
Koncepcia, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel motorových jednotkách radu 861

Pavol Šťastniak, Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline.

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2562.

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline.

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2550.

Dušan Cesnek, Ing.

ŽOS Vrútky a.s.,

Dielenská Kružná 2, 038 61 Vrútky.

E-mail: cesnekdu@zos-vrutky.sk

Peter Golian, Ing.

Železničná spoločnosť Slovensko, a. s.,

Rožňavská 1, 832 72 Bratislava 3.

E-mail: golian.peter@slovakrail.sk

Concept, safety and related industrial research for the replacement of diesel traction by hydrogen fuel cell traction in the railway vehicles series 861

Abstract: The subject of the research is the development of a technical feasibility study that will deal with the concept, safety and related industrial research for the replacement of diesel traction by hydrogen fuel cell traction in the railway vehicles series 861. Part of the research is also the operation of such a source of traction, the assessment and evaluation of risks, especially from the point of view of maintenance and operation. The research result will be a technical study based on numerical simulations of static and dynamic loads, energy management of the fuel cell traction and requirements for the inclusion of such vehicles in regular operation on non-electrified tracks of the *Slovak Republic*.

Keywords: railway vehicle, research and development, operation safety.

ÚVOD

Výskum je orientovaný na vytvorenie podmienok pre aplikáciu environmentálne ohľaduplných vodíkových technológií do prevádzky železničnej osobnej dopravy SR, čo významným spôsobom prispeje k naplneniu strategických cieľov *Európskej únie* a v rámci toho i *Slovenskej republiky* v oblasti zabezpečenia poklesu skleníkových plynov o 55 %, t. j. približne 11 mil. ton ročne, do roku 2030 v porovnaní s východiskovým rokom 1990 a dosiahnutia uhlíkovej neutrality do roku 2050. Jeden z možných prístupov smerujúcich k úspešnému

prispeniu plánovaného zníženia emisií skleníkových plynov v oblasti železničnej dopravy predstavuje úplná elektrifikácia železničných tratí do roku 2050 a výmena všetkých prevádzkovaných železničných koľajových vozidiel s dieselovým pohonom (vrátane posunovacích lokomotív) za vozidlá závislej trakcie využívajúce elektrický pohon. Vzhľadom na veľký podiel neelektrifikovaných železničných tratí v SR je tento náročný cieľ úplnej elektrifikácie v stanovenom disponibilnom období do roku 2050 prakticky nerealizovateľný. Pri súčasnej dĺžke 1992,5 km neelektrifikovaných železničných tratí by bolo

nevyhnutné v pomerne krátkom období počas 29 rokov elektrifikovať ročne približne 69 km, z ktorých veľký podiel predstavujú regionálne trate. To je mimoriadne náročná a ťažko uskutočniteľná úloha. Pritom investície do elektrifikácie a potrebnej obnovy niektorých regionálnych tratí nie sú dostatočne návratné z dôvodov ich relatívne nízkeho prevádzkového využitia v kombinácii s veľkými investičnými nákladmi na samotnú elektrifikáciu a udržiavanie tratí. Podľa expertných odhadov odborníkov na železničnú infraštruktúru predstavuje v súčasnom období elektrifikácia 1 km železničnej trate priemerné náklady v rozmedzí 1,0 ÷ 1,5 mil. Eur (v závislosti od technických parametrov a potrebného rozsahu rekonštrukcie trate, prispôsobenia/modernizácie potrebnej zabezpečovacej a oznamovacej techniky a pod.), čo je investične veľmi náročné. Úplná elektrifikácia železničných tratí SR by tak dosahovala predpokladané náklady v rozsahu približne 2 ÷ 3 mld. Eur. Problematickou sa v uvedenom časovom limite javí i disponibilná technická či dodávateľská kapacita pre výkon stavebných prác v procese elektrifikácie.

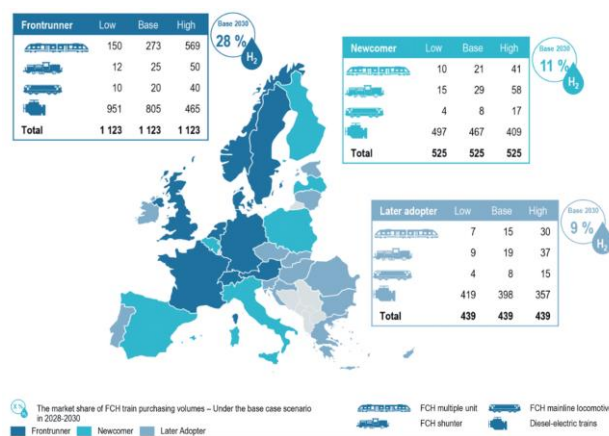
Z dôvodu prijatia ambiciózneho plánu EÚ a tiež SR redukcie skleníkových plynov a dosiahnutia uhlíkovej neutrality do roku 2050, vznikla požiadavka urýchleného nasadenia H₂ pohonu v regionálnej osobnej koľajovej doprave vo väčšom rozsahu. Potreba je determinovaná ekonomikou prevádzky a tiež z dôvodu údržby kritickej masy koľajových vozidiel. Preto je potreba najneskôr do roku 2030 zabezpečiť trakčnými jednotkami aspoň trať Nové Zámky - Prievidza v počte 12 kusov. Celkovo ZSSK prevádzkuje 230 ks diesel-motorových jednotiek (DMJ), z toho 53 radu 861, ktoré sú z dlhodobého hľadiska najperspektívnejšie. Na obr. 1 je ukážka v súčasnosti používanej DMJ radu 861.



Obr. 1. V súčasnosti používaná DMJ radu 861

Prijatím Európskej vodíkovej stratégie schválenej EK [1] dňa 8.7.2020 aj SR začala prípravou svojej stratégie využívania vodíka ako energetického nosiča, a to na konferencii konanej dňa 16.7.2020 [2] v Bratislave, ktorú organizovalo MH SR. V júni 2021 bola schválená Národná vodíková stratégia a následne sa začal pripravovať jej akčný plán. Súčasťou oboch dokumentov je aj nasadenie

osobných regionálnych vlakov s pohonom pomocou palivových článkov (FCHMU). ZSSK a.s bola členom konzorcia H2MUCTYNIC, v rámci ktorého bol vytvorený projektový zámer na inštaláciu 50 MW účelových obnoviteľných zdrojov energie na podporu prevádzky 20 MW elektrolyzéra v obci Močenok. Zariadenie sa bude používať na produkciu bez uhlíkového zeleného vodíku, ktorý nahradí fosilné palivá. Pomer produkovaného vodíka bude určený na použitie v doprave s cieľom demonštrovať technickú a obchodnú uskutočniteľnosť vodíkových čerpacích staníc a elektrických vozidiel s palivovými článkami. Štúdia s nasadzovaním vodíkoveho pohonu v železničnej doprave do roku 2030 v EÚ je uvedená v [3]. Predpokladané využitie v jednotlivých krajinách je zobrazené na obr. 2.



Obr. 2. Predpokladané využitie „vodíkových vlakov“ v jednotlivých krajinách EÚ

2 MIERA ORIGINÁLNOSTI A INOVATÍVNOSTI VÝSKUMU

Výskum je realizovaný v čase, kedy nie je v bežnej pravidelnej komerčnej prevádzke žiadna trakčná jednotka s pohonom na báze vodíkových palivových článkov s pôvodne inštalovaným hydrostatickým meničom a náhonom nápravy pomocou kardanového hriadeľa, ako je to v prípade DMJ 861 s dieselovým pohonom. Rozsiahle testovanie v komerčnej prevádzke prebehlo s dvoma jednotkami FCHMU v Dolnom Sasku a trojmesačné testovanie rovnakých jednotiek v Rakúsku ich operátorom OBB. Treba však zdôrazniť, že pilotné projekty uvedenia takýchto vlakov prebiehajú v rámci každého väčšieho členského štátu EÚ a každý relevantný výrobca a prevádzkovateľ koľajových vozidiel sa na prechod pripravuje z dôvodu mimoriadne ambiciózných záväzkov vyplývajúcich z Parížskej dohody a následných politik Green Deal. Predpokladáme, že jednotlivé riešenia sa budú líšiť v detailoch, avšak aj tieto môžu znamenať v prípade úspešného a rýchleho zvládnutia mimoriadnu konkurenčnú výhodu. Preto riešenie problematiku považujeme za vysoko aktuálnu, inovatívnu a vzhľadom na unikátnu konštrukciu DMJ 861 aj originálnu.

Dôvodom realizácie navrhovaného výskumu je predovšetkým celospoločenská naliehavosť žiaduceho zníženia škodlivých emisií skleníkových plynov vznikajúcich pri prevádzke železničnej osobnej dopravy a postupne do roku 2050 cieľovo dekarbonizácia jej prevádzky. Príspevok realizácie výskumu k naplneniu tejto náročnej výzvy predstavuje aplikácia technológií vodíkoveho pohonu do vlakových jednotiek, ktoré by mali postupne nahrádzať v súčasnom období využívaný dieselový pohon vo vlakoch prevádzkovaných na neelektrifikovaných železničných tratiach SR. Cieľovo by mali byť vodíkové vlakové jednotky využívané v prevádzke regionálnej železničnej osobnej dopravy v SR, nahradiť vlakové súpravy s dieselovým pohonom na nezávislej železničnej infraštruktúre. Popri významnom príspevku k naplneniu náročného cieľa dosiahnutia uhlíkovej neutrality a k poklesu negatívnych dopadov na životné prostredie, by mali zároveň prispieť aj k zlepšeniu podmienok pre žiaduci rast mobility obyvateľstva, k skvalitneniu ponuky komfortnej, rýchlej, bezpečnej a spoľahlivej prepravy osôb železnicou na úrovni 21. storočia a v dôsledku toho i k rastu počtu cestujúcich železničnou osobnou dopravou. To by sa premietlo aj do posilnenia konkurencieschopnosti environmentálne ohľaduplnej železničnej osobnej dopravy predovšetkým voči individuálnej automobilovej doprave.

Ako primárny zdroj paliva, ktorý bude poháňať trakčné jednotky rady 861 bude zelený vodík, ktorý sa vyrába elektrolýzou vody s použitím elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Emisie na výrobu takéhoto vodíku sú nulové, no v súčasnosti 96 % vodíka pochádza z fosílnych palív. Prínosom výskumu bude veľký krok k postupnému budovaniu vodíkovej infraštruktúry na Slovensku a zároveň motivácia výrobcov produkovať ekologicky hodnotný zelený vodík. Len prostredníctvom zabezpečenia trvalej a stabilnej spotreby zeleného vodíka sa môže vytvoriť potrebný hodnotový reťazec relevantného priemyslu a služieb. Železničná doprava v regióne bez elektrifikácie takúto spotrebu zabezpečuje.

3 SPÔSOB REALIZÁCIE

3.1 Návrh a overenie koncepcie výmeny pohonu z dieselového na elektrický s vodíkovými palivovými článkami prostredníctvom numerických simulačných analýz pre existujúce DMJ r. 861 - nezávislý výskum a vývoj

Na základe návrhov, ktoré postupne vyplynú z realizácie, budú konštrukcie overené prostredníctvom vhodných softvérových simulačných nástrojov. Budú vyhodnotené konštrukčné riešenia vo viacerých

variantoch. Simulované budú predovšetkým pevnostné namáhania zmenenej konštrukcie v porovnaní s pôvodným riešením DMJ 861, analýzy zmeny dynamiky (jazdných vlastností), návrh efektívnej kombinácie zdroja energie na báze vodíka s vhodným akumulátorom elektrickej energie, úlohy multikriteriálnej analýzy, teda kombinácie energetických, zástavbových a ekonomických kritérií.

Táto časť výskumu je náročná nielen z pohľadu objemu prác, ale najmä presná špecifikácia parametrov a faktorov, ktoré sa v reálnej prevádzke objavujú. Počas tejto fázy sa simulačnými analýzami overí celkový koncept zmeny pohonu trakčnej jednotky a jeho vplyv na základné statické a dynamické charakteristiky navrhovaného riešenia. Mimoriadny dôraz sa bude klásť na zmeny hmotnostných parametrov, účinnosti reostatických bŕzd, zmeny ťažiska a štrukturálne vlastnosti. Osobitnú pozornosť bude vyžadovať overenie konštrukčných úprav v časti strechy jednotky z dôvodu umiestnenia palivových článkov a nádrží stlačeného vodíka na nej. Taktiež budú simulované a počítané energetické bilancie v pomerne širokom pásme prevádzkových režimov.

3.2 Konštrukčný a parametrický návrh výmeny dieselového pohonu za elektrický s vodíkovými palivovými článkami v existujúcich DMJ r. 861 – priemyselný výskum

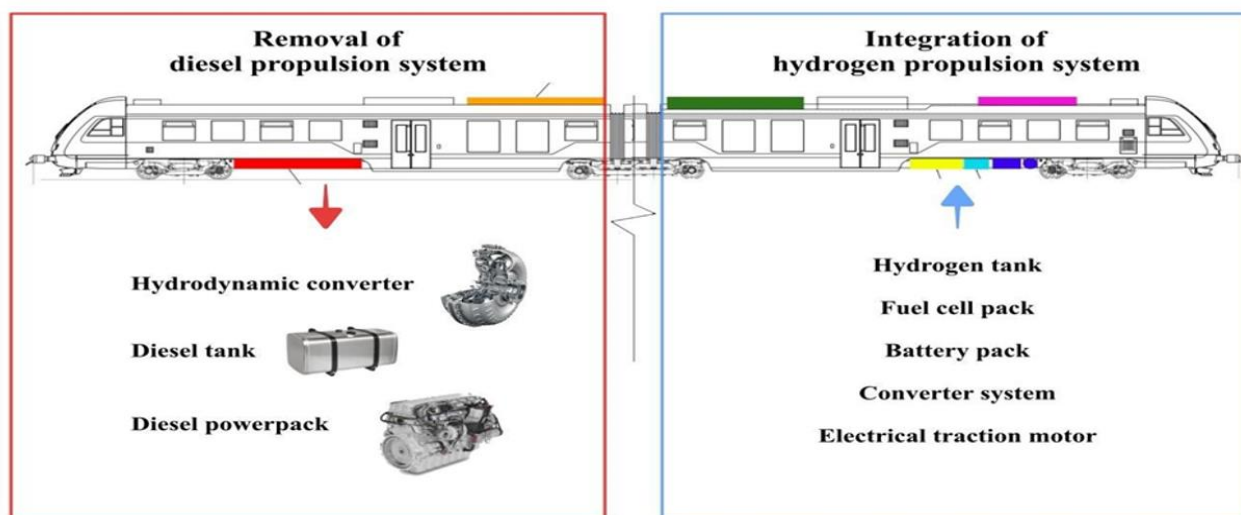
Na základe údajov z prevádzky vznikne parametrizovaný koncept zmeny pohonu DMJ 861 na pohon s vodíkovými palivovými článkami. Samotná koncepcia riešenia je vo svojej podstate hybridná. Hlavným zdrojom elektrickej energie sú palivové články umiestnené na streche trakčnej jednotky a batérie slúžia ako zdroj na rozbeh chemickej reakcie v článkoch a tiež na rekuperáciu energie počas brzdenia a tiež ako zdroj špičkového výkonu pri zrýchľovaní vlaku. V rámci tejto časti sa budú na základe predchádzajúcich analýz voliť konkrétne riešenia a umiestnenie jednotlivých uzlov nového pohonu. Bude treba vhodnými softvérovými prostriedkami navrhnuť výkonové a rozmerové parametre uzlov. Taktiež je potreba skúmať kompatibilitu jednotlivých uzlov a to najmä:

- Trakčného motora.
- Reostatického brzdneho systému.
- Jednosmerného meniča (DC/DC menič).
- Batériového bloku.
- Dodatočného meniča aj s elektronickým riadením pohonu.
- Bloku palivových článkov.
- Vodíkových zásobníkov (35 MPa).

Významný podiel na výskumných aktivitách bude venovaný energetickému manažmentu pohonnej sústavy v reťazci trakčný motor-batéria-palivový článok-reostatické brzdy-chladienie/ohrev.

V bežnej pravidelnej komerčnej prevádzke nie je žiadna trakčná jednotka s pohonom na báze vodíkových palivových článkov s pôvodne inštalovaným hydrostatickým meničom a náhonom nápravy pomocou kardanového hriadeľa ako je to v prípade *DMJ 861* s dieselovým pohonom.

nadväznej infraštruktúre. Analyzovať sa budú všetky svetové zdroje. Zabezpečenie týchto údajov bude zo strany ZSSK mimoriadne náročné a bude vyžadovať zapojenie množstva útvarov a najmä prevádzkových pracovníkov v regiónoch. Na zabezpečenie dostatku relevantných údajov z tratí budú zapojení aj rušňovodiči, ktorí budú vybavení špeciálnym *GPS* zariadením s akcelerometrami a ďalšími snímačmi, ktoré budú zbierať všetky potrebné informácie z neelektrifikovaných tratí nielen čo sa týka profilu, ale



Obr. 3. Schematický návrh výmeny pohonu *DMJ 861*

3.3 Priemyselný výskum prevádzkových požiadaviek operátora FCHMU z pohľadu spoľahlivosti, bezpečnosti a údržby - priemyselný výskum

Významným okruhom výskumu s dopadom na výstupy a ciele celého výskumu budú otázky spojené s bezpečnosťou prevádzkovania systému pohonu s vodíkovými palivovými článkami, posudzovanie a hodnotenie rizík a to najmä z pohľadu výroby, údržby a prevádzky. Musia byť identifikované a následne preskúmané všetky nové technické a bezpečnostné riziká/štandardy a požiadavky nielen na produkt, ale aj na personál, a to v celosvetovom meradle samozrejme s dôrazom na EÚ. V prípade identifikácie chýbajúcich štandardov navrhnuť riešenia pre technickú prax v rámci SR.

Bohatým zdrojom analytických dát budú priebežné výsledky už spomínaného projektu *FCH2RAIL*, v rámci ktorého sú niektoré pracovné balíky venované práve analýzám zozbieraných z tratí všetkých relevantných európskych operátorov. Taktiež budú poskytnuté technické dáta overených pohonných sústav s palivovými článkami. V rámci pracovného balíka tohto výskumu venovaného otázkam bezpečnosti, výroby, údržby a prevádzky sa budú analyzovať všetky dostupné normy, štandardy a smernice súvisiace s používaním vodíka v doprave a

najmä reálneho správania sa *DMJ* na trati počas roka.

4 PREDPOKLADANÉ VÝSLEDKY A VÝSTUPY

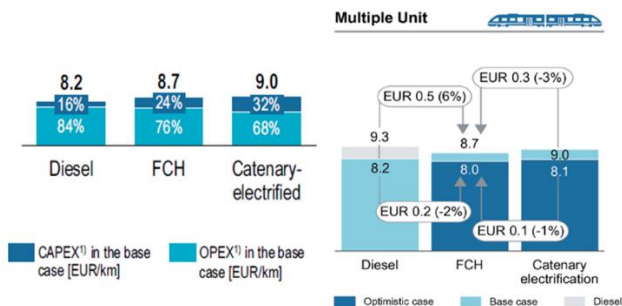
4.1 Spôsob a miera využiteľnosti deklarovaných výsledkov

ZSSK je prevádzkovateľom (užívateľom) *DMJ* jednotiek r. 681 v počte 53 ks a je jeho záujmom konvertovať túto flotilu na pohon bez uhlíkovej stopy. Samozrejme aj pri nákupe ďalších nových jednotiek bude obstarávať riešenia znižujúce celkový dopad produkcie *CO2* na životné prostredie. Pre spolu riešiteľskú organizáciu *ŽOS Vrútky*, ako výrobcu *DMJ* r. 861, je dopad zavedenia výroby a retrofitu dieselových jednotiek na vodíkový pohon mimoriadne významný. Ako každý z výrobcov si uvedomuje nevyhnutnosť ponúkať ekologické varianty svojich produktov z dôvodu neustále sa sprísňujúcej legislatívy a tiež celkového vnímania zákazníkov a cestujúcej verejnosti. Výrobca po zvládnutí technológie bude schopný umiestňovať svoje inovované produkty nielen v SR ale samozrejme aj na trhoch celej Európy. Tomu však bude ešte predchádzať pomerne náročná homologizácia produktu. Preto je nevyhnutné začať s riešením čo najskôr. Využitie výsledkov v oblasti výskumu v oblasti prevádzkovej bezpečnosti vodíkovej

technológie v koľajovej technike je taktiež zrejme a najmä vysoko aktuálne nielen pre prevádzkovateľov, ale aj výrobcov a údržbárske podniky. Všetky takto získané výstupy budú slúžiť ako vstupy do legislatívneho a normalizačného procesu v rámci SR a v nadväznosti na medzinárodnú štandardizáciu.

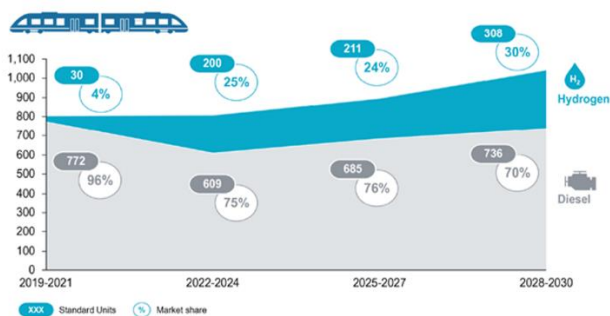
4.1 Ekonomický a environmentálny prínos

Výsledky spoločnej štúdie *Európskych výskumných partnerstiev Shift2Rail* a *FCH JU* ukazujú TCO parameter (*Total Cost of Ownership*) teda náklady na obstaranie a prevádzku trakčných jednotiek s dieselovým, vodíkovým a tiež trolejovým vedením. Jednotlivé podiely sú zobrazené na obr. 4 - Podiel obstarávacích a prevádzkových nákladov pre vybrané trakčné jednotky.



Obr. 4. Podiel obstarávacích a prevádzkových nákladov pre vybrané trakčné jednotky

Z uvedeného grafu je zrejme, že stále v prospech dieselového pohonu hrá nižšia obstarávacia cena vlakov (CAPEX), kdežto prevádzkové náklady (OPEX) sú už dnes nižšie pre vodíkové vlaky. Elektrifikácia sa v tomto smere javí ako najnáročnejšia z pohľadu CAPEX. Táto štúdia predpokladá aj dva ekonomické scenáre TCO, základný a optimistický v závislosti na vývoji ceny nafty. Mohutným nástupom výskumu a vývoja vodíkových technológií ale najmä jeho masívnym dotovaním v programoch EÚ možno v krátkom čase očakávať významné zníženie CAPEX a teda rýchle nástup dostupnosti aj z pohľadu ekonomiky.

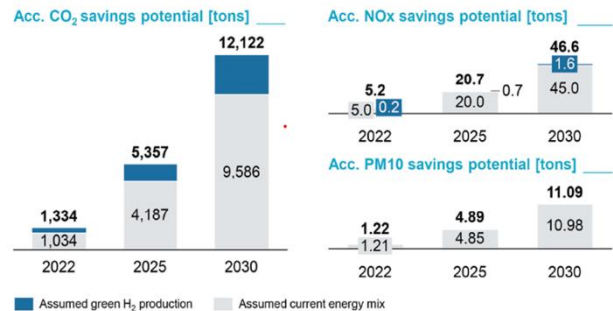


Obr. 5. Trhový potenciál FCH jednotiek do roku 2030

Pre výrobcu je podstatný trhový potenciál potreby FCH jednotiek v základnom scenári s výhľadom do roku 2030 zobrazený na obr. 5 - Trhový potenciál FCH jednotiek do roku 2030. Z takto popísanej

predikcie trhového vývoja možno predpokladať výrazné zvýšenie konkurencieschopnosti výrobcu ŽOS Vrútky a tiež príspevok k exportnej výkonnosti SR. Je to jeden z najdôležitejších dopadov tohto výskumu, ktorý má nadväzné dopady na zamestnanosť a zvyšovanie pridanej hodnoty, pretože trakčné jednotky sú finálnym výrobkom.

Mimoriadne zaujímavé vychádzajú aj výsledky pri zisťovaní vplyvov na životné prostredie (obr. 6). Štúdia uvádza pilotnú prevádzku 4 súprav vodíkových vlakov s denným obehom (podobne ako je to na trati *Prievidza-Nové Zámky*) vo Francúzku, ktoré má podobný energetický mix ako SR.



Obr. 6. Predpokladaný vplyv vodíkových vlakov na životné prostredie

Zavedením environmentálne ohľaduplných vodíkových technológií výskum výrazne prispeje k naplneniu strategických cieľov *Európskej únie* a dosiahnutiu uhlíkovej neutrality do roku 2050. Zníženie emisií bude predstavovať 6000 ton CO₂ na celú trať za jeden rok. Výskum *Univerzity v Göteborgu* vo Švédsku o vplyve vibrácií vlaku na zdravie preukázal zníženie hluku a vibrácií po nahradení dieselového pohonu vodíkovým, čo môže viesť k zlepšeniu zdravia cestujúcich, zamestnancov železníc a ľudí žijúcich v blízkosti železničných tratí.

ZÁVER

Cieľom výskumu je komplexné vypracovanie technickej štúdie uskutočniteľnosti, ktorá bude riešiť samotnú koncepciu, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel-motorových jednotkách radu 861. V rámci výskumu je zámer identifikovať konštrukčné skupiny existujúcich DMJ r. 861, ktoré budú takouto prestavbou dotknuté a definovať rozsah konštrukčných zmien. Zároveň je cieľom definovať komplex požadovaných technických parametrov jednotlivých uzlov nového pohonu. Budú špecifikované výkonové, dimenzionálne, pevnostné, dynamické a ostatné súvisiace parametre, ktoré budú uplatňované v prípade ich obstarávania pri realizácii v podmienkach výrobcu. Ďalším významným okruhom výskumu je bezpečnosť a prevádzkovanie takéhoto systému pohonu, posudzovanie a hodnotenie rizík a to najmä z

pohľadu výroby, údržby a prevádzky. Musia byť identifikované a následne preskúmané všetky nové technické a bezpečnostné riziká/štandardy. V prípade identifikácie chýbajúcich štandardov navrhnúť riešenia. Všetky tieto ciele a ich dosiahnutie sú nevyhnutnou podmienkou zvládnutia vývoja trakčnej jednotky s vodíkovým pohonom, ktorý sa bude následne realizovať vo veľkom konzorciu (*IPCEI* projekt). Výsledkom výskumu bude podrobná technická štúdia s numerickými simuláciami statických a dynamických zaťažení, energetický manažment pohonu a požiadavky na zaradenie takýchto súprav do riadnej prevádzky na trase *SR*.

Pod'akovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Konceptia, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel motorových jednotkách radu 861 (kód projektu v ITMS2014+: 313011BVC2), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

LITERATÚRA

[1] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS (2020): [online], Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>.

[2] VODÍKOVÁ BUDÚCNOSŤ SLOVENSKA (2023): [online], Dostupné na: <https://nvas.sk/sk/2020/07/19/vodikova-buducnost-slovenska/>.

[3] EUROPEAN HYDROGEN WEEK (2021): [online], Dostupné na: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Study%20on%20the%20use%20of%20fuel%20cells%20and%20hydrogen%20in%20the%20railway%20environment_final.pdf.