Doprava a energetika
minulost, současnost, budoucnost

3. část

Jiří Pohl

Praha
21.6.2017

Na úvod stručné shrnutí minulé přednášky

Uhlíková stopa

Vytvoření 1 kWh mechanické práce je provázeno:

- **0,64 kg CO_2 při spalování nafty ve vznětovém motoru (η = 42 %),**
- **0,66 kg CO_2 při spalování benzínu v zážehovém motoru (η = 39 %),**
- **0,53 kg CO_2 při spalování zemního plynu (metanu) v zážehovém motoru (η = 39 %).**

Alternativní paliva
Stlačený zemní plyn

Zemní plyn je směsí plynných uhlovodíků, obsahuje zejména metan. Metan (CH_4) obsahuje relativně velký podíl vodíku, proto při spalování produkuje o 24 % méně CO_2 než nafta.

Ale:

- **zemní plyn má vysokou zápalnou teplotu, proto jej není možno použít jako palivo pro vznětový (Dieselův) spalovací motor – kompresním teplem se nevznítí.**
- **pro spalování zemního plynu je nutné použít zážehový (Ottův) spalovací motor, avšak ten má nižší účinnost a tedy cca o 8 % vyšší spotřebu paliva.**
- **nádrže na stlačený zemní plyn (přetlak 20 MPa) zvyšují hmotnost silničního vozidla o cca 5 až 10 %,**
- **stlačování zemního plynu na přetlak 20 MPa zvyšuje spotřebu energie o další 2 %.**

Alternativní paliva
Stlačený zemní plyn

Výsledek náhrady spalování nafty ve vznětovém motoru spalováním zemního plynu v zážehovém motoru:

- **produkce CO_2 je snížena jen o 8 %, tedy zhruba stejně, jako u směsné nafty (cíl EU: - 40 % do roku 2030),**
- **zvýšení spotřeby energie pro pohon vozidla o 18 %.**

Avšak levnější palivo, což je dáno:

- **z menší části nižší tržní cenou plynu vůči ropě,**
- **z větší části nezatížením zemního plynu spotřební daní z minerálních olejů (u nafty 11 Kč/litr)**

Vozidla poháněná zemním plynem nepřispívají na údržbu a rozvoj dopravní infrastruktury (jezdí po komunikacích financovaných vozidly využívajícími zdaněná kapalná paliva).

Tudy cesta nevede!

Alternativní paliva
Bionafta – metylester řepkového oleje

Na 1 ha pole dopadne za rok zhruba 10 mil.kWh slunečního záření, z 1 ha pole lze ročně sklidit 3,5 t řepky a z ní vyrobit (po odečtení vlastní spotřeby) 800 dm^3 bionafty s tepelným obsahem 8 000 kWh – tedy 0,8 kWh/m^2, výsledná účinnost je 0,08%, (fotovoltaika má 18%).

V ČR připadá na 1 obyvatele spotřeba cca 6,5 barelů ropy ročně, tedy ČR celkem spotřebuje cca 10 mld.dm^3 ropy ročně. K úplné náhradě ropy řepkou by bylo potřeba v ČR pěstovat řepku na ploše 12,5 mil.ha, v ČR jsou k dispozici jen 3 mil. ha orné půdy, k pěstování řepky je potřeba čtyřikrát více.
Řepka pole velmi vysiluje, znovu lze téže pole oset až po několika letech. Podmínkou současných vysokých výnosů řepky je aplikace fosforečných hnojiv, vyráběných z limitovaných (neobnovitelných) zdrojů surovin.

Využívání zemědělských plodin k výrobě paliv vede k propojení cen potravin s cenami pohonných hmot, což má neblahé sociální dopady.

Pole jsou v ČR schopna uživit její obyvatele, nikoliv jejich automobily.

Tudy cesta nevede!

Alternativní paliva
Vodík

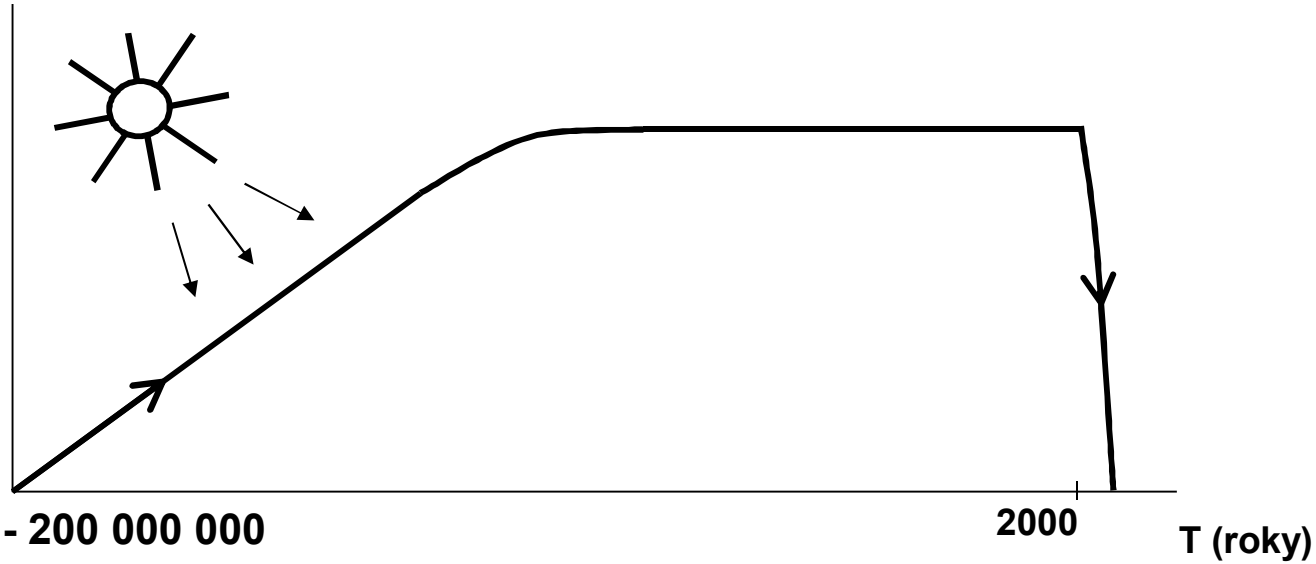
Vodík je výborným nositelem energie a lze jej využít:
- k přímé výrobě elektrické energie v palivových článcích,
- jako palivo pro spalovací motory.
Vodík se však v přírodě volně nenalézá, ale je vyráběn:
a) chemickou cestou z uhlovodíkových paliv,
b) elektrolýzou z elektřiny.
Proto nejde o primární, ale o sekundární (přeměněný) zdroj energie.

Proces složený z výroby vodíku elektrolýzou a z jeho využitím v palivových článcích představuje akumulátor elektrické energie s otevřeným cyklem.
Poměrně drahý a s účinností kolem 40 % (65 % elektrolýza, 60 % palivový článek).
Proti již 135 let starému stavu techniky (liniové trakční vedení) zvyšuje vodíková technologie spotřebu elektrické energie pro pohon vozidel na 250 %.

Aplikace vodíkové technologie je podmíněna levnou (nadbytečnou) elektrickou energií z obnovitelných zdrojů (například větrné elektrárny), využívanou v elektrolyzérech době odběrových sedel.
S pomocí CO_2 lze vodík přeměnit na snáze použitelný metan (CH_4) – lze využít vybudované rozvody plynu.
Velký potenciál použití je u větrných elektráren na mořském pobřeží.
To však není případ ČR.

Tudy v České republice cesta nevede!

Fosilní paliva

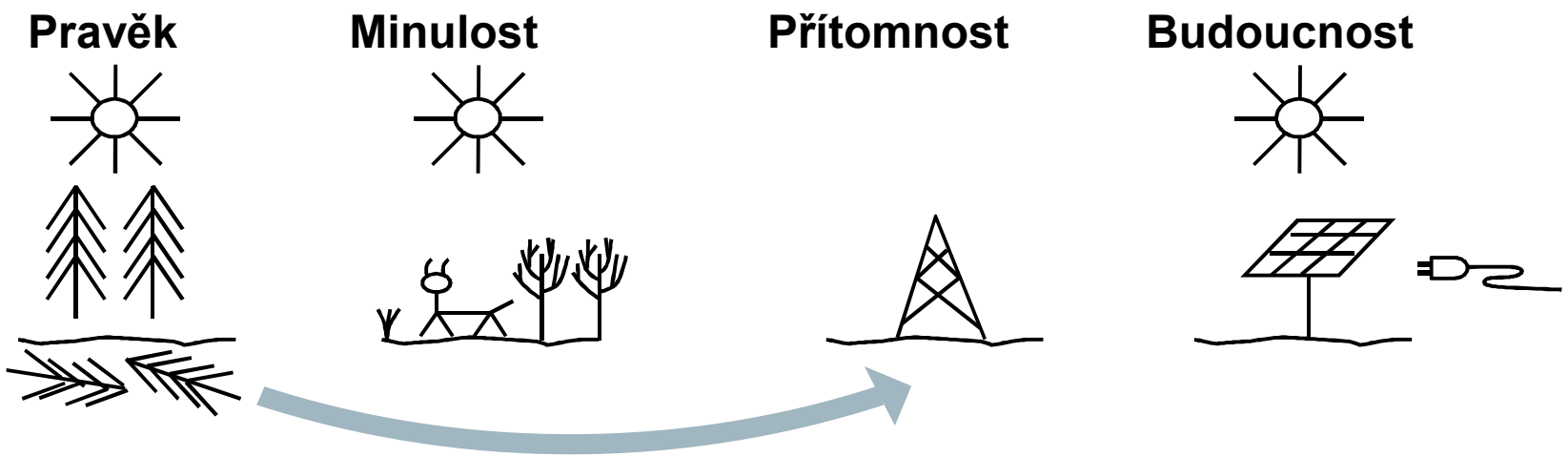


Fosilní paliva jsou v podstatě energetickou konzervou.

Vznikala zhruba 200 milionů let biologickou transformací energie slunečního záření a nyní bude zhruba v proběhu dvou století nenávratně spotřebována .

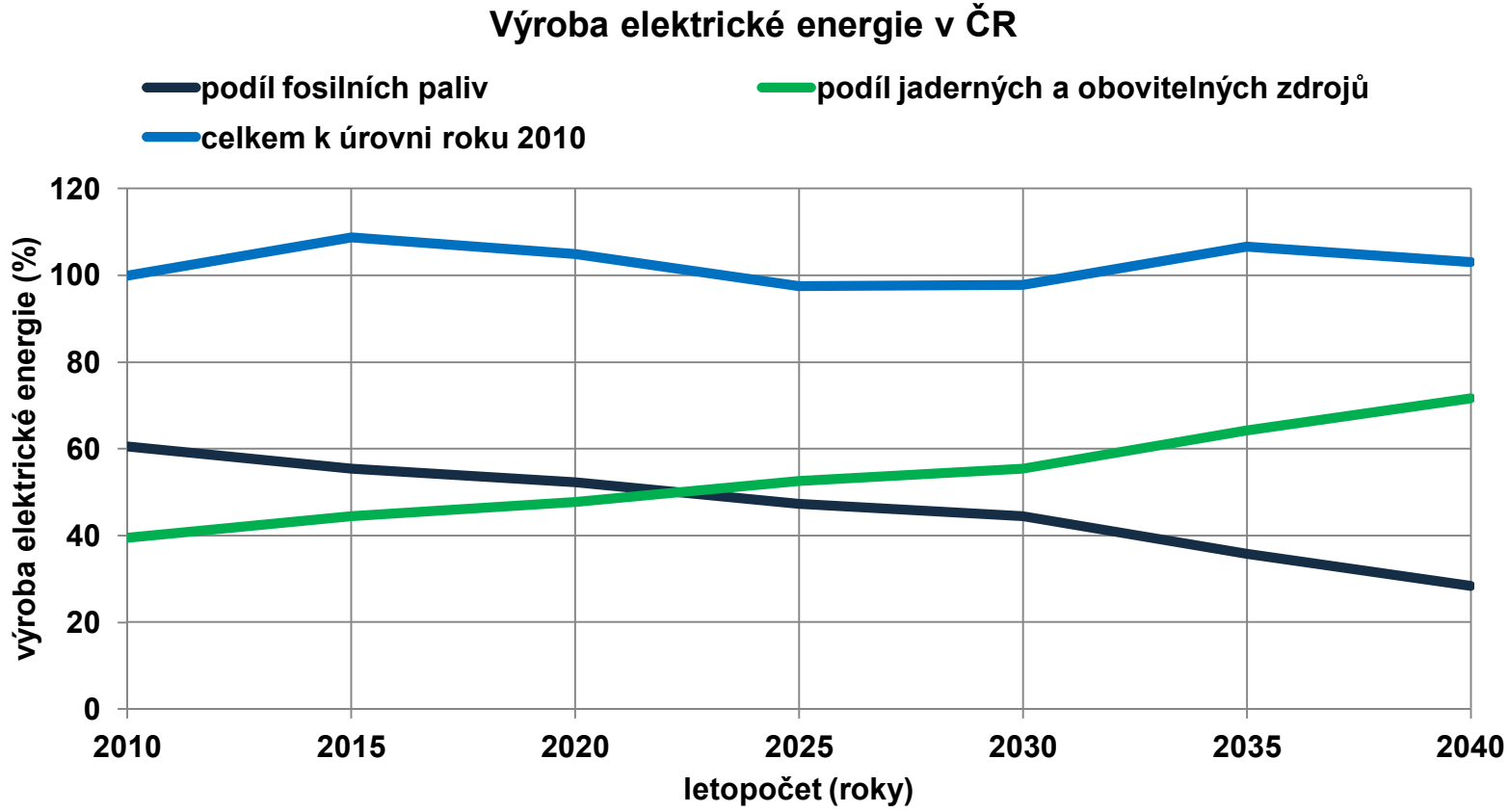
Šťastné období spotřeby fosilních paliv je nutno využít k naučení se žít i bez nich.

Budoucnost energetiky je v ve využívání nikoliv minulé, ale současné energie slunce



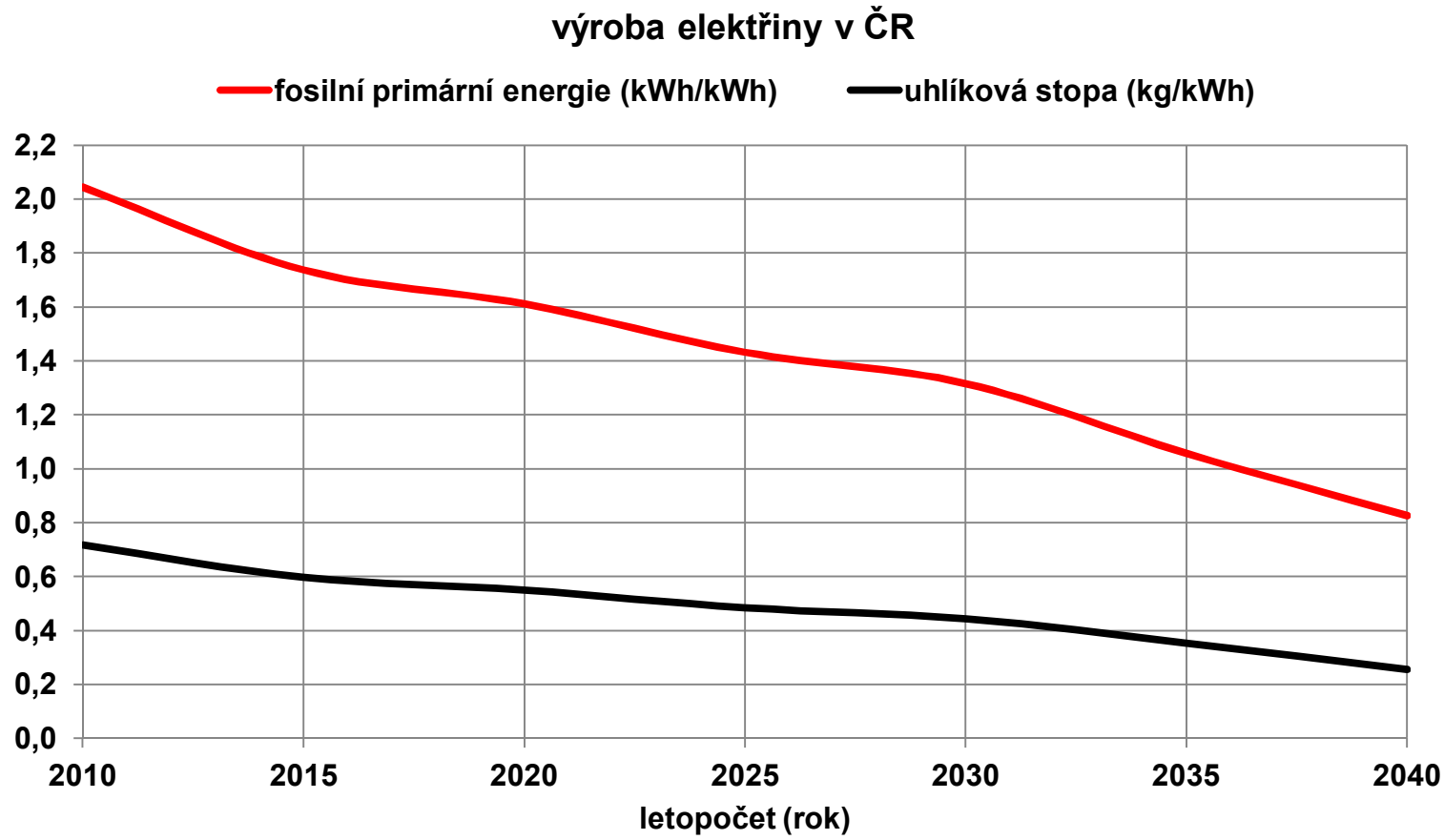
- 200 000 000	… → 1800	1800 → 20xx	20xx → …
slunce vytváří zásoby energie	člověk využívá energii slunce (transformovanou přes fotosyntézu)	člověk těží zásoby energie	člověk využívá transformovanou energii slunce

Usnesení vlády ČR č. 362/2015
Státní energetická koncepce ČR



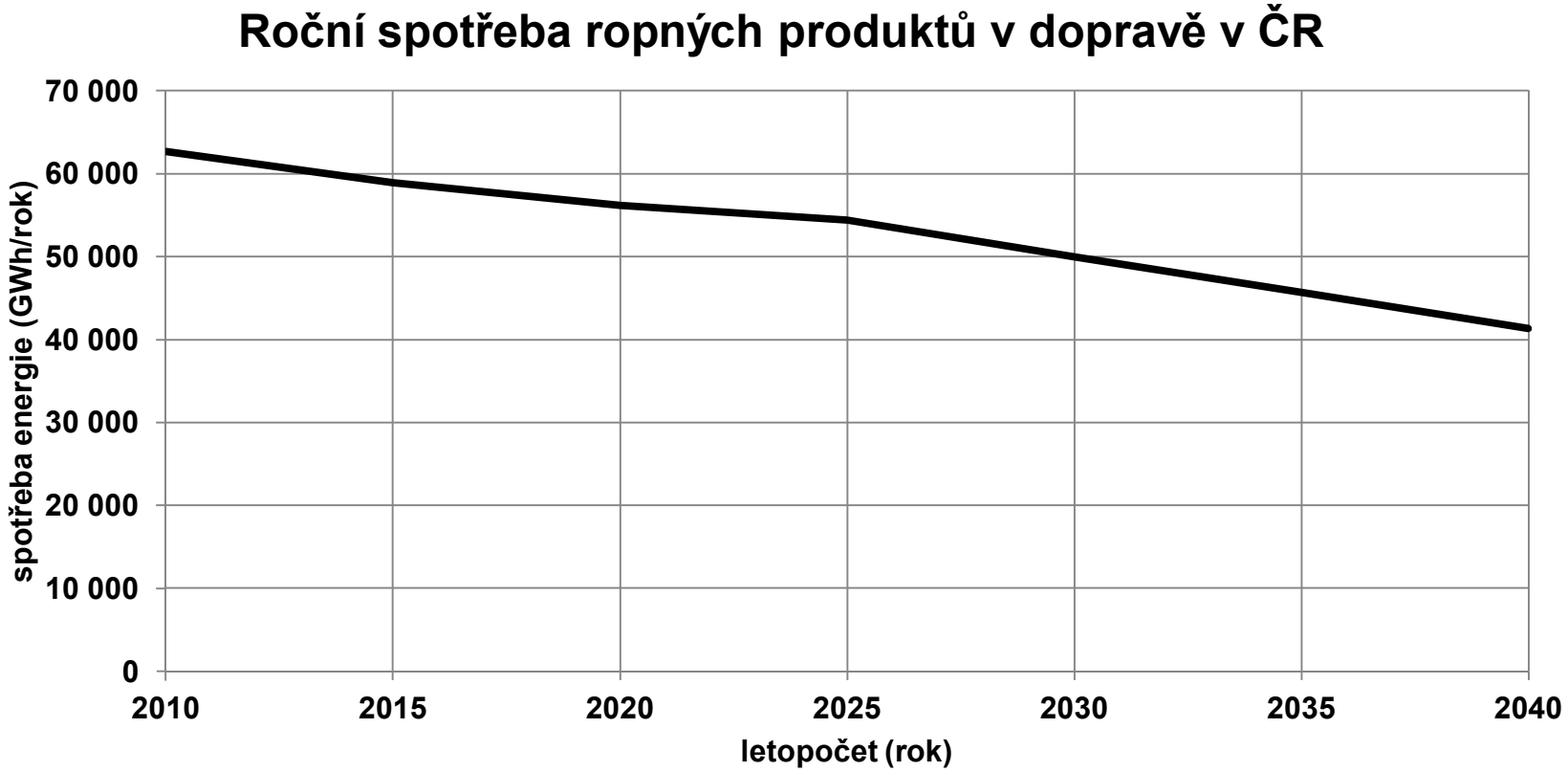
Aktualizovaná státní energetická koncepce ČR předepisuje snížit do roku 2040 podíl fosilních paliv na výrobě elektrické energie ze 61 % na 28 %.
Tím dojede ke snížení uhlíkové stopy při výrobě elektrické energie pod polovinu.

Usnesení vlády ČR č. 362/2015
Státní energetická koncepce ČR



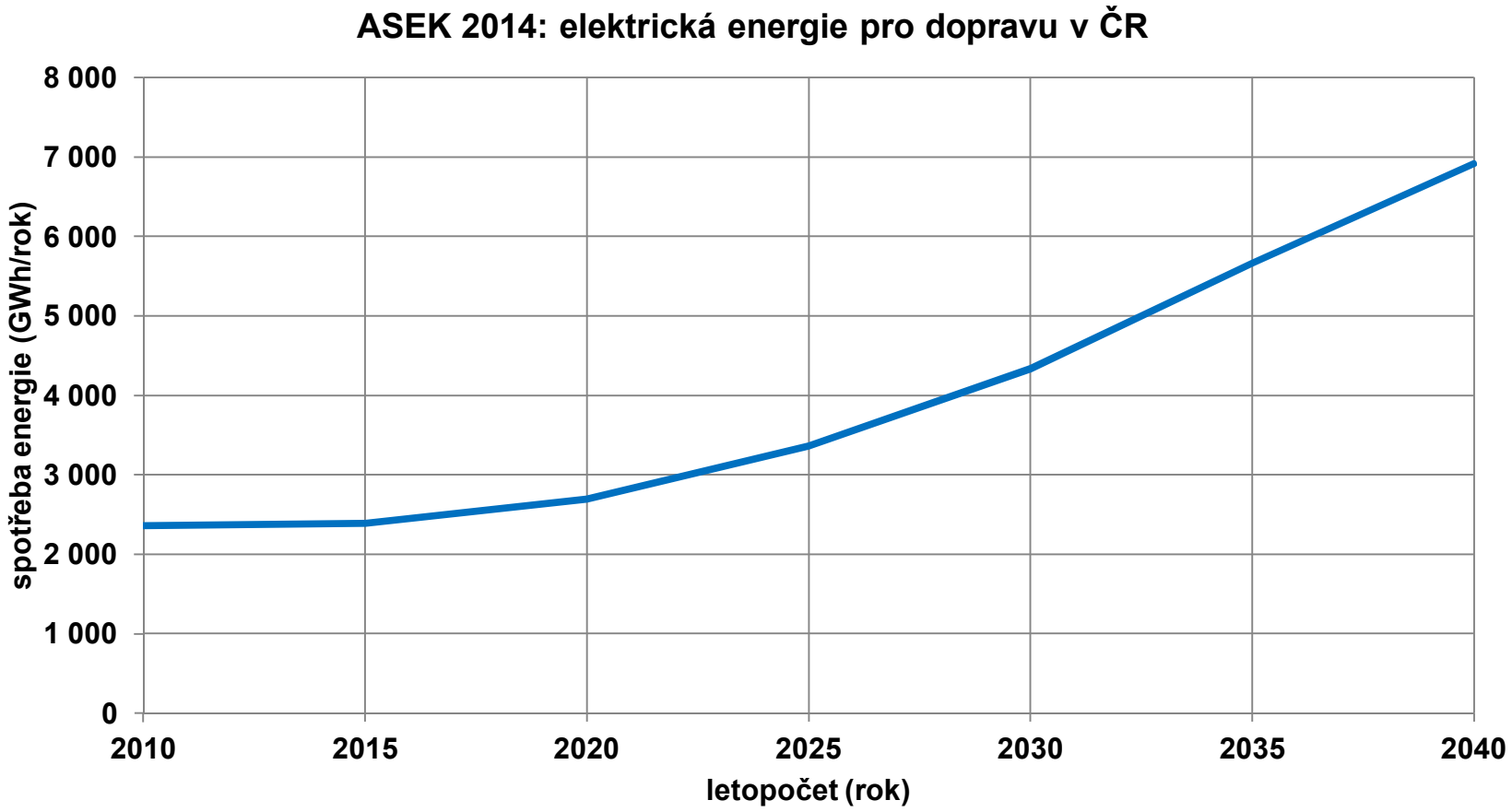
Podle aktualizované státní energetická koncepce ČR bude trvale klesat měrná spotřeba fosilních paliv potřebných k výrobě elektrické energie a spolu s tím i uhlíková stopa elektrické energie.

Usnesení vlády ČR č. 362/2015
Státní energetická koncepce ČR



Úkol pro dopravu: snížit do roku 2030 spotřebu ropných paliv o 9 miliard kWh/rok

Usnesení vlády ČR č. 362/2015
Státní energetická koncepce ČR



Úkol pro dopravu: do roku 2030 zvýšit uplatnění elektřiny v dopravě o 1,9 mld. kWh/rok

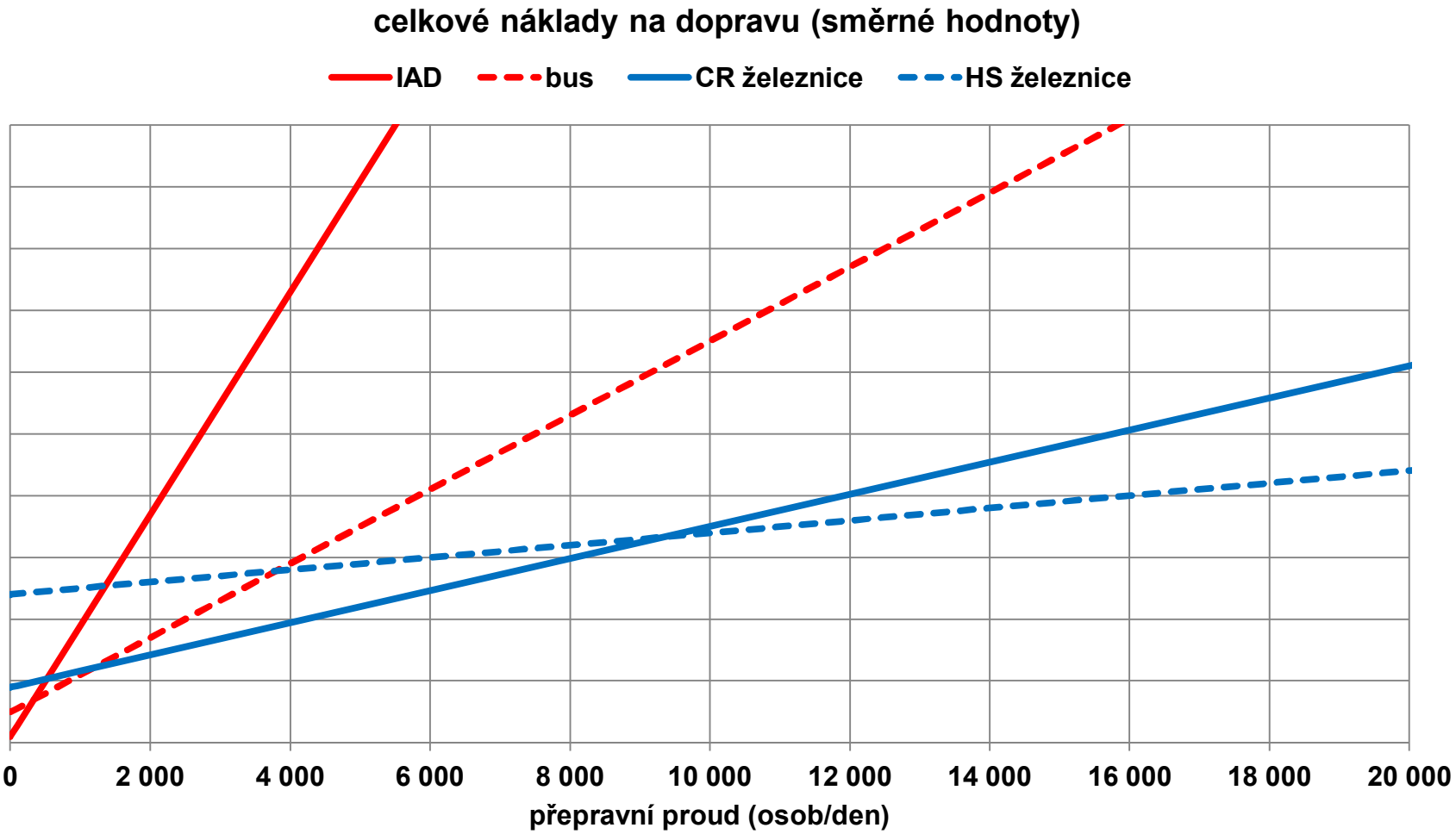
Mutimodální mobilita

Cil: využití celé plochy území ČR k plnohodnotnému profesnímu, společenskému i rodinnému životu (dekoncentrace koncentrovaného osídlení)

Podmínka:
- **nízká energetická náročnost,**
- **trvalá udržitelnost (nezávislost na fosilních palivech),**
- **vlídnost k lidem (bezpečnost, pohodlí, úspora a využití času, …).**

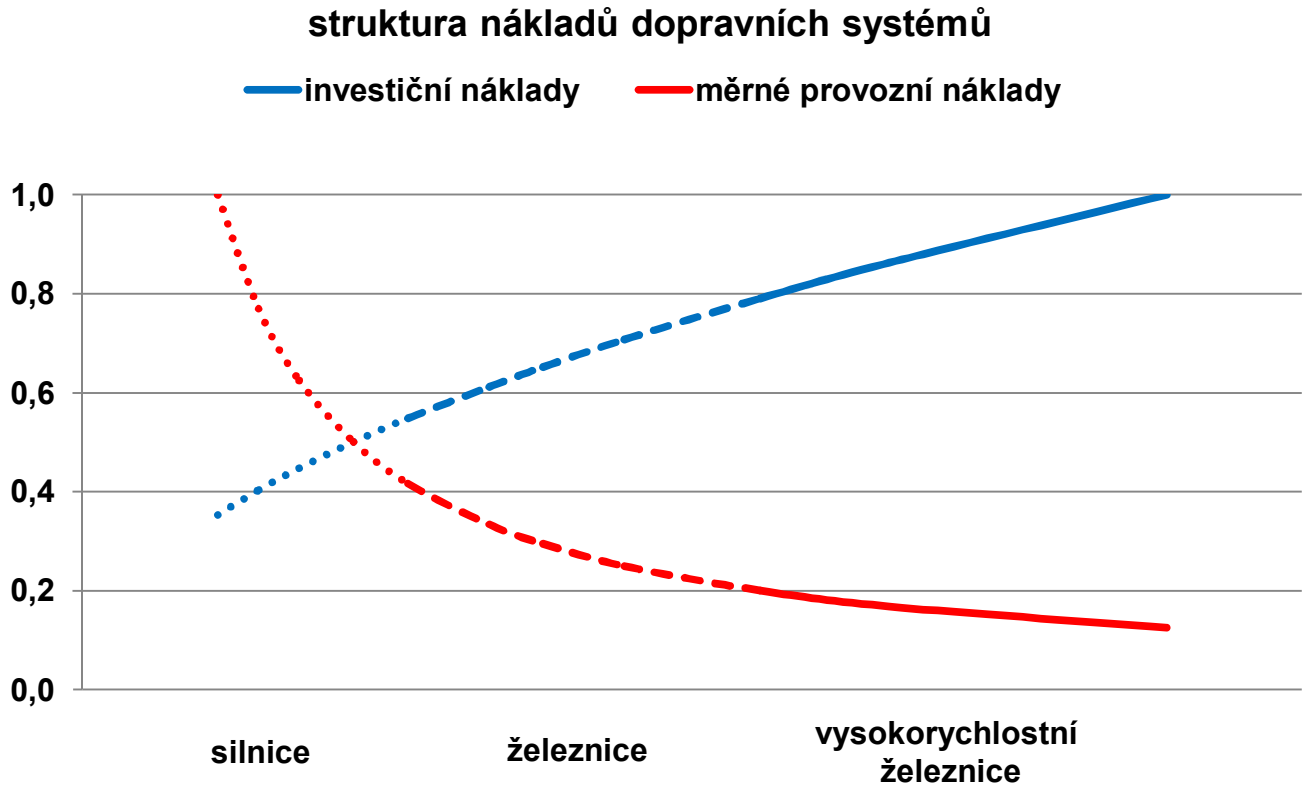
Hierarchická struktura dopravních systémů (logika efektivnosti investic):
- **nejsilnější přepravní proudy: elektrická železnice s liniovým napájením,**
- **silné přepravní proudy: akumulátorová železnice,**
- **slabší přepravní proudy: elektrobusy,**
- **slabé přepravní proudy: elektromobily,**
- **nejslabší přepravní proudy: pěší chůze, jízdní kolo.**

Základní princip multimodální mobility: optimální poměr fixních (investičních) a variabilních (provozních) nákladů



Řízení výběru dopravního módu intenzitou přepravy

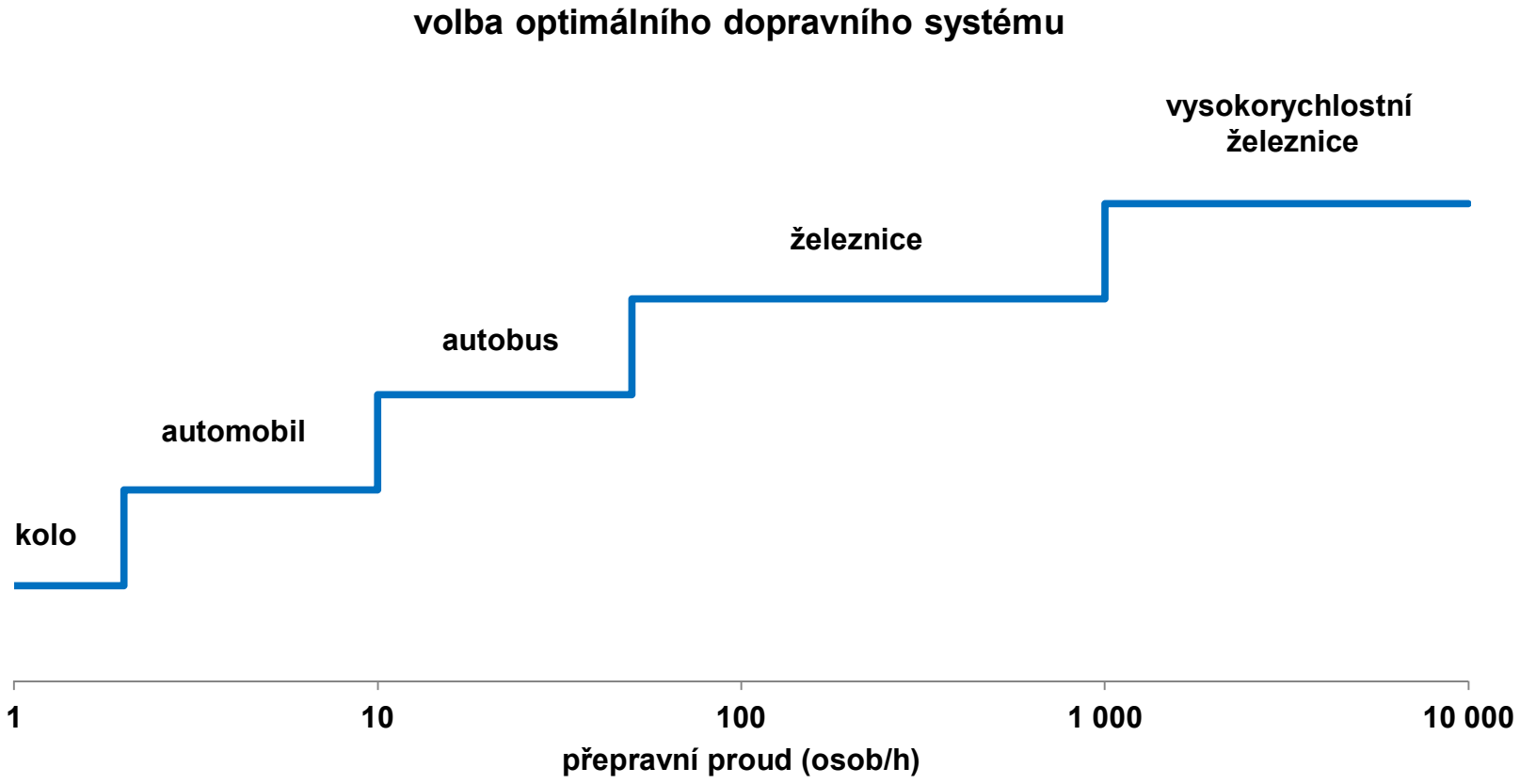
Slabá přepravní poptávka: preference minimálních investičních nákladů (i za cenu dražšího provozu).
Silná přepravní poptávka: preference minimálních provozních nákladů (i za cenu dražších investic).



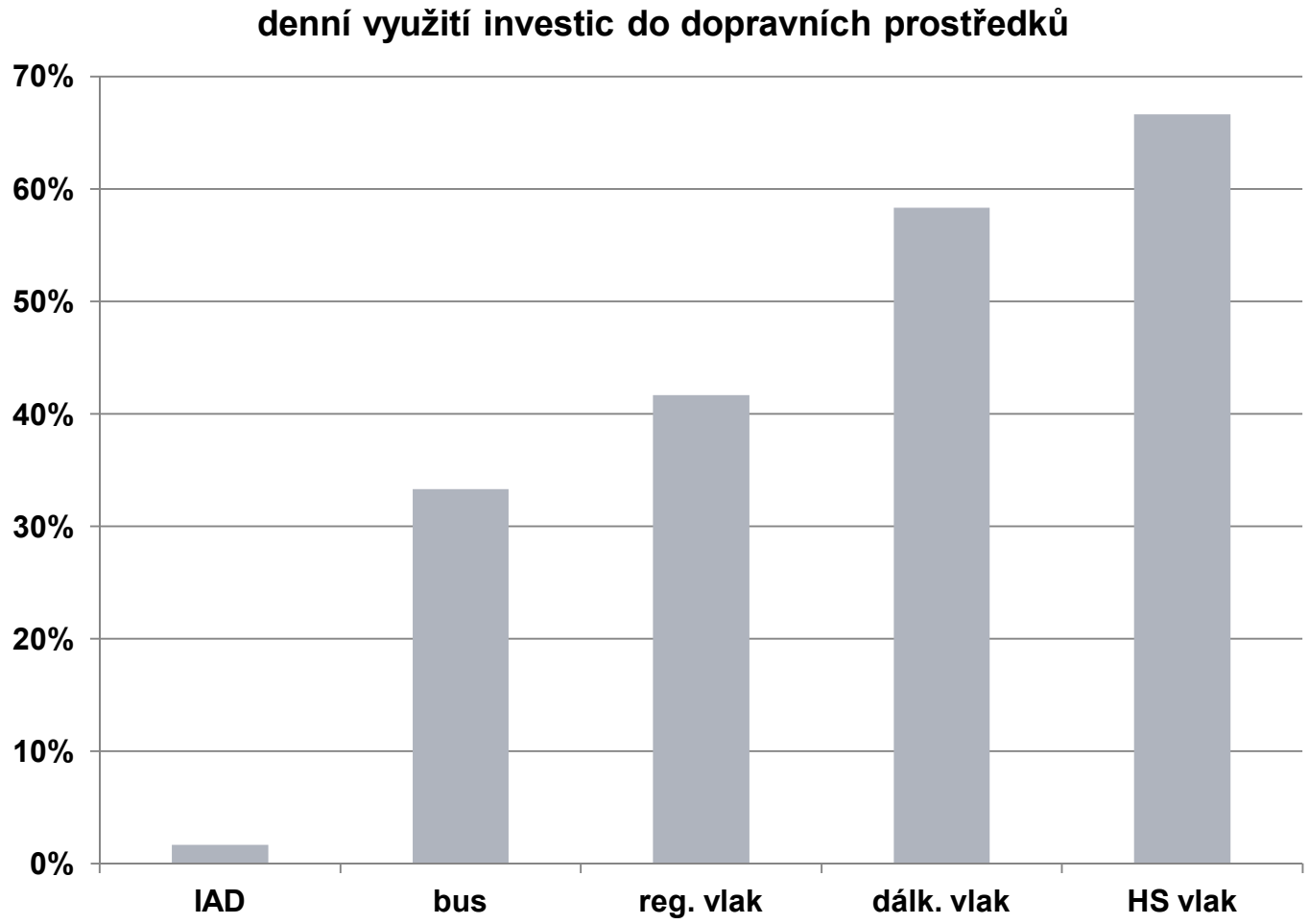
Nikoliv konkurence, ale kooperace dopravních módů

Poloprázdný autobus či vlak je vhodné nahradit automobilem.

Dálnici plnou automobilů má logiku nahradit vysokorychlostní železnicí



Průměrný osobní automobil má v ČR denní běh jen 28 km. Denně je využíván pouze 24 minut, to je 1,7 % celkového času. Celých 23 hodin a 36 minut parkuje.



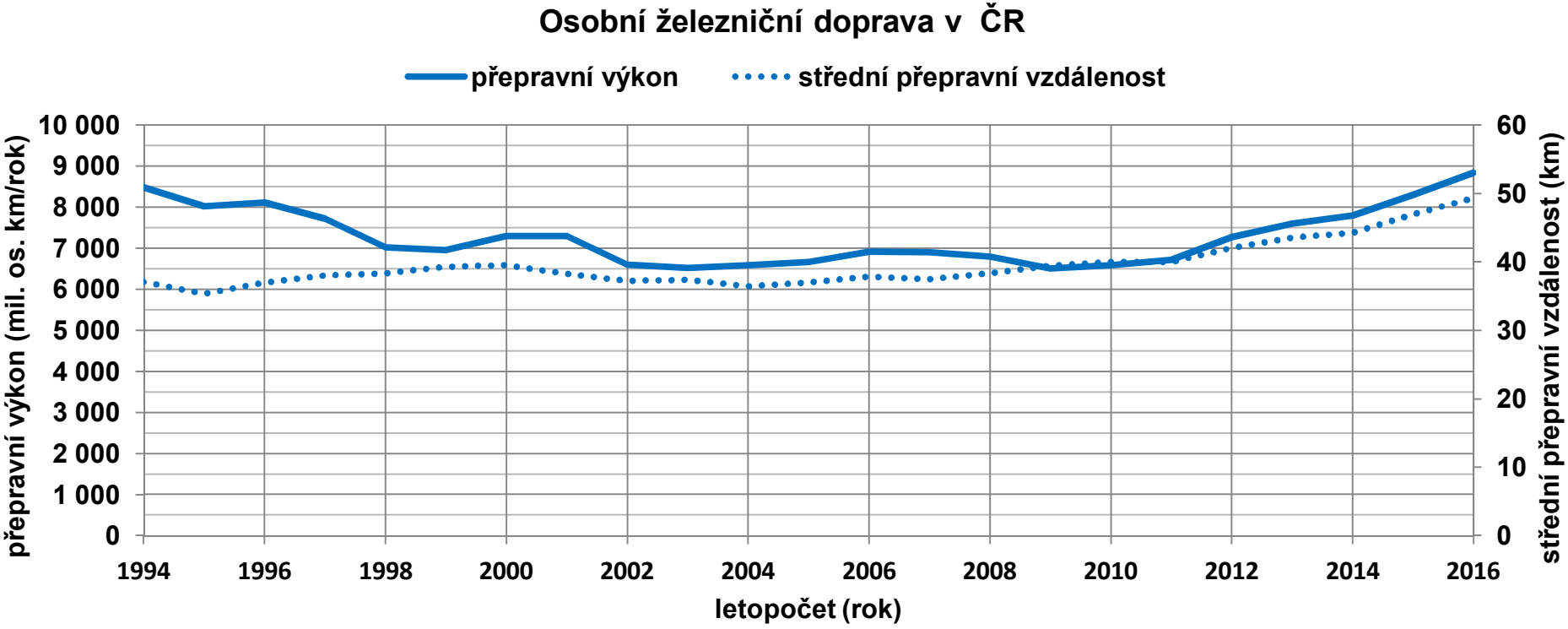
Dopravní chování obyvatelstva v ČR

Na modernizaci železničních tratí, nová vozidla a taktový jízdní řád reaguje obyvatelstvo ČR pozitivně.

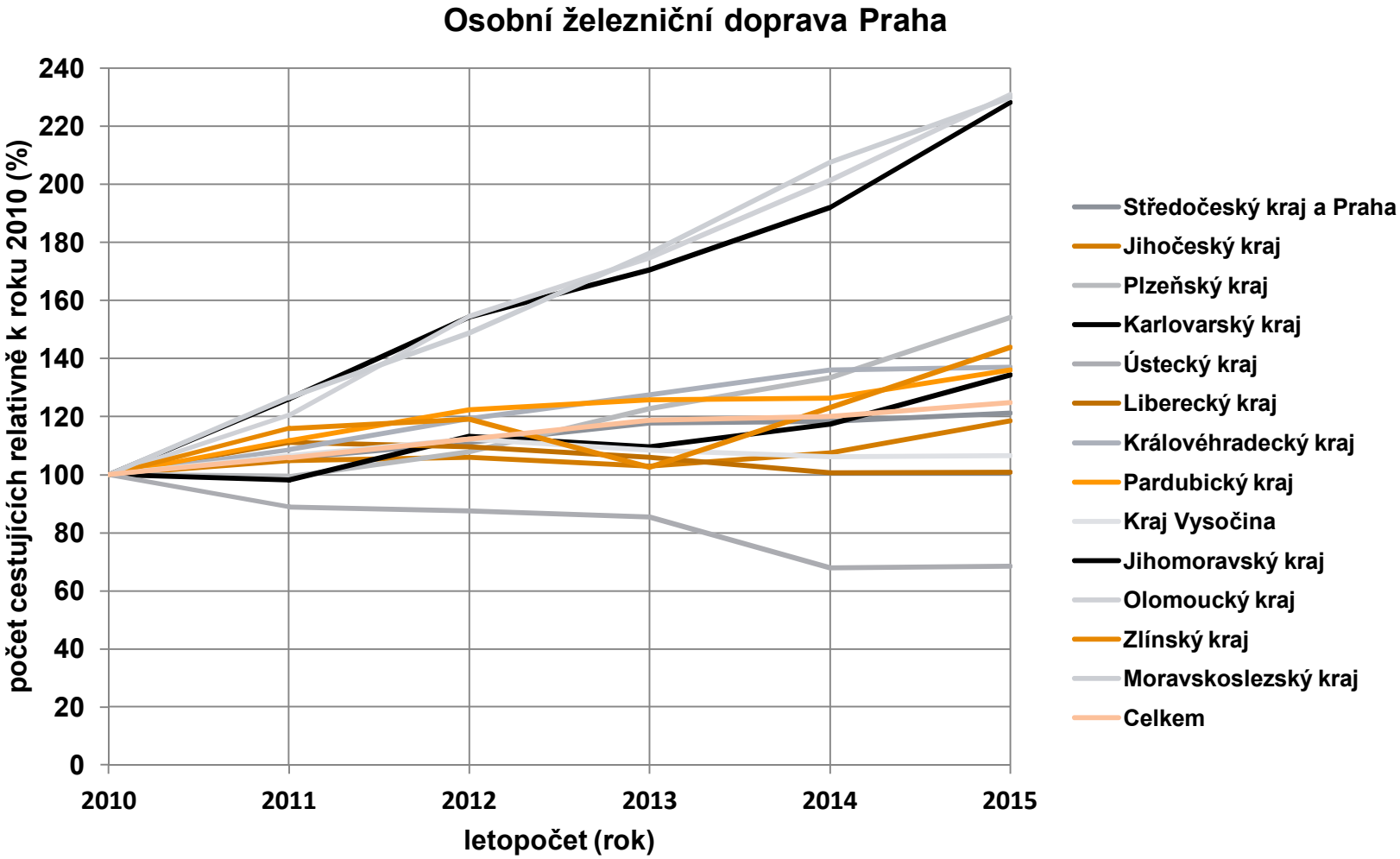
Přepravní výkony železniční osobní dopravy v ČR rostou již šest let v průměru o více než 5 % ročně.

To je 2,5 krát rychleji, než individuální automobilová doprava.

Tahounem tohoto růstu je dálková železniční doprava, ta roste v průměru cca o 9 % ročně.



Odezva cestujících na zkvalitnění železnice



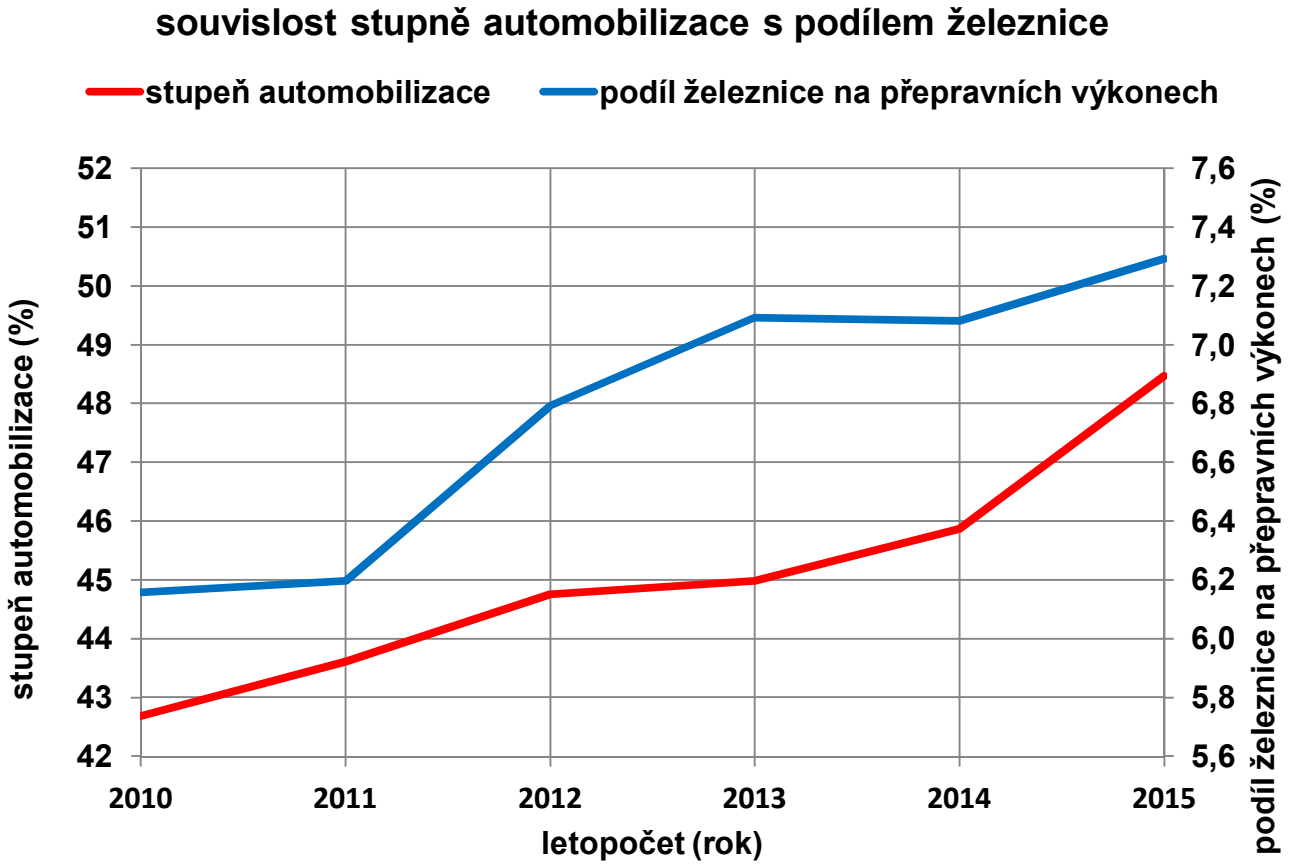
V relacích Praha – Ostrava, Praha – Olomouc a Praha – Brno vzrostl za posledních 5 let počet cestujících na 230 %, to je roční nárůst o 26 %

Spolupráce individuální a veřejné dopravy

SIEMENS
Ingenuity for life

Lidé sice mají lidé více automobilů, ale raději jezdí vlakem.

Orientaci obyvatelstva směrem k železnici je nanejvýš rozumné podpořit vyšší kvalitou i kvantitou přepravní nabídky

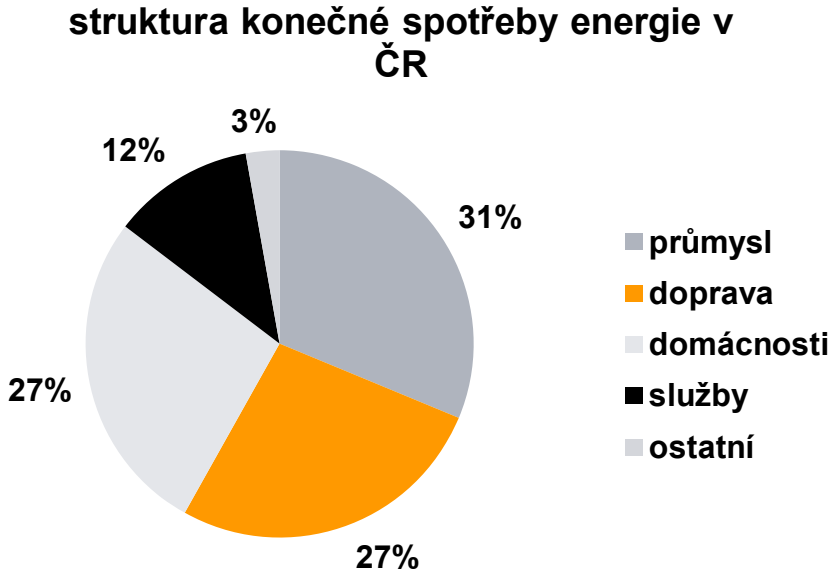


Konec shrnutí minulé přednášky

Podíl dopravy na spotřebě energie

ČR patří k zemím s velmi vysokou spotřebou energie na obyvatele a s velmi vysokou produkcí oxidu uhličitého na obyvatele.
Omlouváme to tím, že jsme průmyslovou zemí.
Avšak to není úplně přesné, průmysl se na tom nepodílí sám:

- **průmysl se v ČR na konečné spotřebě energie podílí 31 %,**
- **doprava se v ČR na konečné spotřebě energie podílí 27 %.**

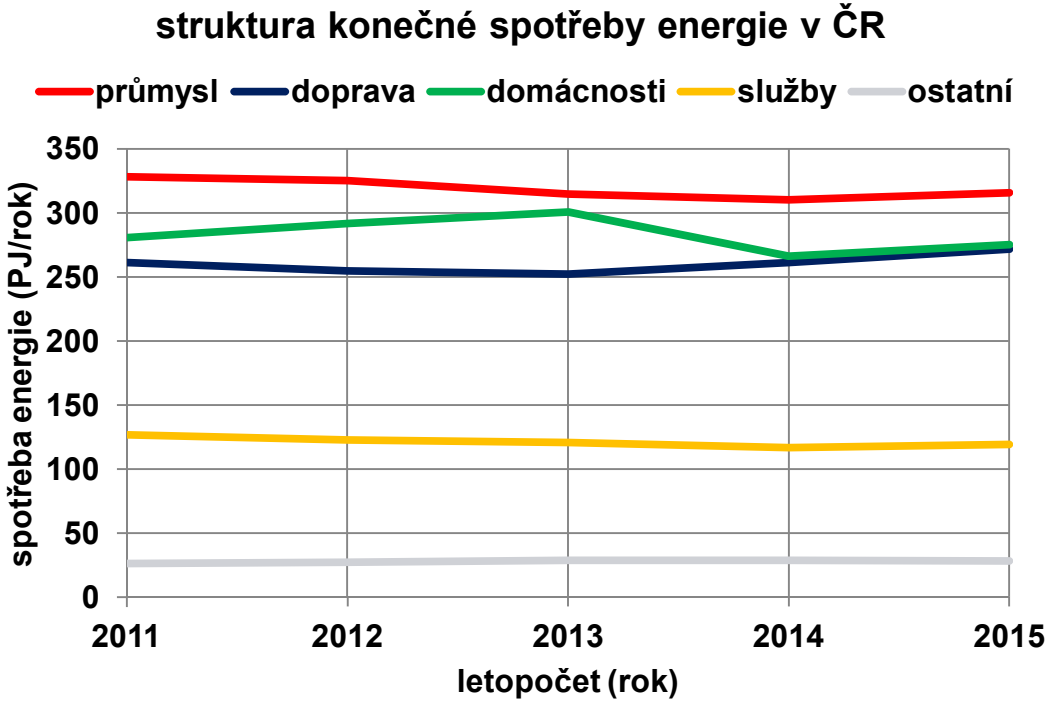


Vývoj spotřeby energie

V důsledku programů úspor klesla v ČR v rozmezí let 2011 až 2015 konečná spotřeba energie:

- **v průmyslu o 4 %,**
- **v domácnostech o 2 %.**

Avšak v dopravě vzrostla spotřeba energie o 4 %



Intramodální a extramodální úspory

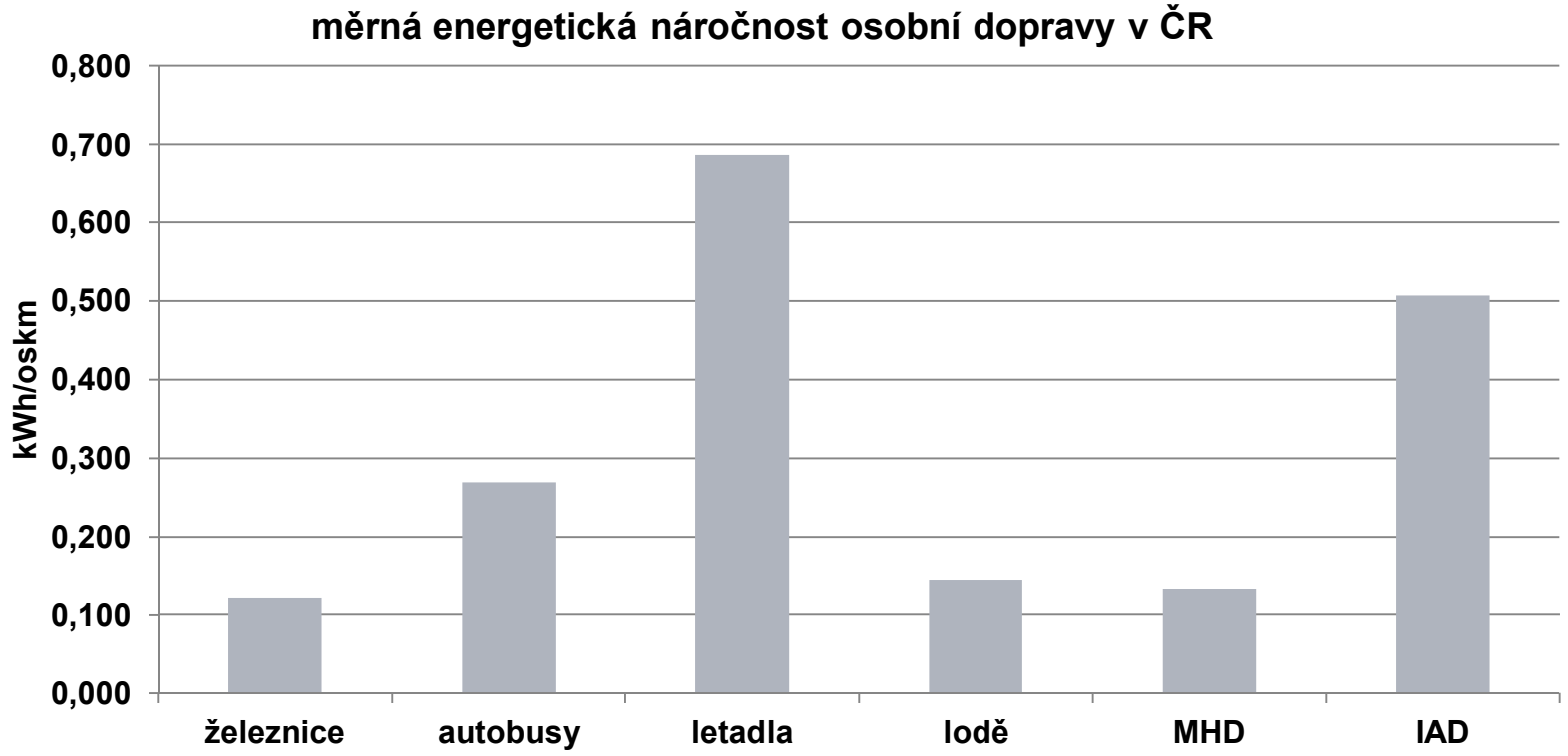
Nejvíce používáme ty dopravní módy (osobní automobilová doprava, nákladní automobilová doprava), které jsou vysoce náročné na spotřebu a které jsou silně závislé na fosilních palivech a proto intenzivně produkují oxid uhličitý.

Největší potenciál úspor energie a produkce CO_2 není v rámci jednotlivých dopravních módů (intramodální úspory), ale převodem dopravy na méně energeticky a klimaticky náročné dopravní módy (extramodální úspory).

Nutným předpokladem k využití potenciálu extramodálních úspor (k převodu dopravy na energeticky a klimaticky méně náročné dopravní módy) je jejich vysoká výkonnost a vysoká kvalita.

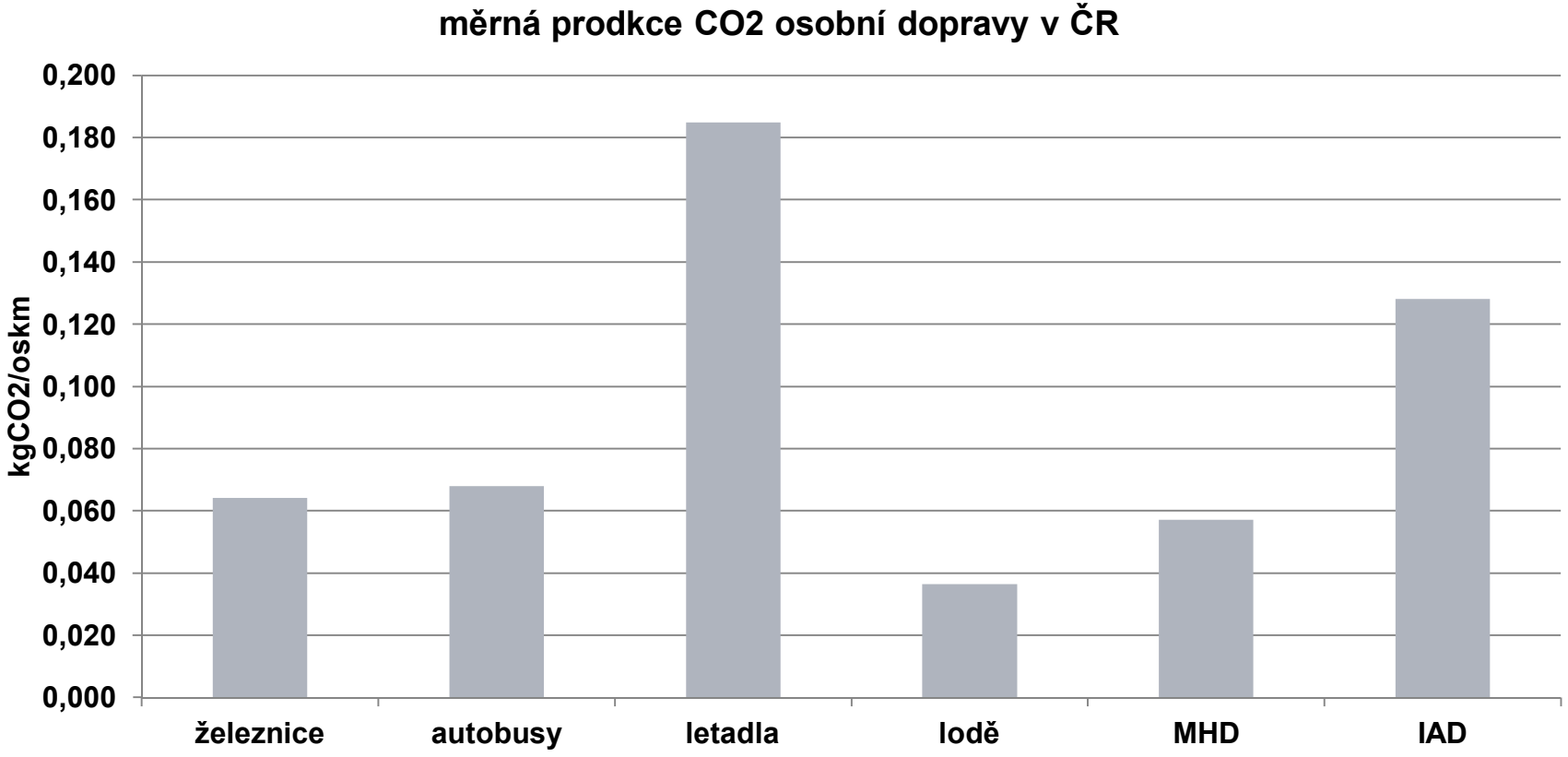
Extramodální úspory energie v dopravě

Cíl: motivovat cestující k použití energeticky méně náročných dopravních módů
Nástroj: kvalita přepravní nabídky
Podmínka: potřebná výkonnost (kapacita)



Extramodální úspory produkce CO_2 v dopravě

Cíl: motivovat cestující k použití klimaticky méně náročných dopravních módů
Nástroj: kvalita přepravní nabídky
Podmínka: potřebná výkonnost (kapacita)



EC/IC vlaky

- **Železnice – jízda rychlostí 160-200 km/h: spotřeba 2,5 kWh/sedadlo/100 km**
- **Automobil – jízda rychlostí 130 km/h: spotřeba 12,5 kWh/sedadlo/100 km**

Pohodlím k úsporám energie

Kvalitní přepravní produkty jsou nástrojem ke motivaci pro konverzi cestujících ze silnic a dálnic na železnice a tím i k zásadním úsporám spotřeby energie i produkce CO_2.

Vysokorychlostní železnice

- **Pěšky – chůze rychlostí 5 km/h: spotřeba 8 kWh/100 km**
- **Železnice – jízda rychlostí 300 km/h: spotřeba 4 kWh/sedadlo/100 km**
- **Letadlo – let rychlostí 900/300 km/h: spotřeba 40 kWh/sedadlo/100 km**

Externí náklady
(Věstník Dopravy MD ČR č. 11/2013)

SIEMENS
Ingenuity for life

Individuální automobilová doprava zatěžuje společnost velmi vysokými Externími náklady, a to zejména v oblasti znečistění ovzduší emisemi zdraví škodlivých látek ze spalovacích motorů a otěrem z pneumatik.

Externality osobní dopravy (Kč/1 000 os km), úroveň roku 2017					
	automobilová	motocyklová	autobusová	železniční	letecká
nehody	1 806	12 547	155	45	30
hluk	286	853	65	196	181
znečistění ovzduší	869	396	984	246	80
změny klimatu	798	696	447	266	1 767
celkem	3 760	14 492	1 651	753	2 058

Převedením osobní dopravy ze silnice na železnici dochází ke úspoře ze státního rozpočtu ČR financovaných externích nákladů o 3,76 – 0,75 = 3,01 Kč/oskm.
To je více, než je cena jízdného.

Politika ČR v oblasti životního prostředí

Usnesení vlády ČR č. 978/2015
Národní plán snižování emisí

Minimalizovat produkci spalovacími motory a otěrem z pneumatik produkovaných zdraví škodlivých polutantů, a to zejména:

- **Prachové částice (PM 10, PM 2,5, PM 1)**
- **NOx,**
- **Polyaromatické uhlovodíky (PAH) – Benzo(a)pyren**

Splnění limitů EURO 6 je pro lidské zdraví nepostačující, z dopravy je nutno zcela vyloučit používání vozidel se spalovacími motory.
Vozidla nesmí škodit obyvatelstvu.

Plus trend snižování hluku generovaného dopravou.

Společenská poptávka:
Bezodkladné vybudování vysokorychlostního železničního systému systému v ČR

SIEMENS
Ingenuity for life

Poslanecká sněmovna Parlamentu ČR
Usnesení č. 1583 ze dne 2.3. 2017

Vláda ČR
Usnesení č. 389 ze dne 22.5.2017

Evropské společenství
Nařízení Evropského Parlamentu a rady č. 1315/2013

Vize budoucí (bezemisní) železnice v ČR – Rychlá spojení

Sít nově vybudovaných vysokorychlostních železnic Rychlých spojení (SZ – JV, JZ – SV, S – J) jakou součást evropského vysokorychlostního železničního systému ve smyslu nařízení Evropského parlamentu a rady č. 1315/2013.

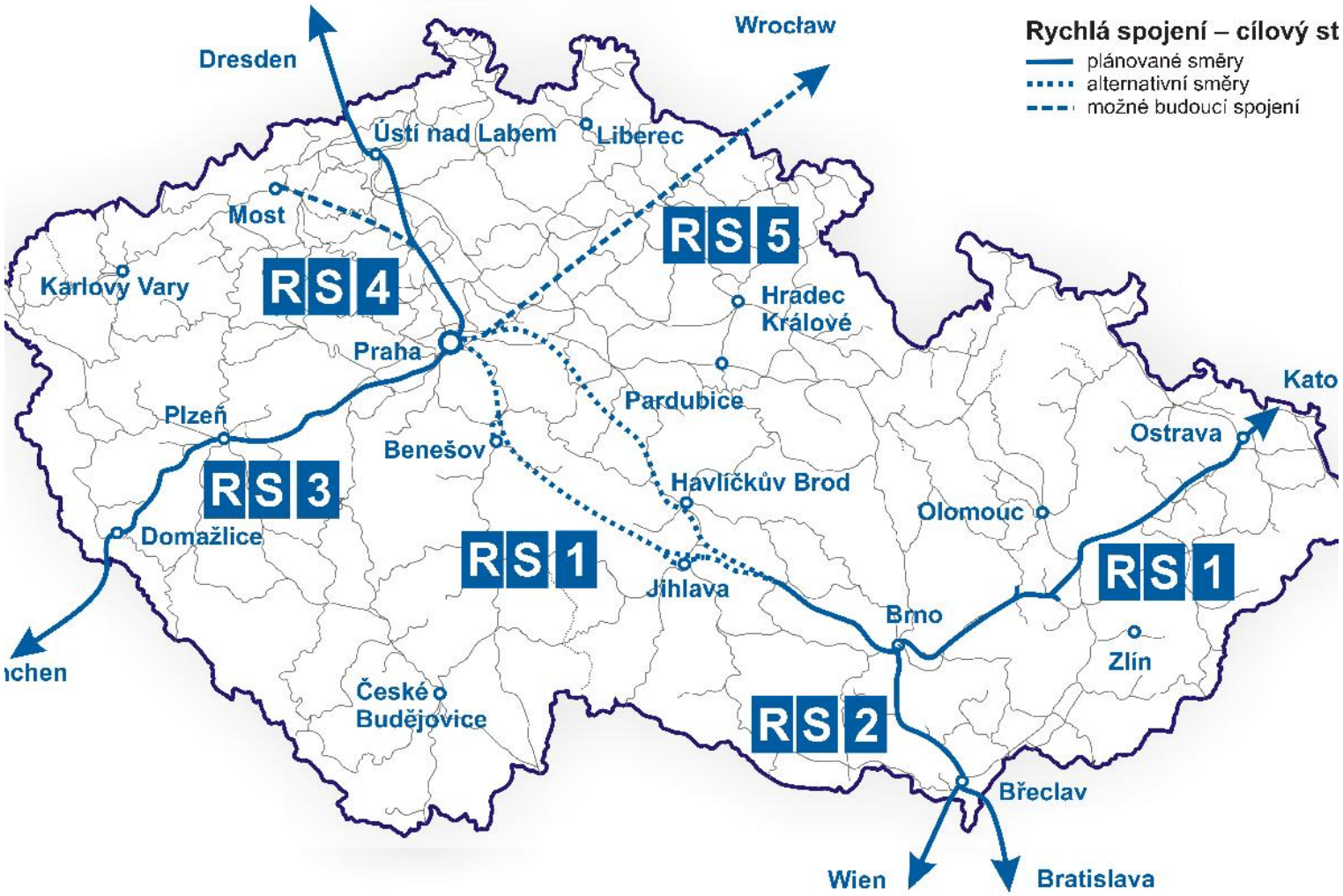
Jde o ekonomicky vysoce efektivní projekt, jen současný přepravní výkon automobilové a autobusové dopravy mezi Prahou a Brnem (202 km) v úrovni 51 000 osob denně představuje roční přepravní výkon 3,8 miliard os. km/rok, což je 43 % přepravního výkonu celé české železnice 8,8 miliard os. km/rok na 9 500 km dlouhé síti.

Technické parametry:

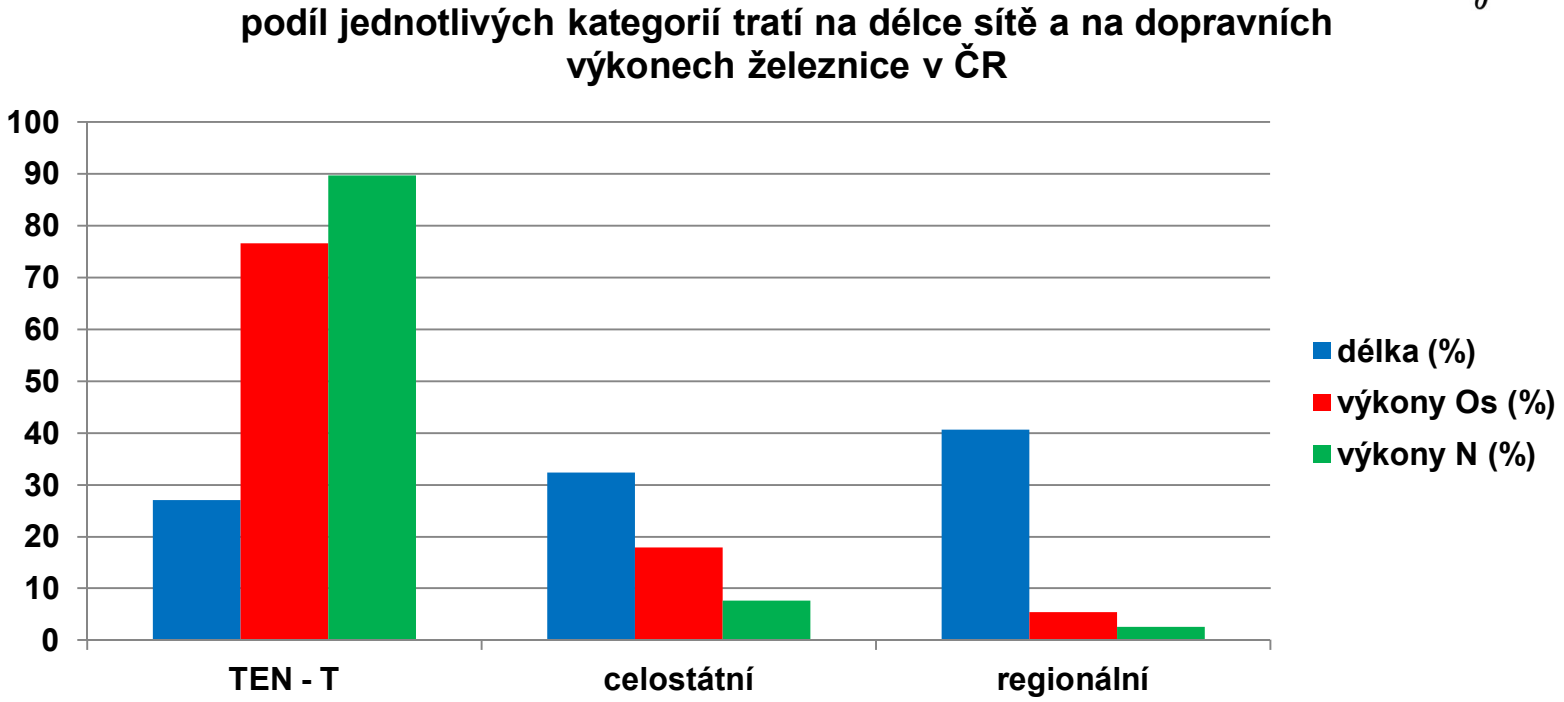
- rychlost 300 km/h +,
- výhradní provoz ucelených vysokorychlostních vozidel,
- elektrizace systémem 2 x 25 kV 50 Hz,
- ETCS level 3.

Nástroj ke zvýšení výkonnosti a kvality železnic: vysokorychlostní železniční systém

SIEMENS
Ingenuity for life



Polarizace železniční sítě v ČR



Rostoucí nerovnoměrnost zatížení železničních tratí v ČR lze řešit čtveřicí opatření:

- **výstavba nových vysokorychlostních tratí,**
- **zvyšování výkonnosti konvenčních tratí sítě TEN-T,**
- **zvýšení kvality a atraktivity konvenčních tratí celostátních (elektrizace),**
- **integrace vhodně vedených regionálních tratí do aktivní části železniční sítě.**

Vize budoucí (bezemisní) železnice v ČR – RFC koridory

Síť modernizovaných Evropských železničních nákladních koridorů (RFC 5, RFC 7, RFC 8, RFC 9) ve smyslu nařízení Evropského parlamentu a rady č. 1316/2013, sloužící zejména k odlehčení dálnic od tranzitní nákladní dopravy, avšak zajišťující i osobní dopravu (dálkovou i regionální).

Technické parametry:
- **rychlost 160 až 200 km/h,**
- **provoz konvenčních i vysokorychlostních vozidel,**
- **délka nákladního vlaku 740 m,**
- **prostorová průchodnost GC,**
- **elektrizace systémem 25 kV 50 Hz,**
- **ETCS level 2.**

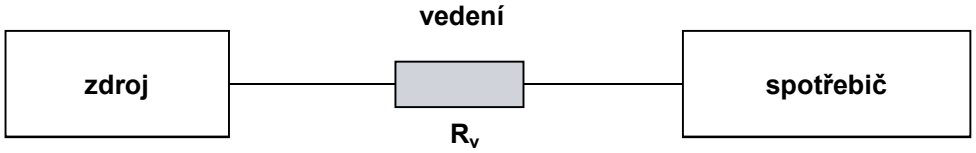
Napájení elektrických drah: přechod ze systému 3 kV na 25 kV

Důvodem k přechodu na jednotný systém 25 kV, tedy přeměna (konverze) tratí dosud elektrizovaných systémem 3 kV na 25 kV je více:
- nízká přenosová schopnost trakčního vedení při napětí 3 kV neumožňuje plnohodnotně napájet výkonná vozidla ani zajistit jízdu vlaků v těsném sledu, který tratě umožňují. K zajištění potřebné kvality napájení by bylo nutno dosavadní vzdálenost stejnosměrných trakčních napájecích stanic (cca 25 km) snížit na polovinu, a to výstavbou podpůrných měníren (a zajistit přívod VN elektrické energie k nim),
- vysoké ztráty energie v trakčním vedení (běžně i kolem 20 %),
- potíže s poškozováním kovových konstrukcí bludnými proudy,
- velmi vysoké náklady na elektrizaci dalších tratí (těžké trakční vedení, velký počet napájecích stanic a nutnost jejich připojení k DS, protikorozní opatření, …), která je v ČR připravována,
- nepoužitelnost pro vysokorychlostní tratě, jejichž vybudování se v ČR připravuje.

=> Centrální komise MD ČR schválila v prosinci roku 2016 přechod železnic v ČR na jednotný systém napájení 25 kV

Základní vlastnost elektrického vedení

odpor (impedance) vedení způsobuje úbytek napětí:



odpor vedení roste s jeho délkou

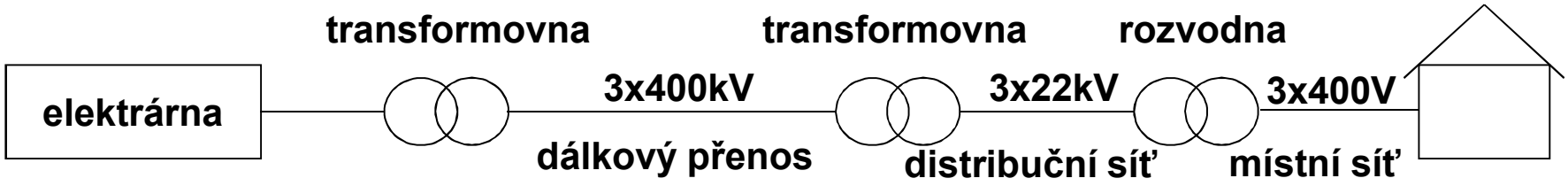
$$R = \rho.\frac{L}{S} = L.\frac{\rho}{S} = r.L$$

činný úbytek napětí způsobuje ztráty energie

$$z = 1 - \eta = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{R.I^2}{U.I} = \frac{R.I}{U} = \frac{R.P}{U^2}$$

Měrné ztráty ve vedení klesají s druhou mocninou napětí (Elihu Thompson, 1878)

Příklad - výroba, přenos a rozvod elektrické energie pro domácnosti



Pro dálkový přenos se používá napětí 1 000 x větší, než v místní rozvodné síti. Pokud by tomu tak nebylo, byly by ztráty v přenosu (při stejných průřezech vodičů) 1 000 000 x větší:

$$\left(\Delta P = R.I^2 = R.\frac{P^2}{U^2} \right)$$

Ztráty energie by byly mnohem větší, než její užitečná spotřeba. Dálkové přenosy nízkým napětím by byly pro svojí nehospodárnost nereálné, elektrárna by musela být v každém městě (viz styl Františka Křižíka kolem roku 1900).

Účinnost napájení elektrických drah

Vlivem nízkého napětí (nelze na přenos použít vyšší a následně na vozidle snížit na použitelnou hodnotu) je účinnost DC přívodu energie relativně nízká – ztráty výkonu (respektive úbytek napětí) jsou velké:

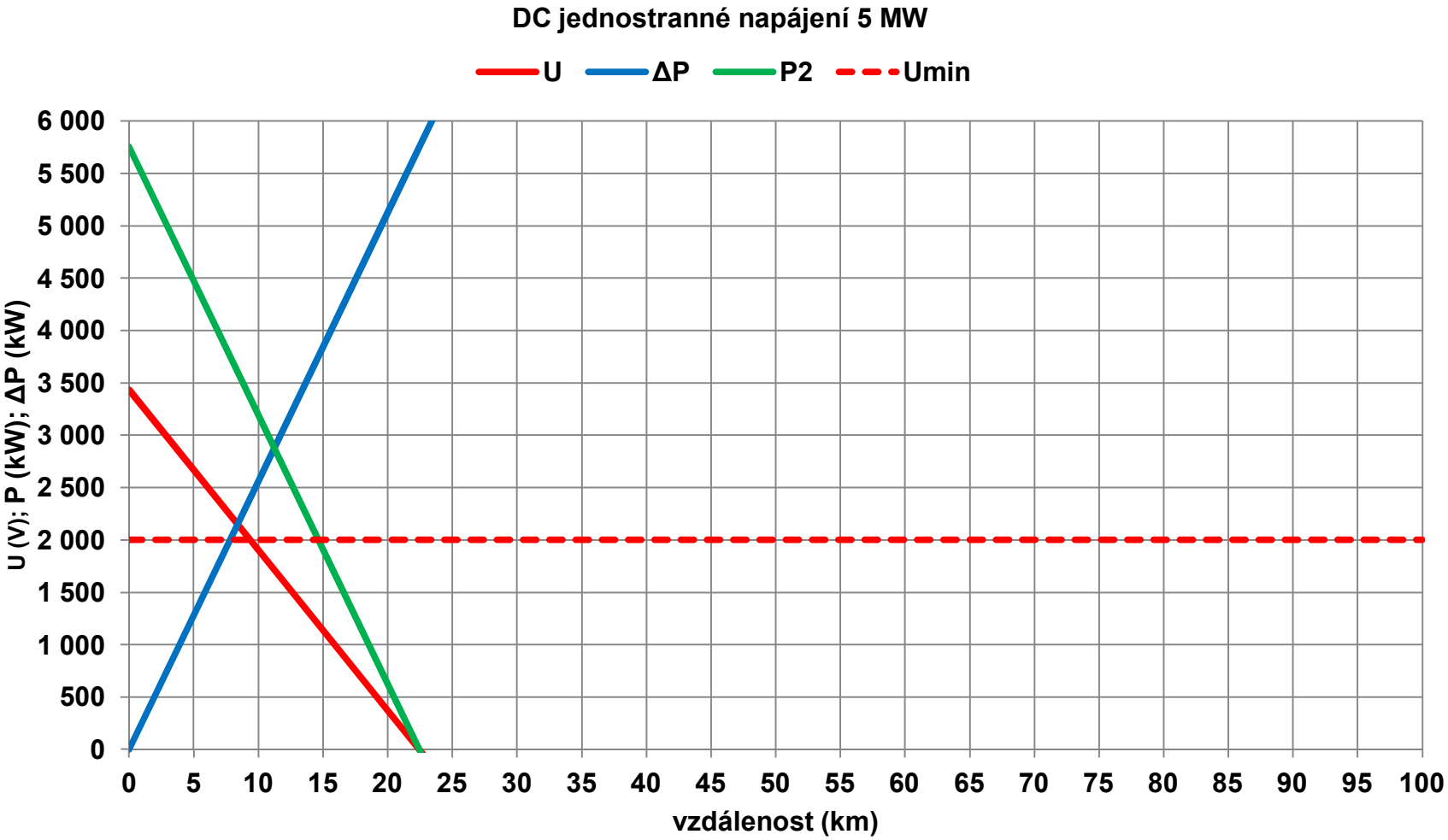
$$z = 1 - \eta = \Delta P/P = \Delta U/U = R \,.\, I / U = R \,.\, (P / U) / U = R \,.\, P \,/\, U^2$$

Zásadním řešením je použití napětí 25 kV respektive 15 kV.

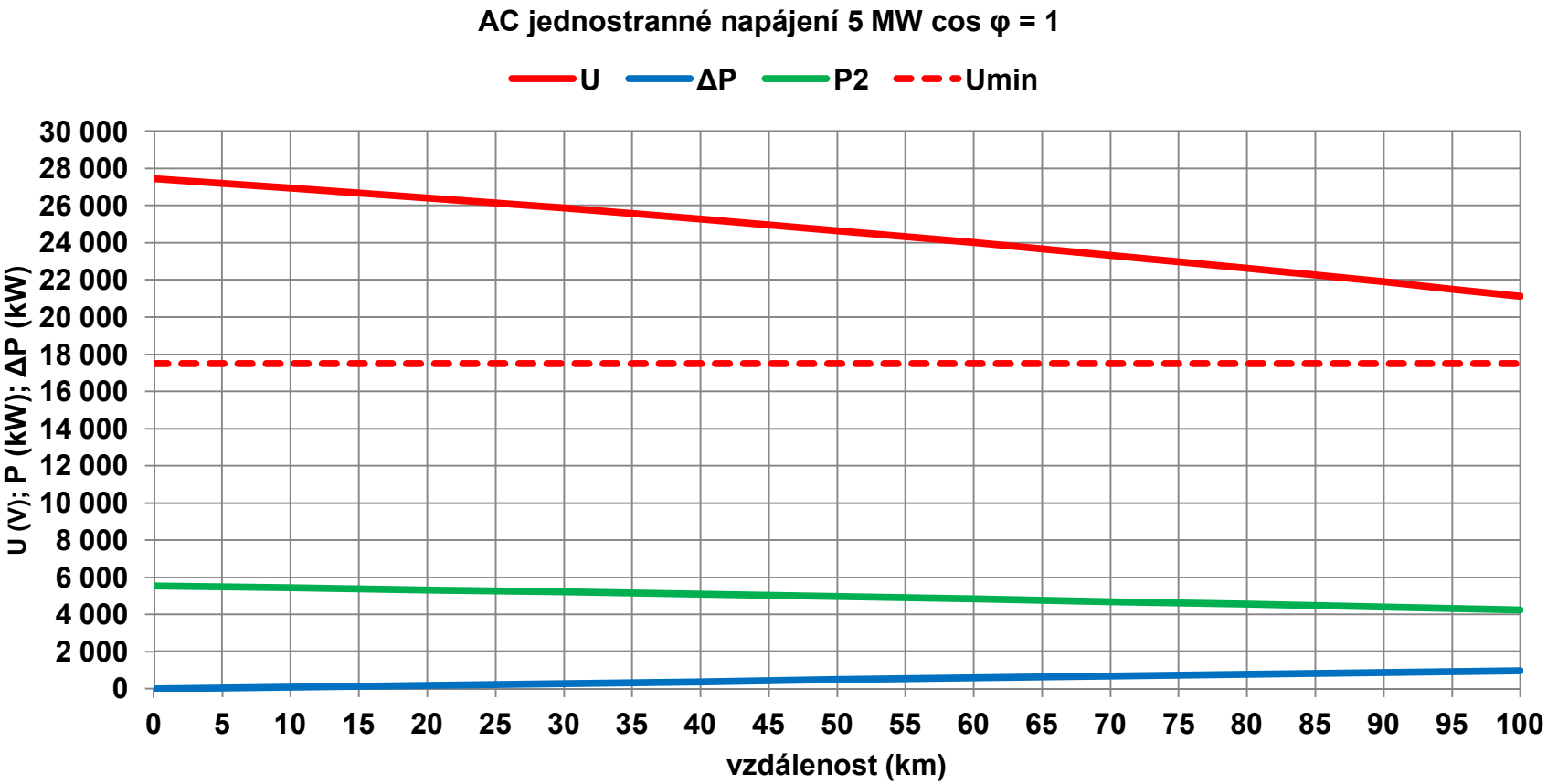
Při stejných podmínkách (stejný odpor vedení, stejný způsob napájení) má systém 25 kV oproti systému 3 kV ztráty 69 krát nižší:

$$\Delta P' / P\Delta = (U / U')^2 = (25/3)^2 = 69$$

Elektrizace dalších zpravidla jednokolejných železničních tratí (dvě vozidla 2,5 MW na konci jednostranně napájeného úseku délky 100 km)

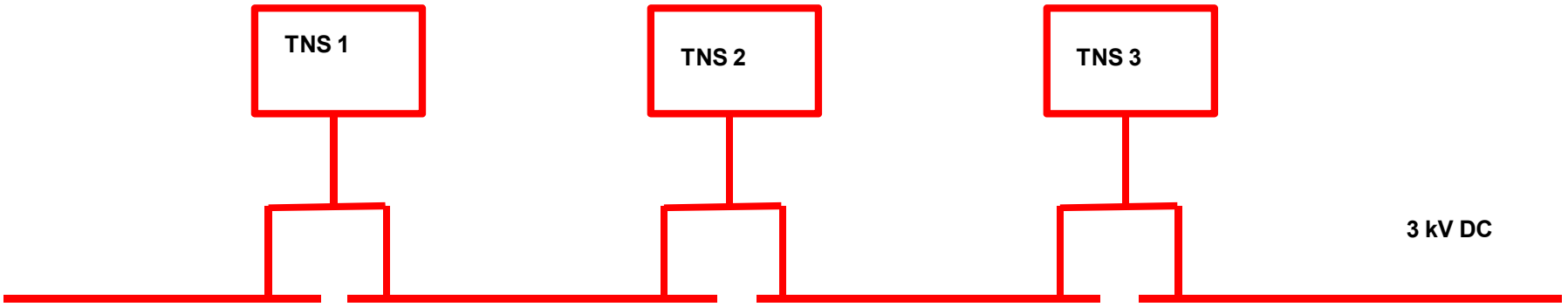


Elektrizace dalších zpravidla jednokolejných železničních tratí (dvě vozidla 2,5 MW na konci jednostranně napájeného úseku délky 100 km)



Napájení elektrických drah 3 kV

Elektrizace železnic byla v ČR zahájena stejnosměrným systémem 3 kV s využitím dvoustranného napájení (usměrňovače brání vzniku vyrovnávacích proudů).
Původně od sebe byly jednotlivé meziměnírenské úseky elektricky odděleny. V současnosti již je praktikováno spojité napájení, záležitost vzdálených zkratů je řešeno vazbou napáječových rychlovypínačů (blízká trakční napájecí vypíná při zjištění nadproudu a zároveň dává pokyn k vypnutí i sousedním napájecím stanicím).



Dopad zvýšení rychlosti na systém 3 kV

Moderní železnice se vyznačuje vyššími rychlostmi:

- došlo ke zvýšení rychlosti jízdy rychlíků dopravovaných lokomotivami ze 120 km/h na 230 km/h (zvýšení výkonu ze 2 MW na 6 MW)

- došlo ke zvýšení rychlosti jízdy rychlíků tvořených ucelenými trakčními jednotkami ze 160 km/h na 350 km/h (zvýšení výkonu ze 2 MW na 8 MW)

- došlo ke zvýšení rychlosti jízdy nákladních vlaků z dříve typických 65 km/h na současných 100 až 120 km/h (zvýšení výkonu ze 2 MW na 6 MW).

Dopad na pevná trakční zařízení:

- **výkon potřebný na překonání aerodynamického odporu roste se třetí mocninou rychlosti ($F = k \cdot v^2 \Rightarrow P = F \cdot v = k \cdot v^3$),**
- **tepelné účinky proudu, nezbytného k zajištění výkonu potřebného na překonání aerodynamického odporu, rostou se šestou mocninou rychlosti:**

$$\Delta T = k \cdot \Delta P = k \cdot R \cdot I2 = k \cdot R \cdot (P/U)^2 = k \cdot R \cdot v^6 / U^2$$

Napájení elektrických drah 25 kV

Od počátku aplikace elektrizace železnic střídavým systémem 25 kV 50 Hz bylo v ČR řešeno téma připojení jednofázového spotřebiče (elektrická vozidla) ke třífázové distribuční soustavě.
Nesymetrický odběr proudu (respektive výkonu) ze třífázové soustavy vede vlivem vnitřní impedance sítě ke vzniku nesymetrie napětí.
$\Delta U = Z \cdot I_n$

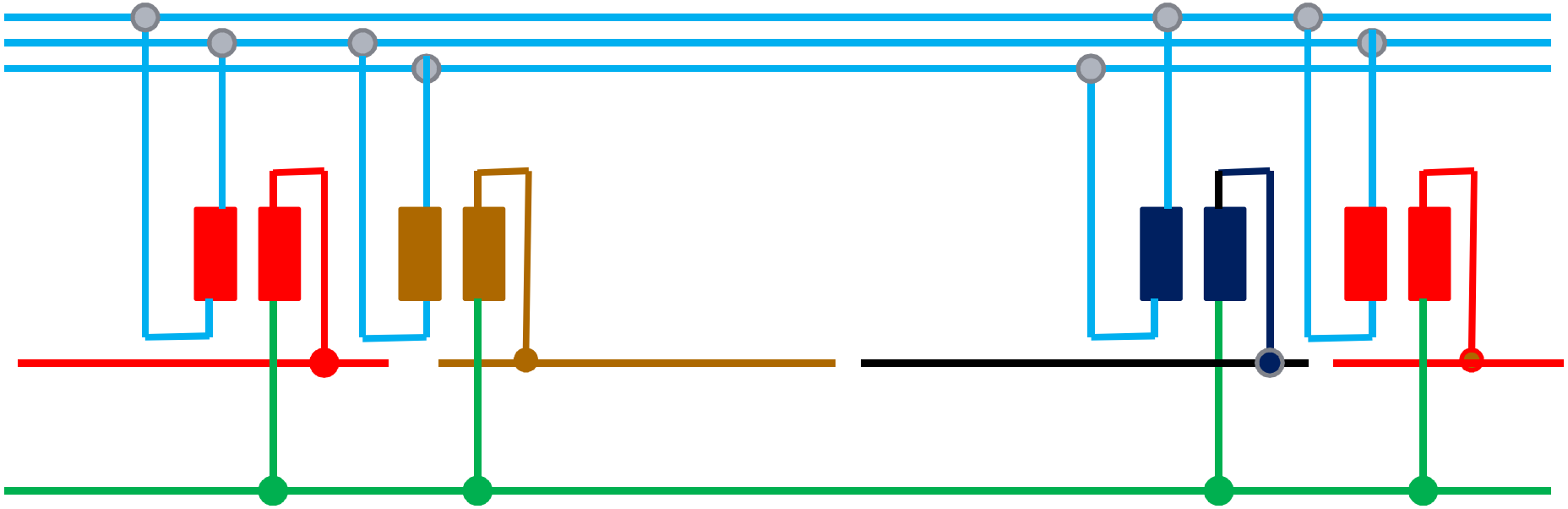
Aby mohl dodavatel elektrické energie zajistit všem odběratelům symetrii dodávaného napětí, může připustit nesymetrický odběr jen do určité výše.
Přibližně platí, že nesymetrie napětí odpovídá poměru nesymetricky odebíraného výkonu ku zkratovému výkonu v místě odběru:

$\Delta U / U = P_n / S_k$

Pro jednotlivé odběratele stanoví PNE 33 3430 mezní hodnotu nesymetrického odběru 0,7 %, platnou pro 10 minutové maximum.

Napájení elektrických drah 25 kV – současný stav

Trakční transformovny na železnicích elektrizovaných systémem 25 kV jsou zpravidla opatřeny dvojicí jednofázových transformátorů.
Tyto transformátory jsou obvykle ve standardním zapojení provozovány v zapojení do V:
- jeden transformátor, připojený na primární straně ke dvojici fází DS, napájí úsek od napájecí stanice k začátku trati,
- druhý transformátor, připojený na primární straně k jiné dvojici fází DS, napájí úsek od napájecí stanice ke konci trati.



Napájení elektrických drah 25 kV – současný stav

V případě aplikace trakčních transformátorů zapojených do V je trakční vedení napájeno nespojitě, jednotlivé napájené úseky mají různé fázové úhly napětí .

V důsledku střídání fází vznikají v trakčním vedení místa přerušeného napájení.
Místa přerušeného napájení jsou nyní umístěna jak u každé trakční napájecí stanice (TNS), tak zhruba uprostřed mezi nimi.

Uprostřed mezi sousedními TNS je umístěna podélná spínací stanice, která je v základním provozním stavu rozpojena.

Při typické vzdálenosti trakčních napájecích stanic 50 km se tedy zhruba každých 25 km mění fáze napětí 25 kV v trakčním vedení.

V místech střídání fází je v trakčním vedení vloženo neutrální pole, přes které musí vlaky projíždět s vypnutým odběrem proudu, aby nezpůsobily mezifázový zkrat.

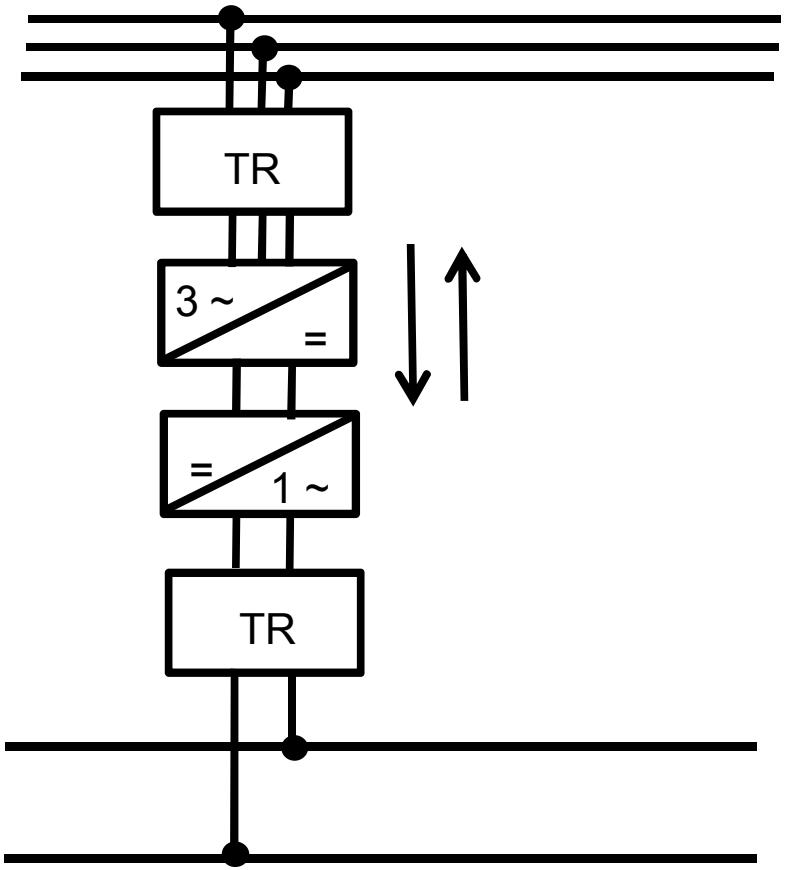
Systém jednotné fáze
Nikoliv 25 kV 50 Hz R/S/T, ale 25 kV 50 Hz R

Výhody systému jednotné fáze:

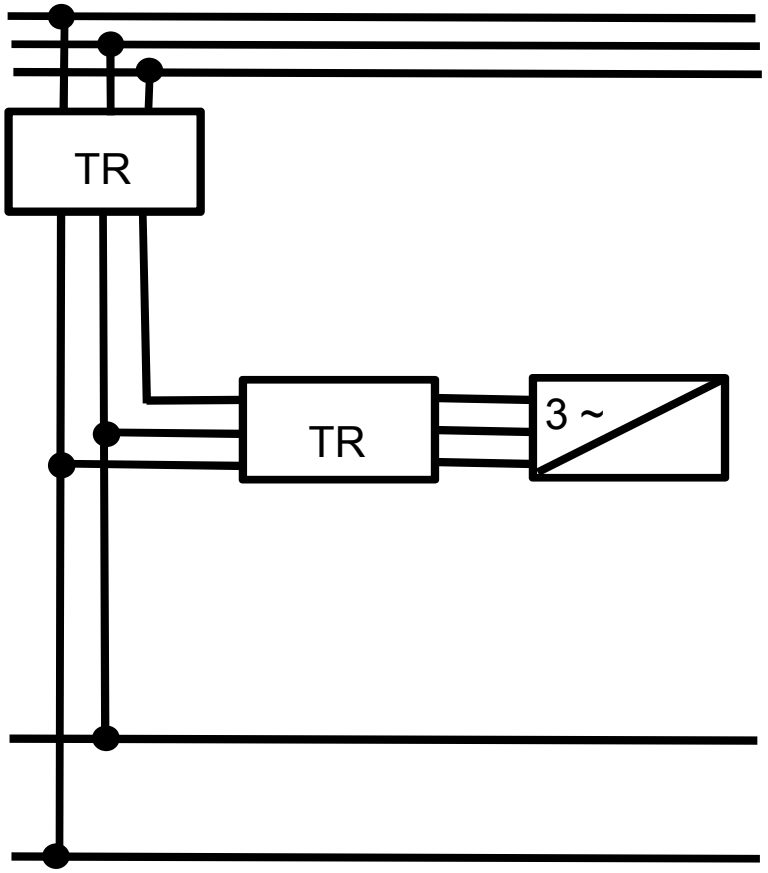
- **jednodušší trakční vedení (bez střídání fází s neutrálními poli),**
- **dvoustranné napájení,**
- **spojité napájení vozidel (trakce, pomocné pohony a klimatizace),**
- **spojité rekuperační brzdění s předáváním energie mezi vozidly i na velké vzdálenosti (minimální zpětné přetoky do distribuční sítě 110 kV),**
- **systémové pojetí elektrického napájení drah (ne jednotlivé tratě, ale síť) .**

Připojení napájecích stanic železnic 25 kV 50 Hz – systém jednotné fáze k distribuční síti 3 x 110 kV 50 Hz

napájecí stanice s kaskádou dvou měničů (3AC/DC plus DC/1 AC)



trakční transformovna s paralelním balacérem (3 AC/ 1 AC)



Konverze systému 3 kV na 25 kV

SIEMENS
Ingenuity for life

Vyšší přenosová schopnost systému 25 kV ve srovnání se systémem 3kV:

$P/\Delta = U^2/R$

umožňuje zásadním způsobem zvětšit vzdálenost trakčních napájecí stanic.

Díky k tomu lze změnit topologii rozmístění trakčních napájecích stanic (TNS):

- **opustit metodu „korálků na niti“ (TNS podél trati na vzdálenost kolem 25 km),**
- **aplikovat metodu „sluníček“ (TNS v železničních uzlech napájejí paprskovitě okolní tratě,**
- **aplikovat metodu „rybí kost“ (TNS umístěné podél hlavních tratí napájejí i okolní odbočné tratě a to na značnou vzdálenost).**

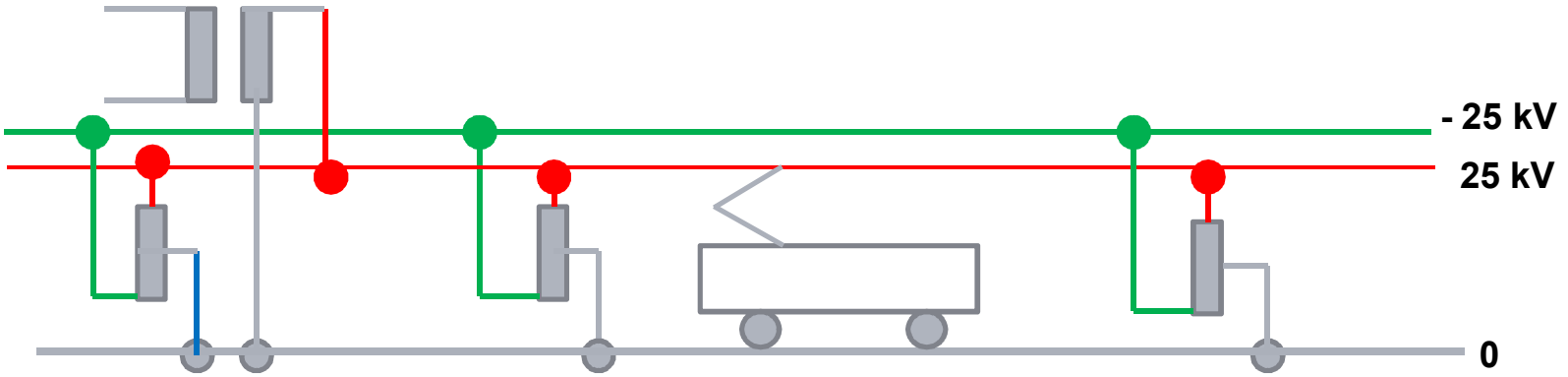
Těmito metodami lze při použití systému 25 kV zásadním způsobem snížit počet nově budovaných TNS při elektrizaci tratí na severu ČR (zhruba na jednu desetinu ve srovnání se systémem 3 kV) a tím významně přispět k rentabilitě (uskutečnitelnosti) elektrizace tohoto území.

Napájení 2 x 25 kV (netýká se vozidel, ale rozvodu energie)

Základní požadavek na napájecím systém:

- **dostatečný výkon (po dobu rozjezdu: cca 20 MW pro 400 m dlouhou vysokorychlostní trakční elektrickou jednotku),**
- **spolehlivý odběr rekuperované energie (vozidla bez brzdových odporníků),**
- **trvalé nepřerušované napájení trakčních i pomocných zařízení - spojité dvoustranné napájení trakčního vedení (bez střídaní fáze). Měničové napájecí stanice symetrickým odběrem z distribuční sítě 3 x 110 kV 50 Hz,**
- **stabilita velikosti napájecího napětí (systém 2 x 25 kV 50 Hz s negativním napájecím vodičem).**

=> Zvýšení přenosové schopnosti vedení ($\Delta P/P = R/U^2$) dvojnásobným napětím v rozvodu



Vize budoucí (bezemisní) železnice v ČR – ostatní tratě

Podle kritéria limitního dopravního toku (t/den) , respektive podle kritéria trakční energetické náročnosti (kW/km) rozdělit do dvou kategorií:

a) tratě ekonomicky vhodné k elektrizaci (dalších cca 2 000 km)
(jejich pevná trakční zařízení budou sloužit k zajištění napájení vozidel na nich provozovaných, i k napájení zásobníků energie vozidel provozovaných na okolních tratích bez elektrizace),

a) tratě ekonomicky nevhodné k elektrizaci (provoz na nich budou zajišťovat vozidla se zásobníky energie)

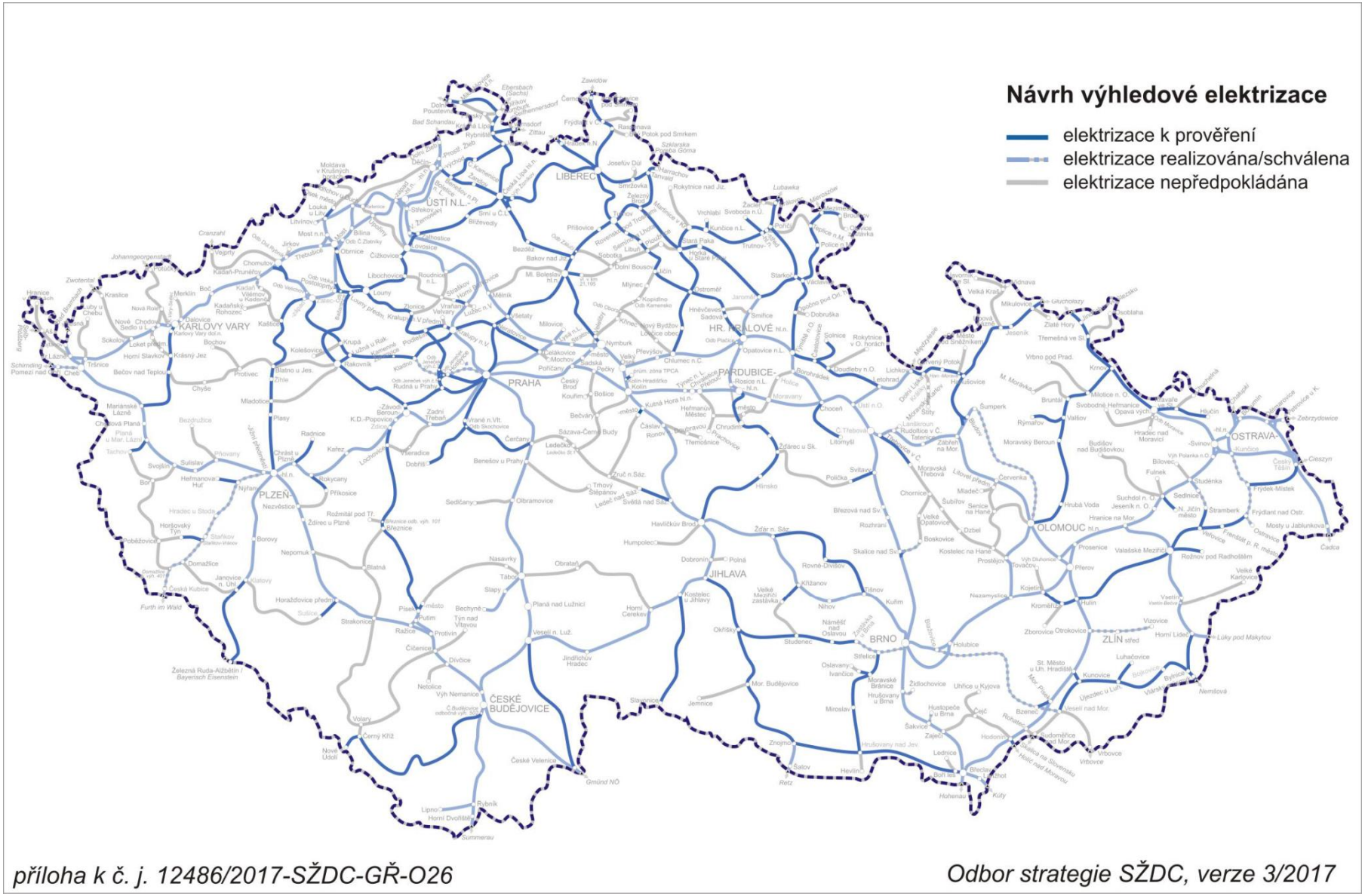
Motivace k rozvoji elektrizace železnic

- je smysluplné elektrifikovat tratě, na kterých MD ČR objednává intenzivní dálkovou dopravu – v opačném případě si z výběrových řízení vzešlí dopravci pořídí vozidla na naftu a na dalších 30 let bude konzervován současný stav motorového provozu (Plzeň - Domažlice, Jaroměř – Trutnov, Praha – Turnov, Staré Město – Luhačovice/Bojkovice/Veselí, Brno – Jihlava, Brno – Veselí nad Moravou, Šumperk – Jeseník, …)

- je smysluplné elektrifikovat tratě, na kterých kraje objednávají intenzivní regionální dopravu – v opačném případě si z výběrových řízení vzešlí dopravci pořídí vozidla na naftu a na dalších 30 let bude konzervován současný stav motorového provozu (Praha – Kladno – Rakovník, Praha - Rudná – Beroun, Český Těšín - Ostrava – Valašské Meziříčí – Hulín - Kojetín, Pardubice – Chrudim, Olomouc – Uničov, Brno – Veselí nad Moravou, …),

- je smysluplné elektrifikovat tratě, které mají potenciál rozvoje dálkové nákladní dopravy (Mladá Boleslav – Praha/Nymburk, Plzeň – Česká Kubice, Jihlava – Znojmo, Týniště nad Orlicí – Letohrad /Solnice,…)

Výhled elektrizace tratí SŽDC



Cesta k bezemisní železnici

Je rozumné bezodkladně přistoupit k plošné elektrizaci všech k tomu vhodných tratí – docílit konečný stav elektrizace co nejdříve.

Principiální zásadou je již vůbec pro českou železnici nenakupovat žádná nová vozidla se spalovacími motory, a to okamžitě:

- **vozidla se spalovacími motory jsou investičně i provozně dražší, než elektrická vozidla,**
- **osobní automobily a autobusy přejdou v rozmezí let 2020 až 2030 na elektřinu,**
- **nová na trhu dostupná vozidla se spalovacími motory mají vyšší spotřebu paliva, než starší dosud používaná vozidla,**
- **investice do vozidel se spalovacími motory by na nejbližších 30 let zmařila investici do budoucí elektrizaci trati,**
- **pozdější elektrizace zmaří investici do nově pořízených naftových vozidel,**
- **v ČR se již schválenou elektrizací tratí uvolní značný počet zánovních naftových vozidel.**

Analogie s kontroverzním nákupem parních lokomotiv v druhé polovině padesátých let je pro nás velkým poučením (využily jen třetinu své možné životnosti).

V ČR je připravována rozsáhlá elektrizace železničních tratí – již schválené projekty

trať	ze stanice	do dstanice	délka
			km
120	Praha-Bubny	Kladno	29
132	Kadaň-Prunéřov	Kadaň předměstí	6
134	Louka u Litvínova	Litvínov	2
179	Cheb	Pomezí n. Ohří st hr.	11
180	Plzeň-Jižní Předměstí	Domažlice	58
180	Domažlice	Česká Kubice st. hr.	15
240	Brno-Horní Heršpice	Zastávka u Brna	20
253	Hrušovany u Brna	Židlochovice	3
254	Šakvice	Hustopeče	7
262	Skalice nad Svitavou	Boskovice	5
290	Olomouc	Šumperk	57
323	Ostrava-Kunčice	Frýdlant nad Ostravicí	24
324	Frýdlant nad Ostravicí	Ostravice	7
325	Sedlnice	Štramberk	15
331	Otrokovice	Vizovice	25
340	Blažovce	Veselí nad Moravou	70
			354

Elektrický pohon (elektrická trakce)

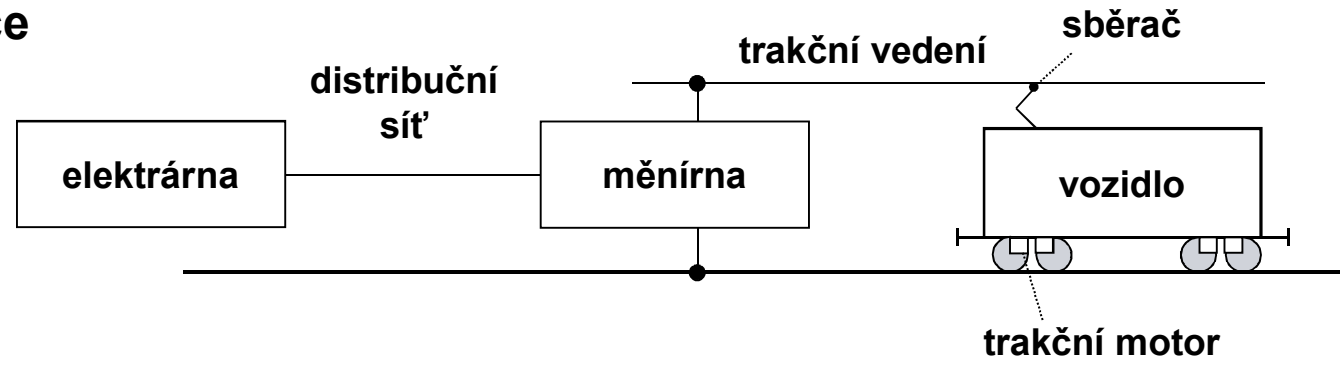
- **závislá el. trakce (potřebuje pevná trakční zařízení)**
  - **vozidlo je prostřednictvím sběrače a trakčního vedení (trolejový drát, přívodní kolejnice) napájeno ze stacionárního zdroje elektrické energie**

- **nezávislá el. trakce (nepotřebuje pevná trakční zařízení)**
  - **vozidlo je napájeno ze zdroje elektrické energie, který je jeho součástí**

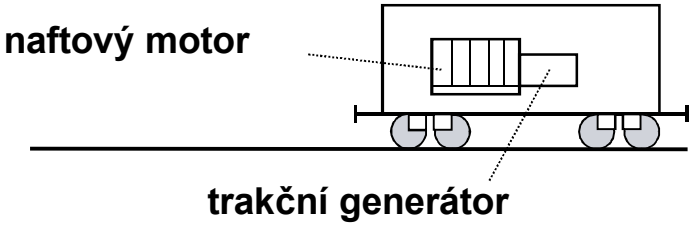
- **polozávislá el. trakce (občas potřebuje pevná trakční zařízení)**
  - **vozidlo je napájeno ze zásobníku elektrické energie, který je jeho součástí, ale ten je nutno občas dobít ze stacionárního zdroje elektrické energie**

Elektrická trakce

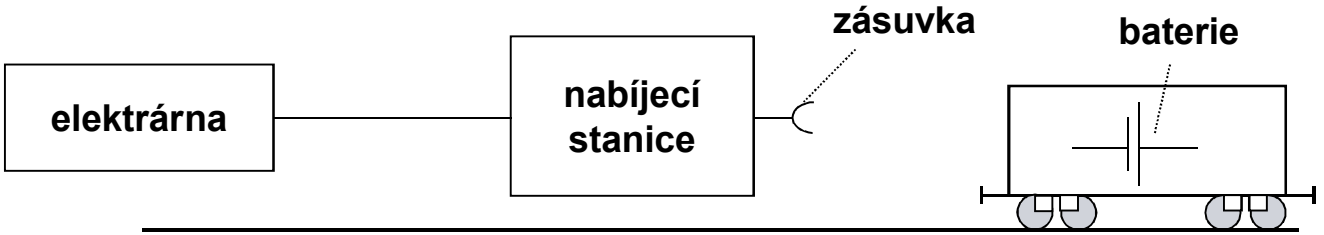
Závislá el. trakce



Nezávislá el. trakce



Polozávislá el. trakce



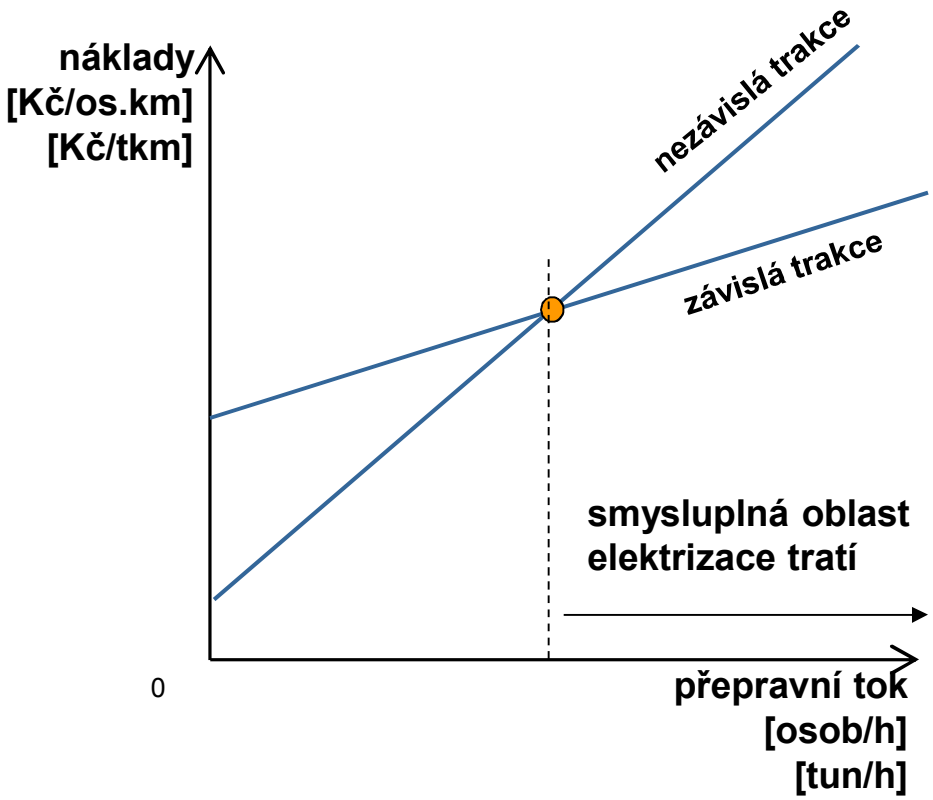
Závislá trakce a nezávislá trakce

Závislá trakce

- vysoké fixní náklady (pevná trakční zařízení)
- nízké variabilní náklady (levná elektrická energie)

Nezávislá trakce

- nízké fixní náklady
- vysoké variabilní náklady (drahá kapalná paliva)



Oblasti optimálního využití

Málo intenzivní provoz => výhodnější (levnější) je nezávislá trakce

Hodně intenzivní provoz => výhodnější (levnější) je závislá trakce

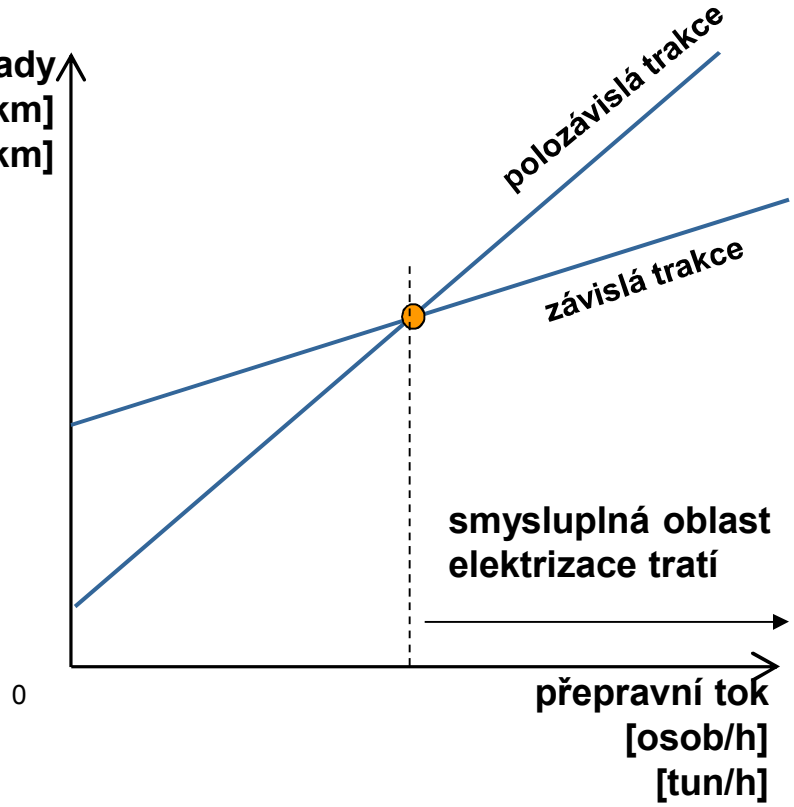
Závislá trakce a polozávislá trakce

Závislá trakce

- **vysoké fixní náklady (pevná trakční zařízení)**
- **nízké variabilní náklady (levná elektrická energie)**

Polozávislá trakce

- **nízké fixní náklady**
- **vyšší variabilní náklady (náklady na akumulaci energie)**



Oblasti optimálního využití

Málo intenzivní provoz => výhodnější (levnější) je polozávislá trakce

Hodně intenzivní provoz => výhodnější (levnější) je závislá trakce

Polozávislá trakce (vozidla se zásobníkem el. energie)

Vítaná (toužebně očekávaná) náhrada nezávislé trakce - výhody:

- **nezávislost na uhlovodíkových palivech**
- **provoz bez spalin**
- **nízká hlučnost**
- **možnost rekuperovat brzdnou energii**

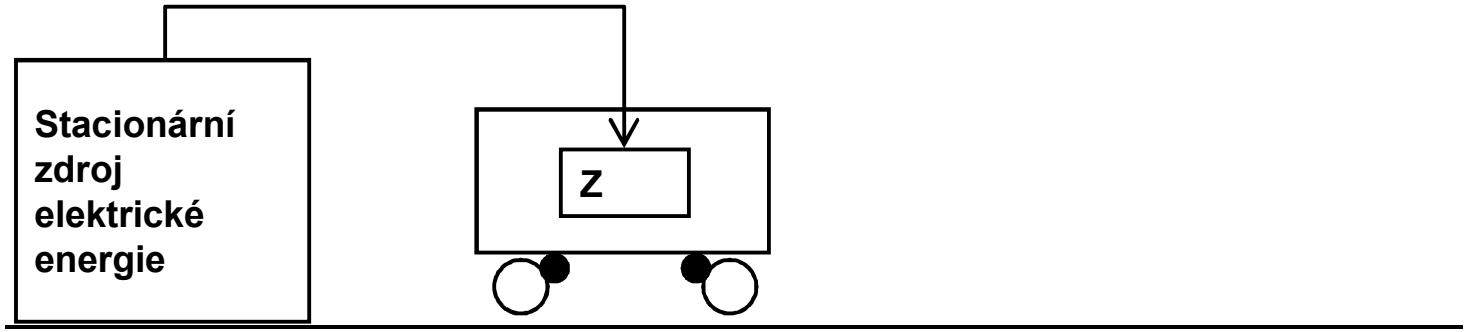
Nevýhody tradičních zásobníků el. energie (akumulátorových baterií - olověných resp. niklokadmiových):

- **nízká měrná energie (cca 25 kWh/t u akumulátorových baterií versus 4 800 kWh/t u uhlovodíkových paliv)**
- **nízký měrný výkon (cca 50 kW/t u akumulátorových baterií versus 300 kW/t u dráhových spalovacích motorů)**
- **ztráty energie (střední účinnost cca 70%)**
- **omezená životnost (jen 1 000 - 2 000 cyklů)**
- **vysoká cena (5 000 - 10 000 Kč/kWh)**

=> moderní akumulátory s vyšší energií, výkonem a počtem cyklů

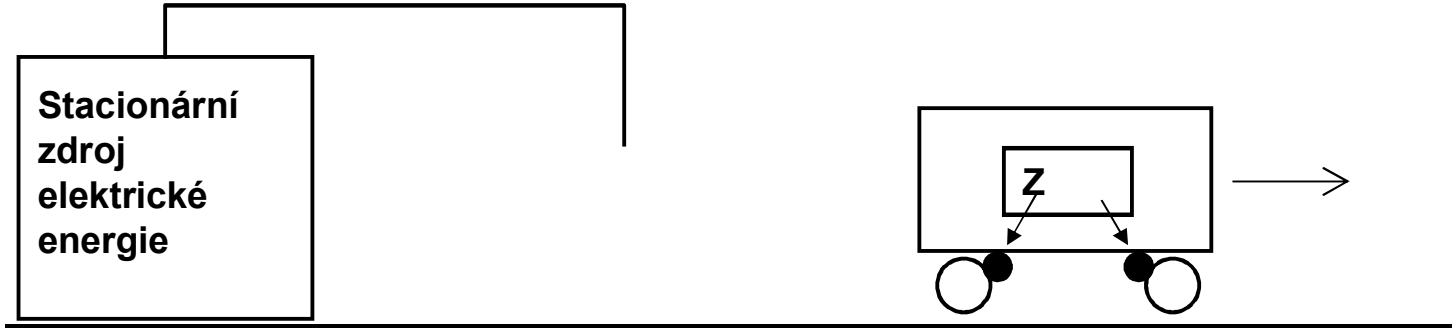
Vozidlo se zásobníkem energie

1. Fáze-nabíjení



Zásobník energie na vozidle je nabíjen ze stacionárního zařízení

2. Fáze - jízda



Pohon vozidla je napájen ze zásobníku na vozidle

Energetická bilance polozávislých vozidel

Vytvořená trakční práce (A_t):

$$A_t = k_A \cdot m_z \cdot \eta \cdot (1 - \beta)$$

k_A … měrná energie zásobníku (kWh/t),
m_z … hmotnost zásobníku energie (t),
η … účinnost trakčního pohonu
β ... poměrný příkon vedlejší spotřeby (osvětlení, klimatizace, …),

Spotřebovaná trakční práce (A_t):

$$A_t = p \cdot m \cdot g \cdot L / 3\,600$$

p … měrný trakční odpor (N/kN),
m … hmotnost vozidla (t),
g … gravitační zrychlení (9,81 m/s^2),
L … ujetá dráha (dojezd) (km)

Teoretický akční rádius (dojezd) polozávislých vozidel

Dojezd (akční rádius) – Kummlerův vztah:

$$L = 3\,600 \cdot k_A \cdot k_m \cdot \eta \cdot (1 - \beta) / (p \cdot g)$$

k_A … měrná energie zásobníku (kWh/t),
k_m … poměrná hmotnost zásobníku energie ($k_m = m_z / m$),
η … účinnost trakčního pohonu
β ... poměrný příkon vedlejší spotřeby (osvětlení, klimatizace, …),
p … měrný trakční odpor (N/kN),
m_z … hmotnost zásobníku (t)
m … hmotnost vozidla (t),
g … gravitační zrychlení (9,81 m/s^2).

Dojezd polozávislých vozidel je omezený.
Vysoké hodnoty dojezdu vyžadují vysokou poměrnou hmotnost zásobníku energie

Tradiční pojetí polozávislých vozidel

- **zásobník energie s nízkou měrnou energií (25 kW/t),**
- **zásobník energie s nízkým měrným výkonem (30 kW/t),**
- **zásobník energie schopný jen pomalého nabíjení (8 hodin),**
- **odporové řízení rozjezdu,**
- **maření brzdové energie (bez rekuperace),**
- **nabíjení ze stacionárního zdroje kabelem při stání vozidla,**
- **nabíjení jednou denně,**
- **napájení pohonu jen ze zásobníku energie (i na elektrizovaných tratích)**

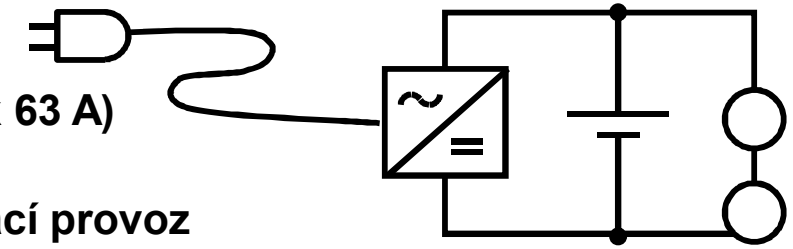
=> hmotnost zásobníku cca 40 % celkové hmotnosti vozidla (24 t / 60 t)

Akumulátorová posunovací lokomotiva A 219.0 s nabíjením ze sítě 3x400 V, 50 Hz (ČKD 1993)

B_0´ 41 t

Akumulátor … 360 kW

Napájení … 40 kW (3x400 V, 50 Hz x 63 A)



Zkušební provoz na řadě nádraží v ČR, ověřovací provoz

též u DB (München) a ÖBB (Wien)

- **prokázaná schopnost nahradit motorovou lokomotivu,**
- **tichý a čistý provoz,**
- **k nabíjení postačují běžné provozní přestávky.**

Olověný akumulátor:

U = 640 V

C = 300 Ah

A = C · U = 192 kWh

m = 8 t

Disponibilita polozávislých vozidel

Polozávislá vozidla nelze nepřetržitě používat, je nutno vyhradit čas pro nabíjení zásobníku energie.

Doba nabíjení snižuje disponibilitu vozidla:

$k_t = T_p/(T_p+T_n)$

doba provozu
$T_p = A / (E \cdot v_c)$

doba nabíjení
$T_n \ldots A / (\eta_b \cdot P_n)$

Po určité době jízdy po tratích bez trakčního vedení musí být vozidlo po potřebnou dobu dobíjeno.

Nová situace (současnost)

Pokrok v oblasti elektrických pohonů

- **vysoká účinnost**
- **schopnost rekuperačního brzdění**

Nové typy zásobníků energie

- dvouvrstvé kondenzátory ($k_P \approx 800$ kW/t, N = 1 000 000 cyklů),

- nové typy elektrochemických akumulátorů ($k_A \approx 100$ kWh/t, N = 3 000 cyklů)

Výhody:
- vysoká měrná energie,
- vysoký měrný výkon,
- vysoká účinnost,
- dlouhá životnost,
- bezúdržbovost.

Nové způsoby provozu

- **nabíjení na konečných,**
- **nabíjení na zastávkách,**
- **nabíjení za jízdy.**

Železnice a MHD: využití trakčního vedení k nabíjení (již vybudováno, vysoké výkony, příznivá cena energie)

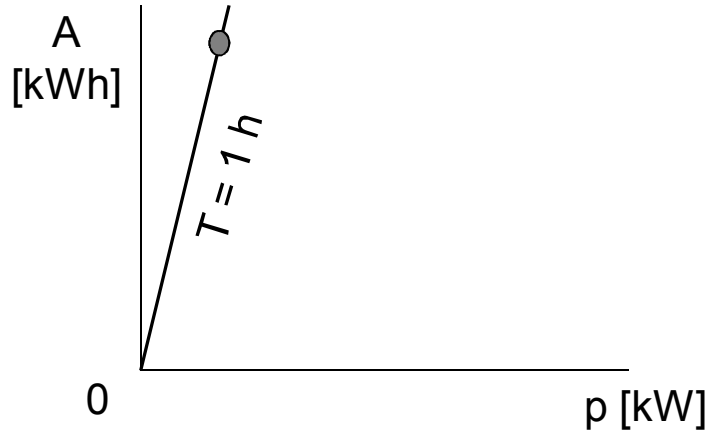
Ukládání elektrické energie v zásobníku elektrické energie

Technické prostředky:

1) Tradiční akumulátorové baterie (Pb)

charakteristické vlastnosti:

- ✶ **nízký krátkodobý výkon (25 kW/t),**
- ✶ **nízký trvalý výkon (5 kW/t),**
- ✶ **nízká účinnost (70%),**
- ✶ **nevelká energie (25 kWh/t),**
- ✶ **nízká životnost (1 500 cyklů),**
- ✶ **zvládnutá toxicita,**
- ✶ **zvládnutá bezpečnost,**
- ✶ **mnoho článků o nízkém napětí (2V)**



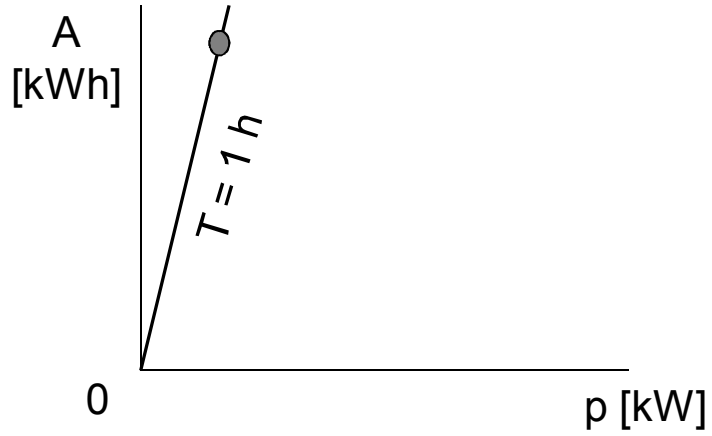
Pro srovnání
- naftový motor: 300 kW/t,
- nafta:12 000 kWh_t/t, 5 000 kWh_m/t

Ukládání elektrické energie v zásobníku elektrické energie

2) Moderní akumulátorové baterie (Lithiové)

charakteristické vlastnosti:

- ✶ **vyšší krátkodobý výkon (200 kW/t),**
- ✶ **vyšší trvalý výkon (50 kW/t),**
- ✶ **vyšší účinnost (90 %),**
- ✶ **vyšší energie (100 kWh/t),**
- ✶ **nepříliš vysoká životnost (3 000 cyklů),**
- ✶ **zvládnutá toxicita,**
- ✶ **zvládnutá bezpečnost,**
- ✶ **mnoho článků o nízkém napětí (3 V)**



Pro srovnání

- naftový motor: 300 kW/t,

- nafta:12 000 kWh_t/t, 5 000 kWh_m/t

Moderní akumulátorové baterie (Lithiové)

Vlastnosti:

- **měrný výkon kolem 50 kW/t trvale,**
- **měrný výkon kolem 200 kW/t krátkodobě**
- **měrná energie kolem 100 kWh/t,**
- **čas nabití a vybití T = A / P = 100 kWh / 50 kW = 2 h,**
- **účinnost 90 %,**
- **životnost N = 3 000 cyklů.**

$\Rightarrow$ **vhodné pro zdroj energie a středního výkonu**

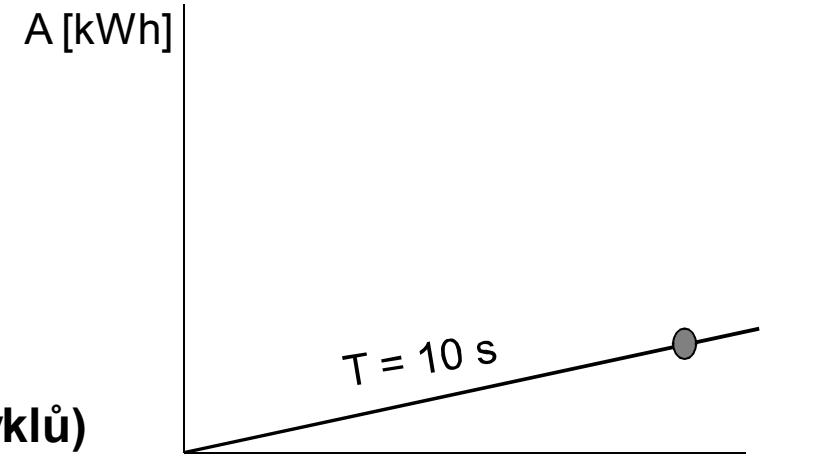
Cena:
Přibližně 12 000 Kč/kWh

Náklady na uschování energie:

C = C / N = 12 000 / 3 000 = 4 Kč/kWh

Ukládání elektrické energie v zásobníku elektrické energie

3) kondenzátorové zásobníky (dvouvrstvé vysoce kapacitní kondenzátory)



charakteristické vlastnosti:

- ✶ **vysoký výkon (800 kW/t)**
- ✶ **vysoká účinnost (95%)**
- ✶ **nízká energie (4 kWh/t)**
- ✶ **vysoká životnost (1 000 000 cyklů)**
- ✶ **problematická toxicita (agresivní elektrolyt na bázi organických rozpouštědel),**
- ✶ **problematická bezpečnost (hořlavost, výbušnost) ,**
- ✶ **mnoho do série zapojených článků o nízkém napětí (kolem 3 V)**

Pro srovnání

- naftový motor: 300 kW/t,

- nafta:12 000 kWh_t/t, 5 000 kWh_m/t

Vysokokapacitní dvouvrstvé kondenzátory

Kapacita kondenzátoru

$C = \varepsilon_r . \varepsilon_0 . S / x$

ε_r … relativní permitivita
ε_0 … permitivita vakua 8,85 . 10^{-12} Vs/Am
S … plocha elektrod,
x … vzdálenost elektrod

Princip dvouvrstvých kondenzátorů:
- velká plocha (mikroporézní uhlík, cca 2 000 m^2/g,
- malá vzdálenost (elektrická dvouvrstva, cca 10^{-8} m)
=> kapacita až 4 kF/ kg

Problém: pracovní napětí musí být nižší, než disociační napětí (u vody 2 x 0,6 V), u speciálních kapalin (organická rozpouštědla) zhruba 2 až 3 V
=> sériové řazení, pokles kapacity C´ = C / N

Vysokokapacitní dvouvrstvé kondenzátory

Vlastnosti:

- **velký měrný výkon (běžně kolem 800 kW/t),**
- **malá měrná energie (kolem 4 kWh/t),**
- **krátký čas nabití a vybití (T = A / P = 4 kWh / 800 kW = 0,005 h = 18 s,**
- **vysoká účinnost (90 %),**
- **vysoká životnost (N = 1000 000 cyklů).**

$\Rightarrow$ **vhodné pro krátkodobý zdroj vysokého výkonu**

Cena:
přibližně 300 000 Kč/kWh

Náklady na uschování energie:

C = C / N = 300 000 / 1 000 000 = 0,3 Kč/kWh

Parametry zásobníků energie

	Typ	k_A (kWh/t)	k_P (kW/t)	T (h)	c_S (Kč/kWh)	N	c_c/N (Kč/kWh)
	olověný	25	25	1	6 000	1 500	4
„pomalé“	**Lithiový**	100	200	0,5	12 000	3 000	4
„rychlé“	**ULTRACAP**	4	800	0,005	300 000	1 000 000	0,3

Cena za uskladnění 1 kWh

Ekonomika zásobníků energie

Energie odebraná ze zásobníku je proti volné elektrické energii dražší vlivem:

- ztát energie při nabíjení a vybíjení: $A_2 = A_1 . \eta$,
- poplatku na obnovu zásobníku: C/(N . A).

Cena elektrické energie ze zásobníku (včetně poplatku za obnovu):
$c_2 = c_1 / \eta + C/ A / N$
Cena energie čerpané ze zásobníku (při ceně vstupní energie c_1 = 2,50 Kč/kWh)

typ	η (%)	C/A (Kč/kWh)	N (počet cyklů)	c_2 (Kč/kWh)
olověný akumulártor	70	6 000	1 500	3,6 + 4 = 7,6
dvouvrstvý kondenzátor	95	300 000	1 000 000	2,6 + 0,3 = 2,9
moderní akumulátor	90	12 000	3 000	2,9 + 4 = 6,9

Porovnání cen elektrické energie na vozidle

Závislá trakce (elektřina 2,50 Kč/kWh)

$C = c_e / \eta_{ptz} = 2,5 / 0,85 = 2,9$ Kč/kWh

Nezávislá trakce (nafta 28 Kč/litr, 10 kWh/litr, účinnost spal. motoru 35 %)

$C = c_n / (H . \eta_m g) = 28 / (10 . 0,35) = 8$ Kč/kWh (plus náklady na údržbu spal. motoru)

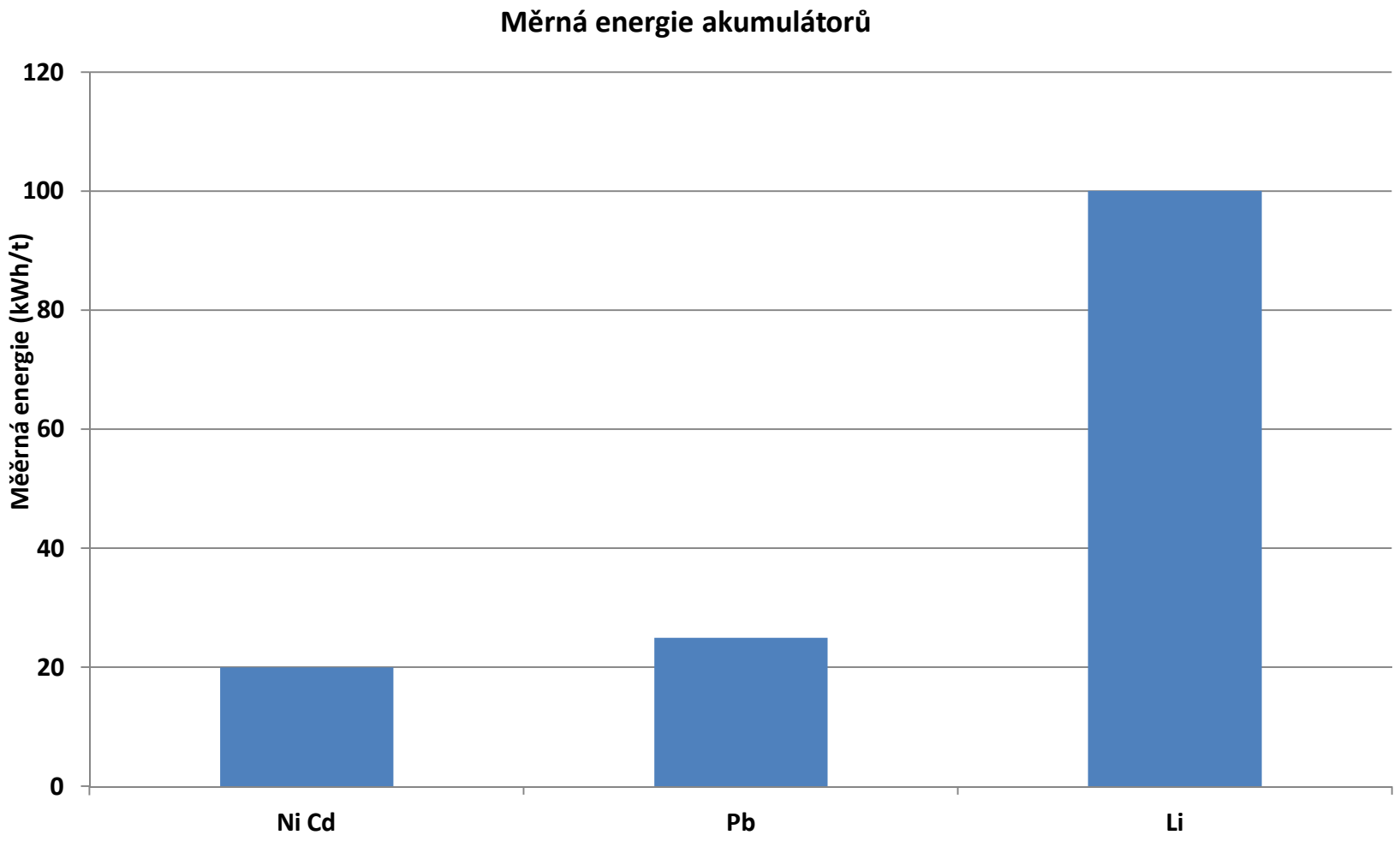
Polozávislá trakce

$C = c_e / (\eta_n . \eta_z) + C_z/N) = 2,5 /(0,95 . 0,9) + 4 = 3,3 + 4 = 7,1$ Kč/KWh (bezúdržbové)

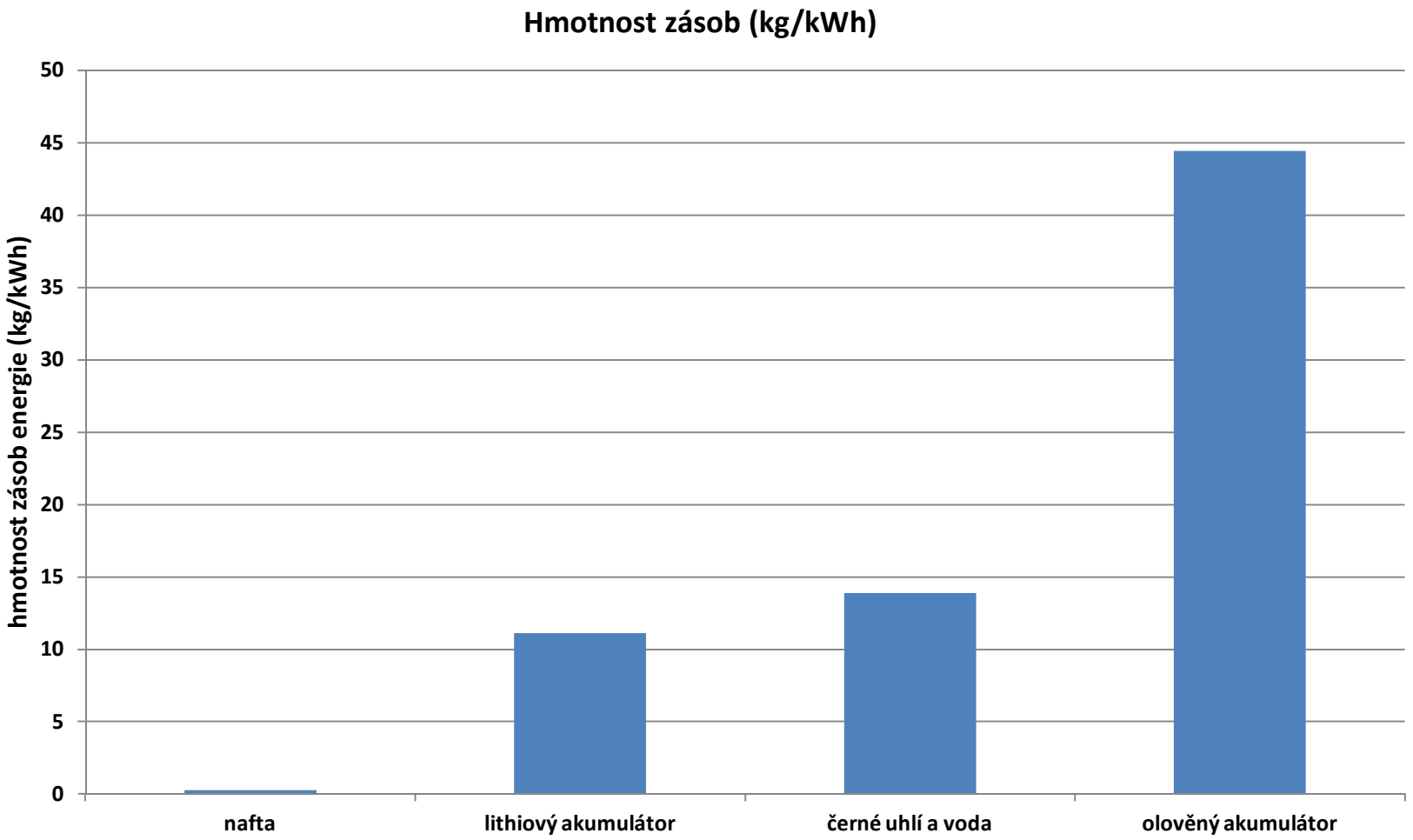
Rekuperace (jinak nevyužitá)

$C = c_e / (\eta_n . \eta_z) + C_z/N) = 0 /(0,95 . 0,8) + 4 = 0 + 4 = 4$ Kč/KWh

Lithiové akumulátory mají čtyřnásobně větší měrnou energii, než olověné



Lithiové akumulátory již jsou lehčí, než zásoby uhlí a vody pro parní stroj (2 kg černého uhlí a 12 kg vody na 1 kWh).
Ale mnohonásobně těžší, než nafta



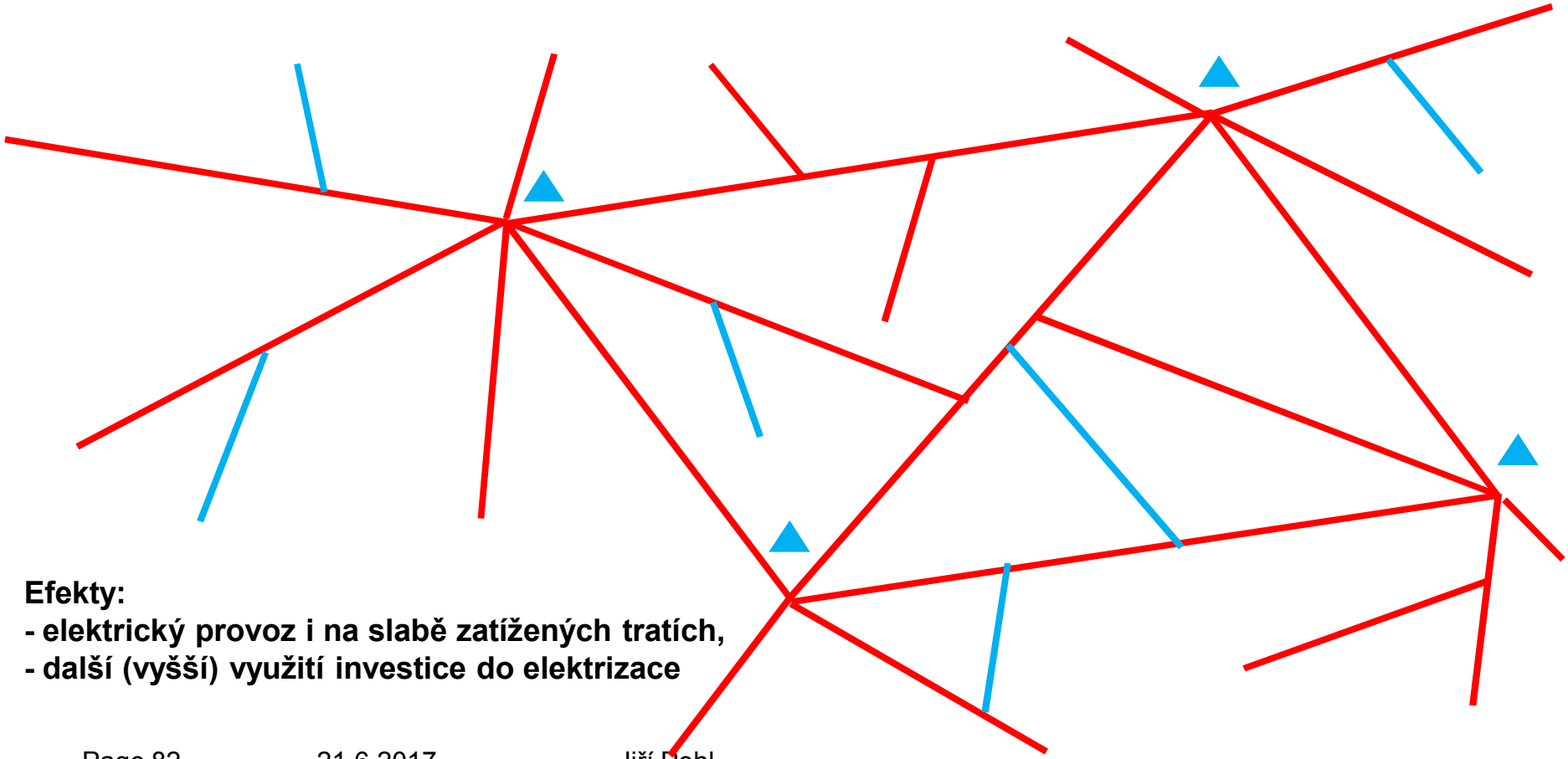
Nové pojetí polozávislých vozidel

- moderní zásobník energie s vysokou měrnou energií (100 kWh/t),
- moderní zásobník energie s vysokým měrným výkonem (150 kW/t),
- moderní zásobník energie schopný rychlého nabíjení (2 hodiny),
- snížení spotřeby energie rekuperací brzdové energie,
- nabíjení z trakčního vedení přes sběrač (v klidu i za jízdy),
- nabíjení vícekrát denně => zásobník stačí dimenzovat na kratší provoz,
- na elektrizovaných tratích napájení pohonu z trakčního vedení.

=> hmotnost zásobníku cca 4 % celkové hmotnosti vozidla postačuje na dojezd zhruba 100 km mezi místy nabíjení (elektrifikovanými tratěmi)

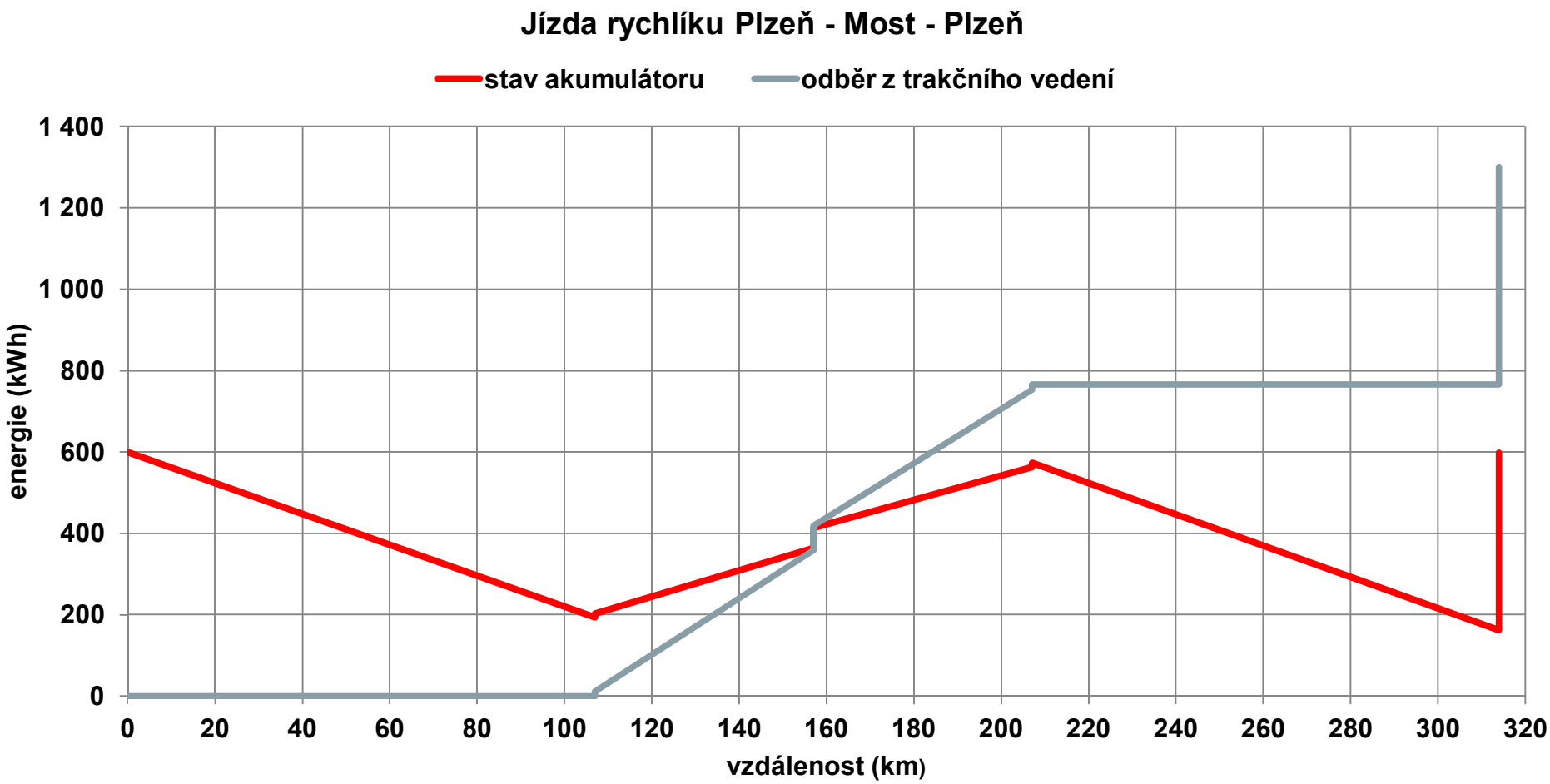
Návaznost elektrifikovaných a neelektrifikovaných tratí

Pevná trakční zařízení elektrifikovaných tratí tvoří energetickou síť k nabíjení akumulátorů vozidel používaných na neelektrifikovaných tratích



Efekty:
- elektrický provoz i na slabě zatížených tratích,
- další (vyšší) využití investice do elektrizace

Příklad aplikace BEMU



Pokrok v oblasti vozidel

Základní vývojové trendy v elektrotechnice

Polovodičová technika zcela změnila pojetí elektrických výzbrojí vozidel třemi nástroji:

a) Polovodičové měniče

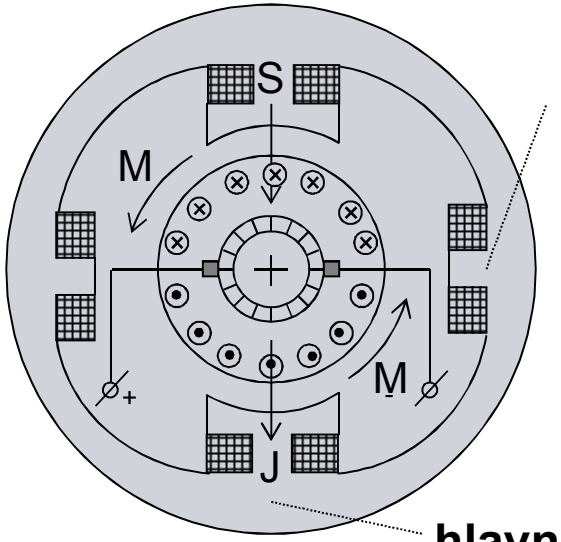
b) Počítačové řízení

c) Komunikace po sběrnici

To ovlivnilo zejména trakční pohony – trakční motory s komutátorem byly nahrazeny frekvenčně řízenými střídavými trakčními motory (soustrojím pulsní střídač – třífázový asynchronní respektive synchronní motor)

Komutátorové trakční motory

stejnosměrný resp. jednofázový (16⅔ Hz)
obsahuje komutátor - mechanický střídač
(uhlíkový kartáč plus měděné lamely komutátoru)



pomocné (komutační) póly

hlavní póly

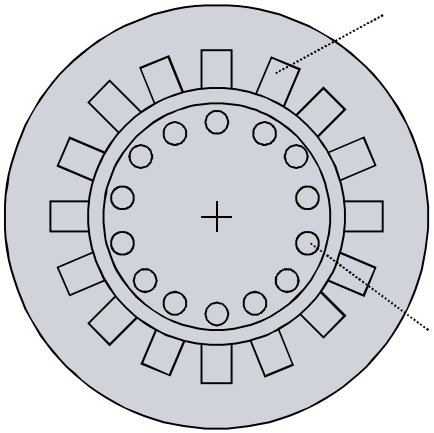
Nevýhody:
- **velký**
- **těžký**
- **limit parametrů (P.n)**
- **údržbově náročný**
- **choulostivý na nečistoty**
- **poruchový**

Výhody:
- **jednodušší napájení**

Směr proudu musí odpovídat polaritě pólů, pod kterým se vodič právě nachází => v rotoru stejnosměrného stroje teče střídavý proud.

Střídavé trakční motory

Asynchronní



třífázové vinutí v drážkách statoru

rotor - kotva klec nakrátko

Výhody (proti DC):

- menší
- lehčí
- levnější
- bezúdržbový
- spolehlivý
- odolný provozním vlivům

Nevýhody:

- vyžaduje měnič (pulzní střídač)

Frekvenčně řízené střídavé trakční pohony

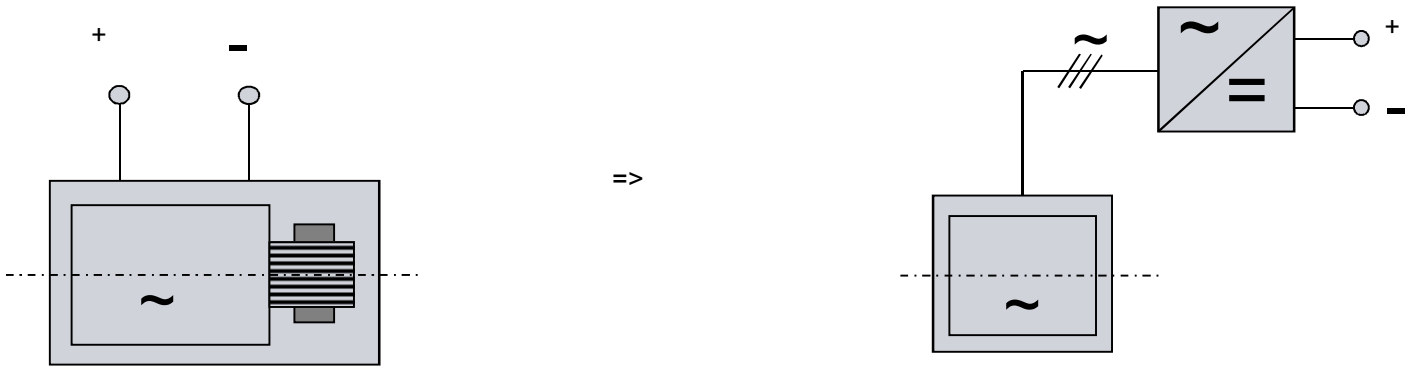
„Komutátor se přestěhoval z podvozku do strojovny“:

⇒ odolnější a údržbově nenáročný trakční motory,

⇒ menší a lehčí trakční motory,

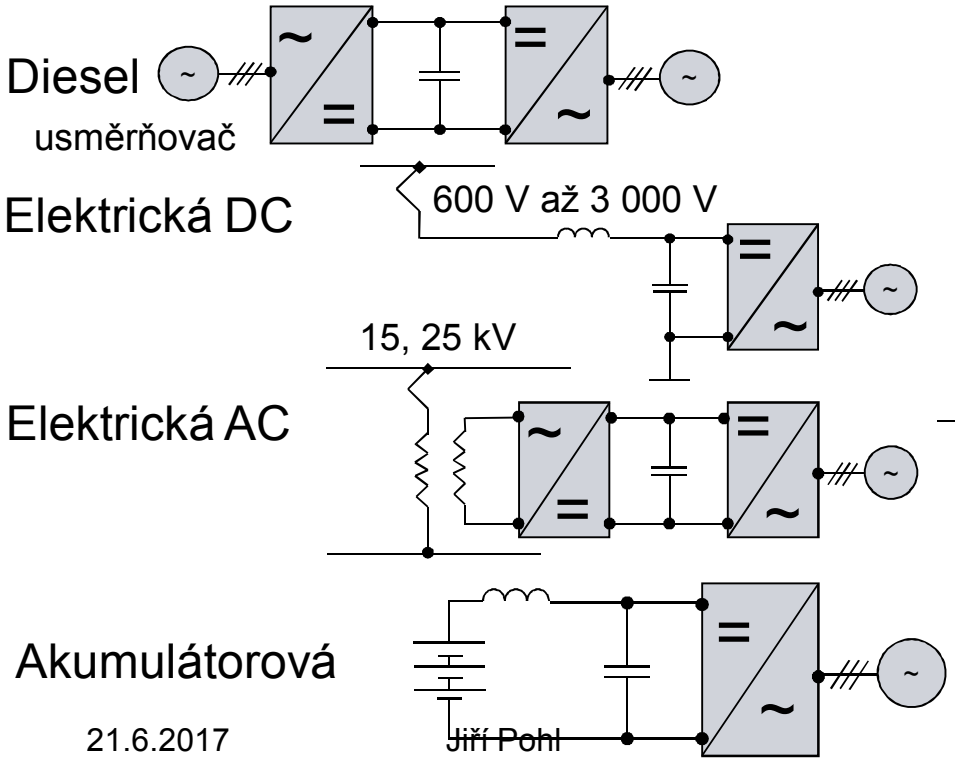
⇒ odolnější a údržbově nenáročná přístrojová část,

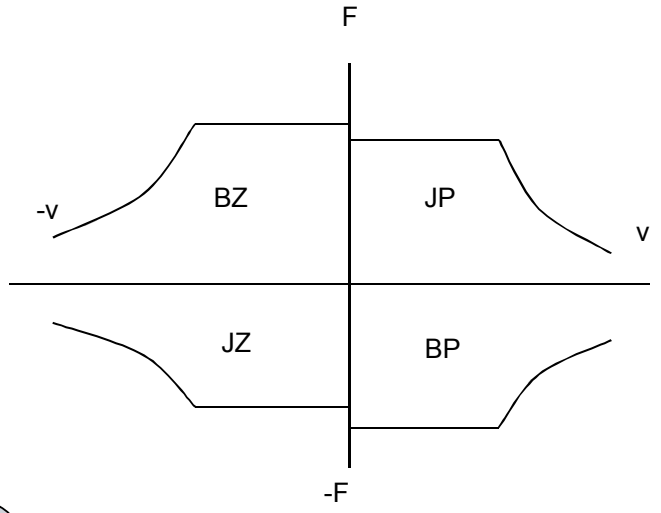
⇒ menší a lehčí přístrojová část



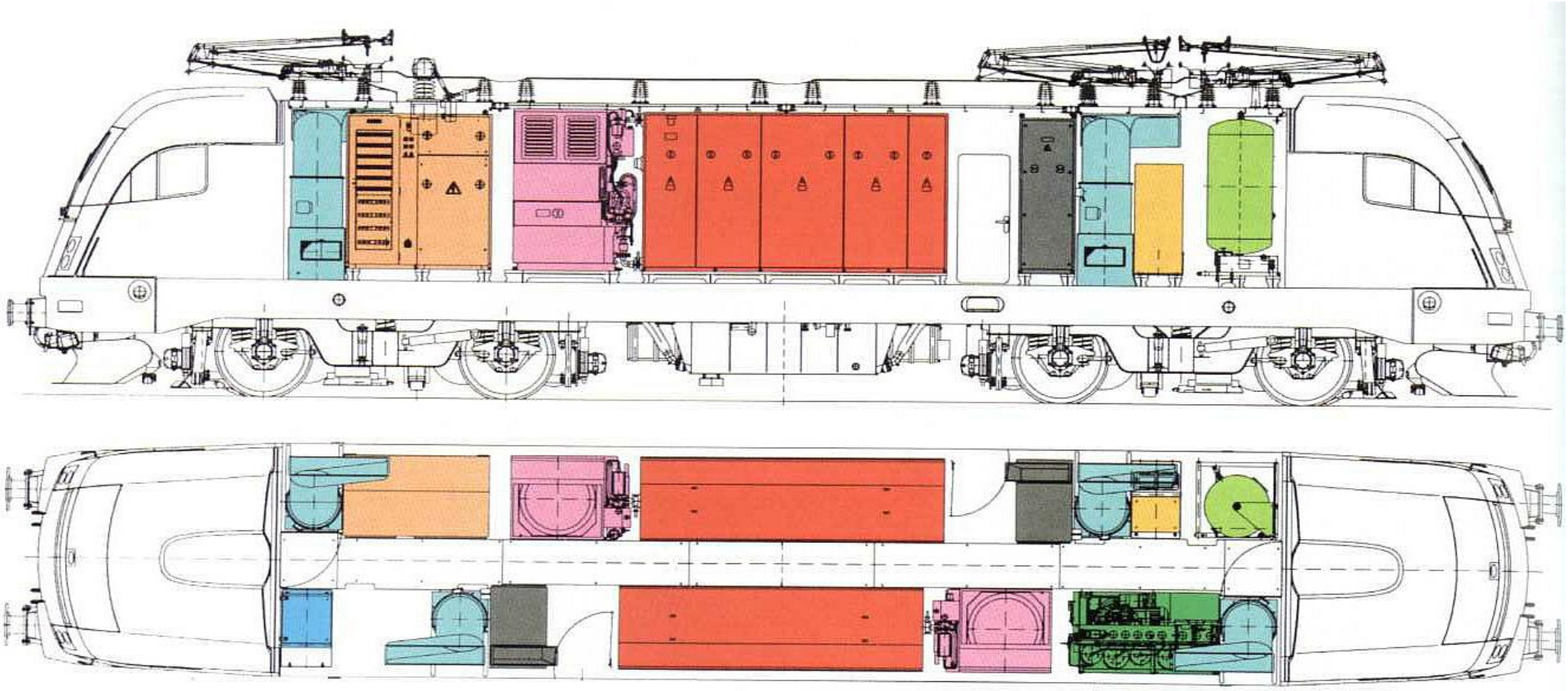
Současnost: „Všechna elektrická vozidla jsou stejná“

Dieselelektrická
Elektrická (závislá) - DC
Elektrická (závislá) - AC
Akumulátorová
(lokomotivy, jednotky, trakční vozy, metro, tramvaje, trolejbusy, ...)



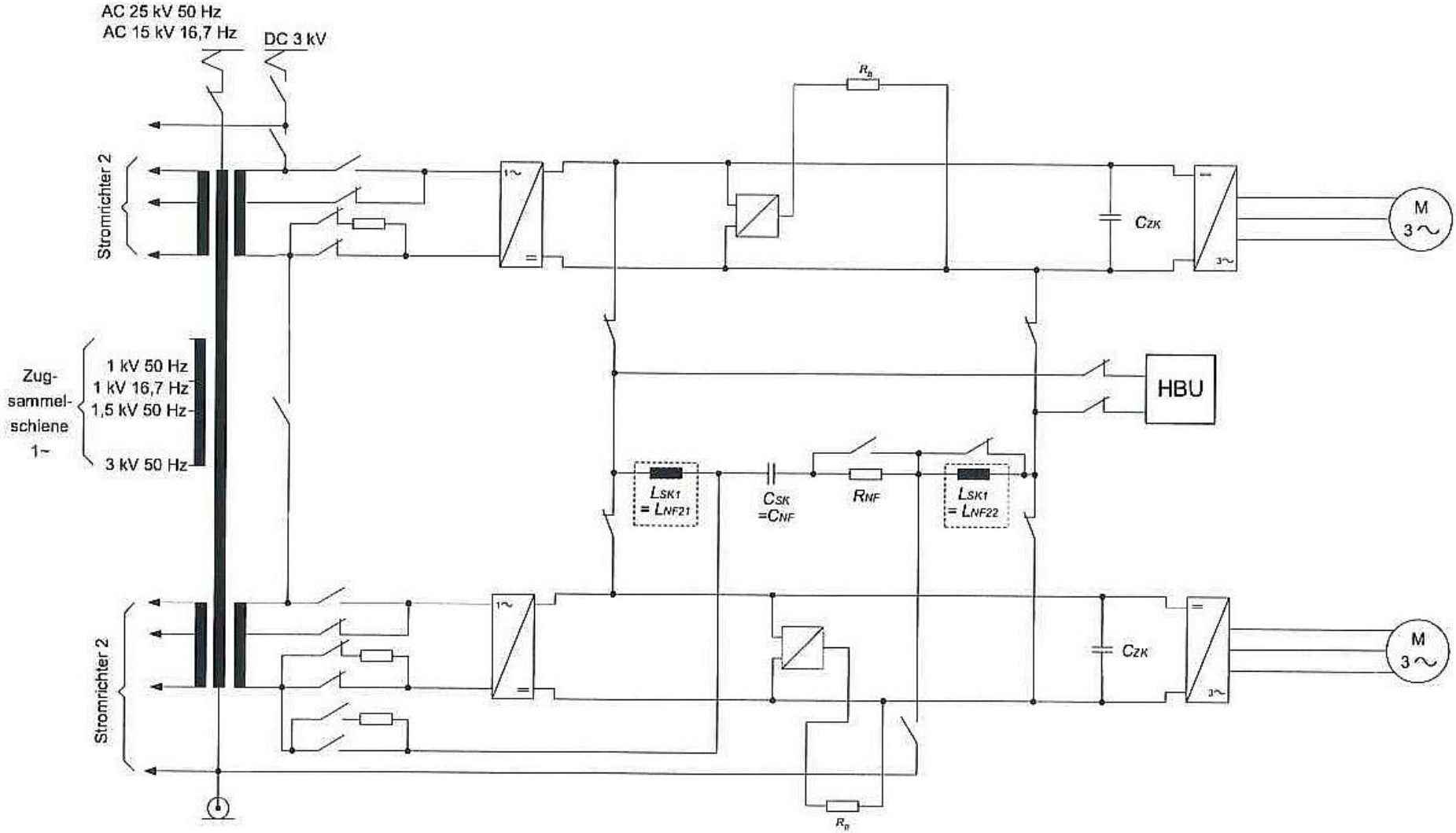


Komponenty ve strojovně lokomotivy

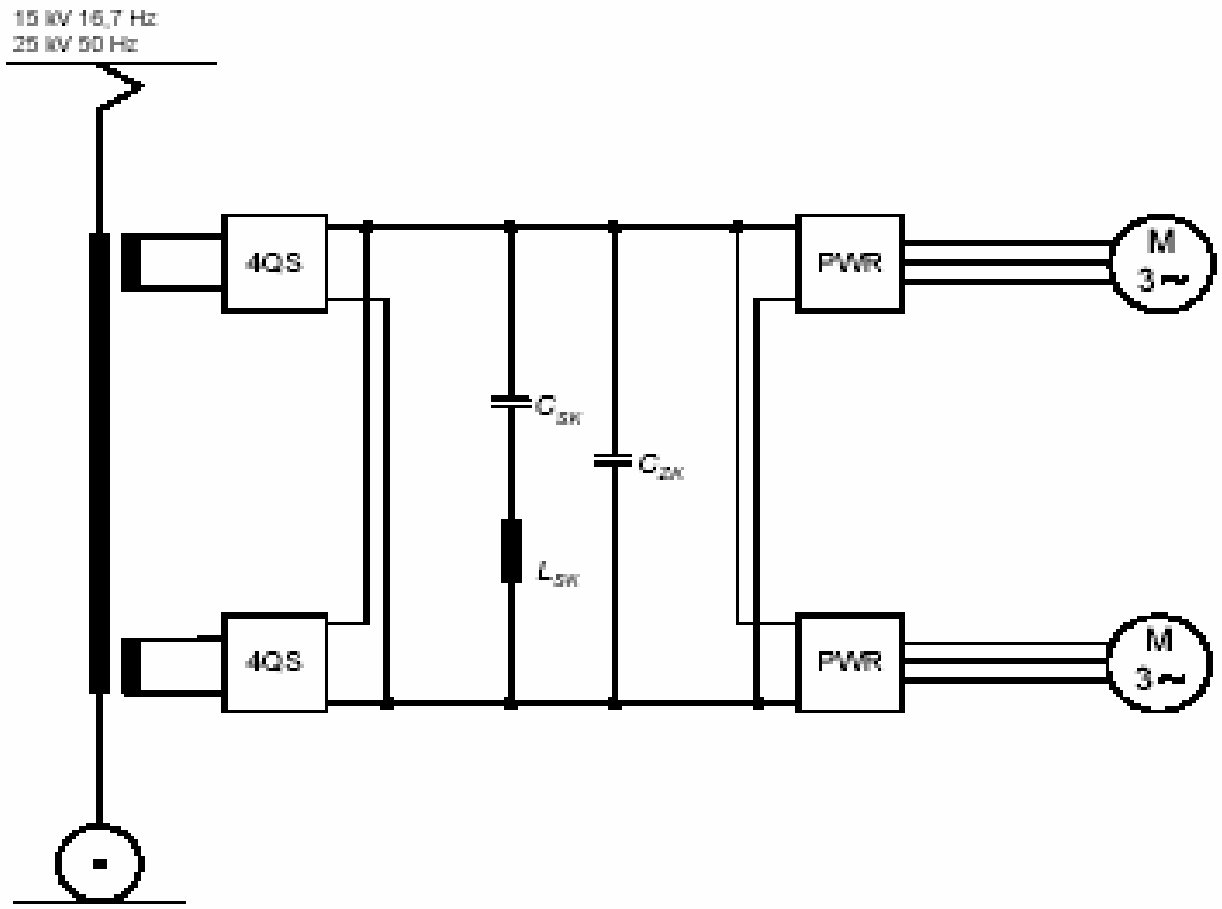


- Ventilátor trakčního motoru
- Skříň pomocných pohonů
- Chladič vody a oleje
- Trakční měnič
- Pomocný měnič
- Vlakový zabezpečovač LZB
- Hlavní vzduchojem
- Elektronická zařízení
- Brzdná zařízení

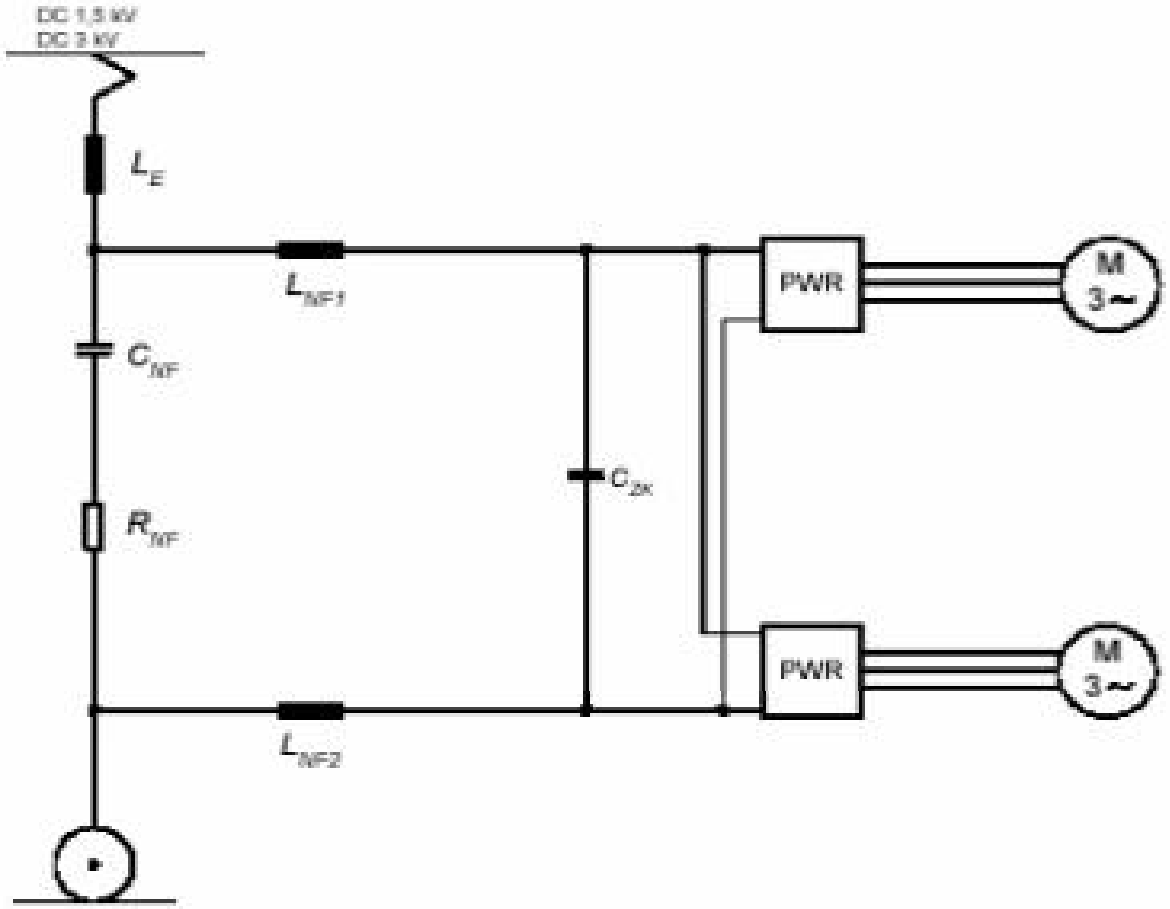
Trakční obvod



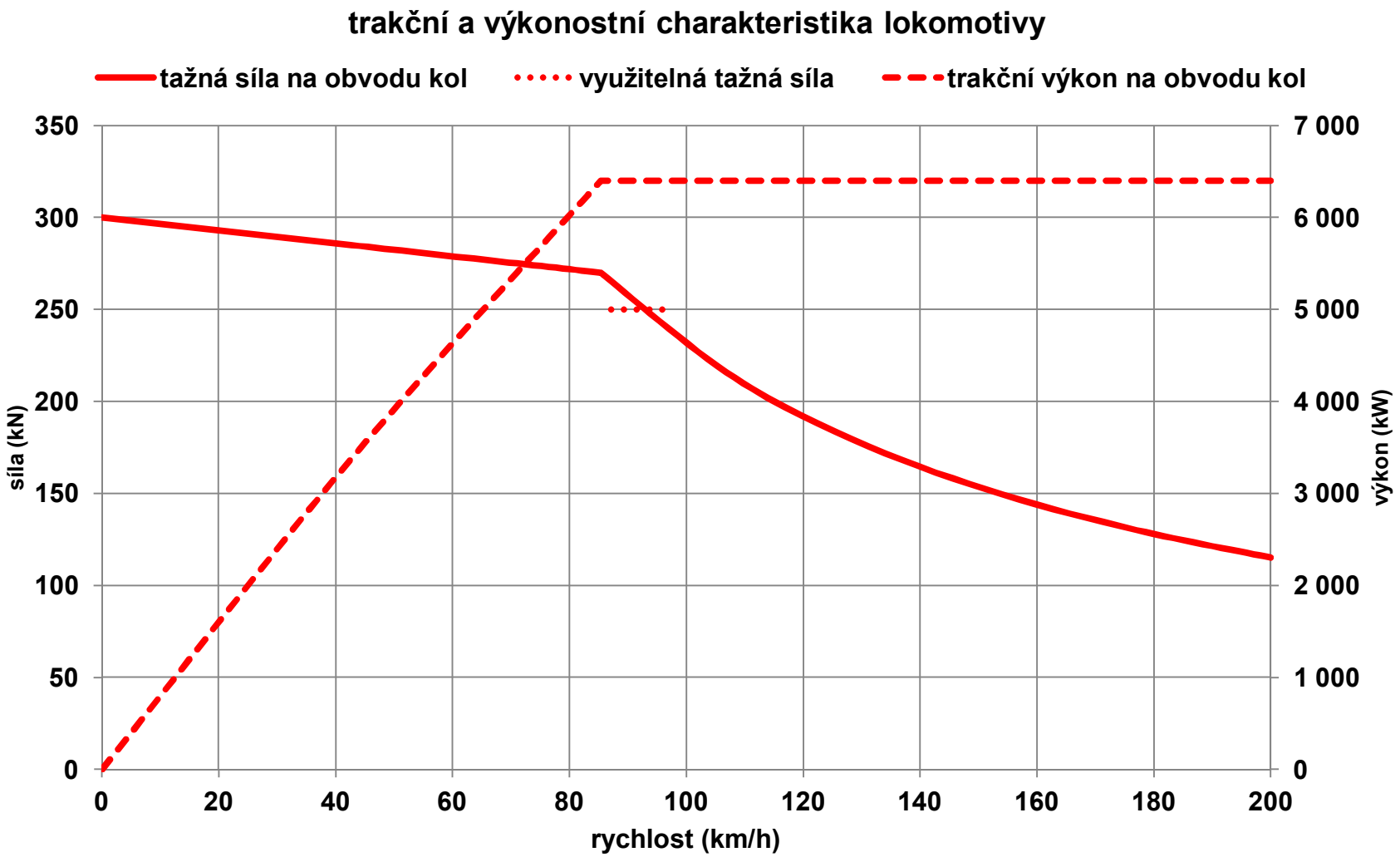
Trakční obvod – AC napájení



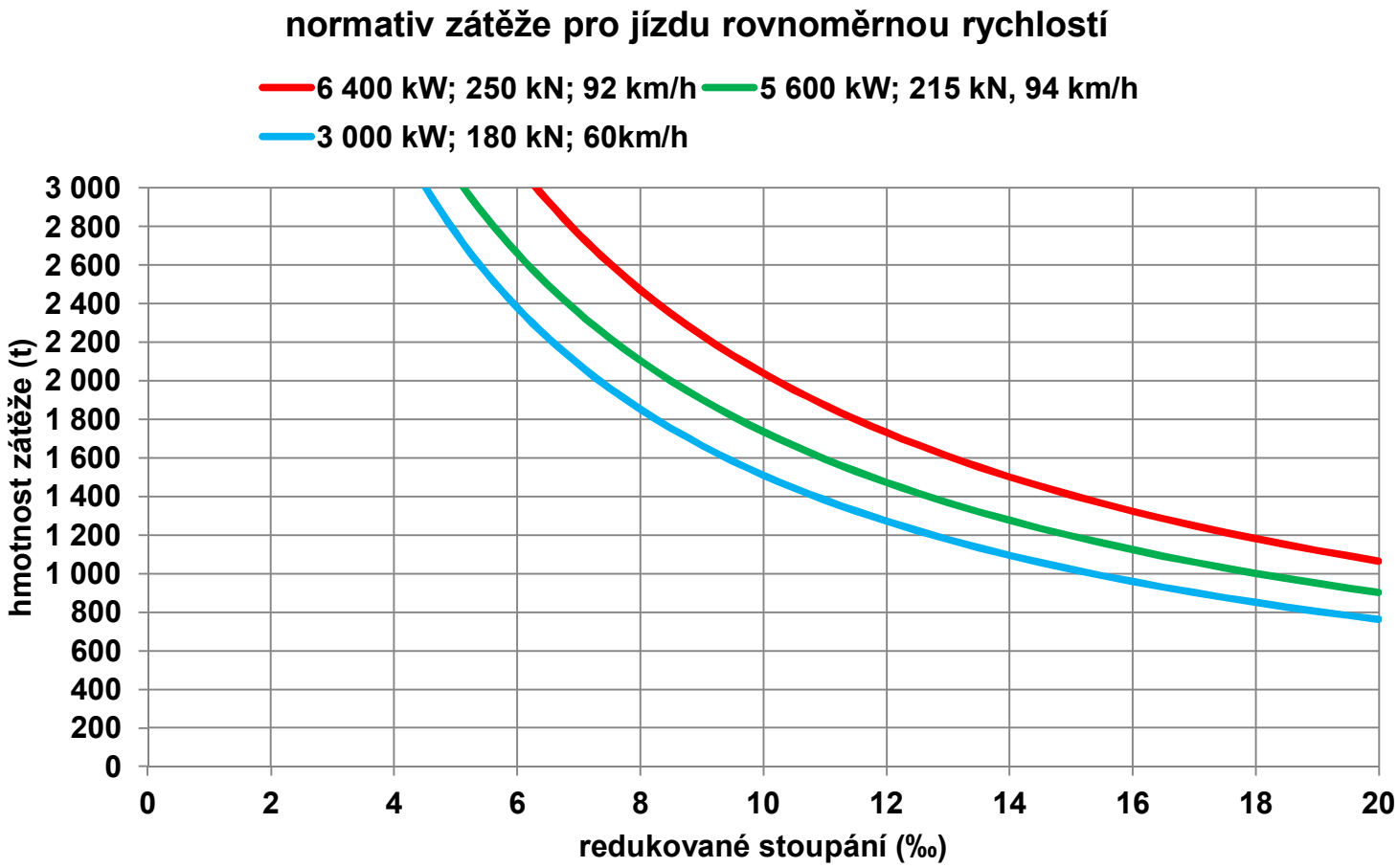
Trakční obvod – DC napájení



Univerzální použití pro osobní i nákladní dopravu (výkon 6,4 MW, tažná síla 250 kN, rychlost 200 km/h)



Porovnání normativů zátěže



Děkuji Vám za Vaši pozornost.

Ing. Jiří Pohl
Engineer Senior
Siemens, s.r.o. / Mobility

Siemensova 1
155 00 Praha 13
Česká republika

siemens.cz/mobility