

# ELECTRIC BUS DRIVE DEVELOPMENT

**Jaroslav Novák<sup>1</sup>, Zdeněk Novák<sup>2</sup>, Martin Novák<sup>3</sup>**

ČVUT v Praze, Fakulta strojní

[jaroslav.novak@fs.cvut.cz](mailto:jaroslav.novak@fs.cvut.cz), [zdenek.novak@fs.cvut.cz](mailto:zdenek.novak@fs.cvut.cz), [martin.novak@fs.cvut.cz](mailto:martin.novak@fs.cvut.cz)

## Abstrakt:

*Príspevek v úvodní části rekapituluje problematiku provozu silničních vozidel s akumulátorovým napájením. V další části jsou prezentovány aktivity Odboru elektrotechniky v rámci projektu MPO TRIO, který je zaměřen na vývoj nové koncepce pohonu elektrobuse pro MHD. Tyto aktivity jsou orientovány na oblast koncepčního návrhu pohonné soustavy akumulátor - měnič - motor - převodovka, počítačové simulace jízdy vozidla a testování parametrů akumulátorových článků. V závěrečné části příspěvku je uveden výhled dalších prací na projektu.*

## Klíčová slova:

*Elektrobus, akumulátor, trakční charakteristika, elektrický pohon, synchronní motor s permanentními magnety*

## Abstract:

*The paper recapitulates in first part the issue of the operation of road vehicles with accumulator supply. The activities of the Department of Electrical Engineering are presented in next part in the project MPO TRIO, which is focused on the development of a new concept of electric bus for public transport. These activities are focused on the area of concept of the drive system: battery system - inverter - motor - gearbox, computer simulation of vehicle driving and testing of battery cell parameters. The final part of the paper presents the further work on the project.*

## Keywords:

*Electric bus, accumulator, traction characteristic, electric drive, permanent magnets synchronous motor*

## 1 Úvod

I když při pohledu na všední dopravní ruch v České republice nejsou ještě patrné nějaké mimořádné kvalitativní změny, světové dění v oblasti dopravních technologií a řada aplikací objevujících se i u nás nenechává na pochybách, že stojíme na prahu nové éry dopravní techniky, která směřuje k elektrině. Efekty jsou zřejmé, kromě markantních ekologických přínosů se jedná o kvalitativně nové trakční vlastnosti vozidel, energetické úspory, komfort jízdy a v neposlední řadě eliminaci závislosti na tak nejistém surovinovém zdroji, jakým je ropa.

Základním impulsem je velmi rychlý rozvoj techniky lithiových akumulátorů, i když v této oblasti nebyla primárním motivem elektromobilita, ale spotřební komunikační a informační elektronika, především mobilní telefony, notebooky, tablety. V současnosti však již ve světovém měřítku převyšuje produkce akumulátorů pro elektromobilitu, měřená v kapacitě vyrobených akumulátorových článků, produkci článků právě pro spotřební elektroniku. Rozvoj techniky akumulátorů elektrické energie zaznamenává v posledních desetiletích rostoucí tempo. Zatímco v devadesátých letech 20. století byl univerzálně pro trakci k dispozici olovený akumulátor s hmotnostní hustotou energie do 30 Wh/kg, v roce 2010 jsou již k dispozici Li – ion akumulátory s hmotnostní hustotou energie okolo 80 Wh/kg, v roce 2015 dosahuje hmotnostní hustota energie těchto akumulátorů 150 Wh/kg, v roce 2017 jsou běžně k dispozici články s hmotnostní hustotou energie 200 Wh/kg, avšak jsou v tomto roce nabízeny i špičkové články s hmotnostní hustotou energie 250 až 350 Wh/kg.

Sledujeme-li v ČR rozvoj elektrických dopravních prostředků s akumulátorovým napájením, které nahrazují vozidla se spalovacími motory, je v současnosti nejrychleji se rozvíjející oblastí MHD, a to jak na úrovni výrobců, tak na úrovni dopravců. V ČR se výrobou elektrobuse a parciálních elektrobuse zabývají firmy ŠKODA

ELECTRIC, SOR a EKOVA. Velmi výrazné je tempo nasazování těchto vozidel v MHD. Elektrobuses jsou provozovány nebo je připravován jejich provoz v MHD například v Ostravě, Plzni, Hranicích na Moravě nebo Třinci. Období let 2017 a 2018 však signalizuje výrazný nástup parciálních elektrobuses, tedy trolejbusů s pomocným akumulátorovým napájením. Tato vozidla se v uvedeném období rozjela nebo rozjedou v převážné většině měst v ČR s trolejbusovou dopravou (Zlín, Teplice, Plzeň, Brno, České Budějovice, Opava, Hradec Králové, Pardubice, Ostrava, Mariánské Lázně). V těchto městech budou parciální elektrobuses využívány převážně na kratších úsecích linek bez trolejového vedení. Velmi zajímavá je v tomto směru situace v Praze, kde byla v loňském roce, přesně 45 let od ukončení provozu trolejbusů, otevřena v Prosecké ulici trolejbusová trať určená pro dobíjení parciálních elektrobuses, které jsou však koncipovány pro provoz s akumulátorovým napájením v převážné části trasy. V současnosti zde probíhá testovací provoz parciálního elektrobuse SOR TNB 12 na lince č. 140 – obr. 1.

V oblasti osobních automobilů oznámila firma ŠKODA AUTO zahájení prodeje elektromobilů v roce 2020, v roce 2025 firma plánuje nabídku až pěti typů elektrických vozidel, [7].



Obr. 1.: Parciální elektrobuse SOR TNB 12 v Prosecké ulici v Praze

## 2 Aktivita U12110 ve vývoji nové pohonné jednotky pro elektrobuse

V rámci programu MPO TRIO byl podpořen projekt zaměřený na vývoj nové pohonné soustavy pro elektrobuse SOR. Řešiteli projektu jsou firmy SOR a Rail electronics (dodavatel měničové výzbroje a řídicích systémů) a ČVUT v Praze, Fakulta strojní, především Odbor elektrotechniky U 12110.

Hlavní cíle projektu lze shrnout do následujících bodů:

1. Navrhnout nový koncept pohonu se zvýšenou účinností
2. Specifikovat hlavní parametry komponent pohonné řetězce
3. Simulačně ověřit a optimalizovat parametry komponent pohonné řetězce (simulace jízd vozidla v reálných trasách, vyhodnocení trakčních a energetických parametrů)
4. Specifikovat parametry akumulátorové baterie
5. Ověřit experimentálně vlastnosti uvažovaných akumulátorových článků a výsledky měření využít v simulačních výpočtech
6. Navrhnout konstrukci elektromechanického měniče
7. Navrhnout konstrukci a řízení měničové části
8. Navrhnout konstrukci akumulátorové výzbroje a systém batterymanagementu
9. Realizovat pohonnou jednotku a měničovou výzbroj
10. Provést laboratorní testy pohonné jednotky a měničové výzbroje
11. Instalovat pohonný systém, měničovou výzbroj a akumulátorovou baterii na vozidlo
12. Provést oživení pohonné soustavy
13. Provést rozsáhlé testování a vyhodnocení trakčních vlastností a energetiky provozu

Odbor elektrotechniky je zapojen zejména v aktivitách 1 až 5, 10 a 13 z výše uvedených bodů. V současnosti

jsou zpracovávány zejména aktivity dle bodů 1, 2, 3, připravuje se experimentální zázemí pro testování akumulátorových článků podle bodu 5.

### 3 Struktura pohonného řetězce elektrobusu

Struktura pohonného řetězce elektrobusu je relativně jednoduchá a standardní. Z akumulátorové baterie je přes energeticky dvojsměrný DC/DC měnič napájen vstupní stejnosměrný obvod trakčního střídače, který napájí třífázový elektromotor. Následuje soustava mechanického přenosu energie na nápravu.

DC/DC měnič slouží pro přizpůsobení napětí úrovní akumulátorové baterie a vstupu trakčního střídače, zároveň stabilizuje vstupní napětí střídače a eliminuje kolísání napětí akumulátorové baterie dané jejím stupněm vybití a úbytkem napětí na vnitřním odporu.

Trakční střídač má standardní zapojení, jedná se o třífázové můstkové zapojení se šesti IGBT a šesti zpětnými diodami. Trakční střídač formuje výstupní třífázovou soustavu pomocí šířkově pulsní modulace.

Novinkou oproti současným elektrobusem z produkce SOR, které jsou vybaveny trakčními asynchronními motory, je použití synchronního motoru s permanentními magnety. Použití synchronního motoru s permanentními magnety lze charakterizovat v následujících bodech:

- Menší rozměry a hmotnost oproti asynchronnímu motoru
- Větší momentová přetížitelnost oproti asynchronnímu motoru (až 3x)
- Okamžitá pohotovost k přechodu do elektrodynamické brzdy díky stálému nabuzení permanentními magnety
- Nutnost řešení odpojitelosti motorů pro případ poruch v trakčním obvodu (motor je stále nabuzen)

Dominantní je oproti asynchronnímu motoru snížení rozměrů a hmotnosti motoru. Některé odlišnosti jsou oproti asynchronnímu motoru i v řešení regulační struktury momentu a v nutnosti použití snímače úhlového natočení rotoru. Tato problematika byla již dříve zpracována na Odboru elektrotechniky, [9].

Zásadní koncepční otázkou, která ještě v současnosti nebyla dořešena, je koncepce přenosu mechanické energie z hřídele elektromotoru na nápravu. V každém případě je použita nápravová převodovka. Další struktura mechanického přenosu je zpracovávána ve dvou variantách:

1. Přenos z hřídele motoru přímo na vstup nápravové převodovky
2. Vložení řaditelné převodovky mezi motor a nápravovou převodovku

V případě použití řaditelné převodovky jsou uvažovány dva rychlostní stupně: první rychlostní stupeň s převodem vložené převodovky 1,8 a druhý rychlostní stupeň, kdy je moment přenášen z motoru přímo na vstup nápravové převodovky. Vložení řaditelné převodovky komplikuje konstrukci a zhoršuje jízdní vlastnosti – zejména se jedná o poklesy tažné a brzdné síly při řazení. Na druhou stranu použití řaditelné převodovky dává předpoklady k menším rozměrům a hmotnosti motoru, k dosažení vyšší stoupavosti vozidla a použití elektrické výzbroje na nižší napětíové hladině. Podporou pro rozhodnutí o finální variantě jsou průběžně získávané simulační výpočty jízdy vozidla v konkrétních trasách.

### 4 Specifikace hlavních parametrů pohonu

Při návrhu hlavních parametrů pohonu a motoru je nutno vyjít z hlavních požadavků na vozidlo a z dalších limitujících požadavků daných konstrukčními záležitostmi mechanické i elektrické části. Pro rychlý výpočet základních parametrů, zejména elektromotoru, byl na ČVUT FS sestaven výpočet parametrů v prostředí MS EXCEL. Výpočet předpokládá použití synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM). Jako vstupní veličiny výpočtu jsou zadávány tyto hodnoty:

- Mezní napětí  $U_{max}$ , které je limitováno v první řadě napětíovou hladinou výkonových polovodičových součástek trakčního měniče. Maximální napětí je limitované na 1000V z důvodů bezpečnosti a hlavně z důvodů legislativy, aby na zařízení mohli pracovat osoby proškolené pro nízké napětí.
- Celkový mechanický převod  $i_{pcelk}$  zadaný jako součin převodu nápravové převodovky a převodovky motoru.
- Celková účinnost převodu  $\eta_{pcelk}$  jako součin účinností obou dílčích převodovek.
- Poloměr kola vozidla  $r_k$ .

- Maximální rychlost vozidla  $V_{\max}$ .
- Poměrná rychlost přechodu motoru do odbuzování vztažená k maximální rychlosti vozidla  $n_{\text{pomodb}}$ .
- Poměrný úbytek napětí na impedanci R a L motoru  $\Delta u_{\text{RLpom}}$  při jmenovitých otáčkách a jmenovitém momentu.
- Hmotnost vozidla  $m_v$ .
- Stoupavost vozidla  $s$  v %.
- Zrychlení vozidla na maximálním stoupání  $a$ .
- Součet jízdních odporů vozidla  $F_j$  kromě odporu ze zrychlení a odporu ze stoupání (odpor vzduchu, odpor valení, odpory v komponentách vozidla...) – zadává se jako konstantní přibližná hodnota a platí přibližně pro rozjezd a nízké rychlosti.
- Součinitel rotačních hmot  $\xi$ .
- Přetížitelnost motoru  $p_M$  jako poměr maximálního a jmenovitého momentu.
- Jmenovitá účinnost motoru  $\eta_M$  – odhad.
- Jmenovitý účiník motoru  $\cos\varphi_n$  – odhad.
- Maximální a minimální napětí článku aku baterie  $U_{\text{clmax}}$  a  $U_{\text{clmin}}$ .
- Maximální napětí baterie  $U_{\text{batmax}}$ .
- Účinnost měniče  $\eta_T$  – odhad.

Výpočet je založen na definování jmenovitých hodnot veličin (napětí, proud, moment) motoru, se kterými je motor možno provozovat po neomezeně dlouhou dobu, a na mezní hodnoty veličin v přetížení, se kterými motor může pracovat po omezenou dobu. Pracuje-li motor v přetížení, je doba tohoto provozu závislá na velikosti okamžitého přetížení. Vzhledem ke struktuře vektorové regulace momentu motoru se ve výpočtu předpokládá rovnost hodnot momentové a proudové přetížitelnosti. Tato rovnost platí zcela exaktně v režimu bez odbuzování, v režimu odbuzování je tato rovnost přibližná.

Postup výpočtu je rozebrán v literatuře [1]. Na základě výpočtů bylo stanoveno 10 variant parametrů elektromotoru a převodovky a z těchto deseti variant byly vybrány dvě varianty prioritní, jedna s řaditelnou převodovkou, druhá s pevným přenosem točivého momentu z motoru na vstup nápravové převodovky. Varianty lze charakterizovat následujícími hlavními parametry:

Varianta s pevným převodem:

Jmenovitý výkon motoru	154 kW
Stoupavost vozidla	20 %
Hmotnost vozidla	18,4 t
Mezní napětí	1000 V
Maximální rychlost vozidla	80 km/h
Celkový převod (na nápravě)	6,19
Zrychlení na maximálním stoupání	0,1 m/s <sup>2</sup>
Jmenovitý moment motoru	1040 Nm
Jmenovité otáčky motoru	1416 ot/min
Maximální otáčky motoru	2832 ot/min
Jmenovité napětí motoru	392 V
Jmenovitý proud motoru	281 A
Momentová a proudová přetížitelnost	3,23

Varianta s řaditelnou převodovkou:

Jmenovitý výkon motoru	129 kW
Stoupavost vozidla	22 %
Hmotnost vozidla	18,4 t
Mezní napětí	750 V

Maximální rychlost vozidla	90 km/h
Celkový převod (na nápravě)	11,14
Zrychlení na maximálním stoupání	0,1 m/s <sup>-2</sup>
Jmenovitý moment motoru	704 Nm
Jmenovité otáčky motoru	1752 ot/min
Maximální otáčky motoru	3185 ot/min
Jmenovité napětí motoru	324 V
Jmenovitý proud motoru	285 A
Momentová a proudová přetížitelnost	3
Preferovaná rychlost řazení	50 km/h

Ze srovnání obou variant je u varianty s řaditelnou převodovkou příznivý nižší jmenovitý výkon motoru a zejména nižší napěťová hladina, což zlevňuje a zjednodušuje konstrukci elektrické výzbroje a vede k její vyšší účinnosti. Naproti tomu se jedná o variantu s komplikovanější mechanickou částí a s problematickými propady tažné a brzdné síly při řazení.

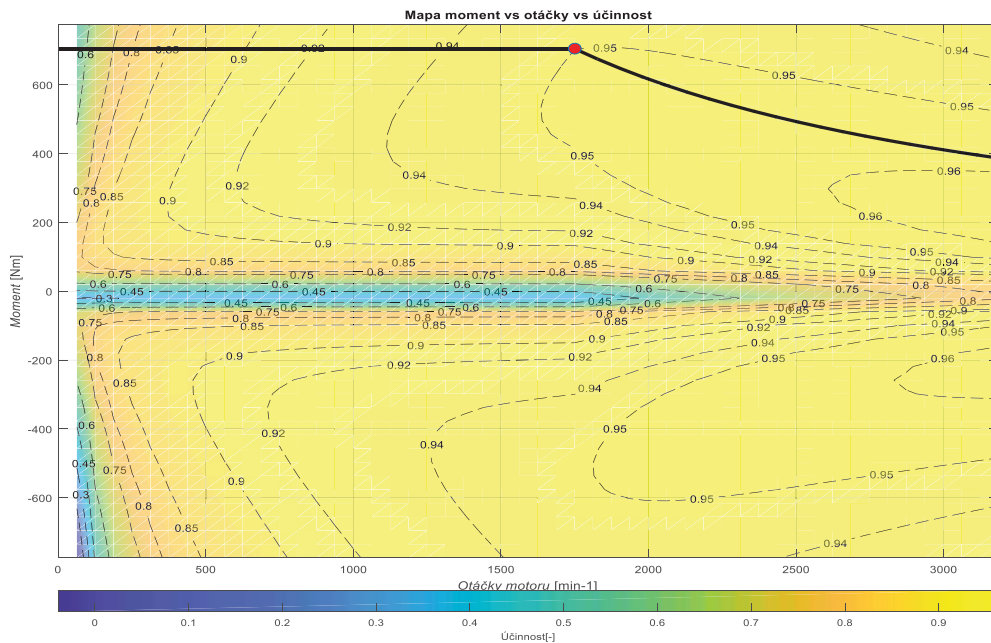
## 5 Simulační výpočty

Pro komplexní vyhodnocení trakčních a energetických vlastností pohonné soustavy byl na Odboru elektrotechniky sestaven simulační model výpočtu jízdy vozidla v definované trase. Vstupními parametry modelu jsou zejména:

- Parametry trasy (zastávky, rychlosti, sklony)
- Parametry vozidla a pohonné jednotky (hmotnost, parametry motoru, převodové poměry, jízdní odpory)

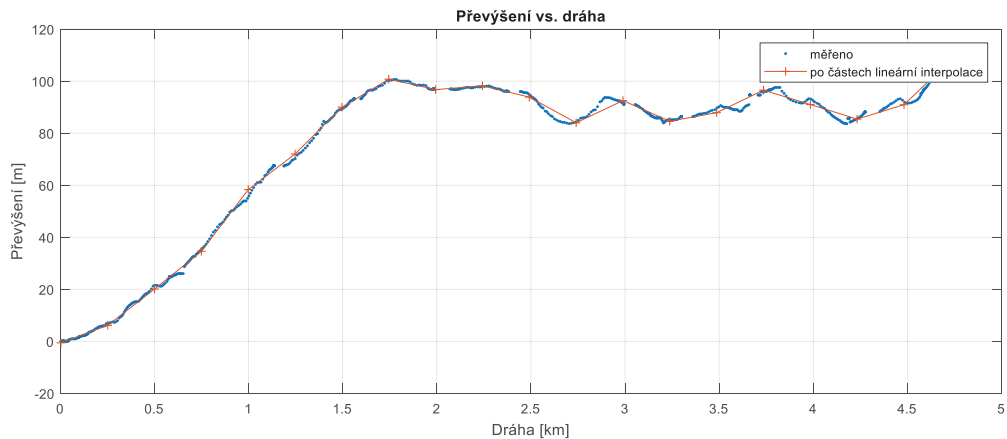
Celý výpočet je založen především na numerickém řešení pohybové rovnice vozidla.

Pro vyčíslení ztrát motoru je základním podkladem účinnostní mapa vypočtená ze štítkových hodnot motoru. Pro ilustraci je na obr. 2 znázorněna účinnostní mapa pro motor z varianty s řaditelnou převodovkou.



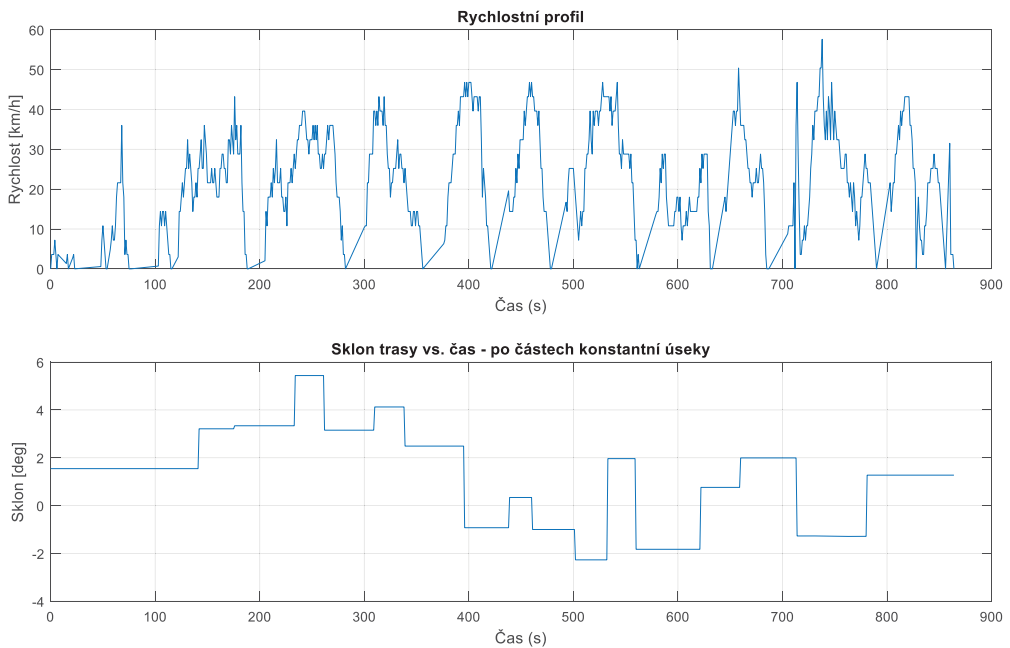
Obr. 2.: Účinnostní mapa motoru pro variantu s řaditelnou převodovkou

Poměrně komplikovaným problémem bylo určení detailních parametrů trasy, zejména sklonu. Výchozí data byla zjištěna měřením pomocí GPS. Z výškového profilu bylo spočítáno převýšení trasy a z něj sklon trasy. Sklon trasy byl určený z výškového profilu po částech lineární interpolací, rozdělením na 20 lineárních úseků. Pro další výpočty je sklon trasy v daném lineárním úseku považován za konstantní. Toto opatření je zavedeno pro eliminaci šumu v měřených datech nadmořské výšky. Na obr. 3 je uveden postup získání vstupních dat sklonu pro výpočet z dat naměřených.



Obr.3.: Příklad převýšení trasy a po částech lineární interpolace, která je dále použita pro výpočet sklonu trati, jízdní trasa “Na Knížecí” -> “Jinonice”, bus 137

Na obr. 4 Jsou uvedeny průběhy rychlostního profilu a po částech určené hodnoty sklonu trasy.



Obr.4.: Rychlostní profil v závislosti na čase a po částech lineární úseky sklonu trasy, jízdní trasa “Na Knížecí” -> “Jinonice”, bus 137

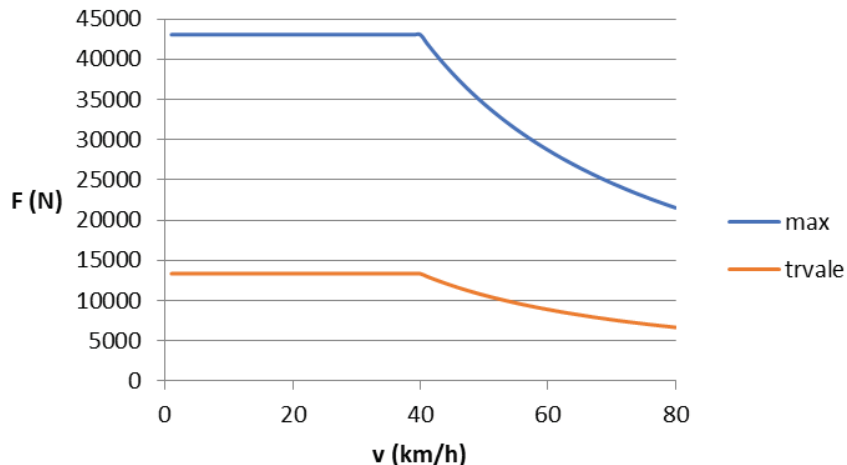
V tabulce Tab. 1 jsou uvedeny příklady výsledků výpočtů spotřeby energie na dvou trasách.

Trasa	Délka (km)	Spotřeba (kWh) bez uvažování sklonu trasy	Spotřeba (kWh/100km) Bez uvažování sklonu trasy	Spotřeba (kWh) s uvažováním sklonu trasy	Spotřeba (kWh /100km) s uvažováním sklonu trasy
Cyklus SORT 2	0,937	0,78	83,3	-	-
Na Knížecí -> Jinonice, linka 137	4,73	2,7	57	5,8	122,6
Na Knížecí -> Jinonice, linka 137, jízda 2	4,73	2,2	46,5	5,9	124,7
Na Knížecí -> Jinonice, linka 137, jízda 3	4,73	2,7	57	5,8	122,6
Na Knížecí -> Jinonice, linka 137, jízda 4	4,73	2,2	46,5	5,9	124,7
Smíchovské nádraží -> Sídliště Zbraslav	13,2	9,2	69,7	Sklon není k dispozici	Sklon není k dispozici

Tab. 1 Příklady výsledků simulačních výpočtů

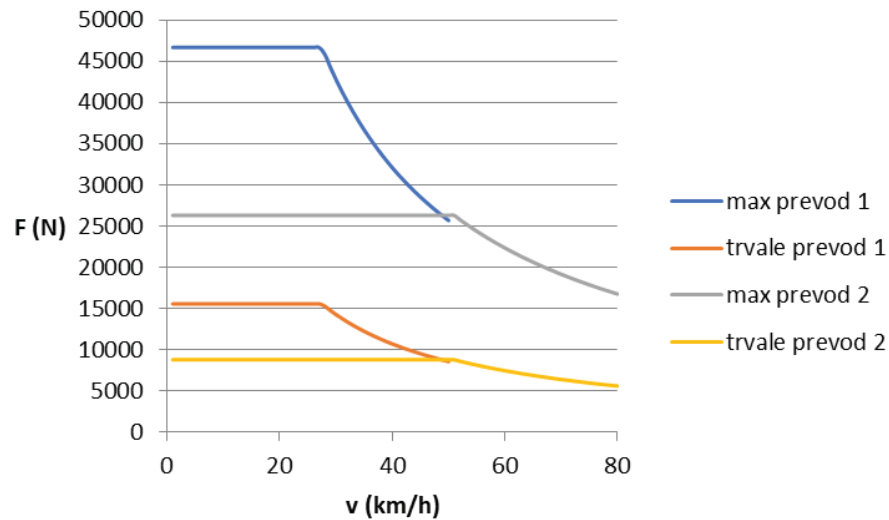
## 6 Závěr

V současnosti byly zahájeny simulační výpočty, které porovnávají trakční a energetické vlastnosti vozidel se dvěma uvedenými preferovanými variantami pohonné jednotky na různých trasách. Na obr. 5 a 6 jsou uvedeny průběhy trakčních charakteristik pro obě preferované varianty.



Obr.5.: Trakční charakteristiky vozidla s pohonnou jednotkou s pevným převodem

Jsou sledovány i varianty jízdy s pohonnou jednotkou s řaditelnou převodovkou, ale s minimalizací řazení či bez řazení a jízdou s trvale zařazeným stupněm 1 (městský provoz) nebo 2 (meziměstský provoz v rovinatém úseku trati). Zároveň se na základě energetických simulačních výpočtů připravuje specifikace akumulátorové baterie. V dalším kroku budou rovněž preferované varianty konzultovány s výrobcem motoru a ohledem na konstrukční záležitosti motorů.



Obr.6.: Trakční charakteristiky vozidla s pohonnou jednotkou s řaditelnou převodovkou

### Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci projektu MPO TRIO FV 30213 Výzkum a vývoj trakčního systému elektrobuse s vyšší účinností.

### Literatura

- [1] Novák, J., Novák M.: Vybrané problémy návrhu elektrického pohonu elektrobuse, Technická zpráva, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2018
- [2] Novák, M.: Dílčí zpráva k projektu MPO TRIO „č. FV30213 „Výzkum a vývoj trakčního systému elektrobuse s vyšší účinností“
- [3] Novák, J., Sadílek, O., Sýkora, P.: Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu, část 2. Časopis ELEKTRO 2016, roč. 26, č. 11 a 12, vydavatel FCC Public, Praha 2016, ISSN 0322-9025
- [4] Firemní materiály SOR
- [5] Firemní materiály Railelectronics
- [6] Firemní materiály VUES
- [7] [www.skoda-auto.cz](http://www.skoda-auto.cz)
- [8] Hinčica, L: Nenápadný návrat trolejbusů do Prahy, časopis Československý dopravák, roč. XIV., č. 5, vydavatel MH Development s.r.o., Ostrava 2017, ISSN 1804-2309
- [9] Novák, J.: Regulační struktura momentu pro trakční synchronní motor s permanentními magnety, Technická zpráva pro firmu Railelectronic, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Praha 2013





**Selected article from**  
**Tento dokument byl publikován ve sborníku**

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky,  
automatického řízení a informatiky 2018**  
**New Methods and Practices in the Instrumentation,  
Automatic Control and Informatics 2018**  
**28. 5. – 30. 5. 2018, Příbram - Podlesí**

**ISBN 978-80-01-06477-1**

**Web page of the original document:**  
<http://control.fs.cvut.cz/nmp>  
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2018.pdf>

**Obsah čísla/individual articles:**  
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2018/>