

VOZIDLA A INFRASTRUKTURA PRO BEZEMISNÍ PROVOZ NA NEELEKTRIFIKOVANÝCH TRATÍCH

VEHICLES AND INFRASTRUCTURE FOR EMISSION-FREE OPERATION ON NON-ELECTRIFIED LINES

Jiří POHL¹

Abstrakt

Přechod české železnice na plně bezemisní provoz je objektivní nutností. A to nikoliv jen z důvodu úspor energie a emisí, ale i pro zvýšení výkonnosti a efektivnosti železniční dopravy. Ukazuje se rozumné provést jej kombinací liniového a akumulátorového napájení vozidel. Obnovu parku vozidel je potřeba koordinovat s rozvojem na straně dopravní cesty. S konverzí napájení drah ze 3 kV na 25 kV, s rozvojem liniové i bodové elektrifikace i se zaváděním ETCS na tratích a na vozidlech.

Klíčová slova

elektrifikace, dvouzdrojová vozidla, bezemisní provoz, vodík

Abstract

The transition of the Czech railways to fully emission-free operation is an objective necessity. And not only to save energy and emissions, but also to increase the efficiency and effectiveness of rail transport. It appears reasonable to do this by combining line and battery power to the vehicles. The renewal of the vehicle fleet needs to be coordinated with the development on the railway infrastructure side. With the conversion of track power supply from 3 kV to 25 kV, the development of line and point electrification and the introduction of ETCS on lines and vehicles.

Keywords

electrification, hybrid vehicles, zero emission operation, hydrogen

1 ÚVOD

Před dvanácti lety, v roce 2009, vyšlo Nařízení Evropského parlamentu a rady č. 443/2009, které výrobcům automobilů sdělovalo, že osobní automobily vyráběné po roce 2020 budou muset v průměru celoroční vyrobené flotily produkovat méně než 95 gramů oxidu uhličitého na kilometr jízdy (což odpovídá spotřebě nafty 3,6 litru na 100 km). V opačném případě za každý vyrobený vůz zaplatí pokutu 95 EUR za každý gram oxidu uhličitého přes tento limit.

Zpočátku velkou část z času, který dostali výrobci automobilů k přípravě na účinnost tohoto opatření, promarnili mediálními tlaky kritizujícími údajnou zbytečnost a nereálnost těchto cílů. Avšak tváří v tvář vývoji trhu v Evropě, ale zejména v Asii a v Americe, postupem času akceptovali realitu. V plné síle svého oboru se upřeli ke splnění zadaného cíle a požadavky Nařízení Evropského parlamentu a rady č. 443/2009 nyní již v zásadě plní, neboť splnitelné jsou. A to tím, že produkci

¹ Ing. Jiří Pohl, Siemens Mobility, s.r.o. Siemensova 1, 155 00 Praha. Tel.: +420 724 014 931, e-mail: jiri.pohl@siemens.com

spalovacích automobilů s nadlimitními emisemi doplňují rok od roku větším dílem elektrických automobilů s nulovými emisemi. Investují desítky miliard EUR do modernizace výrobní základny, aby zvládli výrobu elektrických automobilů. Trendu elektrických automobilů věří, klíčové komponenty elektrického trakčního pohonu (akumulátory, motory, měniče a řízení) insourcují.

O své vůli zastavují renomovaní výrobci prestižních značek vývoj spalovacích automobilů s cílem naplno soustředit potenciál svých tvůrčích techniků a laboratoří do vývoje nových typů elektrických automobilů. Trh je od nich žádá. Po Jižní Koreji a Norsku (2025), Belgii (2026), již oznámili, že na svém území nepřipustí od roku 2030 prodej spalovacích automobilů též Dánsko, Irsko, Island, Izrael, Německo, Nizozemí, Slovinsko, Švédsko a Velká Británie. A také Indie s 1,4 miliardou obyvatel. Nově ze strany vedení EU stanovené limity emisí osobních automobilů od roku 2025 v úrovni 81 g CO₂/km a od roku 2030 v úrovni 53 g CO₂/km jsou tak v zásadě již zbytečné, přirozený vývoj na trhu i v průmyslu kráčí rychleji, regulace již není potřebná.

Poučný pro dopravu je i vývoj v oblasti elektrárenství. Po výstavbě 2 GW jaderné elektrárny v Temelíně, která v průběhu deseti let (2010 až 2019) dodávala v průměru ročně 14,7 TWh elektrické energie, nedošlo k očekávanému odstavení uhelných elektráren. ČR tak v průběhu deseti let (2010 až 2019) vykazovala aktivní exportní saldo elektrické energie v průměru ročně 14,6 TWh.

Nástroj, který měl motivovat uhelné elektrárny k ukončení činnosti, emisní povolenky EU ETS, byl totiž zpočátku pro jejich nízkou tržní cenu málo účinný. Uhelná elektrárna staršího typu, spalující s účinností 36 % uhlí s uhlíkovou stopou 0,36 kg CO₂, produkuje na 1 kWh tepelné energie 0,36 / 36 % = 1 kg CO₂ na 1 kWh elektrické energie. Ještě před čtyřmi lety, v roce 2017, byla cena emisní povolenky kolem 5 EUR/t CO₂. V přepočtu na elektrickou energii produkovanou v uhelné elektrárně představoval nákup emisních povolenek náklady jen 5 EUR/MWh, a to ještě část emisních povolenek dostávaly elektrárny od státu zdarma.

Avšak za poslední čtyři roky (2017 až 2021) vzrostla tržní cena emisní povolenky EU ETS desetinásobně, z původních cca 5 EUR/t CO₂ na současných cca 50 EUR/t CO₂, navíc bezplatný přiděl částí emisních povolenek uhelným elektrárnám skončil. Emisní povolenky v aktuální ceně kolem 50 EUR/t CO₂ zdrazňují elektrickou energii produkovanou ve starších uhelných elektrárnách s účinností kolem 36 % o zhruba 50 EUR/MWh. To je při aktuální tržní ceně elektrické energie v úrovni přibližně 60 EUR/MWh pro provozovatele uhelných elektráren zásadní nákladová položka.

Reálný vývoj vedl provozovatele uhelných elektráren ke změně podnikatelské strategie. Zatím co ještě před pár lety bylo tématem prolamování limitů těžby v hnědouhelných dolech, dnes se jejich vlastníci snaží co nejdříve provoz uhelných elektráren ukončit, respektive uhelné elektrárny přebudovat na bimodální. Využít část jejich technologie, volných okolních pozemků i přenosových elektrických vedení, a přestavět uhelné elektrárny na bimodální elektrárny paroplyn (dvojitý pracovní cyklus se spalovací turbínou a s parní turbínou) a fotovoltaika. A to již s hybridními dvoupalivovými spalovacími turbínami metan/vodík, s cílem doplnit v dalším kroku k těmto technologiím ještě i elektrolyzéry pro ukládání momentálně nadbytečné elektrické energie z obnovitelných zdrojů (slunce, vítr) do vodíku. Fotovoltaická část těchto bimodálních elektráren může být s výhodou (snížení odparů) řešena jako plovoucí na hladině jezer, vzniklých zaplavením důlních jam v rámci hydrických rekultivací, výsypky jsou příležitostí pro agrofotovoltaiku (využití zastínění plochy FV panely ke zvýšení výnosnosti zemědělské produkce).

Vedle růstu tržní ceny emisních povolenek má zásadní vliv na tento obrat v elektrárenství i další nástroj EU, a to taxonomie. Ve snaze předejít investicím do neperspektivních projektů připravila EU pečlivě zpracovaný seznam produktů a technologií, které jsou z hlediska cílů EU v oblasti energetiky a klimatu perspektivní, a bude je proto možno z fondů EU podpořit, a které nikoliv.

Jakkoliv vstoupí taxonomie v EU v účinnost od 1.1.2022, tak již její zásady okamžitě a zcela dobrovolně převzaly komerční banky. Velmi logicky odmítají financovat projekty, které nespadají podle taxonomie mezi perspektivní, neboť oprávněně pochybují o budoucí schopnosti dlužníka předmětný úvěr splácet. Stejnou praxi spontánně přebírají i pojišťovny. Odmítají pojišťovat projekty, které nesplňují požadavky taxonomie, pokládají je za vysoce rizikové.

V úhlu pohledu těchto skutečností je na místě se zamyslet nad budoucností energetiky dopravy. Doprava zatím nespadá do sféry regulované emisními povolenkami EU ETS. Avšak energie pro dopravu je v ČR ve srovnání s ostatními obory nejvíce závislá na fosilních palivech. V hodnotách roku 2019 byl podíl energie fosilních paliv na konečné spotřebě energie v jednotlivých oborech hospodářských činností v ČR následující:

- doprava 93 %,
- teplárenství 89 %,
- elektrárenství 51 %,
- průmysl 44 %.

Doprava je ve spotřebě fosilních paliv mezi konečnými spotřebiteli energie dominantem i absolutně. V roce 2019 ČR spotřebovala doprava 73 TWh/rok energie fosilních paliv, což je více než průmysl (34 TWh/rok) a teplárenství (31 TWh/rok) dohromady. Proto je potřebné pečlivě sledovat, jaké další kroky v rámci dekarbonizace v rámci EU přijdou. Velmi logické jsou plány managementu EU zahrnout do sféry regulované emisními povolenkami EU ETS i sektory dopravy a domácností, současná nesymetrie není udržitelná. S vývojem v oblasti dopravy souvisí i dva důležité cíle, definované v základních strategických dokumentech na úrovni světa i Evropy:

- Mezinárodní energetická agentura IEA stanovila letos na jaře v programovém dokumentu „Net-zero by 2050“ cíl přechodu všech vozidel na elektrický pohon do roku 2040.
- Sdělení Evropské komise „Strategie pro udržitelnou a čistou mobilitu“ z prosince loňského roku definuje milník s cílem bezemisní veřejné hromadné dopravy na vzdálenost do 500 km do roku 2030.

Tyto cíle jsou logické. Dopravu je potřeba bezodkladně dekarbonizovat, a to především dopravu veřejnou. Důraz na prioritu dekarbonizace zejména veřejné dopravy má logiku v řádově vyšším denním časovém využití, a tedy i produktivity dopravních prostředků veřejné hromadné dopravy, řízených řidiči profesionály (respektive perspektivně bezobslužnými) ve srovnání s velmi nízkým denním časovým využitím dopravních prostředků individuální dopravy, řízených řidiči amatéry, kteří z principu svého denního režimu používají své automobily v průměru zhruba jen půl hodiny denně. To má pochopitelně zásadní dopad na ekonomickou efektivnost investic do dekarbonizace, která je právě z důvodu vyššího denního časového využití, a tím i celkového ročního průběhu vozidel u dopravních prostředků veřejné hromadné dopravy, výrazně vyšší než u osobních automobilů.

Z důvodu efektivního využití investic do dekarbonizace je vedle již samovolně probíhajícího útlumu výroby spalovacích osobních automobilů, a jejich náhrady elektrickými osobními automobily, v centru pozornosti centrálních orgánů EU bezemisní veřejná hromadná doprava. Je nemyslitelné, aby dekarbonizace veřejné hromadné dopravy zaostávala za dekarbonizací individuální dopravy, to by kromě málo efektivního investování též veřejnou hromadnou dopravu zcela degradovalo. Proto je nákup autobusů do veřejné hromadné dopravy směrnicí Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1161 již od letošního roku regulován povinným dílem nízkoemisních a bezemisních vozidel. Je pochopitelné v zájmu racionálního investování finančních prostředků z veřejných zdrojů, aby byla do systematického trendu dekarbonizace veřejné hromadné dopravy intenzivně zapojena i železnice.

2 BUDOUCNOST ŽELEZNICE

Železnice je dosud všeobecně vnímána vůči silniční dopravě jako energeticky a emisně méně náročná. V případě dominantní role spalovacích automobilů na silnici (v současnosti je v ČR stále ještě téměř 100 % automobilů spalovacích) a dominantní role elektrické vozby na železnici (v současnosti zajišťuje v ČR elektrická vozba na železnici v ČR 82 % dopravních výkonů osobní dopravy a 87 % dopravních výkonů nákladní dopravy) tomu tak nepochybně je. Elektrická železnice má ve srovnání se spalovacími automobily zhruba osmkrát nižší spotřebu energie, s tím spojené nižší emise oxidu uhličitého a nulové místní emise zdraví škodlivých látek.

V éře těžkých olovených trakčních akumulátorů s měnou energií 25 kWh/t, údržbově náročných (pravidelné doplňování vody), s nízkou účinností, s pomalým nabíjením a nevelkou životností, byla aplikace zásobníků elektrické energie v automobilech jen okrajovým tématem. Příchod lehkých lithiových akumulátorů, s řádově vyšší měnou energií, bezúdržbových, schopných i rychlého nabíjení a s velkou životností tuto situaci změnil, automobily s elektrickými akumulátory se staly realitou. Pochopitelně k tomu přispěla i aplikace moderních bezkontaktních frekvenčně řízených elektrických trakčních pohonů, vyvinutých v průběhu minulých let v kolejové dopravě, i v automobilech.

V kolejové dopravě široce zavedené, avšak v silniční dopravě s výjimkou trolejbusů téměř nepoužívané, liniové elektrické napájení (elektrická trakce závislá) má ve srovnání s napájením elektrického trakčního pohonu vozidel ze zásobníků energie (elektrická trakce polozávislá) řadu zásadních výhod. Zejména v oblasti prakticky neomezené výkonnosti, rychlosti a dojezdu, jakožto i v nepotřebě instalovat ve vozidlech těžké a rozměrné zásobníky energie a tyto nabíjet. Avšak přínosem mobilních zásobníků energie v podobě moderních lithiových akumulátorů je možnost aplikace bezemisní a energeticky vysoce účinné elektrické vozby, a to v podobě elektrické trakce polozávislé, i v oblastech bez liniové elektrifikace. Mimo jiné i v silniční dopravě, jejíž rozlehlou dopravní síť je nereálné kompletně liniově elektrifikovat.

S ohledem na výrazně kratší dobu technického života automobilů, ve srovnání s železničními kolejovými vozidly, a z toho plynoucí rychlejší cyklus výměny starých silničních vozidel za nová, je rozvoj elektrické silniční dopravy tématem velmi blízké budoucnosti. Železnice, respektive obecněji kolejová doprava, již za krátkou dobu nebude jediným dopravním systémem využívajícím výhod elektrické vozby. V rámci multimodální mobility budou díky technickému pokroku v oblasti akumulace elektrické energie využívat výhod a přínosů elektrické vozby i další partneři železnice ku prospěchu dopravy jako celku. Každopádně je však potřeba, aby železnice vnímala realitu rychle probíhající elektrifikace silniční dopravy a podle toho jednala.

Železniční síť v ČR není homogenní, jednotlivé železniční tratě se navzájem významně odlišují. Část tratí železniční sítě je liniově elektrifikována, část nikoliv. To staví železnici vůči elektrifikované silniční dopravě, která se díky pokroku v oblasti mobilních zásobníků energie již brzy stane realitou, do dvou odlišných pozicí. Jinou pozici mají již liniově elektrifikované železnice a jinou pozici mají dosud neelektrifikované železnice.

2.1 Elektrifikované železnice

Na elektrifikovaných železničních tratích bude mít i po elektrifikaci silniční dopravy železnice vůči silniční dopravě nadále řadu zásadních výhod:

- menší energetická náročnost, daná nižším trakčním odporem železničních vozidel vůči vozidlům silničním (nižší odpor valení ocelových kol po ocelových kolejnicích i nižší aerodynamický odpor dlouhých štíhlých vlaků),
- prakticky neomezený dojezd liniově elektricky napájených železničních vozidel ve srovnání s napájením silničních vozidel z mobilních zásobníků energie, a bez nutnosti potřeby času k statickému nabíjení mobilních zásobníků energie,
- prakticky neomezený výkon liniově elektricky napájených železničních vozidel ve srovnání s napájením silničních vozidel ze zásobníků energie,
- možnost využívat rychlosti jízdy do 200 km/h na konvenčních železničních tratích a do 350 km/h na vysokorychlostních železničních tratích ve srovnání s podstatně nižšími rychlostmi na silnicích a dálnicích. A to s pozitivním dopadem jak na atraktivnost přepravní nabídky, tak i na produktivitu vozidel i personálu,
- možnost využívat délku vlaku do 400 m v osobní dopravě a do 740 m v nákladní dopravě, ve srovnání s podstatně kratšími vozidly na silnicích a dálnicích. A to s pozitivním dopadem na racionalitu technického řešení vozidel i na produktivitu provozního personálu,

- vysoká úroveň zabezpečení jízdy vlaků systémem železničních zabezpečovacích zařízení, a to včetně dohledu jednotného evropského vlakového zabezpečovače ETCS nad činností strojvedoucího, ve srovnání s plnou závislostí bezpečnosti silniční dopravy na pozornosti a dovednosti množství jednotlivých řidičů,
- principiální připravenost kolejové dopravy na postupný přechod na bezobslužný provoz GoA 4 (směrové vedení vozidel kolejí).

V rámci základních principů multimodální mobility (kooperace a komplementárnost) si oba dopravní systémy, tedy liniově elektrifikovaná železnice a elektrifikovaná (akumulátorová) silniční doprava, svá pole působnosti najdou tak, aby oba využívaly své výhody a potlačovaly své nevýhody:

- železnice silné a pravidelné přepravy,
- silnice slabší a nepravidelné přepravy.

V ČR je liniově elektrifikováno 3 282 km železničních tratí, což tvoří 34 % délky sítě železnic. Elektrifikované tratě zajišťují 86 % dopravních výkonů české železnice v oblasti osobní dopravy a 95,5 % dopravních výkonů české železnice v oblasti nákladní dopravy. Kromě své dopravní role naplňují i cíle světa, EU a ČR v oblasti energetiky, klimatu a životního prostředí:

- mají vysokou energetickou účinnost, zajišťují přepravu osob i věcí s nízkou spotřebou energie (kWh/os km, kWh/netto tkm),
- nepotřebují fosilní paliva,
- jsou globálně i lokálně bezemisní, neprodukují emise oxidu uhličitého ani emise zdraví škodlivých látek.

Elektrifikované železnice mají díky kombinaci předností kolejové dopravy s přednostmi liniového elektrického napájení mnoho velmi užitečných dopravních, energetických i environmentálních vlastností, které je spolu s elektrifikovanými kolejovými systémy městské hromadné dopravy staví do role základních (páteřových) systémů multimodální mobility. To platí jak o konvenčním železničním systému, tak i o nově budovaném vysokorychlostním železničním systému. Ty jsou navíc spolu kompatibilní (vnitřní konektivita evropského železničního systému: vysokorychlostní vozidla jsou schopna využívat nejen vysokorychlostní tratě, ale i konvenční tratě).

2.2 Neelektrifikované železnice

Ve složitější situaci jsou železniční tratě bez liniové elektrifikace, které v ČR svojí délkou 6 260 km tvoří 66 % délky sítě železnic. Neelektrifikované tratě však zajišťují jen 14 % dopravních výkonů české železnice v oblasti osobní dopravy a jen 4,5 % dopravních výkonů české železnice v oblasti nákladní dopravy.

Charakter sítě nelektrifikovaných železnic je v ČR velmi různorodý, zahrnuje nejen dráhy regionální, ale i dráhy celostátní a ojediněle (v jednom případě: Plzeň – Domažlice st. hr.) i dráhu evropské sítě TEN-T.

Z velké části je však na nelektrifikovaných železničních tratích v ČR provozována pouze kraji objednávaná regionální osobní železniční doprava v závazku veřejné služby (osobní zastávkové vlaky a spěšné vlaky, zpravidla s četností 10 až 20 párů nepřilíh kapacitních vlaků denně). Jen po některých nelektrifikovaných železničních tratích je vedena i státem objednávaná dálková osobní železniční doprava v závazku veřejné služby (rychlíky) a jen na malé části nelektrifikovaných tratí je významnější pravidelná nákladní doprava.

Přicházející elektrifikace silniční dopravy postaví naftovou železniční vozbu do nevýhodné pozice. V případě srovnání silniční dopravy, zajišťované elektrickými vozidly, s železniční dopravou, zajišťovanou spalovacími vozidly (tedy zcela opačná, než dosud v ČR obvyklá situace), jsou z hlediska energetické náročnosti oba systémy přibližně stejné:

- na straně silnice s elektrickými vozidly je nevýhoda vyššího trakčního odporu silniční dopravy a výhoda vyšší účinnosti trakčního elektrického pohonu,
- na straně železnice se spalovacími vozidly je výhoda nižšího trakčního odporu kolejové dopravy a nevýhoda nižší účinnosti trakčního pohonu spalovacím motorem.

Do jaké míry převažuje vliv pohonu nad vlivem dopravního systému či naopak, je dáno konkrétními podmínkami v jednotlivých případech. Z hlediska ochrany životního prostředí je na straně silniční dopravy s elektrickými vozidly vůči železnici se spalovacími vozidly výhodou bezemisní provoz.

Železniční tratě provozované spalovacími vozidly nebudou v lehké situaci. Pokud budou mít objednatelé regionální dopravy v závazku veřejné služby, tedy kraje, při naplňování úmyslu zajistit bezemisní veřejnou hromadnou dopravu možnost volby mezi emisními vozidly na železnici a bezemisními vozidly na silnici, nemá železnice jistotu, že se rozhodnou pro ni. A bez objednávky pravidelné veřejné dopravy postrádá smysl udržování provozuschopnosti železničních tratí s jen sporadickou další dopravou.

Železnice zajišťuje v ČR 8,2 % z celkových přepravních výkonů osobní dopravy a 28 % z celkových přepravních výkonů nákladní dopravy. Z hlediska celkových přepravních výkonů ČR je současný význam neelektrifikovaných železnic dost malý:

- 14 % výkonů železniční osobní dopravy, realizovaných na 6 260 km neelektrifikovaných tratí, představuje 1,2 % přepravních výkonů osobní dopravy v ČR,
- 4,5 % výkonů železniční nákladní dopravy, realizovaných na 6 260 km neelektrifikovaných tratích představuje 1,3 % přepravních výkonů nákladní dopravy v ČR.

V těchto číslech nejsou jen neelektrifikované regionální tratě, ale i neelektrifikované celostátní železniční tratě včetně jedné neelektrifikované tratě sítě TEN-T. Z okamžitého úhlu pohledu by dopravní výkony, v současnosti zajišťované železnici na 6 260 km neelektrifikovaných železničních tratí, pravděpodobně silniční doprava zvládla. Dokázala by převzít a zajistit na nich uskutečňovaných 1,2 % z celkových přepravních výkonů osobní dopravy v ČR i 1,3 % z celkových přepravních výkonů nákladní dopravy v ČR. Avšak okamžitý úhel pohledu není relevantní pro strategické rozhodování v železniční dopravě. Technický život železničních vozidel dosahuje desítek let, technický život železničních tratí dosahuje stovek let. Pro strategické rozhodování je relevantní nikoliv řešení současných úloh dopravy, ale budoucích úloh dopravy. A k jejich plnění mohou po náležitém technickém upgradu přispět i mnohé dosud neelektrifikované tratě.

3 GREEN DEAL

Na základě mnoha hledisek (snížení energetické náročnosti, odstranění emisí, zklidnění ulic ve městech i v obcích, uvolnění silnic, zvýšení bezpečnosti, úspora pracovních sil vyšší produktivitou práce v dopravě) dospěla Evropská komise k rozhodnutí převést do roku 2050 ze silnice na železnici nebo vodu 75 % nákladní dopravy, jak stanovila ve svém Sdělení Evropskému parlamentu a radě COM (2019) 640 Green deal v kapitole 2.1.5, věnované dopravě.

V jakém poměru má být silniční doprava přesunuta na železnici a v jakém na vodu, závisí na konkrétních podmínkách v jednotlivých členských zemích. S přihlédnutím ke specifickým podmínkám České republiky, tedy vnitrozemského státu s malou délkou a slabou vodnatostí přirozených vodních cest (315 km), avšak s hustou železniční sítí (9 542 km) je zřejmé, že dominantní roli v odlehčení silnic od nákladní dopravy bude mít v ČR železnice.

Při porovnání výchozích přepravních výkonů silniční nákladní dopravy na území ČR v roce 2017 v úrovni 45 mld. netto tkm/rok a železniční nákladní dopravy na území ČR v roce 2017 v úrovni 17 mld. netto tkm/rok je zřejmé, že půjde (za předpokladu stejné přepravní náročnosti národního hospodářství i v roce 2050) o zvýšení přepravních výkonů železniční nákladní dopravy na území ČR o 33 mld. netto tkm/rok na hodnotu 50 mld. netto tkm/rok, tedy na trojnásobek vůči výchozí úrovni.

V současnosti má železniční nákladní doprava v ČR převážně mezistátní charakter. Zhruba 2/3 přepravních výkonů železniční nákladní dopravy začínají či končí za hranicemi ČR, tuzemské přepravní výkony tvoří jen 1/3 přepravních výkonů železniční nákladní dopravy na území ČR. Přitom 92 % dopravních výkonů nákladní železniční dopravy je soustředěno na tratě sítě TEN-T, tedy na 28 % délky železniční sítě (s výjimkou tratě Pízeň – Česká Kubice jde vesměs o elektrifikované tratě).

Zbývající celostátní a regionální tratě (převážně neelektrifikované) představující 72 % délky železniční sítě zajišťují jen 8 % dopravních výkonů nákladní dopravy.

Nikoliv jen z kapacitních důvodů, ale především s přihlédnutím ke střední přepravní vzdálenosti silniční nákladní dopravy na území ČR, která činí jen 81 km (v souhrnu vnitrostátní i mezinárodní dopravy), není možné zajišťovat podle Green deal ze silnic na železnice přenesenou nákladní dopravou jen malou část železniční sítě (28 %, tratě sítě TEN-T), ale je nutno do plnění přepravních úloh zapojit podstatně větší část železniční sítě.

Současné střední zatížení železniční sítě ČR přepravním tokem nákladní dopravy je ve srovnání se sousedními státy EU velmi nízké:

- ČR (elektrifikováno 34 % délky železniční sítě): 4 503 netto t/den,
- SK (elektrifikováno 49 % délky železniční sítě): 7 160 netto t/den,
- AT (elektrifikováno 71 % délky železniční sítě): 10 988 netto t/den,
- DE (elektrifikováno 61 % délky železniční sítě): 9 220 netto t/den,
- PL (elektrifikováno 75 % délky železniční sítě): 9 254 netto t/den.

Jen je toto nízké zatížení české železniční sítě nákladní dopravou velmi silně soustředěno na přetížené tratě sítě TEN-T (zejména 1. a 2. koridor) a zbytek železniční sítě není k nákladní dopravě téměř vůbec využíván.

Při srovnání železniční sítě ČR se sousedními zeměmi, z hlediska jejich zatížení středním přepravním tokem nákladní dopravy, je patrná téměř lineární závislost mezi rozsahem elektrifikace železniční sítě a jejím využíváním pro nákladní dopravu. Na neelektrifikovaných železničních tratích nejen v ČR, ale všeobecně ve střední Evropě, nákladní vlaky v zásadě nejedí. Není to totiž ekonomicky efektivní.

Stojí též za povšimnutí, že uvažované zvýšení přepravních výkonů nákladní dopravy na české železnici na trojnásobek (viz Green deal, převedení 75 % silniční nákladní dopravy na železnici), tedy zvýšení středního zatížení železniční sítě ČR dopravním tokem nákladní dopravy na 13 375 netto t/den, nepředstavuje extrémní zátěž tratí. Je jen mírně nad současným středním zatížením železniční sítě Rakouska dopravním tokem nákladní dopravy v úrovni 10 988 netto t/den, ovšem při liniové elektrifikaci 71 % délky železniční sítě.

Základní podmínkou k tomu, aby bylo investováno do liniové elektrifikace určité trati, je náležitě silný dopravní provoz na ní. Dostatečně intenzivní dopravní provoz je totiž ekonomickou podmínkou k tomu, aby v rámci analýzy nákladů a výnosů (CBA) byla dosažena potřebná rentabilita investice do elektrifikace.

Avšak i opačná příčinná souvislost je objektivní skutečností:

- naftová železniční vozidla mají ve srovnání s elektrickými železničními vozidly zhruba trojnásobné náklady na energii,
- naftová železniční vozidla mají ve srovnání s elektrickými železničními vozidly zhruba dvojnásobné náklady na údržbu,
- s ohledem na nižší trakční výkon, a tím nižší rychlost jízdy, nižší normativy zátěže a kratší vozební ramena, mají naftová železniční vozidla nižší produktivitu práce než elektrická železniční vozidla.

Proto jsou neelektrifikované tratě zpravidla využívány jen k místní osobní dopravě, dálkové rychlíky na nich zpravidla nejedí a též nákladní doprava z nich prakticky vymizela. Nebyla by efektivní.

Cyklická vazba obou příčinných souvislostí:

- trať není elektrifikována, neboť na ní není intenzivní provoz,
- na trati není intenzivní provoz, protože není elektrifikována.

Tento stav degeneruje železnici do stavu skomírajícího, nepříliš atraktivního provozu pomalých osobních zastávkových vlaků, tvořených nepříliš pohodlným, nevelkým naftovým motorovým vozem ve věku 30 až 50 let, a to v intervalu jedna či dokonce dvě hodiny. Taková železniční trať sice existuje, je čarou na mapě i položkou v jízdním řádu, ale pro obyvatelstvo ani průmysl neplní funkci páteřového systému v multimodální mobilitě, což je rolí železnice.

4 ELEKTRICKÝM PROVOZEM K BUDOUCNOSTI ŽELEZNICE

Plně v souladu s vývojem stavu techniky bylo v roce 2020 přijato rozhodnutí zajistit postupnými kroky do roku 2040 provoz všech vlaků na celé železniční síti na území ČR pod dohledem jednotného evropského vlakového zabezpečovače ETCS. To je zcela v souladu s pravidly minimalizace rizik. Ke snížení výskytu nehod je na místě používat technické prostředky, které jsou dostupné.

Avšak ve stejné době bude doprava v ČR, včetně dopravy železniční, procházet procesem dekarbonizace. Ukazuje se jako velmi rozumné oba tyto trendy koordinovaně propojit a pojmut je jako celkový systémový upgrade železnice, týkající se všech čtyř jejích strukturálních subsystémů:

- trať (INS): zvýšení traťové rychlosti (velké stavební převýšení v obloucích, bezstyková kolej, použita díky aplikaci příčně tuhých ocelových Y pražců i v obloucích o malých poloměrech, umožňující jízdu vozidel zvýšenou rychlostí s nedostatkem převýšení 150 mm), náhrada zchátralých mostů novými, minimalizace úrovnových křížení, nástupiště v úrovni 550 mm nad TK, ...,
- elektrické napájení (ENE): liniová elektrifikace 25 kV, nebo alespoň bodová elektrifikace 25 kV pro akumulátorová vozidla,
- řízení a zabezpečení (CCS): jednotný evropský vlakový zabezpečovač ETCS, digitální rádiové spojení EIRENE,
- RST: nová interoperabilní elektrická vozidla s vysokým trakčním výkonem i s vysokým výkonem rekuperační brzdy, s vysokou úrovní aktivní bezpečnosti (OBU ETCS, účinné brzdy) i s vysokou úrovní pasivní bezpečnosti (pevnost podle EN 12 663, odolnost při nárazu podle EN 15 227) a náležitou kulturou cestování (kvalitní chodové vlastnosti, prostornost, nízkopodlažnost, klimatizace, ...).

Pochopitelně je nutno pečlivě uvážit, které ze železničních tratí mají potenciál dopravního využití v osobní i nákladní dopravě, a má proto logiku investovat do jejich celkového upgradu, a které nikoliv.

Je zcela legitimní, že kromě racionálního vztahu obyvatelstva k železnici existuje i emotivní vztah obyvatelstva k železnici, tedy že železnice může mít i jiný než dopravní význam. Vedle železničních tratí, které lze celkovým technickým upgradem plnohodnotně zapojit nejen do železniční sítě, ale i do systému multimodální mobility, existují železniční tratě, u kterých není technický upgrade smysluplný, neboť nemají potenciál řádného dopravního využití. To je objektivně dáno charakterem území, kterým procházejí. Tyto tratě mohou pro emotivní vyžití obyvatelstva plnit roli technického skanzenu, ale i to má své ekonomické, technické a bezpečnostní limity.

4.1 Liniová elektrifikace

Pouze 34% podíl elektrifikovaných tratí na celkové délce železničních tratí v ČR a přírůstek pouze 23 km délky elektrifikovaných železničních tratí v rozmezí devíti let (2010 až 2019), tedy v průměru 2,6 km elektrifikovaných tratí ročně, nejsou při všeobecném trendu dekarbonizace lichotivými charakteristikami české železnice. Příznivější informací je skutečnost, že Centrální komise MD ČR již postupně schválila liniovou elektrifikaci 650 km tratí a projekční organizace řeší na základě zadání GŘ SŽ studie proveditelnosti elektrifikace dalších železničních tratí. To je zásadní obrát k lepšímu, charakterizující pozitivní vývoj.

Zcela zásadní význam pro rozvoj liniové elektrifikace českých železnic má též rozhodnutí Centrální komise MD ČR z prosince 2016 o sjednocení napájecích systémů českých železnic na jednotný systém 25 kV. Náhrada napájení 3 kV napájením 25 kV má pochopitelně v první řadě několik pozitivních efektů na tratích, kterých se konverze týká:

- zásadní zvýšení přenosové schopnosti trakčního vedení a tím zajištění kvalitního napájení vozidel bez omezování trakčního výkonu hlubokými poklesy napětí,
- umožnění jízdy vlaků v těsném sledu,
- snížení ztrát v trakčním vedení,

- snížení nákladů na energie. Je potřeba vnímat, že například pokles napětí z 3,3 kV na výstupu trakční napájecí stanice na hodnotu 2,4 kV na sběrači vozidla, způsobený úbytky napětí na trakčním vedení, zvyšuje pro dopravce či objednatele dopravy cenu vozidlem odebírané elektrické energie z 2,30 Kč/kWh na 3,16 Kč/kWh, tedy o 38 %,
- umožnění plnohodnotného rekuperačního brzdění. A to včetně předávání přebytků rekuperované energie, ostatními vozidly nespotřebované, přes trakční napájecí stanici zpět do distribuční elektrické sítě,
- měničové trakční napájecí stanice (3 AC/DC/1 AC) umožňují spojitě dvoustranné napájení trakčního vedení v systému jednotné fáze,
- eliminace stejnosměrných bludných proudů s korozivními účinky na v zemi uložená kovová zařízení,
- možnost uzemnění kolejnic a tím jistější ochrana železnice proti atmosférickým přepětím,
- jednotnost napájení konvenčních a vysokorychlostních železnic (vnitřní konektivita konvenčního a vysokorychlostního železničního systému).

Rozhodnutí o přechodu české železnice na jednotný systém 25 kV však má též velmi zásadní význam pro liniovou elektrifikaci dosud neelektrifikovaných tratí:

- menší vodivé průřezy a tím i menší napínavé síly vodičů vedou k lehké a levnější konstrukci trakčního vedení,
- odpadají nákladné úpravy k omezení zhoubných účinků bludných proudů na kovové konstrukce uložené v zemi,
- velká přenosová schopnost trakčního vedení 25 kV (roste s druhou mocninou napětí) umožňuje velkou vzdálenost trakčních napájecích stanic, respektive dlouhé jednostranné napájení trakčního vedení odbočných tratí.

To je důležité zejména pro severní část ČR. Před více než 50 lety byla přijata koncepce elektrifikace železnic v tehdejší Československu orientovaná podle osy tvořené tehdejšími hlavními tahem Most – Ústí nad Labem – Nymburk – Česká Třebová – Přerov – Ostrava – Žilina – Košice – Čierna nad Tisou:

- elektrifikovat železniční tratě na sever od hlavního tahu systémem 3 kV,
- elektrifikovat železniční tratě na jih od hlavního tahu systémem 25 kV.

K elektrifikaci železnic na jižní části území systémem 25 kV došlo a spolu s ní zpravidla i k jejich modernizaci a zvýšení traťových rychlostí. Avšak k elektrifikaci železnic na severní části území systémem 3 kV nedošlo. Chybějící elektrifikace je jednou z příčin, proč podoba železnice v severní průmyslové části ČR, v prostoru mezi Děčínem a Opavou, zůstala až na pár výjimek bez zásadnější modernizace na úrovni, ve které zde železnice vznikla v 19. století. Systém 3 kV se totiž pro elektrifikaci poměrně husté sítě jednokolejných železničních tratí, jaká na průmyslovém severu ČR je, ukázal ekonomicky nevhodným. Jen pro elektrifikaci hlavních tratí na zmíněném území na severu ČR systémem 3 kV by bylo nutno vybudovat více než 50 trakčních napájecích stanic, rozmístěných podél železničních tratí, a to včetně vybudování 3 AC elektrických vedení pro jejich připojení k distribuční elektrické síti. Navíc robustní trakční vedení s těžkými měděnými vodiči o velkých průřezích, tedy i s velkými napínavými silami, vyvolává zejména v obloucích o malých poloměrech velké příčné síly, které vyžadují pevné zakládání podpěr. To spolu s nákladnými úpravami pro eliminaci vzniku a účinku bludných proudů vedlo k příliš vysokým investičním nákladům uvažované elektrifikace systémem 3 kV a tím i k negativním výsledkům analýzy nákladů a výnosů (CBA), tedy k podlimitně nízkému vnitřnímu výnosovému procentu (EIRR).

Výsledkem chybějící elektrifikace a s ní spojené modernizace železničních tratí na severu ČR je, že je zde železniční síť využívána prakticky jen v regionální osobní dopravě (zpravidla v rozsahu do cca 20 párů nevelkých vlaků denně). Železniční síť zde není využívána k plnohodnotné dálkové osobní dopravě nadregionálního významu (Liberec je jediné krajské město bez rychlíkového spojení s Prahou), a v zásadě ani k pravidelné nákladní dopravě.

Rozhodnutí o přechodu české železnice na jednotný systém napájení drah 25 kV situaci zásadním způsobem mění. Systémem 25 kV lze díky nižším investičním nákladům i železnice na severu ČR ekonomicky efektivně liniově elektrifikovat. A to počínaje tratěmi, na kterých stát objednává rychlíkovou dopravu (linky R 10, R 12, R 14, R 21, R 22 a R 27), a tratěmi, které mají potenciál rozvoje nákladní dopravy ve vazbě na zdejší průmyslová města. Tato průmyslová města jsou zároveň přirozeným cílem denního dojíždění regionální dopravy, pracovních cest. V průmyslových městech je též zpravidla k dispozici distribuční elektrická síť 110 kV k připojení trakční napájecí stanice 25 kV. To je vhodné pro hvězdicové uspořádání napájení trakčního vedení, a to s umístěním společných trakčních napájecích stanic pro více tratí v železničních uzlech.

4.2 Koordinace implementace ETCS a elektrifikace

V druhé polovině minulého roku byly v ČR řešeny dvě na sobě nezávislé úlohy:

- odborníci na zabezpečovací techniku z GŘ ČD připravovali pro MD ČR časový plán postupné implementace jednotného evropského vlakového zabezpečovače ETCS na celé síti železnic,
- odborníci na energetiku dopravy z CDV Brno analyzovali pro GŘ SŽ jednotlivé, dosud neelektrifikované železniční tratě s cílem určit velikost dosažitelných úspor energie a emisí oxidu uhličitého jejich elektrifikací.

Přestože šlo o dvě zcela nezávislé pracovní skupiny, řešící každá jinou úlohu, jsou tratě vybrané k prioritní instalaci plnohodnotného ETCS prakticky shodné s tratěmi vhodnými k prioritní liniové elektrifikaci (pokud již elektrifikovány nejsou).

Nejde o náhodu, ale o logickou souvislost:

- k přednostní implementaci ETCS byly vybrány železniční tratě s nejsilnějším dopravním provozem, neboť na nich je největší efekt preventivního předcházení nehodám, způsobeným přehlédnutím či nerespektováním návěstí,
- k přednostní liniové elektrifikaci byly vybrány železniční tratě s nejsilnějším dopravním provozem, neboť na nich je největší potenciál úspor energie a emisí oxidu uhličitého.

Logickým cílem je vzájemná koordinace obou těchto aktivit a to tak, aby v předstihu před implementací ETCS byla předmětná trať elektrifikována a trať obsluhována novými elektrickými vozidly, již z výroby opatřenými palubními jednotkami ETCS, neboť to přináší významné efekty:

- předejde se dvojímu vybavování vozidel palubními jednotkami ETCS (napřed před elektrifikací naftových, následně po elektrifikaci elektrických). Při tom je nutno vnímat, že dodatečná montáž OBU ETCS do starších vozidel je násobně dražší než vybavování nových vozidel OBU ETCS v průběh výroby a že naftová vozidla již pravděpodobně nebudou v provozu upotřebitelná po celou dobu ekonomické životnosti do nich dosazovaných palubních jednotek ETCS (20 let),
- investice do traťové části ETCS bude od okamžiku uvedení do provozu plnohodnotně využívána se všemi s tím spojenými přínosy pro bezpečnost drážní dopravy a ekonomiku (nulové migrační období, přechod na výhradní provoz všech vlaků pod dohledem ETCS),
- podobně jako lze z radioblokových centrál RBC a základnových radiostanic BTS, instalovaných na hlavních tratích, do určité vzdálenosti využít i pro tratě odbočné, lze i z trakčních napájecích stanic zřízených na hlavních tratích napájet trakční vedení na tratích odbočných. A to při systému 25 kV, díky jeho vysoké přenosové schopnosti, i na vzdálenost 50 km (viz trať České Budějovice – České Velenice, sice neplánovaně, ale jednostranně napájená z trakční napájecí stanice Nemanice).

Termínové provázání národního implementačního plánu subsystému CCS (ERTMS) s národním implementačním plánem subsystému ENE a s obnovou parku vozidel je proto velmi vhodné. Implementace ETCS se tak stává iniciačním impulsem k celkovému technickému upgradu železnice.

5 VOZIDLA SE ZÁSObNÍKY ENERGIE

Potřeba řešit bezemisní provoz na žel. tratích bez liniové elektrifikace má v zásadě dvě příčiny:

- jde o žel. tratě, které je v plánu liniově elektrifikovat, ale v pořadí priorit až později,
- jde o železniční tratě, které se pro slabý dopravní provoz nevyplatí liniově elektrifikovat.

Provoz vozidel se spalovacími motory ve veřejné hromadné dopravě bude již v krátké době neakceptovatelný. Proto jsou pro železniční tratě, které budou dočasně, nebo dlouhodobě bez liniové elektrifikace, určena vozidla se zásobníky energie.

Jde o elektrická trakční vozidla, u kterých je liniové elektrické napájení z trakčního vedení doplněno, respektive nahrazeno, zásobníkem energie. Aktuálně jsou používány dvě technologie:

- BEMU: dvouzdrojová elektrická trakční vozidla trolej/akumulátor, využívající sekundární elektrochemické články,
- HMU: vodíková palivočlánková elektrická trakční vozidla, využívající primární elektrochemické články ve funkci zdroje elektrické energie v kombinaci se sekundárními elektrochemickými články ve funkci vyrovnávacího akumulátoru (hybridní princip).

Oba typy vozidel jsou odvozeny od standardních EMU, se kterými mají řadu shodných komponent, avšak musí v nich být vytvořena patřičná hmotnostní a prostorová rezerva pro instalaci příslušného zásobníku energie.

5.1 Dvouzdrojová elektrická trakční vozidla trolej/akumulátor

Základem k vytvoření dvouzdrojové elektrické trakční jednotky trolej/akumulátor (BEMU) je střídavá elektrická trakční jednotka EMU (15 kV/25 kV), doplněná o zásobník energie v podobě lithiového trakčního akumulátoru typu HP (vysoký výkon, technologie LTO) včetně jeho příslušenství, zajišťujícího správné pracovní podmínky. Trakční akumulátor je přes vstupní a výstupní DC/DC měnič připojen ke stejnosměrnému meziobvodu trakčního obvodu a zajišťuje tři pracovní funkce:

- ukládání elektrické energie při statickém (za stání) či dynamickém (za jízdy) nabíjení z trakčního vedení,
- poskytování elektrické energie pro trakční i vedlejší spotřebu za jízdy či stání vozidla mimo trakční vedení,
- ukládání elektrické energie při spádovém i zastavovacím elektrodynamickém brzdění.

Schopnost lithiových akumulátorů typu HP pracovat jak při nabíjení, tak při vybíjení, vysokým výkonem je primárně dána jejich robustní strukturou s malým vnitřním odporem (nízké Joulovy ztráty, a tedy vysoká účinnost i při velkém proudovém zatížení) a je využívána při jejich všech třech pracovních funkcích ve vozidle BEMU:

- statické (za stání pod trakčním vedením) či dynamické (za jízdy pod trakčním vedením) nabíjení z trakčního vedení může být v případě potřeby extrémně rychlé, zhruba v čase 15 až 20 minut. Schopnost rychlého nabíjení v obrátových stanicích umožňuje nasadit vozidla BEMU do oběhů určených pro vozidla DMU bez změny jízdního řádu a bez prodlužování doby oběhu a tím zvyšování potřebného počtu vozidel,
- vozidla disponují jak v režimu EMU, tak v režimu BEMU, vysokým měrným trakčním výkonem typickým pro moderní AC EMU (kolem 15 kW/t). To jim umožňuje výrazně dynamičtější jízdu, než je obvyklé u tradičních DMU s měrným výkonem kolem 4 až 8 kW/t. Výsledným efektem je zrychlení dopravy a zkrácení jízdních dob, zejména na tratích s velkými sklony a s četnými zastávkami,
- vozidla disponují jak v režimu EMU, tak v režimu BEMU, vysokým měrným brzdícím výkonem typickým pro moderní AC EMU (kolem 25 kW/t). To jim umožňuje používat k provoznímu brzdění výhradně jen rekuperační elektrodynamické brzdění (bez použití mechanických třecích brzd). Výsledným efektem je snížení spotřeby energie, prodloužení dojezdu a snížení opotřebení mechanických brzd, jakožto i nákladů spojených s jejich údržbou.

Při současném stavu techniky se dojezd dvouzdrojových elektrických trakčních jednotek trolej/akumulátor (BEMU), v závislosti na traťových a provozních podmínkách a velikosti akumulátoru, pohybuje v úrovni cca 80 km až 120 km (vztaženo ke sníženým parametrům akumulátoru na konci jeho životnosti, EOL). To se pro zajištění provozu na regionálních tratích v částečně elektrifikované železniční síti zpravidla jeví jako dostačující.

V částečně elektrifikované železniční síti využívají vozidla BEMU řadu synergických efektů s liniovou elektrifikací:

- na liniově elektrifikovaných tratích a v elektrifikovaných železničních stanicích využívají přímé napájení z trakčního vedení, nečerpají energii z akumulátoru (naopak je akumulátor z trakčního vedení nabíjen),
- aplikací BEMU je možno vytvářet přímá bezpřestupová spojení z centra regionu do jeho okrajových oblastí, výhodná jak z hlediska atraktivní přepravní nabídky, tak z hlediska vysoké produktivity využití vozidel i personálu,
- rozvoj liniové elektrifikace vytváří další příležitosti pro statické i dynamické nabíjení BEMU z liniového trakčního vedení,
- rozvoj liniové elektrifikace zkracuje vozební ramena bez liniové elektrifikace, což snižuje potřebný dojezd akumulátorových vozidel,
- využití pevných trakčních zařízení (trakční napájecí stanice a trakční vedení) elektrifikovaných tratí nejen k napájení na nich provozovaných vlaků, ale i vlaků provozovaných na okolních tratích, zvyšuje ekonomickou efektivnost projektů liniové elektrifikace (zvýšení vnitřního výnosového procenta EIRR v analýze nákladů a výnosů CBA),
- při postupné liniové elektrifikaci železniční sítě se lze prioritně soustředit na nejvíce zatížené tratě a bezemisní provoz na méně zatížených tratích řešit použitím BEMU,
- pozdější investice do liniové elektrifikace tratí se neohrožuje s investicí do pořízení BEMU, neboť BEMU lze i nadále provozovat na později elektrifikované trati, a to v režimu EMU (i proto má trakční parametry na úrovni běžných EMU).

Předpokládaná životnost lithiových akumulátorů typu HP je 15 let, tedy polovina ekonomické životnosti kolejového vozidla. Podle aktuálního stavu vývoje liniové elektrifikace se lze před periodickou opravou v polovině technického života BEMU (tedy u nyní k pořízení uvažovaných vozidel v horizontu roku cca 2040) rozhodnout, zda bude vozidlo i v druhé polovině svého technického života potřebné provozovat i na úsecích bez liniové elektrifikace jako BEMU a trakční akumulátor obnovit, nebo zda již liniová elektrifikace tratí natolik pokročila, že akumulátor není potřeba obnovovat, neboť vozidlo bude nadále používáno jako EMU.

K plnému využití času, který je v obrátové stanici dán jízdním řadem, též pro nabíjení akumulátoru, jsou vozidla BEMU velmi vhodně uzpůsobena jednoduchým způsobem kontaktování ke zdroji elektrické energie zvednutím, respektive stažením, sběrače proudu. Tento způsob umožňuje snadné a rychlé připojení vozidla k napájecímu zdroji 25 kV i snadné a rychlé odpojení vozidla od napájecího zdroje 25 kV.

Vozidla BEMU jsou běžně řešena pro AC napájení 15 kV / 25 kV, nikoliv pro napětí 3 kV, a to z několika důvodů:

- systém 25 kV poskytuje výrazně (zhruba čtyřnásobně) vyšší limit výkonu přenášeného kontaktem sběrač / trolejový drát při statickém nabíjení stojícího vozidla než systém 3 kV:
$$3 \text{ kV} \cdot 200 \text{ A} = 600 \text{ kW},$$
$$25 \text{ kV} \cdot 100 \text{ A} = 2\,500 \text{ kW}.$$

Díky tomu umožňuje systém 25 kV vozidlům zhruba čtyřikrát kratší dobu rychlého nabíjení (15 minut místo 60 minut), což je pro tvorbu jízdního řádu i pro produktivitu vozidel a personálu zásadní,

- trakční akumulátory nejsou izolačně řešeny na napětí 3 kV, proto je nelze k trakčnímu obvodu vozidel 3 kV připojovat přímo, ale přes oddělovací zařízení. Jeho hmotnost a rozměry snižují hmotnostní a prostorový limit pro zástavbu akumulátoru, což snižuje možný dojezd vozidla,
- systém 3 kV není pro své nízké výkonové limity a vysoké ztráty energie na železnici perspektivní, další elektrifikace tratí na území ČR již bude prováděna systémem 25 kV a starší tratě budou postupně konvertovány ze systému 3 kV na 25 kV,
- vyšší odolnost (zajištění provozuschopnosti) systému 25 kV oproti systému 3 kV při námraze a ledovce,
- pro potřeby napájecích bodů možnost zřizování jednoduchých trakčních napájecích stanic 22 kV/25 kV s jednofázovým transformátorem (až do výše 0,7 % zkratového výkonu distribuční sítě 22 kV v místě připojení).

5.2 Pevná trakční zařízení pro BEMU

Významnou výhodou dvouzdrojových elektrických trakčních jednotek trolej/akumulátor (BEMU) je využití k nabíjení svých trakčních akumulátorů již existujících či nově budovaných pevných trakčních zařízení (trakčních napájecích stanic a trakčního vedení) liniově elektrifikovaných tratí. Avšak návaznost na liniovou elektrifikaci hlavních tratí není nutnou podmínkou pro provoz BEMU. K jejich elektrickému napájení je možno využívat i bodovou elektrifikaci železnic, která je doplňkem liniové elektrifikace železnic a tvoří součást dráhy.

Napájecí bod je tvořen krátkým slepým trolejovým vedením 25 kV 50 Hz a uzemněnou kolejí, připojenými k výstupu malé jednofázové trakční napájecí stanice 22 kV/25 kV 50 Hz.

Pro nasazení BEMU náhradou za DMU v regionální dopravě v okolí měst, situovaných v neelektrifikovaných částech železniční sítě, je vhodné v uzlové železniční stanici zřídit pro BEMU napájení napájecími body 25 kV. Ty mohou pro rychlé nabíjení trakčních akumulátorů při obrazech vlaků disponovat značným výkonem, neboť ve velkých městech, zejména průmyslových, bývá k dispozici poměrně robustní distribuční elektrická síť 3 x 22 kV, schopná dodávat vysoké výkony (v Praze je ze sítě 22 kV napájeno metro).

Specifickým případem jsou obrátové stanice, kde vozidla přenocují. Při krátkých pobytech během dne zde nedochází k zásadnímu vybití akumulátoru vedlejší spotřebou vozidla v režimu temperace (příkon pro vytápění a klimatizaci přibližně 20 kW). Avšak při dlouhém pobytu při přenocování by již mohlo dojít působením vedlejší spotřeby k velkému snížení energie v akumulátoru s nepříznivým dopadem na schopnost dalšího dojezdu vozidla. Proto je vhodné v obrátových stanicích s přenocováním vybudovat napájecí body nízkého výkonu. Pro temperaci by postačoval výkon v řádu desítek kW. Avšak je rozumné dimenzovat napájecí body na výkon v řádu stovek kW, aby tyto napájecí body též posloužily kromě noční temperace i k možnému nabíjení při nouzových situacích (výluky a podobně).

Pro připojení sběračem k trakčnímu vedení má ve srovnání s připojením jednopólovým vysokonapěťovým kabelem a zásuvkou UIC, používaných k vytápění i centrálnímu napájení jednotlivých vozů z lokomotivy či ze stacionárního předtápěcího zařízení, řadu zásadních výhod:

- rychlé a snadné připojení vozidla k síti (bez ztrátových časů mezi příjezdem a odjezdem vlaku, byla by škoda každé ztracené minuty),
- bezpečnost práce – odpadá manipulace s kabelem,
- odstranění fyzické námahy – kabel je těžký, jeho zasouvání a vysouvání není snadné,
- vyšší kultura práce – odpadá práce se špinavým kabelem za deště a v blátě,
- odpadá nebezpečí poškození kabelu přejetím,
- odpadá nebezpečí poškození kabelu utržením,
- zhruba pětinasobně vyšší výkonový limit kontaktu trolej / sběrač 25 kV vůči připojení zásuvkou a kabelem 1 kV a tím možnost až pětkrát rychlejšího nabíjení,

- jednotnost připojení vozidla ke zdroji elektrické energie v elektrifikovaných i neelektrifikovaných stanicích,
- možnost nabíjení vozidla se zdvižením sběrače na koleji s přístupem veřejnosti, například s nástupem a výstupem cestujících,
- vysokonapěťové kabelové připojení UIC je podobně jako připojení k vrchnímu trakčnímu vedení též jednodólové, jeho použití neřeší téma zpětné cesty a uzemnění kolejnic,
- nižší úroveň zpětných proudů v kolejnicích při použití napětí 25 kV,
- jednotnost stylu aktivního odstavení EMU a BEMU (temperace, pohotovost k odjezdu),
- použití velmi levného vrchního trakčního vedení 25 kV,
- při navazující budoucí elektrifikaci by byla investice do kabelových stojanů zmařena,
- na rozdíl od tradičních jednotlivých osobních vozů již v současnosti elektrické trakční jednotky EMU ani BEMU techniku průběžného vysokonapěťového elektrického kabelu UIC nepoužívají. K ohřevu interiéru nepoužívají vysokonapěťová DC/1 AC topná tělesa na úrovni 1 kV / 1,5 kV / 3 kV, ale nízkonapěťová 3 AC topná tělesa na úrovni cca 0,4 kV, která jsou v provozu spolehlivější (nižší elektrické namáhání) a k jejich spínání postačují jednodušší kontaktní přístroje. Tato topná tělesa jsou napájena z měničů, kterými jsou vozidla vybavena pro účely klimatizace v letním období.

Výkon napájecího bodu je určen dvěma faktory:

- potřebným výkonem pro napájení vozidla:
při nabíjení akumulátorové baterie je určen podíl energie, který byla odebrána, respektive kterou je potřeba doplnit, a času, který je pro nabíjení k dispozici

$$P_n = E_n / T_n = L \cdot e_n / T_n, \quad (1)$$

P_n ... nabíjecí výkon z trakčního vedení (kW),

E_n ... energie potřebná k nabití (kWh),

e_n ... gradient spotřeby energie z trakčního vedení (kWh/km),

L ... ujetá vzdálenost (km),

T_n ... doba nabíjení (h),

při temperaci je výkon potřebný pro napájení vozidla určen příkonem stojícího temperovaného vozidla (z úsporných důvodů v režimu 100 % recirkulace ventilačního vzduchu a při delších pobytech i s korigovanou vnitřní teplotou),

- zatížitelností distribuční elektrické sítě 22 kV (respektive 35 kV) v místě připojení trakčního napájecí stanice.

Oba tyto faktory je nutno při řešení napájecích bodů respektovat.

6 VLASTNOSTI DISTRIBUČNÍ ELEKTRICKÉ SÍTĚ 22 KV

Zatížitelnost distribuční elektrické sítě je dána její tvrdostí, tedy její vnitřní impedancí, která je definována zkratovým výkonem distribuční sítě v místě připojení spotřeby.

Velikost zkratového výkonu, a tedy i zatížitelnost sítě 22 kV, je výrazně ovlivněna délkou vedení 22 kV, tedy vzdáleností odběrného bodu v síti 22 kV od transformovny 110 kV / 22 kV.

Zkratový výkon distribuční sítě v místě odběrného bodu je určen podílem druhé mocniny napětí a výsledné (vektorové) impedance:

$$S_k = U^2 / (Z_0 + Z_v) = U^2 / (Z_0 + z_v \cdot L_v), \quad (2)$$

S_k ... zkratový výkon distribuční sítě v místě připojení,

U ... sdružené napětí distribuční sítě,

Z_0 ... vektor impedance na začátku vedení 22 kV (na výstupu rozvodny s transformovnou 110 kV/22 kV),

Z_v ... vektor impedance vedení 22 kV od výstupu rozvodny s transformovnou 110 kV / 22 kV k místu připojení spotřeby (malé trakční napájecí stanice),

z_v ... gradient vektoru impedance vedení 22 kV,

L_v ... délka vedení 22 kV od výstupu rozvodny s transformovnou 110 kV / 22 kV k místu připojení spotřeby (malé trakční napájecí stanice).

Distribuční síť 3 x 110 kV je v ČR poměrně hustá. Odbočná vedení 3 x 22 kV z rozvodu a transformoven 110 kV / 22 kV, která svojí délkou snižují zatížitelnost distribuční sítě 22 kV, nebývají proto v osídlených územích příliš dlouhá. Proto i síť 3 x 22 kV umožňují v osídlených územích vcelku vysoké zatížení, zejména ve městech. Naopak na venkově na konci dlouhých odboček, je výkonová zatížitelnost sítě 22 kV nižší.

Velikost (příkon) připojitelného odběru k distribuční síti 22 kV je určena dodržením podmínek kvality odběru podle PNE 33 3430-0:

- mezní nesymetrický odběr je limitován povolenou nesymetrií zatěžování třífázového systému (dodržení předepsané symetrie třífázového napětí v síti pro další spotřebitele) na hodnotě:

$$P = k_n \cdot S_k = 0,007 \cdot S_k, \quad (3)$$

- mezní symetrický odběr je limitován povoleným flikrem (dodržení kolísání napětí v síti pro další spotřebitele při zapnutí či vypnutí odběru v přijatelných mezích) na přibližné hodnotě:

$$P = k_s \cdot S_k = 0,025 \cdot S_k. \quad (4)$$

Symetrický odběr ze všech tří fází tedy umožňuje zatěžovat třífázovou distribuční elektrickou síť zhruba 3,6násobně vyšší odebíraným příkonem než nesymetrický odběr pouze ze dvou fází. V zásadě jsou možná dvě technická řešení malých trakčních napájecích stanic 3 x 22 kV / 1 x 25 kV:

6.1 Malá trakční napájecí stanice s jednofázovým transformátorem

Trakční napájecí stanici tvoří jednoduchý jednofázový transformátor, připojený svým primárním vinutím pouze ke dvěma ze tří fázových vodičů. Tím dochází k nesymetrickému zatěžování třífázového distribučního systému.

Odebíraný výkon je omezen na 0,7 % třífázového zkratového výkonu distribuční sítě v místě připojení, což je dáno podmínkami kvality odběru podle PNE 33 3430-0, které limitují povolenou nesymetrii třífázového systému.

V místech s robustní elektrickou sítí 3 x 22 kV (města, průmyslové oblasti) se zkratovým výkonem kolem 200 MVA lze i tímto jednoduchým způsobem poskytovat vozidlům výkon až 1 400 kW.

6.2 Malá trakční napájecí stanice s měničem počtu fází

K napájení jednofázového trakčního vedení 25 kV z třífázové distribuční sítě 3 x 22 kV je použita kromě nezbytného transformátoru též kaskáda polovodičových měničů 3 AC/DC a DC/1 AC, zajišťující symetrické rozdělení odebíraného proudu do všech tří fází distribuční sítě.

Symetricky může být z distribuční sítě odebírán vyšší výkon. Není totiž limitován přípustnou nesymetrií, ale jen přípustným poklesem napětí v distribuční síti při zapnutí trakčního odběru. Tato mez je vyšší než v případě nesymetrického odběru a činí cca 2,5 % třífázového zkratového výkonu distribuční sítě v místě připojení. Vlastní technické zařízení trakční napájecí stanice je poněkud složitější a dražší. Tato varianta má proto smysl v lokalitách, kde je potřebné odebírat ze slabé sítě vysoký výkon. Avšak netřeba ji zavrňovat. Vždyť podobná kaskáda polovodičových měničů 3 AC/DC/1 AC o průchozím výkonu 7 MW je standardní součástí soudobých elektrických lokomotiv.

Zkratový výkon sítě 3 x 22 kV je obrazem její vnitřní impedance. Z hlediska velikosti zkratového výkonu jsou podmínky v sítích 3 x 22 kV velmi různorodé, v zásadě jsou nejvíce ovlivněny délkou vedení 22 kV. Rozpětí hodnot je značné:

- v blízkosti rozvodu a transformoven 110 kV / 22 kV je síť 3 x 22 kV dost tvrdá, zkratový výkon činí kolem 200 MVA. To je případ železničních stanic ve velkých městech či v blízkosti průmyslových závodů nebo energetických uzlů.

V těchto lokalitách lze z distribuční sítě odebírat značný výkon, s rezervou pokrývající potřeby BEMU:

nesymetricky (jednoduše přes jednofázový transformátor) výkon

$$\text{cca } 0,007 \cdot 200\,000 \text{ kVA} = 1\,400 \text{ kVA}$$

symetricky (přes transformátor a 3 AC/1 AC měnič) výkon

$$\text{cca } 0,025 \cdot 200\,000 \text{ kVA} = 5\,000 \text{ kVA}$$

- ve větší vzdálenosti od rozvodu a transformoven 110 kV / 22 kV je síť 3 x 22 kV měkká, zkratový výkon činí kolem 40 MVA. To je případ železničních stanic v odlehlých končinách u menších obcí.

V těchto lokalitách lze z distribuční sítě odebírat výkon poněkud menší, ale pro provoz BEMU v zásadě postačující:

nesymetricky (jednoduše přes jednofázový transformátor) výkon

$$\text{cca } 0,007 \cdot 40\,000 \text{ kVA} = 280 \text{ kVA}$$

symetricky (přes transformátor a 3 AC/1 AC měnič) výkon

$$\text{cca } 0,025 \cdot 40\,000 \text{ kVA} = 1\,000 \text{ kVA}$$

V rámci typizace je z hlediska celé železniční sítě SŽ v ČR sledována unifikace napájecích bodů s malými trakčními napájecími stanicemi s jednofázovými transformátory 22 kV / 25 kV, odvozenými od běžných třífázových distribučních transformátorů 22 kV / 0,4 kV, s měděným vinutím a olejovým chlazením, standardně vyráběných ve výkonové řadě 50; 100; 160; 250; 400; 630; 800; 1 000; 1 250; 1600; 2 000 a 2 500 kW.

Výchozí distribuční transformátory jsou standardně vyráběny ve venkovním provedení, a to jak ve variantě k montáži na podlahu, tak i ve variantě k montáži na sloupy (typické pro obce). Umístění transformátoru a k němu příslušných spínacích a jističích prvků na sloupech je výhodné pro věcné i procesní zjednodušení stavby.

7 VODÍKOVÁ PALIVOČLÁNKOVÁ ELEKTRICKÁ TRAKČNÍ VOZIDLA

Výchozím typem pro vodíková palivočláňková elektrická trakční vozidla (HMU) je, podobně jako v případě dvouzdrojových vozidel trolej/akumulátor (BEMU), též střídavá elektrická trakční jednotka EMU. Avšak bez vstupních elektrických zařízení (sběrač proudu, transformátor, čtyřkvadrantový měnič). Zdrojem elektrické energie pro HMU jsou palivové články. Ty pracují na opačném principu než elektrolýza. Jejich základní částí je protonová membrána, která na anodě rozděluje molekuly vodíku na nosiče energie, tedy elektrony, které odvádí elektrický obvod přes spotřebiče ke katodě, a na nosiče hmoty (protony), které spolu se vzdušným kyslíkem, přiváděným z okolního ovzduší ke katodě, vytvářejí vodu, respektive vodní páru (reakce vodíku se vzdušným kyslíkem je exotermická).

Pro hospodárnou, spolehlivou a trvanlivou funkci palivového článku je potřeba zajistit dvě podmínky:

- vysoká čistota vodíku (ISO 14 867-2 předpisuje čistotu 99,97 % a též specifikuje meze jednotlivých příměsí tvořících v součtu 0,03 %). Čistý vodík palivovým článkem projde, ale nečistoty by v něm ulpívaly a znehodnocovaly by jej,
- práci ustáleným elektrickým výkonem bez kolísání.

Splnění prvé podmínky vyhovuje vodík vyráběný elektrolýzou. Moderní elektrolyzéry s protonovou membránou produkují vodík s čistotou 99,999 %, což je pro docílení dlouhé životnosti palivových článků výborné. Běžně produkovaný vodík z chemické výroby, získávaný parním reformingem fosilního metanu (zemního plynu), či destilací ropných zbytků, dosahují čistoty jen 98,5 až 99,0 %.

Tedy má 30 až 50krát více nečistot, než je pro aplikaci v palivových článcích přípustné, a nelze jej proto pro palivové články použít.

Ke splnění druhé podmínky jsou v mobilních aplikacích, pro které je typické velmi výrazné kolísání okamžitého trakčního výkonu, včetně přechodu do výběhu, dynamického brzdění a stání, primární palivové články doplněny vyrovnávacími akumulátory s lithiovými sekundárními články. Jde o podobný princip, jaký je používán u hybridních vozidel, jen ve funkci zdroje je místo spalovacího motoru s elektrickým generátorem použit palivový článek. Vyrovnávací akumulátor (typu HP, technologie LTO) je, podobně jako palivové články, připojen přes vstupní a výstupní DC/DC měnič ke stejnosměrnému meziobvodu trakčního obvodu a zajišťuje tři funkce:

- ukládání elektrické energie vyrobené palivovým článkem, převyšující aktuální trakční a vedlejší spotřebu (například za stání vozidla),
- poskytování elektrické energie pro trakční i vedlejší spotřebu za jízdy vozidla vyšším výkonem, než odpovídá výkonu palivových článků,
- ukládání elektrické energie při spádovém i zastavovacím elektrodynamickém brzdění.

Vodíkové palivočlánkové vozidlo tedy má dva jmenovité trakční výkony:

- krátkodobý, odpovídající výkonu palivových článků plus vybíjecímu výkonu vyrovnávacího akumulátoru,
- dlouhodobý, odpovídající výkonu palivových článků.

Krátkodobý trakční výkon je několikanásobkem dlouhodobého trakčního výkonu, ale jeho použitelnost je časově omezena velikostí (energií) vyrovnávacího akumulátoru. Proto jsou vodíková vozidla vhodná spíše pro dynamicky proměnlivý způsob jízdy než pro monotónní způsob jízdy stálým výkonem, ten je poměrně nízký.

Z hlediska celkového uspořádání je vodíkové palivočlánkové vozidlo HMU velmi podobné dvouzdrojovému vozidlu trolej/akumulátor BEMU, od kterého se odlišuje:

- absencí vstupních elektrických zařízení (sběrač proudu, transformátor, čtyřkvadrantový měnič),
- zmenšeným trakčním akumulátorem (na úroveň potřebnou k vyrovnávání prac. cyklu),
- instalací palivových článků s příslušenstvím,
- instalací zásob vodíku.

Vodíková palivočlánková vozidla s vyrovnávací akumulací a se zásobníky stlačeného vodíku dosahují krátkodobě stejných výkonových parametrů jak BEMU či EMU. Při současném stavu techniky disponují dojezdem 600 km až 900 km (v závislosti na traťových a provozních podmínkách a velikosti zásobníku vodíku).

7.1 Pevná zařízení pro HMU

Technické zázemí pro provoz vodíkových vozidel je určeno řešením dvou náročných úloh:

- vodíková logistika (ukládání, transport a překládání vodíku),
- energetická účinnost technologického řetězce.

Ve srovnání s motorovou naftou má vodík téměř 2,8krát vyšší výhřevnost vztaženou ke hmotnosti (33,2 kWh/kg versus 12 kWh/kg). Ale s ohledem na svoji velmi nízkou měrnou hmotnost (0,09 kg/m³ versus 830 kg/m³) má vodík ve srovnání s motorovou naftou tři tisíce krát nižší výhřevnost vztaženou k objemu (3 kWh/m³ versus 10 000 kWh/m³).

Proto je vodík silně stlačován. Avšak i při přetlaku 35 MPa (350 bar) má 1 kg vodíku objem 32 litrů. Ocelová nádoba na uchování 1 kg vodíku má hmotnost 50 kg (v případě válcových nádob v zásadě nezávisle na velikosti přetlaku). Tento nepoměr vede k velmi drahé dopravě vodíku: automobil dopravující vodík je více než stokrát těžší než dopravované palivo, a zpět jede prázdný. To výrazně ovlivňuje cenové mapy vodíku, cena vodíku výrazně roste se vzdáleností od místa jeho výroby, s délkou přepravy. Jak doprava vodíku, tak i komprese vodíku zvyšují energetickou náročnost celého procesu.

Manipulace s vodíkem není snadná, aby vodík proudil z jedné nádrže do druhé, musí být mezi nimi rozdíl tlaků (tlakový spád). Vodík se však chová opačně než například vzduch (směs kyslíku a dusíku). Vodík má nízkou teplotu inverze (202 K), proto má při běžných teplotách okolního prostředí záporný Joule-Thomsonův koeficient: při kompresi se ochlazuje a při expanzi se ohřívá. S ohledem na výbušnost vodíku je proto nutno s vodíkem manipulovat pozvolna, vyvarovat se prudké expanze. To je důvod, proč se používá pozvolné plnění velkých vozidlových vodíkových nádrží, které trvá poměrně dlouho, zhruba hodinu. Pomalé plnění vozidlových nádrží vodíkem je pro provoz nepříjemná komplikace. Vozidlo musí odjet z nádraží k plnicí stanici a určitou technologickou dobu v ní pobývat. Proto je vyvíjeno rychlejší plnění, založené na vysoce zabezpečené kontinuální datové komunikaci mezi vozidlem a plnicím zařízením (přenos informace o aktuální teplotě a tlaku vodíku ve vozidlové nádrži do řídicího systému výdejního zařízení) k optimálnímu automatickému nastavení tlakového spádu.

Nesnadná manipulace s plynným vodíkem, daná jeho velmi nízkou objemovou výhřevností (0,003 kWh/litr při normálním tlaku, respektive 1,05 kWh/litr při přetlaku 35 MPa) vede k úmyslu netransportovat, nepředávat a neuchovávat vodík ve volném plynném stavu, ale využívat vodík vázaný v chemických sloučeninách, v hydrátech.

Slibné výsledky přináší vývoj ukládání vodíku v organických kapalinách (LOHC). Již je u nich ve srovnání s plynným vodíkem stlačeným na přetlak 35 MPa dosahováno dvojnásobné objemové výhřevnosti (téměř 2 kWh/litr), a to při atmosférickém tlaku. Chemická reakce při ukládání vodíku do nosné kapaliny (stacionární technologie) je exotermická a chemická reakce při uvolňování vodíku z nosné kapaliny (mobilní technologie) je endotermická.

Vývoj ukládání vodíku za normálního tlaku v organických kapalinách (LOHC) je velmi pozorně sledován petrochemickým průmyslem. Ten je technologicky a logisticky vybaven na transport a distribuci energetických kapalin a přirozeně hledá další uplatnění po skončení epochy ropných paliv. Již je připravována ověřovací aplikace vodíku vázaného v organickém kapalném nosiči (LOHC) na železnici, a to v podobě alternativního napájení standardní interoperabilní elektrické lokomotivy elektrickou energií z palivových článků, využívajících vodík uvolňovaný z organické nosné kapaliny.

Druhým závažným tématem je účinnost ukládání elektrické energie do vodíku.

Účinnost lithiových akumulátorových baterií typu HP (vybití/nabití) je cca 90 %, spolu s DC/DC nabíjecím a vybíjecím měničem činí účinnost ukládání elektrické energie do lithiových akumulátorů cca 85 %. Vstupní energetický řetězec dvouzdrojových vozidel trolej/akumulátor (BEMU), tedy kaskáda AC: trakční napájecí stanice – AC trakční vedení – vozidlový transformátor – čtyřkvadrantový měnič, pracuje s účinností cca 88 %. Tedy celý energetický řetězec BEMU od distribuční elektrické sítě až po stejnosměrný trakční meziobvod přenáší elektrickou energii s účinností v součinu obou hodnot, tedy zhruba $85 \% \cdot 88 \% = 75 \%$.

Vodíková technologie představuje základní kaskádu dvou energetických přeměn elektřina/vodík a vodík/elektřina:

- elektrolyzér s účinností (ve vztahu k výhřevnosti) cca 65 %,
- palivový článek s účinností (ve vztahu k výhřevnosti) cca 60 %.

Tedy základní kaskáda elektrolyzér / palivový článek přenáší elektrickou energii s účinností v součinu $65 \% \cdot 60 \% = 39 \%$.

Při uvažování dalších souvisejících aktivit:

- komprese s účinností 94 %,
- doprava s účinností 90 %,
- vyrovnávací akumulace s účinností 88 %,
- výsledná účinnost dále klesá. V součinu všech dílčích účinností lze dojít k výsledné účinnosti úplného vodíkového energetického řetězce HEMU přibližně 29 %. To je 2,6krát méně než v případě energetického řetězce s využitím pevných trakčních zařízení a s ukládáním energie na vozidle BEMU do lithiového akumulátoru (75 %). Tedy

ukládání elektrické energie do vodíku (HMU) má 2,6krát vyšší spotřebu vstupní elektrické energie než ukládání elektrické energie do lithiového akumulátoru (BEMU).

Použití takto energeticky náročné vodíkové technologie má proto smysl jen v případě, že je k výrobě vodíku využita nadbytečná elektrická energie z obnovitelných zdrojů, pro kterou není jiné využití. Právě možnost využití levné, jinak nepotřebné elektrické energie z obnovitelných zdrojů je základním důvodem, proč je v dopravě hledáno uplatnění vodíku, vytvořeného elektrolýzou v období příznivého počasí. Tato potřeba nastává v elektrických sítích se silným podílem obnovitelných zdrojů energie (vítr, Slunce). A to zejména ve státech ostrovních či přímořských státech, pokud nedisponují dostatečně výkonným elektrickým přenosovým vedením k transportu nadbytečné elektrické energie do vnitrozemí. V zemích, kde dosud není velký podíl obnovitelných zdrojů elektrické energie, zatím taková situace není.

Proto je smysluplnost aplikace vodíku v dopravě teritoriálně a časově selektivní:

- v roce 2019 byl v Německu podíl náhodně působících obnovitelných zdrojů elektrické energie na celkové výrobě elektrické energie 34 % (z toho 25 % vítr a 9 % slunce). V důsledku velkého podílu náhodně působících obnovitelných zdrojů vznikají v Německu časté přebytky jinak nevyužitelné elektrické energie, kterou má logiku ukládat do vodíku,
- v roce 2019 byl v ČR podíl náhodně působících obnovitelných zdrojů elektrické energie na celkové výrobě elektrické energie 3,4 % (z toho 0,8 % vítr a 2,6 % slunce). V důsledku malého podílu náhodně působících obnovitelných zdrojů nevznikají dosud v ČR přebytky jinak nevyužitelné elektrické energie, kterou by bylo vhodné ukládat do vodíku.

Je možno se dohadovat, za kolik let se energetika v ČR promění po vzoru Německa tak, že bude mít velký podíl náhodně působících obnovitelných zdrojů elektrické energie a začne řešit téma ukládání přebytků elektrické energie do vodíku. Ale v současnosti tomu tak ještě není.

8 STRATEGIE DEKARBONIZACE ČESKÉ ŽELEZNICE

Železniční vozidla mají nominální délku technického života 30 let, infrastrukturní zařízení jsou ještě trvanlivější. Proto je nutno při pořizování vozidel, i při budování zázemí pro jejich provoz, rozhodovat velmi uvážlivě, aby pořízená vozidla i zařízení infrastruktury byla v horizontu dalších několika desítek let plnohodnotně využitelná. A to prakticky na stejném místě, neboť v současnosti obvyklá smluvní vazba použití vozidel na určité regiony, či dokonce provozní soubory, respektive linky, omezuje možnosti jejich dříve obvyklých teritoriálních přesunů. Ty byly v minulosti při postupné liniové elektrifikaci železničních tratí velmi významné a početné.

Rozhodujícím trendem je společná strategie MD ČR a SŽ nahradit dosavadní stagnaci liniové elektrifikace železnic (jednotky km ročně) intenzivním rozvojem liniové elektrifikace železnic (stovky km ročně). A to s cílem, aby byla v ČR, podobně jako v sousedních zemích EU, v krátké době více než polovina železničních tratí elektrifikována, a to již jednotným systémem 25 kV.

V zájmu minimalizace celkových investic do železniční techniky je potřebné řešit rozvoj liniové elektrifikace koordinovaně (v předstihu) s rozvojem ETCS, a to včetně obměny parku trakčních vozidel, a doplnit ji o bodovou elektrifikaci v rozsahu potřebném pro aplikaci dvouzdrojových vozidel trolej/akumulátor (BEMU) k zajištění úplného bezemisního provozu v celé síti železnic v ČR.

Plošná aplikace vodíkových vozidel na železnici v ČR se nejvíce z teritoriálních a časových důvodů vhodná:

- cílovým stavech všech regionů (i dosud ležících, zejména na severu ČR, mimo oblast liniové elektrifikace) je liniová elektrifikace hlavních tratí, a to jednotným systémem 25 kV. V tomto cíli je mezi MD ČR, SŽ, kraji i nákladními dopravci shoda,
- v současnosti není v ČR dostatek levného čistého vodíku, což je dáno pomalým nástupem obnovitelných zdrojů elektrické energie v sektoru energetiky,

- není efektivní zřizovat na přechodnou dobu zhruba deseti let infrastrukturu pro provoz vodíkových vozidel a pořizovat vodíková vozidla s vědomím, že nebudou využita po celou dobu své technické životnosti. A zároveň s vědomím, že jde ve srovnání s elektrickými či akumulátorovými vozidly o dražší technologii s výrazně nižší účinností,
- technologický pokrok může přinést zajímavé aplikace vodíku v dopravě bez budování nákladné logistické infrastruktury pro plyný vodík (například ukládání vodíku do hydrátů). Avšak na železnici půjde spíše o okrajové aplikace, byť i ty jsou potřebné a mají své místo. Typickým případem vhodné aplikace vodíkových vozidel na železnici mohou být pomocné lokomotivy nezávislé trakce pro plánované i neplánované napěťové výluky.

9 ZÁVĚR

Přechod české železnice na bezemisní vozidla je objektivní nutností. Lze jej docílit kombinací rozvoje liniové elektrifikace (již i na severu ČR snadno a levně jednotným systémem 25 kV) a vozidly se zásobníky energie. S ohledem na strategický cíl SŽ postupnými kroky liniově elektrifikovat všechny dopravně silněji zatížené železniční tratě, bude podle předpokladů GŘ SŽ v horizontu roku cca 2030 zhruba polovina železniční sítě v ČR elektrifikována.

Jako doplněk k dominantní elektrické trakci závislé se v podmínkách ČR jeví vhodná dvouzdrojová vozidla trolej/akumulátor, která jsou s liniovou elektrifikací 25 kV kompatibilní, a to jak z nynějšího úhlu pohledu méně rozvinuté liniové elektrifikace, tak i z budoucího úhlu pohledu více rozvinuté liniové elektrifikace.

V jižní části území ČR, která již je poměrně hustě elektrifikována systémem 25 kV, a další liniové elektrifikační akce jsou ve fázi pokročilé přípravy, je připravenost infrastrukturního zázemí pro provoz dvouzdrojových vozidel trolej/akumulátor vcelku dobrá. Doplnění bodové elektrifikace (napájecí body 25 kV nevelkého výkonu) bude potřebné zpravidla řešit jen téma přenocování BEMU v obrátových železničních stanicích bez liniové elektrifikace. V severní části území ČR, kde dosud chybí liniová elektrifikace (Rakovnicko, Kladensko, Lounsko, Českolipsko, Rumbursko, Liberecko, Turnovsko, Mladoboleslavsko, Jičínsko, Trutnovsko, Náchodsko, Jesenicko a Krnovsko), není dosud žádná připravenost infrastrukturního zázemí pro provoz dvouzdrojových vozidel trolej/akumulátor. Pro zachování a rozvoj železnice i v této ekonomicky velmi aktivní části území ČR je urychlený přechod železnice na bezemisní provoz existenční nutností. Základem řešení je systematická liniová elektrifikace hlavních tratí v bývalé zóně systému 3 kV, avšak již jednotným systémem 25 kV (počínaje tratěmi Praha – Kladno, Praha – Všetaty, Nymburk/Milovice – Mladá Boleslav a Týniště nad Orlicí – Solnice). Ta vytvoří jak podmínky k zajištění energeticky a emisně úsporného elektrického provozu na dopravně nejvíce zatížených železničních tratích v tomto teritoriu, tak prostřednictvím napájení BEMU i podmínky k zajištění energeticky a emisně úsporného elektrického provozu na okolních železničních tratích. Doplnková bodová elektrifikace (napájecí body 25 kV vyššího výkonu) bude v tomto teritoriu vhodná i jako přechodné řešení pro obrátové nabíjení BEMU v uzlových železničních stanicích do jejich liniové elektrifikace.

V jižní i severní části ČR je zásadním tématem společná časová koordinace implementace ETCS s liniovou a bodovou elektrifikací i s obměnou parku vozidel. A logicky i s úpravami na straně železniční dopravní cesty (výměna přestárých mostů, zvyšování traťových rychlostí), aby celkový technický upgrade železnice proběhl efektivně. Technologický pokrok je i v kolejové dopravě existenční nutností.

Celosvětová historická zkušenost se zánikem 90 % ze 3 500 tramvajových provozů v druhé polovině dvacátého století, v odezvě na jejich technickou zastaralost v důsledku absence systematické modernizace po dobu několika desetiletí, je velmi vážným mementem.