

VÝHODY POUŽITÍ DVOURYCHLOSTNÍCH PŘEVODOVEK V POHONU DVOJKOLÍ VOZIDEL BEMU

ADVANTAGES OF USING TWO-SPEED GEARBOXES IN WHEELSET DRIVES OF RAIL VEHICLES BEMU

Josef KOLÁŘ¹

e-ISBN: 978-80-7560-564-1
DOI: 10.46585/spkv20252668

ISSN: 3029-8342



Abstrakt

Článek se zabývá přínosy použití dvourychlostních převodovek v individuálním pohonu dvojkolí u regionálních vozidel BEMU. Analyzuje konstrukční možnosti použití příčného pohonu v trakčním dvounápravovém podvozku. Ukazuje možnosti energetické úspory trakční energie dosažitelné při vhodném řízení jízdy regionálního vozidla typu BEMU při použití asynchronního nebo synchronního trakčního motoru a jednostupňové nebo dvourychlostní převodovky.

Klíčová slova

čtyřnápravové vozidlo BEMU, individuální příčný pohon dvojkolí, účinnost trakčního motoru, jednostupňová převodovka, dvoustupňová řaditelná převodovka

Abstract

The article deals with the benefits of using two-speed gearboxes in individual wheel set drive in regional BEMU vehicles. It analyzes the design possibilities of using a transverse drive in a traction two-axle chassis. It shows the possibilities of energy saving of traction energy achievable with appropriate driving control of a regional BEMU vehicle using an asynchronous or synchronous traction motor and a single-speed or two-speed gearbox.

Keywords

four-axle BEMU vehicle, transverse wheelset drive, traction motor efficiency, single-speed gearbox, two-speed shifting gearbox

1 ÚVOD

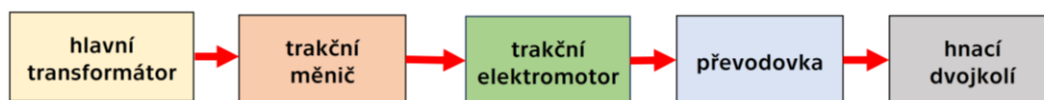
V České republice je v současnosti elektrifikováno cca 35 % provozované železniční sítě. Průměr v EU je 57 %. Správou železnic je v současnosti zpracována koncepce přechodu na jednotnou napájecí síť 25kV/50 Hz a jsou prověřovány možnosti dalších vhodných úseků k elektrifikaci celostátní železniční sítě. Přes tyto investiční plány lze konstatovat, že větší část železničních regionálních tratí s nápravovým zatížením $A_0 \leq 20$ tun a s traťovými rychlostmi $V_T \leq 70$ km/h zůstane v ČR i po roce 2045 neelektrifikovaná. Zásadní technologickou výzvou je odpověď na otázku: „S jakými trakčními vozidly budeme na těchto

¹ doc. Ing. Josef Kolář, CSc., © 0000-0002-4648-6515. České vysoké učení technické v Praze, Strojní fakulta, Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel. Technická 4, 160 00 Praha 6, Česká republika, tel.: +420 224 352 493, e-mail: josef.kolar@fs.cvut.cz

úsecích neelektrifikovaných tratí zajišťovat energeticky a ekologicky šetrnou regionální osobní a nákladní dopravu?“

V současnosti jsou neelektrifikované úseky obsluhovány především kolejovými vozidly nezávislé, tj. motorové (dieselové) trakce. Jejich efektivní náhradu novými vozidly elektrické nezávislé trakce omezují limity v akumulaci energie. Jak baterie, tak vodík totiž vykazují relativně nízké hustoty uložené energie na jednotku hmotnosti a objemu. Navíc napájecí infrastruktura pro „vodíkovou“ železnici téměř neexistuje a její vybudování si vyžádá nemalé investiční náklady. Pro realizaci osobní dopravy na kratších neelektrifikovaných úsecích železniční sítě ČR se nabízí použít aku-trolejová vozidla, typu BEMU 70, tj. vozidlo s kapacitou 70 míst k sezení nebo lehká kolejová vozidla typu Tram–Train (aku-trolejová nebo diesel-trolejová) [1], [2]. Pro delší, neelektrifikované úseky regionálních železničních tratí je vhodné uvažovat o využití současných elektrických lokomotiv s připojeným Energy-Tendrem nebo v osobní dopravě o nových vozidlech na vodíkový pohon, např. typu HEMU. Případně se nabízí otázka, zda lze použít modernizovaná vozidla dieselové trakce s elektrickým přenosem výkonu, spalující „uhlíkově neutrální“ syntetická paliva, bude-li jich (vozidel i paliv) na trhu dostatek. Výhodou tohoto „uhlíkově neutrálního“ řešení by bylo, že bychom nemuseli zásadně budovat novou distribuční síť na zásobování palivem, neboť by šlo použít stávající čerpací stanice. Toto řešení vyžaduje „pouze“ investice do zařízení na výrobu syntetických paliv.

Základními koncepčními studiemi těchto kolejových vozidel se zabýváme v rámci řešení projektu TAČR No.TN02000054 "Bozek Vehicle Engineering - National Competence Center". S ohledem na hospodárnost a efektivnost provozu by tato hnací železniční vozidla měla používat elektrický přenos výkonu. Koncepční uspořádání kolejových vozidel, nastavení základních technických parametrů pohonu a jeho řízení by mělo být s ohledem na minimalizaci spotřeby energie v železniční dopravě přizpůsobeno směrovému, sklonovému a rychlostnímu profilu projížděné trati a provozním režimům vozidla. Spotřeba trakční energie a okamžitá účinnost jednotlivých komponent pohonu kolejového vozidla mimo jiné výrazně závisí na rychlosti jízdy a požadované trakční síle, respektive otáčkách a momentu trakčních motorů, jejichž průběhy se napříč různými provozními stavy podstatně liší. Tyto aspekty je nutné vhodně respektovat při návrhu lehkých kolejových vozidel pro regionální dopravu a jejich pohonu.



Obr. 1 Blokové schéma trakčního pohonu dvojkolí

Obr. 1 dokumentuje schéma jednotlivých komponent trakčního pohonu dvojkolí. Výslednou účinnost trakčního pohonu η_{TP} lze vyjádřit součinem účinnosti elektrické části pohonu $\eta_{E\check{c}}$ a mechanické části $\eta_{M\check{c}}$ pohonu dvojkolí:

$$\eta_C = \eta_{E\check{c}} \cdot \eta_{M\check{c}} = \eta_{HT} \cdot \eta_M \cdot \eta_{TM} \cdot \eta_{Př}, \quad (1)$$

kde η_{HT} je účinnost hlavního transformátoru, η_M je účinnost trakčního měniče, η_{TM} je účinnost trakčního elektromotoru a $\eta_{Př}$ je účinnost použité převodovky (včetně účinnosti vstupní „spojky“ mezi trakčním motorem a pastorkem převodovky, případně i výstupní spojky či duté kloubové hřídele mezi převodovkou a dvojkolím). Pro návrh trakční charakteristiky vozidla a způsobu efektivního řízení pohonu je vhodné, aby projektant pohonu vozidla mohl využít mapy účinnosti jednotlivých komponent pohonu, neboť musí rozhodnout o:

- typu dvounápravového podvozku, tj. s **vnitřním** nebo s **vnějším** rámem,
- uspořádání pohonu dvojkolí: – individuální **$B_0'B_0'$** nebo **$(1A)(A1)$** či skupinový **$B'B'$** ,
– využití adhezní tíhy vozidla pro pohon a pro brzdu,
– závěskový, tj. částečně odpružený nebo plně odpružený pohon,
- typu střídavého trakčního elektromotoru **T_{Em}** – třífázový asynchronní (**ASM**) či synchronní (**PMSM**),
- řešení převodovky – **konvenční jednostupňová** (i_{ckin}) či **dvourychlostní** převodovka (i_{cad} , i_{ckin}),
- způsobu řešení regulace trakčního výkonu vozidla při rozjezdu nebo při částečném zatížení,
- způsobu řešení regulace brzděné síly a výkonu vozidla $\Rightarrow$ míra uplatnění rekuperace energie.

2 ANALÝZA KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ POHONU DVOJKOLÍ

Základní informace o způsobech řešení pohonů dvojkolí u kolejových vozidel, získané autorem tohoto příspěvku v rámci řešení úkolů CKDV, byly publikovány např. v [3]. Z nich vyplývá, že trakční pohony u lehkých kolejových vozidel (LKV) můžeme rozdělit podle orientace trakčních elektromotorů do dvou koncepčních uspořádání:

- s T_{Em} kolmým na podélnou osu dvounápravového podvozku, tj. příčný pohon
- s T_{Em} rovnoběžným s podélnou osou dvounápravového podvozku, tj. podélný pohon

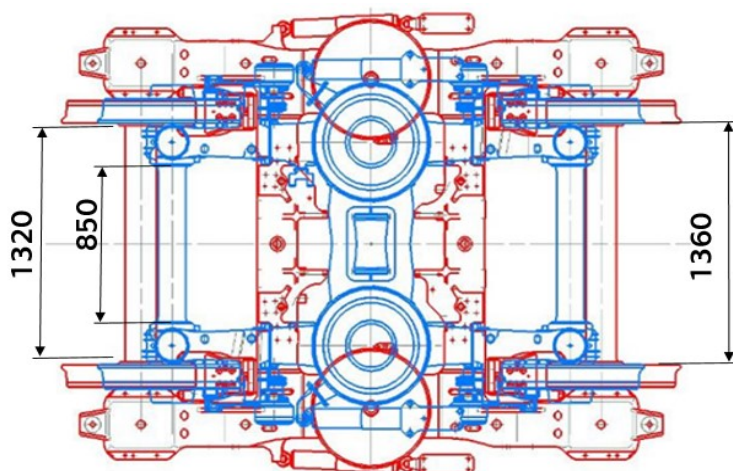
U příčného individuálního pohonu dvojkolí se v převodovkách používají čelní soukolí. U podélného pohonu je nutné použít kuželová, případně hypoidní soukolí nebo kombinaci čelních a kuželových soukolí. Průměrná účinnost převodovek je u jednostupňové převodovky s jedním čelním soukolím $\eta_{Př} = 98 \%$. U převodovky s vloženým kolem nebo s předlohou hřídelí je $\eta_{Př} = 96 \%$. Průměrná účinnost je při použití kuželové převodovky s jedním soukolím (kuželovým nebo hypoidním) $\eta_{Př} = 94\text{--}95 \%$. V případě u kuželově-čelní nebo čelně-kuželové převodovky $\eta_{Př} = 93 \%$. Z těchto poznatků je patrné, že projektant pohonu by pro zlepšení účinnosti pohonu měl upřednostňovat použití příčného pohonu dvojkolí.

2.1 Analýza možnosti zástavby příčného pohonu dvojkolí do podvozku s vnitřním rámem

V rámci projektu TAČR No.TN02000054 byla provedena rešerše dvounápravových trakčních podvozků používaných pro regionální kolejová vozidla typu BEMU či HEMU a analýza prostorových možností zástavby individuálního trakčního pohonu do dvounápravového trakčního podvozku.

Z ní vyplynuly následující závěry:

- u kolejových vozidel pro regionální a příměstskou dopravu se s ohledem na úsporu hmotnosti pojezdu a snížení setrvačných účinků stále více uplatňuje použití dvounápravových trakčních podvozků s vnitřním rámem a menším rozvorem (snížení z 2,3 na 2,1 m, pro metro až na 1,8 m);
- použití vnitřního rámu u trakčního dvojkolí s rozkolím 1360 mm výrazně omezuje příčný rozměr pro zástavbu pohonu dvojkolí, tedy trakčního motoru a převodovky, neboť konstrukce trakčního pohonu nesmí přesáhnout příčnou bázi cca 850 mm, viz obr. 2. Podvozky používají částečně odpružený, tzv. závěskový pohon, u něhož je propojení TM s $Př$ zpravidla realizováno pomocí dvojité sférické zubové spojky. Nápravové převodovky jsou řešeny s konstantním stálým převodem. Moderní provozovaná vozidla zatím nevyužívají dvourychlostní převodovky, tj. 2^o řaditelné převodovky.



Obr. 2 Porovnání půdorysu podvozků s vnějším a vnitřním rámem [10] – graficky upraven (doplnění kót)

Lze očekávat, že příčná báze 850 mm umožní u částečně odpruženého pohonu dvojkolí realizovaného **ASM** s cizí ventilací instalovat pro 2^o převodovku trvalý trakční výkon cca 250 kW/dvojkolí. U motoru s vlastní ventilací lze očekávat, že trvalý trakční výkon bude omezen na hranici 150 ÷ 160 kW.

Tento trvalý výkon 4 x 160 kW je pro potřeby čtyřnápravového vozidla BEMU 70 s maximální provozní rychlostí 120 km/h dostačující, blíže viz [5]. Pro případnou instalaci vyššího trvalého výkonu (do 400 kW/dvojkolí) do podvozku s vnitřním rámem by bylo nutné použít trakční **PMSM** s dutou kotvou a 2^o řaditelnou nápravovou převodovku propojit s trakčním motorem s pomocí kloubového hřídele, vybaveného v dutině kotvy motoru sférickou zubovou spojkou a na straně u převodovky diskovou pružnou spojkou, viz [10].

2.2 Návrh koncepce dvourychlostní převodovky pro příčný pohon dvojkolí

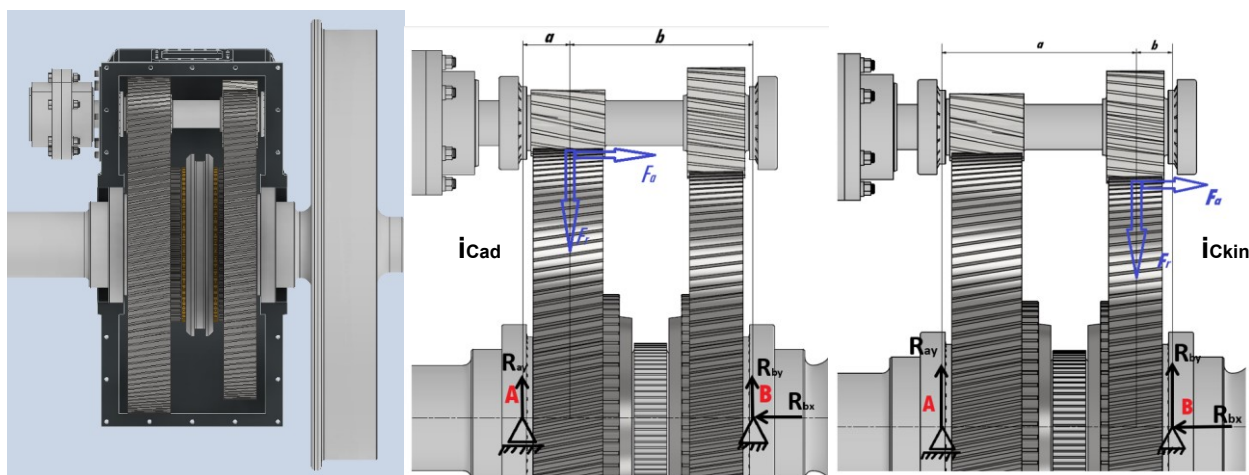
Na konferenci PRORAIL 2023 byla v příspěvku [5] prezentována studie koncepce řešení kolejového vozidla pro regionální dopravu BEMU 70 a základní koncept pohonu vozidla. Dále byla v tomto příspěvku na základě simulačních výpočtů jízdy vozidla BEMU 70 v jednoduchém jízdním cyklu provedena analýza úspory trakční energie při rozjezdu při použití individuálního příčného pohonu dvojkolí třífázovým asynchronním elektromotorem pohánějícím přes dvojitou sférickou zubovou spojkou nápravovou převodovku v provedení:

- s klasickou jednostupňovou převodovkou se stálým převodem – i_{Ckin}
- s dvourychlostní, tj. 2^o řaditelnou převodovkou s převody – ($1^0 - i_{Cad}$, $2^0 - i_{Ckin}$)

V závěru příspěvku [5] byly stručně teoreticky zhodnoceny možné ekonomické přínosy z použití 2^o řaditelných převodovek v individuálním pohonu dvojkolí a bylo konstatováno, že posouzení vhodného konstrukčního řešení dvourychlostních převodovek bude předmětem dalšího výzkumu v rámci projektu TAČR No. TN02000054. Tyto základní výzkumné práce probíhají ve dvou rovinách.

První je soustředěna na kvalifikované posouzení konceptu konstrukčního řešení nápravové převodovky z pohledu návrhu čelních soukolí jednotlivých převodů ($1^0 - i_{Cad}$, $2^0 - i_{Ckin}$) a možného technického provedení – převodovka dvouhřídelová, viz obr. 3 [7], nebo s předlohou hřídelí, viz obr. 4 [8]. V souvislosti s konstrukčním řešením převodovky je posuzován i koncept řešení a umístění řadicí synchronizační spojky.

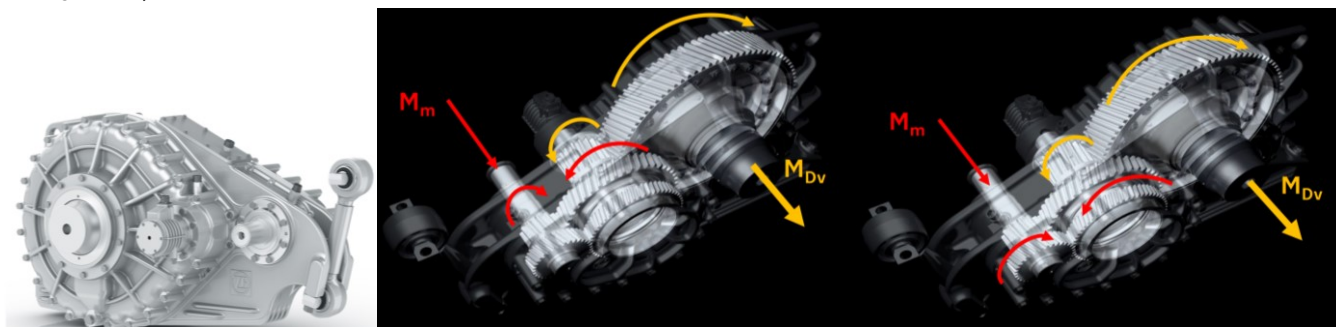
Z hlediska dosažení nejvyšší účinnosti převodovky by bylo teoreticky vhodné použít v příčném individuálním pohonu dvojkolí pouze dvouhřídelovou převodovku, neboť ta vykazuje pouze dvě čelní soukolí (i_{Cad} , i_{Ckin}), vždy jedno v silovém záběru, a tedy účinnost cca 97,5 %. Její konstrukční řešení je však výrazně závislé na velikosti převodového stupně i_{Cad} . Na něm je závislé i umístění řadicí spojky – na vstupní nebo výstupní hřídel? Z hlediska rozměrů a dimenzování řadicí spojky by bylo vhodnější ji umístit na vstupní hřídel.



Obr. 3 Koncept dvouhřídelové dvourychlostní řaditelné převodovky [7]

Pro menší hodnoty převodu i_{Cad} lze teoreticky použít pastorek čelního soukolí s větším počtem zubů, např. $z_{1Cad} \geq 25$. Tím lze při použití normálního modulu čelního soukolí $m_n \geq 5$ mm dosáhnout větší průměr patní kružnice $D_{f1Cad} \geq 113$ mm. Tak obdržíme i větší vnitřní průměr náboje pastorku převodového stupně i_{Cad} . To by mohlo umožnit jeho uložení v jehlových ložiskách na vstupním hřídeli. Řešení s umístěním synchronizační řadicí spojky na vstupním hřídeli je jednodušší i z hlediska její případné opravy, neboť

po rozpojení dvojité sférické zubové spojky spojující hřídel elektromotoru a vstupní hřídel převodovky a po uvolnění jejího závěsu by byl z převodovky demontován pouze vstupní hřídel se dvěma pastorky a se synchronizační řadicí spojkou. Toto řešení je použitelné pro střídavé pohony dvojkolí jednotek s PMSM, kde $i_{Cad} \leq 4,5$.



Obr. 4 Dvourychlostní převodovka ZF Get 2 s předlohou [8], graficky upraven [5]

Pro příměstské a regionální vozidla či jednotky typu BEMU nebo HEMU používající elektromotory s maximálními provozními otáčkami $n_{TMmax} \geq 3\,500$ ot./min při maximální rychlosti na adhezní převod $V_{max(iad)} \leq 65$ km/h, nelze vzhledem k velikosti převodového stupně i_{Cad} a tedy k rozměrům patní kružnice pastorku $D_{f1Cad} \leq 100$ mm konstrukčně realizovat řadicí synchronizační spojku na vstupním hřídeli převodovky, neboť ten bude muset být konstrukčně řešen jako jeden obrobený výkovek se dvěma pevnými pastorky. Proto je nutné řadicí spojku umístit na osu nápravy dvojkolí, viz obr. 3. Toto řešení však klade požadavky na vysokou kvalitu a spolehlivost vnější synchronizační spojky, neboť její případná oprava by vyžadovala vyvázání trakčního dvojkolí z podvozku a následné rozlisování dvojkolí. Tato konstrukční úskalí patrně vysvětlují, proč nebyla dosud dvouhřídelová převodovka pro regionální kolejová vozidla vyprojektována.

Na trhu je výrobcům kolejových vozidel pro regionální a příměstskou železnici či metro nabízena firmou ZF Friedrichshafen AG pouze 2^o řaditelná převodovka ZF Get 2 s předlohou [8], viz obr. 4.

U ní jsou výsledné převodové poměry i_{Cad} , i_{CKin} rozděleny na dva dílčí převody. Rozjezdový převod $i_{Cad} = i_{12ad} \cdot i_{34}$ a kinematický převod $i_{CKin} = i_{12Kin} \cdot i_{34}$. Toto koncepční řešení se dvěma soukolími v silovém záběru sice vykazuje oproti dvouhřídelové převodovce o cca 2% nižší účinnost, avšak nabízí při stejném přenosu tažné síly dvojkolí T_{Dv} menší reakční sílu S v závěsce převodovky a menší dynamický moment v čelních soukolích M_{1dyn} , vyplývající z relativních kývavých pohybů nápravové převodovky kolem osy dvojkolí [6]. Toto hmotnější konstrukční řešení však umožňuje lépe optimalizovat počty zubů na pastorcích čelních soukolí.

U nápravové převodovky s předlohou je možné použít tato konstrukční řešení předlohy:

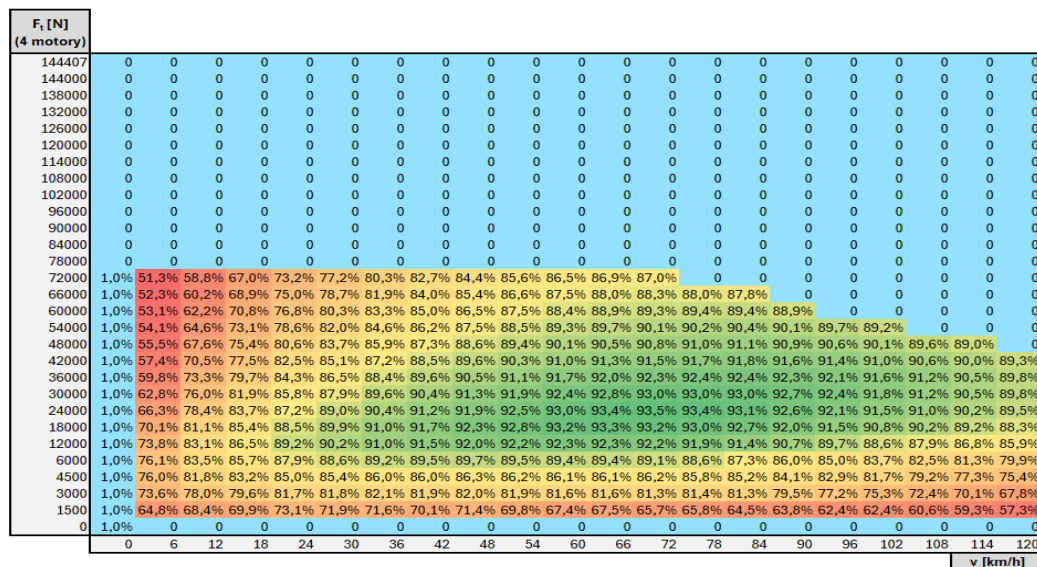
- plný předlohový hřídel, na němž jsou mezi nábojem vnější synchronizační spojky v jehlových ložiskách uložená velká kola čelních soukolí i_{12ad} , i_{12Kin} a na druhém konci je nalisovaný pastorek soukolí 34,
- velká kola čelních soukolí i_{12ad} , i_{12Kin} opatřená dutými náboji jsou na vnějších průměrech nábojů uložena v ložiskách ve skříní převodovky. V dutině nábojů velkých ozubených kol je vestavěná příčně posuvná řadicí spojka, která je připojena k duté hřídeli pastorku soukolí 34.

U obou konstrukčních řešení předlohy musí být dílčí převody i_{12ad} a i_{12Kin} korigovány na stejnou osovou vzdálenost, tj. $a_{w12ad} = a_{w12Kin}$. Stálý převod i_{34} je vhodné volit co největší, avšak s ohledem na maximální průměr hlavové kružnice D_{a4} a splnění požadavků na bezpečnou osovou vzdálenost trakčního motoru od osy nápravy.

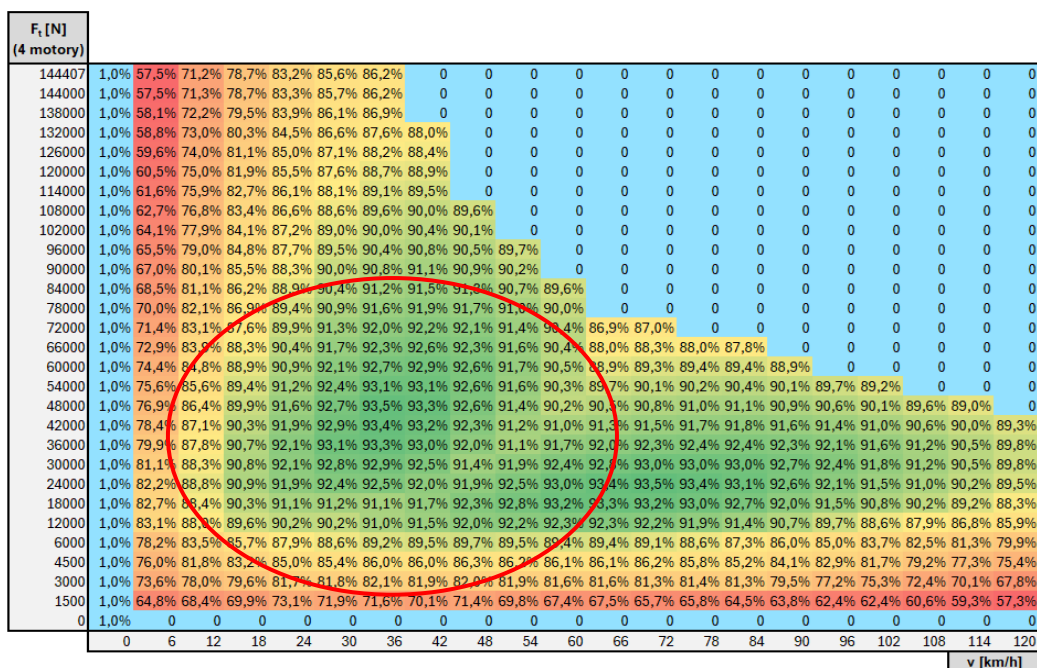
2.3 Vývoj výpočetního programu pro trakční výpočty

Druhá výzkumná rovina byla soustředěna do vývoje výpočetního programu v prostředí Matlab pro trakční výpočty jízdy regionálních kolejových vozidel s využitím map účinnosti jednotlivých komponent trakčního pohonu [9]. Vyvíjený program umožňuje vyhodnotit časový tachogram $v = f(t)$ a dráhový tachogram $v = f(s)$, průběh hnací síly $F_0 = f(s)$ a výkonu hnacího výkonu na dvojkolí $P_0 = f(s)$. Ze znalostí

zpoždění vlaku umožňuje vyvinout větší hnací sílu (až 144 kN) a tím i vyšší akceleraci, např. při jízdě do stoupání. V tomto provozním režimu však již nebude úspora energie tak výrazná, blíže viz [5] a [9].



Obr. 7 Mapa účinnosti v trakční charakteristice vozidla BEMU 70 s asynchronními motory (ASM) a konvenční převodovkou [9][1]



Obr. 8 Mapa účinnosti v trakční charakteristice vozidla BEMU 70 se synchronními motory (PMSM) a s 2^0 řaditelnou převodovkou [9][1]

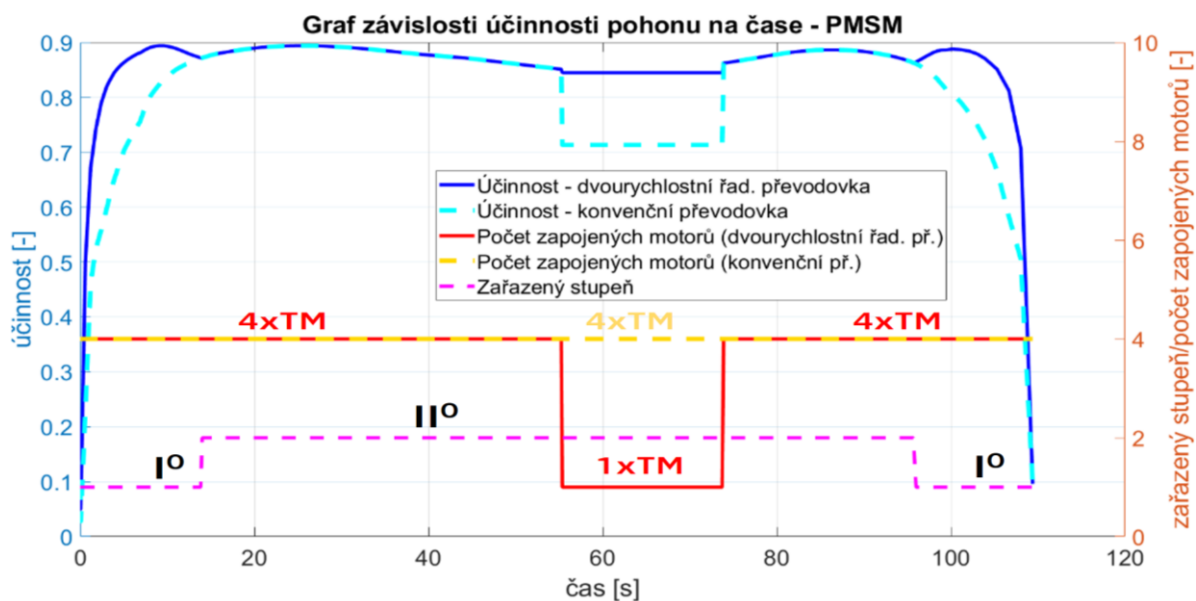
Výpočetní program zahrnuje simulaci „chytrého“ řízení asynchronních motorů (ASM) s možností jejich elektrického odpojení v okamžicích nízké výkonové potřeby vozidla za účelem dosažení vyšší účinnosti pohonu. U kolejového vozidla využívajícího synchronní motory (PMSM) umožňuje program simulaci odpojení motoru zařazením neutrálu ve 2^0 řadící převodovce, opět s cílem dosažení vyšší účinnosti pohonu vozidla. Program dopočítává energii spotřebovanou na urychlování rotačních hmot při přechodu z 2^0 (i_{CKin}) na 1^0 (i_{Cad}) a také v případě zařazování rychlostního stupně z neutrálu.

V rámci vývoje programu byly provedeny simulace jízdy vozidla BEMU 70, jak v jednoduchém jízdním cyklu na dráze 2,5 km a 4 km (rozjezd na $V_{max} = 120$ km/h, jízda V_{max} a brzdění do zastavení), tak i při simulaci jízdy na reálné trati Klatovy – Železná Ruda–Alžbětín [9]. Vozidlo při simulačních výpočtech pracovalo s nápravovými převodovkami s předlohou a konstantní účinností 96 %. Navržené převodové stupně byly $1^0 - i_{Cad} = 12,786$ a $2^0 - i_{CKin} = 6,675$. [9]

Tab. 1 Spotřeba energie při jednoduchém jízdním cyklu na úseku 2,5 km

Použitá převodovka	Odpojování PMSM [ano/ne]	Rozjezdové zrychlení a_{xroz} [m/s ²]	Spotřeba energie – ASM [kWh]	Spotřeba energie – PMSM [kWh]	Jízdní doba [s]
1 ⁰ konvenční- i_{CKin}	ne	1,2	9,56	9,11	110,8
2 ⁰ řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ne	1,2	9,02	8,77	110,8
2 ⁰ řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ano	1,2	----	8,94	110,8
1 ⁰ konvenční- i_{CKin}	ne	1	9,44	9,06	114,3
2 ⁰ řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ne	1	9,02	8,78	114,3
2 ⁰ řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ano	1	----	8,92	114,3

Z provedených simulací na jednoduchém jízdním cyklu s délkou úseku $L_u = 2,5$ km, viz tab. 1, byla při použití 2⁰ řaditelné převodovky potvrzena možnost energetické úspory cca 5 až 6 % oproti konvenční 1⁰ převodovce při použití ASM, predikovaná v [5], případně až $(9,56 - 8,77)/9,56 = 8,26$ % při použití PMSM místo ASM. Z tabulky dále vyplynulo, že odpojení tří PMSM po dosažení maximální rychlosti jízdy 120 km/h zařazením „neutrálu“ nepřineslo na tomto krátkém úseku trati oproti jízdě na 4 trakční motory energetickou úsporu, neboť pro použití EDB bylo nutné odpojené motory PMSM znovu roztočit a energie vynaložená na jejich rozběh byla nepatrně větší než energie uspořené.



Obr. 9 Výsledky porovnání účinnosti pohonu pro PMSM s dvěma typy převodovek [9]

Prodloužení jednoduchého úseku mezi dvěma zastávkami na $L_u = 4$ km nabídlo u vozidla s PMSM a dvoustupňovými řaditelnými převodovkami jet po dosažení maximální rychlosti 120 km/h delší část trati pouze na jeden PMSM a tím se při zachování stejné doby jízdy $t = 159,3$ s (jako u pohonu ASM s konvenční jednostupňovou převodovkou) podařilo dosáhnout menší spotřeby energie. Výsledky těchto simulací jízdy vozidla BEMU 70 s rozjezdovým zrychlením $a_{xroz} = 1,2$ m/s² byly následující:

- spotřeba energie u pohonu ASM s konvenční jednostupňovou převodovkou $E = 12,65$ kWh,
- spotřeba energie u pohonu PMSM s dvoustupňovou řaditelnou převodovkou při jízdě se všemi čtyřmi zapnutými motory na celém úseku $E = 12,17$ kWh
- spotřeba energie u pohonu PMSM s dvoustupňovou řaditelnou převodovkou při jízdě s krátkodobým odpojením tří trakčních motorů $E = 11,92$ kWh.

Z uvedeného příkladu vyplývá, že systém řízení odpojování trakčních motorů může přinést při „chytrém řízení“ pohonu vozidla energetické úspory, které mohou přinést určité prodloužení dojezdu vozidel BEMU 70 či HEMU 70 na neelektrifikovaných tratích.

Po odladění vytvořeného programu byly v [9] provedeny simulační výpočty jízdy vozidla BEMU na trati Klatovy – Železná Ruda–Alžbětín a zpět. Jedná se o trať dlouhou přibližně 49 km s výškovým rozdílem 326 m, kterou vozidlo projede za asi 55 min.

Pro simulace byly zvoleny hodnoty maximálního zrychlení $a_{xroz} = 1 \text{ m/s}^2$ se 100 % využitím výkonu při rozjezdu či brzdění vozidla. Vozidlo BEMU 70 bylo simulováno jako pohybující se hmotný bod, tj. délka vozidla byla zanedbána. Simulace byly provedeny v obou směrech jízdy, pro trakční motory (ASM, PMSM), pro oba druhy převodovek (konvenční, 2^o řaditelná). V případě PMSM byla provedena simulace jízdy jak v částečném zatížení na všechny čtyři motory, tak s možností odpojování TM, tedy s možností zařazení „neutrálu“ na některých trakčních motorech při nižší výkonové potřebě, např. při jízdě maximální povolenou traťovou rychlostí, nikoliv maximální provozní rychlostí vozidla v přímé trati či v klesání. Výsledky energetických spotřeb dokumentují tab. 2 a tab. 3.

Tab. 2 Spotřeba energie na trati Klatovy – Železná Ruda–Alžbětín

Použitá převodovka	Odpojování PMSM [ano/ne]	Rozjezdové zrychlení a_{xroz} [m/s ²]	Spotřeba energie – ASM [kWh]	Úspora energie ASM [kWh]	Spotřeba energie – PMSM [kWh]	Úspora energie PMSM [kWh]
1 ^o konvenční- i_{CKin}	ne	1	190,6	---	190,8	----
2 ^o řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ne	1	184,7	5,9	186,6	4,2
2 ^o řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ano	1	----	---	184	6,8

Tab. 3 Spotřeba energie na trati Železná Ruda–Alžbětín – Klatovy

Použitá převodovka	Odpojování PMSM [ano/ne]	Rozjezdové zrychlení a_{xroz} [m/s ²]	Spotřeba energie – ASM [kWh]	Úspora energie ASM [kWh]	Spotřeba energie – PMSM [kWh]	Úspora energie PMSM [kWh]
1 ^o konvenční- i_{CKin}	ne	1	124	---	122,8	----
2 ^o řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ne	1	117,7	6,3	118,4	4,4
2 ^o řaditelná - i_{Cad} , i_{CKin}	ano	1	----	---	117,3	5,5

Ve směru do Železné Rudy byly relativní úspory energie nejvyšší u synchronního motoru v režimu s odpojováním dílčích pohonů 6,8 kWh – viz tab. 2. Při jízdě do Klatov to byl motor asynchronní 6,3 kWh – viz tab. 3. Využití funkce „neutrálu“ v pohonu s PMSM se ukazuje u vozidel BEMU 70 jako energeticky opodstatněné, neboť pomohlo snížit spotřebu o cca 1%. Je však nutné upozornit, že je vykoupené častějším řazením, které by mohlo vést k opotřebení řadicí spojky. Přínos v úspoře energie a v případném snížení opotřebení řadicí spojky lze spatřit ve spolupráci „chytrého řízení pohonu vozidla“ s hybridním vlakovým zabezpečovačem ETCS – level 3. Pokud hnací vozidlo bude znát trať, svou polohu a znamení na návěstidlech, a tedy okamžitý rychlostní profil před ním, bude moci vhodně aplikovat řazení „neutrálu“ pouze tam, kde by po delší dobu nepotřebovalo plný výkon, tak by se četnost řazení mohla snížit a tím by se zvýšila životnost řadicí spojky.

3 ZÁVĚR

Pro potřeby regionální a příměstské dopravy, kde vzdálenosti mezi zastávkami jsou výrazně kratší a kde dochází k častému rozjíždění a brzdění „sólo“ vozidla či vlaku, nemusí být použito jednostupňové převodovky s konstantním převodem navrženým pro otáčkové využití trakčního motoru optimálním řešením, neboť při jízdě pod trolejí může být zákazníkem požadována maximální rychlost $V \geq 120 \text{ km/h}$ a pro jízdu v akumulátorovém režimu na neelektrifikované trati bude s ohledem na směrové a sklonové poměry trati maximální traťová rychlost $V \leq 80 \text{ km/h}$. V tomto režimu částečného využití výkonu a trakční síly bude při jízdě po regionální trati trakční pohon dvojkolí s jednostupňovou převodovkou pracovat v oblasti nižších účinností.

Pro zlepšení energetické spotřeby regionálních vozidel BEMU 70 či HEMU 70 se při uspořádání pohonu náprav B₀' B₀' nabízí s ohledem na instalovaný výkon na dvojkolí (jmenovitý trakční 160 kW, max. brzdný výkon EDB cca 225 kW) zvážit použití dvourychlostních řaditelných převodovek.

Jejich konstrukční provedení bude nutné důkladně analyzovat s ohledem na technické požadavky, provozní určení vozidla a možnosti jeho údržby, jak bylo naznačeno v tomto příspěvku. Technologické výzvy snižování energetické spotřeby v železniční dopravě, zvyšování komfortu pro cestující a dokončení poslední „míle“, tj. odstranění přepřahu hnacích kolejových vozidel či přestupu cestujících na neelektrifikované železniční síti si však tuto analýzu „moderní konstrukce“ úsporných pohonů dvousilových vozidel typu BEMU či hybridních vozidel typu HEMU jistě zaslouží.

Tento článek byl vytvořen s finanční podporou Technologické agentury České republiky, projekt č. TE02000054 „Božek Vehicle Engineering – National Competence Center“.



Literatura

- [1] KOLÁŘ, J. Modern railways for the 21st century – A challenge not only for designers. In: *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2022, s. 14–18. ISSN 2336-5382. ISBN 978-80-01-06996-7.
- [2] KOLÁŘ, J. Moderní vozidla pro regionální železnice. *Nová železniční technika*. Roč. 31 (2023), č. 3,4, s. 28, 8–31,18. ISSN 1210-3942.
- [3] KOLÁŘ, J. Design of a Wheelset Drive. *Transaction on Electrical Engineering*. Vol. 4 (2015), no. 1, s. 11–19. ISSN 1805-3386.
- [4] KOLÁŘ, J. Moderní individuální pohon kol a dvojkolí u tramvají a železničních vozidel. *Strojař*. Roč. 25 (2016), č. 1,2, s. 4–17. ISSN 1213-0591.
- [5] KOLÁŘ, J. Přínosy využití dvoustupňových řaditelných převodovek u lehkých kolejových vozidel s elektrickým přenosem výkonu. In: *Súčasné problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2023: XXVI. medzinárodná konferencia, zborník prednášok, diel I*. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2023, s. 255–262. ISBN 978-80-89276-61-5.
- [6] KOLÁŘ, J. Dynamika individuálního pohonu dvojkolí s nápravovou převodovkou. In: *Súčasné problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2011: XX. medzinárodná konferencia, zborník prednášok, diel II*. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2011, s. 139–148. ISBN 978-80-89276-31-8.
- [7] LIČMAN, F. *Nápravová převodovka pro lehké kolejové vozidlo BEMU 70*. Bakalářská práce. Praha: FS ČVUT, 2025.
- [8] ZF. *Get2 - Zweiganggetriebe: Wegweisend. Für einen geringeren Energieverbrauch*. Online. Dostupné z: https://www.zf.com/products/de/rail/products_64372.html. [citováno 2025-06-12]
- [9] MAJKUS, D. *Výpočetní program pro trakční výpočty regionálních kolejových vozidel s využitím účinnostních map*. Diplomová práce. Praha: FS ČVUT, 2025.
- [10] ZIKA, J. *Návrh pohonu podvozku elektrické vlakové jednotky s vnitřním rámem pomocí PMSM motoru s převodovou skříní*. Diplomová práce. Praha: FS ČVUT, 2024.

Zasláno / received: 16. 06. 2025, přijato / accepted: 10. 07. 2025, publikováno / published: 17. 09. 2025.

Příspěvek recenzovali / The paper was reviewed by: doc. Ing. Petr Heller, CSc. (Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní), doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D. (Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera).