním vinutím AM2 a zdroj napětí U_i , který symbolizuje indukované napětí motoru. Toto napětí je podle rovnice (3.4) dáno magnetickým tokem motoru $Tok1$ a rychlostí otáčení motoru $w1$. Větev buzení motoru se skládá z odporu vinutí R_b , indukčnosti vinutí L_b a ampérmetru AM3, měřící proud procházející budícím vinutím motoru. Motor pracuje na principu rovnice (3.9). Zatěžovací moment motoru je symbolizovaný vozidlovým odporem přepočítaným na moment na hřídeli motoru.

Po nich následuje odporník pro první motorovou skupinu, který je rozdělen do 7 částí. Velikost celkového nastaveného odporu určuje sepnutí stykačů $S_5 - S_{25}$. Tyto stykače spínají podle spínacího programu lokomotivy na obrázku (4.1). Časy jednotlivých jízdních stupňů jsou v tabulce (3).

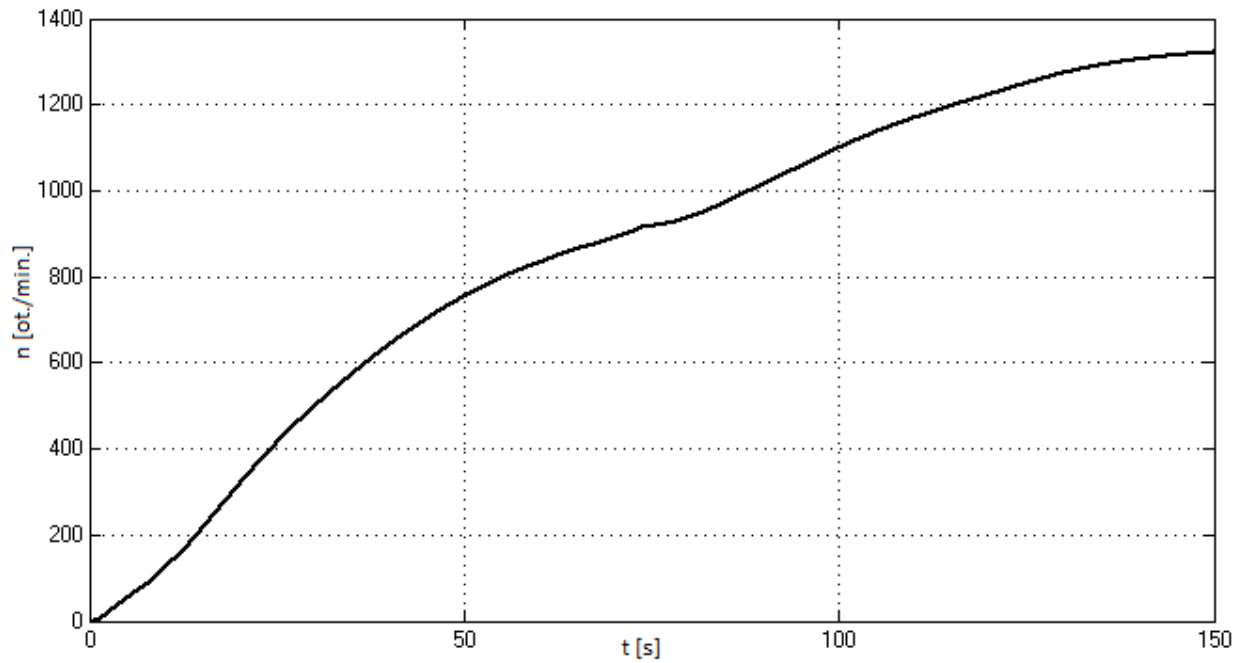
Při sériovém zapojení je sepnutý stykač S_3 a po něm následuje odporník druhé motorové skupiny, který je totožný s předchozím a další motorová skupina skládající se z dalších dvou trakčních motorů fungujících opět na stejném principu jako předchozí.

K přepojení motorových skupin a jejich odporníků paralelně slouží stykače S_2 a S_4 . Úbytek napětí na odpornících je měřen voltmetrem UR_1 a voltmetrem UR_2 . V bloku „měření ztrátového výkonu“ se vyhodnotí aktuální typ zapojení a podle něj, se vypočítá ztrátový výkon na odpornících PR. Spínání stykačů je zajištěno přesně nastavenými signály z bloku „signal builder“, který je připojen ke každému stykači.

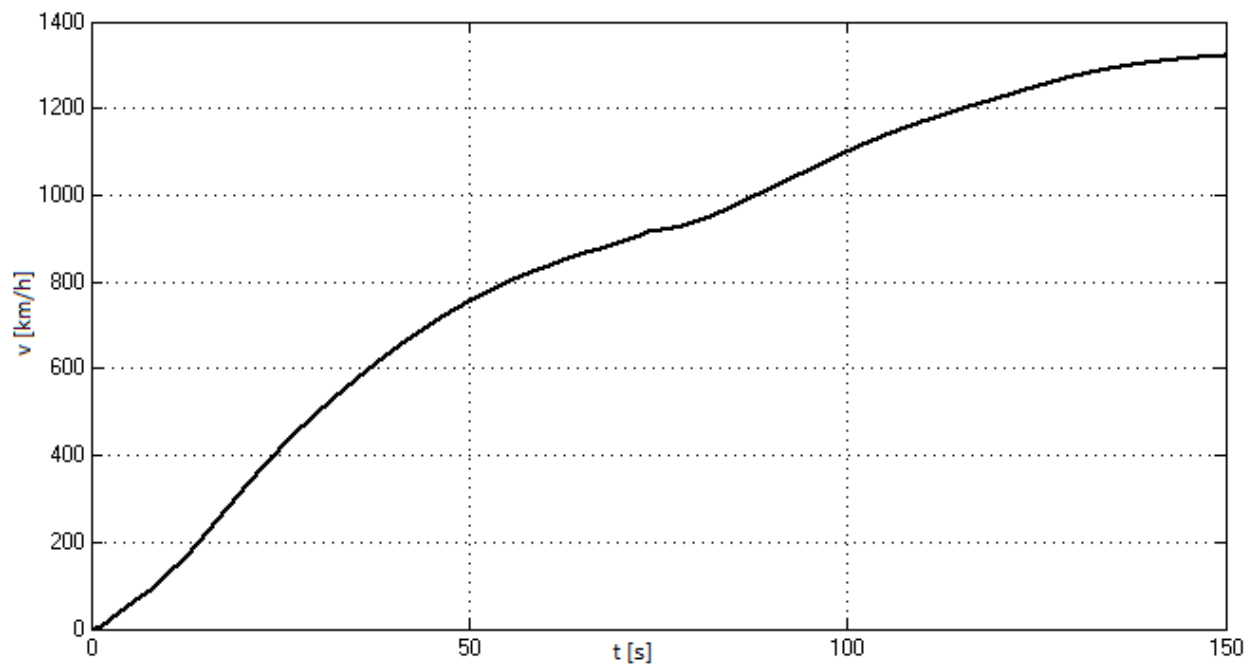


Obr. 4.1: Spínací program lokomotivy 150

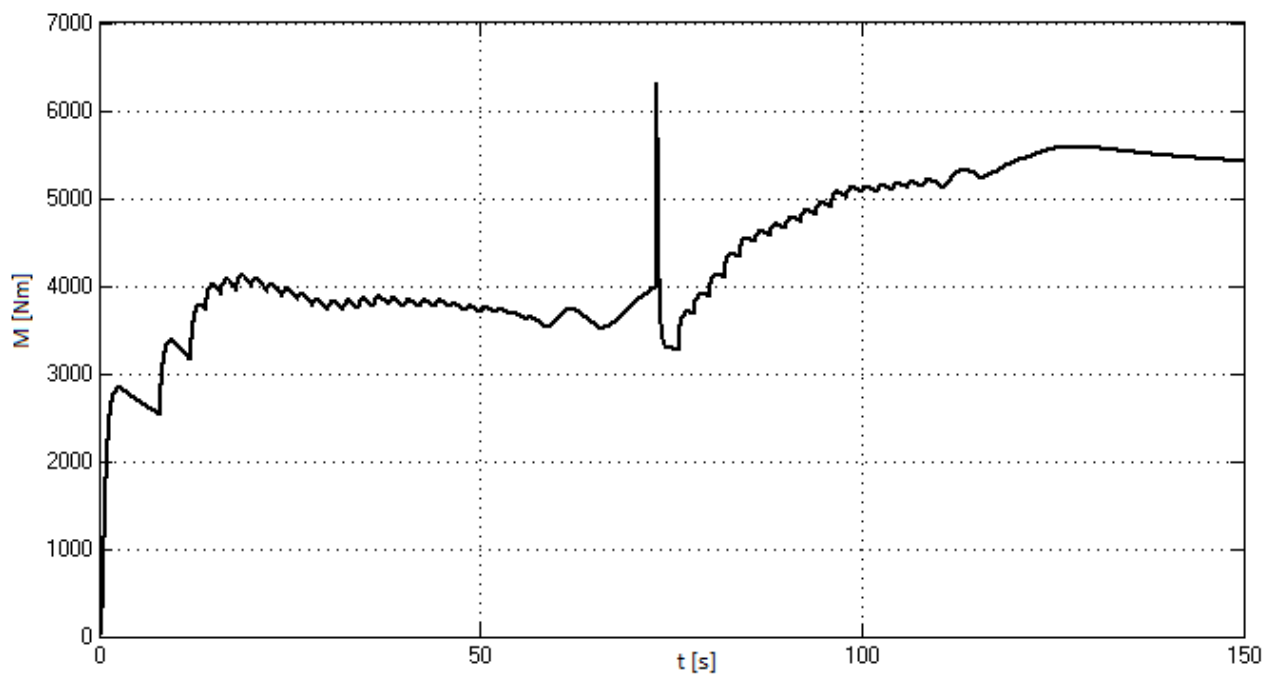
4.2.3 Naměřené výsledky lokomotivy 150



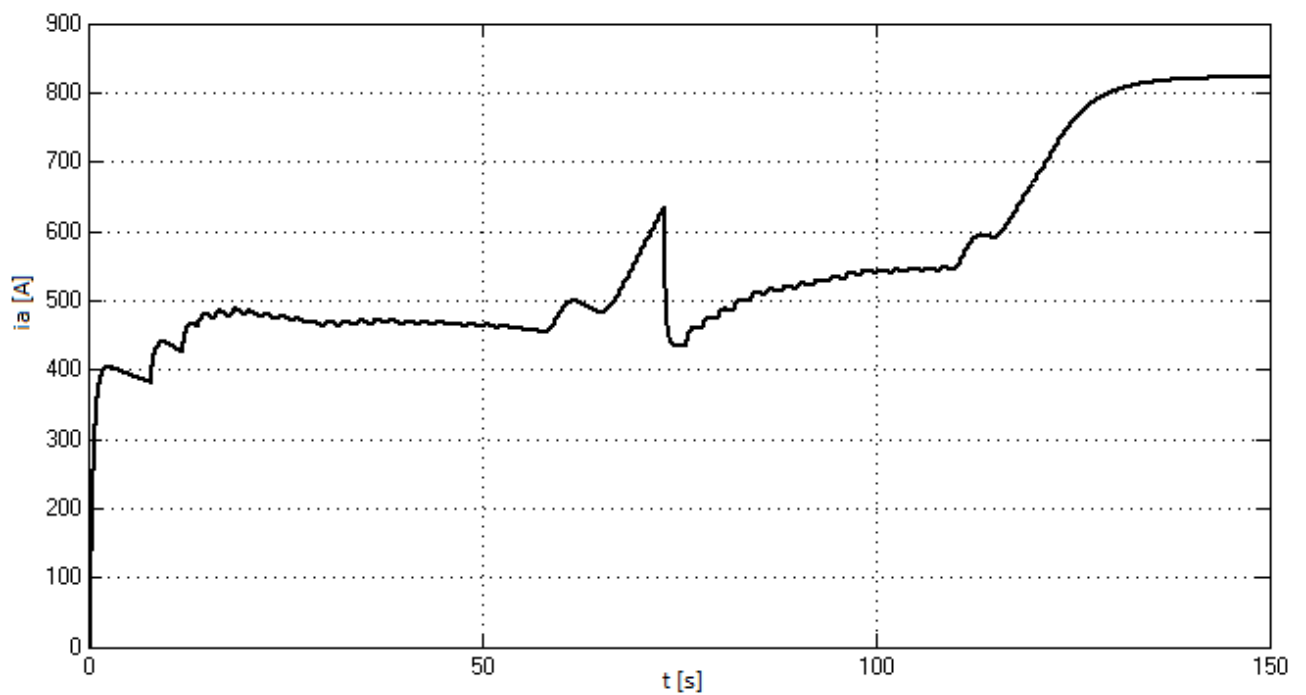
Obr. 4.2: Průběh otáček motoru TM1 (150)



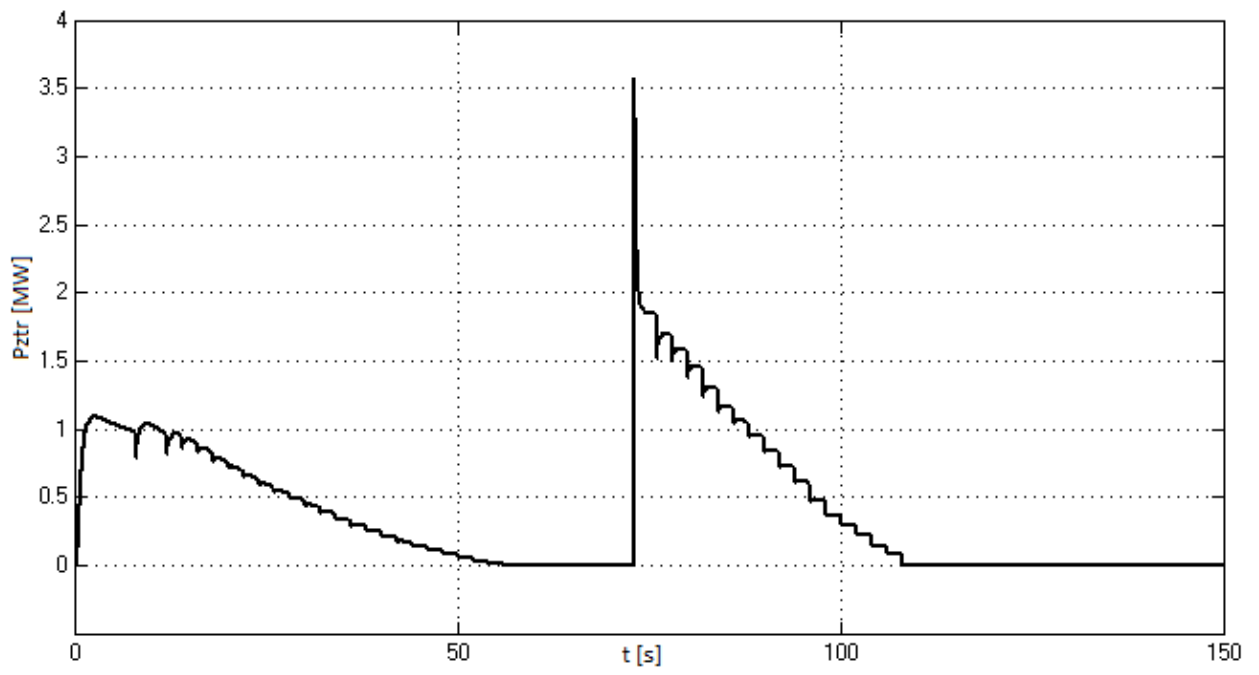
Obr. 4.3: Průběh rychlosti lokomotivy (150)



Obr. 4.4: Průběh kroutícího momentu motoru TM1 (150)



Obr. 4.5: Průběh proudu kotvou motoru TM1 (150)



Obr. 4.6: Průběh ztrátového výkonu na odpornících (150)

4.3 Praktická část lokomotivy 163

4.3.1 Výpočet parametrů trakčního motoru (163)

Z trvalých hodnot trakčního motoru AL 4542FiR a pomocí vztahu (3.3) lze vypočítat jmenovitý moment motoru:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{765 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot \frac{935}{60}} = 7813 \text{ Nm}$$

Vypočítaný jmenovitý moment motoru je třeba znát pro výpočet konstanty c_Φ motoru podle vztahu (3.9):

$$c_\Phi = \frac{M_n}{I_a \cdot I_b} = \frac{7813}{715 \cdot 110} = 0,0993 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

Redukovaný moment setrvačnosti J_{red} trakčního motoru lze vypočítat pomocí vztahu pro zachování energie jako u lokomotivy řady 150. Z technických parametrů lokomotivy [4] byla zjištěna hmotnost lokomotivy $m = 84 \text{ t}$, poloměr neopotřebovaného kola $r_k = 625 \text{ mm}$ a nápravový převod $i = 3,522$.

$$J_{\text{red}} = \frac{m \cdot r_k^2}{i^2} = \frac{84000 \cdot 0,625^2}{3,522^2} = 2645 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Z informací o trakčním motoru byla vybrána střední indukčnost kotvy a buzení $L_a = 0,8 \text{ H}$ a $L_b = 0,8 \text{ H}$.

Odpor kotvy R_a lze vypočítat obdobně jako pro řadu 150 s výjimkou toho, že se nebude počítat s úbytkem napětí na odporu buzení:

$$U_i = k \cdot \Phi \cdot \omega = c_\Phi \cdot I_b \cdot \omega = 0,0993 \cdot 110 \cdot 2\pi \cdot \frac{935}{60} = 1069 \text{ V}$$

$$R_a = \frac{U_a - U_i}{I_a} = \frac{1300 - 1069}{715} = 0,323 \text{ } \Omega$$

4.3.2 Obvod lokomotivy 163

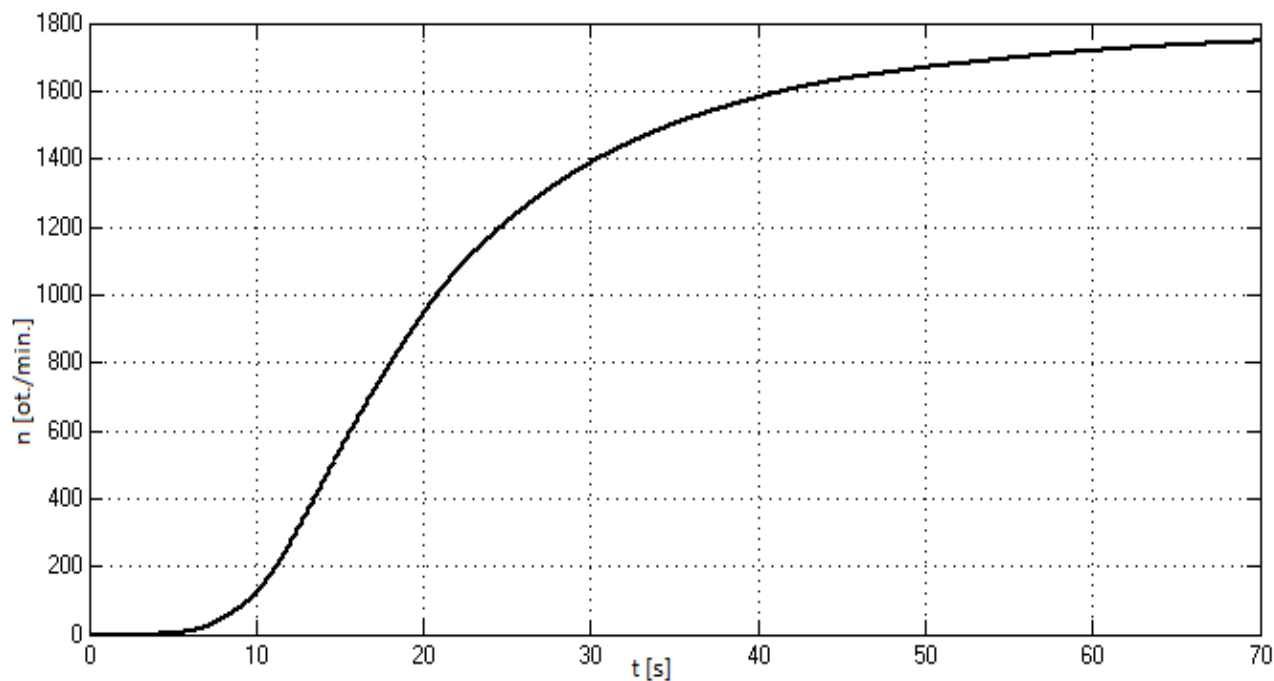
Stejně jako v simulaci řady 150 je lokomotiva napájena ze dvou měníren A, B o napětí 3,3kV. Mezi body připojení lokomotivy leží odpory $R_{Atrolej}$, $R_{Btrolej}$, které symbolizují odpor troleje mezi lokomotivou a zdroji napětí, a odpory R_{Akolej} a R_{Bkolej} , které symbolizují odpor kolejnice.

Obvod lokomotivy začíná vstupním reaktorem L_1 . Za ní následuje tlumivka L_3 , která dohromady s kondenzátorem C_{04} tvoří vstupní filtr lokomotivy. Před kondenzátorem C_{04} je zařazen menší diodový blok U_1 , který brání vybití filtru při zkratu na troleji. Kondenzátor C_{04} je zároveň zdrojem pro kotevní pulzní měniče.

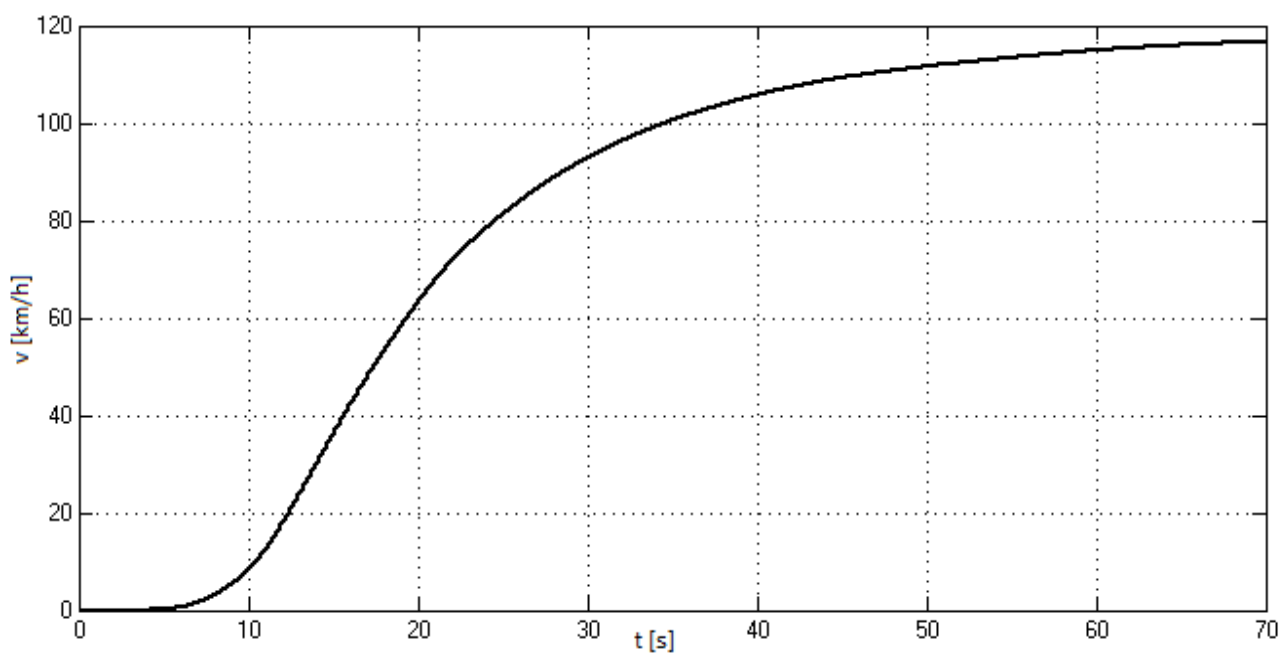
Kotvy trakčních motorů jsou napájeny ze čtyř měničů. Pro první motorovou skupinu jsou to měniče označené červenou barvou a pro druhou motorovou skupinu modrou barvou. Jeden z těchto měničů je obsahuje opět komutační obvod, hlavní a zhášecí tyristor a nulové diody. Hlavní tyristor a zhášecí tyristor je ovládán blokem řízení A_1 a A_2 . Řízení mění frekvenci přivedených impulzů na tyristory a zároveň postupně zvětšuje zpoždění impulzů na zhášecí tyristor za hlavním tyristorem. Tímto se nastavuje střída, která se pohybuje od 0,011 do 0,88. Tyristory pracují s frekvencí 33,3 Hz do 6. vteřiny simulace. Následující 3 vteřiny s frekvencí 100 Hz a od 9. vteřiny simulace s frekvencí 300 Hz. Strmost nárůstu zpoždění za hlavním tyristorem je nastavena tak, aby maximální střídy, která je 0,88, dosáhlo řízení za 19 vteřin od začátku simulace. Zbývající 3 pulzní měniče pracují stejným způsobem. Jediný rozdíl je zpoždění těchto měničů vůči sobě o 90 elektrických stupňů. Obvod řízení se nachází v příloze.

Z napěťového děliče C_{05} je napájen měnič buzení motorů, který obsahuje 2 hlavní tyristory, nulové diody a komutační obvody pro uzavření tyristoru. Jelikož tento měnič pracuje se stejnou dobou otevření, která je rovna právě komutační půlplně LC obvodu, není potřeba zhášecí tyristory. Hlavní tyristory jsou řízeny z bloku řízení b_1 a řízení b_2 . Toto řízení posílá na řídicí elektrodu tyristoru pulzy s určitou frekvencí. Při plném buzení trakčních motorů posílá řízení na tyristor pulzy s frekvencí 450 Hz. Jelikož tyristory jsou dva, pracují o 180° elektrických vůči sobě, celková frekvence spínání je 900 Hz. Tato frekvence odpovídá budícímu proudu $I_b = 110$ A. Při odbuzování se postupně snižuje frekvence celkově o 33,33 Hz. Pokud by se motor odbuzoval až na minimální možné odbuzení, které je 25A, měnič by pracoval s celkovou frekvencí 200 Hz. V tomto nastavení simulace probíhá odbuzování od 18. vteřiny, kdy kotevní měniče jsou maximálně otevřené. Strmost odbuzování je nastavena tak, aby byl udržen přibližně konstantní proud I_a . Budící vinutí všech trakčních motorů jsou zapojena do série. Budící vinutí motorových skupin má zapojenou nulovou diodu přes vybíjecí odpor R_b , který slouží k vybití přebytečné energie z vinutí při odbuzení.

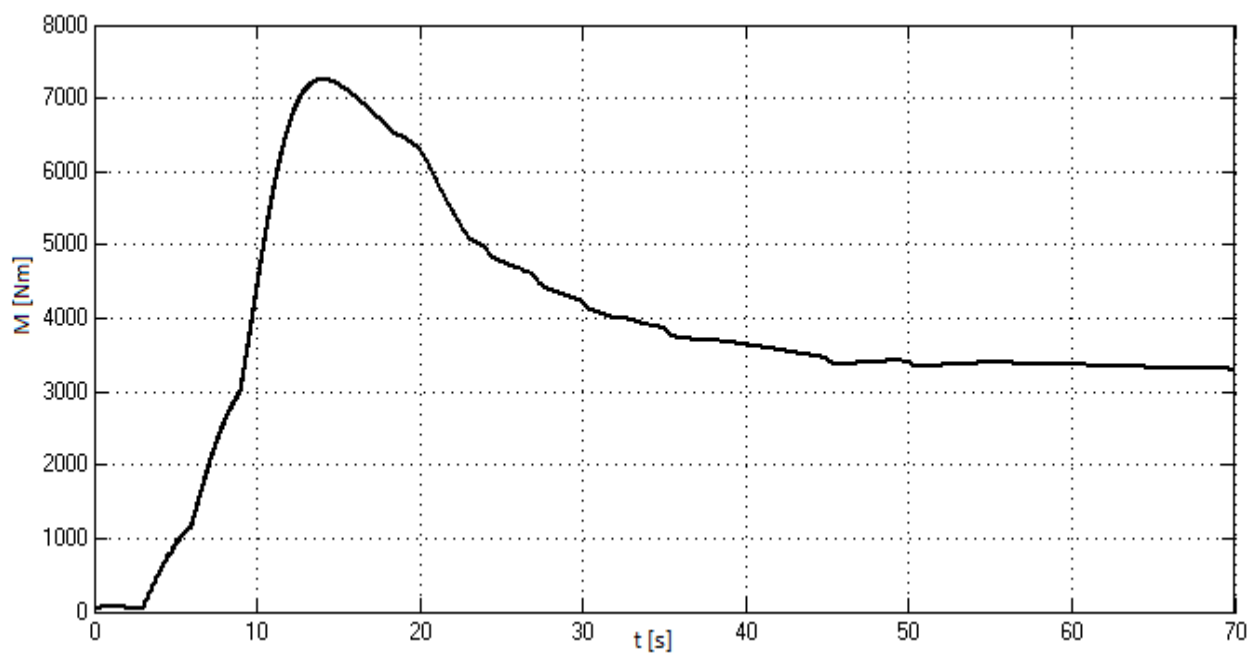
4.3.3 Naměřené výsledky lokomotivy 163



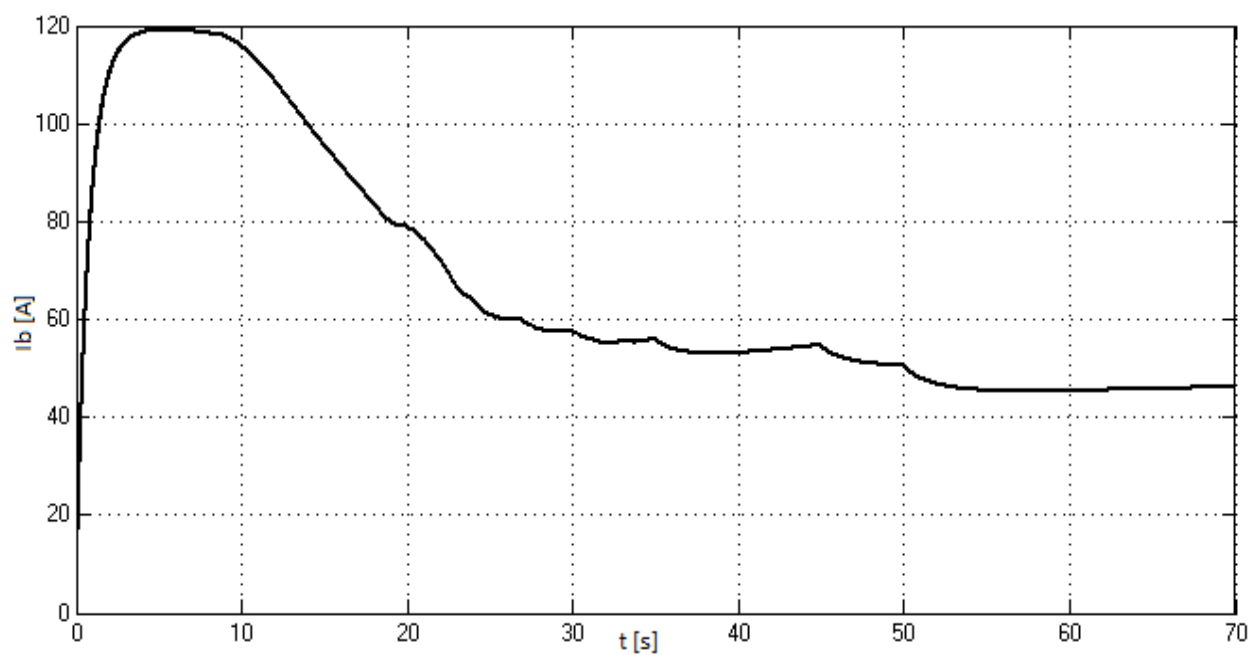
Obr. 4.7: Průběh otáček motoru TM1(163)



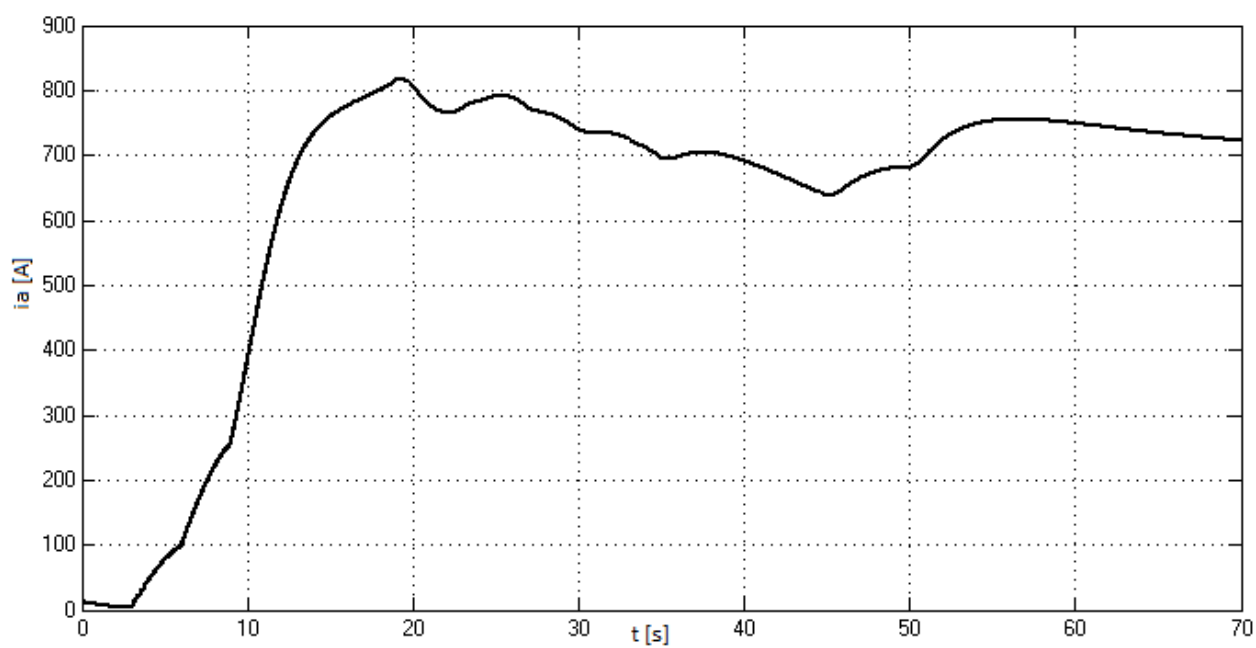
Obr. 4.8: Průběh rychlosti lokomotivy (163)



Obr. 4.9: Průběh kroutícího momentu motoru TM1 (163)



Obr. 4.10: Průběh proudu buzení motoru TM1 (163)



Obr. 4.11: Průběh proudu kotvou motoru TM1 (163)

ZÁVĚR

Výsledky simulace lokomotivy řady 150 jsou na obrázcích (4.2 – 4.6) na stranách 28 až 30. Z průběhu otáček na obrázku (4.2) lze vidět pozvolný nárůst otáček motoru TM1 až téměř na 1300 ot./min. Otáčkám motoru je úměrná rychlost lokomotivy, která dosáhla na nejvyšším jízdním stupni rychlosti 130 km/h viz obrázek (4.3). Tato rychlost je o 10 kilometrů vyšší, než je maximální předepsaná rychlost, což je způsobeno zanedbáním některých odporů působících proti pohybu soupravy.

Na obrázku (4.4) a (4.5) lze vidět průběh kroutícího momentu motoru TM1 a proudu procházejícím kotovu motoru TM1. Lze vidět, že motor dosahuje maximálního momentu 5600 Nm v čase 125 sekund, což odpovídá poslednímu jízdnímu stupni. V tomto čase dosahuje proud kotovu hodnoty 820 A. Z průběhů dále můžeme vidět, že tímto nastavováním jízdních stupňů se v sériovém zapojení drží proud kotvou mezi 450 až 500 ampéry. Od 58. a 110. vteřiny můžeme vidět zvýšení proudu vlivem odbuzení trakčního motoru.

Na obrázku (4.6) lze vidět největší nevýhodu toho způsobu řízení, kterou jsou velké ztráty. Především na prvních stupních sériového a paralelního zapojení dochází k velkým ztrátovým výkonům na odporcích, které dosahují hodnoty až téměř 2 MW. Tyto velké ztráty jsou důvodem, proč je doporučen provoz lokomotivy na vyšších stupních. Zejména pak na stupních 27 a 51, na kterých nedochází téměř k žádným ztrátám.

Výsledky simulace lokomotivy 163 nalezneme na obrázcích (4.7 - 4.11) na stranách 33 až 35. Na první pohled vidíme, že k rozjezdu na rychlost téměř 120 km/h, které odpovídá 1800 ot./min., došlo již za 70 sekund. To je způsobeno řízením kotevních měničů, které je nastaveno na prudký nárůst kotevního proudu až na 800 ampér. Pulzní měnič pracuje s maximální střídou v 19. vteřině. Z obrázku (4.9, 4.11) můžeme vidět zlomy v 6. a 9. vteřině způsobené změnou frekvence kotevních měničů.

Z průběhu na obrázku (4.10) můžeme pozorovat, že plné budící proud dosahuje 120 ampér, což je o 10 ampér více, než je jmenovitý budící proud. To je způsobeno vyšším napětím na filtru lokomotivy. K tomu došlo přepětím na troleji, jelikož trolej je napájena 3300 volty z tvrdého zdroje. Zároveň dochází k odbuzování již v 6. vteřině simulace z důvodu snížení napětí na filtru lokomotivy kvůli zatížení kotevním měničem. Na toto odbuzení navazuje od 20. vteřiny odbuzení řízením frekvence budícího měniče. Odbuzování lze vidět i na zlomech v průběhu kotevního proudu. Konečná hodnota budícího proudu je v této simulaci 45 A, což odpovídá odbuzení zhruba 41%. Další odbuzování již nebylo nutné z důvodu dosažení maximální rychlosti.

Maximálního kroučícího momentu 7200 Nm dosáhl motor ve 13. sekundě, což odpovídá téměř plnému otevření kotevních měničů z ohledem na buzení.

Účelem této simulace bylo názorná ukázka řízení stejnosměrných trakčních motorů v praxi. Ať už řízení vyřazováním odporů na lokomotivě řady 150 nebo řízením pulzními měniči na lokomotivě řady 163. Simulace těchto lokomotiv byla nastavena tak, aby bylo lépe vidět postupné zvyšování střídavy se změnou frekvence kotevního měniče a následné postupné odbuzování. Z tohoto důvodu je u lokomotivy řady 163 průběh kotevního proudu v oblasti odbuzování poměrně kolísavý. Ve skutečném provozu využívá lokomotiva této řady zpětnovazební regulaci, která se řídí podle poměrného tahu lokomotivy nastaveným strojvedoucím. Navázáním na tuto bakalářskou práci by mohlo být právě sestavení této regulace nebo přidání součástí pro provoz na střídavém napájecím systému.

LITERATURA

- [1] KOŽUŠKO, Július. *Elektrická lokomotiva řady E 499.2*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1981. Knižnice nové techniky a technologie na železnici.
- [2] *AtlasLokomotiv.net: 150, 151 / E 499.2* [online]. 2017 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-150.html>
- [3] ŘÍHA, Petr. *Trakční prvky dvousystémových lokomotiv* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/9442/1/BP_Petr_Riha.pdf. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
- [4] *AtlasLokomotiv.net: 163, 162 / E 499.3* [online]. 2017 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-163.html>
- [5] RUBEŠ, VÁCLAV. Peršingy a Esa WTB: Stroje se smyslem pro Sysla. *Železničář* [online]. 30.8.2012, , 1 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/provoz-a-technika/persingy-a-esa-wtb-stroje-se-smyslem-pro-sysla/-613/>
- [6] JOSEF, Budka. *Elektrická lokomotiva řady:163*. Ústí nad Labem: Lokomotivní depo Ústí nad Labem, 1993.
- [7] Uložení tlapového motoru, pohled ve směru osy nápravy. In: *Wikipedie, Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tlapov%C3%BD_motor
- [8] *Elektrické Stroje: Skriptum* [online]. [cit. 2017-12-28]. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [9] *Stejnoseměrné stroje (motory)* [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap22.pdf>
- [10] Motory. *ELUC: Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/771>
- [11] ING. VAVŘIŇÁK, Petr. *ELEKTRICKÉ STROJE - POHONY: Motor s cizím buzením* [online]. 2013 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_esp_6.pdf
- [12] ING. VAVŘIŇÁK, Petr. *ELEKTRICKÉ STROJE - POHONY: Sériový motor* [online]. 2013 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_esp_8.pdf
- [13] *AtlasLokomotiv.net: Trakční měniče* [online]. 2017 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-menice.html>

- [14] *Technické specifikace systémů, zařízení a výrobků: Trakční vedení jednofázové trakční soustavy AC 25 kV 50 Hz pro rychlost 200 km/h včetně* [online]. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2011 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.szdc.cz/documentpublisher/download?documentId=1%3B%231f033c1b-0832-491f-9ded-3f0c346d31f4&contentId=0>
- [15] *Popis funkce a činnosti pulsních měničů* [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://zofsmost.mzf.cz/zakonite/1357055769.pdf>
- [16] *Napájení elektrifikovaných tratí* [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/phv/PDP_energetika_1.pdf
- [17] *Plzeňští strojevůdci: Trakční vedení* [online]. 2017 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://www.strojvedouciplzen.cz/index.php?page=menu&id=79>
- [18] *Způsoby napájení trakční sítě* [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/phv/PDP_energetika_2.pdf
- [19] ZAJÍČEK, Filip. *NEM 120: Průřezy kolejnic a kolejnicové spojky* [online]. In: . [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/filip.zajicek/mod/normy/120.html>
- [20] *EDUCON: Pevná trakční zařízení pro vozidla závislé trakce* [online]. In: . [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050204>
- [21] *Třinecké železářny: Kolejnice* [online]. [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: https://www.trz.cz/web/trzocel.nsf/link/kolejnice_cz
- [22] BC. SKÁLA, Pavel. *Analýza zpětné cesty elektrického napájení železničního trakčního vozidla* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-12-25]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70088/F3-DP-2017-Skala-Pavel%5BAnalyza%20zpetne%20cesty%20elektrickeho%20napajeni%20zel eznicniho%20trakcniho%20vozidla%5D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [23] ING. ŠIROKÝ PH.D., Jaromír. *Mechanika v dopravě I: Kolejová vozidla* [online]. Ostrava, 2003 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/skr_mvd.pdf. Skriptum. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [24] *Šablona pro BP/DP a prezentace v2.63* [online]. Brno: FEKT VUT, 2017 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://latex.feec.vutbr.cz/sablona/>
- [25] Ústředný inštitút vzdelavania a psychologie. *Pulzné meniče: vzdelávací program*
- [26] *Vagony.cz* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/vagony/energie.html>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně
EDB	-	Elektrodynamická brzda
WTB	-	Wire Train Bus
kV	-	kilovolt (elektrické napětí)
kA	-	kiloampér (elektrický proud)
mH	-	milihenry (indukčnost)
mΩ	-	miliohm (elektrická odpor)
kW	-	kilowatt (výkon)
ot./min	-	otáčky za minutu
°C	-	stupeň Celsia (teplota)
kg	-	kilogram (hmotnost)
Hz	-	hertz (frekvence)
μF	-	mikrofarad (elektrická kapacita)
km/h	-	kilometry za hodinu (rychlost)
Pa	-	pascal (tlak)
M	-	moment [Nm]
Φ	-	magnetický tok [Wb]
F	-	síla [N]
U _a	-	napětí na svorkách kotvy [V]
U _i	-	indukované napětí [V]
I _a	-	elektrický proud procházející kotevním vinutím [A]
I _b	-	elektrický proud procházející budícím vinutím [A]
R _a	-	elektrický odpor kotevního vinutí [Ω]
R _b	-	elektrický odpor budícího vinutí [Ω]
L _a	-	indukčnost kotevního vinutí [H]
L _b	-	indukčnost budícího vinutí [H]
B	-	magnetická indukce [T]
l	-	délka [m]
m	-	hmotnost [kg]
J _{red}	-	redukovaný moment setrvačnosti [kg.m ²]
n	-	otáčky [ot./min]
ω	-	úhlová rychlost [rad/s]
ΔU _K	-	úbytek napětí na kartáčích motoru [V]
ΔU _{RK}	-	úbytek napětí vlivem reakce kotvy [V]
k	-	konstanta stroje [-]
c _Φ	-	konstanta buzení [V.s/rad]

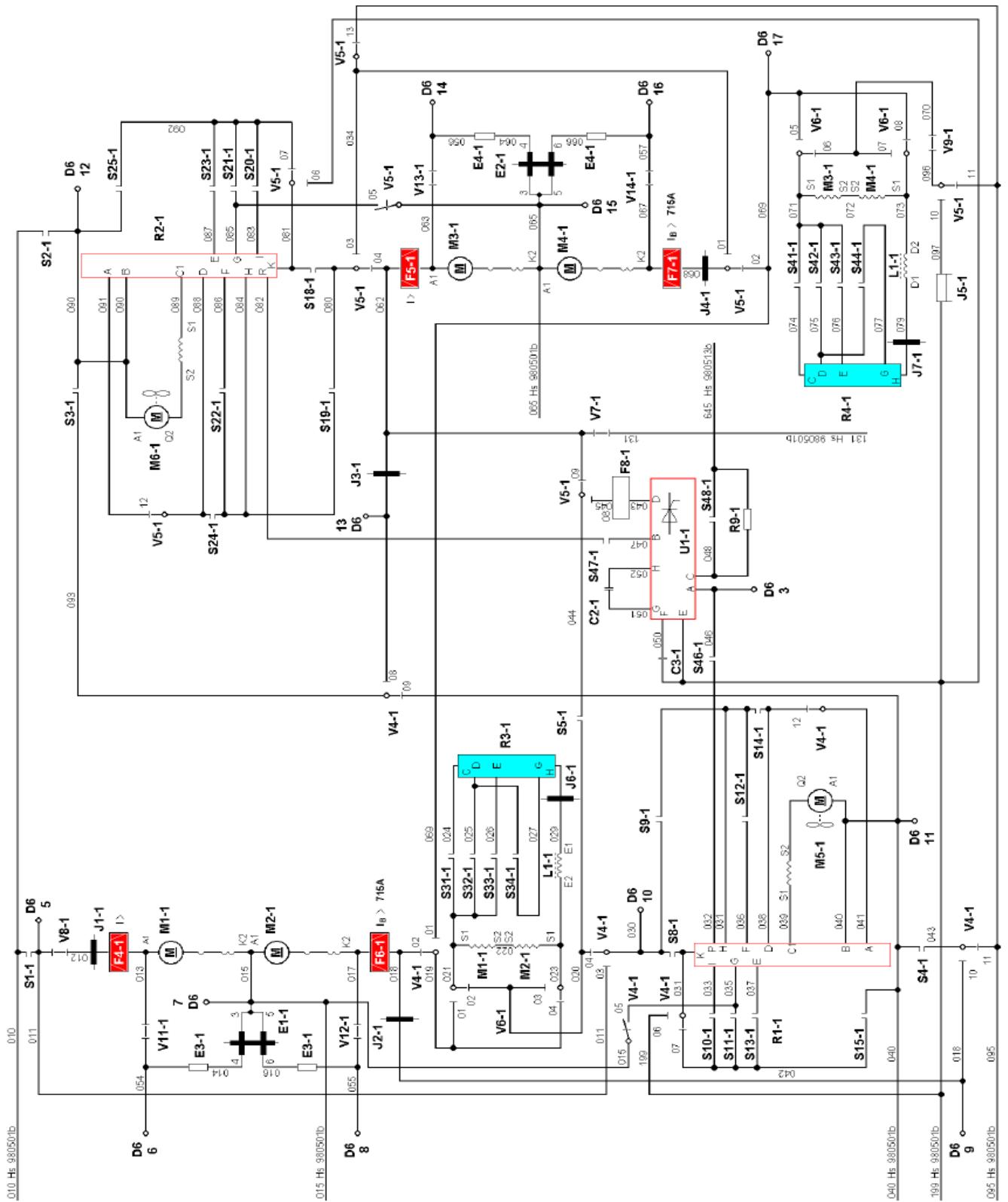
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. CD/DVD

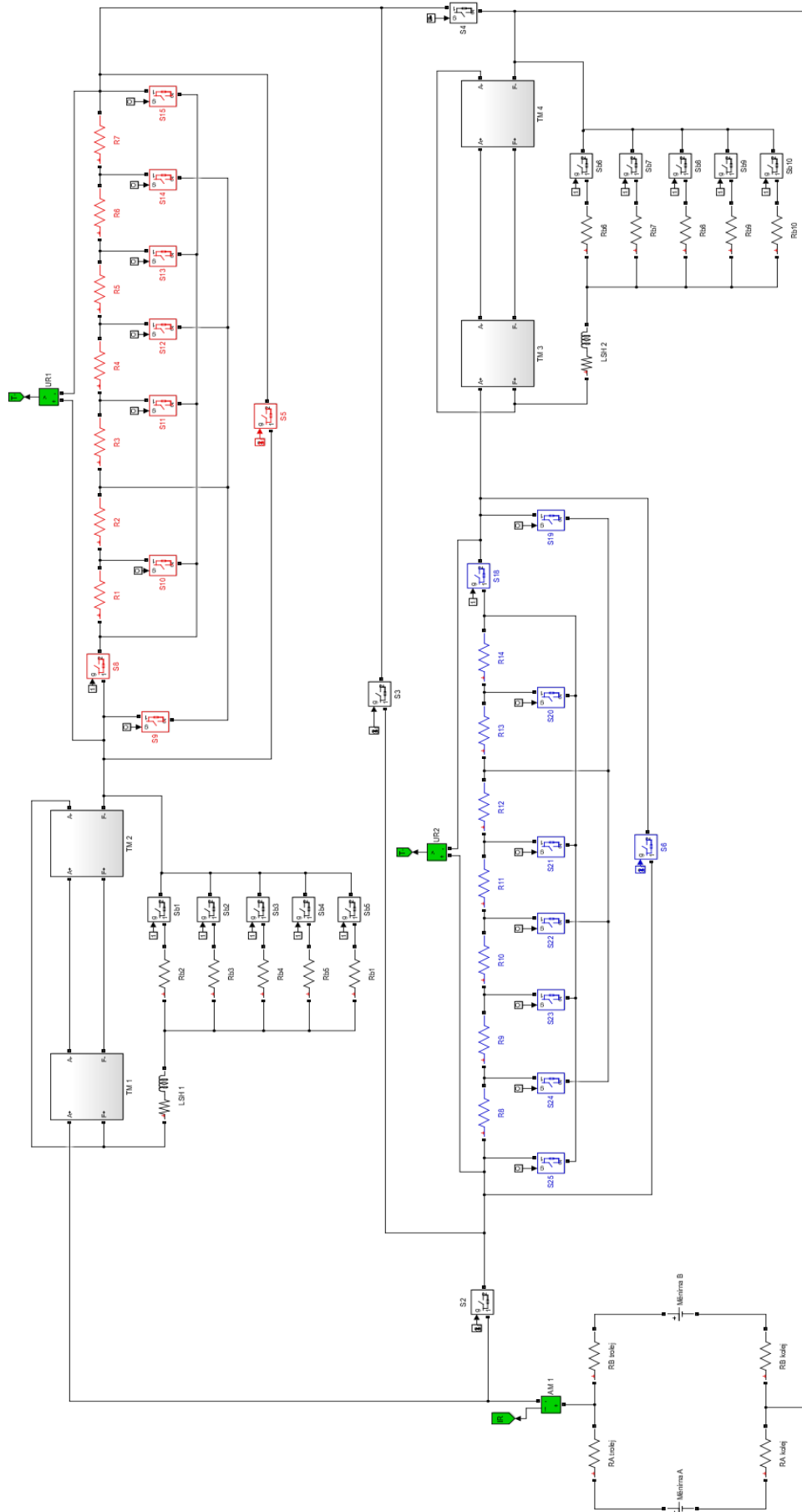
- Bakalářská práce v elektronické podobě
- Simulovaný program lokomotivy 150 (Odporova.slx)
- Simulovaný program lokomotivy 163 (Tyristorova.slx)
- Obrázky z přílohy 2

Příloha 2.

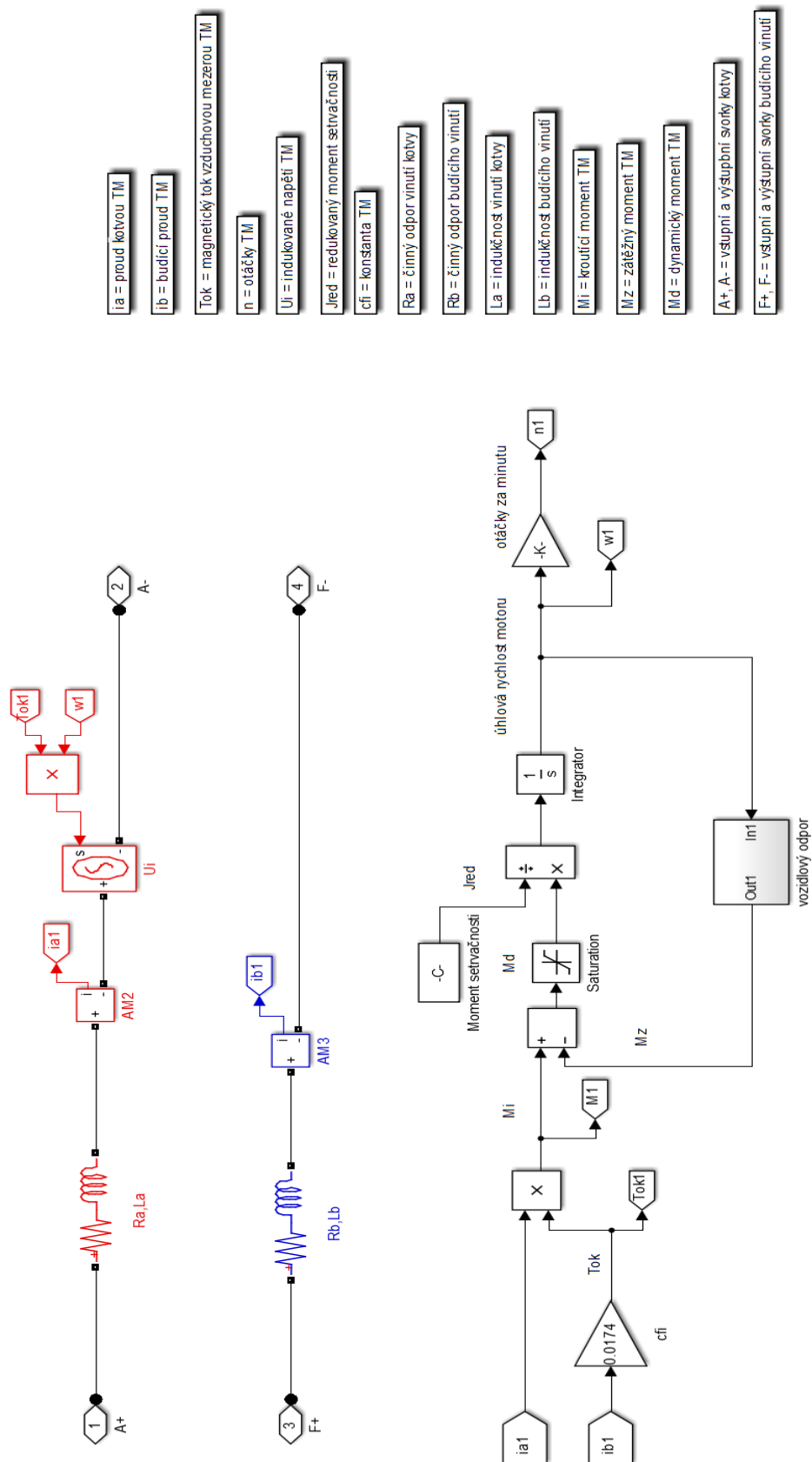
- Schéma silového obvodu lokomotivy 150
- Obvod lokomotivy 150 v simulinku
- Složení trakčního motoru
- Schéma silového obvodu lokomotivy 163
- První část obvodu lokomotivy 163 v simulinku
- Druhá část obvodu lokomotivy 163 v simulinku
- Řízení kotev lokomotivy 163 v simulinku



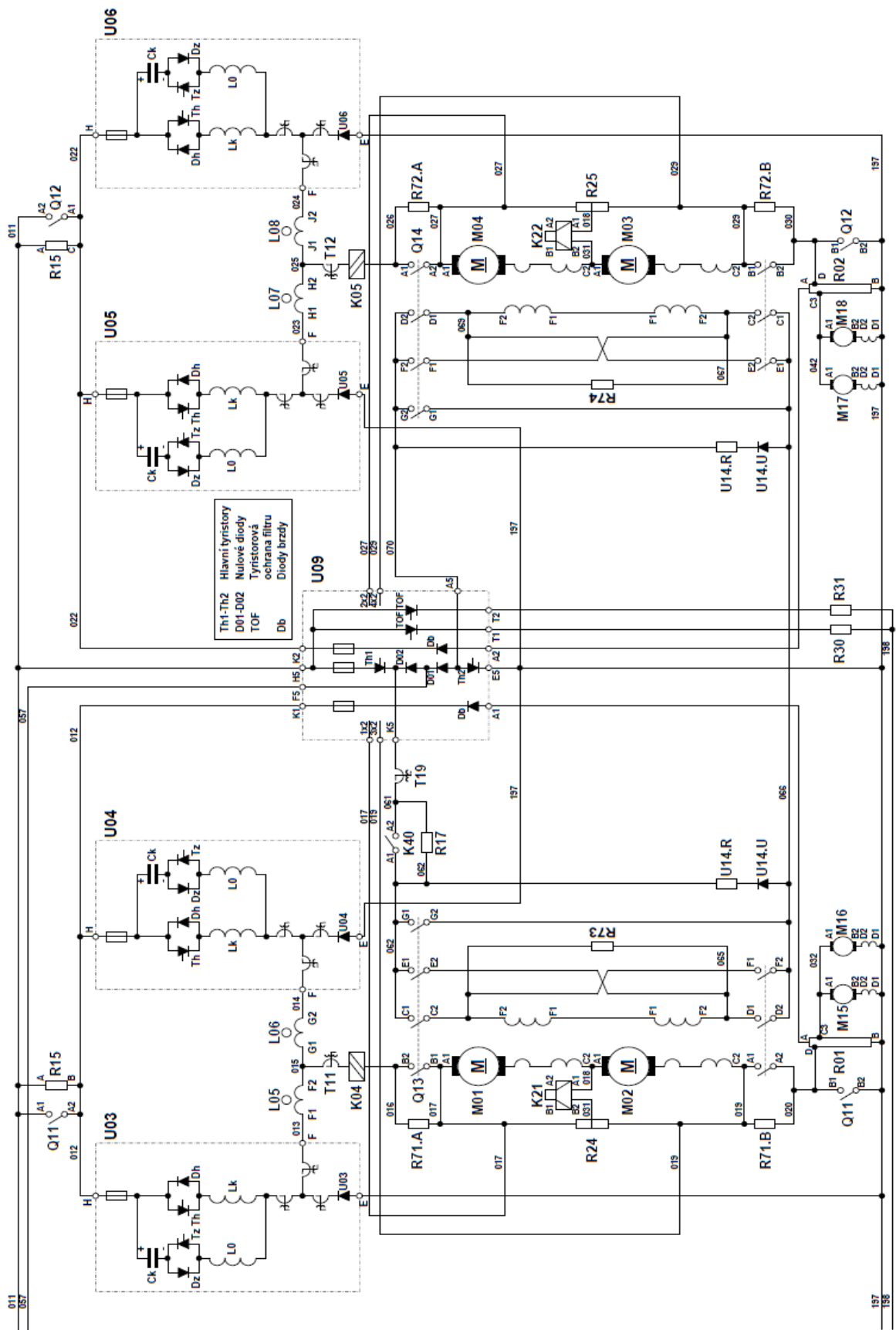
Obr. 5.1: Schéma silového obvodu lokomotivy 150



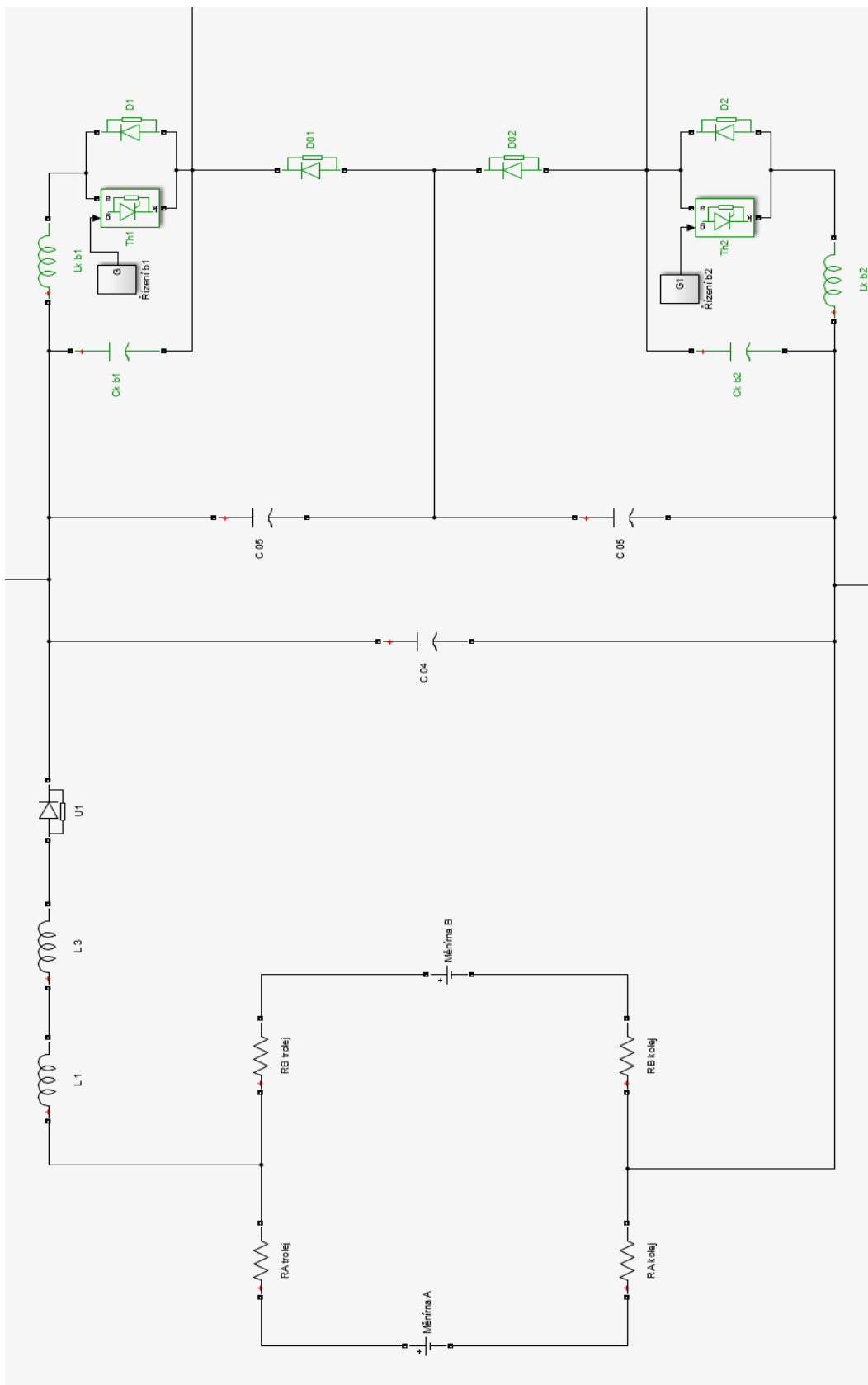
Obr. 5.2: Obvod lokomotivy 150 v simulinku



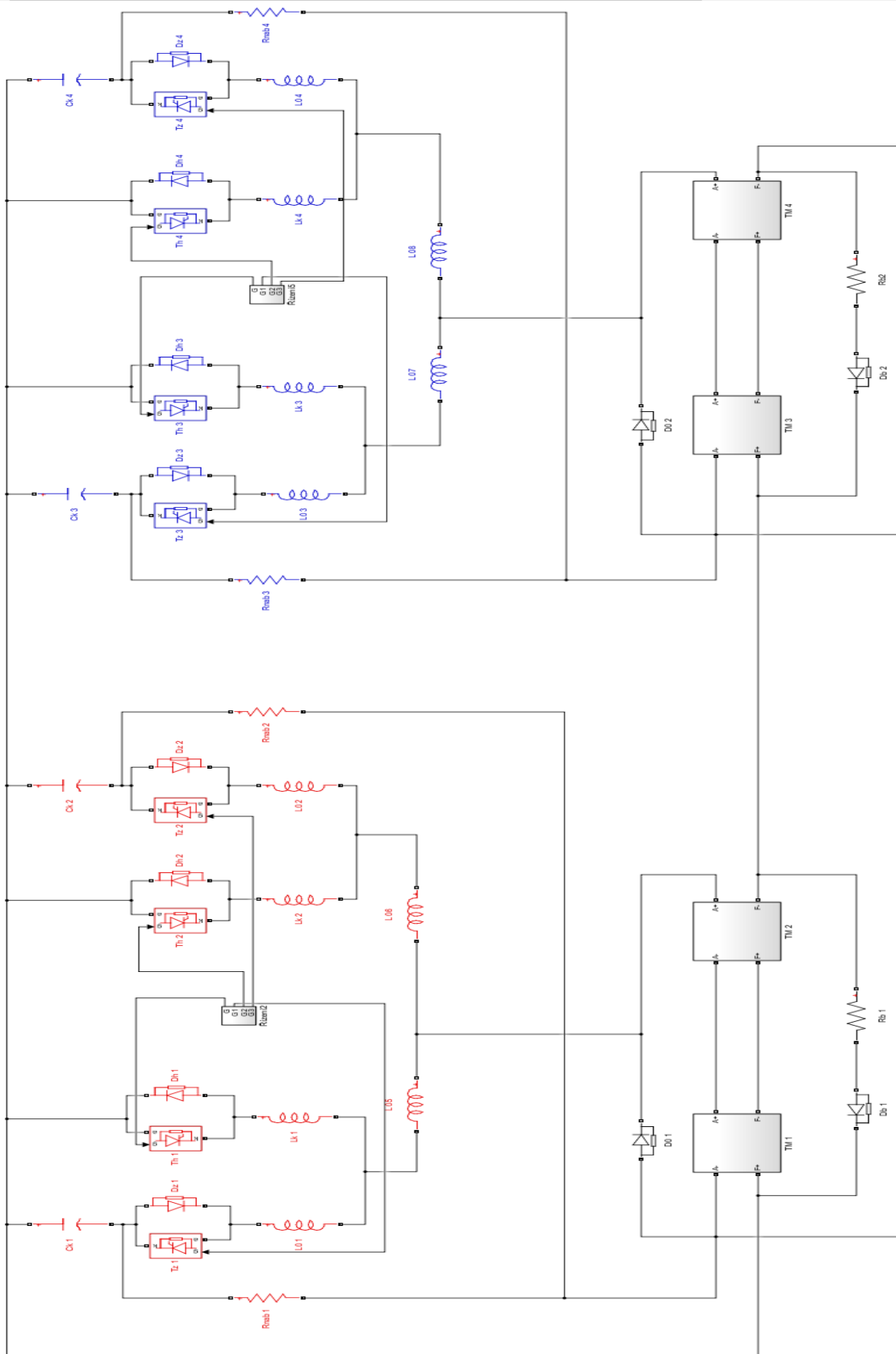
Obr. 5.3: Složení trakčního motoru v simulinku



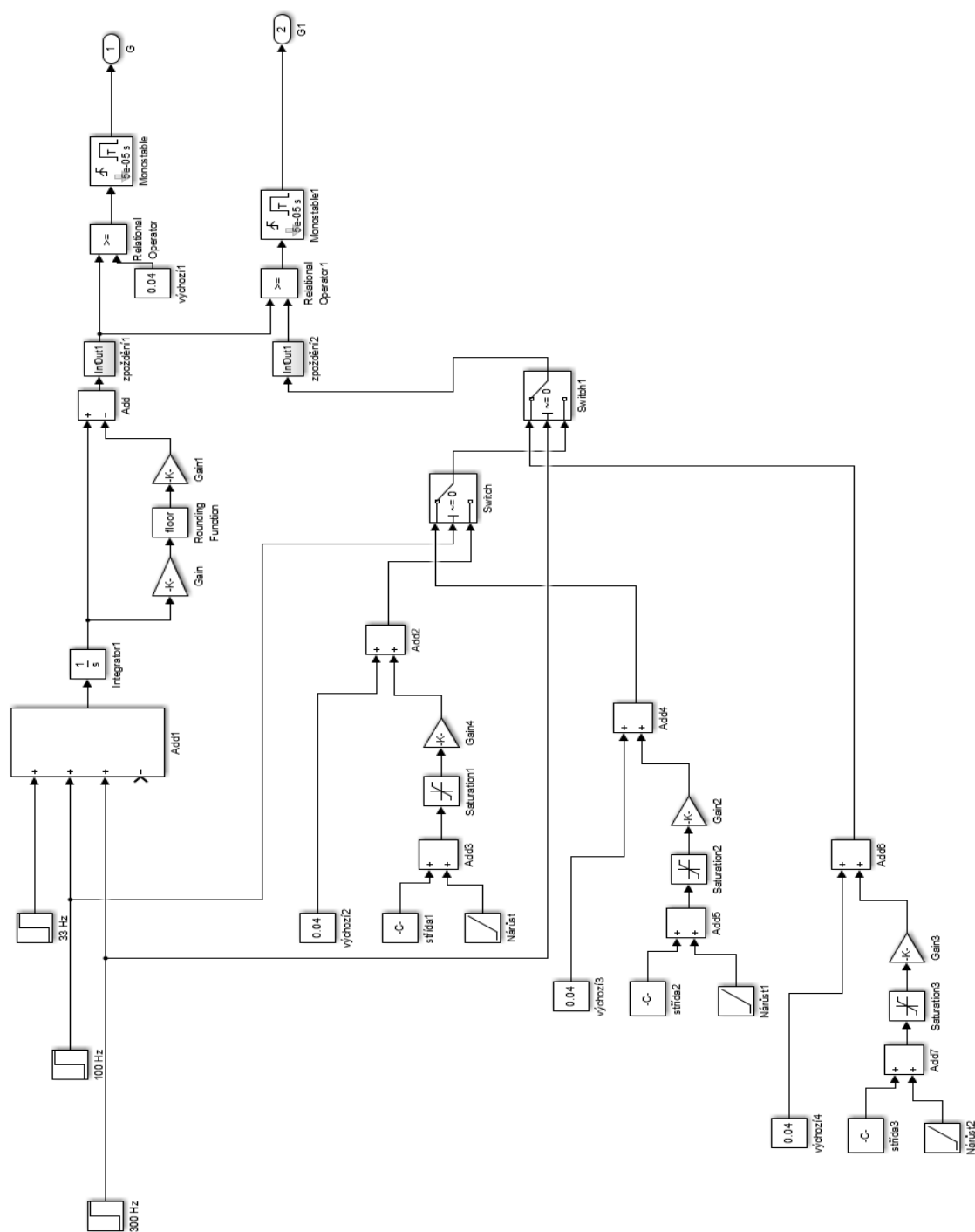
Obr. 5.4: Schéma silového obvodu lokomotivy 163



Obr. 5.5: První část obvodu lokomotivy 163 v simulinku



Obr. 5.6: Druhá část obvodu lokomotivy 163 v simulinku



Obr. 5.7: Řízení kotev lokomotivy 163 v simulinku