



**26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLAJOVÝCH
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko**

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.2.18>

ROLE ŽELEZNICE V UDRŽITELNÉ MULTIMODÁLNI MOBILITĚ THE ROLE OF RAIL IN SUSTAINABLE MULTIMODAL MOBILITY

Jiří POHL^{*)}

1 REALITA KLIMATICKÉ ZMĚNY

Spalováním fosilních paliv již došlo ke zvýšení obsahu oxidu uhličitého v zemském obalu z výchozí hodnoty 3 500 miliard t (koncentrace 280 ppm) o zhruba 50 % na současnou hodnotu přibližně 5 250 miliard t (koncentrace 420 ppm). To se projevilo zvýšením tepelné izolační schopnosti zemského obalu s důsledkem zvýšení střední teploty ovzduší nad povrchem země o 1 °C. Oxid uhličitý je velmi stabilní, proto je z hlediska lidského chápání času vnímána tato změna jako nevratná.

Vlivem nesymetrické tepelné kapacity Země (severní pól je oceán mezi pevninami, jižní pól je pevninou mezi oceány, proto má severní pól mnohem slabší zalednění než jižní pól) probíhají na severní zemské polokouli změny klimatu podstatně rychleji než na jižní zemské polokouli. Zvýšení teploty ovzduší je v ČR cca 2,5násobně vyšší než světový průměr. Meteorologická měření to dokládají, v průběhu 110 let (1905 až 2015) již došlo v ČR k nárůstu střední roční teploty ovzduší o 2,5 °C (z 6,7 °C na 9,2 °C). Srážkový úhrn však byl v období let 1905 až 2015 zhruba stálý (680 mm). Výsledkem je chronické sucho způsobené zvýšeným odparem srážkové vody.

Realita nevratných klimatických změn je velmi silnou motivací k programovému ukončení spalování fosilních paliv (uhlí, ropných produktů a zemního plynu) tak, jak bylo dohodnuto 197 zeměmi světa na světové klimatické konferenci OSN v Paříži v prosinci roku 2015.

Rozhodnutí zastavit oteplování Země na hodnotě 1,5 až 2 °C znamená podle analýz provedených Mezinárodní agenturou IEA přestat do roku 2050 spalovat uhlí, ropné produkty i zemní plyn. To je smělý, ale reálný cíl. energii, kterou lidstvu dávají fosilní paliva lidstvu za rok, přinášejí sluneční paprsky k Zemi každých 40 minut. Končící epocha používání fosilních paliv byla dějinnou epizodou významného rozvoje. Více než dvě stě let trvající období využívání energie fosilních paliv umožnilo lidstvu žít v energetickém blahobytu a uskutečnit zásadní rozvoj vzdělanosti, znalostí a dovedností. Díky tomu již lze:

- významným způsobem zvýšit energetickou účinnost a tím snížit konečnou spotřebu energie (princip: úspory jsou zdrojem energie, a to zdrojem obnovitelným a bezemisním),
- fosilní paliva nahradit obnovitelnými zdroji energie, zejména univerzálně využitelnou elektrickou energií. Avšak s ohledem na volatilitu obnovitelných zdrojů je nutno řešit nejen vyrovnanou energetickou bilanci (kWh) zdrojů a spotřeby, ale i vyrovnanou výkonovou bilanci (kW) zdrojů a spotřeby, a to v jakémkoliv okamžiku.

Způsob života lidské civilizace, podmíněný spalováním fosilních paliv, v zásadě nepoškozuje planetu Zemi, ta je z vesmírného a geologického hlediska vysoce odolná.

^{*)} **Ing. Jiří POHL**, Siemens Mobility, s.r.o., Engineering, Siemsenova 2715/1,155 00 Praha 13, +420 724 014 931, jiri.pohl@siemens.com.

Avšak mění podmínky pro život ekosystémů na Zemi, a to včetně podmínek pro život lidské civilizace. To je důvodem, proč dosud navykly životní styl, podmíněný spalováním fosilních paliv, není udržitelný. To se týká všech oborů lidské činnosti včetně dopravy. Podobně jako energetiku, či průmysl, je nutno, a to velmi rychle, též i dopravu zbavit závislosti na spalování fosilních paliv.

Avšak udržitelný rozvoj má nejen environmentální, ale i ekonomickou a sociální dimenzi. Podmínkou udržitelnosti mobility je kromě minimalizace vlivů dopravy na životní prostředí cestou eliminace globálně působících a klima nevratně měnících emisí oxidu uhličitého, i lokálně působících emisí zdraví škodlivých látek, též její ekonomická a sociální udržitelnost. Lidé musí být svojí prací (i tu lze vnímat jako obnovitelný zdroj) schopni přebudovat stacionární i mobilní část dopravních systémů a musí být ochotni s tím spojené změny akceptovat.

Klíčová je ekonomika. Bude-li nová podoba mobility udržitelná ekonomicky, bude udržitelná i sociálně, neboť neomezí naplňování dopravních potřeb. Základem udržitelné multimodální mobility je proto náhrada dosavadních konkurenčních vztahů mezi jednotlivými druhy dopravy (snaha být nejlepší, umět druhého porazit), jejich součinností, založenou na kooperativnosti (umění spolupracovat) a komplementárností (umění nabídnout něco jiného, doplňovat se).

Na straně železnice je zásadní výhoda nízké energetické náročnosti (vysoké energetické účinnosti) a vysoké výkonnosti i výhoda technologicky vyřešené nezávislosti na fosilních palivech, což však je podmíněno investicemi do vybudování kvalitní infrastruktury. V rámci dekarbonizace mobility je proto vhodné orientovat železnici do oblastí silné a pravidelné přepravní poptávky, kdy její přednosti přinesou největší efekt, který vyváží investiční náklady.

2 PROJEKTOVÉ ŘÍZENÍ DEKARBONIZACE

Odklon od používání energie fosilních paliv, tedy dekarbonizace, je nejrozsáhlejším projektem v dějinách lidstva. Podobně jako každý jiný projekt vyžaduje i projekt dekarbonizace definování motivace, cílů, nástrojů a zdrojů. A pochopitelně i vysoce kvalifikované projektové řízení.

Energetika má a bude mít nadnárodní dimenzi. To je dáno jak nerovnoměrným rozložením geologických zásob fosilních paliv na Zemi (viz například skutečnost, že 98 % své spotřeby zemního plynu a 99 % své spotřeby ropy kryjí země EU importem), tak i nerovnoměrným rozložením podmínek pro využívání obnovitelných zdrojů energie. Ne všechny státy mají k dispozici pobřežní mělčiny, vhodné pro instalaci vysoce výkonných (v řádu GW) větrných parků, či vodní toky s velkým hydroenergetickým potenciálem. Proto je logické, že evropské země sdružené v EU řeší projekt dekarbonizace společně, byť k Pařížské dohodě přistoupily jednotlivě. Logickým důvodem k součinnosti zemí EU je též jejich spojení společnými energetickými sítěmi.

Základním nástrojem zemí EU k odklonu od používání fosilních paliv je systém emisního obchodování EU ETS. Jeho princip je prostý: spalování fosilních paliv je zpoplatněno úměrně vytvořenému množství oxidu uhličitého, a to povinností nákupu emisních povolenek. Výnos z prodeje emisních povolenek je určen k podpoře úspor energie a bezemisních technologií. Cena emisní povolenky je cenou tržní, určuje jí elasticita trhu v odezvě na nabídku, která je programově rok od roku lineárním redukčním faktorem snižována. Aktuálně je cena emisní povolenky poměrně stabilní a pohybuje se kolem 90 EUR/t CO₂.

Slabinou systému emisního obchodování EU ETS je jeho dosavadní nedůslednost. Do oblasti spotřeby fosilních paliv regulované systémem emisního obchodování EU ETS je zařazena jen část spotřebitelů (elektrárny, teplárny a průmysl), nikoliv doprava a individuální vytápění. To má na dopravu velmi kontraproduktivní dopad:

- cena elektrickej energie i pro dopravu jiř je zvyřena zahrnut m elektr ren do syst mu EU ETS. Napr iklad uheln  elektr rna s  uinnost  36 % spaluj c  uhl  s m rnou emisivitou 0,36 kg CO₂/kWh produkuje elektrickou energii s m rnou emisivitou 1 kg CO₂/kWh, coř pri cen  emisn  povolenky 90 EUR/t CO₂ zvyřuje jej  v robn  n klady a t m i cenu elektrickej energie o 0,09 EUR/kWh,
- pohonn  hmoty pro spalovac  motory vozidel dosud nejsou zahrnuty do syst mu EU ETS. Napr iklad motorov  nafta s m rnou emisivitou 2,65 kg CO₂/litr dosud odpov daj c  platbou za emisn  povolenky v  rovni 0,24 EUR/litr zat
iřena nen .

Tato diskriminace bezemisn  elektrickej vozby bude odstran na ař mezi roky 2027 ař 2030, kdy budou do syst mu emisn ch povolenek EU ETS 2 zahrnuty i paliva pro individu ln  vyt p n  a pro dopravn  prost
edky. Zpo atku se sniřenou sazbou 45 EUR/t CO₂, n sledn  se po roce 2030 stanou sou ast  jednotn ho syst mu emisn ho obchodov n .

3 DEKARBONIZACE DOPRAVY

Doprava je v  R velice v znamn m kone n m spot
ebitelem energie. Dokl d  to Souhrnn  energetick  bilance MPO/EUROSTAT za rok 2019 (posledn  j  statisticky zpracovan  rok p
ed pandemi  Covid 19):

- dom cnosti 83 TWh/rok (s tendenc  poklesu),
- doprava 79 TWh/rok (s tendenc  r stu),
- pr mysl 76 TWh/rok (s tendenc  poklesu),

Doprava je t ř z t chto t
i obor  nejv ce z visl  na spot
eb  fosiln ch paliv, a tedy i na produkci oxidu uhli it ho:

- dom cnosti 31 TWh/rok, coř je 37 % z celkov  spot
eby energie a coř generuje 8 mil. t CO₂/rok,
- doprava 73 TWh/rok, coř je 93 % z celkov  spot
eby energie a coř generuje 19 mil. t CO₂/rok,
- pr mysl 34 TWh/rok, coř je 44 % z celkov  spot
eby energie a coř generuje 8 mil. t CO₂/rok.

Z kladn  c l dekarbonizace dopravy je velmi prost : v roce 2050 nebude doprava spalovat řadn  fosiln  paliva (bude vyd na řadn  emisn  povolenka), a tedy ani nebude produkovat řadn  emise oxidu uhli it ho. S t m souvis  i eliminace emis  zdrav  škodliv ch l tek (oxidy dus ku NO_x, jemn  prachov  částice PM, polyaromatick  uhlovod ky PAH, organick  t kav  l tky VOC...) a odstran n  z vislosti dopravy a t m i svobody pohybu na importu fosiln ch paliv, spojen m s financov n m agresivn ch arm d. Pochopiteln  je tento z kladn  c l logicky dopln n dv ma souvisej c mi c li:

- rozv jet dopravu k vyřř bezpe nosti, spolehlivosti, produktivit , rychlosti a pohodl  a pro zapojen  cel ho  zem  do spole n ho syst mu tvorby a spot
eby hodnot,
- minimalizovat energetickou n ro nost dopravy a jej  dalř  neřadouc  extern  vlivy.

Stoj  za povřimnut , ře pri dekarbonizaci dopravy jsou d ky odklonu od pouřiv n  spalovac ch motor  v dopravn ch prost
edc ch redukov ny jej  dosavadn  čtyři externality (emise oxidu uhli it ho, emise zdrav  škodliv ch l tek, hluk a nehody) na dv  (hluk a nehody). Avřak p
ib v  k nim nov  vn man  t
et  externalita, kterou je spot
eba energie. Neboť energie pro dopravu nevznik  na dopravn  cest , ale n kde mimo ni, kde jej  vytv řen  (zpravidla v podob  elektr rny) zat
eřuje krajinu.

4  SPORY ENERGIE V DOPRAV 

Dekarbonizace dopravy je v z sad  energeticky p
izniv . D ky vyřř  uinnosti elektric ch trak n ch pohon  ve srovn n  se spalovac mi motory, kter  m n  v řřinu energie paliva na ztr tov  teplo a kter  neum  rekuperovat brzdivou energii, kles  p
i

intramodální náhradě spalovacích motorů elektrickými trakčními pohony spotřeba energie zhruba 2,5krát, tedy na cca 40 %. To se příznivě projevuje i na nákladech na energii. Rovněž náklady na údržbu elektrických vozidel jsou výrazně nižší, než náklady na údržbu spalovacích vozidel.

Ještě významnější snížení spotřeby energie, zhruba 3krát, tedy na cca 33 %, nastává vlivem nižšího odporu valení (ocelové kolo versus pneumatika) a vlivem nižšího aerodynamického odporu (dlouhá štíhlá vozidla jedoucí ve vlaku v těsném zákrytu versus samostatně jedoucí krátká vozidla) při extramodálním převodu z přeprav ze silniční dopravy na železniční dopravu.

V realitě nynějšího dopravního provozu jsou silniční vozidla téměř výhradně poháněna spalovacími motory, a naopak v kolejové dopravě dominuje elektrická vozba. Ačkoliv je v ČR jen 34 % délky železničních tratí elektrizovaných, tak na líniově elektrizované tratě je soustředěno 86 % dopravních výkonů osobní železniční dopravy a 95 % dopravních výkonů nákladní železniční dopravy. V městské hromadné dopravě (metro, tramvaje) je kolejová doprava výhradně v elektrické vozbě.

V důsledku toho je převod dopravy ze silnic na koleje zároveň zpravidla doprovázen i převodem ze spalovací vozby na elektrickou vozbu. Energetická náročnost přepravy převedené ze spalovacích automobilů na elektrizovanou železnici klesá v součinu obou výše uvedených redukčních faktorů ($0,4 \cdot 0,33 = 0,13$), respektive v poměru 1 : 7,5, tedy na pouhých 13 % výchozího stavu, a bez emisí. Tato velice zásadní úspora energie (87 %) je spolu s odstraněním závislosti dopravy na importu a spalování fosilních paliv základním motivem k investičnímu rozvoji kolejové dopravy ve směrech silných přepravních proudů.

Potenciál extramodálních úspor energie při převodu silniční dopravy na železnici je značný, avšak je podmíněn dvěma skutečnostmi:

- cestující, respektive přepravce, musí mít motiv ke změně svého dopravního chování, kolejová doprava mu musí nabídnout určité benefity (rychlost, pohodlí, rozumnou cenu),
- kolejová doprava musí mít kapacitu (tratí, vozidel, personálu, terminálů...) přijmout zvýšenou přepravní poptávku. I kvantita je součástí kvality přepravní nabídky.

5 ENERGIE PRO DOPRAVU

Budoucí vývoj spotřeby fosilních paliv v dopravě v EU i v ČR je v zásadě určen pravidly systému emisního obchodování EU ETS 2, respektive EU ETS:

- ve výchozím roce 2027 (začátek emisního obchodování EU ETS 2) spotřebuje doprava v ČR regulatorními opatřeními ještě nesnížené množství uhlovodíkových paliv. To bude odhadem, podle dosavadního vývoje, reprezentovat energii uhlovodíkových paliv (zejména fosilních) cca 82 TWh/rok. Tím doprava vyprodukuje zhruba 20 mil. t oxidu uhličitého/rok,
- v cílovém roce 2050 (zakočení emisního obchodování EU ETS po dosažení cíle dekarbonizace, v roce 2050 již nebude vydána žádná emisní povolenka) spotřebuje doprava v ČR 0 TWh/rok energie fosilních paliv a vyprodukuje 0 mil. t oxidu uhličitého.

Snížení spotřeby fosilních paliv do roku 2050 na nulu (a jemu úměrné snížení emisí oxidu uhličitého do roku 2050 na nulu) není téma k diskusi na úrovni ČR, to je dáno celosvětově přijatou dohodou, kterou akceptovala i ČR. To je zadání pro všechny obory včetně dopravy.

Téma k řešení však je, jakým způsobem bude provedena náhrada fosilních paliv obnovitelnými zdroji energie, tedy elektřinou. Cílová hodnota je ohraničena dvojicí krajních mezí:

- spotřeba elektrick e energie pro dopravu v  R vzroste z po ate n i hodnoty v roce 2025 v  rovni 2 TWh/rok na 35 TWh/rok v c lov em roce (2050) při pouh e elektrizaci silni n i dopravy s reduk n m faktorem energetick e n ročnosti 2,5 (při 0 % převodu silni n i dopravy na koľajovou dopravu),
- spotřeba elektrick e energie pro dopravu v  R vzroste v limitn i hodnot e na 13 TWh/rok při převeden i veřker e silni n i dopravy na elektrizovanou koľajovou dopravu s reduk n m faktorem energetick e n ročnosti 7,5 (při hypotetick em 100 % převodu dopravy ze silnice na koľajovou dopravu).

Pro investi n i n ročnost rozvoje sektoru energetiky, sm eřovan e k zajiřt en i potřebn e elektrick e energie pro dopravu, je velmi podstatn e, zda m a n hradou za uřetřen ch 82 TWh/rok energie uhlovod kov ch paliv:

- zajistit navíc 33 TWh/rok elektrick e energie (to je o 57 % navíc v ci spotřeb e elektrick e energie spotřebitelsk m sektorem v  R v roce 2019 v  rovni 58 TWh/rok), jak odpov d a pouh e elektrizaci silni n i dopravy bez přesunu na koľajovou dopravu),
- nebo zda bude navíc potřebn e množství elektrick e energie pro dopravu v znamn e sniřeno v d sledku poklesu energetick e n ročnosti dopravy přesunem přeprev ze silni n i na koľajovou dopravu (limitn e by při 100 % převodu dopravy ze silnice na koľajovou dopravu posta ovalo zajistit navíc jen 11 TWh/rok elektrick e energie, coř je o 19 % navíc v ci spotřeb e elektrick e energie spotřebitelsk m sektorem v  R v roce 2019 v  rovni 58 TWh/rok). Pochopiteln e nejde jen o rok 2050, ale i zajiřt en i elektrick e energie pro dopravu v dalřich desetilet ch.

V še uveden a  isla jsou vzt ařena k pln e elektrick e doprav e, v silni n i doprav e s dominanc i vozidel s elektrochemick ymi z sobn iky energie (akumul torov e baterie) a koľajov e doprav e s dominanc i vozidel s liniov m elektrick m nap jen m (z trak n ho veden i).

V připad e ukl d n i elektrick e energie do vod ku by s ohledem na n zkou   innost řet zce energetick ch přem n (elektrolyz r – kompresor – doprava – chlazen i při expanzi – palivov y  l nek – vyrovn vac i akumulace), kter a  in i cca 30 %, byla spotřeba elektrick e energie zhruba třikr t v řř (avřak s přednost i využit i mořnosti akumulace přebytk u elektrick e energie z volatiln ch obnoviteln ch zdroj  v dob e př zniv ch podm nek).

Pro sniřen i extern ch n klad  dopravy do budov n i nov ch zdroj  elektrick e energie pro dopravu je velmi d leřit e usilovat se o to, aby doprav e celkov e posta ovalo nikoliv v še uveden ch 35 TWh/rok, jak by odpov d alo 0 % převodu silni n i dopravy na koľajovou dopravu, ale zhruba 24 TWh/rok elektrick e energie, coř odpov d a 50 % převodu silni n i dopravy na koľajovou dopravu. To je zvyřen i spotřeb y elektrick e energie pro dopravu o 22 TWh/rok oproti sou asnosti.

6 BEZEMISN I MULTIMOD LN I UDRŽITELN A MOBILITA

V ci silni n i doprav e m a koľajov a doprava při dekarbonizaci dv e z sadn i v hody, pro kter e je ve sm erech siln e přeprevn i popt vky intenzivn e rozv jena:

- n zk  energetick a n ročnost (na jednotku přeprevn i p rce j i posta uje zhruba třetinov a spotřeba energie),
- technicky vyřeřen e, normativn e standardizovan e a s ťov e zaveden e vysoce v konn e a vysoce   inn e vysokonap řov e liniov e elektrick e nap jen i. To je ve srovn n i s limity dan mi rozm rn mi, drah mi a t řk ymi z sobn iky energie (akumul tory) v podob e prim rn ch (vod kov ch)  i sekund rn ch (lithiov ch) elektrochemick ch  l nk , na kter e jsou vlivem absence liniov ho nap jen i odk z na silni n i vozidla, velmi v znamn a přednost. V principu je v koľajov e doprav e tato přednost d na použit m elektricky vodiv ch ocelov ch koľajnic, kter e vytv r ej i dv e z sadn i přednosti elektrick e vozby:

- kolejnice zajišťují zpětné trakční vedení, díky tomu může být vrchní trakční vedení jen jednostopé a bez výhybek, tedy sjízdné podle TSI provozními rychlostmi do 350 km/h,
- kolejnice zajišťují kontinuální vodivé spojení kolejových vozidel se zemí a tím i jejich ochranu vůči nebezpečnému doteku neživých částí. To podmiňuje v kolejové dopravě možnost napájet vozidla vysokým napětím 25 kV, což je významný rozdíl oproti silniční dopravě, u které je z důvodu chybějícího uzemnění vozidel na pneumatikách napájecí napětí limitováno na úroveň 0,75 kV.

Nevelké napájecí napětí 0,75 kV omezuje v líniově elektrizované silniční dopravě výkonnost vozidel i dopravního systému a vyžaduje velké množství trakčních napájecích stanic rozmístěných na malou vzdálenost. V kontrastu s tím mohou železniční vozidla, díky vodivému spojení s uzemněnými kolejnicemi, využívat napájecí napětí 25 kV, což dává trakčnímu vedení v poměru druhých mocnin napětí vůči systému 0,75 kV 1 111krát větší přenosovou schopnost a spolu s tím i velmi vysokou účinnost. Provoz vysokorychlostních vlaků o příkonu kolem 20 MW, či budování IGBT multilevel měničových 3 AC/1 AC trakčních napájecích stanic se spojitým dvoustranným napájením v systému jednotné fáze na vzdálenost kolem 100 km, jsou toho dokladem.

Objektivní fyzikální i technické a ekonomické přednosti elektrické vozby staví v kolejové dopravě do čelní pozice líniovou elektrizaci. V městské hromadné dopravě výhradně (viz metro a tramvaje), na železnici v oblasti hlavních tratí. Rozvoj líniové elektrizace na hlavních dopravně silněji zatížených tratích též jde vstříc i potřebám bezemisního provozu na vedlejších dopravně méně zatížených tratích bez líniové elektrizace:

- vytváří další příležitosti pro nabíjení akumulátorových baterií dvouzdrojových vozidel trolej/akumulátor (BEMU). A to jak statické (za stání v líniově elektrizovaných železničních stanicích), tak i dynamické (v průběhu jízdy po líniově elektrizovaných železničních tratích).

Železnice však nedokáže plošně obsloužit celé území, v ČR má k dispozici jen 9 532 km tratí, které jsou navíc zatíženy velmi nerovnoměrně:

- 90 % dopravních výkonů nákladní železniční dopravy je soustředěno na 19 % délky železniční sítě (1 800 km),
- 90 % dopravních výkonů osobní železniční dopravy je soustředěno na 34 % délky železniční sítě (3 200 km).

Z hlediska plošné obsluhy i méně intenzivně osídleného území je vůči železnici ve výhodnější pozici silniční doprava, má v ČR k dispozici síť 130 757 km dálnic, silnic a místních komunikací. Avšak při dekarbonizaci má silniční doprava dvě podstatné nevýhody:

- velkou energetickou náročnost (ve srovnání se železnicí zhruba trojnásobnou),
- až na výjimky (trolejbusy) chybějící líniová elektrizace. Proto jsou silniční vozidla při odklonu od používání spalovacích motorů odkázána na použití zásobníků elektrické energie, aktuálně reprezentovaných zejména lithiovými akumulátorovými bateriemi.

V průběhu posledních desetiletí došlo k významnému technologickému pokroku v oblasti lithiových sekundárních článků. Ve srovnání s olověnými akumulátorovými trakčními bateriemi, které byly dosud používány a které dosahovaly měrnou energii kolem 25 kWh/t, disponují moderní lithiové akumulátorové baterie měrnou energií kolem 100 kWh/t (typu HP, tedy dražší robustní schopné rychlého nabíjení a vybíjení vysokým výkonem, s vyšší životností v desítkách tisíc cyklů a s vysokou účinností) až 200 kWh/t (typu HE, tedy levnější, méně robustní a určené pro pomalejší nabíjení a vybíjení nižším výkonem, s nižší životností v jednotkách tisíc cyklů a s nižší účinností). Avšak stále ještě představují akumulátorové baterie dosti drahý, rozměrný a hmotný díl vozidla.

Z principlu z akona zachov an ı energie je podle K ummlerova vztahu dojezd vozidla se z asobn ıkem energie  um ern y pom ern e hmotnosti z asobn ıku energie ke hmotnosti vozidla. Tedy pokud nem a b yt akumul atorov e vozidlo p ıil ı t ezk e, co  by zhor ovalo jeho u ıtkovost, zvy ovalo by jeho po ıızovac ı cenu i provozn ı n aklady, nelze od n eho po žadovat dlouh y dojezd. Aktu ln e jsou na trhu p ıi současn em stavu techniky b e n e dostupn e osobn ı automobily i n akladn ı automobily (v  ıirok em rozsahu nosnost ı) s dojezdem v ni z ıch stovk ach kilometr u, nikoliv pro d alkov e j ızdy.

Je realitou,  e vlivem respektov an ı fyzik aln ıch z akonitost ı (r ust aerodynamick eho odporu s druhou mocninou rychlosti) vede snaha o docilen ı akceptovateln eho dojezdu vozidel se z asobn ıky energie k um ırn en ym po žadavk um na rychlost jejich j ızdy.

Multimodalita, tedy kombinace v ice druh u dopravy, je řešen ım, jak efektivn e vyu ıt ı n ızkou energetickou n aročnost kolejov e dopravy, a p ıitom zajistit dopravu osob a v ec ı po cel e plo e  zem ı st atu. Je praktikov ana jak v oblasti p repravy osob, tak i v oblasti p repravy v ec ı. Jde o spont ann e akceptovan y trend, z ajem veřejnosti o parkovi t e P+R u  elezničn ıch stanic a zast avek jsou dokladem její obliby: na kr atk e vzd alenost ı a po venkov e automobilem, na dlouh e vzd alenost ı a do m est vlakem.

7 SOUČINNOST  ELEZNIČN ı A SILNIČN ı DOPRAVY

Mezi jednotliv ymi druhy dopravy historicky vznikly konkurenčn ı vztahy. Ka d y druh dopravy usiloval samostatn e zajistit p repravu osob  ıi v ec ı od zač atku do c ıle cesty, ziskat pro sebe zak azku. Aktu ln ım trendem je kombinovan a doprava, pln ym n azvem udr ıiteln a bezemisn ı multimod aln ı mobilita. Ta je zalo ena nikoliv na konkurenčn ım vztahu mezi jednotliv ymi druhy dopravy, ale na jejich kooperativnosti (schopnosti spolupracovat) a komplement arnosti (schopnosti doplňovat se).

C ılem je, aby ka d y druh dopravy byl vyu ıv an v aplikac ıch, kde vynikaj ı jeho v ıhody a nikoliv tam, kde se projevuj ı jeho nev ıhody. Typick a je součinnost  elezničn ı a silničn ı dopravy:

- ve sm eru siln ıch a pravideln ıch p repravn ıch proud u je ekonomicky efektivn ı vybudovat a provozovat kvalitn ı energeticky  spornou kolejovou dopravn ı cestu s vysoce v ykonn ym elektrick ym nap ajen ım 25 kV a s vysokou  rovn ı zabezpečen ı (ETCS), umo ňuj ıc ım rychlou dopravu (a  200 km/h na konvenčn ıch trat ıch a a  350 km/h na vysokorychlostn ıch trat ıch),
- ve sm eru slab ıch a nepravideln ıch p repravn ıch proud u nen ı ekonomicky efektivn ı budovat kvalitn ı energeticky  spornou kolejovou dopravn ı cestu, v ıhodn eji je vyu ıvat operativn eji automobilovou dopravu, a to i za cenu její v ı ıı energetick e n aročnosti.

Z asadn ı p rednost ı kolejov e dopravy je standardn e zaveden e liniov e elektrick e nap ajen ı, kter e s velmi vysokou  ıinnost ı zvl ad a vysok e v ıkony i vysok e rychlosti, neomezuje dojezd vozidel a nesn ı uje jejich u ıtkovost p rev azen ım t ezk ıch z asobn ıku energie.

K p reveden ı p reprav ze silničn ı dopravy na energeticky m en e n aročnou kolejovou dopravu je pot řebn e, aby kolejov a doprava disponovala:

- kvalitn ı nab ıdkou a v ıhodnou cenou, motivuj ıc ı p repravn ı popt avku (cestuj ıc ı a p repravce) ke zm en e dopravn ıho chov an ı,
- n al ezitou kapacitu dopravn ı cesty i dopravn ıch prost edk u, aby byla schopna p ıijmout zvy šenou p repravn ı popt avku.

Ke sn ı en ı energetick e n aročnosti dopravy cestou multimodalit ı (prvn ı a posledn ı m ıle po silnici, d alkov a j ızda po  eleznici) je praktikov ano p et z akladn ıch trend u investicn ıho rozvoje  elezničn ı dopravy:

- budování vysokorychlostního železničního systému, který přináší jak novou kvalitu (zvýšení rychlostí jízdy), tak i novou kapacitu (další kolejové spojení, zvýšení propustnosti rychlostní segregací),
- zvýšení kvality a výkonnosti dopravně nejvíce zatížených tratí konvenčního železničního systému,
- větší zapojení dalších, dosud méně využívaných, železničních tratí do plnění dopravních úloh, zejména jejich liniovou elektrizací,
- systematické budování sítě multimodálních terminálů železnice/silnice osobní i nákladní dopravy s cílem pokrýt jimi celé území státu včetně městské logistiky,
- vybudování energetického zázemí pro nabíjení akumulátorových baterií silničních vozidel, hvězdicově zajišťujících dopravní obsluhu okolního území multimodálních terminálů.

8 SOUČINNOST ŽELEZNIČNÍ A LETECKÉ DOPRAVY

Dynamický tlak proudícího vzduchu a spolu s ním i aerodynamický odpor jsou úměrné měrné hmotnosti vzduchu. Pro vytvoření podmínek hospodárného letu s nízkým letovým odporem využívají dopravní letadla letovou hladinu ve výšce 10 až 12 km, kde je vzduch zhruba čtyřikrát lehčí než těsně nad zemí v nízké nadmořské výšce. Avšak k vytvoření potenciální energie reprezentující zvednutí do výšky kolem 12 km spotřebují letecké motory energii paliva zhruba 130 kWh/t. V řídkém vzduchu je však nejen nízký letový odpor, ale i nízká vztlačková síla. Dopravní letadlo se proto musí ve velké výšce pohybovat patřičně rychle, zhruba rychlostí 900 km/h. Avšak k vytvoření kinetické energie odpovídající pohybu rychlostí 900 km/h spotřebují letecké motory energii paliva zhruba 35 kWh/t. K vytvoření podmínek hospodárného letu s nízkým letovým odporem tedy v součtu spotřebují motory letadla celkem energii paliva zhruba 165 kWh/t.

V případě dlouhých zaoceánských letů, které se vyznačují několika hodinami letu ustálenou rychlostí, činí energie paliva spotřebovaná k vytvoření podmínek hospodárného letu jen malou část z celkové spotřeby energie paliva v průběhu letu, což je akceptovatelné. Avšak u letů na malé vzdálenosti je energie paliva spotřebovaná k vytvoření podmínek letu (zvednutí do výšky letové hladiny a akcelerace na letovou rychlost) velmi zásadní složkou celkové spotřeby energie paliva, neboť doba letu ustálenou rychlostí je při letech na krátké vzdálenosti velmi krátká. Spotřeba energie pro let je v důsledku toho v poměru k překonané vzdálenosti velmi velká, let není energeticky efektivní.

Podobně též působí časová náročnost cest a procesů před startem a po přistání. Ta zahrnuje cestu z centra města na letiště, procesy před startem, procesy po přistání a cestu z letiště do centra města a zpravidla činí zhruba dvě hodiny. V případě dlouhých zaoceánských letů s několika hodinami letu ustálenou rychlostí činí časová náročnost cest a procesů před startem a po přistání jen menší část z celkové doby cestování. Tedy výslednou cestovní rychlost snižuje jen nevýznamně. Avšak u krátce trvajících letů na malé vzdálenosti tvoří časová náročnost cest a procesů před startem a po přistání podstatnou část z celkové doby cestování. Zásadním způsobem snižuje výslednou cestovní rychlost na zlomek rychlosti letu ustálenou rychlostí a tím znehodnocuje časovou výhodnost letecké dopravy.

Výsledkem je soulad energetické a časové náročnosti cestování letadlem:

- při cestách na dlouhé vzdálenosti (tisíce kilometrů, zpravidla do zámoří, tedy nenahraditelné pozemní dopravou) je letadlo energeticky i časově efektivní,
- při cestách na krátké vzdálenosti (stovky kilometrů, zpravidla nad pevninou, tedy nahraditelné pozemní dopravou) je letadlo energeticky i časově neefektivní.

Náhrada cest letadlem automobilem s cestovní rychlostí kolem 100 km/h není pro cestovatele příliš atraktivní (velká časová náročnost, stísněný prostor, omezené možnosti k aktivnímu využití času stráveného cestováním). Podstatně výhodnější je náhrada cest

letadlem rychl m vlakem s cestovn  rychlost  kolem 250 km/h (akceptovateln   asov  n ročnost, voln j  i prostor,  irok e mo nosti k aktivn mu vyu it i  asu str ven ho cestov n m). Z sadn m p inosem je n zk  energetick  n ročnost rychl   elezni n i dopravy. Energie spot ebovaná letadlem k vytvo en i letov ch podm nek (v  ka 12 km, rychlost 900 km/h) v  rovni zhruba 165 kWh/t sta i vlaku jedouc mu rychlost  300 km/h na p ekon n i vzd lenosti p ibli n e 3 600 km.

9 Z V R

V dob e hojn ho ni m nelimitovan ho pou iv n i fosiln ch paliv byly jednotliv e druhy dopravy navz ajem konfrontov ny a stav eny v či sob e do konkuren n i pozice. V  e dekarbonizace se ukazuje tento zp sob neefektivn m. V hodn j  i je jednotliv e druhy dopravy optim ln e kombinovat, vyu ivat jejich siln e str nky a vyvarovat se jejich pou iv n i v aplikac ch, pro kter e se nehod i. A to nejen ku prosp chu dopravy a jejich u ivateli, ale i pro sn i en i n ročnosti dopravy na extern i zdroje energie. Takov e jsou z kladn i c le bezemisn i udr iteln e multimod ln i mobility. Modern i  eleznice je schopna vydatn e p isp vat k jejich napln n i.



Resum e

Doprava je velice v znamn m spot ebitelem energie, a to zejména energie fosiln ch paliv. Dekarbonizace dopravy je proto ned lnou sou ast i projektu dekarbonizace v ech aktivit lidsk e spole nosti. P ednostmi  eleznice jsou n zk  energetick  n ročnost a vy e en e l niov e elektrick e nap jen i, av sak nev hodou  eleznice je nep il i rozs hl a  elezni n i s t. Silni n i doprav e chyb i l niov e elektrick e nap jen i, p i dekarbonizaci je odk z na na vozidla s akumul torov mi bateriemi. To limituje jejich dojezd. Av sak silni n i vozidla jsou velmi operativn i a disponuj i velmi rozs hlou s t i silnic. Ře en im je sou innost  elezni n i a silni n i dopravy, respektive  elezni n i a leteck e dopravy, funguj c i na principech bezemisn i udr iteln e multimod ln i mobility.

Summary

Transport is a very significant consumer of energy, especially fossil fuel energy. Decarbonising transport is therefore an integral part of the project to decarbonise all activities of human society. The advantages of rail are low energy requirements and a solved linear traction power supply, but the disadvantage is a less extensive railway network. In the area of decarbonisation, road transport relies on vehicles with rechargeable batteries, which limit the range. However, road vehicles are very operative and can use a very extensive road network. The solution is the cooperation of rail and road transport, respectively rail and air transport, based on the principles of emission-free sustainable multimodal mobility.

