

SIMULAČNÍ OVĚŘENÍ VLIVŮ PROVOZU NA SPOTŘEBU DVOUZDROJOVÉHO KOLEJOVÉHO VOZIDLA

SIMULATION CALCULATIONS OF THE EFFECTS OF OPERATION ON THE CONSUMPTION OF A BATTERY RAIL VEHICLE

Ladislav MLYNÁŘÍK¹, Jaroslav NOVÁK², Ondřej SADÍLEK³

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252670

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Článek si klade za cíl přiblížit klíčové aspekty mající vliv na spotřebu (a tedy i úspory) trakční energie. Jedná se především o využití jízdy výběhem a vliv výběhu na spotřebu a jízdní dobu vozidla, vliv délky pobytů v zastávkách za chodu pomocných pohonů vozidla, vliv využití rekuperačního brzdění do akumulátoru a jeho vztah k dodržení jízdního řádu, a v neposlední řadě vliv „stylu jízdy“. V závěru jsou diskutovány potřebné rezervy v kapacitě akumulátoru pro spolehlivý provoz aku-trolejových vozidel. Pro lepší pochopení výsledků je stručně představena struktura SW vyvinutého na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice, jež slouží právě pro detailní výpočty spotřeby energie při jízdě kolejového vozidla napájeného z trolejového vedení, nebo z trakčního akumulátoru.

Klíčová slova

trakční výpočty, akumulátorové napájení, simulace jízdy kolejového vozidla, LFP akumulátor, model akumulátoru

Abstract

The article presents key aspects that have an impact on the calculation of traction energy. These include primarily the use of driving without power and the effect of run without power on the consumption and driving time of the vehicle, the effect of the time of stays at stops while the vehicle's auxiliary drives are running, the effect of the use of regenerative braking into the traction battery and its relationship to adherence and to the timetable. In conclusion, the necessary energy reserves in the battery capacity for reliable operation of battery-trolley vehicles are discussed. For a better understanding of the results, the structure of the SW developed at the Faculty of Transport Engineering of the University of Pardubice, is presented.

Keywords

traction calculations, battery power supply, calculation of rail vehicle driving, LFP battery, battery model

¹ Ing. Ladislav Mlynařík, Ph.D.,  0000-0001-8396-5657. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, tel.: +420 466 036 404, e-mail: ladislav.mlynarik@upce.cz

² prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.,  0000-0003-3844-4961. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, e-mail: jaroslav.novak@upce.cz

³ Ing. Ondřej Sadílek, Ph.D.,  0000-0002-5943-866X. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika, e-mail: ondrej.sadilek@upce.cz

1 ÚVOD

Snaha o snížení emisí z dopravy a počínající celospolečenský odklon od fosilních paliv je v posledních letech patrný i v osobní regionální železniční dopravě. Stále více železničních tratí v ČR je elektrifikováno a dopravu na nich lze považovat za lokálně bezemisní. Navíc je tohoto efektu dosaženo s možnostmi rekuperace brzděné energie zpět do trakčního vedení, s výhodou tichých a výkonných vozidel. Na části železniční sítě však nikdy nebude tak hustý provoz, aby se jejich elektrizace ekonomicky vyplatila. Snaha čerpat výhody z provozu elektrického vozidla i mimo trolejové napájení vedla výrobce k jejich doplnění o trakční akumulátor.

Trakční akumulátor sice umožňuje vozidlu nezávislý provoz, avšak z principu nedovoluje neomezený dojezd, jako napájení trolejové. Z tohoto důvodu je potřeba vozidlo velmi dobře teoreticky popsat a následně na uvažovaných trasách simulačně ověřit spotřebu energie ve vztahu k dimenzování trakčního akumulátoru.

Ve třetí kapitole jsou na příkladu jízdy regionálního osobního vlaku z Prahy do Mělníka ukázány výhody simulačního ověření akumulátorového napájení. Díky simulacím je možné následně vozidlo navrhnout a provozovat bez rizika nedostatečného dimenzování akumulátoru jak z hlediska kapacitního (dostatku energie), tak z hlediska výkonového, a to vše při zachování maximální možné životnosti. Ze simulace reálného provozu lze také odvodit počet cyklů (a mikrocyklů) trakčního akumulátoru a tím predikovat jeho opotřebení a životnost.

Zatímco vlivy jednotlivých konstrukčních celků vozidla jsou předem známe a za provozu je nelze příliš ovlivnit, vlivy železničního provozu na spotřebu jsou dopředu těžko předvídatelné. Simulačně je možné předem navržené scénáře kvantifikovat a pro bezproblémový provoz navrhnout v kapacitě akumulátoru dostatečné rezervy.

2 KONCEPCE VYVINUTÉHO SW

Na Dopravní fakultě Univerzity Pardubice byl vyvinut simulační model jízdy kolejového vozidla po předem známé trati za účelem ověření jednotlivých vlivů na spotřebu vozidla v elektrickém i akumulátorovém režimu. Simulační SW pracuje s pevnou periodou výpočtu (100 ms). Celkově lze popisovanou část SW rozdělit do několika částí.

2.1 Načtení parametrů trati a vozidla

Nutnou podmínkou pro důvěryhodné výsledky je pečlivé a uvážené zadání vstupních proměnných. Zadávané proměnné popisující parametry trati jsou ve všech simulacích stejné: podélný profil (sklony), rychlostní profil, poloha zastávek, názvy zastávek a dostupnost trakčního vedení.

Dalšími parametry přibližujícími simulaci reálnému provozu jsou: různě dlouhé výběhy před zastávkami a před zpomalením, použité poměrné tahy, omezení adheze, zákaz či povolení rekuperace, uvažované zpomalení vozidla, „povolování brzdy“ před zastavením, zarampování nárůstu tažné a brzděné síly atd.

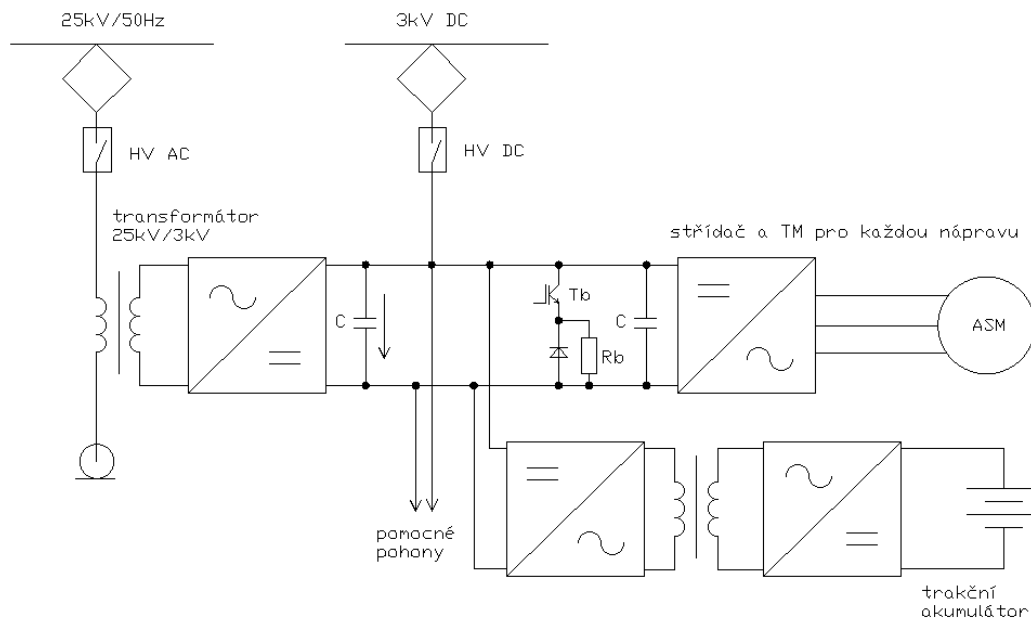
Při zadávání parametrů vozidla je nutné zohlednit jeho trakční schéma. Pro simulace regionálního osobního vlaku byla vybrána dvouvozová elektrická jednotka, doplněná trakčními akumulátory se zjednodušeným trakčním schématem uvedeným na obr. 1.

V případě střídavého trolejového napájení je energie vedena přes trakční transformátor a řízený usměrňovač (řízený usměrňovač je u střídavých vozidel povinný kvůli kvalitě odběru trakční energie, kdy je umožněn odběr proudu ve fázi s napětím) a samozřejmě pro možnost rekuperace energie zpět do trolejového vedení při brzdění vozidla.

Ze stejnosměrného obvodu o jmenovitém napětí 3 kV jsou napájeny čtyři střídače, z nichž každý napájí jeden asynchronní trakční motor s kotvou nakrátko. Dále jsou ze stejnosměrného meziobvodu napájeny všechny netrakční spotřeby (topení vlaku a klimatizace, kompresor, chlazení trakční výzbroje – měničů a trakčních motorů, anebo dobíječ palubní 24 V baterie, ze které je vozidlo řízeno). Součástí meziobvodu simulovaného vozidla je i brzdový odporník, který v případě jízdy pod střídavou trolejí slouží

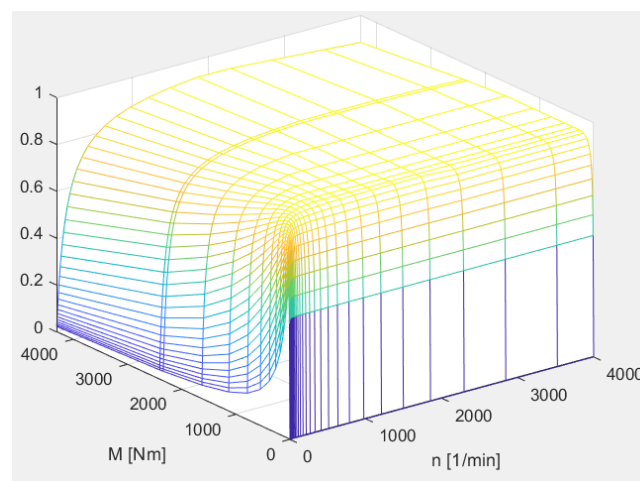
jako rychlá ochrana kondenzátorů v meziobvodu, v případě napájení vozidla ze stejnosměrné troleje je v něm mařena brzdná energie, kterou trolej v dané chvíli neabsorbuje a z libovolných příčin ji není možné uložit do trakční baterie.

Do stejnosměrného meziobvodu je připojena také trakční baterie. Protože uvažujeme stejnosměrný meziobvod o napětí 3 kV, musí být baterie (z bezpečnostních důvodů) galvanicky oddělena od napětí meziobvodu. Na schématu znázorněný oddělovací měnič většinou pracuje na frekvenci vyšších jednotek kHz.



Obr. 1 Trakční schéma zahrnující simulované komponenty

Zvolené trakční schéma je potřeba popsat účinnostmi jednotlivých jeho komponent. Samotné zadání účinností trakčních komponent je téma na samostatnou rozsáhlou zprávu. Jako příklad může sloužit mapa účinnosti trakčního motoru na obr. 2. Uvedené trakční schéma vyžaduje zadání účinnosti nápravové převodovky (závisí na otáčkách a přenášeném momentu), trakčního motoru (závisí na otáčkách a přenášeném momentu), trakčního střídače (závisí na napětí a tekoucím proudu), oddělovacího měniče akumulátoru, řízeného usměrňovače a trakčního transformátoru (závisí na přenášeném výkonu).



Obr. 2 Zadání účinnosti trakčního motoru (účinnost je závislá na momentu a otáčkách motoru na hřídeli M a n)

Mezi další parametry vozidla, které je nutné zadávat patří: hmotnosti, jízdní odpory, délka vlaku, adhezní hmotnost, součinitel rotujících hmot, nápravový převod a průměr kol, střední příkon pomocných spotřeb, trakční charakteristiky v jízdním a brzdném režimu (rozdílné pro trolejové a akumulátorové napájení) a model trakčního akumulátoru.

2.2 Výpočet mechanických a elektrických veličin ve vozidle

Po zadání všech vstupních proměnných probíhá s přednastavenou periodou výpočet trakčních a energetických veličin:

- Určení aktuálně dosažitelné tažné síly z trakční charakteristiky.
- Výpočet aktuálních jízdních odporů.
- Určení potřebné tažné síly v závislosti na rychlostním profilu trati a blížících se zastávkách,

$$\sum F = m \cdot \ddot{s} \quad (1)$$

$$v = \frac{ds}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3)$$

kde suma všech sil působících na vozidlo (které se chová jako jeden hmotný bod) zahrnuje tažnou sílu (dostupnou pro danou rychlost z trakční charakteristiky), sílu působící z jízdních odporů vozidla, sílu ze sklonu trati, přidanou sílu z průjezdu obloukem a síly vyvolané mechanickými brzdami.

Hmotnost vozidla je značena M a s je aktuální dráha. První derivací dráhy je aktuální rychlost v a druhou derivací potom aktuální zrychlení a . V případě, že použijeme dostatečně krátkou periodu výpočtu (např. 100 ms) můžeme napsat vztahy (2) a (3) a uvažovat aktuální zrychlení a rychlost v dané periodě jako konstantní.

- Následuje určení aktuálních možností pohonu tuto tažnou sílu realizovat (v závislosti na parametrech akumulátoru).
- Výpočet skutečné tažné síly podle aktuálních možností pohonu.
- Výpočet skutečných aktuálních parametrů na obvodu kol hnacího vozidla.
- Výpočet aktuálně ujeté dráhy a aktuální rychlosti.

Po jeho dokončení jsou vypsány a graficky zobrazeny veličiny na jejichž základě je možné usuzovat na chování reálného vozidla a v případě potřeby pokračovat v simulačním ověření poměrů v napájecí síti, nebo rozhodovat o dimenzování akumulátoru.

2.3 Výstupní veličiny poskytnuté vyvinutým SW

Z níže uvedených veličin (jejich grafického zobrazení v závislosti na poloze na trati, nebo tabulkovém souhrnu) je možné optimalizovat kapacitu trakčního akumulátoru, dobu jeho dobíjení, posoudit poměr trasy vozidla pod trolejí a na nezatrojevaném úseku, určit počet cyklů a mikrocyklů akumulátoru, jež mají vliv na jeho stárnutí a životnost.

- čas [s]
- ujetá dráha [km]
- rychlost na obvodu kol [km/h]
- výkon na obvodu kol [kW]
- energie nasčítaná na obvodu kol [kWh]
- žádaný výkon ve stejnosměrném meziobvodu (včetně pomocných pohonů) [kW]
- skutečný výkon ve stejnosměrném meziobvodu (včetně pomocných pohonů) [kW]
- energie nasčítaná v meziobvodu (včetně pomocných pohonů) [kWh]
- výkon na sběrači [kW]
- energie odebraná z troleje (nasčítaná od začátku simulace) [kWh]
- zbývající energie v akumulátoru [kWh]
- aktuální svorkové napětí baterie [V]
- aktuální proud trakční baterie [A]

3 PROVOZ AKUTROLEJOVÉHO VOZIDLA NA REGIONÁLNÍ TRATI

Na Univerzitě Pardubice je pomocí SW popsaného v předchozí kapitole postupně analyzován provoz osobních vlaků na mnoha částečně zatrolejovaných tratích v České republice. Cílem analýzy je ověřit možnost akumulátorového provozu na neelektrizovaných úsecích a reálnost dojíjení v čase stráveném pod trolejí.

Jako příklad vlivů provozu na spotřebu v tomto článku byla vybrána trať z Prahy do Mělníka, která je na obou koncích elektrizována a v její střední části (z odb. Skály do Všetat – 29 km) je vozidlo provozováno na trakční akumulátor. Neelektrizovaný úsek je ve směru do Prahy výhradně do stoupání v opačném směru trať výhradně klesá. Proto je právě na jejím příkladu možné ukázat některé jevy, které by byly na typické koncové trati (vedoucí v jednom směru do hor a v druhém zpět k elektrizované trati v údolí) špatně patrné.

Jako vozidlo byla vybrána polovičně obsazená dvouvozová elektrická jednotka trolej / akumulátor s trakčním schématem podle obrázku 1 a celkovou hmotností 121 t.

Jednotlivé vlivy na spotřebu je možné rozdělit do dvou kategorií:

- První velkou kategorií je konstrukce vozidla a jeho jednotlivých komponent. Mezi tyto vlivy lze zahrnout účinnosti jednotlivých komponent trakčního obvodu a jejich optimalizací (například odpojování trakčních motorů v případě jejich dočasného nevyužití), princip vytápění a chlazení vozidla, nebo jízdní odpory (valivý, a především aerodynamický).
- Druhou skupinou, jsou vlivy samotného provozu vozidla (plánovaná i neplánovaná zastavení, sklony tratí, výše traťových rychlostí a jejich dosahování, styl jízdy atd).

Zatímco první kategorii vlivů na spotřebu vozidla má v rukou hlavně výrobce, který konstrukcí vozidla určí jeho hospodárnost prakticky na celou dobu životnosti, jevy uvedené ve druhé odrážce většinou nejsou dopředu známy. Vozidlo je velmi často pořízováno jako univerzální a je provozováno na celém spektru železničních tratí a různých výkonech (zastávkové vlaky, spěšné vlaky) atd. Navíc i v rámci stejné trati a stejného výkonu mohou jednotlivé, dopředu těžko předvídatelné, provozní vlivy výrazně změnit trakční spotřebu.

Byly vybrány nejtypičtější „dopředu nepředvídatelné vlivy“, které v železniční dopravě nastávají a na kterých je ilustrován rozsah spotřeby, se kterou může vozidlo tentýž výkon realizovat. Je zřejmé, že uvedených vlivů zvyšujících spotřebu vozidla může být teoreticky nekonečné množství a jedinou spolehlivou možností pokrytí těchto zvýšených spotřeb při jízdě po nezatrolejované trati jsou rezervy v kapacitě trakčního akumulátoru.

Podrobně byly analyzovány vlivy zejména:

- Jízda po různě sklonově náročných tratích
- Výběhy před zastavením a snížením rychlosti / jízda plnou rychlostí do posledního možného okamžiku následovaná brzděním
- Přidání neplánovaných zastavení
- Jízda s různými poměrnými tahy
- Vítr působící proti směru jízdy
- Jízda bez elektrodynamického brzdění
- Doba pobytů v zastávkách (nebo na obratu soupravy) a její vliv na spotřebu pomocných pohonů.

3.1 Referenční varianta – jízda ve směru Mělník–Praha

Tato výchozí varianta má nejkratší jízdní doby, protože uvažuje brzdění k místu zastavení až z nejzazšího možného okamžiku. To vyžaduje brzdné síly, které je nutné realizovat z velké části mechanickými brzdami s malou mírou rekuperace (omezená síla z trakční charakteristiky, omezený nabíjecí výkon akumulátoru) a žádné jízdy výběhem. Zároveň je při této simulaci využíván poměrný tah 1 (jízda a elektrodynamická brzda na obálce trakční charakteristiky), který zatěžuje akumulátor největšími proudy, vyvolávajícími největší ztráty na vnitřním odporu akumulátoru. Neznamená to však, že je spotřeba při takové jízdě automaticky největší, jak ukazují některé další simulace.

Na níže uvedených grafech (obr. 3) je vidět průběh traťové a simulací vypočtené rychlosti; průběh redukovaného sklonu a místa jednotlivých zastavení; výkon a energie na obvodu kol; tažná a brzdná síla vyvolaná elektrickým pohonem a brzdná síla mechanických brzd na obvodu kola; výkon ve stejnosměrném meziobvodu vozidla; napětí a proud trakčního akumulátoru; průběh zbývajících energie v akumulátoru a průběh odebrané energie na sběrači vozidla.

Na základě těchto průběhů je možné analyzovat provoz vozidla na trati za stanovených podmínek.

Simulací byla vypočtena spotřeba energie na projetí trati za výše popsaných podmínek 195 kWh (56 Wh/tkm) a doba jízdy z akumulátoru (v úseku Všetaty–Rajská zahrada) 44:45 min.



Obr. 3 Grafické znázornění výsledků simulace v závislosti na poloze na projížděné trati

3.2 Jízda opačným směrem Praha–Mělník

Trať ze Všetat do Prahy – na odb. Skály vede do výrazného stoupání. Provedeme-li simulaci jízdy v opačném směru (za jinak stejných podmínek) dostáváme se k velmi odlišným výsledkům spotřeby.

Spotřeba z akumulátoru byla vypočtena 99 kWh (28 Wh/tkm) a doba jízdy stejně, tedy 44:58 min. Při porovnání s předchozí variantou je zřejmé, že akumulátor nelze dimenzovat na střední hodnotu spotřeby a je potřeba ověřit každou trať (a někdy i každý směr) individuálně.

3.3 Jízda s poměrným tahem 50 %

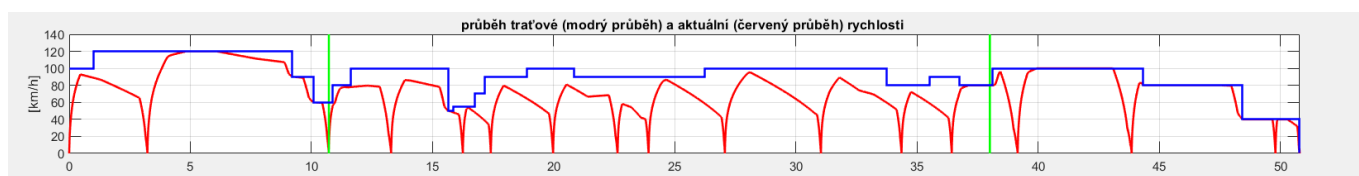
Jízda s poměrným tahem v jízdě 0,5 a v brzdě 1 samozřejmě vede k nižším zrychlením a delším jízdám. Avšak vlivem nižších vybíjecích proudů trakčního akumulátoru snižuje ztráty na vnitřním odporu akumulátoru, a tedy jeho ztráty (vnitřní ztráty v akumulátoru rostou nelineárně v závislosti na protékajícím proudu ($P_{\text{ztrát aku}} = R_i \cdot I_{\text{aku}}^2$)).

Simulací byla určena spotřeba z akumulátoru 179 kWh (-16 kWh / -8 % oproti ref. variantě) a doba jízdy z akumulátoru 47:45 min. (+3 min oproti ref. variantě).

3.4 Jízda s výběhy před zastavením, nebo zpomalením

Jízda výběhem obecně znamená nižší střední rychlost. Při simulacích se pravidelně ukazuje, že nízkým prodloužením jízdny doby (kvůli jízdě výběhem) lze ušetřit nezanedbatelnou část energie. Budeme-li dimenzovat akumulátor na spotřebu respektující výběhy už při návrhu dopravního modelu, dostaneme při jakémkoliv krácení zpoždění spotřebu o desítky % větší (např. jízda s využitím automatického vedení vlaku při krácení zpoždění). Bez adekvátní rezervy v kapacitě trakčního akumulátoru může být spolehlivost takového provozu významně ohrožena.

Spotřeba z akumulátoru při důsledném využívání výběhů podle tachogramu na obr. 4 byla vypočtena 154 kWh (-41 kWh / -21 % oproti ref. variantě) a doba jízdy na akumulátor 45:58 min. (+1:13 min oproti ref. variantě).



Obr. 4 Průběh vypočtené rychlosti při zohlednění jízdy výběhem

3.5 Jízda se dvěma neplánovanými zastaveními (2 x 30 s)

I při důsledném využívání rekuperace dochází s každým zastavením ke zvýšení celkové spotřeby. Za „nízkou návratností“ energie zpět do akumulátoru při elektrodynamickém brzdění stojí dvě skutečnosti. Většinou brzdíme většími silami, než je schopna vyvodit sama elektrodynamická brzda a část energie je tak zmařena v mechanických brzdách. Druhým neméně významným faktem jsou účinnosti v trakčním řetězci, kdy energii máme ve ztrátách trakčních komponent jak při rozjezdu, tak při brzdění.

Přidáme-li dvě zastavení na 30 s (doba pobytu nám dále zvyšuje spotřebu vlivem odběru pomocných pohonů) dostaneme se (za jinak stejných podmínek jako u referenční varianty) ke spotřebě z akumulátoru 207 kWh (+12 kWh / +6 % oproti ref. variantě) a době jízdy na akumulátor 48:21 min. (+3:36 min oproti ref. variantě).

3.6 Jízda proti působícímu větru 20 km/h

Vyjádřit vliv větru působícího proti jízdě vozidla je obtížné. V simulaci bylo použito fiktivní zvýšení všech traťových rychlostí o 20 km/h. Avšak vítr by v reálném provozu působil i při rozjezdech vozidla, což simulační zjednodušení opomíjí. Na druhou stranu je pravděpodobné, že by vítr nepůsobil čistě proti jízdě v celé trase tak, jako to uvažovala simulace.

Při výše uvedených předpokladech činila vypočtená spotřeba energie z akumulátoru 231 kWh (+36 kWh / +18 % oproti ref. variantě). Doba jízdy se nezměnila (44:45 min.) protože vozidlo disponuje dostatečnými tažnými silami na překonání zvýšených jízdnych odporů.

3.7 Jízda při omezeném nabíjecím výkonu akumulátoru

V provozu moderních akumulátorů může nastat situace, že kvůli jeho stavu nedovolí battery management systém jeho nabíjení (a tedy rekuperaci brzděné energie) plným výkonem (např. z důvodu

teploty akumulátoru). Vlivem špatné adheze může také dojít k potřebě brzdít všemi nápravami (nejen těmi osazenými trakčním motorem) a původně plánovaná rekuperovaná energie je výrazným způsobem zmařena v mechanických brzdách. Tyto a mnoho dalších vlivů neplánovaně omezí využití rekuperované energie a celkově zvýší spotřebu vozidla.

Spotřeba z akumulátoru při úplné absenci elektrodynamické brzdy je 278 kWh (+83 kWh / +42 % oproti ref. variantě). Při malých rezervách kapacity akumulátoru by bylo nutné neplánovaně zvýšenou spotřebu řešit zavčasu. Například omezit spotřebu pomocných pohonů, využívat výběhy bez ohledu na jízdní doby atd.

3.8 Prodloužení pobytu mimo trolej o 30 minut

Každé vozidlo odebírá energii pro své pomocné pohony bez ohledu na svoji jízdu. Jedná se především o vytápění a chlazení vozidla, výrobu stlačeného vzduchu, osvětlení, řídicí obvody vozidla atd. Tyto spotřeby narůstají v čase. V simulacích byl uvažován střední příkon všech pomocných spotřeb na úrovni stejnosměrného meziobvodu vozidla v hodnotě 41 kW. Tato hodnota byla ověřena u moderní dvouvozové elektrické jednotky měřením, avšak vlivem změn vnějších podmínek (například okolní teploty) se může výrazně měnit.

Pro příklad však lze uvést:

- Při konstantním příkonu pomocných spotřeb 40 kW (na úrovni stejnosměrného meziobvodu vozidla) činí jejich spotřeba za 1 minutu 0,66 kWh, za 30 minut potom +20 kWh.
- Při konstantním příkonu pomocných spotřeb 60 kW (na úrovni stejnosměrného meziobvodu vozidla) činí jejich spotřeba za 1 minutu 1 kWh, za 30 minut potom +30 kWh.

V provozu je nutné počítat s neočekávaným prodloužením pobytu v nezatrolejovaném úseku. V případě nízké rezervy v kapacitě akumulátoru je potřeba výše popsané pomocné pohony včas omezit. Například při vzniku mimořádné události, kdy je potřeba nemanipulovat v prvky vozidla až do příjezdu vyšetřovacích orgánů, takovéto omezení spotřeb není přípustné a za každou půlhodinu vozidlo spotřebuje až 10 % využitelné energie akumulátoru současných aku-trolejových vozidel. To může při nedostatečném dimenzování rezervy v akumulátoru pro danou trasu mít za následek neschopnost vozidla pokračovat v jízdě.

4 ZÁVĚR

V předchozí kapitole bylo ukázáno jen několik možností, které výrazně ovlivnily (zvýšily, nebo naopak snížily) spotřebu vozidla oproti referenční variantě. Byly vybrány situace z každodenního provozu.

Může nastat mnoho dalších situací, které nejen že zvýší spotřebu vozidla v nezatrolejovaném úseku, ale mohou i ohrozit čas původně plánovaný k jeho dobíjení pod trolejí (nebo v nabíjecím bodě).

Obecně lze na uvedené trati uvažovat o dalších (výše neprobíraných) vlivech na spolehlivost akumulátorového napájení:

- Vlak byl zpožděný a nestihl se pod trolejí plně dobít (například obrat soupravy ve Všetatech, na který je plánováno 30 min., ale příjezd byl opožděn o 20 min. Nebo obrat v Mělníce, který byl z důvodu eliminace zpoždění přeložen do Všetat a odpadl tak čas jízdy a dobíjení po cestě.
- Vlak přijede do nezatrolejovaného úseku zpožděný a bude se snažit zpoždění krátit – bude „kopírovat traťové rychlosti“ (využívat tažné síly na obálce trakční charakteristiky, úplné vynechání fáze jízdy výběhem atd.).
- Vlak z důvodu mimořádnosti ukončí jízdu před koncem nezatrolejovaného úseku (například v Neratovicích) a bude se vracet zpět bez plánovaného dobíjení.
- Vlak pojedje z důvodu mimořádnosti za jiným vlakem a bude opakovaně zastavovat u návštěvidel, nebo pojedje k několika přejezdům „se zvýšenou opatrností“.

Dílíč úvahy v tomto článku jednoznačně vedou k závěru, že není možné plánovat energetiku nasazení aku-trolejového vozidla na konkrétní trati na základě jeho spotřeby na trati jiné, nebo dokonce na základě spotřeby jiných vozidel. Ke zodpovědnému a důvěryhodnému zhodnocení dojezdu vozidla na dané trati

nelze používat průměrné spotřeby v jednotkách kWh/tkm. Parametry každé železniční trati jsou specifické a používání průměrných spotřeb získaných kdekoli jinde je možné pouze za předpokladu dostatečných rezerv zbývajících energie v akumulátoru po návratu pod trolejové vedení (nebo po příjezdu do nabíjecího místa).

Kapacity trakčních akumulátorů dnešních vozidel velmi často dostačují k jejich bezproblémovému provozu na dané trati. Energetická rezerva však není taková, jako v případě vozidla dieselového. Proto je potřeba provoz akumulátorových vozidel dopředu pečlivě naplánovat. Dokonce i při pečlivém posouzení spotřeby vozidla na konkrétním výkonu a na dané trati (zkušební jízdou a simulacemi) je nutné zvážit více, či méně pravděpodobné komplikace, které mohou v železniční dopravě nastat. Trakční akumulátor je nutné zodpovědně dimenzovat s ohledem na pokrytí těchto mimořádností a při vědomí, že využitelná kapacita trakčního akumulátoru je (s ohledem na jeho životnost) jen cca 80 % kapacity skutečně instalované. Dalším faktorem hodným pozornosti je využitelná kapacita akumulátoru na konci jeho životnosti (která bývá definována jako 80 % původně využitelné kapacity). Na konci životnosti tak musíme počítat s tím, že využitelná kapacita akumulátoru bude jen 64 % ($0,8 \cdot 0,8$) kapacity původně instalované. I v této kapacitě je potřeba mít zahrnuty rezervy pro všechny uvažované mimořádnosti. Alternativou může být přesun vozidla na méně energeticky náročné výkony.

Příspěvek byl vytvořen v rámci projektu „Prostředky pro implementaci nízkoemisních technologií v železniční dopravě“, který je financován Technologickou agenturou České republiky pod číslem CL01000041.



Literatura

- [1] BALSAR, J., MRKVIČKA, J. *Trakční vozidla závislá I*. 1. vyd. Praha: NADAS, 1982.
- [2] HERZÁŇ, F., HABARADA, D., MRKVIČKA, J. *Mechanika dopravy koľajových vozidiel*. Praha: NADAS, 1989.
- [3] NAVRÁTIL, J. *Vliv vozidlového odporu na trakční výpočty*. Bakalářská práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, 2011.
- [4] FREIBAUER, L., RUS, L., ZAHŘÁDKA, J. *Dynamika kolejových vozidel*. 1. vyd. Praha: NADAS, 1991. ISBN 80-7030-104-X.
- [5] ČSD V7. *Trakční výpočty*. Praha: NADAS, 1982.
- [6] JANSÁ, F. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Praha: NADAS, 1980.
- [7] ŠRÁMEK, M. Elektrické jednotky s trakční baterií řady 690.2 ČD. *Dráha*. Roč. 2024, č. 11. ISSN 1211-1260.
- [8] PHAM, N. N., SADÍLEK, O., LEUCHTER, J. *Parameterization of Traction Battery Models for Performance Evaluation in Ecological Rail Transport*. Nuremberg, Germany: PCIM Conference 2025, 6.–8. 5. 2025.
- [9] MAŠEK, Z. *Seznámení s programem Matlab*. Studijní opora. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera, 2013.
- [10] *Altairnano 70 Amp Hour cell*. Altairnano product P/N 1112533-001. Datasheet. Document number: 3342116 (R2), 2021.
- [11] KŘEPELA, J., VANĚČEK, M. *Tenzometrické měření účinnosti převodovky pro metro 11Mt*. Technická zpráva Wikov MGI a.s. Hronov, 2014.
- [12] HU, M., ZENG, J., XU, S., FU, C., QIN, D. Efficiency Study of a Dual-Motor Coupling EV Powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 64 (2015), no. 6, s. 2252–2260. ISSN 1939-9359.
- [13] HONGWEN, HE., RUI, X., JINXIN, F. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*. Vol. 4 (2011), no. 4. ISSN 1996-1073.
- [14] MOIUSAVI, S. M., NIKDEL, M. Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Vol. 32 (2014). ISSN 1364-0321.

- [15] NOVÁK, J., MLYNÁŘÍK, L., LELEK, T. Možnosti využití kolejových vozidel s kombinovaným napájením v regionální osobní dopravě. *ELEKTRO*. Roč. 25 (2015), č. 6. ISSN 1210-0889.
- [16] NOVÁK, M., NOVÁK, J., MORKUS, J., MUSÁLEK, L., SIVKOV, O. Drivetrain modelling and parameter calculation for an electric bus with fixed or 2-speed gearbox. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. Vol. 12 (2020), no. 3, s. 229–252. ISSN 1751-4088.
- [17] NOVÁK, M., NOVÁK, J., NOVÁK, Z. Methodology for Efficiency Mapping of Permanent Magnet Synchronous Motors. In: *EDPE 2017 – 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, conference proceedings*. Danvers: IEEE, 2017, s. 205–210. ISSN 1339-3944. ISBN 978-1-5386-3381-6.
- [18] ČÁP, J. Adhezní limity procesu trakce a brzdění. *Scientific Papers of the University of Pardubice, Ser. B – Jan Perner Transport Faculty*. Roč. 2000, č. 6, s. 53–69. ISSN 1211-6610.

Zasláno / received: 17. 06. 2025, přijato / accepted: 24. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: Ing. Rudolf Mrzena, Ph.D. (Správa železnic, státní organizace), Ing. Jaromír Široký, Ph.D. (Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy).