

Luboš Streit

Řídicí software funkčního vzorku akumulčního systému pro vozidla lehké trakce

Technická zpráva

Pracovní balíček:

11 –Elektrické části pohonu

Rok řešení:

2015

Pracoviště: Výkonová elektronika a pohony
Výzkumná zpráva č.: 22190 - 044 - 2015

Řídicí software funkčního vzorku akumulačního systému pro vozidla lehké trakce

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný
Řešitelé: Ing. Luboš STREIT, Ph.D.

Vedoucí úkolu: Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Počet stran: 14

Datum vydání: říjen 2015

Revize: 1

Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Technologické agentury České Republiky TE01020038 - Centrum kompetence drážních vozidel a Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá popisem řídicího algoritmu laboratorního funkčního vzorku trakčního vozidla s akumulacním systémem o výkonu 8 kW. Hlavním úkolem algoritmu je řízení DC/DC měniče akumulacního systému se superkondenzátorem dle vybrané energetické strategie. Implementovány jsou tyto strategie řízení: proporcionální, střední hodnota odebíraného výkonu a strategie omezení výkonových špiček. Dalším úkolem algoritmu je řízení ostatních měničů nezbytných pro kompletní funkci funkčního vzorku. Těmito měniči jsou: trakční měnič a DC/DC měnič stejnosměrného stroje. Trakční měnič napájí asynchronní motor pomocí skalárního řízení s čidlem otáček. DC/DC měnič napájí stejnosměrný motor, který je spřažen s asynchronním motorem. Tento stejnosměrný motor proto umožňuje napodobit jízdní odpory trati (zejména sklon) a zvýšenou hmotnost modelovaného vozidla umělým zvýšením momentu setrvačnosti.

Seznam symbolů a zkratk

ESS	Energy Storage System – Akumulační systém
SC	Superkondenzátor
I_{ESS}	Proud akumulčního systému
I_{TM}	Proud trakčního měniče
I_D	Proud dynama nahrazující trolej
I_{SC}	Proud SC modulem
U_{SC}	Napětí SC modulu

Obsah

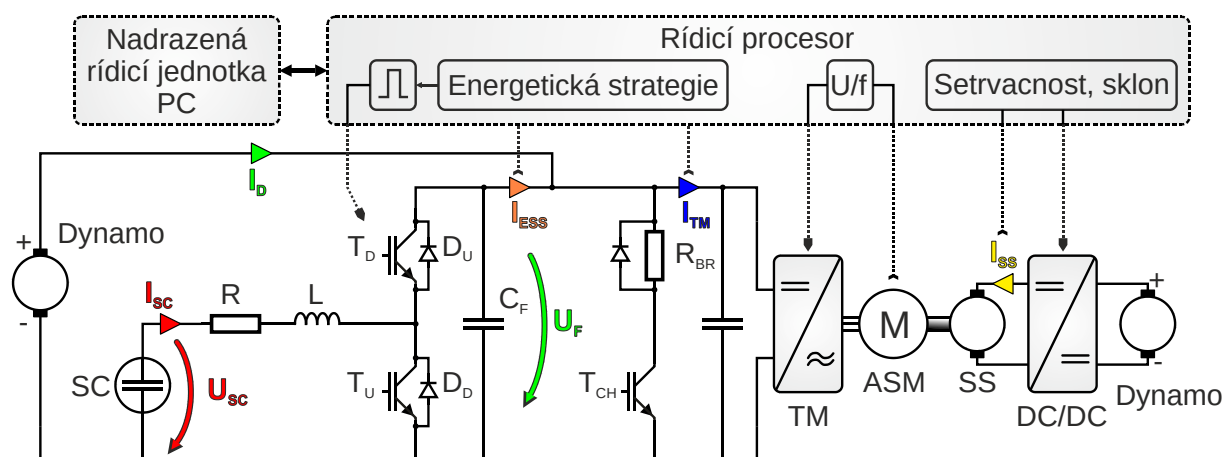
1	ÚVOD.....	4
2	SOFTWARE IMPLEMENTOVANÝ DO PROCESORU.....	5
2.1	DC/DC měnič superkondenzátorů.....	5
2.1.1	Způsob řízení.....	5
2.1.2	Energetické strategie	6
2.2	Trakční měnič	7
2.3	DC/DC měnič stejnosměrného motoru	8
2.4	Brzdový odporník.....	9
3	SOFTWARE IMPLEMENTOVANÝ DO PC	9
4	ZÁVĚR.....	11

1 Úvod

Zvýšení účinnosti trakčního vozidla je možné dosáhnout například za pomoci akumulčního systému, který umožňuje zachytit část kinetické energie při brzdění. Aby byl akumulční systém optimálně využit, musí být správně navržena jeho velikost a dále musí být řízen vhodnou energetickou strategií. Optimální velikost akumulčního systému a jeho vhodná strategie řízení se odvíjí od parametrů vozidla a linky, na které je provozováno. Za účelem testování strategií a dimenzování akumulčního systému vznikl funkční vzorek umožňující emulaci reálné linky ve zmenšeném měřítku. Tento vzorek využívá pro akumulaci energie superkondenzátory od firmy MAXWELL, které jsou učený pro trakční účely.

Hlavní částí funkčního vzorku je soustrojí, které emuluje asynchronní trakční motor tramvaje s akumulacním systémem jedoucí na modelu vybrané linky. Model linky zajišťuje stejnosměrný motor, který svým řízeným brzdným (nebo akceleračním) momentem napodobuje jízdní odpory (zejména sklon) a řízeně zvyšuje moment setrvačnosti, který představuje hmotnost tramvaje. Oba motory jsou napájeny z měničů, které jsou řízeny z jednoho procesoru. Pro nastavování parametrů a měření veličin byla vyvinuta i nadřazená řídicí jednotka. Zmiňovaný software se tedy skládá ze dvou programů. První z nich je vytvořen v jazyce C a je implementován do procesoru TMS320F2812. Druhý je vytvořen v prostředí LabView a je spuštěn na PC, který tak tvoří nadřazenou řídicí jednotku.

Na Obr. 1 je zobrazena topologie funkčního vzorku, kde SC je superkondenzátor (z anglického Supercapacitor), ESS je akumulací systém (z anglického Energy Storage System), TM je trakční měnič.



Obr. 1 Topologie funkčního vzorku modelu tramvaje s akumulčním systémem

2 Software implementovaný do procesoru

2.1 DC/DC měnič superkondenzátorů

Úkolem této části algoritmu je řízení proudu I_{SC} , který teče superkondenzátorem. Jeho další důležitou úlohou je hlídání napětí superkondenzátoru U_{SC} , které nesmí přesáhnout maximální napětí povolené výrobcem a nesmí klesnout pod nastavenou minimální hodnotu. Minimální hodnota napětí se volí dle účinnosti akumulačního systému. Pro nízké hodnoty napětí superkondenzátoru je při jmenovitém proudu výstupní výkon akumulačního systému relativně malý, přičemž ztráty v superkondenzátoru a tlumivce jsou víceméně jmenovité. To znamená, že účinnost bude velmi malá a nemusí se vyplatit energii ukládat. V okamžiku, kdy je napětí větší než nastavené maximum, dochází k blokování tranzistoru pro nabíjení superkondenzátoru (v Obr. 1 značen jako T_D). Toto blokování zahrnuje i hysterezi, která zamezí nežádoucímu spínání v blízkém okolí maximálního napětí. Podobně dochází k blokování tranzistoru pro vybíjení superkondenzátoru (T_U) při napětí nižším než nastavené minimum.

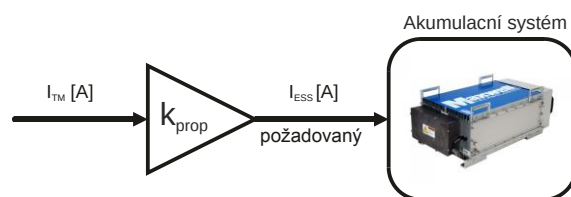
Pro potřeby testování obsahuje algoritmus i funkci umožňující manuální nabití/vybití superkondenzátoru na požadovanou hladinu.

2.1.1 Způsob řízení

Regulaci proudu I_{SC} zajišťuje PI regulátor, jehož vstupem je rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou tohoto proudu. Výstupem regulátoru je poměrné sepnutí IGBT tranzistorů. Spínací frekvence tranzistorů je zvolena pevná o kmitočtu 2 kHz. Požadovanou hodnotu proudu I_{SC} generuje nadřazený PI regulátor, který reguluje celkový výstupní proud akumulačního systému I_{ESS} . Velikost požadovaného proudu I_{ESS} určuje zvolená strategie řízení dle aktuálních podmínek. Měření regulovaného proudu I_{SC} je provedeno vzorkováním o frekvenci 100 kHz a filtrováno plovoucím průměrem o čtyřech prvcích. Takto vysoká frekvence vzorkování byla zvolena kvůli měření další proudů potřebných pro v textu následující energetické strategie. Jsou to proudy I_{ESS} a I_{TM} , které jsou z principu pulzní a je potřeba znát jejich střední hodnotu. Jejich střední hodnota je vypočtena opět použitím klouzavého průměru tentokrát však z 512 prvků, právě kvůli pulznímu charakteru měřených proudů. Počet prvků je zvolen 512, což je 2^9 . Tento počet umožní snadným a rychlým bitovým posunem vydělení sumy počtem prvků pro výpočet průměru.

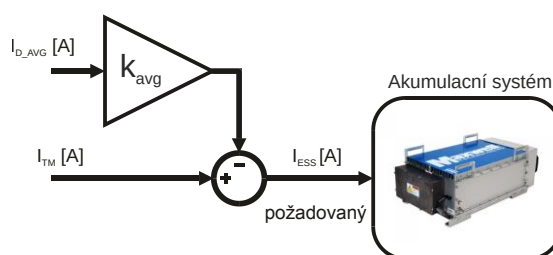
2.1.2 Energetické strategie

Implementované strategie byly představeny v [1]. První implementovanou strategií je proporcionální strategie, která je uvedena na Obr. 2. Tato strategie využívá akumulční systém dle násobku proudu trakčního měniče. V případě kdy je tento násobek k_{prop} roven jedné, dochází k plnému hrazení odebíraného proudu trakčním měničem. To znamená, že odebraný proud z dynama bude nulový. Toto platí za předpokladu, že akumulční systém má dostatek energie a je schopen dodávat plný výkon. Konstanta k_{prop} může mít odlišnou hodnotu pro motorický a generátorický režim pohonu.



Obr. 2 Proporcionální strategie řízení akumulčního systému

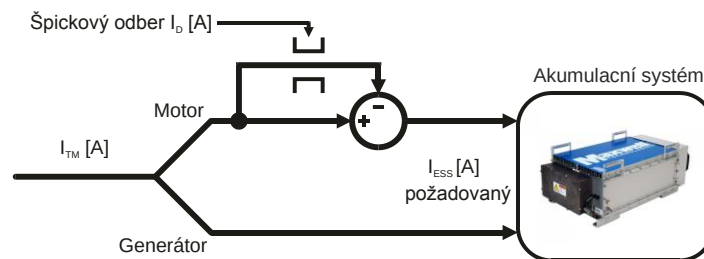
Druhá implementovaná strategie, se snaží udržet odběr tramvaje po celou dobu jízdy na konstantní hodnotě rovné střednímu proudu pro celou dobu jízdy, tedy pro jednu cestu na druhou konečnou a zpět. Při dostatečné velikosti superkondenzátoru by tato strategie trvale odebírala konstantní výkon, který je potřeba na krytí průměrných ztrát. Výkonové špičky při rozjezdech a brzdění by plně hradil akumulční systém, který by byl jinak neustále dobíjen z dynama. Obr. 3 naznačuje princip strategie.



Obr. 3 Řízení akumulčního systému dle strategie střední hodnoty odebíraného proudu

Principem třetí implementované strategie je použití akumulované energie pro hrazení odběrů převyšujících nastavenou hladinu. Akumulační systém tak vlastně ořezává výkonové špičky, které by způsobovaly nadměrné ztráty v troleji. V motorickém režimu je oříznut výkon převyšující nastavenou hodnotu *Špičkový odběr* I_D a při generátorickém režimu je požadováno

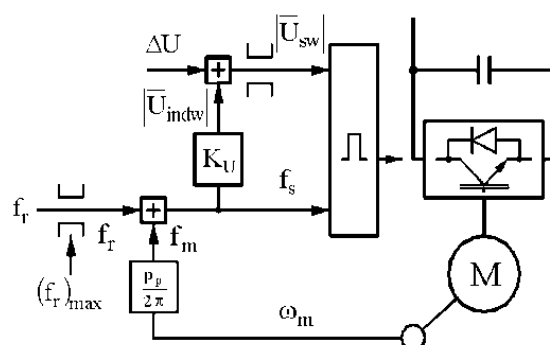
akumulovat plný výkon, aby byl systém následně schopen odebírané špičky omezovat. Zmíněný princip je zobrazen na Obr. 4.



Obr. 4 Řízení akumulčního systému dle strategie omezení špičkového odběru

2.2 Trakční měnič

Trakční měnič je řízen metodou konstantního rotorového kmitočtu asynchronního motoru [2]. To znamená, že bylo použito řízení s čidlem otáček. Blokové schéma řízení ukazuje Obr. 5. Zadávaný rotorový kmitočet odpovídá momentu motoru a je výstupem té části algoritmu, která napodobuje řidiče. Tato část programu zajišťuje projetí trati včetně zastavování v zastávkách. Pozice zastávek jsou uloženy v tabulce a odpovídají poměrným pozicím na vybrané reálné tramvajové lince. Algoritmus také umožňuje nastavení doby stání v zastávce. Pokud není spuštěn režim jízdy na trati, je možno manuálně zadávat rotorový kmitočet z nadřazené jednotky. Jmenovité otáčky trakčního motoru 1500 ot/min odpovídají rychlosti emulované tramvaje 50 km/h. Spínací frekvence IGBT tranzistorů je opět volena 2 kHz.



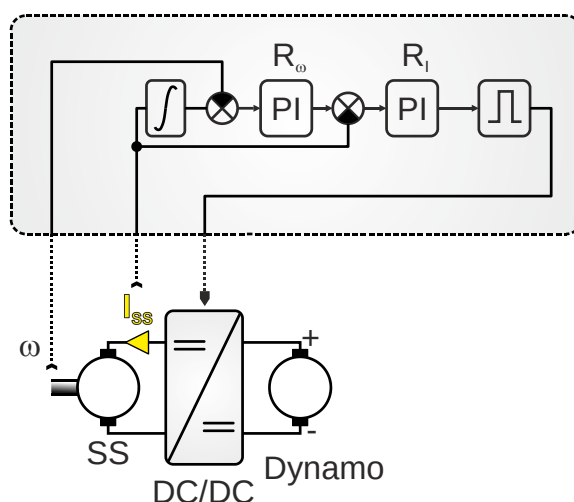
Obr. 5 Blokové schéma řízení trakčního měniče [2]

2.3 DC/DC měnič stejnosměrného motoru

Řízení stejnosměrného proudu spočívá v regulaci jeho proudu. Tento proud I_{SS} je řízen obdobně jako výše zmíněný proud I_{SC} pomocí PI regulátoru s konstantní spínací frekvencí 2 kHz. Proud I_{SS} odpovídá momentu stejnosměrného stroje.

Prvním úkolem tohoto stroje je emulace sklonu trati reálné linky. To znamená, že stejnosměrný stroj zatěžuje trakční asynchronní motor dle aktuálních poměrů na emulované trati. Sклон trati byl přepočten na požadovaný moment respektive proud I_{SS} . Sклон celé trati je uložen v tabulce proudů I_{SS} a podle vypočtené ujeté dráhy je vybírána aktuální hodnota proudu odpovídající sklonu trati v daném místě. Pokud je na trati v daný okamžik stoupání, tak stejnosměrný stroj brzdí asynchronní trakční motor, který musí zvýšit svůj výkon, aby udržel požadovanou rychlost. V případě, že je v daný okamžik na trati klesání, stejnosměrný stroj je v režimu motor a trakční asynchronní stroj brzdí na požadovanou rychlost.

Druhým úkolem regulace stejnosměrného stroje je emulace momentu setrvačnosti. Z hmotnosti reálné tramvaje je odvozen zvýšený moment setrvačnosti soustrojí. Moment setrvačnosti samotného soustrojí je totiž několikrát menší než vychází pro případ emulace tramvaje. Zvýšení momentu setrvačnosti je provedeno pomocí rychlostní regulace stejnosměrného motoru. Je použita klasická struktura regulace, kde PI regulátoru proudu je nadřazen PI regulátor otáček. Požadované otáčky jsou vypočteny z integrace proudu I_{SS} . Blokové schéma regulace je zobrazeno na Obr. 6.



Obr. 6 Princip zvýšení momentu setrvačnosti pomocí stejnosměrného stroje

Při rozběhu je tedy požadavek na nulové otáčky stejnosměrného motoru, ale trakční asynchronní motor začne roztáčet soustrojí. To způsobí, že stejnosměrný stroj bude brzdít, aby udržel požadované nulové otáčky. Stejnosměrným strojem tedy začne protýkat proud, který způsobí brzdňý moment. Tento proud je integrován a poté zaveden jako hodnota požadovaných otáček. Takto vypočtené otáčky tedy postupně rostou a soustrojí se rozbíhá při soustavném brzdění stejnosměrným strojem. Takto je tedy rozběh soustrojí prodloužen vlivem emulovaného momentu setrvačnosti. Po dosažení nastavených otáček trakčního asynchronního motoru již soustrojí dále nezrychluje a stejnosměrný stroj také dosáhne požadovaných otáček z integrace jeho proudu I_{ss} . Proto stejnosměrný stroj již nebrzdí, to znamená, že jeho proud je nulový a integrace se zastaví.

Obdobným způsobem funguje emulace momentu setrvačnosti při snižování otáček (brzdění trakčním asynchronním motorem).

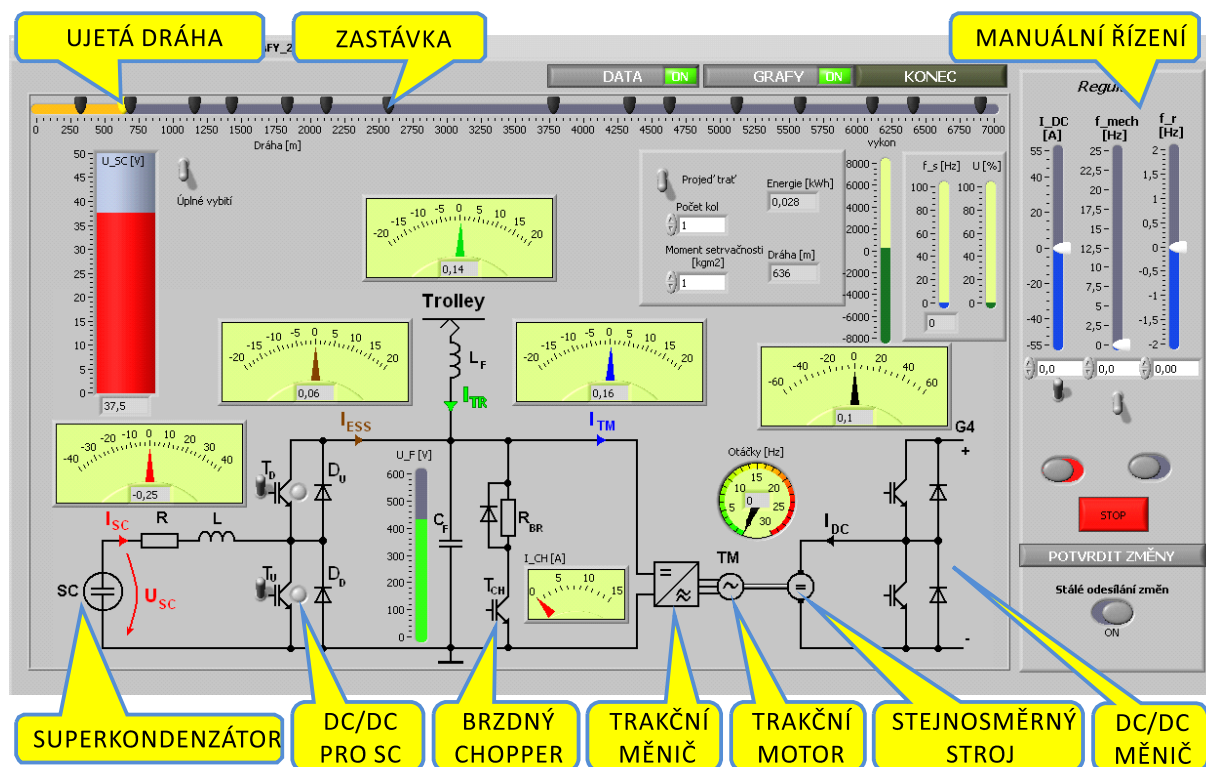
2.4 Brzdový odporník

Regulace brzdového odporníku umožňuje maření energie během brzdění v případě, kdy zdroj (trolej) nemůže energii absorbovat a akumulací systém je nabit na maximum. Regulační struktura obsahuje opět PI regulátor proudu a jemu nadřazený regulátor napětí. V případě brzdění bez možnosti rekuperace energie do zdroje (troleje) dojde ke zvýšení napětí na filtračním kondenzátoru C_F . Nastavená hodnota povoleného napětí na tomto kondenzátoru musí být nižší než jeho jmenovité napětí. Při této hladině začne reagovat regulace brzdového odporníku a požadavek na jeho proud roste, dokud roste napětí nad nastavenou hladinu. Takto je přebytečná energie zmařena v brzdovém odporníku.

3 Software implementovaný do PC

Tento software byl vytvořen v prostředí LabView a slouží k ovládání emulátoru tramvaje s akumulacím systémem jako jeho nadřazená řídicí jednotka. Komunikace mezi řídicím procesorem a touto jednotkou v PC je zajištěna pomocí USB sběrnice. Nadřazená jednotka umožňuje oba směry komunikace, tedy nastavení parametrů funkčního vzorku emulátoru tak

i vyčítání a zobrazení jeho veličin. Vzhled nadřazené jednotky s popisem základních komponent je zobrazen na Obr. 7.



Obr. 7 Nadřazená řídicí jednotka emulátoru tramvaje s akumulčním systémem

Zobrazované veličiny:

- Ujetá dráha – žlutá barva přehledně znázorňuje ujetou dráhu
- Zastávky – černé značky ukazují pozici všech zastávek
- Napětí a proud superkondenzátoru jsou znázorněny červeným zásobníkem a červeným ručkovým měřidlem
- Ostatní ručková měřidla ukazují proud: akumulčního systému – hnědá, dynamo (troleje) – zelená, trakčního měniče – modrá, proud stejnosměrným motorem – černá
- Napětí na filtračním kondenzátoru C_F je zobrazeno světle zeleně jako U_F
- Otáčky soustrojí zobrazuje kruhové měřidlo v jednotkách mechanické frekvence
- Výkon trakčního pohonu je zobrazen tmavě zeleně vpravo nahoře
- f_s [Hz] a U [%] zobrazují aktuální hodnoty skalárního řízení trakčního motoru

Nastavované veličiny:

- Moment setrvačnosti – velikost emulovaného momentu setrvačnosti stejnosměrným strojem

- Počet kol – počet projetí trati
- Přepínač „Úplné vybití“ – umožňuje vybití superkondenzátor až do téměř nulového napětí, využíváno po dokončení měření
- Přepínače u tranzistorů DC/DC měniče superkondenzátoru umožňují ručně blokovat jejich funkci – tedy nabíjení a/nebo vybíjení superkondenzátoru
- Manuální řízení f_r – ruční nastavení rotorové frekvence asynchronního trakčního motoru
- Manuální řízení f_{mech} – po přepnutí příslušného přepínače možnost ručního nastavení otáček stejnosměrného stroje, opačná poloha znamená, že je stejnosměrný stroj řízen jako zvýšený moment setrvačnosti
- Manuální řízení I_{DC} - po přepnutí příslušného přepínače možnost ručního nastavení proudu stejnosměrného stroje, opačná poloha znamená, že proud stejnosměrného stroje je řízen výstupem regulátoru otáček
- Tlačítko STOP – umožňuje odstavit zařízení definovaným způsobem

4 Závěr

Implementovaný software umožňuje testování superkondenzátorů na fyzikálním modelu tramvaje s akumulačním systémem. Tento software umožnil otestovat základní strategie řízení akumulačního systému a je možné ho rozšířit o pokročilé strategie. Změnou parametrů trati lze emulovat libovolnou trať včetně nově budovaných tratí. Díky emulaci momentu setrvačnosti lze emulovat i proměnnou hmotnost tramvaje vlivem měnícího se počtu cestujících.

Literatura

- [1] GRIGANS, Linards. *Recuperated Electric Energy Utilization in Urban Electric Transport by Applying Supercapacitors*. Riga, 2012. Rigorózní práce. Riga Technical University, Faculty of Power and Electrical Engineering, Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering.
- [2] Zeman, Karel; Peroutka, Zdeněk; Janda, Martin. *Automatická regulace pohonů s asynchronními motory*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 200s. ISBN: 80-7043-350-7.

Seznam obrázků

Obr. 1 Topologie funkčního vzorku modelu tramvaje s akumulčním systémem.....	4
Obr. 2 Proporcionální strategie řízení akumulčního systému.....	6
Obr. 3 Řízení akumulčního systému dle strategie střední hodnoty odebíraného proudu	6
Obr. 4 Řízení akumulčního systému dle strategie omezení špičkového odběru	7
Obr. 5 Blokové schéma řízení trakčního měniče [2]	7
Obr. 6 Princip zvýšení momentu setrvačnosti pomocí stejnosměrného stroje.....	8
Obr. 7 Nadřazená řídicí jednotka emulátoru tramvaje s akumulčním systémem	10

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.
1	Všechny	Publikování dokumentu	15.12.2015 Streit / KEV