



26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLĀJOVÝCH
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.1.25>

PŘÍNOSY VYUŽITÍ DVOUSTUPŇOVÝCH ŘADITELNÝCH PŘEVODOVEK U LEHKÝCH KOLEJOVÝCH VOZIDEL S ELEKTRICKÝM PŘENOSEM VÝKONU

BENEFITS OF USING TWO-STAGE SHIFTING AXLE–GEARBOX IN LIGHT RAIL VEHICLES WITH ELECTRIC POWER TRANSMISSION

Josef KOLÁŘ^{*)}

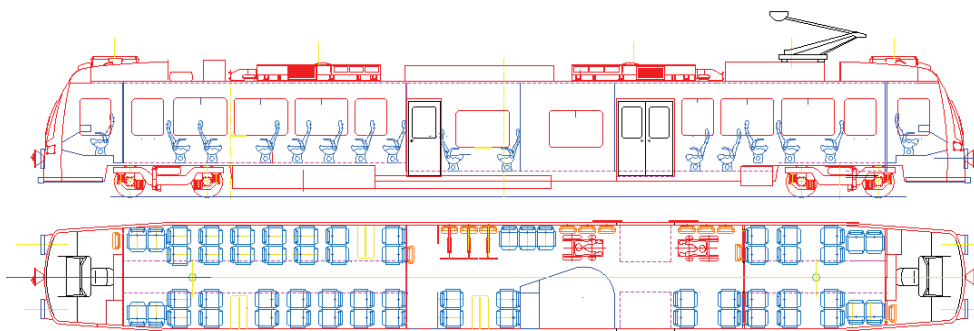
1 ÚVOD

Na konferencích PRORAIL 2015 a PRORAIL 2019 byly prezentovány konstrukční studie kolejového částečně nízkopodlažního autobusu s hybridním pohonem [1] a lehkého kolejového elektrobuse [2], jak jsme je řešili se studenty magisterského studijního oboru Dopravní technika, zaměřeni Kolejová vozidla v rámci diplomových prací na Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, FS ČVUT v Praze. Z pevnostních analýz konstrukcí skříní těchto lehkých KV, dále jen LKV, vyplynulo, že při splnění požadavků kladených na pevnost a crashovou odolnost skříně vozidla, tj. požadavku EN 12 663 (kategorie P2) a EN 15 227 (kategorie CI), nelze částečně nízkopodlažní dvounápravové kolejové autobusy či elektrobusy k provozu na regionálních drahách, definovaných dle zákona č. 266/1994 Sb., použít. Pokud nedojde na regionálních tratích na základě zavedení ETCS a smluvně, definovaného provozního řádu osobní a nákladní železniční dopravy¹⁾ ke snížení požadavků kladených na LKV v EN 12 663 (kategorii P3) a v EN 15 227 (kategorii CII), potom lze dosluhující dvou a třívozové soupravy RegioNova nahradit pouze hmotnějšími čtyřnápravovými vozidly.

V roce 2021 jsem byl ČD a.s. osloven, abych zpracoval návrh koncepční studie akutrolejového vozidla BEMU 70, viz **Obr. 1**, které by mohlo nahradit soupravu ř. 810 + 910, tj. „Regionovu.“ Požadavkem bylo navrhnout obousměrné LKV s kapacitou 70 míst k sezení splňující požadavky EN 12 663 kategorii P2 a EN 15 227 kategorii CI a respektující TSI PRM. Úvodní projekt dvousilového vozidla BEMU 70 jsem uvažoval ve formě modulární stavby. Aby pro delší neelektrifikované úseky regionálních tratí, na nichž se nepočítá s dostavbou trakčního vedení 25 kV/50 Hz a kde bychom u vozidla BEMU 70 nevystačili s elektrickou energií uloženou v bateriovém power-packu, bylo možné LKV přestavět na vozidlo s vodíkovým pohonem, tj. na vozidlo HEMU 70 viz **Obr. 2**. S ohledem na ekologický, nízkoemisní provoz jsem pro pohon obou typů LKV navrhl použít elektrický přenos výkonu a individuální pohon dvojkolí, tj. vozidlo s upořádáním pojezdu Bo'Bo'. Toto řešení pohonu umožňuje u regionálního vozidla vyšší uplatnění provozní elektrodynamické brzdy (EDB) a využití rekuperace energie, která nejen že sníží energetickou náročnost jízdy a tedy i množství CO₂ a NO_x, ale zajistí použití pneumatických třecích brzd pouze pro dobrzdění,

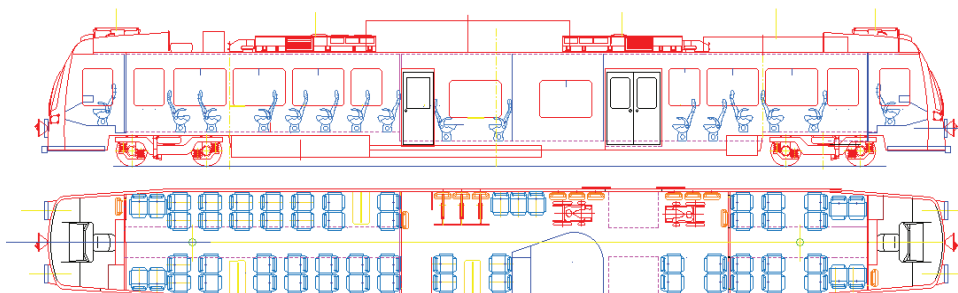
^{*)} **doc. Ing. Josef KOLÁŘ, CSc.**, U 12 120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice, tel.: (+420) 224 352 493, e-mail: josef.kolar@fs.cvut.cz, 62 let.

¹⁾ Vymezení časových oken, kdy v průběhu dne bude na trati provozována pouze osobní doprava pomocí LKV nebo pouze nákladní vlak tažený lokomotivou. nouzové brzdění a k zajištění LKV proti samovolnému pohybu. Tím se výrazně sníží hlučnost, prašnost a tepelné emise z mechanických brzd do ovzduší a dojde i k poklesu provozních nákladů na výměnu brzdových segmentů třecích brzd. Další bližší informace ke studii regionálních LKV byly publikovány v [3].



Obr. 1 Studie uspořádání částečně nízkopodlažního akutrolejového vozu BEMU 70 dvousilové, třísystémové vozidlo - AC 25 kV/50Hz, DC 3kV + akumulátory

Fig. 1 Design study of the arrangement of a partially low-floor electric railcar BEMU 70 - two-power, three-system vehicle - AC 25 kV/50Hz, DC 3kV + electric battery



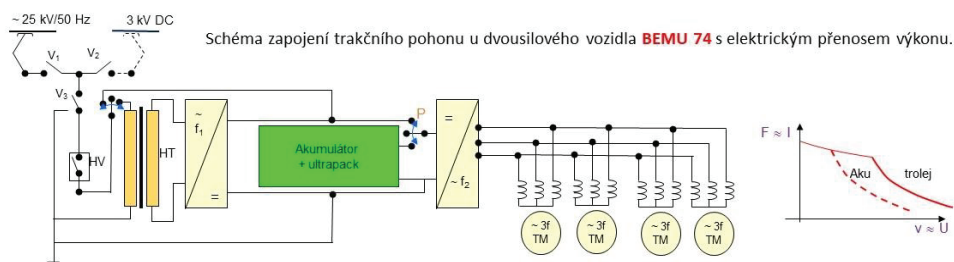
Obr. 2 Studie uspořádání částečně nízkopodlažního hybridního vozu HEMU 70

Fig. 2 Design study of the arrangement of a partially low-floor hybrid railcar HEMU 70

Obě vozidla, tj. BEMU 70 nebo HEMU 70, určená k provozu na regionálních tratích mají dva trakční dvounápravové podvozky s individuálním, příčně orientovaným pohonem dvojkolí. S ohledem na úsporu hmotnosti pojezdu vozidla je uvažováno použití trakčních podvozků s vnitřním rámem, s rozvorem podvozku 2100 až 2200 mm. Schéma zapojení trakčního pohonu dokumentují obrázky **obr. 3** a **obr. 4**. Maximální provozní rychlost vozidla je 120 km/hod. Maximální trakční výkon vozidla je 600 kW. Pro splnění zábrzdné dráhy při brzdění pouze pomocí EDB je brzdový výkon vozidla v EDB navýšen na 900 kW. Trakční dvojkolí mají jmenovitý průměr kol $D_{Kjm} = 840$ mm a opotřebený, tj. minimální průměr kol $D_{Kmin} = 760$ mm.

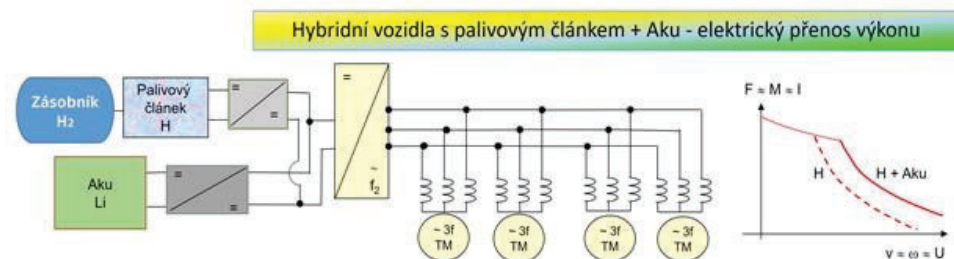
Na regionální trati se vzdálenost mezi zastávkami pohybuje mezi 2,5 až 3,5 km. Vzhledem k náročnějším směrovým a sklonovým poměrům regionálních tratí dochází k častější regulaci rychlosti vozidla. Energetická náročnost jízdního cyklu a životnost pohonu dvojkolí je ovlivněna nejen stylem jízdy vozidla, ale kvalitou kolejí regionálních tratí. Použití

přímeho neodpruženého pohonu dvojkolí, například pomoci třífazov eho pomaloběžného střídavého synchronního motoru s permanentními magnety lze pro regionální vozidlo patrn e vyloučit. Vhodnější je pou it př ıchn e orientovaný, částečně odpružený pohon s nápravou převodovkou nebo pln e odpružený pohon s dutou hř idel ı obj ımající nápravu.



Obr. 3 Sch ema zapojen  trakčního pohonu částečně nízkopodlažního vozu BEMU

Fig. 3 Scheme of the arrangement of the traction drive of a partially low-floor railcar BEMU



Obr. 4 Sch ema zapojen  trakčního pohonu částečně nízkopodlažního vozu HEMU

Fig. 4 Scheme of the arrangement of the traction drive of a partially low-floor railcar HEMU

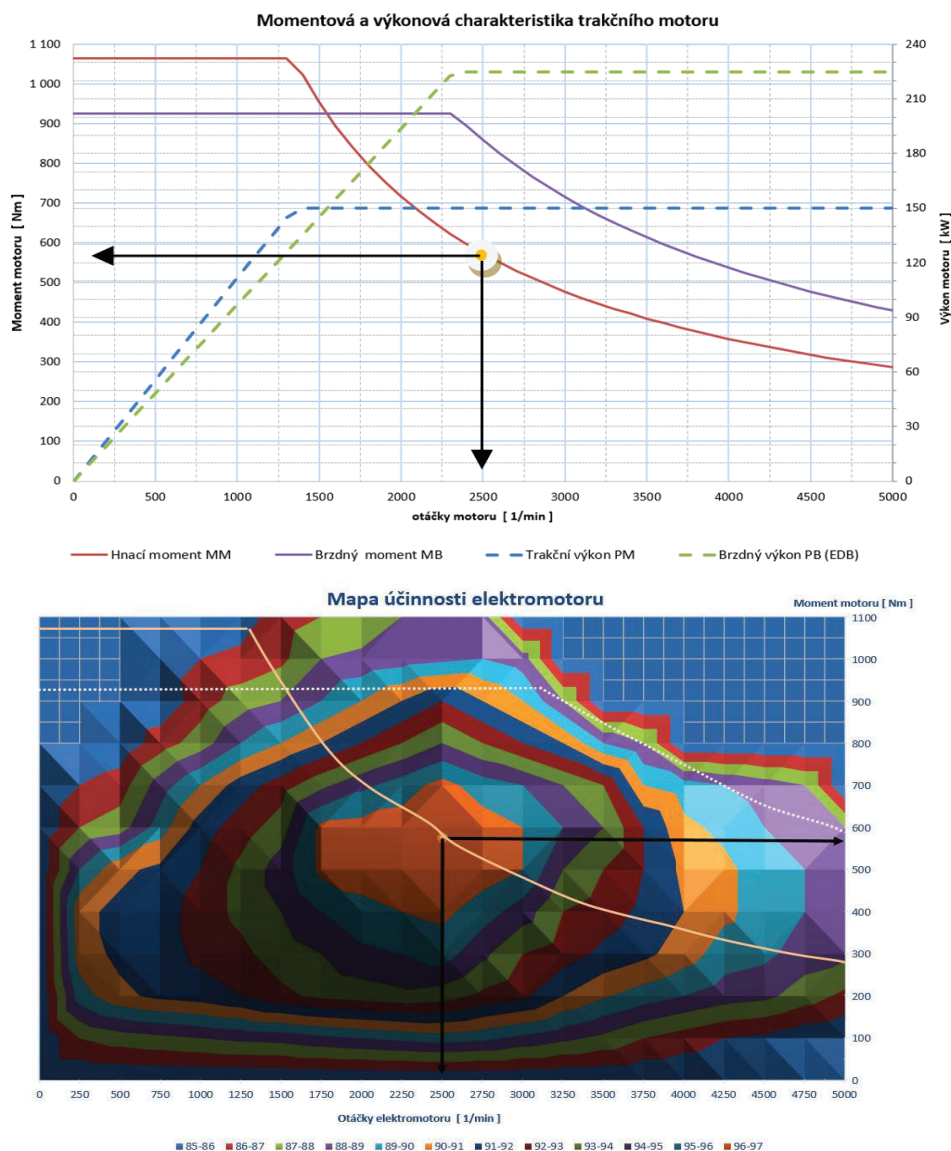
2 ZÁKLADNÍ KONCEPT Pohonu VOZIDLA

Projektant mechanické části částečně nebo pln e odpruženého pohonu je při návrhu velikosti ozubeného převodu mimo pevnostních požadavků omezen: minimální světlou výškou vozidla nad rovinou temene koleje (80 mm), minimální osou vzdáleností trakčního motoru a osy nápravy, která musí zajistit bezkolizn  relativn  pohyb odpruženého trakčního motoru vůči nápravě dvojkolí nebo vůči dut  kloubov  hřídelí objímající nápravu a dále z stavbov m prostorem v trakčním podvozku, do kterého je mo n  elektromotor a nápravovou převodovku umístit. Velikost navrženého převodu by měla respektovat jednak ot ačkov  využití trakčního motoru ($V_{max} \approx n_{Mmax} \Rightarrow i_{cKin}$) a dále s ohledem na maximální hnací moment trakčního motoru nepřekročení adhezních podmínek dvojkolí ($M_{Mmax} \approx M_{Dvmax} < M_{Dvad} \Rightarrow i_{cad}$). Navr en  stálý převodov  poměr konvenční převodovky je pak s ohledem na provozní režim vozidla kompromisním řešen m.

Moderní pohony elektrických regionálních jednotek a vozů metra pou ivaj  vysokoot ačkov e střídav e elektromotory ($n_{Mmax} = 3850 \div 5000 \text{ min}^{-1}$), které zpravidla pro splnění uvedených podmínek vyžadují u částečně odpruženého pohonu pou it konvenční jednostupňovou převodovku s vlo en m kolem nebo konvenční dvoustupňovou převodovku s předlohou hřídelí. Tato řešení s konstantním st l m převodov m stupněm neumo nňuj  optimalizovat využití výkonu vozidla.

Pro individuální př ıchn e pohony dvojkolí o jmenovitých výkonech od 120 do 250 kW na dvojkolí se teoreticky nabízí možnost pou it nekonvenční převodovku se dvěma, řaditeln mi rychlostními stupni ($1^0 - i_{cad}$, $2^0 - i_{cKin}$). Tématem tohoto p spěvku je posouzení p rnosu těchto nekonvenčních převodovek u př ıchn ho individuálního pohonu dvojkolí vozidla

BEMU nebo HEMU. Předpokládáme, že pohon dvojkolí těchto vozidel zajišťují asynchronní motory o jmenovitém výkonu $P_{jm} = 150 \text{ kW}$ ($n_{jm} = 2500 \text{ min}^{-1}$ a $M_{jm} = 573 \text{ Nm}$) a maximálním brzděním výkonu $P_{Bmax} = 225 \text{ kW}$. Maximální hnací moment motoru $M_{Mmax} = 1065 \text{ Nm}$. Maximální provozní otáčky motoru $n_{Mmax} = 5000 \text{ min}^{-1}$.



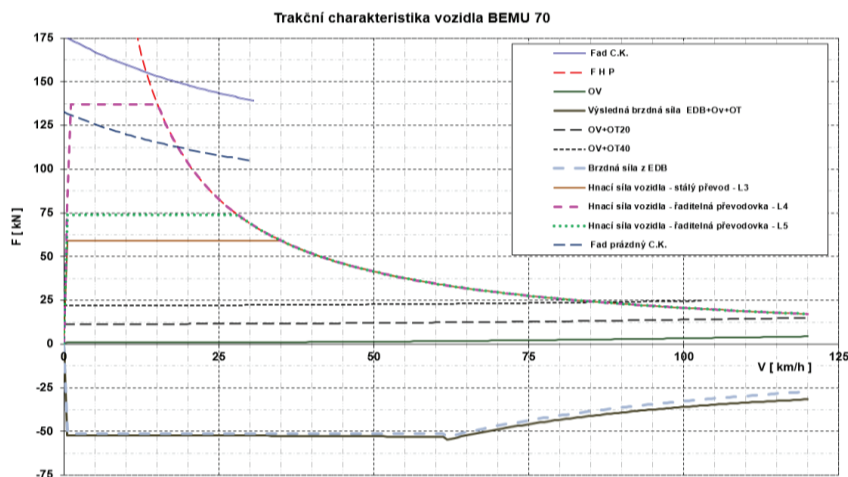
Obr. 5 Momentová a výkonová charakteristika trakčního motoru, mapa účinnosti

Fig. 5 Torque and power characteristics of the traction motor, efficiency map

Za předpokladu, že trakční motor splňuje třídu IE4, normy ČSN EN 60034-30-1:2014, je při napájecí frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$ jeho maximální účinnost ve jmenovitém pracovním bodě $\eta_{Mmax} = 96,5 \%$. Od jmenovitého pracovního bodu účinnost motoru klesá.

Charakteristiku trakčního elektromotoru a predpokladanou mapu jeho  uinnosti dokumentuje **obr. 5**.

Pro vozidlo BEMU lze navrhnout „adhezni“ převodový poměr $i_{cad} = 14,087$ a kinematický převodový poměr $i_{Kin} = 6,068$. Trakční charakteristiku vozidla dokumentuje **obr. 6**.



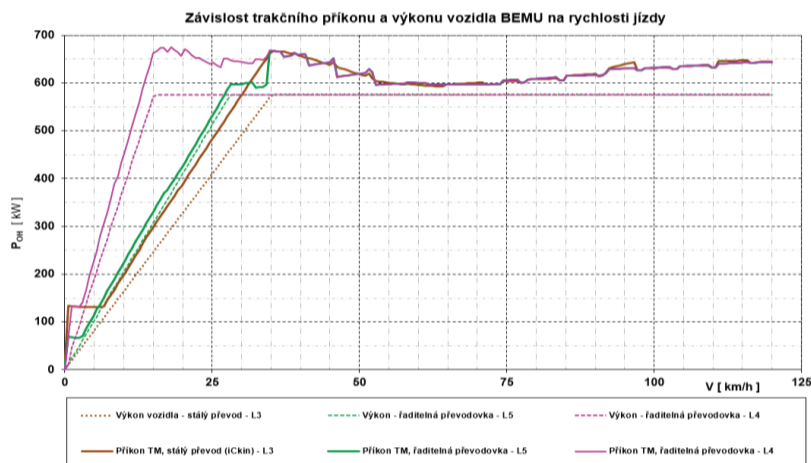
Obr. 6 Trakční charakteristika vozidla BEMU 70

Fig. 6 Traction characteristic of the vehicle BEMU 70

Na **obr. 6** je zobrazen plnou hnědou křivkou „Hnací síla vozidla – stálý převod – L3“ průběh hnací síly vozidla při pou it  konvenční převodovky se stálým převodem i_{Kin} . Z ní je patrn , že vozidlo BEMU 70 může, při zjednodu en  úlohy a zapo it n  konstantní  uinnosti n pravov  převodovky $\eta_{Pr} = 96\%$, do provozní rychlosti cca 35 km/h při maximálním momentu čtyř trakčních motorů $4 \cdot M_{Mmax} = 4\,260$ Nm pracovat s hnací silou $F_H = 58,6$ kN. Po překročení této rychlosti hnací síla vozidla hyperbolicky klesá podle výkonového omezen  ($4 \cdot P_{Mmax} = 600$ kW). V režimu provozní brzdy, tj. v režimu EDB, vozidlo BEMU 70 do rychlosti $V = 66,5$ km/h brzd  z brzdňeho momentu trakčních motorů $4M_{Bmax} = 3700$ Nm silou $F_{EDB} = 51,3$ kN. Při brzdění z rychlosti $V \geq 65$ km/h je po ateční brzdňá síla vozidla limitována nav y en m v konov m omezen m ($4 \cdot P_{Bmax} = 900$ kW). Brzdňá síla vyvinut  EDB nepřekračuje adhezni brzdňou silou prázdného vozidla $F_{Bad(PV)}$, kter  je pro součinitel adheze $\mu_B = 0,15$ cca $F_{Bad(PV)} = 60$ kN. Pln  obsazen  vozidlo BEMU 70 s konvenční převodovkou se stálým převodem i_{Kin} vykazuje rozjezdov  zrychlen  $a_x = 0,93$ m/s². K dosa en  maxim ln  rychlosti 120 km/h bylo potřeba 73,63 sekund, viz **obr. 7**  lut  křivka „Skutečná rychlost vozidla – st lly převod – L3“.

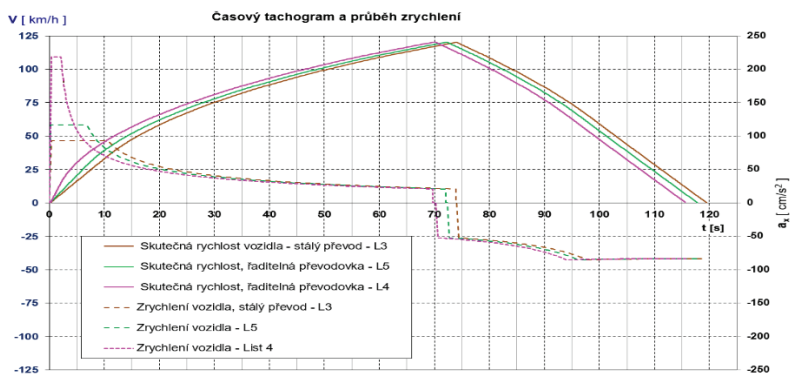
Průběh hnací síly vozidla BEMU 70 při pou it  dvoustupňov  řaditeln  převodovky, kdy se vozidlo do rychlosti 35 km/h rozj zd  na 1. rychlostní stupeň (s převodem i_{cad}) a n sledn  je přeřazení na 2. rychlostní stupeň (s převodem i_{Kin}), je na **obr. 6** zobrazen  arkovanou fialovou křivkou „Hnací síla vozidla – řaditeln  převodovka – L4“. Z ní je patrn , že obsazen  vozidlo BEMU 70 je schopn  s hnacího momentu trakčních motorů $4 \cdot M_{Mmax}$ při zapo it n  konstantní  uinnosti převodovky $\eta_{Pr} = 96\%$ pracovat do rychlosti 15 km/h s hnací silou $F_H = 137$ kN. Po překročení této rychlosti hnací síla vozidla klesá podle výkonového omezen . Před dosa en m maximálních otáček trakčního motoru došlo k přeřazení na 2. rychlostní stupeň a tím ke snížení otáček elektromotoru na hodnotu cca 1350 min⁻¹. Při nichž, jak vyplv  z charakteristiky trakčního motoru viz **obr. 5**, je hnací síla opět limitována v konov m omezen m. Simulací rozjezdu vozidla podle tohoto j zdn ho režimu bylo dosaženo využití hnacího výkonu elektromotorů j i  od rychlosti 15 km/h, viz **obr. 7**. Tím byl

zrealizován nejrychlejší rozjezd vozidla, viz **obr. 8**. Plně obsazené vozidlo však vykazuje velké rozjezdové zrychlení $a_x = 2,2 \text{ m/s}^2$. Maximální rychlost 120 km/h byla dosažena po 70,58 sekundách, tj. zkrácení doby rozjezdu činí cca 4%, ale úspora energie potřebné pro trakci (cca 0,3 %) prakticky je zanedbatelná.



Obr. 7 Průběhy výkonu a příkonu vozidla BEMU s konvenční a s nekonvenční, řaditelnou nápravovou převodovkou

Fig. 7 Courses of power and input power of a BEMU vehicle with conventional and non-conventional shift axle gearbox



Obr. 8 Časový tachogram vozidla BEMU při posuzovaných režimech – L3, L4, L5

Fig. 8 Time speed-diagram of the BEMU vehicle during assessed moving offs – L3, L4, L5

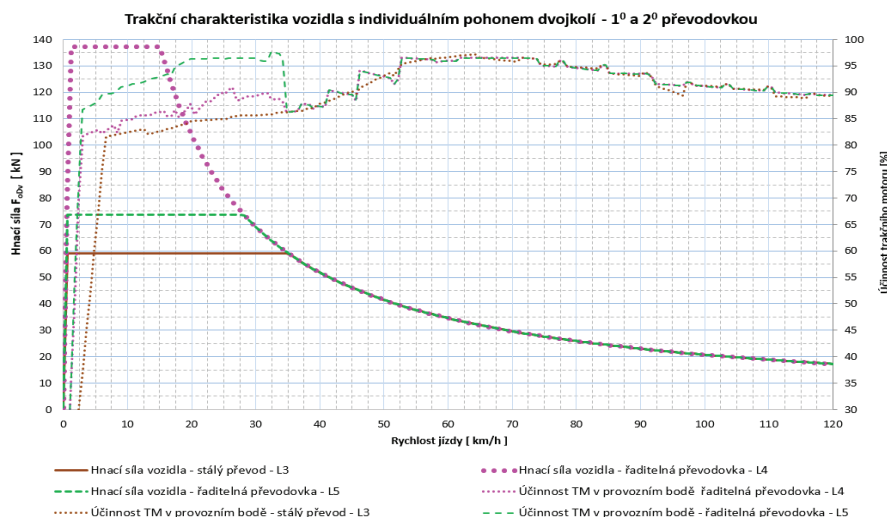
Úsporný režim jízdy při použití dvoustupňové řaditelné převodovky je dokumentován tečkovanou zelenou křivkou „Hnací síla vozidla – řaditelná převodovka – L5“, kdy se do rychlosti 35 km/h vozidlo opět rozjíždí na 1. rychlostní stupeň ($i_{C_{ad}}$), ale do rychlosti 27 km/h vozidlo pracuje pouze se jmenovitým hnacím momentem elektromotorů $4.M_{Mjm} = 2300 \text{ Nm}$. V této fázi rozjezdu vykazuje vozidlo konstantní hnací sílu $F_H = 73,8 \text{ kN}$, viz **obr. 6**. Po překročení této rychlosti přechází na výkonové omezení a hnací síla hyperbolicky klesá. Při rychlosti cca 35 km je opět přeřazeno na 2. rychlostní stupeň ($i_{C_{kin}}$). Plně obsazené vozidlo vykazuje přijatelné rozjezdové zrychlení $a_x = 1,17 \text{ m/s}^2$. Maximální rychlosti 120 km/h bylo dosaženo za 72,16 sekund, tzn., že zkrácení doby rozjezdu oproti vozidlu s konvenční převodovkou činí cca 0,5%, ale úspora energie potřebné pro trakci je

cca 8,5%. To dokumentuje porovnaní průběhu výkonnosti a p ııkonu vozidla pí simulovaných rozjezdch, viz **obr. 7**, kde p rav e rozdiel medzi k ıvkami výkonnosti (tečkované čary) a p ııkonu (pln e čary) vykazuje u zelených průběhů „řaditeln a převodovka – L5“ nejmen ı rozdiel.

3 ZÁVĚR

V porovnaní s jednostupňovou nápravovou převodovkou se stálým převodem má nápravová doustupňov a „řaditeln a“ převodovka de facto t ıı pracovní stupně (1^0 - i_{Cad} , 2^0 - i_{CKin} a neutrál) a lze s ní dosáhnout:

- lep ıı využití u ıinnosti trakčního motoru pí akceleraci vozidla v oblasti ni ııch rychlostí, pí zachov anı srovnateln e nebo nepatrn e v ıııı hna ı síly vozidla, viz **obr. 9**.
- možnost zařadit neutrální stupeň na některém z hna ıch dvojkolí. Tím lze pí jízdě ni ııı traťovou rychlostí ($V_{trať} < V_{max}$) optimalizovat velikost pot řebn e hna ı síly vozidla - F_{oDv} . Odpojením jednoho í dvo u trakčních motorů lze na regionální trati pí jízdě ni ııı rychlostí snížit součinitele rotačních hmot vozidla. Tím lze snížit výsledný odpor vozidla a u e třit hna ı energii.
- pí provozním brzdění pomocí EDB (v ıemi čtyřmi motory) je lep ıı využití optimální oblasti u ıinnosti rekuperace trakčního pohonu, což zlep ıuje rekuperaci energie.



Obř. 9 Průběhy u ıinnosti trakčních motorů pí posuzovaných re ıimech – L3, L4 a L5

Fig. 9 Courses of efficiency of traction motors in the assessed modes – L3, L4 and L5

Těmito kroky lze pí znalosti „mapy u ıinnosti“ trakčního pohonu a pí inteligentním řızen ı trakčních pohonů lze u LKV dosáhnout na regionálních tratích ni ıııch provozních a energetických nákladů. Využitím dvo u rozdieln ych řaditeln ych převodů lze optimalizovat nejen velikost hna ıho momentu, ale i velikost normálového modulu ozubení a nam ah anı vstupních čelních soukolí. Nápravová převodovka s předlohou v hřidel ı vykazuje oproti jednostupňov e nápravové převodovce s jedním čelním soukolím pí přenosu stejn e ta n e síly dvojkolí nejen men ıı reakční síly v závěsce převodovky, ale i men ıı dynamické síly v čelním ozubení, které vznikají odvalov anı pastorku v ıstupn ıho soukolí po velkém ozubeném kole v d ısledku k ıv anı nápravové převodovky. V ııe uvedené v ıhody mohou vést k v ırazn emu prodloužení servisních intervalů, ke snížení nákladů na u dr bu a t edy k prodloužení životnosti nápravové převodovky. Teoreticky v porovnaní s jednostupňovou převodovkou až na cca dvojnásobek. Tím by se mohly vykompenzovat v ıııı pořızovac ı

náklady individuálního pohonu dvojkolí s dvoustupňovou „řaditelnou“ převodovkou. Posouzení vhodného konstrukčního řešení těchto převodovek bude předmětem dalšího výzkumu v rámci projektu No TE01020054.

Literatura

[1] Kolář, J.: Konstrukční studie částečně nízkopodlažního kolejového autobusu s hybridním pohonem, In: PRORAIL 2015 - XXII. Mezinárodní konference Súčasných problémů v koľajových vozidlách – Zborník prednášok Diel I. Žilina: VTS pri ŽU, 2015. pp. 267-274. ISBN 978-80-89276-48-6. [2] Kolář, J.: Konstrukční studie částečně nízkopodlažního kolejového elektrobuse, In: Zborník prednášok I. - XXIV. Mezinárodní konference - Súčasných problémů v koľajových vozidlách. Žilina: VTS pri ŽU, 2019. p. 317-324. ISBN 978-80-89276-58-5. [3] Kolář, J.: Moderní vozidla pro regionální železnice, In: NTŽ 3/2023, ISSN 1210-3942.

Acknowledgments

The paper was created with the financial support of the Technology Agency of the Czech Republic, project No TE01020054 "Božek Vehicle Engineering - National Competence Center".



Resumé

Príspevok predstavuje koncepciu pohonu štyrňápravového vozidla BEMU 70 a zaoberá sa možnosťami využitia dvoustupňových řaditelných nápravových převodovek v trakčním pohone dvojkolí těchto lehkých kolejových vozidel (LKV) s elektrickým přenosem výkonu. Vyhodnocuje možné úspory trakční energie při použití řaditelné nápravové převodovky v elektrickém pohone LKV určených pro železniční regionální osobní dopravu. Z příspěvku vyplývá, že při vhodném řízení potřebné hnací síly vozidla pomocí dvoustupňové řaditelné nápravové převodovky, viz **obr. 9** průběh „Hnací síla – řaditelná převodovka – L5“, lze lépe využít pole účinnosti trakčního pohonu, viz **obr. 9** průběh „Účinnost TM provozním bodě – řaditelná převodovka – L5“. Použití tříhřídelové převodovky umožňuje snížit dynamické namáhání čelních ozubených kol a prodloužit tak životnost nápravové převodovky.

Summary

The paper presents the concept of drive the BEMU 70 four-axle vehicle and deals with the possibilities of using two-stage shifting axle gearbox in the wheelset traction drive of these light rail vehicles (LKV) with electric power transmission. It evaluates possible savings in traction energy when using a shifting axle gearbox in the electric drive of LKVs intended for railway regional passenger transport. It follows from the contribution that with the appropriate control of the necessary driving force of the vehicle with the help of a two-stage shifting axle transmission, see **fig. 9** line „Hnací síla – řaditelná převodovka – L5“, the efficiency field of the traction drive can be better utilized, see **fig. 9** line "Účinnost TM provozním bodě – řaditelná převodovka – L5". The application of a three-shaft gearbox makes it possible to reduce the dynamic stress on the spur gearings and this way extend the service life of the axle gearbox.