

OPONENTNÍ POSUDEK
disertační práce.

AKUMULAČNÍ SYSTÉM DRÁŽNÍCH VOZIDEL ZVYŠUJÍCÍ ENERGETICKOU
ÚČINNOST.

Ing. Luboš Streit
Západočeská univerzita v Plzni,
Fakulta elektrotechnická.

Posudek vypracoval: Prof. Ing. Zdeněk Čeřovský, DrSc.
ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická,
31. prosince 2013.

a) Zhodnocení významu disertační práce pro obor.

Disertační práce se zabývá akumulací elektrické energie na vozidlech pouličních drah, speciálně na tramvajích. Použití akumulčního členu umožňuje uložení kinetické energie vozidla při brzdění a její následné použití pro další trakci. Další využití akumulčního členu může přinést snížení energetických špičkových výkonů odebíraných z troleje a možnost pojezdu tramvaje v úsecích bez trolejového napájení. Jako akumulční člen schopný ukládat a vydávat elektrickou energii se uvažuje superkondenzátor. Úvodem je vyložen princip jeho činnosti a různé způsoby jeho zapojení v silovém trakčním obvodu.

Zaměření disertační práce je aktuální a práce je důležitá pro obor elektrických trakčních vozidel.

b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle.

Postup zvolený pro řešení disertace spočívá na vytvoření simulačního modelu vybraného akumulčního členu a na následném ověřování simulačního systému pomocí konkrétního měření na vozidle. Pro ověření simulací měl autor disertační práce možnost použít měření na tramvaji Škoda s asynchronními motory označované jako Škoda 03T. Trať na které byla měření provedena je tramvajová linka č.4 v Plzni spojující konečné stanice Bory a Košutku. Na této trati byly simulovány různé způsoby řízení akumulčního systému. Vlastní měření mělo dva cíle. Prvním byla stanovena reálná spotřeba elektrické energie. Druhým cílem bylo vyhodnotit měření tak, aby se upřesnily pravděpodobnosti s jakou může konkrétní tramvaj v konkrétním místě a čase rekuperovat energii. Tato pravděpodobnost je závislá na počtu tramvají v sekci, na době měření, na dnu v týdnu na poruchách dopravy a na dalších faktorech. Vyhodnocení možnosti reálné tramvaje rekuperovat je proto vyjadřováno pouze pravděpodobnostmi, že taková situace nastane. Přínosem měření je tuto pravděpodobnost upřesnit cestou vyhodnocení naměřených veličin.

Zvolený postup řešení je vtipný a je nutno vyzvednout jeho vazbu k realitě. Určené cíle byly dosaženy.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce.

Výsledky disertační práce vytvořily podklady pro ocenění výhodnosti akumulčního systému vzhledem k úsporám elektrické energie odebrané z troleje. Tyto výsledky závisí na mnoha podmínkách, které se mění kontinuálně za jízdy tramvaje. Proto jsou v práci vypracovány potřebné simulace na základě statických a pravděpodobnostních metod. Takto koncipované výsledky jsou sice do jisté míry přibližné, přesto jsou však objektivní a v případě velkých čísel směrodatné.

Výsledky disertační práce jsou původní a znamenají přínos pro rozhodování projektanta. Výsledky lze shrnout do závěrů platných pro sledovanou linku č. 4 v Plzni. Je poněkud překvapivé, že při rekuperaci energie do troleje v každém čase, kdy to je možné, dochází na jmenované lince k malému ničení energie v brzdných odporech. Podle měření v Tab.9 se v brzdných odporcích v průměru ničí pouze 2,1% až 3,6% energie spotřebované. Ke stejnému, dokonce nižšímu výsledku, to je nižší možné úspoře elektrické energie, dospívají také simulace provedené v disertační práci a uvedené na Obr. 51, 53, 55, 57 a v Tab. 20. Mimo aspekty čistě technické autor disertační práce bere v úvahu také otázky ekonomické. Dochází k závěru, že s ohledem na dobu návratnosti investice potřebné pro aplikaci akumulčního systému může být tato doba až několik desítek let (Obr.76). Je otázkou do jaké míry se tyto závěry týkají pouze linky č.4, na které byly získány. V každém případě tyto závěry podtrhují význam přímé rekuperace a nutnost pečlivé analýzy pro aplikaci akumulčních členů. Platnost závěrů je v úzké vazbě na časově proměnnou cenu elektrické energie. Závěry jsou pro projektantkou praxi významné.

d) Vyjádření k systematicce, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce.

Disertační práce má dobrou formální úpravu a dobrou jazykovou úroveň.

K disertační práci mám následující připomínky:

1. V simulacích rozběhu soustrojí, kterými se modeluje rozjíždějící se tramvaj (viz strany 30 a 31 obrázky Obr. 14 a 15) se simulují případy rozjezdu s konstantním urychlením. Urychlovací moment na hřídeli motoru je konstantní a odpovídající urychlující příkon motoru roste přímo úměrně s otáčkami. Ve stejnosměrném obvodu s konstantním napětím odpovídající urychlující proud narůstá také lineárně. Stoupají však nezanedbatelné ztráty mechanické, které se musí krýt dalším příkonem, tedy další složkou proudu. Tento přírůstek proudu kryjícího mechanické ztráty při nejvyšší rychlosti se jeví v obrázcích jako velikost proudu po dokončení rozběhu. Nárůst celkového proudu v čase musí být proto rychlejší než lineární. Ve výsledku simulace v grafu je však uveden pouze lineární průběh proudu s časem. Prosím o vysvětlení.
2. Výpočet ani definice četnosti výkonu troleje pro režim brzda i pohon na str. 48-52 a na Obr.26 nejsou jasně popsány. Výsledné četnosti byly zpracovány do grafů na Obr-27. Čitelnost těchto grafů je mizivá, i když pro lepší čitelnost byla vypočtená data normována v každé hladině výkonu dle maximální hodnoty. Grafy jsou vyneseny do os „výkon“ na ose y a „segment“ na ose x. Mají zobrazovat „četnost“, ale na žádné ose není veličina „četnost“ vynesena.
3. Obdobné platí pro Obr. 28 a 32. Hranice mezi křivkou P_{BR} a křivkou P_R v Obr. 32 není patrná. Na ose je vynesena čas v sekundách, ale jak dlouhý čas je na ose x zobrazen není vyznačeno.
4. V části „Ztráty ve vedení E_{VED} “ na str 71 se uvádí, že (cituji) „tramvaj vyhavená akumulčním systémem může snížit nejen ztráty v troleji způsobené pouze vlastním

odběrem, ale v případě přítomnosti druhé tramvaje v úseku může účinně snížit i ztráty způsobené odběrem právě této druhé tramvaje. Následující rovnice ukazují názorný příklad*. Mají to ukázat rovnice (23) až (26) na str. 72. Rovnice (26) má údajně vyjadřovat rozdíl ztrát mezi ztrátami při rozjezdu obou tramvají bez akumulárního systému oproti ztrátám, že tramvaj T_1 je vybavena akumulárním systémem, který byl schopen její odebíraný rozjezdový proud plně hradit. Rovnice (26) však takový rozdíl nevyjadřuje. V případě, že se tramvaj T_1 rozjíždí proudem svého akumulárního systému, pak vlastně žádný proud z troleje neodebírání a z hlediska ztrát v troleji zůstává jen rozjezdový proud tramvaje T_2 . Ztráty tramvaje T_2 zůstávají a nebyly sníženy. Výsledek je v rozporu s tvrzením na začátku úvahy.

5. Termín používaný na Obr 51 „snížena rekuperace na 0%“ je nejasný. Může znamenat, že se celá kinetická energie při brzdění ukládá do akumulárního systému, nebo, že se pálí v odporu. V obou případech nenastává rekuperace.

Vzhledem k tomu, že pojem četnosti výkonu je podstatnou částí disertační práce, byla by přehlednost práce zvýšena, kdyby tyto pojmy a jejich grafické znázornění byly v práci od samého začátku jasněji čtenáři zpřístupněny.

e) Vyjádření k publikacím autora disertační práce.

Autor posuzované disertační práce publikoval ve spolupráci se svými spolupracovníky velkou řadu publikací umístěných v časopisech, kapitola v knize a na mezinárodních konferencích stejně jako na českých konferencích. Témata těchto prací mají úzký vztah k tématu disertační práce. Publikované práce odpovídají nárokům na obhajobu disertační práce.

Disertační práci doporučuji k obhajobě.



Prof. Ing. Zdeněk Čeřovský, DrSc.

Oponentní posudek disertační práce Ing. Luboše Streita

„AKUMULAČNÍ SYSTÉM DRÁŽNÍCH VOZIDEL ZVYŠUJÍCÍ ENERGETICKOU ÚČINNOST“

Námět práce z části odpovídá oboru disertace „Elektronika“. Téma disertační práce se snaží přinést nové pohledy na způsob použití superkapacitorů v tramvajové trakci. Práce se také tematicky dotýká kybernetiky a elektroenergetiky.

Zvolené téma je velmi žádané z pohledu aplikovaného výzkumu. Autor ukazuje možný přístup k uplatnění superkapacitorů (SC) v tramvajích a strategii řízení energetického akumulčního systému. Tato problematika je v současné době v popředí zájmů všech výzkumných pracovišť a praxe zabývajících se elektromobilitou.

Práce je v souladu se současným stavem poznání.

Hlavní osnova disertace je přehledná a správná. Cíle práce jsou v úvodu jasně vymezeny. Práce předkládá pouze jednu nosnou problematiku a tou je návrh energetického akumulčního systému tramvaje. Disertant provedl názorný přehled současného stavu. Podařilo se mu dobře vystihnout podstatu problému.

Práce je velmi kvalitně zpracována.

Zbytečně detailní členění kapitol činí práci místy nepřehlednou. Další strukturování dílčích kapitol 5.3, 6.5 a 6.7 rozděluje text na příliš krátké úseky. Orientaci v textu ztěžuje postupné číslování obrázků a rovnic (bez přiřazení k jednotlivým kapitolám).

Formální nepřesnosti a překlepy se vyskytují výjimečně. Grafické zpracování je na dobré úrovni. Je možné nalézt jen drobné odchylky od běžně používaných standardů, jako je například nepoužití kurzívy ve skalárních symbolech (str. 9).

Teoretická část (kapitola 2) zabývající se problematikou SC dává obecný přehled, který nepřekračuje rámec běžně dostupných katalogových údajů. Autor pro klasifikaci parametrů SC používá pouze termín napětí (str. 18). Pravděpodobně tím myslí termín *jmenovité napětí*. Nelze souhlasit s neurčitým tvrzením, že napětí (asi jmenovité) na jednom článku je kolem 2V (ve skutečnosti je 1,5-3V podle technologie výroby SC) a s konstatovanou hodnotou vnitřního odporu (v současné době je R_i již na úrovni 1m Ω).

SC o kapacitě 83 F a jmenovitém napětí 48V je v praxi nereálný, pravděpodobně se jedná o baterii SC (str. 19). Obrázku 2 (str. 19) chybí přesný popis jednotlivých (frekvenčně závislých) parametrů náhradního obvodu článku SC. Z grafu na obr. 3 není jasný typ technologie SC a hlavně není zřejmá hodnota jmenovitého napětí.

Kapitola 3 zabývající se systémy akumulace energie vysvětluje stručně a přehledně základní principy. Za jeden z dílčích přínosů práce je možné považovat kapitolu 3.2, která ověřuje na funkčním modelu s asynchronním motorem konkrétní systém akumulace energie pomocí baterie SC.

V kapitole 4 jsou uvedeny podmínky pro měření na tramvajové lince v Plzni. Tato kapitola by si zasluhovala detailnější kinematický rozbor z hlediska rozdělení zdrojů a spotřebičů mechanické energie. Nejsou zřejmé podíly (rozdílná účinnost) kinetické a polohové energie v rekuperaci a ve spotřebě. Použití barometrického snímače pro určení polohy tramvaje na lince je sporné zejména v úsecích s malým převýšením (str. 42).

Obrázky 27 (str. 51) jsou nečitelné s nízkou vypovídací hodnotou.

Hlavním přínosem doktoranda jsou kapitoly 5 a 6 (Simulační model tramvaje a Strategie řízení akumulčního systému). Přístup k řešení je unikátní a je možné tyto kapitoly považovat za originální.

Simulační model tramvaje používá zjednodušující předpoklady. Například součinitel rotačních částí je uveden jako 1,2 bez dalšího zdůvodnění. Zcela je zanedbán součinitel odporu vzduchu. Jak byl stanoven empirický vztah s konstantou 44? Chybí i momentové charakteristiky motorů, ze kterých se vychází při výpočtu dostupné tažné síly.

Jako příklad pro ověření výsledků simulací (str. 81) je použit modul s poměrně nízkým napětím vzhledem k nominálnímu napětí na troleji, tím pádem bude menší poměr uložené energie. V této části práce (str. 82) je správně zmíněn a rozebrán vliv teploty na činnost SC, ale chybí bližší specifikace činnosti tepelné ochrany a jak bude SC provozován při vyšších provozních teplotách.

K výsledkům práce se pak nabízí následující diskuze: Není zcela zřejmé kolik nabíjecích/vybíjecích cyklů připadá na jednu jízdu. Z textu na str. 83 vyplývá, že tramvaj na lince akceleruje a brzdí 46x. Z textu a z obrázku na str. 103 vychází, že na celou trasu bude potřeba 8-10 cyklů. SC mají životnost milion cyklů do 10 let při pokojové teplotě, potom vychází asi 273 cyklů denně, což odpovídá 30 jízdám. Jaká bude reálná životnost SC?

Otázky k obhajobě:

1. Jak je definováno jmenovité napětí SC?
2. Je možné, aby reálná životnost SC baterií v mobilních prostředcích byla větší jak 10 let s ohledem na provozní teplotní podmínky?
3. Je opravdu měření polohy tramvaje pomocí barometrického snímače přesnější než GPS?
4. Jaká je závislost uložené energie SC na napětí SC modulu?
5. Při jaké teplotě bude reagovat teplotní ochrana a jak bude omezen proudový režim?

Doktorandovi se podařilo přinést nový pohled na simulaci energetické účinnosti tramvaje a strategii řízení akumulčního systému se superkondenzátorovými moduly v městském tramvajovém provozu.

Hlavní myšlenky této práce byly publikované na kvalitních mezinárodních konferencích a jsou uvedeny v prestižních sbornících. Velký počet příspěvků s více spoluautory a přílišná podoba témat článků navozuje dojem účelovosti těchto publikací a snižuje kvalitu prezentace špičkových výsledků pracoviště.

Z přehledu odborné činnosti uchazeče je zřejmé, že se jedná o pracovníka s dobrou vědeckou erudicí, silným experimentálním základem.

Doporučuji uvedenou práci k obhajobě a bude-li práce úspěšně obhájena, k následnému udělení akademického titulu Ph.D. panu Ing. Luboši Streitovi

V Liberci 2. 2. 2014



Prof. Ing. Aleš Richter, CSc.
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Technická univerzita v Liberci

Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

OPONENTNÍ POSUDEK
doktorské disertační práce pana Ing. Luboše Streita
„Akumulační systém drážních vozidel zvyšující energetickou účinnost“

1) Věcné hodnocení disertační práce, stanovisko k výsledkům

Disertační práce je věnována problematice úspory elektrické energie na tramvajové lince při nasazení vhodného akumulčního systému s optimálním způsobem řízení jeho energetické bilance (mobilní systém nasazený ve vozidlech). Jako akumulční prvek byl vybrán superkondenzátor, jehož popisu je věnována kapitola 2. Zde by možná bylo vhodné také provedení konfrontace s akumulátory LiFePO₄, které jsou dnes již pro tuto aplikaci také možné.

Kapitola 3 popisuje možná uspořádání akumulčního systému se superkondenzátorem a obsahuje názorné a srozumitelné simulace.

Stěžejní část práce začíná v kap. 4 věnované tvorbě statistického modelu tramvajové linky č.4 v Plzni. Model využívá reálná data zjištěná měření. Použitý přístup je skutečně originální, v práci je vysvětleno sestavení jednotlivých rozložení pravděpodobností a dalších závislostí. Ačkoliv výsledky vypadají jednoduše (a v textu není mnoho složitých matematických postupů), při podrobnějším zamyšlení je zřejmé, že vedle vlastní invence musel autor vynaložit obrovské množství práce a musel hojně využívat různé softwarové podpůrné prostředky. Práce vždy uvádí dosažené výsledky, vlastní postup jejich získávání je také vysvětlen. Možná by bylo zajímavé podrobné dokumentování pracovního procesu nalezení výsledků (výpisy programů, popř. popisy použitých software atd.), avšak pro účel práce to nutné jistě není.

Kapitola 5 se věnuje sestavení simulačního modelu tramvaje s vestavěným akumulčním systémem. Jedná se také o cennou kapitolu svědčící o správném fyzikálním vhladu autora do problematiky.

Kapitola 6 je vyvrcholením práce, popisuje totiž způsoby řízení energetické bilance akumulčního systému. Je zde popsáno několik strategií řízení a jsou porovnány výsledky při aplikaci na konkrétní tramvajovou linku simulovanou v kap. 4. Kapitola přináší cenné výsledky a je skutečně přínosem práce.

V rozboru řídicích strategií však nebyla analyzována následující jednoduchá varianta: Regulace změn proudu odebíraného tramvajemi z troleje na nulovou hodnotu tj. jakési vyhlazování proudu troleje (skutečná hodnota regulované veličiny by byla tedy derivace proudu z troleje podle času a žádaná hodnota nula). Nadřazenou regulační smyčkou by pak bylo nastavováno napětí superkondenzátoru nepřímou úměrou rychlosti (nadřazená smyčka dostatečně pomalá, prioritu má vyhlazení proudu z troleje). Pro krytí středního výkonu je důležitá hodnota střední (trolej je teoreticky zdroj konstantního napětí), ta by se nezměnila oproti tramvajím bez akumulčního systému. Ovšem díky odstranění krátkodobých špiček

proudu troleje obou polarit by klesla jeho dlouhodobá efektivní hodnota a tedy ztráty v trolejovém vedení, které sám autor uvádí jako velmi podstatné. Rád bych vyzval autora práce o krátkou diskusi na toto téma při obhajobě (viz dotaz níže).

2) *Formální hodnocení*

Práce je sepsána velmi pečlivě a srozumitelně. Vysoká stylistická úroveň práce plně odpovídá nárokům na vědeckou práci. Z textu je patrná inteligence, tvořivý potenciál a výstižnost autorova vyjadřování. Rovněž kvalita obrázků je velmi dobrá. Autor se v práci vyjadřuje konkrétně a věcně. Po formální stránce je práce na velmi vysoké úrovni.

3) *Dotazy*

- Mohl byste orientačně posoudit výhodnost popř. nevýhodnost strategie řízení akumulčního prvku nastíněné v tomto posudku ve věcném hodnocení (regulace časové změny proudu odebíraného z troleje na nulovou hodnotu) ve srovnání s předloženými strategiemi?
- Vysvětlíte prosím význam spodního vstupu do PI regulátoru na Obr. 36 (signál vedoucí z bloku „Poloha začátku brzdění“).
- Ze závěru práce jasně plyne, že není možné stanovit univerzální strategii řízení energie akumulčního systému tak, aby byla optimální pro různé dopravní situace (počet tramvají v napájecím úseku), různou techniku jízdy a zejména různý výškový profil trati s různým rozmístěním zastávek. Nebylo by možné pro vybranou analyzovanou linku č.4 navrhnout konkrétní optimální strategii řízení měniče pro superkondenzátor (podle aktuální polohy tramvaje na trati, denní doby atd.) spolu s doporučenou technikou jízdy (výběhy, doporučený rychlostní profil, místa začátku brzdění, atd.) bez použití fuzzy regulátoru a diferenciální evoluce?
- Akumulátory LiFePO₄ dosahují až 15krát vyšší hmotnostní hustoty výkonu než superkondenzátory, přitom mají také velmi nízký vnitřní odpor (dovolené trvalé vybíjecí a nabíjecí proudy až 30ti-násobek hodnoty kapacity) a jsou levnější. Kromě toho nevykazují nepříjemnou lineární závislost napětí na aktuálním náboji jako kondenzátory. Uvažujete také o jejich použití?
- Jak bude v dalším vývoji zohledněna praktická nutnost projíždět napájecí sekční uzly bez proudu sběrače? (Dnes bez akumulčního systému stačí, aby řidič „sundal nohu z jízdy“.)

4) *Posouzení publikační činnosti autora*

Ing. Luboš Streit je autorem nebo spoluautorem velkého množství odborných článků (v zahraničním časopise, na hraničních konferencích, na tuzemských odborných fórech), v nichž bylo jádro práce na patřičné úrovni publikováno.

5) *Význam disertační práce pro obor*

Provedené rozborů, navržené simulační modely a závěry simulací přináší užitečné informace do problematiky úspor elektrické energie v provozu sítě vozidel závislé elektrické trakce (tramvaje, trolejbusy). Souhlasím s hlavními přínosy práce uvedenými v kap. 7.1:

- a) matematický pravděpodobnostní model tramvaje na konkrétní lince
- b) navržená strategie řízení energetické bilance akumulčního systému s přizpůsobením dané trati
- c) posouzení efektivity nasazení akumulčního systému při různé míře rekuperace

Pokládám tyto výsledky za cenné. Z praktického hlediska je možná škoda, že nebyl systém realizován ve výkonové podobě pro skutečné nasazení do pokusné tramvaje. Pro splnění vytčených cílů práce by to ovšem užitečné nebylo - výsledky celkové úspory (se započtením ztrát v troleji atd.) by se nedaly vyhodnotit, pokud by nebyla systémem vybavena většina tramvajů na zkoumané lince.

Poněkud problematická je myšlenka „SMART GRID“ zmiňovaná v kap. 7.2 v souvislosti s dalším směrem výzkumu. Sofistikovaná strategie řízení aktuálních odběrů a dodávek distribuční sítě pomocí složitých propojených inteligentních systémů je prosazována Německem jako řešení obrovských potíží vznikajících nyní masivním nasazením volatelných obnovitelných zdrojů. Takové řešení má však řadu nevýhod a obrovských technických rizik. Navzdory modernosti „mantry“ SMART GRID se nedomnívám, že se jedná o rozumný směr. Jde však spíše o intuici, pro tvrzení nemám konkrétní přesvědčivé důkazy. Chápu, že jde o moderní diskutované téma a práce se ho tedy snaží také dotknout.

Na základě výše uvedeného věcného i formálního hodnocení práci jednoznačně doporučuji k obhajobě a doporučuji udělení titulu „doktor“ jejímu autorovi.

V Brně, dne 22.12. 2013.


Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.