

SIMULAČNÍ MODEL DVOUNAPRAVOVÉ HYBRIDNÍ POSUNOVACÍ LOKOMOTIVY

SIMULATION MODEL OF TWO-AXLE HYBRID SHUNTING LOCOMOTIVE

Václav Lenoč¹, Zdeněk Mašek²

Abstrakt

Článek popisuje simulační SW vytvořený v prostředí MATLAB Simulink pro analýzu energetických toků v trakčním pohonu lokomotiv s diesel-elektrickým přenosem. Výsledky simulací porovnávají konvenční vozidlo s hybridním vozidlem na předem nadefinovaných pracovních cyklech, zaměřené na obsluhu vleček a manipulace s vozy. Cílem simulací bylo ověření vhodné strategie řízení a dimenzování pohonného řetězce pro dosažení efektivního využití vozidla, tím snížení provozních nákladů.

Klíčová slova

Lokomotiva, posunovací, simulační, SW, hybridní, pohon, tok energie, účinnost, strategie, řízení, diesel, elektrický, akumulátor.

Abstract

The paper describes simulation software developed in MATLAB Simulink for analysis of energy flows in the traction drive locomotives with diesel-electric transmission. The simulation results of hybrid vehicle are compared with conventional vehicle on predefined work cycles (sidings and handling of cars). The aim of the simulations was to verify the suitable control strategy and dimensioning of the drive chain in order to achieve effective utilization of the vehicle, thereby reducing operating costs.

Keywords

locomotive; shunting; simulation; SW; hybrid; drive; energy flow; efficiency; strategy; management; diesel; electric; battery.

1 ÚVOD

Článek vznikl na základě projektu „Hybridní lokomotiva a elektronická optimalizace energetiky jejího provozu“. Hlavním řešitelem projektu je CZ LOKO a.s., MSV elektronika a Univerzita Pardubice. Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky (dále jen KEEZ) na DFJP UPCE. Zabývá se problematikou hybridních pohonů aplikovaných na kolejových vozidlech, simulačními výpočty zaměřenými na stanovení energetické náročnosti vozidla pro stanovenou trať nebo typ provozu a porovnávání energetické náročnosti různých řešení pohonu.

Cílem projektu je návrh a stavba dvounápravové hybridní posunovací lokomotivy. Model dvounápravové hybridní posunovací lokomotivy vychází z klasické koncepce diezelektrické

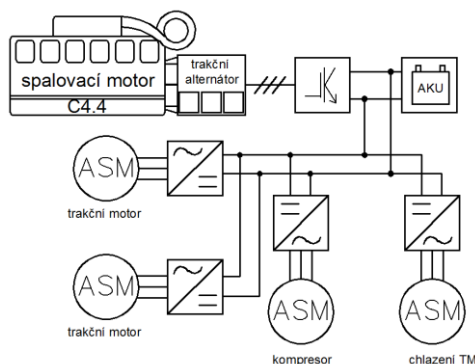
¹ Ing. Václav Lenoč, Ph.D., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Doubravice 41, 533 53 Pardubice. Tel.: +420 466 036 403, e-mail: vaclav.lenoch@upce.cz

² Ing. Zdeněk Mašek, Ph.D., Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Výukové a výzkumné centrum v dopravě, Doubravice 41, 533 53 Pardubice. Tel.: +420 466 036 403, e-mail: zdenek.masek@upce.cz

posunovací lokomotivy. Tento postup umožňuje porovnání dvou posunovacích vozidel nezávislé trakce srovnatelných parametrů s rozdílnou koncepcí pohonu a strategií řízení. Na základě těchto skutečností je možné zhodnotit přínosy hybridizace dvounápravové posunovací lokomotivy.

Hybridní varianta dvounápravové lokomotivy o hmotnosti 40 t je odvozena z konvenční posunovací lokomotivy. Konvenční posunovací lokomotivu pohání spalovací motor od firmy Caterpillar, jedná se o typ C15, který disponuje maximálním výkonem 403 kW. Spalovací motor je přes spojku připojen k synchronnímu trakčnímu generátoru od firmy SIEMENS, napětí je následně usměrněno diodovým usměrňovačem. Ze stejnosměrného meziobvodu jsou napájeny dva trakční měniče, každý napájí jeden asynchronní trakční motor.

V případě navrhované hybridní varianty je uvažována záměna spalovacího motoru C15 za Caterpillar C4.4. Spalovací motor disponuje maximálním výkonem 129 kW. Snížením výkonu došlo i ke snížení zástavbových rozměrů a hmotnosti agregátu. Stejně tak je navrhován adekvátní trakční alternátor, kde pro hybridní variantu je počítáno se synchronním alternátorem s permanentními magnety, který má menší zástavbové rozměry a odpadá buzení. Tato koncepce, je zobrazena na následujícím obrázku, ovšem požaduje místo diodového usměrňovače řízený usměrňovač. Zbylý prostor po zástavbě menšího diesel generátoru je prostorem dostupným pro instalaci akumulátorů. Umístění akumulátoru je přímo do meziobvodu bez použití měniče, který snižuje účinnost pohonného řetězce. V návrhu není zobrazen pomocný pohon chlazení spalovacího motoru, ten je u typu motoru C4.4 poháněn řemenem.



Obr. 1 Návrh koncepce hybridní posunovací lokomotivy

2 STRUKTURA SIMULAČNÍHO MODELU

Po navržení koncepce hybridního vozidla bylo nutné ověřit přínos v porovnání s konvenčním vozidlem. Dále je nutné ověřit, zda navrhovaná kapacita akumulátoru a snížení výkonu spalovacího motoru dokáže plnit srovnatelné požadavky s konvenčním vozidlem. Simulační SW umožňuje sledování účinnosti jednotlivých komponent a toků trakčního řetězce vozidla. Touto analýzou je možné odhalit slabá místa ještě neexistujícího vozidla ve fázi návrhu.

Pro vytvoření simulačního SW byl zvolen program MATLAB Simulink. Základní simulační program je vytvořen v prostředí Simulink, kde blokové schéma je zobrazeno na Obr. 2. Každý komponent je tvořen blokem, který je parametrizován pomocí skriptu. Při inicializaci jsou nastaveny jednotlivé proměnné a vypočteny dílčí výpočty, které je zapotřebí vypočítat po spuštění simulačního SW. Po ukončení simulace jsou veškerá nalogovaná data uložena do Workspace v Matlabu.



Obr. 3 Akumulátor 105E 10,5 kWh 60NMC-2P24S od firmy Kokam [5]

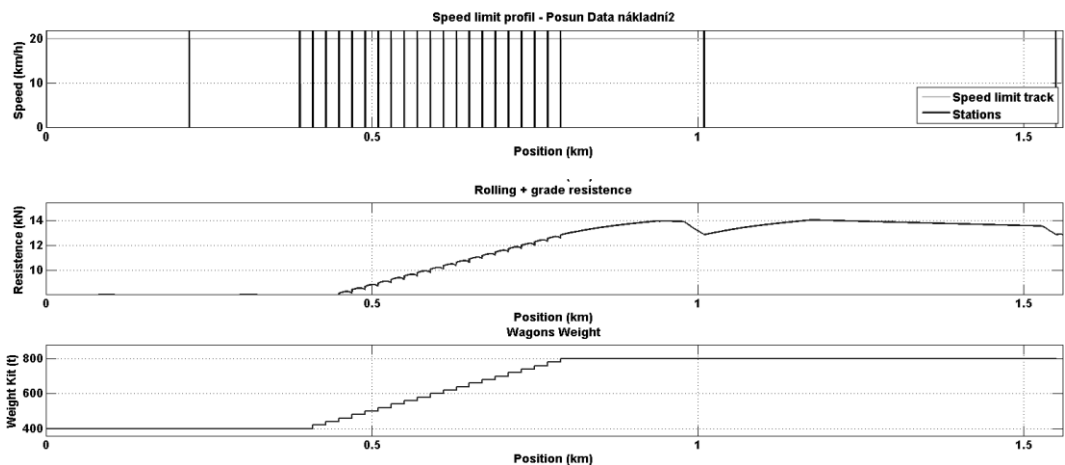
Konfigurace modulu pro hybridní posunovací lokomotivu bylo dle napětí stanoveno na 11 modulů. Při stanoveném počtu je dosaženo jmenovitého napětí 965,8 V, hmotnosti 825 kg a kapacity 115,5 kWh. Na základě hmotnosti vychází, že by vozidlo mohlo disponovat dvěma paralelními větvemi a však vzhledem k zástavbovým rozměrům je limitní počet jedenácti EV packů.

Při uvažovaném trvalém vybiřecím výkonu 4C, je konfigurace schopna dodat trvalý výkon 462 kW. Dostupný výkon je vyšší než u konvenčního vozidla. Vzhledem ke skutečnosti, že vozidlo disponuje výkonem trakčních motorů 2x 366 kW, je pohon dostatečně předdimenzován.

4 SIMULACE

Pro adekvátní porovnání konvenčního a hybridního pohonu vozidla, bylo nutné nespecifikovat odpovídající pracovní cykly. Jednotlivé pracovní cykly obsahují jak obsluhu nákladních vozů během nakládání, tak i obsluhu osobních vozů. Níže je zobrazen přehled simulovaných pracovních cyklů a jejich základní charakteristika. Charakter pracovního cyklu obsahuje celkovou délku příslušné simulace, maximální sklon na trati a největší hmotnost manipulovaného nákladu.

- nakladni1 1,93 km, 0 ‰, 480 t
- nakladni2 1,56 km, 0 ‰, 1620 t
- nakladni3 1,56 km, 0 ‰, 1620 t
- osobni1 1,50 km, 0 ‰, 320 t
- osobni2 1,91 km, 0 ‰, 200 t
- osobni3 10 km, 0 ‰, 360 t
- vleckovy1 13,51 km, -20 +16‰, 620 t

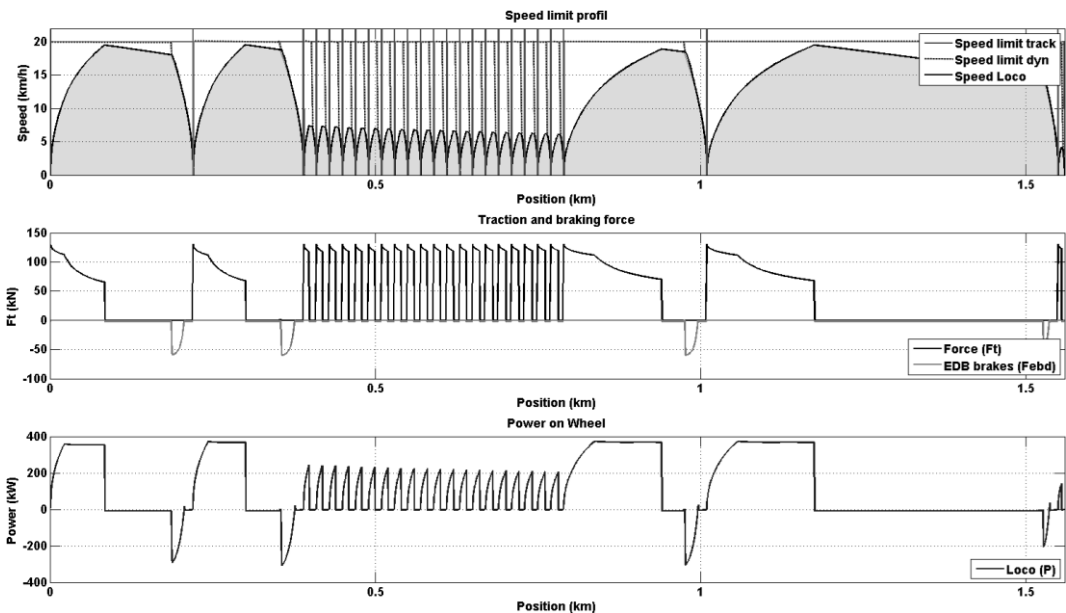


Obr. 4 Pracovní cyklus nákladní2

Obr. 4 obsahuje zobrazení pracovního cyklu nákladní2. Na horizontální ose je vzdálenost v km, kde je u prvního grafu šedou zobrazena maximální rychlost v daném místě. Svislé černé čáry značí místa zastavení vozidla. Jednotlivá místa zastavení mají nadefinován čas pobytu vozidla v daném místě. Druhý graf zobrazuje jízdní odpory, ty jsou závislé na hmotnosti taženého nákladu a rychlosti. Třetí graf zobrazuje hmotnost nákladu pro manipulaci mezi místy zastavení.

Při analyzování energetických toků je nutné uvažovat i pomocnou spotřebu, ta zahrnujeme chlazení spalovacího motoru (5 kW), chlazení trakčních motorů (10 kW), pohon kompresoru (15,1 kW) a ostatní spotřeba (7 kW). Pomocná spotřeba tvoří značný podíl odebíraného výkonu při uvažovaném výkonu spalovacího motoru 129 kW. Nezbytné je při simulacích zohlednit i skutečnost, že maximální hodnota odebíraného výkonu není trvalé odebíraná, ale mění se v návaznosti na spínání kompresoru a požadavků na chlazení trakčních motorů včetně spalovacího motoru.

Na začátku simulací bylo nutné nadefinovat strategii řízení. Strategie řízení značně ovlivňuje spotřebu pohonných hmot. Jednou z uvažovaných strategií řízení byla preference spalovacího motoru, kdy při požadavku na větší výkon akumulátor dodává rozdíl. Uvažována byla součinnost akumulátoru se spalovacím motorem, kdy při požadavku na větší výkon, než je dostupný z akumulátoru, je startován spalovací motor. Posledním uvažovaným způsobem řízení je preference akumulátoru, kdy spalovací motor slouží jako generátor při poklesu energie akumulátoru pod stanovenou mez (50%). Z provedených simulací a porovnání strategií řízení, nejlepších výsledků dosáhla poslední zmiňovaná strategie. Je to dáno především aspektem, že při posunovací službě převážnou část času je spalovací motor ve volnoběžných otáčkách, které nejsou efektivní. Při poklesu kapacity akumulátoru pod stanovenou mez, se startuje spalovací agregát, který pracuje v ideálním pracovním bodě. Tímto způsobem dochází k eliminaci času strávených ve volnoběžných otáčkách a kolísání požadavku na výkon.

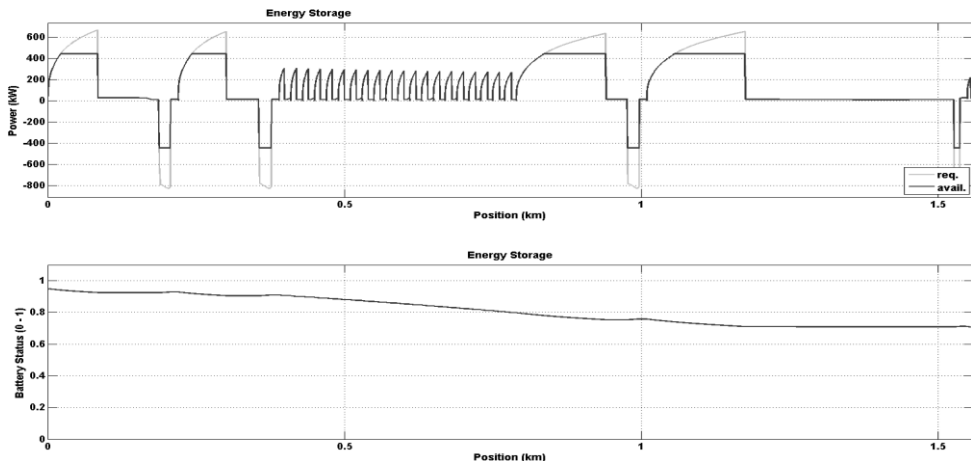


Obr. 5 Výsledky simulace pracovního cyklu nákladní2

Obrázky č. 5 a 6 zobrazují vybrané výsledky simulace hybridní posunovací lokomotivy. Obr. 5 zachycuje základní parametry vozidla, kde v horní části se nachází rychlostní profil. Černý průběh zobrazuje skutečnou rychlost vozidla. Po akceleraci vozidla a dosažení limitu rychlosti (20 km/h), vozidlo přechází do výběhu, následně vozidlo přechází do rekuperačního brždění. Druhý graf zachycuje průběh tažné síly (černý), zde je možné pozorovat omezení tažné síly od adheze a

následně trakční hyperboly. Zelený průběh označený EDB značí brzdovou sílu, která je zmařena na brzdovém rezistoru. Poslední graf zobrazuje průběh výkonu na obvodu kola.

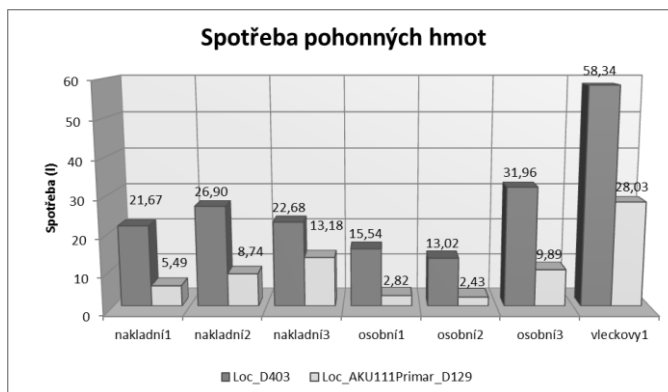
Obr. 6 zobrazuje vybrané veličiny akumulátoru. Horní část obsahuje dva průběhy výkonu. Světlý průběh zobrazuje požadavek na výstupní výkon akumulátoru, který je požadován pohonným řetězcem a pomocnou spotřebou. Hodnota požadovaného výkonu přesahuje hodnotu 600 kW. Akumulátor vypočte maximální dostupný výkon, který je schopen dodat. Tento dostupný výkon je zobrazen tmavým průběhem. Zde je možné vidět, že nad hodnotu cca 400 kW dochází k omezení dostupného výkonu. Dolní graf zobrazuje stav nabití akumulátoru, zde je možné si povšimnout, že akumulátor na počátku simulace nebyl inicializován hodnotou 100 %. Pracovním cyklem došlo k poklesu energie v akumulátoru na 70 %. Ze simulace je možné uvažovat, že tento cyklus by bylo možné třikrát opakovat bez nutnosti startování spalovacího motoru, či nabíjení akumulátorů. V případě uvedeného pracovního cyklu nákladní2 je na konci cyklu nabíjen akumulátor spalovacím motorem, kde pro nabití na počáteční hodnotu trvá 16,5 minuty. Čas potřebný pro nabíjení akumulátoru, není možné pozorovat vzhledem k tomu, že na ose x je uvedená dráha v km.



Obr. 6 Výsledky simulace akumulátoru pracovního cyklu nákladní2

5 VÝSLEDKY SIMULACE

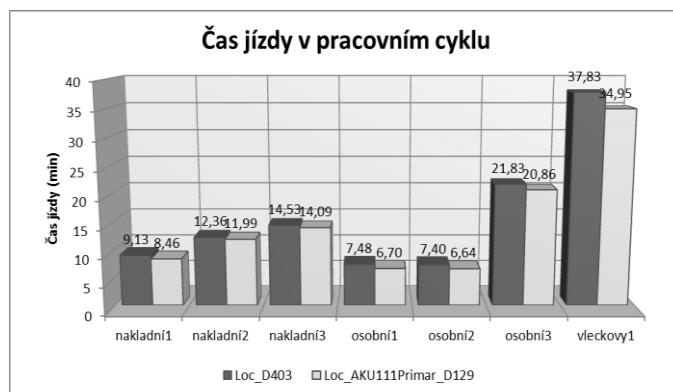
Výsledky simulace jsou porovnány ve dvou aspektech dle spotřeby pohonných hmot a času jízdy vozidla. Pro potřeby porovnání rozdílných vozidel bylo nutné u simulace hybridního vozidla



Obr. 7 Spotřeba pohonných hmot

vždy na konci pracovního cyklu nabít akumulátor pomocí spalovacího motoru na počáteční hodnotu nabití akumulátoru. Tím je možné provádět porovnání dle spotřeby pohonných hmot při preferování pohonu pomocí akumulátoru.

Tmavé sloupce náleží konvenčnímu vozidlu pouze se spalovacím motorem, světlé potom hybridnímu vozidlu. Na horizontální ose se nachází sedm simulovaných pracovních cyklů. Při porovnání je rozdíl spotřeby pohonných hmot jednoznačný. Porovnání časů jízdy vozidla je značně vyrovnané a v některých režimech dosahuje lepších výsledků.



Obr. 8 Čas jízdy v pracovním cyklu

6 ZÁVĚR

Simulační SW ve fázi návrhu hybridní posunovací lokomotivy umožnilo hledání nejvíce omezujícího komponentu v pohonném řetězci a tím případnou koncepci vozidel přepracovat. Na základě analyzování strategie řízení je možné ovlivnit návrh a s tím spojené požadavky pro metodu řízení. Pomocí tohoto SW je možné se dále vyvarovat zásadnějším změnám v projektu.

Z průběhu výkonu na obvodu kola je patrné, že hybridní vozidlo s instalovaným menším výkonem spalovacího motoru je schopno dosáhnout stejných či lepších pracovních výkonů proti konvenčnímu vozidlu.

Při porovnání spotřeby pohonných hmot hybridního vozidla oproti konvenčnímu vozidlu, výsledky vycházejí jednoznačně pozitivně pro přínos hybridního vozidla. Úspora pohonných hmot vychází více jak 50 %, při nejméně příznivém stavu, kdy je uvažováno nabíjení akumulátoru pomocí spalovacího motoru. Náklady lze dále snížit dobíjením akumulátoru ze sítě během odstavení vozidla mezi posuny.

Příspěvek vznikl v rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu FV10724 „Hybridní lokomotiva a elektro-nická optimalizace energeticky jejího provozu“.



Literatura

- [1] NOVÁK, Jaroslav, Václav LENOCH, Ladislav MLYNAŘÍK, Zdeněk MAŠEK a Ondřej SADÍLEK. Sériové hybridní pohony pro drážní vozidla. Zpráva č. KEEZ-T-12.05-15. Projekt č. 50680/56/TE520038. Pardubice, 2015.
- [2] LENOCH, Václav a Zdeněk MAŠEK, Simulační model sériového hybridního pohonu posunovací lokomotivy, XXXIV. Celostátní konference o elektrických pohonech. Pra-ha: Česká elektrotechnická společnost, 2015, s. 17. ISBN 978-80-02-02592-4.

- [3] MLYNAŘÍK, Ladislav a Jaroslav NOVÁK. Simulační model profilu jízdy kolejového vozidla. Zpráva č. KEEZ-T-05-13. Projekt č. 50680/56/TE520038. Pardubice, 2013.
- [4] PÁCHA, Matěj. Hybridní pohon kolejových vozidel. Žilina, 2010. Disertační práce. Žilinská univerzita v Žilině.
- [5] Firemní dokumenty firmy KOKAM, URL: <http://kokam.com/>
- [6] Firemní dokumenty firmy CZ LOKO, a.s., URL: <http://www.czloko.cz/cz>