VÝZKUM V OBLASTI APLIKACE ALTERNATIVNÍCH ENERGETICKÝCH ZDROJŮ NA DRÁŽNÍ VOZIDLA

Petr Sýkora, Ondřej Sadílek, Tomáš Lelek

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, DFJP, Univerzita Pardubice
Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika
tel.: +420 466 036 427, email: petr.sykora@upce.cz
web: http://www.upce.cz

Abstrakt: *Příspěvek popisuje výzkumné aktivity na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, které se zaměřují na oblast regulace drážních vozidel v součinnosti s jejich napájením pomocí fotovoltaických panelů a trakčních akumulátorů. Nejpodstatnější částí výzkumu je provádění experimentálních měření na trati s akumulátorovým vozidlem vlastněným katedrou.*

Klíčová slova: *železniční vozidlo, akumulátor, nabíjení, fotovoltaický panel*

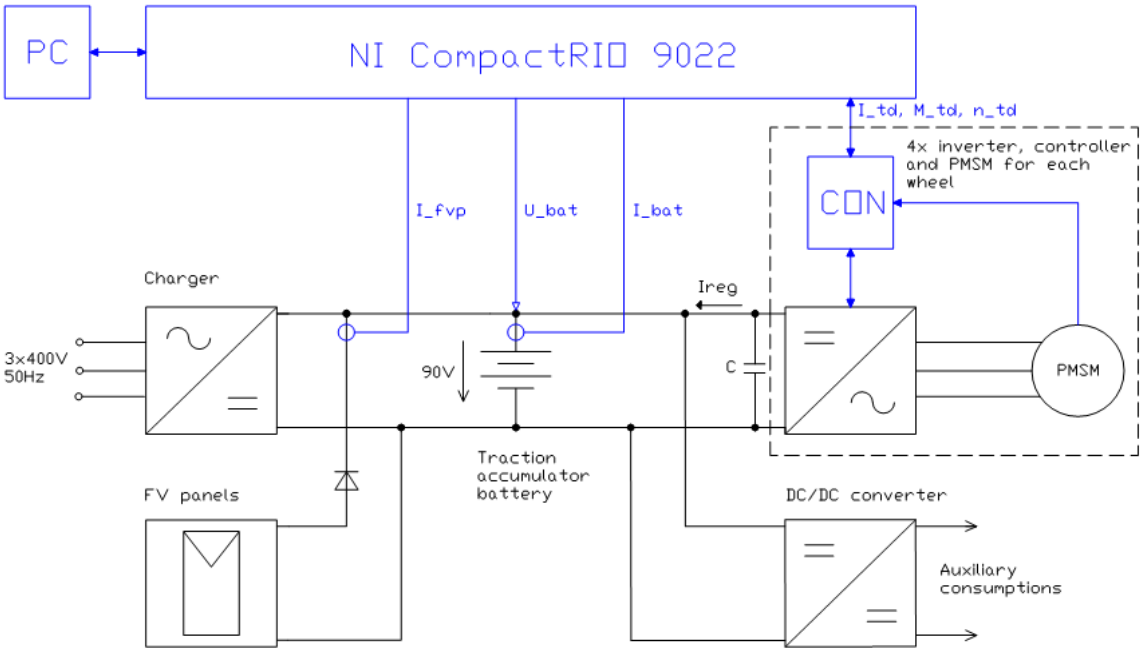
1 Úvod

V rámci evropské železniční sítě jsou dnes provozovány zejména elektrické lokomotivy a elektrické jednotky. Tato vozidla lze jen stěží použít pro provoz na tratích regionálního významu, jelikož je ekonomicky nevýhodné na těchto tratích budovat trakční vedení. Problém s nasazením vozidel závislé elektrické trakce lze velice efektivně vyřešit použitím akumulátorové trakce, kde se o napájení vozidla stará vestavěný akumulátor. Z hlediska zvýšení efektivity provozu akumulátorového vozidla je nasnadě využití chytrých sítí pro nabíjení vozidla. Z tohoto důvodu se náš výzkum větví do tří oblastí: akumulátorové napájení, chytré kontrolní systémy a pomocné fotovoltaické systémy použité přímo na experimentálním vozidle.

Obr. 1.1: Experimentální drážní vozidlo

2 Experimentální vozidlo

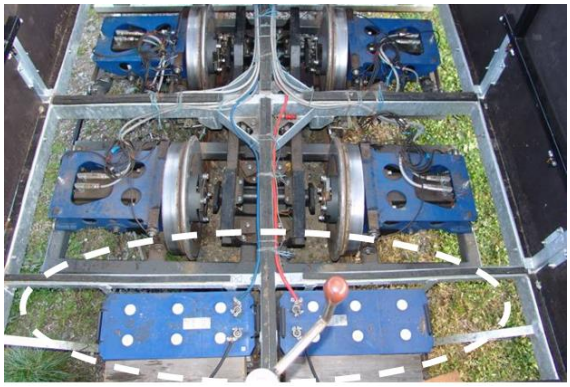
Nosnými bloky našeho výzkumu jsou zejména experimenty, jež provádíme pomocí naší experimentální základny - bateriově napájeného drážního vozidla, které je prezentováno na obrázku 1.1. Vozidlo s vlastní hmotnosti 2100 kg je postaveno na rozchod kolejí 600 mm. Trakční pohon tvoří čtyři motory typu PMSM napájených ze čtyř trakčních střídačů, které nezávisle řídí moment na jednotlivých kolech – jmenovitý trakční výkon dosahuje hodnoty 6 kW, maximální trakční výkon je potom o něco málo menší než 10 kW. Veškeré komponenty pohonného řetězce jsou mezi sebou propojeny pomocí stejnosměrné sběrnice. Na sběrnici je napojen nabíječ, který umožnuje nabíjení vozidla z elektrické sítě, fotovoltaický generátor, trakční akumulátor, čtyři trakční pohony a měniče pro pomocné spotřeby. Schéma vozidla se nachází na obrázku 2.1. Více informací o vozidle se nachází v literatuře [1] a [2].



Obr. 2.1: Blokový diagram pohonné a řídicí části experimentálního drážního vozidla

3 Akumulátorový systém

Experimentální kolejové vozidlo je svými vlastnostmi předurčeno pro aplikaci analýz a testů elektro chemických zásobníků energie. Zásobárnu elektrické energie tvořil donedávna akumulátor trakční olověný, který byl sestaven ze sériové kombinace osmi akumulátorů se jmenovitým napětím 12V a kapacitou 150Ah EXIDE FT 12 150. Celková energie akumulátorové baterie se jmenovitým napětím 96V činila 14,4kWh. Akumulátory na olověné bázi tvořily výchozí bod pro testování akumulačních vlastností elektro chemických zdrojů energie.



Obr. 3.1: Umístění Pb akumulátorů na vozidle

Současná podoba zdrojového systému spočívá v zásadní změně – z důvodů výzkumu moderních akumulátorových systémů vozidlo pohání systém založený na Li článcích a sada fotovoltaických panelů.

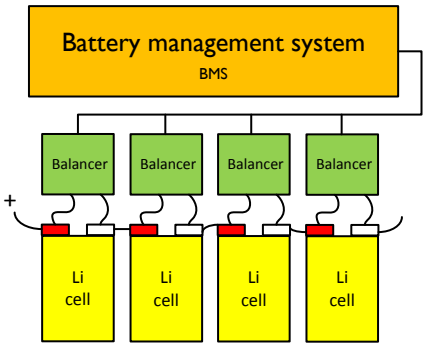
Akumulátory založené na lithiu patří mezi nejmodernější elektrochemické zdroje energie. Jejich výhodou je vyšší hmotností a objemová hustota energie, nevýhodou pak vyšší pořizovací náklady a potřebný nadřazený řídicí management. Výhodná koncepce lithiových akumulátorů vychází z velkého rozdílu elektrických potenciálů uhlíkové záporné a lithné kladné elektrody. Napětí mezi elektrodami dosahuje hodnot okolo 3,5V. V porovnání s olověnými akumulátory s hodnotou napětí 2,1V.

Pro aplikaci experimentálního vozidla byly vybrány Li-ion články technologie LiFePO4 Sinopoly SP-LFP100AHA. Tento typ akumulátorů patří v současné době z pohledu bezpečnosti k nejvíce uznávaným. V případě elektrického či mechanického poškození nehrozí exploze či požár tak, jako je tomu u konvenčních Li-pol a Li-ion článků.

Tab. 2.1: Porovnání technologie Pb a Li-ion

Parameter	Lead acid - old	Li-ion - new
Type of cell	EXIDE FT 12 150	Sinopoly SP-LFP100AHA
Voltage of cell [V]	12	3,2
Count of serial cells [ks]	8	30
Total energy [kWh]	14,4	9,6
Weight of one cell [kg]	53	3,3
Total weight of cells [kg]	424	99
Total weight with accessories [kg]	424	150
Gravimetric energy density [Wh/kg]	34	64

Tabulka 2.1 popisuje porovnání původního Pb bateriového systému a současného Li. Současná koncepce naznačuje zvýšení objemové a hmotnostní hustoty energie. V souvislosti s instalací Li akumulátorů na vozidlo je nutno do celkového bateriového systému začlenit nadřazený řídicí battery management (BMS), který v průběhu nabíjení a vybíjení jednotlivé články akumulátorové baterie hlídá. Systém je tvořen hlavní jednotkou BMS a balancery. Hlavním úkolem balancérů je vyrovnávání napětí jednotlivých článků akumulátorové baterie, včetně měření napětí, vnitřního odporu a teploty článku. Tyto informace jsou poté odesílány po komunikační lince do hlavní jednotky bateriového systému BMS.



Obr. 3.1: Schéma Li-ion bateriového systému vozidla

Hlavní jednotka BMS poté může logovaná data ukládat do PC či přímo v reálném čase zobrazovat. Uložená data v další fázi slouží k vyhodnocení nabíjecích a vybíjecích toků energie.

Obr. 3.3: Balancer Li-ion článku

4 Fotovoltaický systém

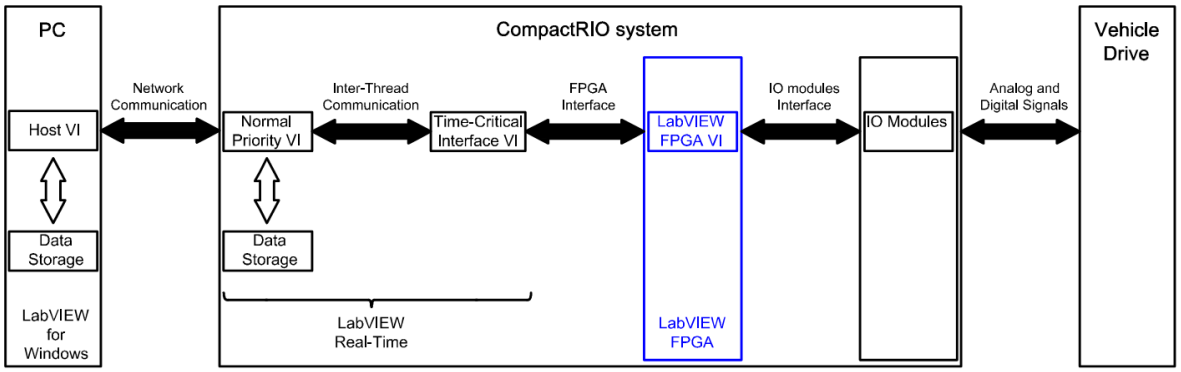
Fotovoltaický generátor umístěný na střeše vozidla se skládá ze čtyř fotovoltaických panelů Panasonic VBHN240SJ25 s maximálním výkonem 240W. Dva z panelů jsou vždy vzájemně spojeny sériově. Paralelní spojení dvojic panelů je pak zaústěno do stejnosměrného meziobvodu pouze pomocí oddělovací diody, to znamená bez dodatečného měniče. Toto jednoduché spojení není ovšem schopno dodat maximální výkon v případě, že nedojde k přizpůsobení napětí baterie s voltampérovou charakteristikou fotovoltaického panelu.

5 Řídicí systém vozidla

Komplexní regulaci vozidla zajišťuje nadřazený řídicí systém, jehož základem je průmyslový počítač CompactRIO dodávaný americkou firmou National Instruments. Hlavním úkolem systému CompactRIO je provádět regulaci vozidla na základě dat získaných přímo z pohonu vozidla, respektive z uživatelského počítače. Dalším úkolem systému CompactRIO je měření význačných veličin, jež se vyskytují v pohonu vozidla. O měření a generování regulačních signálů se starají karty umístěné v šasi řídicího počítače. Například pomocí

čtveřice proudových analogových výstupů je předáván požadavek na moment do podřízených DSP procesorů, které pomocí vektorové regulace řídí momenty jednotlivých motorů PMSM.

Obrázek 5.1 znázorňuje architekturu řídicího počítače CompactRIO a její napojení na uživatelský počítač, respektive na pohon vozidla. Řídicí počítač je rozdělen na tři hlavní části, procesor pro výpočetní systém běžící v reálném čase, hradlové pole FPGA určené k paralelizaci časově kritických výpočtů a již zmíněné vstupně-výstupní karty starající se o vytváření číslicové reprezentace vstupních signálů, respektive o vytváření analogové reprezentace výstupních signálů. Vyjmenované hlavní části jsou navzájem propojeny tak, jak je naznačeno na obrázku 5.1. Pro bezproblémový chod celého systému bylo nutno vytvořit tři programové moduly v grafickém programovacím jazyku LabVIEW. Jedním z nich je program na uživatelském počítači, jenž jednak zajišťuje zpracování a grafickou reprezentaci naměřených dat, dále je určen pro ovládání řídicího systému. Uživatelský počítač fyzicky komunikuje s řídicím systémem prostřednictvím lokální sítě LAN. V operačním systému reálného času řídicího počítače potom běží druhý programový modul, ve kterém se nacházejí regulační algoritmy, a který si předává data mezi uživatelským počítačem a hradlovým polem FPGA. Předávání dat je mezi moduly řešeno pomocí datových streamů a síťových proměnných. V rámci jednotlivých programových modulů se pak data předávají a uchovávají pomocí nejrůznějších technik. Příkladem může být použití globálních, respektive lokálních proměnných, nebo datových front. Třetí programový modul je sestaven pro hradlové pole. Skládá se z jednotlivých oddělených smyček tak, aby každá smyčka mohla pracovat v rámci hradlového pole nezávisle na ostatních. Data jsou z hradlového pole předávána datovými clustery do programového modulu pro operační systém reálného času.



Obr. 5.1: Blokové schéma architektury nadřazeného řídicího počítače CompactRIO

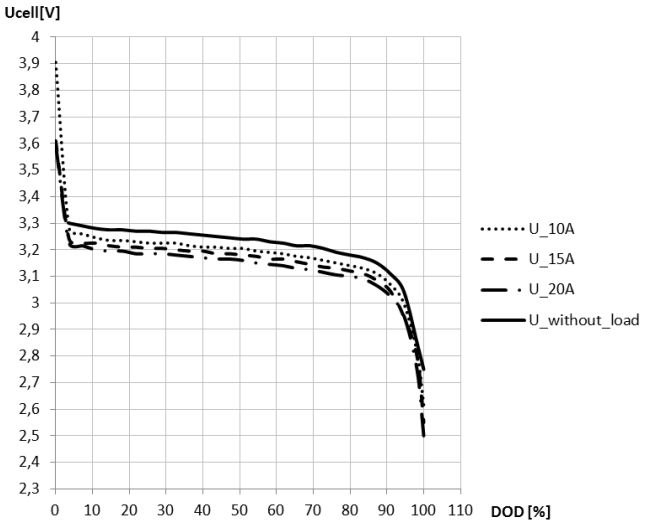
Regulační systém vozidla umožňuje uživateli použít dva základní režimy jízdy. Jedná se o manuální režim a automatické vedení vlaku. Pokud je zapnut manuální režim jízdy, tak je ovládání vozidla v kompetenci strojvedoucího, který vozidlo řídí prostřednictvím ovládacího pultu. V tomto režimu jízdy je žádanou hodnotou na silové páce poměrný tah v jízdě i brzdě. Pokud strojvedoucí silovou páku odpoutá ve směru od sebe, tak vozidlo táhne, v opačném případě se aktivuje elektrodynamická rekuperační brzda. Je-li vozidlo v klidu, tak může strojvedoucí měnit směr vozidla na ovládacím pultu. V manuálním režimu jízdy řídicí systém registruje veškeré proměnné potřebné pro pohon vozidla i pro měření a předává je do uživatelského počítače, kde dochází k jejich logování, respektive k vyobrazování na obrazovce. V případě, že je na uživatelském počítači navolen režim automatického vedení vlaku a je zvolena trať, tak vozidlo jede po uděleném souhlasu autonomně, bez zásahu strojvedoucího. V tomto režimu jízdy vozidlo jede na základě dat získaných z globálního pozičního systému GPS a z předem nastaveného rychlostního profilu tratě nebo nalogované manuální jízdy. Řídicí systém v tomto případě musí regulovat rychlost vozidla, pročež je do

softwaru zapracován regulátor rychlosti. Automatické vedení vlaku je výhodné použít při realizaci energetických měření, kde výrazně přispívá ke zvýšení opakovatelnosti měření.

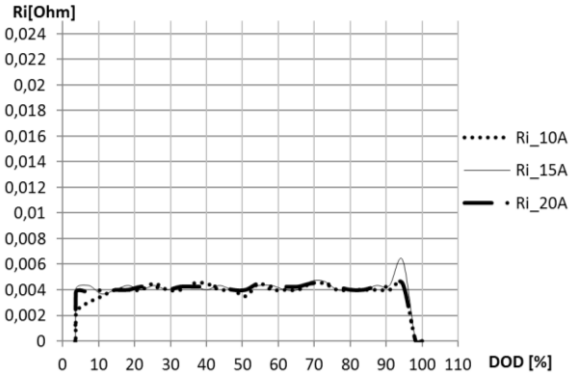
6 Prováděná měření na Li-ion článcích a bateriovém systému vozidla

Katalogové údaje konkrétního akumulátoru jednoznačně definují jeho vlastnosti za určitých podmínek. Tyto podmínky (pokud jsou uvedeny) většinou představují pouze omezenou množinu stavů, které mohou na vozidle během provozu nastat. Proto je nutno ověřit či dodatečně zjistit závislosti, které katalogové listy neobsahují. Ovšem, v laboratorních podmínkách je obtížné navodit většinu reálných provozních stavů, které mohou při provozu nastat.

Cílem laboratorního měření bylo testování vlastností Li-ion LFP článku Thunder Sky TS LFP40AHA. Jedná se o typického představitele technologie LFP se jmenovitou kapacitou 40Ah. Rozdílná kapacita článku v porovnání s kapacitou akumulátorové baterie experimentálního vozidla v případě testu nehrála roli – trend charakteristik předpokládáme stejný.



Obr. 6.1: Závislost napětí článku TS LFP40AHA na stupni vybití a vybíjecím proudu



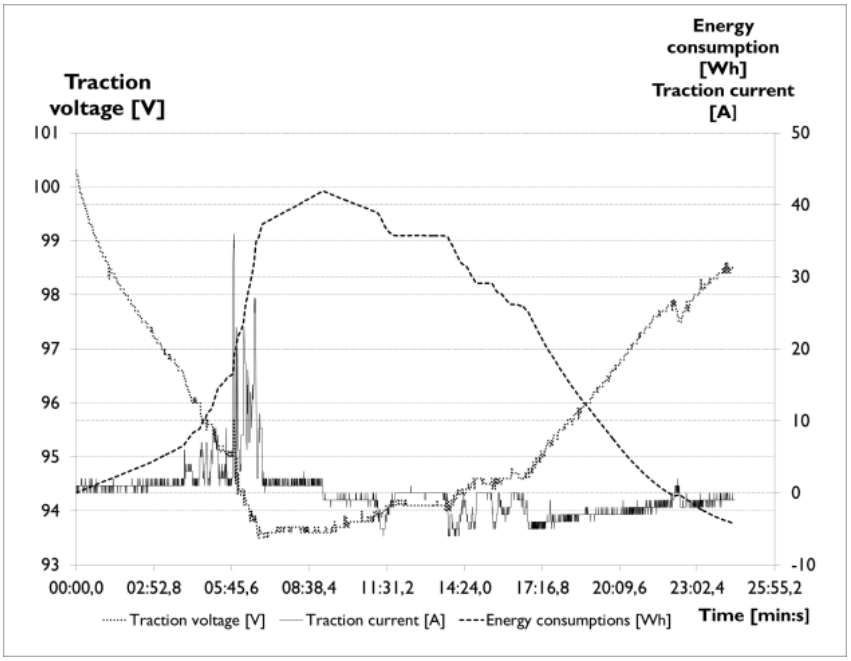
Obr. 6.2: Závislost vnitřního odporu článku SP-LFP40AHA na stupni vybití a vybíjecím proudu

Obrázek 6.1 znázorňuje trend vybíjecí charakteristiky pro různé hodnoty vybíjecích proudů. Z tvaru a polohy jednotlivých charakteristik je zřejmé, že přibližně 85% energie se nachází v lineární oblasti charakteristiky, tedy od hodnoty stavu vybití 5% do 90%. Svislý

posun charakteristik je dán úbytkem na vnitřním odporu článku a směrnice lineární části charakteristiky je pro různé proudy stejná.

Z obrázku 6.2 je patrné, že velikost vnitřního odporu je pro celé rozmezí hloubky vybití konstantní, stejně tak i závislost vnitřního odporu na různých vybíjecích proudech. Lze předpokládat, že v reálném provozu se hodnota vnitřního odporu bude měnit vlivem zvyšující se teploty článku. Počátek grafu od 0 – 5% DOD (depth of discharge) byl zatížen chybou při měření.

Další aktivity v testování Li-ion článků se již soustředí přímo na vozidlo a akumulátory SP-LFP100AHA. Testování akumulátorového systému přímo na vozidle se v současnou dobu nachází v první etapě – testování celého systému po funkční stránce. Na dalším obrázku jsou vyobrazena logovaná data systémem BMS experimentálního kolejového vozidla.



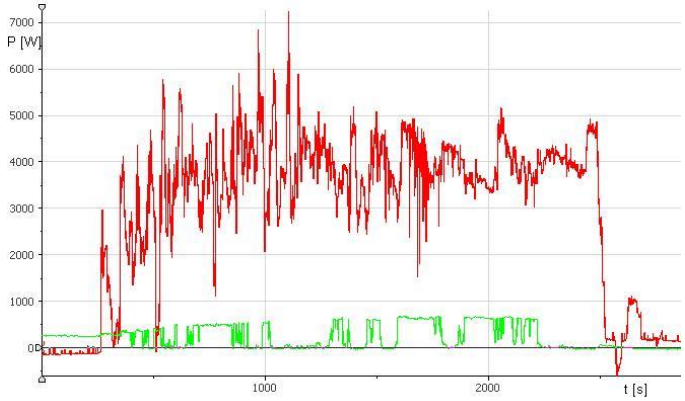
Obr. 6.3: Testovací jízda - energetické toky bateriovým systémem (současné dobíjení solárními panely)

Obrázek 6.3 znázorňuje základní závislosti energetických toků uvnitř bateriového systému vozidla. Před zahájením trakčního odběru dosahuje napětí trakce přes 100V. V případě proudového odběru trakčním pohonem napětí trakce klesá. Graf spotřeby energie indikuje spotřebovanou či rekuperovanou energii.

7 Prováděná měření na solárním napájecím systému

Během slunečného léta 2015 byla provedena sada zkušebních měření s cílem zjistit reálný výkon dodávaný solárními panely. Obrázek 7.1 ukazuje nalogovaná data, která byla pořízena během dvoukilometrové jízdy ve sklonu 30‰. Na tomto grafu představuje červená křivka výkon, který vozidlo spotřebovalo z trakční baterie, zelený průběh pak představuje výkon, který byl dodán solárním systémem. Maximální výkon odebraný z baterie se pohyboval okolo 7kW a maximální výkon z fotovoltaického generátoru dosahoval hodnoty okolo 0,7kW, což je zhruba jedna desetina z trakčního výkonu. Výkon solárních panelů není

dostatečně velký pro pohon celého vozidla, ale stačí pro napájení pomocných spotřeb, což je velice užitečné. Více informací ohledně solárních měření lze získat z literatury [3].



Obr. 7.1: Energetické toky během testování pohonu se solárním napájením

8 Plánované činnosti na bateriovém systému vozidla

V současné době se experimentální kolejové vozidlo nachází ve stavu plné provozuschopnosti s novým akumulátorovým systémem založeným na Li LFP akumulátorech. U vozidla proběhl test všech nabíjecích režimů, včetně zkušebního logování naměřených dat během režimu jízdy či nabíjení. Vozidlo poskytuje plnohodnotný základ pro rozsáhlou sérii měření parametrů a charakteristik akumulátorového systému. Mezi zamýšlené testy patří:

- Měření vybíjecích charakteristik Li akumulátorů
- Měření oteplovacích charakteristik
- Měření závislosti vnitřního odporu na teplotě, vybíjecím proudu a stupni vybití
- Měření velikosti ztrát na akumulátorech v závislosti na jízdním cyklu
- Měření poklesu kapacity (životnosti) po definované době testů.

Tyto všechny testy budou provedeny i na připravovaném akumulátorovém systému složeném z 24 kusů Li-pol KOKAM SLPB 25Ah.

9 Plánované činnosti na fotovoltaickém napájení

Provoz fotovoltaického systému během léta 2015 se osvědčil. Na jednom panelu bylo zprovozněno měření teploty – pracuje zcela správně. Mezi solárními panely je též nově namontován pyrometrický senzor měřící energii dopadajícího světla. Tento signál je připojen do řídícího počítače NI CompactRIO, ale signál je značně zarušený, což znamená, že nemůže být nyní použit pro relevantní měření. V tuto chvíli je třeba sestavit vhodný číslicový filtr pro odstranění rušení.

Z hlediska fotovoltaického systému jsou dále naplánovány následující činnosti:

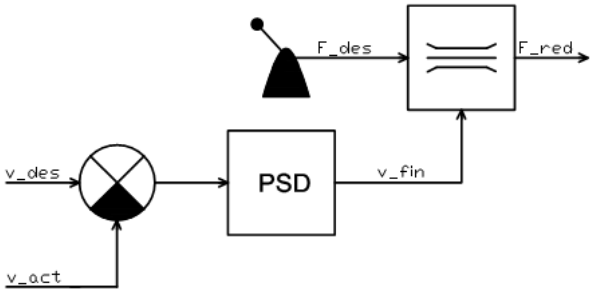
- Měření a statistické vyhodnocení množství energie dodané do systému v závislosti na sluneční energii a teplotě panelu.
- Měření a statistické vyhodnocení množství energie dodané do systému v závislosti na proběhu vozidla.

- Vypočet reálně uložené energie z fotovoltaiky a porovnání tohoto výpočtu s energií získanou pouze nabíjením z elektrické sítě.

Zmíněné testy budou provedeny na současných polykrystalických panelech a na čtveřici nových amorfních panelů typu SolarFrontier 160S s nominálním výstupním výkonem 160W. Závěrem bude velice zajímavé porovnání, protože tyto typy panelů se z hlediska výroby energie, která je u každého jinak závislá na úrovni dopadajícího světla, významně liší.

10 Plánované činnosti na řídicím systému

V současné době lze konstatovat, že řídicí systém pracuje dle požadavků a proto byl využit při každodenních energetických měřeních během léta 2015. Jedinou chybou je chování rychlostního regulátoru, který je stabilní, ale tažná síla generovaná tímto regulátorem v souladu se schématem na obrázku 8 velice kolísá, což způsobuje nestabilní spotřebu energie.



Obr. 10.1: Schéma regulátoru rychlosti

Jednou z možností, jak tento problém vyřešit, je použití korekčního regulátoru rychlosti. Jako první do něho bude vstupovat nalogovaná tažná síla pro dané místo na trati. Pokud dojde k vychýlení rychlosti z žádané hodnoty, tak zakročí regulátor a předem zadanou tažnou sílu zmodifikuje, čímž dojde ke stabilizaci průběhu tažné síly během jízdy. Lze očekávat, že takto dojde i k harmonizaci odběru elektrické energie z energetických zdrojů umístěných na vozidle.

11 Závěr

Již provedený výzkum a aktivity naplánované pro tento rok by měly potvrdit možnosti použití drážního vozidla napájeného z akumulátoru pro provoz na regionálních tratích, neboť současný provoz dieselelektrických vozidel se jeví být pro budoucí podobu železnice neudržitelným. Je zřejmé, že drážní vozidla napájená z akumulátoru by mohla být dobrým řešením, protože přímé provozní náklady budou ve srovnání s dieselelektrickými vozidly výrazně nižší. Integrace obnovitelných zdrojů energie přímo na vozidlo přispěje nemalou měrou ke zvýšení šetrnosti vůči životnímu prostředí.

12 Poděkování

Výzkum byl podpořen studentským grantem SGS Univerzity Pardubice.

13 Literatura

[1] DOLEČEK, R., ČERNÝ, O., MLYNAŘÍK, L., SÝKORA, P. Passenger Accumulator Fed Railcars in Regional Railway Traffic. In Transport Problems 2014. Katowice : Silesian University of Technology, 2014, s. 1-8. ISBN 978-83-935232-3-8.

[2] DOLEČEK, R., ČERNÝ, O., SÝKORA, P., PIDANIČ, J., NĚMEC, Z. The traction drive of the experimental rail vehicle. In Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on. Los Alamitos : IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2013, s. 650-654. ISBN 978-1-4673-6392-1.

[3] SÝKORA, P., NOVÁK, J. Research in Aarea of Photovoltaic Feeding of Light Railway Vehicle. In 6th International Scientific Conference: Conference Proceedings. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2015, s. 475-478. ISBN 978-80-7395-924-1.

[4] T. Lelek, O. Sadilek, R. Dolecek, L. Mlynarik, P. Sykora, "Dual source railway vehicles," In Proceedings of 25th International Conference Radioelektronika, RADIOELEKTRONIKA 2015. New York: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2015. s. 56. ISBN 978-147998117-5.

[5] Brandstetter P. and Skotnica M., "ANN Speed Controller for Induction Motor Drivewith Vector Control", International Review of Electrical Engineering - IREE, Vol. 6, No. 7, 2947-2954, 2011.

[6] Doleček, R., Novák, J., Černý, O. and Bartłomiejczyk, M., "Interference in Power system for traction drive with PMSM", PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Vol. 88, No. 9a, 204-207, 2012.

[7] MOHAN, Ned. Advanced electric drives: analysis, control, and modeling using MATLAB/Simulink. xvi, 180 pages. ISBN 9781118485484.

[8] DUNLOP, James P. Photovoltaic systems. 3rd ed. Orland Park, Illinois: American Technical Publishers, 2012, 502 s. ISBN 978-1-935941-05-7.

[9] V. Smil, Energy Myths and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate.American Enterprise Institute, Washington, DC, 2010. xiv + 213 pp.

[10] Y.Kono, N.Shiraki, H.Yokoyama, R.Furuta, Catenary and Storage Battery Hybrid System for Electric Railcar Series EV-E30: The 2014 International Power Electronics Conference, 2014.

[11] H. Hirose, K. Yoshida, K. Shibanuma, Development of Catenary and Storage Battery Hybrid Train System, ESARS 2012.

[12] I. Masatsuki, Development of the battery charging system for the new hybrid train that combines feeder line and the storage battery, The 2010 International Power Electronics Conference, 2010.

[13] S. Brown, Diagnosis of Lifetime Performance Degradation of Lithium-Ion Batteries: Focus on Power Assist Hybrid Electric Vehicle and Low-Earth-Orbit Satellite Applications. Stockholm, 2008. Doctoral Thesis. Applied Electrochemistry, School of Chemical Science and Engineering.

[14] J. Marcicki, Modeling, Parametrization, and Diagnostics for Lithium-ion Batteries with Automotive Applications. Ohio, 2012. Dissertation. The Ohio State University.