

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

**AUTOREFERÁT
DIZERTAČNEJ PRÁCE**

Žilina, 2025

Ing. Daniel Pribula

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov
Katedra Železničnej dopravy

Ing. Daniel Pribula

Autoreferát dizertačnej práce

**METODIKA HODNOTENIA VPLYVU ALTERNATÍVNYCH POHO-
NOV NA TECHNOLOGICKÉ PROCESY V ŽELEZNIČNEJ OSOBNEJ
DOPRAVE**

na získanie akademického titulu **d o k t o r**
(„philosophiaedocto r“, v skratke „PhD.“)
v študijnom odbore Doprava,
v študijnom programe Doprava

Žilina, 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Fakulte prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Daniel Pribula
Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta PEDAS
Katedra železničnej dopravy

Školiteľ: doc. Ing. Martin Kendra, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta PEDAS
Katedra železničnej dopravy

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o h.
v zasadačke dekanátu fakulty PEDAS pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce
schválenu odborovou komisiou v študijnom odbore Doprava, v študijnom programe
Doprava, vymenovanou dekanom Fakulty prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov
Žilinskej univerzity v Žiline.

prof. Ing. Miloš Poliak, PhD. – v. r.
predseda odborovej komisie
študijného odboru Doprava

ABSTRAKT

Dizertačná práca sa zaoberá návrhom metodiky na výber najvhodnejších a realizovateľných riešení alternatívnych pohonov ucelených jednotiek na konkrétnej železničnej linke ako substitútu elektrifikácie, pričom zohľadňuje ich vplyv na technológiu železničnej osobnej dopravy. Cieľom práce je vytvoriť systematický prístup, ktorý umožní hierarchické usporiadanie pohonov na základe ich vplyvu na komplexné technologicko-prevádzkové kritériá. Metodika zároveň identifikuje nevyhnutné technologické a investičné opatrenia potrebné na úspešnú implementáciu vybraného riešenia. Práca vychádza z analýzy vzťahu medzi parametrami vozidiel, dostupnou infraštruktúrou a technikou základňou. Navrhnutý prístup umožňuje objektívne porovnanie jednotlivých riešení a podporuje efektívne rozhodovanie v kontexte dekarbonizácie železničnej dopravy. Výsledky ukazujú, že výber optimálneho alternatívneho pohonu závisí nielen od ekonomických a environmentálnych faktorov, ale aj od jeho vplyvu na technologické procesy v železničnej osobnej doprave. Implementácia metodiky slúži ako podklad pre ekonomické a environmentálne zhodnotenie nasadenia týchto pohonov, pričom zamedzí výberu nevhodných a nerealizovateľných riešení.

Kľúčové slová: alternatívne pohony, ucelené jednotky, železničná dopravná technológia, železničná osobná doprava.

ABSTRACT

This dissertation thesis proposes a methodology for selecting the most suitable and feasible alternative propulsion solutions for multiple units on a specific railway line as a substitute for electrification, while considering their impact on railway passenger transport technology. The primary objective of the research is to develop a systematic approach that enables the hierarchical ranking of propulsion systems based on their influence on complex technological and operational criteria. The proposed methodology also identifies the necessary technological and investment measures required for the successful implementation of the selected solution. The research is grounded in an analysis of the interrelationship between vehicle parameters, available infrastructure, and the technical base. The proposed approach provides an objective framework for comparing different solutions and facilitates informed decision-making in the context of railway transport decarbonization. The findings indicate that the selection of the optimal alternative propulsion system depends not only on economic and environmental factors but also on its impact on technological processes within railway passenger transport. The implementation of the methodology serves as a foundation for the economic and environmental assessment of these propulsion systems, mitigating the risk of selecting unsuitable or unfeasible solutions.

Key words: Alternative propulsions. Multiple units. Railway transport technology. Railway passenger transport.

1. ÚVOD

Jedným z najväčších globálnych cieľov v súčasnosti je zabezpečenie trvalej udržateľnosti pomocou zníženia dôsledkov globálneho otepľovania, čo je možné dosiahnuť dekarbonizáciou priemyslu. Až 25 % celkových emisií, ktoré sú v Európskej únii (ďalej ako EÚ) vyprodukované, sú emisie z dopravného priemyslu (Pohl, 2022).

Emisie je možné znížiť zvýšením efektivity dopravy presunom na nízko emisné dopravné systémy, ako je železničná doprava, vykonávaná elektrickou trakciou. Hoci väčšina výkonov železničnej dopravy je zabezpečovaná elektrickými vozidlami, stále existuje značný podiel výkonov zabezpečovaných motorovou trakciou (Lochman, 2019). Elektrifikácia je preferovaným riešením, avšak ide o strategicky náročný proces vyžadujúci vysoké počiatkové investície, ktorých návratnosť závisí od rozsahu dopravných výkonov. Preto mnohé trate nie sú vhodné na elektrifikáciu a ostávajú odkázané na motorovú trakciu alebo tvoria potenciál pre využitie alternatívnych pohonov (Plán obnovy, 2022).

Motorové koľajové vozidlá využívajú spaľovací motor (ďalej ako ICE z angl. internal combustion engine), ktorý pri spaľovaní pohonných hmôt (ďalej ako PHM) produkuje emisie a udržiava závislosť na fosílnych palivách. Alternatívne pohony však umožňujú nízko emisnú prevádzku aj na tratiach bez líniovej elektrifikácie (Kluth, 2019).

Alternatívne pohony v rámci železničnej osobnej dopravy (ďalej ako ŽOD) sú v súčasnosti ešte novinkou, pričom nie je dostatok skúseností s ich prevádzkou na železničnej sieti (Pribula, 2024). To vyvoláva mnoho otázok o možnostiach a vhodnosti ich využitia na jednotlivých dopravných linkách. Keďže existuje viacero riešení pohonov, je nevyhnutné zohľadniť ich špecifické technologicko-prevádzkové vlastnosti a požiadavky pri výbere najvhodnejšej alternatívy. Tým sa minimalizujú negatívne dôsledky nesprávne zvoleného pohonu na určitom vozebnom ramene (ďalej ako VR) linky spôsobené unáhlenými závermi.

Cieľom dizertačnej práce je navrhnuť metodiku, ktorá na základe vplyvu špecifických vlastností a požiadaviek alternatívnych pohonov ucelených jednotiek (ďalej ako MU z angl., multiple unit) na technológiu ŽOD v určitých podmienkach VR linky, vytvorí hierarchicky usporiadaný zoznam realizovateľných alternatívnych pohonov ucelených jednotiek (ďalej ako MU) na základe komplexných prevádzkovo-technologických kritérií s dôrazom na nevyhnutné technologické a investičné opatrenia spojené s prevádzkou takýchto pohonov.

2. SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

V tejto kapitole je popísaný súčasný stav vývoja alternatívnych pohonov v železničnej doprave, vzťah týchto pohonov k technológii ŽOD a zámery s alternatívnymi pohonmi u nás a v zahraničí. Dané problematiky je možno chápať ako najdôležitejšie pre túto dizertačnú prácu.

2.1 Pohony v železničnej doprave

Pohony v železničnej doprave možno rozdeliť na konvenčné a alternatívne. Za konvenčné pohony železničných vozidiel z hľadiska zdroja trakčnej energie sú považované jednorežimové pohony, ktoré sú v súčasnosti najbežnejšie, využívajúce tradičné zdroje energie ako je elektrická energia v trakčnom vedení a spaľovanie pohonných hmôt (PHM) v ICE. Medzi ne možno zaradiť:

- elektrickú trakciu,
- motorovú trakciu,
- parnú trakciu – historické riešenie.

Alternatívne pohony využívajú nekonvenčné zdroje energie, ako sú vodík, elektrina zo zásobníkov alebo udržateľné palivá, prípadne ich kombinácie v rámci hybridných systémov. Ich zavádzanie je reakciou na potrebu nahrádzať motorovú trakciu tam, kde elektrifikácia nie je ekonomicky efektívna.

Tieto pohony spájajú výhody elektrickej trakcie (nízke emisie, vysoká účinnosť) s flexibilitou motorovej trakcie a predstavujú jeden z nástrojov ekologizácie železničnej dopravy bez nutnosti úplnej elektrifikácie (Pohl, 2020).

Podľa Pribula & Kendra, (2023) možno alternatívne trakcie klasifikovať na:

- batériovú trakciu – v prevedení:
 - batériová – jednorežimová (len batéria),
 - batériová-elektrická – dvojurežimová (batéria + zberač),
- vodíkovú trakciu – vozidlá s palivovým článkom (FC), v prevedení:
 - vodíková – dvojurežimová (FC + zásobník energie – batéria/superkondenzátor)
 - vodíkovo-elektrická – trojurežimová (FC + zásobník + zberač)
- diesel-hybridnú trakciu – v prevedení
 - elektro-dieselová – dvojurežimová (ICE + zberač)
 - hybridná-dieselová – dvojurežimová (ICE + zásobník)
 - hybridná elektro-dieselová – trojurežimová (ICE + zásobník + zberač)
- ostatné pohony – zotravníkové, superkondenzátorové, solárne, atď.

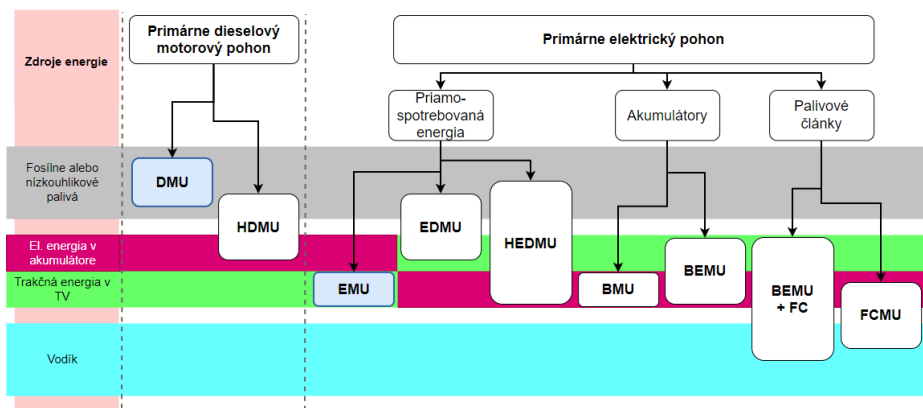
V súčasnosti sú ucelené jednotky uprednostňované pred vlakovými súpravami z dôvodu jednoduchšej prevádzkovej technológie (Homolka, 2020; Pribula et al., 2024-1). V tabuľke 1 sú klasifikované MU vzhľadom na pohon so zaužívaným anglickým názvom pohonu a skratkou, a tiež sú zaradené do kategórie pohonu.

Tabuľka 1 Klasifikácia pohonov ucelených jednotiek

Druh	Pohon	Zaužívaný anglický názov	Jednotka (skratka)	Kategória pohonu
Konvenčné pohony	Elektrický	Electric multiple unit	EMU	1. kategória
	Motorový	Diesel multiple unit	DMU	2. kategória
Alternatívne pohony	Batériový	Battery multiple unit	BMU	2. kategória
	Batériovo-elektrický	Battery electric multiple unit	BEMU	3. kategória
	Vodíkový (s paliv. článkom)	Fuel-cell multiple unit	FCMU	2. kategória
	Vodíkovo-elektrický	Fuel-cell electric multiple unit	FCEMU	3. kategória
	Elektro-dieselový	Electro-diesel multiple unit	EDMU	3. kategória
	Hybridný-dieselový	Hybrid-diesel multiple unit	HDMU	2. kategória
	Hybridný elektro-dieselový	Hybrid electro-diesel multiple unit	HEDMU	3. kategória

Zdroj: autor prostredníctvom (Pribula & Kendra, 2023)

V obrázku 1 je mapa MU s alternatívnym pohonom podľa primárneho pohonu a jeho zdroja/-ov trakčnej energie.



Obrázok 1 Mapa pohonov MU, zdroj: autor na základe (Homolka, 2020)

V tabuľke 2 sú definované niektoré parametre reálnych MU s alternatívnym pohonom od rôznych výrobcov.

Tabuľka 2 Parametre MU s alternatívnym pohonom

Názov a značka MU	Siemens Desiro ML / City Jet ECO		Siemen Mireo Plus B		Stadler Flirt Akku		Bombardier Talent 3 BEMU		Alstom Coradia Continental BEMU		Škoda Regio Panter BEMU	
Pohon	BEMU		BEMU		BEMU		BEMU		BEMU		BEMU	
Údaje pre:	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.
Počet náprav MU	12	-	12	-	6	-	8	-	8	-	8	-
Max rýchlosť [km/h]	140/120	-	160/140	-	160/140	-	140	-	160	-	160/140	-
Max. kapacita miest na sedenie	244	20,33	160	13,33	124	20,67	169	21,13	150	18,75	140	17,50
Maximálna hmotnosť [t]	204	17,00	211,2	17,60	108,15	18,03	129	16,13	123	15,38	138,84	17,36
Dĺžka [m]	75	6,26	63	5,25	55,5	9,25	56,4	7,05	56	7,00	52,9	6,61
Nimálna úroveň energie v zásobníku [kWh]	528	44,00	700	58,33	450	75,00	440	55,00	500	62,50	450	56,25
Dostupná úroveň energie v zásobníku [kWh]	396	33,00	525	43,75	337,5	56,25	330	41,25	375	46,88	337,5	42,19
Súvislý dojazd MU mimo TV [km]	80		120		80		60 - 100		80		80	

Názov a značka MU	Siemens Mireo Plus H		Coradia I lint		Končiar BMU		Stadler Flirt H2		Hitachi Blues		Priemer na nápravu pre všetky MU	
Pohon	FCMU		FCMU		BMU		FCMU		HEDMU			
Údaje pre:	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.	Celá MU	Na nápr.		
Počet náprav MU	8	-	6	-	6	-	8	-	10	-		
Max rýchlosť [km/h]	160/140	-	120	-	120	-	120	-	160/140	-		
Max. kapacita miest na sedenie	160	20,00	150	25,00	113	18,83	116	14,50	300	30,00	20,00	
Maximálna hmotnosť [t]	211,2	26,40	49	8,17	108	18,00	160	20,00	162,062	16,21	17,30	
Dĺžka [m]	63	7,88	41,89	6,98	41,9	6,98	51,5	6,44	90	9,00	7,15	
Nimálna úroveň energie v zásobníku [kWh]	150	18,75	160	26,67	736	122,67	130	16,25	132	13,20	49,87	
Dostupná úroveň energie v zásobníku [kWh]	112,5	14,06	120	20,00	552	92,00	97,5	12,19	176	17,60	38,11	
Súvislý dojazd MU mimo TV [km]	800 - 1 000		900		80		460		1 300			

Zdroj: autor na základe (Homolka, 2020; Beran & Molková, 2023; Vohla et al., 2024)

2.2 Špecifické technologicko-prevádzkové procesy spojené s prevádzkou jednotiek s alternatívnym pohonom

Ide o technologické procesy, ktoré sa spravidla nevykonávajú pri MU s konvenčným pohonom, alebo sú vykonávané odlišným spôsobom alebo špecifickou technikou základňou. Medzi ne možno zaradiť:

- nabíjanie,
- zbrojenie energetickým,
- tvorba vlakových liniek pre jednotky s alternatívnym pohonom,
- vplyv na vybrané miestne procesy železničnej osobnej dopravy,
- technická údržba MU s alternatívnym pohonom.

2.3 Skúsenosti s alternatívnymi pohonmi v železničnej doprave u nás a v zahraničí

V tejto podkapitole sú stručne prezentované najdôležitejšie poznatky zo skúsenosti s prevádzkou a zámerom zavádzania alternatívnych pohonov na Slovensku a vybraných Európskych krajinách.

Viac ako 50% tratí na Slovensku je neelektrifikovaných, čo tvorí potenciál na zavedenie alternatívnych pohonov ako substitútu k líniovej elektrifikácii. Železničná spoločnosť Slovensko, a.s. (2025) „Obstaranie hybridných elektrických jednotiek pre regionálnu dopravu“, ktorá popisuje a zdôvodňuje zámery zavedenia BEMU na vybraných VR na Slovensku. V pláne je obstať 16 ks BEMU s opciou na ďalších 20 ks.

Spoločnosť tiež chce obstarat' 10 – 20 elektro-dieselových rušňov na obsluhu tratí s náročnejšími parametrami.

V Českej republike (ČR) bola koncom roka 2024 spustená reálna prevádzka BEMU v Moravsko-sliezskom kraji. Nasadené boli štyri BEMU Škoda RegioPanter na linku z Ostravy do Veřovic. Prevádzka BEMU na danom ramene je momentálne bezproblémová a inšpiratívna pre ďalšie regióny v ČR, kde sa uvažuje s alternatívnymi pohonmi. S vodíkovou trakciou sa v rámci ČR uvažovalo len minimálne a z dôvodu nízkej efektívnosti v súčasnom stave (Kubala, 2024).

Nemecko sa stalo priekopníkom v nasadzovaní vodíkovej trakcie do reálnej prevádzky, keď boli prvé FCMU – Alstom Coradia iLint uvedené do prevádzky v Dolnom Sasku na trati Cuxhaven – Buxtehude. Po roku prevádzky bola zaznamenaná nízka spotreba elektriny na km, čo bolo dôsledkom kombinácie viacerých faktorov: optimálnych podmienok jazdy, dobrej kvality paliva a efektívneho využitia energie. Na základe skúsenosti s vodíkovou trakciou upustili BEMU aj v Hesensku a Bádensku-Württembersku. V Braniborsku trvala prevádzka FCMU Siemens Mireo Plus H na trati „Heidekraut-bahn“ iba dva týždne, po ktorých boli MU nahradené DMU a BEMU, kvôli oneskoreniu výstavby ČS H₂ (Zdropravy.cz, 2025).

Od roku 2023 sú v Taliansku v prevádzke HEDMU Hitachi Blues na viacerých VR. Taliani tiež podpísali zmluvu k nákupu 50 ks elektro-dieselových rušňov Eurolight-Dual. Dopravné podniky v Taliansku majú tiež záujem investovať financie z plánu obnovy po COVID 19 do batériovej a vodíkovej trakcie pre rôzne talianske regióny.

V polovici roka 2019 začala v Rakúsku testovacia prevádzka BEMU s cieľom preskúmania potenciálu ich nasadenia do reálnej prevádzky. Testovanie prinieslo pozitívnu odozvu a záujem o nasadenie BEMU do reálnych podmienok. V Rakúsku bol tak, ako aj na Slovensku a v iných krajinách, testovaný prototyp FCMU Coradia iLint, pričom prezentácia. Rakúšania označili vodíkovú technológiu na železnici ako príliš nákladnú, nepreskúmanú a málo ekologickú pre ich podmienky (České dráhy, 2023).

Vo Veľkej Británii bol iniciovaný projekt Traction Decarbonisation Network Strategy, ktorého cieľom je dekarbonizácia železníc redukciou motorovej trakcie a zvýšením efektivity. V rámci projektu bola vypracovaná mapa tratí, ktorá definuje budúce smerovanie dekarbonizácie železníc vo Veľkej Británii. Z 15 400 km neelektrifikovaných tratí je plánovaná elektrifikácia 11 700 km, pričom na 400 km sa predpokladá využitie batériovej trakcie a na 900 km vodíkovej trakcie. Pre zostávajúcich 2 000 km je potrebné vypracovať podrobnú analýzu pohonných riešení (IRJ, 2021).

3. CIEĽ DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodického postupu, ktorý umožní najvhodnejších realizovateľných riešení alternatívnych pohonov MU na základe vplyvu týchto pohonov na technológiu ŽOD. Toto usporiadanie vychádza z hodnotenia vopred definovaných kritérií, ktoré kvantifikujú vplyv jednotlivých pohonov MU na technologicko-prevádzkové charakteristiky ŽOD, vychádzajúce z komparácie požiadaviek alebo možností MU a vlastností VR. Zároveň sa zohľadňujú aj prípadné investičné a technologické opatrenia, ktoré môžu podmieňovať realizovateľnosť prevádzky konkrétnych riešení pohonu MU na danom vozebnom ramene.

Na dosiahnutie tohto cieľa je potrebné postupovať systematicky a splniť nasledujúce čiastkové ciele:

- identifikácia existujúcich riešení alternatívnych pohonov MU a ich parametrov,
- charakteristika vzťahu pohonu MU, linky a železničnej infraštruktúry na pridruženom VR,
- identifikácia technologických a investičných opatrení nevyhnutných k prevádzke daných alternatívnych pohonov MU vzhľadom na súčasný stav VR,
- kvantifikácia vybraných prevádzkových ukazovateľov jednotiek na VR,
- stanovenie komplexných kritérií hodnotiacich vplyv daných pohonov na technológiu ŽOD,
- aplikácia navrhnutého metodického postupu v reálnych podmienkach.

4. ZVOLENÉ METÓDY PRÁCE A VÝSKUMU

Medzi metódy, využívané v dizertačnej práci možno rozdeliť do piatich skupín a to:

- **metódy mapovania a časovej kvantifikácie procesov** – metódy prioritne slúžia na stanovenie časových normatífov procesov, ktoré nie sú nanormované a súvisia s prevádzkou MU s alternatívnym pohonom; slúžia na časové vyhodnotenie celého procesu pozostávajúceho z viacerých aktivít, ktoré môžu prebiehať paralelne sekundárne môžu slúžiť na grafické vyjadrenie metodického postupu; medzi dané metódy patria:
 - metódy časového normovania aktivít – metódy stanovenia času trvania jednotlivých aktivít v procese,
 - vývojové diagramy – (procesné) diagramy, môžu slúžiť na mapovanie procesu no v tejto práci sú využité na vizualizáciu vedeckých postupov k riešeniu rôznych problematik v dizertačnej práci,
 - ganttové grafy – jednoduchá grafická metóda na stanovenie trvania procesu pomocou úsečiek na časovej osi,
 - metódy sieťovej analýzy – určenie trvania procesu na základe kritickej cesty, napr.:
 - CPM – metóda sieťovej analýzy časového ohodnotenia procesu alebo projektu v prípade využitia deterministických trvaní aktivít,
 - PERT - metóda sieťovej analýzy časového ohodnotenia procesu alebo projektu v prípade využitia stochastických trvaní aktivít; k tejto metóde je vytvorené softvérové riešenie ako pomôcka,
- **metódy multikriteriálneho rozhodovacieho procesu** – metódy slúžia na výber najvhodnejších variantov pohonu MU pre dané VR na základe komplexných hodnotiacich kritérií; v tejto práci sú využité:
 - Saatyho metóda – stanovenie váh významnosti kritérií,
 - metóda TOPSIS – hierarchické zoradenie variantov od najvhodnejšieho po najmenej vhodné na základe kritérií,
- **matematicko-analytické metódy** – tvorba analytických vzorcov na báze mechaniky železničnej dopravy a tvorby grafikonu vlakovej dopravy,
- **metóda Delphi** – metóda na získavanie informácií od expertov v problematike alternatívnych pohonov nevyhnutných k dosiahnutiu cieľa práce,
- **základné vedecké metódy** – nevyhnutné najmä k popisu súčasného stavu, analýze literatúry, tvorby metodického postupu a pod.; medzi ne patrí napríklad:
 - analýza,
 - syntéza,
 - dedukcia,
 - experiment,
 - atď.

5. VÝSLEDKY PRÁCE

Výsledkom tejto práce je návrh metodického postupu na výber realizovateľných pohonov MU na konkrétnom VR, ktoré sa hierarchicky zoradia od najvhodnejšieho po najmenej vhodné riešenie na základe hodnotenia ich vplyvu na komplexné technologicko-prevádzkové kritériá.

Hlavným vstupom metodického postupu je linka, na ktorej SDT plánuje zaviesť prevádzku MU s alternatívnym pohonom ako substitút k úplnej elektrifikácii alebo DMU. Stručná charakteristika možností tvorby takýchto liniek je rozpracovaná v podkapitole (2.5.3). Metodika pozostáva zo štyroch fáz, pričom každá fáza má definovanú úlohu v rámci posudzovania realizovateľnosti, kvantifikácia prevádzky a výbere najvhodnejšieho riešenia pohonu na danom VR

V prvej fáze sa definujú všeobecné parametre MU, parametre súčasného stavu VR a linky, ktoré sú predmetom hodnotenia. Posudzuje sa aj vhodnosť VR na prevádzku ŽOD s alternatívne poháňanými MU vo všeobecnosti. Výstupom tejto fázy je rozhodnutie, či je dané VR vhodné na prevádzku železničnej osobnej dopravy a MU s alternatívnym pohonom a návrh opatrení.

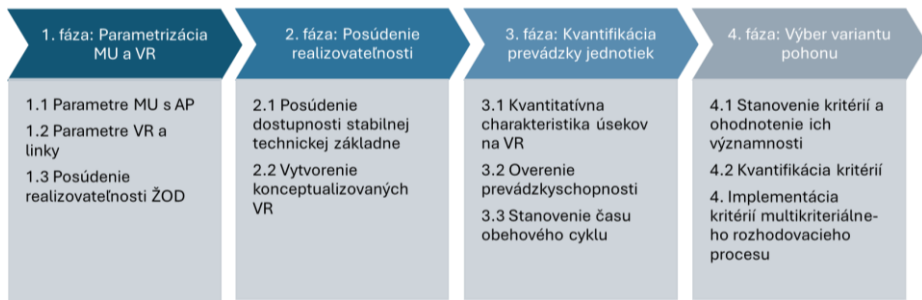
V druhej fáze sa posudzuje realizovateľnosť jednotlivých variantov pohonov MU a stanovujú sa nevyhnutné investičné opatrenia do technickej základne, ktoré umožnia ich prevádzku, ak ich pohon vyžaduje alebo sa nevytlúči z ďalšieho hodnotenia.

Tretia fáza pozostáva z troch krokov zameraných na časovú kvantifikáciu prevádzky realizovateľných pohonov MU na VR. Jedným z nich je overenie prevádzkyschopnosti MU vzhľadom na úroveň energie v limitujúcom zdroji, čím sa sekundárne potvrdí alebo vylúči realizovateľnosť prevádzky MU. Tento krok je zároveň nevyhnutný na stanovenie času potrebného na statické nabíjanie. Na základe časových faktorov prevádzky MU sa určuje čas obhoveho cyklu MU na VR a ďalšie vstupné hodnoty pre poslednú fázu metodiky.

Posledná fáza predstavuje výber najvhodnejšieho variantu alternatívneho pohonu na danom VR využitím multikritériálneho rozhodovacieho procesu na základe ôsmich komplexných kritérií, ktoré posudzujú vplyv jednotlivých pohonov na technologicko-prevádzkové parametre ŽOD. Výstupom je zoradenie pohonov od najvhodnejšieho po najmenej vhodný, pričom proces hodnotenia kritérií umožňuje identifikovať hlavné faktory ovplyvňujúce dosiahnuté výsledky.

V obrázku 2 je heuristicky znázornený metodický postup navrhnutý v tejto dizertačnej práci (jednotlivé fázy a ich kroky).

Jednotlivé fázy metodiky a ich dielčie kroky sú stručne vysvetlené v nasledujúcich podkapitolách autoreferátu.



Obrázok 2 Heuristické znázornenie metodiky, zdroj: autor

5.1 Parametrizácia ucelených jednotiek a vozebného ramena

5.1.1 Charakteristika parametrov jednotiek s alternatívnym pohonom

V rámci tohto kroku sú charakterizované všetky parametre, vlastnosti a požiadavky MU, nevyhnutné v ďalších fázach metodiky. Medzi pevne dané parametre vychádzajúce zo súčasného stavu vývoja pohonov možno zaradiť:

- režim prevádzky,
- dostupnosť zberača na MU,
- nutnosť a spôsob nabíjania,
- typ energetického média,
- možnosť rekuperácie,
- ideálny stav VR z hľadiska elektrifikácie a segment dopravnej obsluhy,
- súvislý dojazd MU mimo TV,
- priemerná zásoba energie v zásobníku alebo nádržiach,
- maximálna konštrukčná rýchlosť,
- priemerná kapacita miest na sedenie MU, nápravová hmotnosť a dĺžka,
- parametre merného vozidlového odporu.

Voliteľný parameter je dĺžka jednotky v počte náprav n_a , ktorý sa odhadne na základe požadovanej kapacity vozila.

5.1.2 Charakteristika parametrov linky a pridruženého vozebného ramena

Cieľom tejto analýzy je stanoviť nemenné parametre infraštruktúry a identifikovať dostupnosť stabilnej dopravnej i technickej základne nevyhnutnej na prevádzku jednotlivých typov MU s alternatívnym pohonom analyzovaného VR linky. Parametre infraštruktúry VR a dostupnosť vybraných prvkov sú kľúčové identifikátory k posúdeniu prevádzky konkrétnych pohonov MU a identifikáciu prípadných investičných alebo technologických opatrení. Dĺžke kroky východiskovej charakteristiky sú:

- charakteristika základných parametrov infraštruktúry VR:
 - dopravné dĺžky (vzdialenosti) VR a obehového cyklu,
 - parametre priechodnosti tratí na VR,
- identifikácia východiskového stavu elektrifikácie VR – tratí a OS,

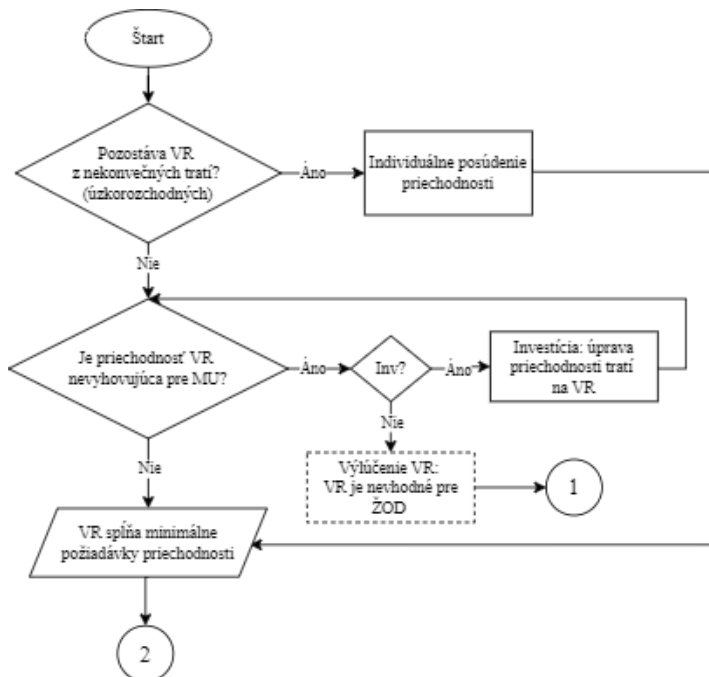
- charakteristika linky:
 - segment dopravnej obsluhy,
 - uvažovaný interval dopravných spojení,
 - počet obsluhovaných nácestných tarifných bodov (TB),
 - trajektória linkového vedenia.

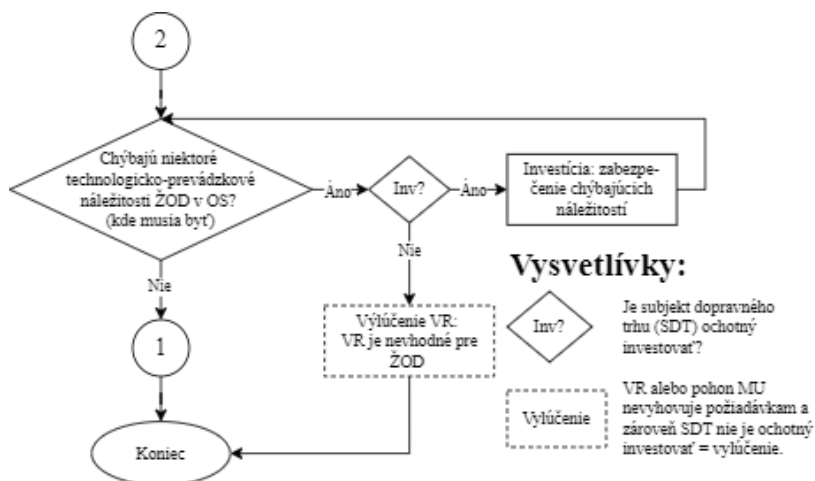
4.1.3 Posúdenie realizovateľnosti železničnej osobnej dopravy

V tomto kroku 1. fázy je hodnotené, či je VR všeobecne vhodné na prevádzku ŽOD a MU s alternatívnym pohonom bez ohľadu na typ pohonu, a to na základe dvoch hlavných parametrov:

- priechodnosť trati na VR – súčasné limity pre konvenčné trate pre priechodný prierez je UIC Pp A a traťová trieda B2 (18 t/na nápravu),
- dostupnosť technologicko-prevádzkových náležitostí ŽOD – t.j. dostupnosť náležitostí v bezprostrednej alebo dostupnej vzdialenosti od VR, ako:
 - náležitosti prevádzkovej hygienickej a fekálnej údržby,
 - náležitosti technickej údržby,
 - náležitosti vyššieho stupňa hygienickej údržby a ďalšie podľa predpisov dopravcu.

Ako pomôcka bol vytvorený vývojový diagram, vid'. obr. 3, prostredníctvom ktorého je možné posúdiť realizovateľnosť ŽOD a stanoviť patričné opatrenia, resp. VR vylúčiť.





Obrázok 3 Posúdenie realizovateľnosti osobnej dopravy na VR, zdroj: autor

4.2 Posúdenie realizovateľnosti

V tejto fáze metodiky sa posudzuje realizovateľnosť prevádzky jednotlivých riešení alternatívnych pohonov MU s vzhľadom na dostupnosť nevyhnutnej technickej základne na ich prevádzku. Cieľom je zistiť, aké opatrenia sú nevyhnutné na zabezpečenie prevádzky daných MU. Implementované opatrenia konceptualizujú VR pre každú jednotku.

4.2.1 Posúdenie dostupnosti stabilnej technickej základne

V tomto dielčom kroku posúdenia realizovateľnosti je hodnotená realizovateľnosť prevádzky MU na konkrétnom VR prostredníctvom komparatívnej analýzy požiadaviek jednotlivých pohonov a dostupnosti nevyhnutnej stabilnej technickej základne (v rátane elektrifikácie) pre daný pohon v súčasnom stave VR. Dané prvky môžu byť lokalizované na bezprostredne v OS, v dostupnej vzdialenosti od OS alebo v rámci širšej trati. Medzi ne patrí, napr.:

- pomocný zdroj energie,
- elektrifikácia OS,
- ŠNS,
- čerpace stanice,
- trakčné vedenie na širšej trati.

Na základe individuálneho posúdenia každého pohonu je možné určiť, či prevádzka daného pohonu je realizovateľná ihneď (v súčasnom stave VR), s určitými investičnými alebo technologickými opatreniami, alebo nie je realizovateľná vôbec. Medzi možné investičné opatrenia patrí napr.:

- rozšírenie TV o 5 km,
- elektrifikácia OS stanice,
- vybudovanie ŠNS,

- výstavba pomocného zdroja do OS,
- výstavba čerpacích staníc a pod.

Každé investičné opatrenie je vyhodnotené pomocou metódy bodového hodnotenia na základe troch ukazovateľov, a to nákladová náročnosť (bodová škála 1-4 s váhou 0,5), realizačná náročnosť (škála 1-4 s váhou 0,333) a univerzálnosť a dlhodobá využiteľnosť (so škálou 4-1 pri váhe 0,167). Čím má investičné opatrenie viac bodov tým je menej výhodné a niektoré opatrenia môžu byť aplikované viacnásobne, alebo môžu byť odmietnuté a tým sa daný pohon vylúči.

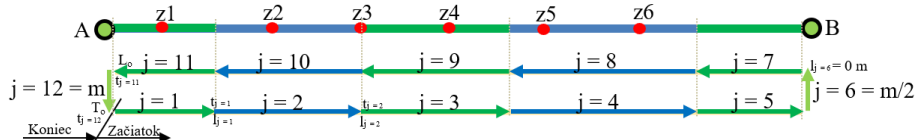
Medzi technologické opatrenia možno zaradiť zníženie maximálneho dojazdu MU kvôli jej prenocovaniu bez napájania, zavedenie pobytu v elektrifikovanom nácestnom TB, zmena obsluhy TB. Tieto opatrenia nie sú hodnotené v rámci tejto fázy.

Na posúdenie realizovateľnosti slúži pomôcka v podobe vývojových diagramov, ktoré sú vytvorené pre každý pohon zvlášť a reflektujúce požiadavky každého pohonu.

4.2.2 Vytvorenie konceptualizovaných vozebných ramien

Pre každý nevyhlúčený pohon MU sa vytvorí konceptualizované vozebné ramená $VR^{(MU)}$, ktoré obsahuje implementované investičné a niektoré technologické opatrenia. V prípade, že opatrenia žiadne nie sú zavedené $VR^{MU} = VR$ (súčasný stav).

Každé VR^{MU} sa na dĺžke obehového cyklu L_0 sa rozdelí na segmenty – úseky $j = 1, 2, \dots, m$ minimálne podľa stavu elektrifikácie, pričom za samostatný úsek sa považujú aj OS a TB s určitou špecifickou technológiou. V obrázku 4 je príklad segmentácie VR na základe elektrifikácie.



Obrázok 4 Príklad segmentácie obehového cyklu VR na úseky, zdroj: autor

Každý segment – úsek je charakterizovaný dĺžkou l_j , časom stráveným v úseku t_j , a počtom nácestných zastavení. V prípade zastavenia na hranici úseku, je zastavenie v prospech elektrifikovaného alebo podľa rozhodnutia užívateľa metodiky.

4.3 Kvantifikácia prevádzky jednotiek

V tejto fáze ide o časové vyjadrenie prevádzky MU pomocou úsekov $j \in VR^{MU}$, ktoré je nevyhnutné v ďalších krokoch metodiky. Vďaka poznaniu parametrov úsekov je možné stanoviť celkový čas obehového cyklu T_0^{MU} daného pohonu.

4.3.1 Kvantitatívna charakteristika úsekov na vozebnom ramene

Každý úsek j až m VR^{MU} je charakterizovaný časom t_j , ktorý v ňom MU strávi z dôvodu prevádzky vlaku. Celkový čas strávený úseku j závisí od času jazdy v úseku j (TJ_j) a času pobytu z dopravných, prepravných alebo technologických dôvodov TP_j , zaokrúhlený na pol minúty (30 s) nahor

Čas jazdy v úseku j (T_{j_j}) sa vypočíta ako súčet času potrebného na akceleráciu, deceleráciu a jazdu konštantnou rýchlosťou podľa vzorca (1).

$$T_{j_j} = \frac{\bar{v}_{maxj} \times n_{rj}}{a_r} + \frac{l_j - \left(\frac{\bar{v}_{maxj}^2 \times n_r}{2a_r} + \frac{\bar{v}_{maxj}^2 \times n_z}{|2a_z|} \right)}{\bar{v}_{maxj}} - \frac{\bar{v}_{maxj} \times n_{zj}}{a_z} [s] \quad (1)$$

kde:

a_z – decelerácia, odporúčaná hodnota je $-0,55 \text{ ms}^{-2}$,

a_r – zrýchlenie, analyticky $0,55 \text{ ms}^{-2}$ (Albrecht et al., 2008),

$\bar{v}_{maxj}$ – priemer maximálnych rýchlostí na úseku j [ms^{-1}],

n_{rj} – počet pravidelných rozjazdov v úseku j ,

n_{zj} – počet pravidelných zastavení v úseku j ,

t_{TBj} – čas pobytu z prepravných alebo dopravných dôvodov [s],

t_{pj} – čas pobytu z technologických dôvodov [s].

Čas pobytu v úseku j TP_j vychádza zo samotnej technológie prevádzky osobného vlaku daného segmentu dopravy pri tom, ktorom pohone v rámci obehového cyklu. TP_j je súčet času pobytu z technologických dôvodov t_{pj} so časom pobytu z prepravných a dopravných dôvodov t_{TBj} v úseku j podľa vzorca (2).

$$TP_j = t_{TBj} + t_{pj} \quad (2)$$

Niektoré zo vstupných hodnôt do výpočtov T_{j_j} je potrebné samostatne vypočítať podľa analytických vzorcov uvedených v dizertačnej práci.

4.3.2 Overenie prevádzkyschopnosti jednotiek

Ide o overenie prevádzkyschopnosti MU na VR^(MU) vzhľadom na stav zdroja energie v zásobníku energie E_{ij} v každom úseku j a obehového cyklu $i \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$, v simulovaných najhorších podmienkach na VR^(MU) (vysoká spotreba pomocných pohonov, maximálnom rozhodnom sklone S_{rj} , V_{max} , ...). Tento krok overí, či na VR s implementovanými opatreniami z 4.2.1 je realizovateľná prevádzka daných jednotiek tak, že E_{ij} neklesne pod 0 kWh a zároveň nepresiahne E_{max} . Overenie prevádzkyschopnosti možno považovať za sekundárnu formu overenia realizovateľnosti prevádzky.

Overenie prevádzkyschopnosti je nevyhnutné len pre MU batériovej a vodíkovej trakcie, pričom sleduje sa stav energie v primárne limitujúcom zdroji – zásobníku (batérie alebo SC), ktoré je na ich prevádzku nevyhnutná.

Výpočet prevádzkyschopnosti na základe primárneho limitujúceho zdroja je založený na sledovaní množstva dostupnej energie v primárne limitujúcom zdroji X (E_{ij}) vzhľadom na spotrebu S_j , dobíjanie energie N_j a stave energie E_{ij-1} v predchádzajúcich úsekoch j obehových cyklov i . Spotreba aj nabíjanie sú funkcie času. Všeobecný matematický zápis výpočtu prevádzkyschopnosti na základe primárne limit. Zdroja X je:

$$E_{ij} = \min(E_{ij-1} + (N_j - S_j); E_{max}) [\text{kWh}] \quad (3)$$

kde:

E_{max} – maximálna dostupná kapacita energie v limitujúcom zdroji.

Celkový výpočet a výpočet jeho zložiek (premenných) je charakterizovaný všeobecnými aj špecifickými podmienkami výpočtu.

V prípade, že pri nastavenej technológii prevádzky MU na VR^{MU} klesne hodnota E_{ij} pod o kWh, tak pohon je neprevádzkyschopný a je potrebné zaviesť dodatočné investičné alebo technologické opatrenia, alebo pohon vylúčiť.

4.3.3 Stanovenie času obehového cyklu

Obehový cyklus začína odchodom z východiskovej OS (ozn. ako A) a končí pobytom z technologických dôvodov vo východiskovej OS A. Výpočet času obehového cyklu T_O v metodike tejto práce je založený na sume času pobytov vo všetkých úsekoch j až m VR^{MU} (t_j) navýšenej o prirážku na zbrojenie T_Z a nabíjanie T_N, zaokrúhlenej na 30 sekúnd nahor.

$$T_O = \left\lceil \sum_{j=1}^m t_j + T_N + T_Z ; 30s \right\rceil \quad (4)$$

Výpočet prirážky času nabíjania závisí od úrovne energie na konci úseku pred elektrifikovanou OS E_{ij}, j = j/2 - 1 v j = m-1 (prípadne v úseku pred TB v ktorom dochádza k nabíjaniu), rýchlosti statického nabíjania e_{etj} a času pobytu t_{oj}.

$$T_N = \sum_{j=1}^m \max \left(\frac{(E_{max} - E_{ij-1})}{e_{stj}} - t_{oj}; 0 \right) [s] \quad (5)$$

Prirážka na zbrojenie vychádza z technologického času zbrojenia t_{zb}, počtu zbrojení na jeden cyklus, poradia obehového cyklu zbrojenia a kategórie MU. Výpočet prirážky pre MU 2. kategórie T_Z^{MU2} = T_Z je vo vzorci (6) a pre MU3. kategórie je vo vzorci (7).

$$T_Z^{MU2} = \frac{t_{zb} \times \left\lfloor \frac{L_O}{L_{doj}^{MU2}} + 0,501; 0 \right\rfloor}{\max \left(1; \left\lfloor \frac{L_{doj}^{MU2}}{L_O + 0,01} \right\rfloor \right)} \rightarrow 2. kat. MU \quad (6)$$

$$T_Z^{MU3} = \frac{t_{zb} \times \left\lfloor \frac{2L_{NE}}{L_{doj}^{MU3}} + 0,501; 0 \right\rfloor}{\max \left(1; \left\lfloor \frac{L_{doj}^{MU3}}{2L_{NE} + 0,01} \right\rfloor \right)} \rightarrow 3. kat. MU \quad (7)$$

kde:

L_{doj}^{MU2} – odhadovaný dojazd MU 2. kat. na jedno zbrojenie, HDMU ≈ 1000 km a FCMU ≈ 800 km ak sú obe OS vybavené pomocným zdrojom, inak o 30 km menej,
L_{doj}^{MU3} – odhadovaný dojazd MU 3. kategórie mimo TV na jedno zbrojenie, EDMU a HEDMU ≈ 1000 km a FCEMU ≈ 800 km ak sú obe OS elektrifikované, inak o 30 km menej,

L_{NE} – kumulatívna dĺžka neelektrifikovaných úsekov,

L_O – dopravná dĺžka obehového cyklu,

konštanty 0,01 a 0,501 slúžia na správne zaokrúhlenie hodnôt.

4.4 Výber najvhodnejšieho variantu

Poslednou fázou metodiky je výber najvhodnejšieho variantu pohonu MU pre posudzované MU linky pomocou multikritériálneho ohodnotenia pohonov MU, ktorých prevádzka realizovateľná a nie sú vylúčené. Cieľom tejto fázy je zoradenie realizovateľných pohonov MU od najvhodnejšieho (najvýhodnejšieho) po najmenej vhodný, (najmenej výhodný) na základe technologicko-prevádzkových kritérií ŽOD, ktoré sú kvantifikované a hodnotené na základe vlastností MU a výstupov z predošlých fáz.

4.4.1 Stanovenie kritérií a ohodnotenie ich významnosti

Kritéria K_j , $j \in \{1, 2, \dots, 8\}$ možno rozdeliť na kvantitatívne a kvalitatívne. Medzi kvantitatívne kritéria, ktoré sú posudzované v tomto kroku patrí:

- **K1: investičná náročnosť** – bodovo ohodnotené investičné opatrenia nevyhnutné k realizovateľnosti prevádzky daného pohonu,
- **K2: teoretická vozidlová potreba** – teoretický počet potrebných na zabezpečenie obsluhy VR linky pri danom intervale spojení,
- **K3: cestovný čas na VR** – cestovný čas od východiskovej po konečnú zastávku a späť,
- **K4: technologický čas miestnych procesov** – technologický čas spracovania východiskového a končiaceho vlaku v OS, pre daný pohon,
- **K5: miera odolnosti voči mimoriadnostiam** – čas zotrvania v prevádzkyschopnom stave v prípade napájania z limitujúcich zdrojov energie s dostatkom energie na dojazd do najbližšieho TB.

Medzi kvalitatívne kritériá patrí:

- **K6: miera vhodnosti pohonu na danom VR** – vhodnosť vzhľadom na stav elektrifikácie VR a parametre linky,
- **K7: náročnosť technickej údržby** – náročnosť technickej údržby MU podľa pohonu,
- **K8: flexibilita pohonu** – flexibilita MU vzhľadom na zmenu lokality prevádzky alebo stavu elektrifikácie VR.

Váhy kritérií sú stanovené pomocou Saatyho metódy. Keďže v rámci výskumu bolo oslovených viacero expertov výsledná párovacia matica A je prienikom viacerých recipročných matíc A_k a hodnota $a_{ij} \in A$ je priemerom a_{ijk} matíc A_k . V tabuľke 2 sú kritériám pridelené váhy a označenie, či je kritérium minimalizačné alebo maximalizačné.

Kritérium K _j	Váha - v _j	Minimalizač./maximalizač.
K1 – investičná náročnosť	0,213	Minimalizačné
K2 – teoretická vozidlová potreba	0,147	Minimalizačné
K3 – cestovný čas na VR	0,113	Minimalizačné
K4 – technologický čas miestnych procesov	0,086	Minimalizačné
K5 – miera odolnosti voči mimoriadnostiam	0,075	Maximalizačné
K6 – vhodnosť pohonu MU vzhľadom na stav VR	0,143	Maximalizačné
K7 – miera náročnosti technickej údržby	0,111	Minimalizačné
K8 – flexibilita pohonu	0,113	Maximalizačné

Zdroj: autor

4.4.2 Kvantifikácia kritérií

V tomto kroku sa ozrejmi, ako bude dané kritérium ohodnotené pre každý pohon. Charakterizuje sa hodnotiaci škála alebo výpočet ktorí priradí hodnotu kritéria pre daný pohon, ide o prípravu k metóde TOPSIS.

Investičná náročnosť

Kritérium investičná náročnosť I_{MU} predstavuje sumu bodov za všetky investície so zohľadnením ich počtosti, ktoré bolo nevyhnutné implementovať pre zabezpečenie realizovateľnosti prevádzky a prevádzkyschopnosti MU na vozebnom ramene. Hodnota I_{MU} predstavuje sumu súčinov bodového ohodnotenia investície k (B_k) s jej počtnosťou (n_k).

Teoretická vozidlová potreba

Teoretická vozidlová potreba N^{MU} stanovuje minimálne počet MU daného pohonu potrebných na zabezpečenie dopravnej obsluhy VR. Výpočet N^{MU} vznikol modifikáciou vzorca z knihy Prevádzkovanie železničnej osobnej dopravy (Vojtek. & Dedík, 2023) a v podstate je to pomer T_O^{MU} k maximálnemu intervalu linky I_{max} v minútach (8).

$$N^{MU} = \frac{\frac{T_O^{MU}}{60}}{I_{max}} \quad (8)$$

Aj keď hodnota N^{MU} by mala byť pre praktické účely zaokrúhlená nahor, v prípade tejto metodiky práce sa ponechá hodnota v desatinnom tvare zaokrúhlená na 2 desatinné miesta. Takáto hodnota môže byť vhodnejšia do multikritériálneho hodnotenia.

Cestovný čas na vozebnom ramene

Toto kritérium slúži na porovnanie spätných cestovných časov (z východiskovej do konečnej OS a späť) T_C^{MU} pri jednotlivých pohonoch jednotiek na VR^{MU}. Výpočet je založený sume časov v jednotlivých úsekoch j okrem úsekov patriacich OS. V prípade štandardného vedenia linky sa T_C^{MU} vypočíta vzorcom (9) a v prípade (polo-)okružného, podľa vzorca (10):

$$T_C^{MU} = \frac{\sum_{j=1}^{m-1} t_j - t_{m/2}}{60} [\text{min}] \quad (9)$$

$$T_C^{MU} = \frac{\sum_{j=1}^{m-1} t_j}{60} [\text{min}] \quad (10)$$

Celkové trvanie miestnych procesov

Toto kritérium súčasne hodnotí čas potrebný na prípravu MU na traťový výkon (technologický proces spracovania východiskového vlaku) a odstavenie MU po traťovom výkone (technologický proces spracovania končiaceho vlaku) na VR^{MU}. Výpočet celkového trvania miestnych procesov T_{MP}^{MU} je založený na súčte trvania technologického procesu spracovania východiskového a končiaceho vlaku v oboch OS:

$$T_{MP}^{MU} = \frac{T_{VVM/2}^{MU} + T_{VVM}^{MU} + T_{KVM/2}^{MU} + T_{KVM}^{MU}}{60} [\text{min}] \quad (11)$$

Trvanie rovnakých miestnych procesov vo východiskovej a konečnej stanici môže byť rovnaké alebo odlišné, záleží na miestnych podmienkach danej OS. Na stanovenie trvania procesov sa odporúča využiť metóda PERT a navrhnuté softvérové riešenie na výpočet ich trvania.

Miera odolnosti voči pobytu z mimoriadnych dôvodov

Kritérium stanovuje ako dlho vydrží obsadená MU aktívna pri pobyte z mimoriadnych dôvodov len z vlastných zdrojov energie. Miera odolnosti O^{MU} sa určí ako polovica maximálnej dostupnej zásoby energie MU v kWh, podelená jednotkovou spotrebou pomocných pohonov v najhorších podmienkach, pričom od maximálnej zásoby energie sa odpočíta približná spotreba energie na dojazd k najbližšiemu TB. Použitie polovičnej hodnoty $E_{\max}$ zohľadňuje, že mimoriadna situácia môže nastať kedykoľvek počas prevádzky.

$$O^{MU} = \frac{(E_{\max}^{MU}(X) + E_{\max}^{MU}(Y)) - \frac{L_{VR}}{2 \times (n_{TB} + 1)} \times \bar{S}_0}{2 \times 3600 S_{pp}} [h] \quad (12)$$

kde:

- $E_{\max}^{MU}(X)$ – maximálna zásoba energie v primárne limitujúcom zdroji X,
- $E_{\max}^{MU}(Y)$ – maximálna zásoba energie v sekundárne limitujúcom zdroji Y,
- $\bar{S}_0$ – priemerná spotreba MU v kWh/km,
- n_{TB} – počet nácestných tarifných bodov,
- L_{VR} – dopravná dĺžka vozebného ramena v m.

Miera vhodnosti pohonu na danom vozebnom ramene

Miera vhodnosti pohonu na VR predstavuje bodové ohodnotenie vhodnosti nasadenia MU na VR^(MU) vzhľadom na vlastnosti ramena a parametrov jednotiek. Miera vhodnosti je hodnotená na bodovej škále 0-3 body, kde:

- **3 body: úplne vhodný** – pohon vhodný a vytvorený pre daný charakter VR,
- **2 body: čiastočne vhodný** – pohon je použiteľný, ale s miernymi kompromismi, len čiastočne sa využije potenciál pohonu,

- **1 body: čiastočne nevhodný** – prevádzka je technicky možná, avšak potenciál pohonu sa nevyužíja, alebo sa využíja len minimálne,
- **0 bodov: úplne nevhodný (nerealizovateľný)** – pohon MU nie je kompatibilný s charakteristikou VRMU; takýto pohon by mal byť vyradený v predošlých fázach metodiky.

Miera náročnosti technickej údržby

Miera náročnosti technickej údržby MU sa líši vzhľadom od typu pohonu a jeho technickej komplexnosti. Miera náročnosti je definovaná pomocou 3 bodovej škály, kde:

- **3 body: vysoká náročnosť údržby** – frekventovaná údržba systémov s vysokým rizikom výbuchu vyžadujúca riadne školený personál, veľmi špecializované vybavenie a priestory údržby aj skladovania,
- **2 body: stredná náročnosť údržby** – vyššia frekvencia údržby ako pri motorovej trakkii, ktorá môže vyžadovať určité zásahy do priestorov a školenia zamestnancov,
- **1 bod: nízka náročnosť** – náročnosť údržby podobná EMU, môže vyžadovať mierne úpravy priestorov a zariadení v rámci školenia zamestnancov.

Flexibilita pohonu jednotky

Flexibilita pohonu vyjadruje schopnosť MU daného pohonu prispôbiť sa zmenám parametrov VR, napríklad v prípade ukončenia prevádzky alternatívnych pohonov na VR alebo prevelenie MU počas jej životného cyklu. Flexibilita je definovaná pomocou 4 bodovej škály, kde:

- **4 body: vysoká flexibilita** – prevádzka je technicky možná takmer na všetkých VR v rámci konvenčnej železnice, pričom spravidla nie sú potrebné investičné opatrenia do technickej základne (napr. ČS PHM); tá býva súčasnosti dostupná na sieti,
- **3 body: vyššia flexibilita** – prevádzka je technicky možná takmer na všetkých VR konvenčnej železnice, avšak vyžaduje značné investičné opatrenia do technickej základne (napr. ČS H2), ktorá nebýva v súčasnosti bežne dostupná,
- **2 body: nižšia flexibilita** – značne obmedzený dojazd mimo TV čiastočne limituje počet realizovateľných VR, pričom prevádzka môže a nemusí vyžadovať investičné opatrenia do technickej základne,
- **1 bod: nízka flexibilita** – značne obmedzený dojazd bez ohľadu na stav elektrifikácie zásadne limituje rozsah realizovateľných VR, zároveň si tieto pohony vyžadujú investície do technickej základne (napr. ŠNS), ktorá zatiaľ nebýva na sieti rozšírená.

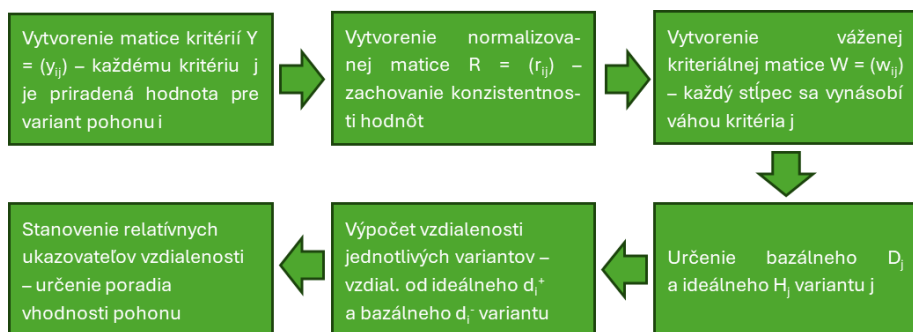
4.4.3 Implementácia kritérií do multikritériálneho rozhodovacieho procesu

Cieľom záverečného kroku metodiky je výber najvhodnejšieho pohonu MU pre konkrétnu linku a jej VR na základe jeho vplyvu na technológiu a technologické procesy prevádzky vlakov v ŽOD. Tento výber vychádza z precízne definovaných hodnotiacich kritérií a je realizovaný prostredníctvom metódy TOPSIS.

Metóda TOPSIS umožňuje systematické a objektívne porovnanie jednotlivých pohonov na základe ich vzdialenosti od ideálneho a anti-ideálneho riešenia. Tento prístup zabezpečuje hierarchické zoradenie realizovateľných pohonov, ktoré prešli predošlými fázami metodiky, pričom kritériá hodnotenia reflektujú ich technologicko-prevádzkovú vhodnosť pre dané VR.

Výsledkom tejto analýzy je kvantifikované a metodicky podložené porovnanie alternatív pohonu MU, ktoré umožňuje identifikovať optimálne riešenie z hľadiska efektivity, udržateľnosti a prevádzkovej vhodnosti pre konkrétny dopravný scenár.

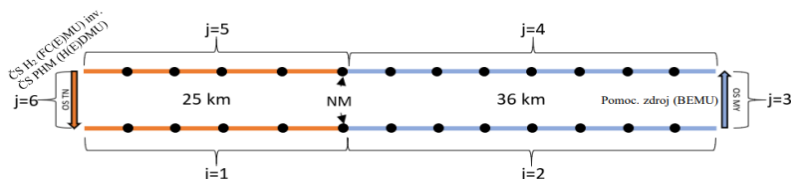
Heuristicky znázornený postup implementácie metódy TOPSIS je v obrázku 5.



Obrázok 5 Heuristické znázornenie TOPSIS, zdroj: autor na základe (Wu et al., 2021)

4.5 Aplikácia metodiky na vybranom vozebnom ramene

Metodika bola aplikovaná na vozebnom ramene Trenčín – Nové Mesto nad Váhom – Myjava, kde súčasný dopravca plánuje zaviesť prevádzku BEMU. Ako najvýhodnejší pohon zo všetkých posudzovaných riešení na danom vozebnom ramene vyšlo HEDMU, nasledované HDMU, BEMU a nakoniec jednotkou s vodíkovou trakciou (MU vodíkovej trakcie). V prípade požiadavky na absolútnu dekarbonizáciu prevádzky je najvýhodnejším riešením BEMU, pričom je potrebná iba investícia do pomocného zdroja energie. V obrázku 5 je schéma VR Trenčín – Myjava rozdelená na úseky v rámci L_0 .



Obrázok 5 Segmentácia VR Trenčín – Myjava, zdroj: autor

Na základe aplikácie metodiky v reálnych podmienkach, otestovania jej jednotlivých fáz a dosiahnutia relevantných výsledkov možno konštatovať, že metodika je všeobecne použiteľná.

5. TEORETICKÉ A PRAKTICKÉ PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavné teoretické prínosy dizertačnej práce spočívajú v rozšírení poznatkov v oblasti technológie prevádzky ŽOD spojených so zavedením alternatívnych pohonov. Konkrétne prínosy možno zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- rozšírenie teoretických poznatkov o vzťahu alternatívnych pohonov MU a technológie železničnej osobnej dopravy,
- vypracovanie komplexného metodického postupu k výberu najvhodnejších riešení alternatívnych pohonov jednotiek na konkrétnom VR linky železničnej osobnej dopravy,
- rozšírenie a spresnenie terminológie spojenej s popisom stavu elektrifikácie,
- stanovenie kritérií na hodnotenie vplyvu alternatívnych pohonov na technologické procesy ŽOD,
- vývoj softvérového nástroja z účelom mapovania a kvantifikácie technologických procesov ŽOD ako pomôcky.

Praktické prínosy tejto práce spočívajú v možnosti priamej aplikácie navrhutej metodiky v procese výberu alternatívnych pohonov ucelených jednotiek v ŽOD. Metodika umožňuje systematické stanovenie podmienok realizovateľnosti jednotlivých riešení pohonov s dôrazom na minimalizáciu negatívneho dopadu na technologické aspekty ŽOD:

- prakticky overený, objektívny a systematický výber najvhodnejších realizovateľných riešení pohonu MU pre konkrétne VR znižujúci riziko neúspešnej implementácie takýchto pohonov do reálnej prevádzky,
- stanovenie nevyhnutných investičných a technologických opatrení pre implementáciu jednotlivých pohonov, bez nutnosti náročného výskumu a simulácii,
- praktická aplikovateľnosť metodiky pri rozhodovacích procesoch SDT,
- kvantifikácia technologického procesu ako výstupy vytvoreného softvérového riešenia,
- využitie čiastkových a celkových výstupov z aplikácie metodiky ako podklad pre ekonomické a environmentálne hodnotenie alternatívnych pohonov MU.

ZÁVER

Cieľ tejto dizertačnej práce je naplnený. Cieľom bolo navrhnutie metodického postupu na výber najvhodnejších riešení alternatívnych pohonov na predurčenom VR na základe hodnotenia vplyvu pohonov na technológiu ŽOD. Výsledkom je systematický a aplikovateľný prístup, ktorý umožňuje objektívne posúdiť technologicko-prevádzkové dopady jednotlivých pohonov na VR a zároveň identifikuje potrebné investičné opatrenia pre zabezpečenie ich spoľahlivej prevádzky.

Metodika pozostáva zo štyroch fáz. Prvá fáza charakterizuje základné parametre VR a požiadavky MU. Druhá fáza hodnotí realizovateľnosť prevádzky pohonov MU, pričom identifikuje pohony vhodné na okamžitú prevádzku, vyžadujúce investičné opatrenia alebo nerealizovateľné. Tretia fáza kvantifikuje technologické procesy prevádzky MU a sekundárne overuje realizovateľnosť na základe limitujúceho zdroja energie. Štvrtá fáza využíva multikriteriálne hodnotenie ôsmich technologicko-prevádzkových kritérií na hierarchické usporiadanie pohonov podľa ich vplyvu na technológiu a prevádzku ŽOD.

Výsledky aplikácie metodiky práce preukázali, že jednotlivé alternatívne pohony majú odlišný vplyv na technologicko-prevádzkové aspekty ŽOD. Tento vzťah sa prejavuje pri komparácii špecifických parametrov, vlastností, či požiadaviek jednotlivých riešení pohonov a stavu infraštruktúry alebo technickej základne na VR. Vyčíslenie tejto komparácie má za následok prioritizáciu niektorých riešení pohonu pred ostatnými.

Práca tiež poukazuje na potrebu rozšírenia metodiky o spoločné hodnotenie alternatívnych pohonov pre viacero VR, ako aj na možnosť analýzy optimálneho trasovania liniek s prihliadnutím na prevádzkové požiadavky alternatívnych trakčných systémov. Tieto oblasti zostávajú výzvou pre budúci výskum.

Dizertačná práca predstavuje praktický rámec na podporu strategického rozhodovania SDT v procese dekarbonizácie železničnej siete, pričom metodika môže tvoriť východiskový základ pre jej budúce rozšírenie o ekonomické, environmentálne a technické faktory. Navrhnuté riešenie tak prispieva k racionalizácii výberu alternatívneho pohonu ako substitútu elektrifikácie, pričom minimalizuje riziko nesprávneho rozhodnutia spôsobeného neadekvátnym zohľadnením technologicko-prevádzkových aspektov ŽOD vo vzťahu k daným riešeniam pohonov.

PUBLIKOVANÉ PRÁCE SÚVISIACE S RIEŠENOU PROBLEMATIKOU

KENDRA, M., PRIBULA, D. & SKRÚCANÝ, T., 2024. Methodology for Quantification of Technological Processes in Passenger Railway Transport Using Alternatively Powered Vehicles. *Sustainability*, 16(16), 7239.

PRIBULA, D., DEDÍK, M. & KENDRA, M., 2024. Methodology of technological times determination within the operation of railway passenger transport multiple units. In: *Transport problems 2024: proceedings 16 International scientific conference and 13 International symposium of young researchers*. 1. vyd. Katowice: Politechnika Slaska, s. 447–457.

PRIBULA, D. & KENDRA, M., 2023. Analysis of Current State of Alternative Propulsion in a Sector of Passenger Railway Transport. *Transport Technic and Technology*, 19(2), s. 18. DOI: 10.2478/ttt-2023-0010.

PRIBULA, D. & KENDRA, M., 2024. Príležitosti a limity implementácie alternatívnych pohonov v železničnej osobnej doprave. In: *Verejná osobná doprava - VOD 2024, 14. – 15. október 2024, Bratislava, Slovensko*, s. 87–97.

PRIBULA, D., DOLINAYOVÁ, A. & KENDRA, M., 2023. Alternative propulsion in railway transport - the way to green transport. In: *Horizons of railway transport – Accelerating a shift from road to rail as a green transport mode, 1st – 3rd October 2023, Podbanské*.

PRIBULA, D., ŽIDOVÁ, Z., KENDRA, M. & ZITRICKÝ, V., 2023-1. Factors affecting mileage of battery electric multiple units. In: *TRANSCOM 2023: 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*. vol. 74, s. 19–25.

KENDRA, M., PRIBULA, D., SKRÚCANÝ, T., BLAŽEKOVÁ, O. & STOILOVA, S., 2024. Battery-Assisted Trolleybuses: Effect of Battery Energy Utilization Ratio on Overall Traction Energy Consumption. *Sustainability*, 16(24), 11303.

IBLIOGRAFICKÉ ODKAZY POUŽITÉ V DIZERTAČNEJ PRÁCI

ALBRECHT, T., et al., 2008. Railway Timetabling & Operation. Hamburg: DW Media Group GmbH.

ARENS, S., WINDT, A., STREULING, C. & HANKE, B., 2024. Pareto Optimization of the Integration of Renewables for the Supply of Battery-Electric and Hydrogen-Electric Multiple Units at a Single Site. *Energy Science & Engineering*.

BARAN, F. a MOLKOVÁ, T., 2023. Bezemisní regionální doprava v souvislosti s budo-ucími vysokorychlostními tratěmi v ČR. Vědeckotechnický sborník Správy železnic, č. 8/2023. Správa železnic.

ČESKÉ DRÁHY, A.S., 2023. ÖBB o vodíkovém pohonu neuvažují. In: *Železničář – České Dráhy*. Roč. 2023, vyd. 6, s. 26.

DOLINAYOVÁ, A. & MORIHLADKO, P., 2024-1. Rail transport performances on electrified and non-electrified railway lines: sustainable rail transport point of view. In: *CETRA 2024*, 15–17 May 2024, Cavtat, Croatia.

EHRHART, B.D., ANLEU, G.B., MOHMAND, J.A., BAIRD, A.R. & KLEBANOFF, L.E., 2021. Refueling Infrastructure Scoping and Feasibility Assessment for Hydrogen Rail Applications. *Technická správa*.

ERA, 2020. Technical specifications for interoperability. [online] Dostupné na: https://www.era.europa.eu/domains/technical-specifications-interoperability_en [cit. 18. 7. 2024].

EÚ, 2023. Normalizácia v Európe – technické požiadavky – harmonizované normy – označenie CE. [online] Dostupné na: https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/standards/standards-in-europe/index_sk.htm [cit. 27. 2. 2025].

EURÓPSKA KOMISIA, 2019. Vykonávacie nariadenie Komisie (EÚ) 2019/779 z 16. mája 2019, ktorým sa stanovujú podrobné ustanovenia o systéme certifikácie subjektov zodpovedných za údržbu vozidiel podľa smernice (EÚ) 2016/798 Európskeho parlamentu a Ra-dy.

FIGGENER, J., HECHT, C., HABERSCHUSZ, D., BORS, J., SPREUER, K. G., KAIRIES, K-P., STENZEL, P. & SAUER, D. U., 2023. The development of battery storage systems in Germany: a market review (status 2023). *Electrical Engineering and Systems Science*.

FINANČNÉ NOVINY, 2024. Čo je to Delphi metóda alebo Delphi technika? [online] Dostupné na: <https://financnenoviny.com/co-je-to-delphi-metoda-alebo-delphi-technika/> [cit. 11. 1. 2025].

GAŠPARÍK, J. & KOLÁŘ, J., 2017. *Železniční doprava: technologie, řízení, grafiky a dalších 100 zajímavostí*. Praha: Grada Publishing.

GAŠPARÍK, J. & ŠULKO, P., 2016. *Technológia železničnej dopravy – líniové dopravné procesy*. 1. vyd. Žilina: EDIS – Žilinská univerzita. 383 s.

GAŠPARÍK, J., BLAHO, P. & LICHNER, D., 2015. *Železničná dopravná prevádzka - Základy železničnej dopravy*. Žilina: EDIS. 407 s.

GAŠPARÍK, J., GREŇČÍK, J., MEŠKO, P., LUPTÁK, V. & ZITRICKÝ, V., 2017. *Mechanika v železničnej doprave*. Žilina: EDIS. 282 s.

H2TOOLS, 2025. Rail. [online] Dostupné na: <https://h2tools.org/fccs-application-type/rail> [cit. 27. 4. 2024].

HELLER, P., 2017. *Kolejová vozidla I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. 186 s. ISBN 978-80-261-0693-7.

HOMOLKA, P., 2020. *Možnosti využití BEMU v podmínkách České republiky*. Diplomová práce. ČVUT, Praha, Česká republika.

IEC 62864-1:2016, 2016. *Railway applications – Rolling stock – Power supply with on-board energy storage system*. Part 1: Series hybrid system.

IEC 62928:2017, 2017. *Railway applications – Rolling stock – Onboard lithium-ion traction batteries*. Geneva: International Electrotechnical Commission.

IRG-Rail, 2024. 12th IRG-Rail Market Monitoring Report. IRG-Rail. [online] Dostupné na: <https://irg-rail.eu/irg/documents/market-monitoring/404,2024.html> [cit. 15. 10. 2025].

IRJ, 2020. Decarbonising the British network. *International Railway Journal*, vol. 30, issue 10, s. 34–37.

ISO 17268:2020, 2020. *Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices*.

ISO 19885-1:2024, 2024. *Gaseous hydrogen – Fuelling protocols for hydrogen-fuelled vehicles*. Part 1: Design and development process for fuelling protocols.

ISO/AWI 19887-2, [n.d.]. *Gaseous hydrogen – Fuel system components for hydrogen-fuelled vehicles*. Part 2: Rail vehicles.

JAFRI, N. H. & GUPTA, S., 2017. Technical viability study of fuel cell as an alternative to diesel in diesel-electric multiple units (DEMUS) for Suburban Rail Transportation.

JANDURA, P., RICHTER, A. & FERKOVÁ, Ž., 2016. Flywheel energy storage system for city railway. In: 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), June 2016. IEEE.

KAPETANOVIĆ, M., VAJIHI, M. & GOVERDE, R. M., 2021. Analysis of hybrid and plug-in hybrid alternative propulsion systems for regional diesel-electric multiple unit trains. *Energies*, 14(18), s. 5920.

KAŠPAR, V., 1998. *Vybrané metody operačnej analýzy vo vojenskej doprave a vojenskom staviteľstve: (metódy sieťovej analýzy - CPM, PERT)*. Žilina: Žilinská univerzita. 116 s.

KENDRA, M., PRIBULA, D. & SKRÚCANÝ, T., 2024. Methodology for Quantification of Technological Processes in Passenger Railway Transport Using Alternatively Powered Vehicles. *Sustainability*, 16(16), s. 7239.

KLUTH, A., 2019. Rail Industry Decarbonisation Taskforce Initial report to the Minister for Rail. DOI: 10.13140/RG.2.2.14036.65920.

KOVAŘÍK, K., 2022. Návrh trakčního zařízení trakční měřicí metry. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Praha, Česká republika.

KRAMPITZ-MENA, 2024. Universal filling stations. [online] Dostupné na: <https://www.krampitz-mena.com/tank-container/universal-filling-stations/> [cit. 15. 6. 2024].

KUBALA, O., 2024. Kraje chtějí bateriové vlaky. Podívejte se na velký přehled, na jaké tratě s nimi počítají. Zdobry.cz. [online] Dostupné na: <https://zdobry.cz/prehledne-kraje-chteji-bateriove-vlaky-na-jake-trate-s-nimi-pocitaji-230921/> [cit. 28. 1. 2025].

LIPÍŇSKI, L., 2024. SM42-6Dn Hydrogen. [online] Dostupné na: <https://pesa.pl/en/produkty/lokomotywy/sm42-6dn-hydrogen/> [cit. 5. 9. 2024].

LOCHMAN, L., 2019. VTS Správy železnic č. 1/2019. Green Deal & priority evropské železnice.

MAJERČÁK, J., GAŠPARÍK, J. & BLAHO, P., 2015. Železničná dopravná prevádzka: Technológia železničných staníc. Žilina: EDIS. 224 s.

MAPCHART, 2024. MapChart – Create your own custom map. [online] Dostupné na: <https://www.mapchart.net> [cit. 22. 11. 2024].

MAY, T., 2023. Austria: ÖBB orders Flirt Akku battery trains from Stadler. Railway-News. [online] Dostupné na: <https://railway-news.com/austria-obb-orders-flirt-akku-battery-trains-from-stadler/> [cit. 14. 7. 2024].

MEDCOM, 2024. Newag to produce new hybrid Impuls multiple units for PKP Intercity. [online] Dostupné na: <https://medcom.com.pl/en/news/newag-to-produce-new-hybrid-impuls-multiple-units-for-pkp-intercity> [cit. 18. 10. 2024].

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKEJ REPUBLIKY (MD ČR), 2023. Koncepcie rozvoje elektrické trakce. [online] Dostupné na: <https://zdobry.cz/wp-content/uploads/2023/11/Koncepcie-rozvoje-elektricke-trakce-2023.pdf> [cit. 28. 1. 2025].

MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKEJ REPUBLIKY (MD ČR), 2023. Koncepcie rozvoje elektrické trakce. [online] Dostupné na: <https://zdobry.cz/wp-content/uploads/2023/11/Koncepcie-rozvoje-elektricke-trakce-2023.pdf> [cit. 28. 1. 2025].

MINISTERSTVO VNÚTRA SR (MV SR), 2020. Metodika optimalizácie procesov – konvencie modelovania. [online] Dostupné na: [https://www.minv.sk/swift_data/source/mvsr_a_eu/fabianova/np_optimalizacia/Metodika%20optimalizacie%20procesov%20-%20konvencie%20modelovania%20\(janu%202020\).pdf](https://www.minv.sk/swift_data/source/mvsr_a_eu/fabianova/np_optimalizacia/Metodika%20optimalizacie%20procesov%20-%20konvencie%20modelovania%20(janu%202020).pdf) [cit. 18. 2. 2024].

MOKOŠÁK, L., 2020. Zostava typových technologických grafov obsluhy súprav vlakov osobnej dopravy. Diplomová práca. Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, Slovenská republika.

MORI, H., 2024. The People of Hitachi: Leader in the Development of Europe's First Tribid Train, Achieving a 50% Reduction in CO2 Emissions. [online] Social Innovation - Hitachi. Dostupné na: <https://social-innovation.hitachi/en/article/people-blues/> [cit. 27. 2. 2025].

MORIHLADKO, P. & DOLINAYOVÁ, A., 2024. Policy of decarbonization railway transport in the Slovak Republic. In: Transport Problems 2024: 16th International Conference and 13th International Symposium of Young Researchers. Katowice, Poland, s. 421–427.

OLMOS, J., GANDIAGA, I., LOPEZ, D., LARREA, X., NIEVA, T. & AIZPURU, I., 2020. Impact of Li-ion Battery Technology and Energy Management on the Life Cycle Costs of Hybrid Diesel-Electric Multiple Units. In: 15th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 10–12 September 2020.

PACEK, L., 2024. Vplyv alternatívnych pohonov železničných vozidiel na prevádzku železničnej osobnej dopravy. Bakalárska práca. Žilinská univerzita v Žiline.

PESA, 2023. Railway premiere of the year – PESA presented the hydrogen locomotive at TRAKO. [online] Dostupné na: <https://pesa.pl/en/railway-premiere-of-the-year-pesa-presented-the-hydrogen-locomotive-at-trako/>

PLÁN OBNOVY, 2022. Kompletný plán obnovy. [online] Dostupné na: <https://www.planobnovy.sk/kompletny-plan-obnovy/> [cit. 20. 8. 2024].

POGANYP, 2015. Mapa železničných tratí na Slovensku (slovenské popisy). [online] Dostupné na: https://sk.wikipedia.org/wiki/Zoznam_železničných_tratí_na_Slovensku#/media/Súbor:Railways_Slovakia_SK.svg

POHL, J., 2020. Dostupná inovatívni řešení v oblasti energetiky dopravy. In: Konference TOP EXPO: Trendy české a evropské energetiky, Praha, 10. 11. 2020. Siemens Mobility, s.r.o. [online] Dostupné na: http://www.top-expo.cz/domain/top-expo/files/smart-city/smart-city-2020/tee/prezentace/pohl_jiri.pdf [cit. 27. 2. 2025].

POHL, J., 2020-1. Elektrická osobní železniční doprava na tratích bez liniové elektrizace. Správa železnic.

POHL, J., 2022. Dekarbonizace železniční dopravy. In: 1. Česko – Slovenská železniční konference, Bratislava, 4. 11. 2022. Siemens Mobility, s.r.o. [online] Dostupné na: https://s3-eu-central-1.amazonaws.com/Siemens_ba9bc11525.pdf [cit. 15. 6. 2024].

POHL, J., 2023. Přímé a nepřímé využití vodíku při dekarbonizaci dopravy. [online] VUT, Brno, 24. 10. 2023. Siemens Mobility, s.r.o. Dostupné na: <https://www.ueen.fekt.vut.cz/sites/default/files/inline-files/vodik-vut-231024.pdf> [cit. 10. 2. 2025].

PRIBULA, D. & KENDRA, M., 2023. Analysis of Current State of Alternative Propulsion in a Sector of Passenger Railway Transport. *Transport Technic and Technology*, 19(2), s. 18. DOI: 10.2478/ttt-2023-0010.

PRIBULA, D. & KENDRA, M., 2024. Príležitosti a limity implementácie alternatívnych pohonov v železničnej osobnej doprave. In: Verejná osobná doprava - VOD 2024, 14. – 15. október 2024, Bratislava, Slovensko, s. 87–97.

PRIBULA, D., DEDÍK, M. & KENDRA, M., 2024-1. Methodology of technological times determination within the operation of railway passenger transport multiple units. In: *Transport problems 2024: proceedings 16 International scientific conference and 13 International symposium of young researchers*. 1. vyd. Katowice: Politechnika Slaska, s. 447–457.

PRIBULA, D., DOLINAYOVÁ, A. & KENDRA, M., 2023. Alternative propulsion in railway transport - the way to green transport. In: *Horizons of railway transport – Accelerating a shift from road to rail as a green transport mode*, 1st – 3rd October 2023, Podbaňské.

PRIBULA, D., ŽIDOVÁ, Z., KENDRA, M. & ZITRICKÝ, V., 2023-1. Factors affecting mileage of battery electric multiple units. In: *TRANSCOM 2023: 15th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*. vol. 74, s. 19–25.

PRUŽINSKÝ, M., MIHALČOVÁ, B. & JELENOVÁ, I., 2011. Veda, výskum, vedecké metódy a ich aplikácia. In: *Systémové prístupy 11. Systémové myšlení jako změna paradigmatu*, Praha, Česká republika.

RAILPAGE.NET, 2024. Siemens vyrobil hybridný Vectron pre trate Slovenska a Česka. [online] Dostupné na: <https://www.railpage.net/fotografie/siemens-vyrobil-hybridny-vectron-pre-trate-slovenska-a-ceska/> [cit. 15. 10. 2024].

RAILWAY-NEWS, 2025. ÖBB tests Cityjet Eco with positive results. [online] Dostupné na: <https://railway-news.com/oebb-tests-cityjet-eco-with-positive-results/> [cit. 14. 7. 2024].

REHÁK, R., 2022. Elektromobilita v Slovenskej republike vo vzťahu k postojom generácie „Z“.

REN21, 2024. Annex – Units and Conversion Factors. [online] Paris: REN21. Dostupné na: <https://www.ren21.net/gsr-2024/annex/units/> [Citované 5. 1. 2025].

RUBIO, S., NIETO, B. & MARTÍN, J., 2021. D1.5 – Hydrogen refuelling and storage requirements for rail vehicles. FCH2RAIL Project, Grant Agreement Number: 101006633.

RUF, Y., ZORN, T., DE NEVE, P. A., ANDRAE, P., EROFEEVA, S., GARRISON, F. & SCHWILLING, A., 2019. Europe's Rail. Study on the use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway Environment.

SAATY, T. L. & PENIWATI, K., 2008. Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences. Pittsburgh, PA: RWS Publications.

- SAE INTERNATIONAL, 2020. J2601_202005: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. Warrendale: SAE International. [online] Dostupné na: https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/
- SLÁDEK, F., NACHTIGALL, P. & VOJTEK, M., 2021. Predstavení vzájemných vazeb medzi vozidlami s alternatívnymi pohony, infraštruktúrou a nákladmi. Vedeckotechnický zborník Správy železníc, 5/2021, s. 61–71.
- SOLAR EMPORIUM, 2024. Can solar energy power a train? [online] Dostupné na: <https://solaremporium.com.au/can-solar-energy-power-a-train/> [cit. 27. 2. 2025].
- ŠPERKA, A., ČAMAJ, J., DEDÍK, M. & BULKOVÁ, Z., 2023. Evaluation Methodology of the Railway Stations Using the AHP Method in the Transport Hubs from the Freight Transport Point of View. Infrastructures, 8(12), s. 177.
- ŠRÁMEK, M., 2022. BEMUs ŠKODA & nízkoemisní zítřek. [online] ŠKODA. Dostupné na: https://ys-common.s3.eu-central-1.amazonaws.com/Skoda_bemus_7f45911ba3.pdf [cit. 12. 5. 2024].
- TABRIZI, M.K., CERRI, T., BONALUMI, D., LUCCHINI, T. & BRENNI, M., 2024. Retrofit of Diesel Engines with H₂ for Potential Decarbonization of Non-Electrified Railways: Assessment with Lifecycle Analysis and Advanced Numerical Modeling. Energies, 17(5), s. 996.
- VOHLA, M., SCHÖBEL, A. & RÜGER, B., 2024. Analysis of different traction systems for the Zillertalbahn. In: CETRA 2024 – 8th International Conference on Road and Rail Infrastructure, 15–17 May 2024, Cavtat, Croatia.
- VOJTEK, M. & DEDÍK, M., 2023. Prevádzkovanie železničnej dopravy osobnej dopravy. 233 s.
- WIWA P&G, 2023. HYTRAIN. Development of the world's first hydrogen-powered narrow-gauge train. [online] Dostupné na: <https://www.wiva.at/project/hytrain/> [cit. 22. 8. 2024].
- WU, H-W., LI, E-Q., SUN, Y-Y. & DONG, B-T., 2021. Research on the operation safety evaluation of urban rail stations based on the improved TOPSIS method and entropy weight method. Journal of Rail Transport Planning & Management, 20, 100262.
- YONEYAMA, T., et al., 2007. Fuel Cell Powered Railway Vehicle and experimental test results. ECPEA, 2007.
- ZDOPRAVY.CZ, 2024. Sbohem vodíku. V Německu se vrátí kvůli častým závadám nových jednotek do provozu dieselových vlakov. [online] Dostupné na: <https://zdopravy.cz/sbohem-vodiku-v-nemecu-se-vrati-kvuli-castym-zavadam-novych-jednotek-do-provozu-dieselove-vlak-228809/> [cit. 10. 2. 2025].
- ZDOPRAVY.CZ, 2025. Nedostatek paliva, nedodané stojany. Vodíkové vlaky u Berlína nahradil po dvoch týždňoch diesel. [online] Dostupné na: <https://zdopravy.cz/nedostatek-paliva-nedodane-stojany-vodikove-vlak-232211/> [cit. 8. 2. 2025].
- ZSE, 2020. Vlaky poháňané vodíkom môžu byť realitou aj na Slovensku. ZSE Biznis Novinky, roč. 2023, vyd. 2. [online] Dostupné na: <https://www.zse.sk/ZSE-BiznisNovinky/2020-02/Vlaky-pohanane-vodikom-mozu-byt-realitou-aj-na-Slovensku> [cit. 8. 2. 2025].
- ŽELEZNICE SLOVENSKEJ REPUBLIKY (ŽSR), 2024. Mapa železničnej siete. [online] Platné k: 11. 3. 2024. Dostupné na: www.zsr.sk/dopravcovia/infrastruktura/mapa-siete/ [cit. 11. 3. 2024].
- ŽELEZNICE SLOVENSKEJ REPUBLIKY (ŽSR), 2025. Projekty spolufinancované EÚ – stavby v realizácii. [online] Dostupné na: <https://www.zsr.sk/modernizacia-trati/projekty-spolufinancovane-eu-stavby-realizacii/>
- ŽELEŽNIČNÁ SPOLOČNOSŤ SLOVENSKO, A.S., 2023. Ozveny – Časopis pre zamestnancov. Vodík končí. Roč. 2023, vyd. 7, s. 16.
- ŽELEŽNIČNÁ SPOLOČNOSŤ SLOVENSKO, A.S., 2025. Obstaranie hybridných elek-trických jednotiek pre regionálnu dopravu. Štúdia uskutočniteľnosti. [online] Dostupné na: https://www.zssk.sk/wp-content/uploads/2025/02/SU-Obstaranie-hybridnych-EJ-pre-regionalnu-dopravu_FINAL.pdf [cit. 24. 2. 2025].
- ŽÍDEK, O., 2013. Primárne matematické vzdelávanie 2. Interaktívna elektronická učebnica. Trnava: PFTU Trnava, Slovensko. [online] Dostupné na: <https://pdfweb.truni.sk/e-ucebnice/pmv2/> [cit. 28. 2. 2025].
- ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE (UNIZA), 2024. Sieťová analýza. [online] Dostupné na: http://fbi.uniza.sk/ktvi/leitner/2_predmety/OA/Semester/EX07_Sietova%20analiza%20upr.pdf [cit. 10. 4. 2024].

SUMMARY

The dissertation addresses the issue of selecting the most suitable solutions for alternative propulsion systems of multiple units for a specific route, considering the impact of these propulsion systems on the technology of passenger rail transport. The proposed methodology consists of four phases. In the first phase, selected parameters of the units and the assessed train route are characterized. The second phase defines the technological and investment measures necessary for the operation of specific propulsion systems. In the third phase, the operating technology of the respective units is quantified, and the fourth phase involves multi-criteria decision-making on the advantages of the propulsion solutions using the TOPSIS method. The practical output of the dissertation is the selection of the most suitable propulsion variant for the given train route with respect to its impact on passenger transport technology, including the proposal of necessary technological and investment measures for infrastructure for the specific type of propulsion. This approach minimizes the risk of an inappropriate propulsion choice and prepares input data for further assessment. The methodology was applied to the Trenčín – Myjava route.

ZUSAMMENFASSUNG:

Die Dissertation befasst sich mit der Problematik der Auswahl der geeignetsten Lösungen für alternative Antriebssysteme von Triebzugeinheiten auf einer spezifischen Strecke unter Berücksichtigung der Auswirkungen dieser Antriebe auf die Technologie des Schienenpersonenverkehrs. Die vorgeschlagene Methodik besteht aus vier Phasen. In der ersten Phase werden ausgewählte Parameter der Einheiten sowie der bewerteten Zugstrecke charakterisiert. Die zweite Phase definiert die technologischen und investiven Maßnahmen, die für den Betrieb spezifischer Antriebssysteme erforderlich sind. In der dritten Phase wird die Betriebstechnologie der jeweiligen Einheiten quantifiziert, und die vierte Phase umfasst eine multikriterielle Entscheidungsfindung über die Vorteilhaftigkeit der Antriebslösungen unter Anwendung der TOPSIS-Methode. Das praktische Ergebnis der Dissertation ist die Auswahl der geeignetsten Antriebsvariante für die gegebene Zugstrecke unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf die Technologie des Personenverkehrs, einschließlich des Vorschlags notwendiger technologischer und investiver Maßnahmen für die Infrastruktur in Bezug auf den spezifischen Antriebstyp. Dieser Ansatz minimiert das Risiko einer ungeeigneten Antriebsauswahl und ermöglicht gleichzeitig die Vorbereitung von Eingangsdaten für eine weitere Bewertung. Die Methodik wurde auf der Strecke Trenčín – Myjava angewendet.