

Jiří Pohl¹

Bezemisní a nízkoemisní vozidla pro železniční dopravu

Klíčová slova

Změna klimatu, fosilní paliva, dekarbonizace, úspory energie, bezemisní vozidla, liniová elektrizace, zásobníky energie, multimodální mobilita

Anotace

Negativní dopady klimatické změny, vysoké náklady na import fosilních paliv a produkce zdraví škodlivých látek spalováním fosilních paliv jsou silnou motivací k dekarbonizaci. Úkolem dopravy je zajistit od roku 2050 mobilitu osob a věcí bez fosilních paliv. Na rozdíl od některých oborů lidské činnosti, které technické řešení dekarbonizace teprve hledají, má doprava výhodu ve vyzrálosti a připravenosti bezemisních technických řešení. Pochopitelně v dimenzi multimodality, neboť ta umožňuje aplikovat jednotlivé druhy dopravy jen tam, kde jsou efektivní. Zásadní výhodou železnice je technologicky zvládnutá a velmi rozšířená liniová elektrizace. Její další rozvoj je základním trendem dekarbonizace železniční dopravy. Doplnkovými trendy jsou v částečně liniově elektrizované železniční síti dvouzdrojové trakční jednotky trolej/akumulátor (BEMU) a dvouzdrojové (duální) lokomotivy trolej/diesel.

Key words

Climate change, fossil fuels, decarbonization, energy savings, zero-emission vehicles, linear electrification, energy storage, multimodal mobility

Anotation

The negative impacts of climate change, the high costs of importing fossil fuels, and the production of health-damaging substances from burning fossil fuels are strong motivations for decarbonization. The task for transportation is to ensure mobility of people and goods without fossil fuels by 2050. Unlike some sectors of human activity that are still seeking technical solutions for decarbonization, transportation has the advantage of mature and ready zero-emission technical solutions. Naturally, in the dimension of multimodality, as it allows for the application of different types of transportation only where they are effective. A fundamental advantage of rail is the technologically mastered and widely used linear electrification. Its further development is a basic trend in the decarbonization of railway transport. Complementary trends in a partially linearly electrified railway network include dual-source traction units using trolley/battery (BEMU) and dual locomotives using trolley/diesel.

Úvod

Ve srovnání s tím, jak důsledně je řešena, a jak významně již pokrčila, dekarbonizace elektrárenství (soustavný pokles měrné emisivity spotřební elektrické energie, a to i v ČR, je toho objektivním dokladem), tak v dopravě dekarbonizace v zásadě ještě nezačala. Soustavný růst spotřeby energie v dopravě, zejména importovaných fosilních paliv, a vytrvale rok od roku stále vyšší produkce oxidu uhličitého v dopravě v ČR jsou toho smutným dokladem.

Zaostávání dekarbonizace dopravy (tím i aplikací moderních inovativních bezemisních udržitelných technologií v dopravě) za dekarbonizací energetiky (tím i aplikací moderních inovativních bezemisních udržitelných technologií v energetice) je nepochybně způsobeno i tím, že v energetice již

¹ Ing. Jiří Pohl, senior engineer, Siemens Mobility

je v zemích EU řadu let důsledně uplatňován princip emisního obchodování EU ETS, avšak v dopravě zatím ne.

Tato nesymetrie již brzy skončí, od roku 2027 bude v zemích EU rozšířen systém emisního obchodování i na dopravu a na vytápění budov. A to zavedením samostatného systému emisního obchodování EU ETS 2.

Tržní cena emisní povolenky EU ETS 2 bude zpočátku limitována (případným vydáváním dalších emisních povolenek) na hodnotě 45 EUR t CO₂, tedy zhruba 1 Kč/kg CO₂.

Měrná emisivita ropné motorové nafty činí 2,65 kg CO₂/litr, tedy po zavedení systému EU ETS 2 vzroste cena motorové nafty zhruba jen o 3 Kč/litr. To není žádné dramatické zdržení, běžné sezónní výkyvy tržní ceny pohonných hmot bývají prakticky každoročně vyšší.

Podstatný však je lineární redukční faktor, tedy tempo snižování počtu ročně vydaných emisních povolenek. Trajektorie emisí oxidu uhličitého produkovaného dopravou směřuje k nule v roce 2050, ve kterém již nebude vydána žádná emisní povolenka.

V odpovědnosti sektoru dopravy je, aby se do té doby doprava zbavila své závislosti na spotřebě, respektive splování fosilních paliv. Aby doprava dokázala zjistit přepravu osob a věcí bez fosilních paliv, neboť v roce 2050 již žádná fosilní paliva nedostane.

V procesu dekarbonizace je žádoucí, aby doprava šla trendu dekarbonizace vstříc, aby svoji závislost na fosilních palivech rok od roku programově snižovala, aby emisních povolenek potřebovala stále méně. V opačném případě by byla poptávka po fosilních palivech vyšší než jejich možná spotřeba, tržní cena emisní povolenky by byla velmi vysoká, aby vyvolala změnu spotřebitelského chování. To je jejich účelem.

Vysoká tržní cena emisní povolenky urychluje proces dekarbonizace dopravy dvojnásobným účinkem:

- vysoké ceně emisní povolenky úměrná vysoká cena fosilních paliv vede k poklesu poptávky po fosilních palivech,
- vysoký výnos z držeb emisních povolenek a jemu úměrné vysoké investice do moderních bezemisních technologií stimuluje zavádění moderních bezemisních technologií v dopravě, poptávka po fosilních palivech klesá, nejsou potřeba, jsou nahrazovány obnovitelnými zdroji.

V každém oboru lidské činnosti, dopravu nevyjímaje, je dekarbonizace největším projektem, jaký kdy byl v dějinách techniky řešen. Motiv je všeobecně znám (zastavení klimatických změn, zastavení importu fosilních paliv, zastavení produkce zdraví škodlivých látek), cíl též (nulová spotřeba fosilních paliv v roce 2050 – viz závěry celosvětové Pařížské konference z prosince 2015). Nástroje k dekarbonizaci (moderní technologie) jsou k dispozici, zdroje (tím primárním a obnovitelným je lidská práce) též.

Pochopitelně jako každý projekt potřebuje i dekarbonizace kvalitní projektové řízení. Jeho hlavním cílem je zajistit nejen environmentální udržitelnost, ale i ekonomickou udržitelnost a sociální udržitelnost.

1. Adaptace a mitigace

Změna klimatu je realita. Klima ovlivňují antropogenní plynné emise a doprava je jejich významným zdrojem. Velmi názorně to dokládá růst četnosti výskytu a intenzity povodní v ČR, ke kterým vydatně přispěly jak emise oxidu uhličitého, tak i emise oxidů dusíku:

- Spalováním fosilních paliv (automobilový benzín, motorová nafta, CNG, LNG) vznikající emise oxidu uhličitého (CO₂), které zvyšují tepelně izolační schopnost plynného obalu Země, což se projevuje růstem teploty ovzduší i oceánů. Všeobecně sledovaným parametrem je zvýšení střední roční teploty ovzduší Země, které již překročilo hodnotu 1 °C a dále roste. Avšak tepelné pole povrchu Země není homogenní, některé jeho části se ohřívají pomaleji a jiné rychleji. Například na území ČR došlo v průběhu posledních 110 let k postupnému

zvýšení střední roční teploty ovzduší z hodnoty 6,7 °C v první dekádě 20. století na hodnotu 9,2 °C v druhé dekádě 21. století, což je zvýšení o 2,5 °C.

Příčinou této rozdílnosti mezi jednotlivými lokalitami je nesymetrie tepelné kapacity Země. Oblast Severního pólu (Arktida) je tepelně velmi labilní, neboť není tvořena pevninou, ale jen plouvoucí ledovou krou. Má jen slabé zalednění, proto se ohřívá mnohem rychleji než tepelně více stabilní oblast Jižního pólu (Antarktida), která je tvořena hluboce promrzající pevninou s velmi silným zaledněním.

Malá tepelná setrvačnost oblasti Severního pólu má významný vliv na vývoj počasí v Evropě. To se ukázalo na konci léta roku 2024. Pohyb oblak odpařených nad Středozezemním mořem směrem k severu zastavila nízká rychlost tryskových výškových proudů, a tak své dešťové srážky uvolnily nad Evropu, která tím byla zasažena vydatnými dešti.

- Vysokoteplotním ohřevem vzduchu ve spalovacích motorech, zejména vznětových (naftových i vodíkových), vznikající emise oxidů dusíku (NO_x) způsobují nejen poškození lidského zdraví svými karcinogenními účinky, ale i nitrifikaci půdy. Na té se společně podílejí emise oxidů dusíku a dusíkatá hnojiva spolu s poklesem organického hnojení a ochuzováním půdy organické zbytky, typicky při produkci biopaliv. Sloučeniny dusíku snižují schopnost půdy vsakovat dešťové srážky (retenci). Ta již klesla z původních 500 litrů/m² na méně než polovinu. V důsledku toho vzniká nejen hloubková půdní suchost (nedostatek vody ve studních, usychání stromů), ale i rychlé povrchové povodně. Ty z důvodu snížené retenční schopnosti půdy nastávají nikoliv až po několika dnech intenzivních dešťových srážek, ale velmi rychle již v prvních dnech intenzivních dešťových srážek.

Kombinace vydatných dešťových srážek a snížené retenční schopnosti půdy mění četnost výskytu povodní a tím i pravděpodobnost vzniku škod. Mnoha generacemi zaznamenávaná evidence povodní (desetiletá voda, stoletá voda, pětisetletá voda, ...) vytvořila všeobecně uznávaná pravidla, na kterých jsou založeny jak pojišťovací matematika, tak i normativní požadavky na dimenzování a povolování staveb. Nyní však změna klimatu zásadně mění tato vžitá pravidla. Léty prověřené hodnoty ztrácejí svůj význam, četnost výskytu extrémních klimatických jevů vydatně roste. Aktualizace pojišťovací matematiky i stavebních pravidel jsou objektivní nutností.

Změna klimatu mění podmínky pro život lidí na Zemi. Nelze ji ignorovat, je nutno na ni reagovat. K této uvědomělé činnosti jsou cíleny dva druhy opatření – adaptační a mitigační, a to ve všech oblastech lidské činnosti:

- adaptací se rozumí opatření cílená k přizpůsobení života lidí změněným klimatickým podmínkám,
- mitigační se rozumí opatření cílená k snížení antropogenních vlivů, způsobujících změnu klimatu.

Dopravy se týkají jak adaptační opatření (typicky: nutnost klimatizace interiérů vozidel pro přepravu osob, potřeba zvýšení odolnosti elektrické vozby vůči námraze a ledovce na trakčním vedení konverzí napájecího systému 3 kV na 25 kV), tak i mitigační opatření. Zásadním mitigačním opatřením je dekarbonizace dopravy, tedy odpoutání dopravy od závislosti na spalování uhlovodíkových paliv, zejména fosilních (ropné produkty – motorová nafta a automobilový benzín a zemní plyn – CNG a LNG).

Změna klimatu není jedinou motivací k dekarbonizaci dopravy. Minimálně se stejnou naléhavostí působí další dva závažné motivy:

- odstranění závislosti dopravy na importu fosilních paliv, zejména ropných, který je mimo jiné i velice silným zdrojem financování agresivních armád,
- odstranění závislosti dopravy na produkci zdraví škodlivých látek (oxidy dusíku NO_x, jemné prachové částice PM, polyaromatické uhlovodíky PAH a organické těkavé látky VOC). Počet předčasných úmrtí způsobených znečištěným ovzduším v ČR vytrvale roste, již přesáhl 9 000 osob ročně. Přitom ve městech, tedy tam kde v ČR žije 70 % obyvatelstva, již prakticky

nejsou ani lokální topeniště, ani znečišťující průmysl, tedy velkou většinu znečištění ovzduší způsobuje doprava.

2. Intramodální a extramodální úspory energie

Doprava spotřebuje v ČR více energie než průmysl, a to především energie z fosilních paliv. Importovaná fosilní paliva pokrývají v ČR 93 % spotřeby energie pro dopravu. Doprava je v ČR nejvíce závislým hospodářským odvětvím na spalování a importu fosilních paliv.

Vlivem vysoké energetické náročnosti automobilové dopravy (vysoký valivý odpor pneumatik na vozovce a vysoký aerodynamický odpor krátkých samostatně jedoucích vozidel, nízká účinnost spalovacích motorů) a jejího dominantního podílu na přepravních výkonech osob i věcí, je doprava v ČR velmi energeticky náročná, má velice nízkou energetickou účinnost. Z toho plyne její extrémně vysoká energetická náročnost, která vytrvale roste a již přesahuje 80 TWh/rok. Není reálné nahradit tak mohutnou (a zbytečnou) spotřebu energie uhlovodíkových paliv v dopravě v ČR obnovitelnými zdroji energie. V rámci procesu dekarbonizace dopravy je proto objektivní nutností energetickou náročnost dopravy radikálně snížit.

Nezbytnou součástí procesu dekarbonizace (přestat do roku 2050 používat fosilní paliva), ke kterému se Česká republika spolu s ostatními téměř 200 státy světa zavázala podpisem Pařížského protokolu v roce 2015, je zvyšování energetické účinnosti, tedy pokles energetické náročnosti. K tomu definuje Dopravní politika ČR dva základní nástroje:

- **Intramodální úspory energie**, což jsou úspory energie docílené zvýšením energetické účinnosti v rámci téhož dopravního módu. Typicky jde o náhradu pohonu spalovacím motorem, který vyžívá jen cca 1/3 energie paliva a není schopen rekuperačního brzdění, elektrickým pohonem, který pracuje s vyšší účinností a je schopen rekuperačního brzdění.
- **Extramodální úspory energie**, což jsou úspory energie docílené motivací uživatelů dopravy ke změně dopravního chování, k převedení přeprav na energeticky účinnější druh dopravy. Typicky jde o přesun přeprav ze silniční na železniční dopravu, která se vyznačuje vyšší energetickou účinností. A to jak v důsledku nižšího odporu valení ocelových kol po ocelových kolejnicích a nižšího aerodynamického odporu dlouhých štíhlých vozidel jedoucích v zákrytu (tvořících vlak), tak i v důsledku používání k pohonu vozidel vysoce účinného liniového elektrického vysokonapěťového napájení 25 kV. Motivací ke změně dopravního chování je vysoká kvalita přepravní nabídky (rychlost, pohodlí) a dostatečnost kapacity tratí i vozidel k převzetí zvýšené přepravní poptávky.

Pochopitelně má ekonomický smysl vytvářet extramodální úspory energie především v relacích siných a pravidelných přepravních proudů. Tedy tam, kde je ekonomicky efektivní investovat do rozvoje kvalitní železniční dopravní cesty, při vnímání její dopravní, energetické i informační dimenze. Jde o harmonický rozvoj subsystémů INF, ENE a CCS evropského interoperabilního železničního systému a pochopitelně i vozidel (subsystém RST).

V rámci racionální multimodality je potřebné, aby byl každý druh aplikován v oblastech, kde pracuje efektivně, kde jeho výhody převažují nad nevýhodami. Nejen environmentální udržitelnost, ale i ekonomická udržitelnost a sociální udržitelnost jsou základními podmínkami udržitelného rozvoje. Kooperativnost (schopnost spolupracovat) a komplementárnost (schopnost se doplňovat) jsou nosnými trendy multimodální udržitelné mobility.

3. Liniová elektrizace

Skutečnost, že ocelové kolejnice vlak nejen nesou a vedou, ale zároveň je též vodivě spojují s potenciálem země a jsou schopny vést elektrický proud, využívají železnice jako výborný předpoklad pro vysoce výkonnou a vysoce účinnou liniovou elektrizaci. A to technologicky snadným,

v provozu osvědčeným a investičně a provozně levným a spolehlivým jednostopým trolejovým trakčním vedením.

Díky tomu, že jsou železniční vozidla ocelovými koly na ocelových kolejnicích uzemněna, může železnice využívat lehké vysokonapěťové trakční vedení 25 kV s nízkými průřezy vodičů. To je základní rozdíl proti silniční dopravě, kde vozidla uzemněna nejsou, a je proto nutné z bezpečnostních důvodů používat složité a těžké dvoustopé vedení a napětí 0,75 kV (viz trolejbusy), což omezuje jeho výkonnost a snižuje jeho účinnost.

Přenosová schopnost vedení (poměr přenášeného výkonu ku ztracenému výkonu) závisí na druhé mocnině napětí. Tedy přenosová schopnost trakčního vedení je na železnici s napětím 25 kV více než tisíckrát vyšší, než v silniční dopravě při napětí 0,75 kV. Ve srovnání se silniční dopravou, která potřebuje dvoustopé vrchním trakční vedení, vystačí kolejová doprava s jednodušším a levnějším jednostopým vrchním trakčním vedením. To jsou velice významné systémové přednosti kolejové dopravy.

Historický vývoj elektrizaci železnic v ČR zkomplikoval nikoliv technicky, ale politicky motivované rozhodnutí zvést v Československu po vzoru Francie zastaralý nevykonný systém 1,5 kV, což předurčilo prvou fázi elektrizace Československých železnic, zahájenou v pražském železničním uzlu ve dvacátých letech minulého století, k neúspěchu. Systém využívající tak nízké napětí objektivně trpí nízkou přenosovou schopností trakčního vedení, tedy nízkou účinností, vysokými ztrátami energie a vysokými investičními náklady. Nebylo ekonomicky reálné jej rozvinout do podoby systematické elektrizace železniční sítě. Pražský železniční uzel zůstal nenaplněným torzem elektrizačních záměrů ČSD.

Ani po druhé světové válce přijaté rozhodnutí o přechodu na systém 3 kV, navázané na myšlenkový vývoj v Československu v průběhu třicátých let, nebylo šťastné. Válka technický pokrok nezastavila, technický vývoj ve čtyřicátých letech intenzivně směřoval k elektrizaci železnic jednofázovým systémem 50 Hz.

Již v padesátých letech bylo i v Československu zřejmé, že systém 25 kV 50 Hz se z racionálních technických a ekonomických důvodů stává světovým standardem elektrice železnic. Avšak Československý znárodněný průmysl, žijící v epoše studené války v izolaci od okolního evropského dění, měl v té době dost starostí, jak zvládnout spolehlivý provoz železnic elektrizovaných systémem 3 kV, zahájený na trati Praha – Česká Třebová v den 40. výročí Velké říjnové socialistické revoluce 7. 11. 1957. Elektrizace a vláda Sovětů rovná se komunismus, zněla známá Leninova rovnice.

V dnes nesnadno pochopitelných podmínkách striktního oddělení Československa od technických informací a technických produktů z hospodářsky vyspělých evropských zemí zajišťovaly dva největší československé průmyslové podniky, plzeňské Závody Vladimíra Iljiče Lenina a pražské ČKD Stalingrad, mobilní i stacionární technické prostředky k elektrizaci železnic systémem 3 kV. Tedy především elektrické lokomotivy, elektrické vytápění osobních železničních vozů a technologické vybavení trakčních napájecích stanic (transformátory, rtuťové usměrňovače i rychlovypínače).

Prioritní strategickou úlohou tehdejší doby byla elektrizace hlavního železničního tahu, spojujícího hnědouhelné doly v Podkrušnohoří a pražský průmysl s uhelnými doly, hutěmi a průmyslovými závody na Ostravsku a s východoslovenskými překladišti (Trať družby), po kterém směřovaly hospodářské produkty všeho druhu z celého Československa do Sovětského svazu.

Po zvládnutí elektrizace železnic systémem 3 kV dostal československý průmysl nové zadání, osvojit si a zajistit pro železnici i mobilní i stacionární technologie pro systém 25 kV. Také toto zadání, opět řešené v podmínkách izolace od dění v zahraničí, pražský a plzeňský průmysl v postupu let společně zvládnul. Vznikly mobilní i stacionární technologie pro elektrizaci československých železnic systémem 25 kV, a to včetně prvopočátku výroby a užití křemíkových diodových usměrňovačů.

V roce 1966, po devíti letech od zahájení provozu na tratích elektrizovaných systémem 3 kV, byla v Československu k dispozici též technika jednofázových trakčních napájecích stanic i jednofázových eklektických lokomotiv 25 kV, na kterou elektrizace československých železnic čekala.

Rád na tomto místě připomenu několik mých bývalých strašných kolegů z Vysočan, kteří se svojí prací a dovedností zasloužili o vytvoření technického základu elektrizace československých železnic systémy 3 kV i 25 kV:

- tvůrce rtuťových excitronových usměrňovačů a dráhových měření Jaroslav Ibl,
- tvůrce elektrického topení v železničních vozech František Vodňanský,
- tvůrce trakčních transformátorů pro napájecí stanice i pro lokomotivy Maxmilián Skála,
- tvůrce zpočátku rtuťových ignitronových, později diodových křemíkových usměrňovačů pro elektrické lokomotivy a trakční jednotky Jaroslav Straka,
- výpočtář polovodičových měničů Albert Kloss (před emigrací).

Vývoj v oblasti elektrotechniky, zejména v oboru polovodičových měničů a řídicích systémů, postupoval velmi rychle. Počáteční největší dilema jednofázových elektrických vozidel, jak efektivně a spolehlivě uspořádat trakční pohon, vyřešily v závěru minulého století vektorově řízené asynchronní trakční motory velmi úspěšně, a to pro celou šířku oboru drážních aplikací.

Liniová elektrizace českých železnic (od roku 1957 systémem 3 kV, následně od roku 1965 též systémem 25 kV) probíhala zpočátku vysokým tempem. Postupně však slábla a kolem roku 2010 prakticky ustala. To je paradoxní, neboť právě po roce 2010 došlo v důsledku modernizace hlavních železničních tratí a příchodu nových rychlých a pohodlných vozidel k zastavení předchozího dlouhodobého poklesu přepravních výkonů osobní železniční dopravy a železnice přešla do tendru systematického růstu přepravních výkonů (mezi roky 2010 a 2019 vzrostly přepravní výkony osobní dopravy na české železnici o 66 %).

Realitou je liniová elektrizace v ČR na pouhých 34 % železniční sítě. To je zhruba polovina jak vůči průměru zemí EU, tak vůči sousedním státům (PL, SK, AT, DE). Tato poměrná hodnota je pochopitelně ovlivněna i mírou redukce lokálních tratí.

Jednou z příčin ustrnutí elektrizace českých železnic bylo nepříliš šťastné koncepční rozhodnutí z konce 60. let minulého století o rozdělení elektrizace železnic v tehdejší ČSSR na dvě zóny:

- tratě na jih od hlavního tahu Most/Praha – Kolín – Olomouc – Ostrava /Vsetín – Žilina – Košice – Čierna nad Tisou elektrizovat střídavým systémem 25 kV 50 Hz,
- tratě na sever od hlavního tahu včetně Most/Praha – Kolín – Olomouc – Ostrava /Vsetín – Žilina – Košice – Čierna nad Tisou elektrizovat stejnosměrným systémem 3 kV.

První výrok, o elektrizaci železnic na jihu ČR, byl v zásadě naplněn. Železnice elektrizovaná systémem 25 kV propojila krajská města na jihu ČR s centrem a dospěla až ke státní hranici. Na převážně agrárním jihu tak disponuje ČR modernizovanou elektrizovanou železnici s dvoukolejnými tratěmi, s rychlostí do 160 km/h a ETCS. Je na nich čilá regionální osobní doprava, dálková osobní doprava i nákladní doprava, a to jak ve vnitrostátní dimenzi, tak i v mezistátní dimenzi.

Druhý výrok, o elektrizaci železnic severu ČR, zůstal i po téměř 60. letech až do současnosti nenaplněn. Tratě na severu ČR, v zamýšlené zóně rozvoje systému 3 kV, dodnes liniově elektrizovány nejsou. Železnice zde prakticky zůstala ve své podobě z druhé poloviny let předminulého století, kdy bylo jejím hlavním cílem ze všech směrů zásobovat bohaté a průmyslově rozvinuté Liberecko uhlím. Výsledkem je, že průmyslový sever ČR má jen zastaralou nevýkonnou železnici, bez liniové elektrizace, bez dvoukolejných tratí a s traťovými rychlostmi jen kolem 80 až 100 km/h. V zásadě zde železnice slouží jen regionální osobní dopravě, dálková osobní doprava a nákladní doprava na severu Čech téměř nejsou. Liberec je jediným krajským městem bez rychlíkového spojení s Prahou. To je právem vnímáno jako teritoriální diskriminace.

Příčin tohoto neutěšeného stavu železnic na severu ČR je více, ale jednou z podstatných je chybějící liniová elektrizace. Systém 3 kV se ukázal pro elektrizaci zdejší husté sítě jednokolejných železničních tratí jako nevhodný. Vyžadoval by vybudování mnoha desítek trakčních napájecích stanic (měření) podél železničních tratí a zjištění přívodu elektrické energie k nim. Z ekonomických důvodů proto v průběhu více než padesáti let k elektrizaci železnic severu ČR systémem 3 kV nedošlo. Zahájení systematické elektrizace železnic na severu ČR (mezi Děčínem a Opavou) je trvale aktuální úlohou.

4. Koncepční dokumenty

Avšak i na hlavních elektrizovaných tratích dosáhl systém 3 kV svých limitů, a to technických. V době svého vzniku, krátce po skončení druhé světové války, byl navržen pro napájení lokomotiv o výkonu 2 MW. Postupem let však došlo k významnému zvýšení rychlosti jízdy vlaků. U rychlíků z někdejších 100 až 120 km/h na současných 160 km/h, s předpokladem zvýšení na 200 km/h po odstranění úroňových křížení s pozemními komunikacemi. V zájmu náležitého využití kapacity dráhy musí i nákladní vlaky jezdit dostatečně rychle, aby dokázaly udržet trasu v souběhu s rychlíky. Standardem vozby rychlíků i nákladních vlaků se staly lokomotivy o výkonu 6 MW.

Pro napájení tak výkonných vozidel již systém 3 kV nestačí, přenosová schopnost trakčního vedení o tak nízkém napětí je malá. Úbytky napětí na trakčním vedení a tím i ztráty energie jsou velké, napětí na sběrači proudu vozidel hluboce klesá, dochází k významnému omezení trakčního výkonu vozidel.

V zásadě byla možná dvě technická řešení, jak posílit výkonnost eklektického napájení hlavních tratí:

- zvýšit výkonnost systému 3 kV zdvojnásobením počtu trakčních napájecích stanic (měnění), tedy doplněním nových trakčních napájecích stanic o další, situovanou uprostřed mezi nimi,
- přechod české železnice na jednotný systém 25 kV, který se díky vyššímu napětí vyznačuje mnohanásobně vyšší (v poměru druhých mocnin napětí) přenosovou schopností trakčního vedení, tedy nižšími ztrátami energie a vyšší stabilitou napětí na sběrači proudu vozidel, tedy i vyšší stabilitou trakčního výkonu vozidel.

Na základě odborné studie bylo v prosinci 2016 Centrální komisí Ministerstva dopravy ČR rozhodnuto o přechodu české železnice na jednotný systém 25 kV (o **konverzi ze 3 kV na 25 kV**), který vyniká vyšší výkonností, vyšší účinností a nižšími investičními náklady.

Důležitou okolností je skutečnost, že stav techniky významně pokročil vpřed a k dispozici již jsou trakční napájecí stanice s technologií polovodičových měničů vstupního třífázového napětí na výstupní jednofázové napětí (3 AC/1 AC). Ty splňují jak požadavky energetiky na kvalitu odběru elektrické energie z distribuční sítě:

- symetrické zatížení všech tří fází,
- odběr pouze činného výkonu,
- téměř sinusový tvar proudu bez vyšších harmonických složek,

tak i požadavky vlakové dopravy. Jde především o vysoce výkonné a energeticky hospodárné spojitě dvoustranné napájení trakčního vedení v systému jednotné fáze (bez neutrálních polí v trakčním vedení), zajišťující nepřetržité napájení vozidel velmi stabilním napětím. To je podstatným přínosem pro:

- nepřerušované působení tažné síly (plynulost provozu, zvyšování rychlosti),
- nepřerušované působení brzdě síly elektrodynamické rekuperační brzdy (bezpečnost, úspory energie),
- nepřerušovaný chod pomocných zařízení a zdrojů pro napájení palubních sítí,
- nepřerušovaný chod ventilace, topení a klimatizace interiérů vozidel,
- stabilitu napětí v trakčním vedení,
- možnost rozmrazování námrazy a ledovky,
- snížení opotřebení kontaktních přístrojů a dalších technických zařízení,
- nerozptylování strojvedoucího neustálým periodickým zapínáním a vypínáním proudu,
- odstranění poruch způsobených přehlídnutím či nerespektováním návěsti vypni proud.

Přechod na jednotný systém napájení železnic 25 kV je důležitý i z důvodu vnitřní konektivity konvenčního železničního systému a nově budovaného vysokorychlostního systému, který využívá liniovou elektrizaci 25 kV (pro vysoké rychlosti je systém 3 kV nevhodný, vyžadoval by z důvodu vysokého proudu mohutný těžký sběrač proudu, který by vlivem vysokých dynamických sil špatně spolupracoval s trakčním vedením).

Bylo by velice nevhodné, aby v místech přechodu z konvenčního železničního systému na vysokorychlostní železniční systém, tedy tam, kde se vlaky intenzivně rozjíždějí a intenzivně brzdí, docházelo ke změně napájecího systému, provázené nežádoucím přerušením tažné síly či brzdné síly rekuperační elektrodynamické brzdy.

Návazně na rozhodnutí o konverzi systému 3 kV na 25 kV přijalo Ministerstvo dopravy ČR po dalších analýzách v listopadu 2023 **Koncepci rozvoje elektrické trakce v ČR**, která stanovuje cíl, aby se postupnou elektrizací dalších 2 480 km tratí zvýšila i v ČR elektrizace železniční sítě na cca 60 %, tedy na současný evropský standard.

Oba tyto trendy spolu velmi úzce souvisejí, neboť vysoká přenosová schopnost systému 25 kV umožňuje napájet z již existujících či nově budovaných trakčních napájecích stanic nejen jednu elektrizovanou železniční trať, ale i další železniční tratě (železniční síť) v jejím okolí. To velmi radikálně snižuje potřebu budovat další trakční napájecí stanice a řešit jejich připojení ke všeobecné elektrizační distribuční soustavě ČR.

Liniová elektrizace 25 kV je evropsky standardizovaným interoperabilním systémem. Je vhodná pro regionální osobní dopravu, dálkovou osobní dopravu i pro nákladní dopravu. Pochopitelně vyžaduje určitou investici, a proto je rozumné aplikovat liniovou elektrizaci prioritně na dopravně silně zatížené tratě (v součtu regionální osobní dopravy, dálkové osobní dopravy a nákladní dopravy), neboť tam přináší nejvyšší energetické i provozní efekty.

Dokument Koncepce rozvoje elektrické trakce v ČR byl schválen a je v realizační fázi. SŽ aktuálně postupně zadává jednotlivé tratě projekčním firmám ke zpracování projektové dokumentace pro přípravu stavby.

V oblasti liniové elektrizace železnic je mezi všemi relevantními partnery (MD, SŽ, objednatelé dálkové i regionální osobní dopravy, osobní i nákladní dopravci) principiální shoda. Diskutovaným tématem je termín realizace jednotlivých projektů. A to především z důvodu zcela nezbytné technické, teritoriální a časové kompatibility elektrizace tratí a vozidel, respektive i s vozidly spojené objednávky veřejné dopravy. Vzájemná koordinace investic do tratí a do vozidel je nutností.

Časová posloupnost rozvoje elektrizace železnic je limitována zejména disponibilními finančními prostředky, neboť technické řešení liniové elektrizace je principiálně známo, v EU standardizováno (viz TSI ENE), projekční kapacity ani stavební kapacity nejsou rozhodujícím limitem. Termínový plán elektrizace železnic je omezen nejistotou objemu prostředků, se kterými bude hospodařit v dalším roce SFDI a jak budou rozděleny.

5. Bezemisní doprava na tratích bez liniové elektrizace

Jakkoliv je prioritním trendem rozvoj liniové elektrizace železnic (již jednotným systémem 25 kV), bude ve střednědobém horizontu (postupný přechod od 1/3 liniově elektrizovaných železnic na 2/3 liniově elektrizovaných železnic) i v dlouhodobém horizontu (2/3 liniově elektrizovaných železnic a 1/3 železnic bez liniové elektrizace) v ČR nutno počítat s koexistencí dvou druhů železničních tratí:

- dominantní a rostoucí podíl liniově elektrizovaných železnic (perspektivně výhradně 25 kV),
- menšinový (ale dost velký) podíl železnic bez liniové elektrizace.

Technické řešení vozidel pro dominantní liniově elektrizovanou část železniční sítě je zřejmé. Jsou jím již široce zavedená a všeobecně známá tradiční elektrická vozidla s liniovým napájením:

- elektrické lokomotivy,

- elektrické trakční jednotky.

Při aktuálním stavu techniky představují možné technické řešení vozidel pro klesající neelektrizovanou část železniční sítě tři kategorie vozidel:

- bezemisní **dvouzdrojové elektrické trakční jednotky trolej/akumulátor (BEMU)** vhodné pro zastávkovou regionální osobní železniční dopravu (dojezd cca 80 až 100 km),
- bezemisní **vodíkové palivočlánkové trakční jednotky (HMU)** vhodné pro zastávkovou regionální osobní železniční dopravu,
- nízkemisní **dvouzdrojové (duální) lokomotivy trolej/diesel** pro dálkovou osobní železniční dopravu.

V rámci přípravy Koncepce rozvoje elektrické trakce byla analyzována vhodnost výše uvedených vozidel pro železniční provoz na tratích bez liniové elektrizace.

Pro bezemisní provoz na železničních tratích bez liniové elektrizace je nutností akumulace elektrické energie. K tomu lze využít dva fyzikální principy:

- **Sekundární elektrochemické články** (aktuálně zejména litioiontové). Akumulátorové baterie sestavené z těchto článků, vhodné pro dráhový provoz (robustní, typu HP s vysokou výkonovou zatížitelností a s životností v řádu desítek tisíc cyklů, cca 15 let, technologie lithium titanát oxid, LTO) dosahují velmi vysoké účinnosti (cca 90 %) a akceptovatelných hodnot měrné energie (cca 100 kWh/t, tedy cca 4krát více než tradiční olověné trakční akumulátorové baterie). To dává vozidlům BEMU výborné trakční a brzdové vlastnosti. I v akumulátorovém režimu disponují v režimu jízdy i v režimu rekuperační brzdy parametry na úrovni vozidel elektrických, tedy rychlá dynamická jízda a vysoce účinné a energeticky úsporné rekuperační elektrodynamické brzdění. Zároveň mají možnost rychlého nabíjení vysokým výkonem odebíraným ze standardního trakčního vedení liniově elektrizovaných železnic 25 kV za jízdy (dynamické nabíjení) či za stání (statické nabíjení). Mohou být provozována na částečně liniově elektrizovaných železničních sítích, a to zpravidla bez potřeby budovat pro ně zvláštní (bodovou) nabíjecí infrastrukturu. Reálně provozně využitelný dojezd (EOL, tedy při snížených parametrech akumulátorové baterie na konci její životnosti) je u vozidel BEMU v regionální osobní zastávkové dopravě podle charakteru trati a provozu cca 80 až 100 km. S ohledem na možnost opakovaného nabíjení BEMU z trakčního vedení několikrát v průběhu dne je takový provoz pro velkou část regionální osobní dopravy v částečně elektrizované železniční síti postačující. Případná potřeba delšího dojezdu je řešitelná dílčí liniovou elektrizací (například v úseku odbočujícího z hlavní liniově elektrizované tratě).

Velkou podporou rozvoje BEMU na české železnici je probíhající proces konverze napájení elektrických drah ze 3 kV na 25 kV, a to ze dvou objektivních technických důvodů:

- o trakční akumulátorové baterie jsou všeobecně řešeny s izolační hladinou kolem 1 kV, tedy je lze snadno přímo připojit ke stejnosměrnému meziobvodu AC vozidel, nikoliv ke stejnosměrnému meziobvodu DC vozidel 3 kV, což tato vozidla komplikuje (snižuje výkonnost a dojezd),
 - o při statickém nabíjení vozidla z liniového trakčního vedení je limitem příkon, a tedy i virtuální rychlosti nabíjení, proudová zatížitelnost kontaktu lišty sběrače proudu vozidla s trolejovým drátem při stání. Nízké DC trolejové napětí 3 kV limituje podle TSI ENE příkon pro nabíjení na hodnotě $3 \text{ kV} \times 200 \text{ A} = 600 \text{ kW}$. Výhodou AC systému 25 kV je 8,3krát vyšší napětí, tedy možnost intenzivnějšího a rychlejšího nabíjení vyšším výkonem. A to kdekoliv, přímo z trakčního vedení bez nutnosti budovat speciální infrastrukturní zařízení.
- **Primární elektrochemické články** (aktuálně zejména palivové vodíkové). Tuto technologii je možno vnímat jako akumulátor s otevřeným cyklem:
 - o v elektrolyzátoru dochází k ukládání elektrické energie do chemické vazby vodíku,
 - o v palivovém článku dochází k přeměně chemické vazby vodíku na elektrickou energii.

6. Vodík a jeho aplikace v dopravě

Výhodou palivočlánekové technologie je vysoká měrná energie vodíku. Samotný vodík má výhřevnost 33 200 kWh/t, stlačený vodík v kompozitových tlakových lahvích 350 bar (které jeho hmotnost zvyšují cca 20násobně) poskytuje cca 900 kWh/t elektrické energie na výstupu palivového článku, stlačený vodík v ocelových tlakových lahvích 350 bar (které hmotnost zásob vodíku zvyšují cca 50násobně) poskytuje cca 400 kWh/t elektrické energie na výstupu palivového článku.

Palivové články vyžadují čistý vodík (s čistotou podle ISO 14 687-2, tedy alespoň 99,97 %). Proto pro ně nelze používat běžný vodík z chemického průmyslu získaný destilací ropných zbytků (čistota 99,0 %, tedy 33 x více nečistot, než je pro palivové články přípustné) či parním reformingem metanu (čistota 98,5 %, tedy 50 x více nečistot, než je pro palivové články přípustné), ale jen velmi čistý elektrolytický vodík (při technologii elektrolyzy PEM je dosahována čistota 99,999 %). Navíc by použití vodíku vyráběného z těchto surovin nevedlo k dekarbonizaci, neboť ropa i zemní plyn jsou fosilními uhlovodíkovými palivy.

Objektivní nevýhodou palivových článků je jejich nízká účinnost. Ta činí i u nejlepších palivových článků jen kolem 60 %, značná část energie se ztrácí v podobě vodní páry (palivový článek produkuje z 1 kg vodíku 9 kg vody, respektive vodní páry, což reprezentuje ztrátu 7,2 kWh). Společně s elektrolyzérem (nejmodernější elektrolyzéry s protonovou membránou dosahují účinnost kolem 65 %) je výsledná účinnost energetické přeměny elektřina/vodík/elektřina soustrojím elektrolyzér a palivový článek jen 65 % x 60 % = 39 %.

Při uvažování příkonu dalších zařízení a procesů (komprese, doprava, chlazení při expanzi – viz Joule Thomsonův efekt: vodík se chová opačně než většina technických plynů, při expanzi se ohřívá a je nutno jej z bezpečnostních důvodů chladit, vyrovnávací akumulace) klesá výsledná účinnost řetězce energetických přeměn na pouhých cca 30 %. Tedy z přibližně 3,3 kWh elektrické energie na vstupu elektrolyzéra lze získat jen 1 kWh elektrické energie na výstupu palivového článku.

Ekonomický smysl má proto vyrábět vodík jen z aktuálních přebytků momentálně jiným (efektivnějším) způsobem nevyužitelné elektrické energie z volatilních obnovitelných zdrojů elektřiny, které musí být místní a které musí být celoročně aktivní.

Tyto dvě podmínky mají své logické oprávnění:

- Vodík má vlivem své nízké měrné hmotnosti (jen 0,09 kg/m³) velice nízkou objemovou výhřevnost, jen 3 kWh/m³ (motorová nafta má objemovou výhřevnost 10 000 kWh/m³, tedy 3 000krát vyšší), proto je nutno jej přepravovat v silně stlačeném stavu, tedy v těžkých vysokotlakých nádobách.

Hmotnost automobilu přepravujícího vodík (brutto) je proto zhruba 100krát vyšší než hmotnost přepravovaného vodíku (netto), zpět jede prázdný, ale téměř stejně těžký. To vede k velmi vysoké energetické náročnosti přepravy vodíku, neboť spotřebu energie určuje dopravní práce (brutto tkm), která je při přepravě vodíku zhruba 200krát vyšší než dopravní práce (netto tkm). V kontrastu s tím, že vodík má 7krát vyšší výhřevnost než hnědé uhlí (33,2 kWh/kg versus 4,7 kWh/kg), je z důvodu velmi vysoké hmotnosti přepravních prostředků přeprava vodíku naftovými automobily po silnici zhruba 120krát energeticky náročnější než přeprava hnědé uhlí po elektrizované železnici. Proto je spíše uvažováno o přepravě vodíku produktovody.

- Nízká objemová výhřevnost vodíku (jen 3 kWh/m³, tedy ani ne jedna třetina ve srovnání s metanem, který má objemovou výhřevnost 9,45 kWh/m³) činí jeho skladování velice drahým. Tuto skutečnost ještě komplikuje fakt, že molekula vodíku H₂ (molekulová hmotnost 2) je velmi malá, podstatně menší než molekula metanu CH₄ (molekulová hmotnost 16). V důsledku toho nelze technická zařízení určená (a těsná) pro metan (respektive zemní plyn) vyžít pro vodík, uniká by z nich.

U ocelových zařízení je těsnost zajištělná přídavnou vnitřní ochrannou vrstvou, která též brání narušování krystalické struktury oceli vodíkem (vodíková křehkost). Ale ocelové

zásobníky vodíku jsou velmi drahé. Je ekonomicky únosné je využívat k vyrovnání výroby a spotřeby vodíku jen na období několika málo dnů, nikoliv pro sezonní skladování léto/zima.

K sezonnímu skladování jsou v plynárenství používány bezpečnější, levnější a mohutnější podzemní zásobníky plynu. Avšak ty pro vodík využít nelze. A to nejen z důvodu, že by to bylo ekonomicky neefektivní (vlivem 3,15krát nižší objemové výhřevnosti vodíku, než metanu by pojmuly jen necelou jednu třetinu energie), ale především proto, že to nejde. Ani horninové přírodní zásobníky plynu (Dolní Dunajovice, Dambořice, Uhřice, Štramberk, ...), ani kavernové přírodní zásobníky plynu (Háje) nejsou pro ukládání vodíku patřičně těsné, unikl by z nich.

Z těchto důvodů jsou nutnými podmínkami ekonomické efektivity provozu vodíkových vozidel:

- lokalizace jejich provozu v těsné blízkosti výroby vodíku (minimalizace spotřeby energie, minimalizace nákladů spojených s dopravou vodíku),
- výroba vodíku z volatelných obnovitelných zdrojů elektrické energie, které se vyznačují:
 - o vyrovnanou celoroční produkcí elektrické energie, a tedy i vodíku, umožňující minimalizovat potřebné objemy vyrovnávacího skladování vodíku,
 - o vysokou produktivitou, tedy vysokým poměrem středního a maximálního výkonu, aby byly investice do vybudování jak elektrárenských, tak i do vodíkové technologie náležitě využity.

Tyto podmínky splňují vodíkové stanice vybudované jako doplněk velkých větrných elektráren na větrných mořských pobřežích Severního moře či Baltského moře, primárně určených pro účely elektroenergetiky. Dosahují středního ročního využití instalovaného výkonu až 40 % a téměř denně v nich dochází v noci k nadbytečné produkci elektrické energie s nulovou tržní cenou, a tu má smysl proměňovat na vodík.

Je geoeconomickou realitou, že ve vnitrozemí nelze ekonomicky konkurovat výrobě vodíku na větrných mořských pobřežích:

- Větrné elektrárny v ČR pracují s ročním poměrem středního a maximálního výkonu na úrovni 21 %, zatímco větrné elektrárny na mořských pobřežích pracují s dvojnásobným ročním poměrem středního a maximálního výkonu na úrovni kolem 40 %. Navíc je větrných elektráren v ČR velký nedostatek, jimi vyrobená eklektická energie je mnohonásobně energeticky i ekonomicky lépe přímo uplatnitelná v elektrizační soustavě než jejím znehodnocením přeměnou na vodík.
- Solární (fotovoltaické) elektrárny jsou pro výrobu vodíku nevhodné, a to především z důvodu nereálnosti sezonního skladování velkého množství vodíku z léta na zimu.
- Nízký roční poměr středního a maximálního výkonu větrných elektráren v ČR (21 %), i fotovoltaických elektráren v ČR (12 %), ve srovnání s větrnými elektrárnami na mořských pobřežích (40 %) vede k jednoznačné ekonomické výhodnosti instalace technologie výroby vodíku nikoliv ve vnitrozemí, ale na mořských pobřežích, kde je 2 až 3krát efektivněji využita než ve vnitrozemí (to samé zařízení vyrobí 2 až 3krát více vodíku, a to rovnoměrněji v průběhu roku, s menšími nároky na sezonní skladování).

ČR je vnitrozemským státem dosti vzdáleným od větrných mořských pobřeží a rozhodlo se řešit svoji energetickou budoucnost na principu soběstačnosti, nikoliv na racionálním principu spolupráce se sousedními státy. Tedy nemá a nebude mít vodík tak levný, jak levný jej mají a budou mít přímořské státy.

Z hlediska aplikace v dopravních prostředcích mají vodíkové technologie ještě dva další závažné limity:

- V částečně elektrizované železniční síti postačuje dvouzdrojovým elektrickým trakčním jednotkám trolej/akumulátor (BEMU) pro zastávkovou regionální osobní železniční dopravu dojezd cca 80 až 100 km. Po zhruba dvou až třech hodinách cesty přijedou do liniové elektrizované železniční stanice. Zde mohou po zdvižení sběrače proudu okamžitě nabíjet trakční akumulátorovou baterii, a to i při obsazení cestujícími. A to jak staticky (v průběhu

stání v liniově elektrizované železniční stanici) tak i dynamicky (v průběhu jízdy po liniově elektrizované železniční trati). Toto nabíjení je možno příležitostně využít několikrát denně. Jízda po liniově elektrizované části železniční sítě je pro BEMU výhodná nejen tím, že ji lze využít k nabíjení trakční akumulátorové baterie, ale i tím, že při ní není čerpána energie z trakční akumulátorové baterie (naopak je do ní dodávána).

V kontrastu s tím lze do vodíkových vozidel doplňovat energii jen ve speciální k tomuto účelu vybudované plnicí stanici, která zpravidla bývá vybudována z prostorových, logistických i bezpečnostních (safety i security) důvodů mimo veřejně přístupné prostory nádraží. Tedy není reálné doplňovat zásoby vodíku do HMU v době obratu mezi vlaky, ale zpravidla až večer po ukončení provozu vlaků v pravidelném taktu.

Navíc na určité vlakové lince nocuje zhruba jedna polovina vozidel v jedné koncové železniční stanici a druhá polovina vozidel nocuje v druhé koncové železniční stanici. Pokud nemají být pro vlakovou linku budovány dvě plnicí vodíkové stanice, je u vozidla HMU nutné dimenzovat dojezd na dva dny. To je zpravidla v regionální osobní dopravě 800 km až 1000 km, tedy 10krát větší než jak postačuje u vozidla BEMU, které je schopno kdekoliv se operativně nabíjet z trakčního vedení 25 kV i bez budování speciálních provozně i investičně nákladných infrastrukturních energetických zařízení. Při kratším dojezdu než dva dny, by bylo nutno pro HMU budovat velké množství provozně i investičně nákladných plnicích stanic.

- Palivové články vyžadují ustálený pracovní režim, práci stálým výkonem a neumí zpětně přijímat (rekuperovat) elektrickou energii. Naopak elektrický trakční pohon vozidel vyžaduje v čase proměnný výkon a generuje při brzdění elektrickou energii. K docílení okamžité výkonové rovnováhy je proto u vodíkových vozidel (HMU) mezi palivové články a elektrický trakční pohon vkládána vyrovnávací akumulátorová baterie.

Jde o technické řešení podobné hybridnímu elektrickému automobilu, avšak namísto spalovacího motoru s elektrickým generátorem je použit palivový článek. Palivové články jsou dosti drahé (platinová konstrukce), a proto je u vodíkových vozidel velmi výrazně využíván princip navyšování výkonu energií uloženou ve vyrovnávacím akumulátoru. Jejich palivový článek je úsporně dimenzován jen na cca 20 až 30 % plného trakčního výkonu. Tímto způsobem jsou z ekonomických důvodů řešena prakticky všechna dosud průmyslově vyráběná vodíková vozidla.

U městských autobusů či u regionálních osobních zastávkových vlaků pro rovinaté území s neustálým cyklickým střídáním rozjezdů a brzdění je to postačující, avšak pro dálkovou osobní či nákladní dopravu, při kterých je nutností vytrvalá jízda plnou rychlostí, tedy s vysokým výkonem, či v kopcovitém terénu, nejsou taková vozidla použitelná. Jejich vyrovnávací akumulátor je schopen pokrýt plný výkon jen po dobu několika minut. Po tomto čase klesá disponibilní výkon vozidla na hodnotu odpovídající výkonu samotného palivového článku, tedy jen na 20 až 30 % plného výkonu vozidla. To činí vodíková vozidla v dálkové dopravě neupotřebitelnými.

7. Dvouzdrojové (duální) lokomotivy trolej/diesel

Pro bezemisní osobní regionální dopravu jsou k dispozici dvě řešení:

- dvouzdrojové trakční jednotky trolej/akumulátor (BEMU),
- vodíkové palivočlánekové trakční jednotky (HMU).

Ani jedno z těchto vozidel však není vhodné pro dálkovou osobní či nákladní dopravu:

- vozidla s akumulací eklektické energie do litnoiontových akumulátorů na bázi sekundárních elektrochemických článků mají při současném stavu techniky pro účely dálkové osobní či nákladní dopravy příliš malou akumulovanou energii, a tedy krátký dojezd,
- vodíková palivočláneková vozidla se pro dálkovou osobní či nákladní dopravu nehodí, neboť jsou dimenzována pro cyklický zastávkový režim, nemají dlouhodobou stabilitu plného výkonu, nezbytnou pro použití v dálkové dopravě.

Proto se dálková osobní i nákladní železniční doprava v částečně elektrizované železniční síti orientuje na nízkoemisní dvouzdrojové lokomotivy trolej/diesel. Ty jsou řešeny na bázi tradiční

motorové lokomotivy s elektrickým přenosem výkonu, doplněné o vstupní obvody pro napájení trakčních a pomocných zařízení nejen z naftovým motorem poháněného trakčního generátoru, ale i z trakčního vedení 25 kV (sběrač proudu, vn přístroje, transformátor, IGBT čtyřkvadrantový měnič).

Takto řešené dvouzdrojové (duální) lokomotivy nacházejí efektivní uplatnění v dálkové osobní či nákladní dopravě, kde ve srovnání s dvojicí tradičních řešení přinášejí významné benefity:

- oproti dopravě vlaků v celé délce trasy motorovou lokomotivou výrazně snižují spotřebu energie a produkci emisí, neboť minimalizují použití naftového motoru, ten je aktivován jen při práci na tratích bez liniové elektrizace,
- oproti nácestné výměně lokomotiv šetří dobu cesty a významně zvyšují produktivitu využití vozidel i personálu.

Oblastí použití dvouzdrojových vozidel trolej/diesel je lokomotivami zajišťovaná dálková osobní i nákladní železniční doprava po částečně elektrizované železniční síti. Pro aplikaci v regionální osobní dopravě se však dvouzdrojová vozidla (trakční jednotky) trolej/diesel (DEMU) nehodí. Při dopravě osobních vlaků by byly (podobně jako DMU) na tratích bez liniové elektrizace vysoce energeticky náročné, neboť nemají schopnost rekuperačního brzdění. Neumí znovu využívat cyklicky vznikající kinetickou energii vlaku, měnili by ji opakovaně na ztrátové teplo.

8. Koexistence bezemisních a nízkoemisních vozidel pro neelektrizované tratě s rozvojem liniové elektrizace

Základní orientací budoucí železniční dopravy je rozvoj liniové elektrizace. Proto je nutné i řešení bezemisních a nízkoemisních železničních trakčních vozidel pro neelektrizované železniční tratě vnímat nikoliv izolovaně, ale ve stále rozsáhlejší síti elektrizovaných železnic:

- **Dvouzdrojové lokomotivy trolej/diesel** jsou využitelné k vozbě dálkových vlaků osobní i nákladní přepravy v částečně elektrizované síti i v období rostoucího poměru délky elektrizovaných a neelektrizovaných tratí. Spolu s postupným poklesem délky sítě neelektrizovaných železnic bude klesat i počet provozuschopných motorových lokomotiv. Dvouzdrojové lokomotivy trolej/diesel budou proto stále potřebnější i pro operativní nasazení při:
 - o obsluze vlečků a nakládkových a vykládkových a vykládkových míst, kde z důvodu manipulací nemůže být trakční vedení,
 - o plánovaných napěťových výlukách (opravy, stavby, konverze) a odklonech,
 - o neplánovaných napěťových výlukách (poruchy pevných trakčních zařízení),
 - o přepravách za stavu nebezpečí, stavu ohrožení státu, nouzového stavu nebo válečného stavu (zákon č. 77/2002 Sb., §17),
 - o vojenských přepravách.

Dvouzdrojové lokomotivy trolej/diesel jsou vhodným doplňkem k čistě elektrickým lokomotivám, a v zásadě i nezbytnou součástí železničního systému i v éře výrazného zvyšování podílu liniově elektrizovaných železničních tratí.

- Podobně jsou i **dvouzdrojové elektrické trakční jednotky trolej/akumulátor (BEMU)** vhodným doplňkem k čistě elektrickým trakčním jednotkám EMU i v éře výrazného zvyšování podílu liniově elektrizovaných železničních tratí. Mezi rozvojem elektrizace železnic a zaváděním dvouzdrojových elektrických trakčních jednotek trolej/akumulátor (BEMU) je řada synergických vazeb:
 - o existence BEMU umožňuje soustředit elektrizační kapacity na dopravně silně zatížené tratě, na kterých přináší liniová elektrizace nejvyšší efekt, a bezemisní dopravu na dopravně méně zatížených tratích zajistit přechodně či trvale vozidly BEMU,
 - o v oblastech alespoň částečné elektrizace železničních tratí systémem 25 kV není zpravidla pro BEMU nutné budovat žádná speciální bodová nabíjecí zařízení, vozidlo lze přímo staticky či dynamicky nabíjet přes sběrač proudu z liniového trakčního vedení, a to i velmi vysokými výkony,

- využití pevných trakčních zařízení liniové elektrizace k napájení nejen vozidel, provozovaných na předmětné trati, ale i vozidel BEMU provozovaných na okolních tratích bez liniové elektrizace, zvyšuje ekonomickou efektivitu liniové elektrizace,
 - rozvoj liniové elektrizace dalších železničních tratí zkracuje neelektrizovaná vozební ramena a tím usnadňují provoz BEMU (není potřeba tak mohutná trakční akumulátorová baterie),
 - rozvoj liniové elektrizace dalších železničních tratí vytváří nové příležitosti pro statické či dynamické nabíjení BEMU,
 - BEMU využívají každý nový úsek trakčního vedení k jízdě v režimu trolejového napájení, šetří si tím energii uloženou v trakční akumulátorové baterii pro úseky bez trakčního vedení,
 - v případě významného pokroku v rozvoji liniové elektrizace železnic lze v polovině technického života vozidla BEMU již jeho trakční akumulátorovou baterii neobnovovat a provést upgrade trakční jednotky z BEMU na EMU (princip dvojího schválení typu).
- **Vodíkové palivočlánkové trakční jednotky (HMU)** s nosným trendem liniové elektrizace železnic v ČR nesouznějí:
- vyžadují zcela odlišné infrastrukturní energetické zázemí (vodíkové plnicí stanice),
 - vozidla HMU nedokážou využívat trakční vedení, které se stále více stává standardem,
 - vodíková vozidla a spolu s nimi i vodíkové plnicí stanice jsou schopny zajistit jen regionální osobní dopravu, nikoli dálkovou osobní dopravu a nákladní dopravu; vozidla pro dálkovou osobní dopravu a nákladní dopravu vyžadují jiné než vodíkové infrastrukturní energetické zázemí (standardní interoperabilní liniovou elektrizaci 25 kV),
 - je obtížné soustřeďovat regionální železniční tratě do uzlových bodů vhodných pro vybudování společně využitelných vodíkových plnicích stanic. Železniční uzly již jsou nebo budou propojeny sítí elektrizovaných železnic,
 - jak vodíková vozidla, tak i vodíkové plnicí stanice představují značnou hodnotu s předpokladem využívání po dobu 30 let, tedy v horizontu let 2030 až 2060. Vázat v určité lokalitě na tak dlouhou dobu vodíkové řešení místo stále více standardní liniové elektrizace je velmi neatraktivní.

Zvážení všech těchto objektivních fyzikálních a geografických okolností vedlo k tomu, že budoucnost české železnice je ve schválené koncepci rozvoje elektrické trakce v ČR jednoznačně orientována na rozvoj liniové elektrizace 25 kV. Doplnkovými trendy na přechodné i cílové období jsou dvouzdrojové trakční jednotky trolej/akumulátor (BEMU) a dvouzdrojové (duální) lokomotivy trolej /diesel.

9. Závěr

Železnice má v epoše dekarbonizace dopravy v ČR velmi důležitou roli. Jejím posláním je především přispět mohutnými extramodálními úsporami energie k zásadnímu snížení energetické náročnosti dopravy. Prostá náhrada importovaných fosilních paliv pro dopravu obnovitelnými zdroji energie by byla v současné dimenzi 80 TWh/rok ze strany energetiky do roku 2050 nezajistitelná. A ani to není potřebné. Odklon od používání spalovacích motorů v dopravě všeobecně a převedení silných a pravidelných přeprav osob a věcí umožní snížit energetickou náročnost dopravy tak, aby náhrada fosilních zdrojů energie obnovitelnými zdroji energie byla reálně proveditelná. Zásadními kroky k tomu jsou výstavba vysokorychlostního železničního systému i zvýšení výkonnosti a atraktivity konvenčního železničního systému.

Lektorovali:

Ing. Vít Sedmidubský, Ministerstva dopravy ČR

Doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D., Správa železnic