

Energetické vlastnosti železničních dopravních systémů

Jiří Drábek, doc.Ing. PhD.

Katedra výkonových elektrotechnických
systémův ŽU v Žiline

drabek@kves.uniza.sk

Trakční odpory silničních a kolejových vozidel a jejich vliv na měrnou spotřebu paliva/energie pro jízdu.

Rovnice jízdy vozidla (vlaku)

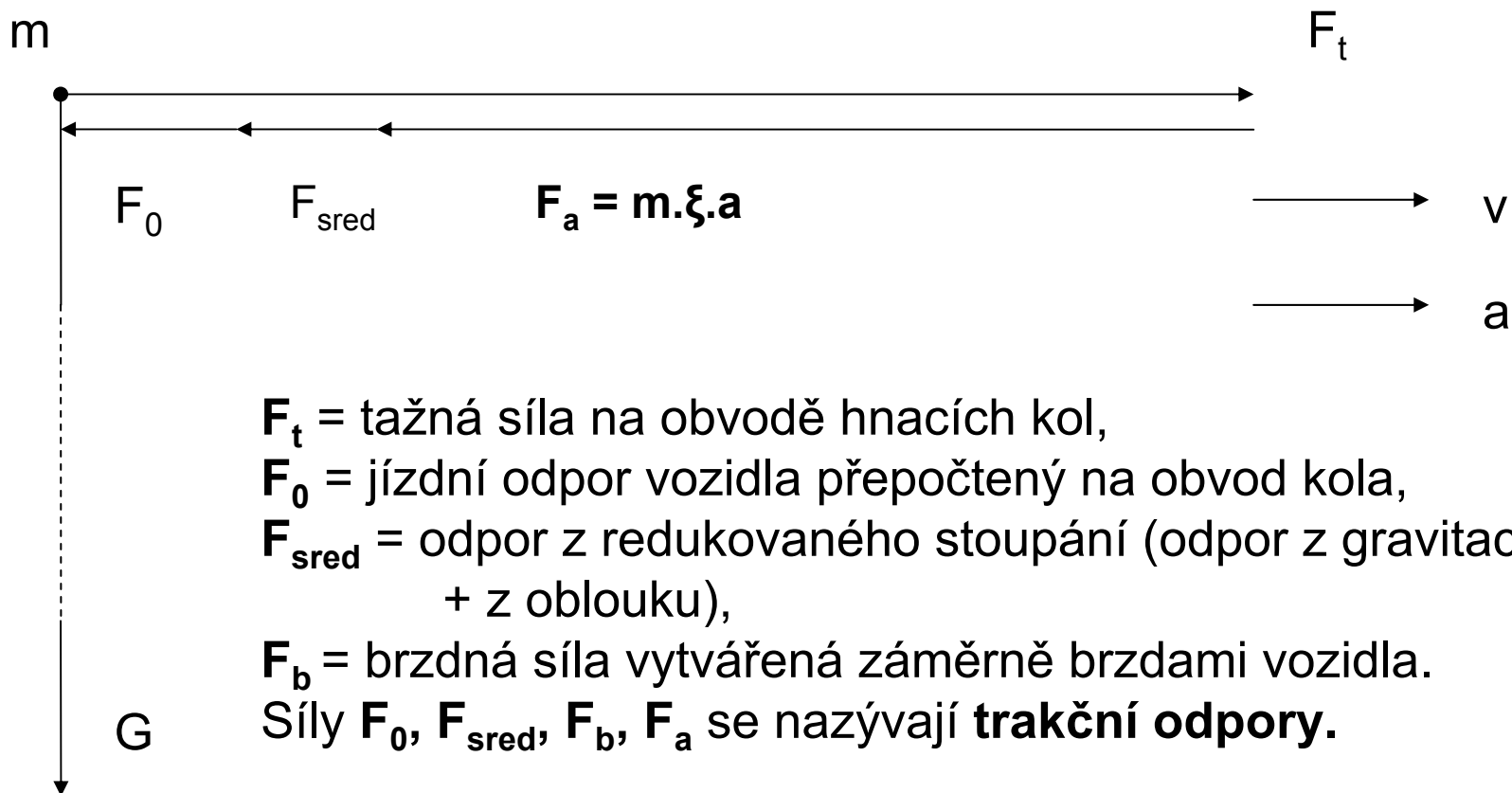
- ***vozidlo (vlak) považujeme za hmotný bod a***
- ***tento hmotný bod se pohybuje přímočaře (má jen 1° volnosti),***

platí 2. Newtonův zákon

$$\text{zrychlení } \mathbf{a} = \sum \mathbf{F}_i / m \text{ [m/s}^2\text{; N, kg],}$$

***kde $\mathbf{F}_i$ jsou síly působící na vozidlo při jeho jízdě,
m = hmotnost vozidla.,***

Síly působící na vozidlo (hmotný bod) při rozjezdu



F_t = tažná síla na obvodě hnacích kol,

F_0 = jízdní odpor vozidla přepočtený na obvod kola,

F_{sred} = odpor z redukovaného stoupání (odpor z gravitace + z oblouku),

F_b = brzdná síla vytvářená záměrně brzdami vozidla.

Síly F_0 , F_{sred} , F_b , F_a se nazývají **trakční odpory**.

Obecná rovnice pohybu vozidla potom je

$$F_a = m \cdot \xi \cdot a = F_t - F_0 - F_{\text{sred}} - F_b,$$

přičemž v jednotlivých fázích jízdy (rozjezd, jízda konstantní rychlostí, výběh, brzdění) působí vždy **jen některé** z těchto sil.

Měrné trakční odpory

Na posouzení velikosti vlivu jednotlivých trakčních odporů slouží **měrné (specifické) trakční odpory**, vztažené na jednotku tíhy vozidla,

$$p_i = F_i/G \text{ [N/kN; N, kN]}$$

Měrný jízdní odpor kolejových a silničních vozidel

$$p_0 = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \text{ [N/kN; km/h]}$$

↓
v ložiskách

↓
valivé

↓
o vzduch

TGV-PSE: 418 t, 386 míst, délka 200 m, jmen. výkon 6,4 MW má vzorec

$$p_0 = 0,62 + 0,00812.V + 0,0001396.V^2 \quad [\text{N/kN; km/h}].$$

TGV-A: 483 t, 504 míst, délka 237 m, jmen. výkon 8,8 MW (na systému 25 kV) má vzorec

$$p_0 = 0,6165 + 0,006.V + 0,0001267.V^2 \quad [\text{N/kN; km/h}].$$

Lokomotiva řady 151 (značení ŠKODA 65 Em): 86 t, 160 km/h:

$$p_{0L} = 2,8 + 0,00085.V^2 \quad [\text{N/kN; km/h}].$$

Např. pro **trolejbusy** se používá vzorec [4]

$$p_0 = a + 0,07.V + 0,01.V^2.c.S/M \quad [\text{N/kN; km/h, km/h, 1, m}^2, \text{t}]$$

a = 12 až 15 N/kN (beton, asfalt)

a = 20 až 25 “ (dlažba)

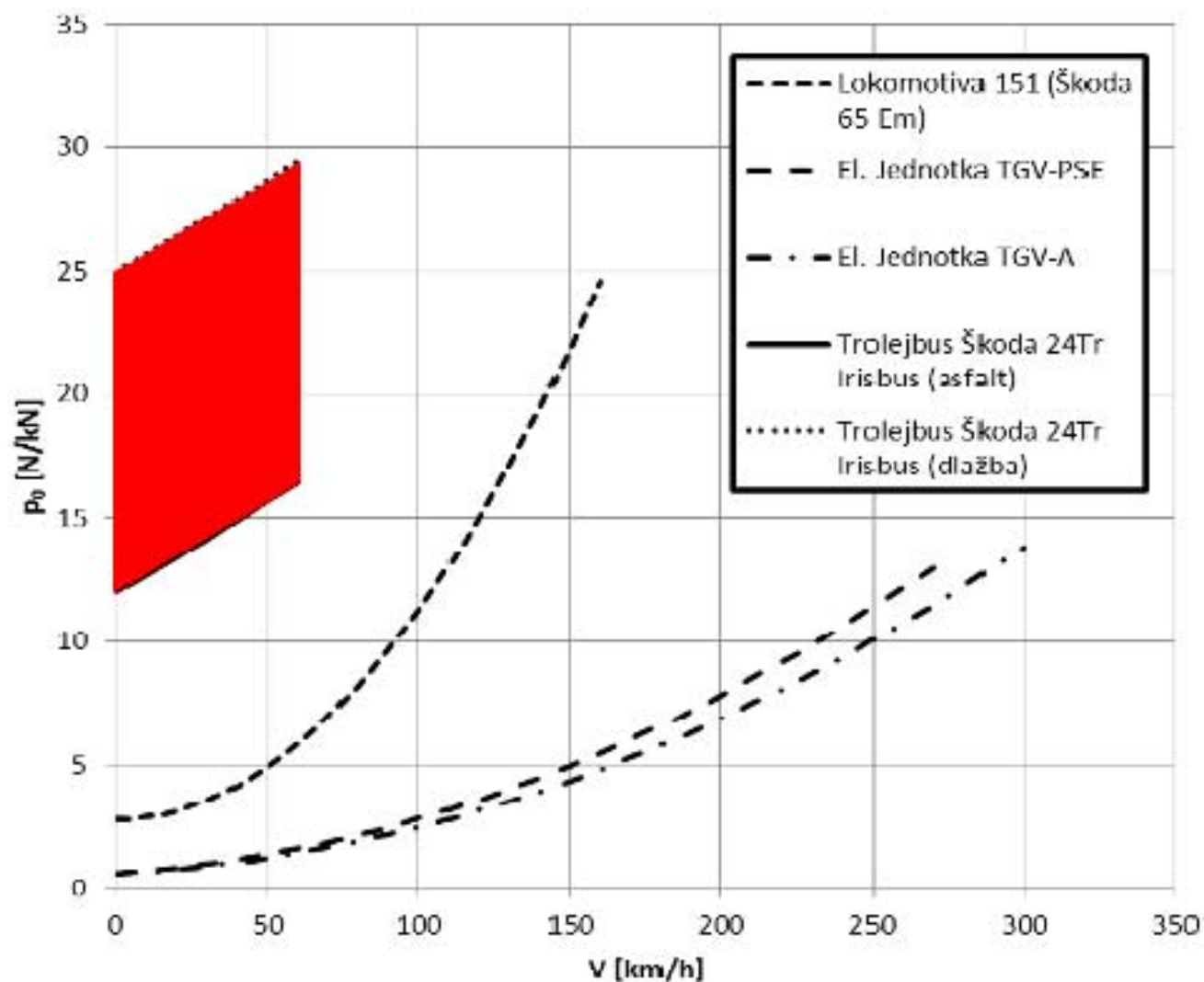
c – činitel tvaru čela, **S** – čelní plocha, **M** – hmotnost trolejbusu

ŠKODA 24 Tr Irisbus: šířka 2,5 m, výška 3,5 m, hmotnost 11,99 t
(prázdný), $c = 1$:

$$p_0 = (12 \div 25) + 0,07.V + 0,007.V^2 \text{ [N/kN; km/h]}$$



Měrné jízdní odpory vybraných vozidel



Měrný odpor ze stoupání kolejových a silničních vozidel

Stoupání **železničních** tratí je **podstatně nižší** než **stoupání cest a silnic**. Příčinou je nižší **součinitel adheze φ_a** kolo/kolejnice oprotisystému pneumatika/vozovka.

φ_a = max. asi 300 N/kN (0,3 N/N) pro kolejová vozidla,

φ_a = asi 1000 N/kN (1) pro silniční vozidla.

V důsledku toho se železniční tratě musejí stavět s menším stoupáním

s = do 20 ‰ pro hlavní tratě, výjimečně **do 40 ‰** (hlavní horské tratě; VR tratě),

s = do 40 ‰ ÷ asi 70 ‰ (vedlejší tratě; metro; tramvajové tratě).

Zatímco cesty mají obvykle stoupání **do 10 % = 100 ‰** i více (např. trolejbusy musejí při plném obsazení zdolávat **stoupání 15 % rychlostí 20 km/h**).

Měrná spotřeba energie pro jízdu vozidla

$$\begin{aligned} w &= W \cdot 10^3 / m \cdot l = A_t \cdot 10^3 / \mu \cdot m \cdot l = \\ &= [10^3 \cdot G / 3600 \cdot (\sum p_{oi} \cdot l_{oi} + \sum p_{sredj} \cdot l_{sredj} + \sum p_{ak} \cdot l_{ak})] / \mu \cdot m \cdot l \approx \\ &\approx (2,725 / l \cdot \mu) \cdot (\sum h_{oi} + \sum h_{sredj} + \varepsilon \cdot \sum h_{ek}) \\ &\quad [Wh/tkm; km, 1, m, m, 1, m], \end{aligned}$$

l – celková délka počítané tratě,

μ – jmenovitá účinnost hnacího vozidla,

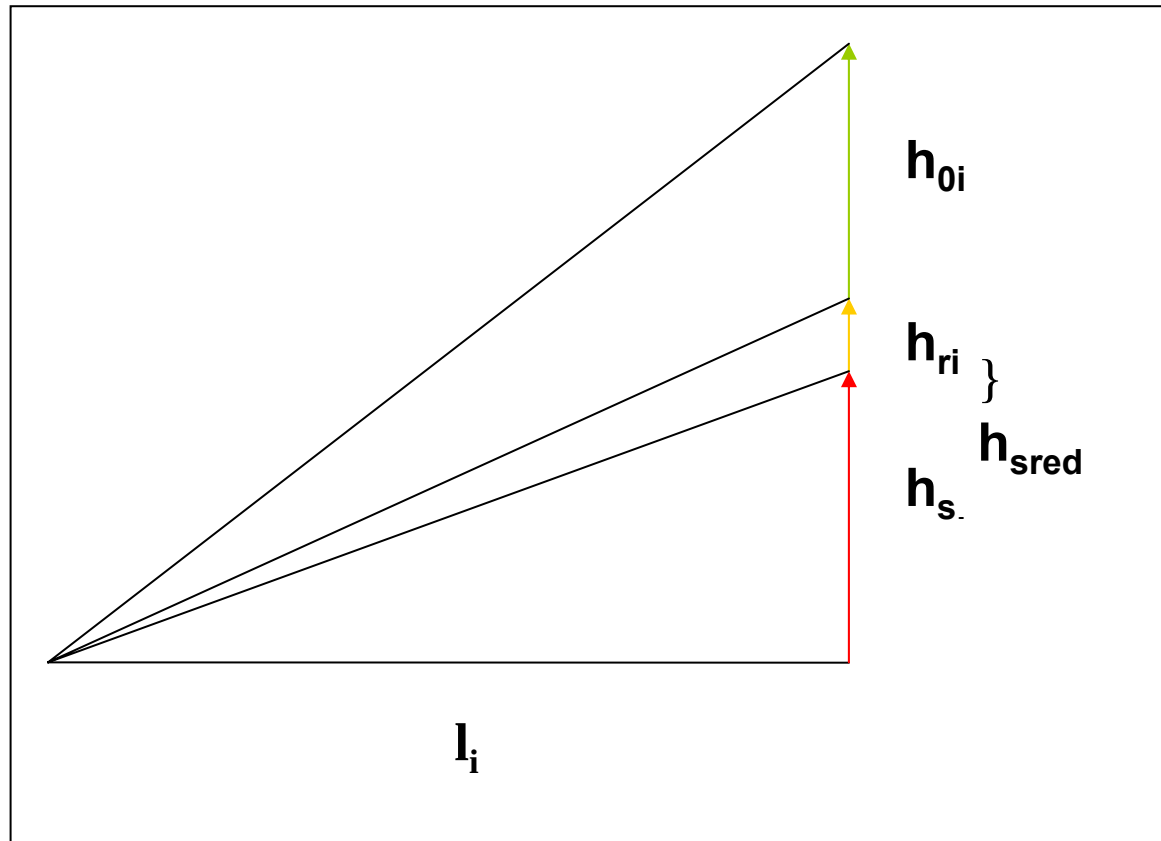
h_{oi} je i -tá odporová výška z jízdního odporu,

h_{sredj} je j -tá odporová výška z redukovaného stoupání,

h_{ek} – je k -tá odporová rychlostní (energetická) výška, $h_{ek} = p_{ak} \cdot l_{ak}$

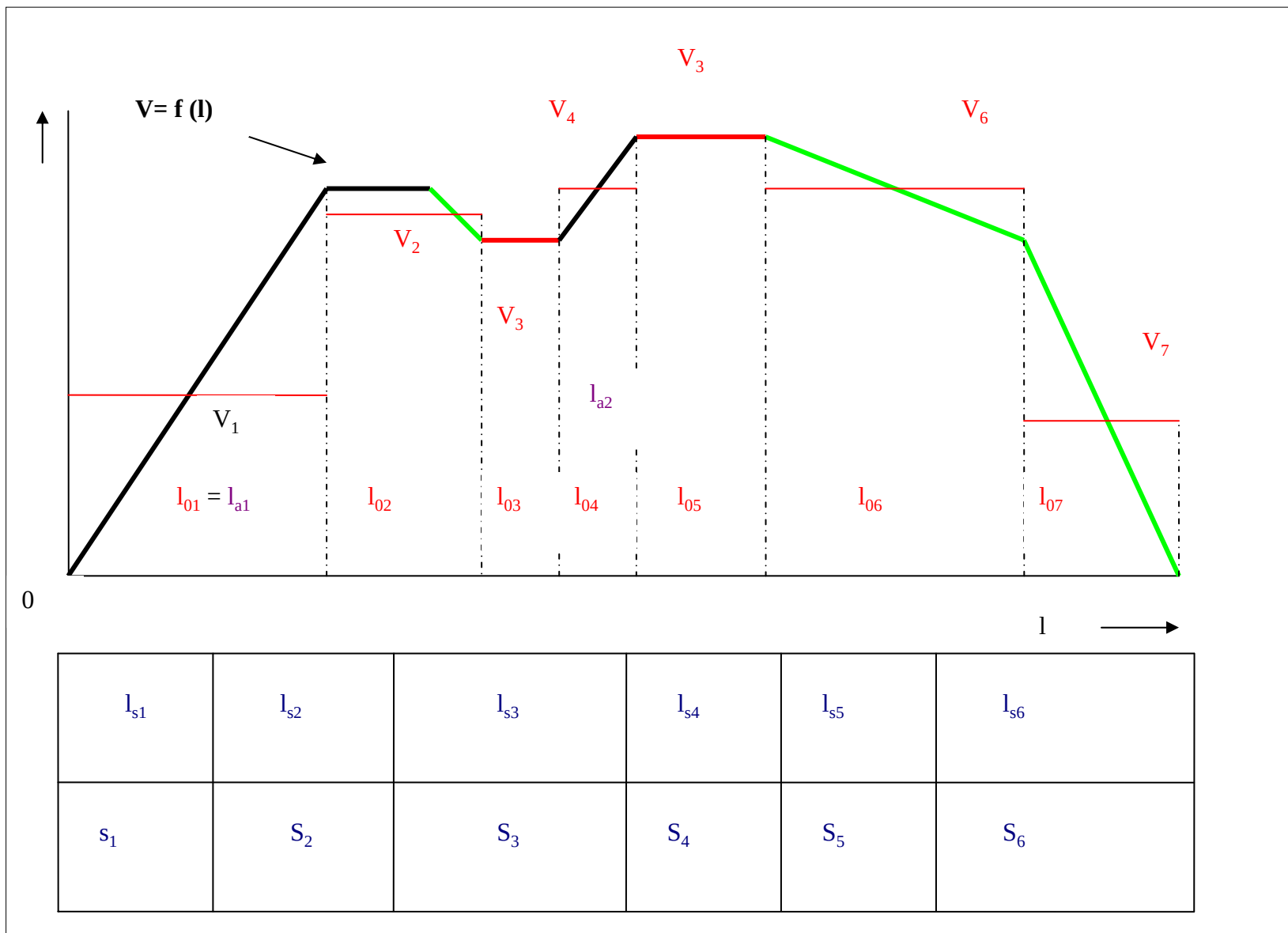
$\varepsilon = \mu / \mu_r$ je poměr jmenovité/střední rozjezdové účinnost hnacího vozidla.

Odporové výšky z pasivních odporů při jízdě $V = \text{konst.}$



Podobně **energetická** výška: $h_e = p_a \cdot l$

Dráhový tachogram jízdy $v = f(l)$



Velikost měrné spotřeby energie silničních a kolejových vozidel pro jízdu

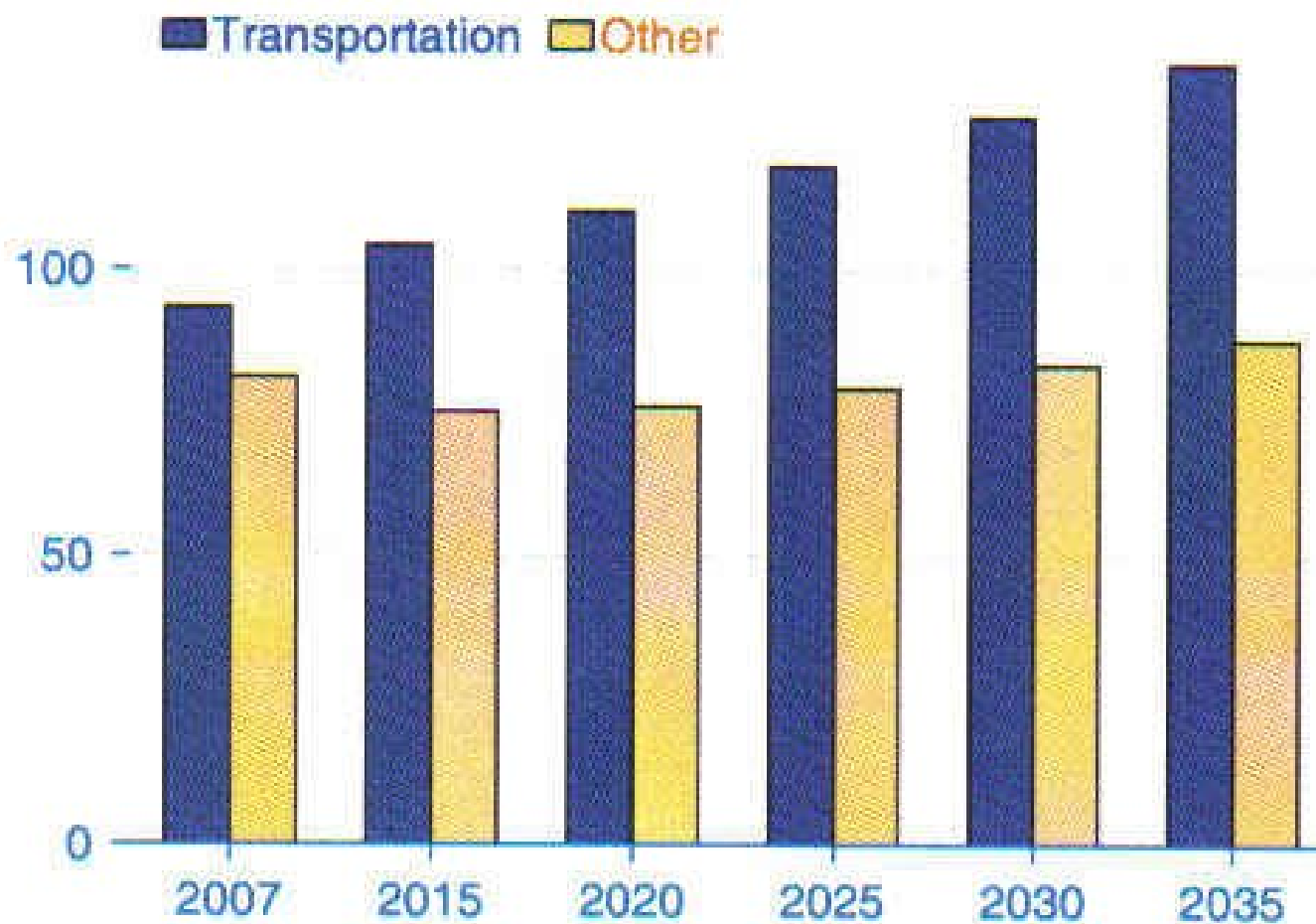
Vzhledem k **asi 5-násobně většímu měrnému jízdnímu odporu silničních vozidel** oproti kolejovým i větším stoupáním cest je také **všeobecně vyšší měrná spotřeba paliva pro jízdu silničních vozidel.**

Zatímco **železniční motorová vozidla** mají měrnou spotřebu motorové nafty v průměru **asi $10 \div 13 \text{ dm}^3/1000 \text{ tkm}$** , v nákladní **automobilové dopravě** je to kolem **$60 \text{ dm}^3/1000 \text{ tkm}$** [7].

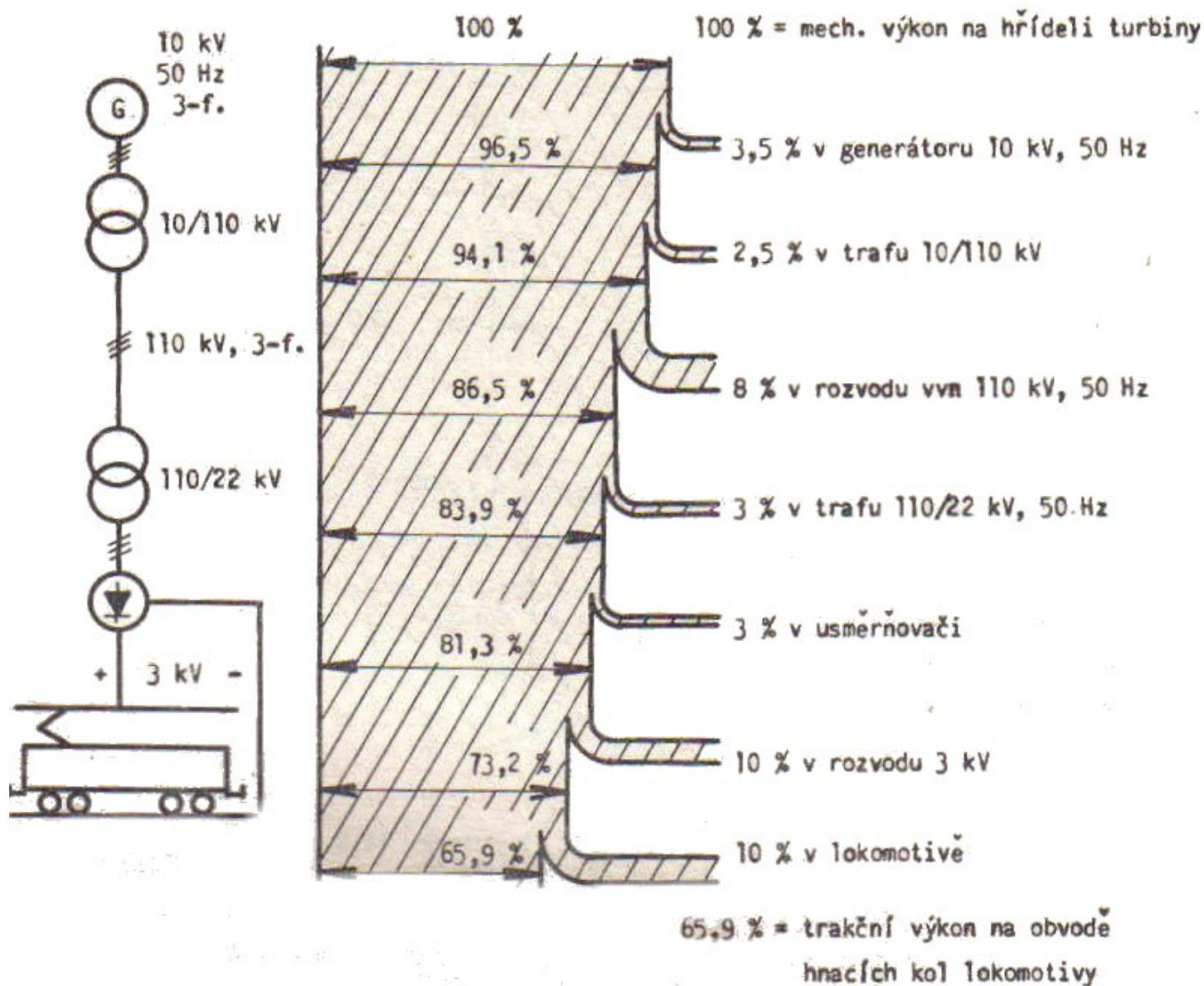
Když jmenovitá účinnost dieselových motorů lokomotiv (vztažená na energetický obsah paliva) je **asi $35 \div 40 \%$** a **lokomotiv** jako celku **asi $30 \div 32 \%$** , potom **střední hodnota** účinnosti motorových kolejových vozidel v provozu **je jen asi 15%** [7].

V **silniční dopravě** lze potom odhadnout využití energetického obsahu paliva na jízdu vozidla na **asi $3 \div 5 \%$** . Spalování nafty silničními vozidly je tedy **velmi neefektivní**. Přitom **přes 50%** světové spotřeby tekutých paliv se spotřebuje v dopravě (silniční, letecké, vodní, železniční) a má vzrůst na **61%** do r. 2035.

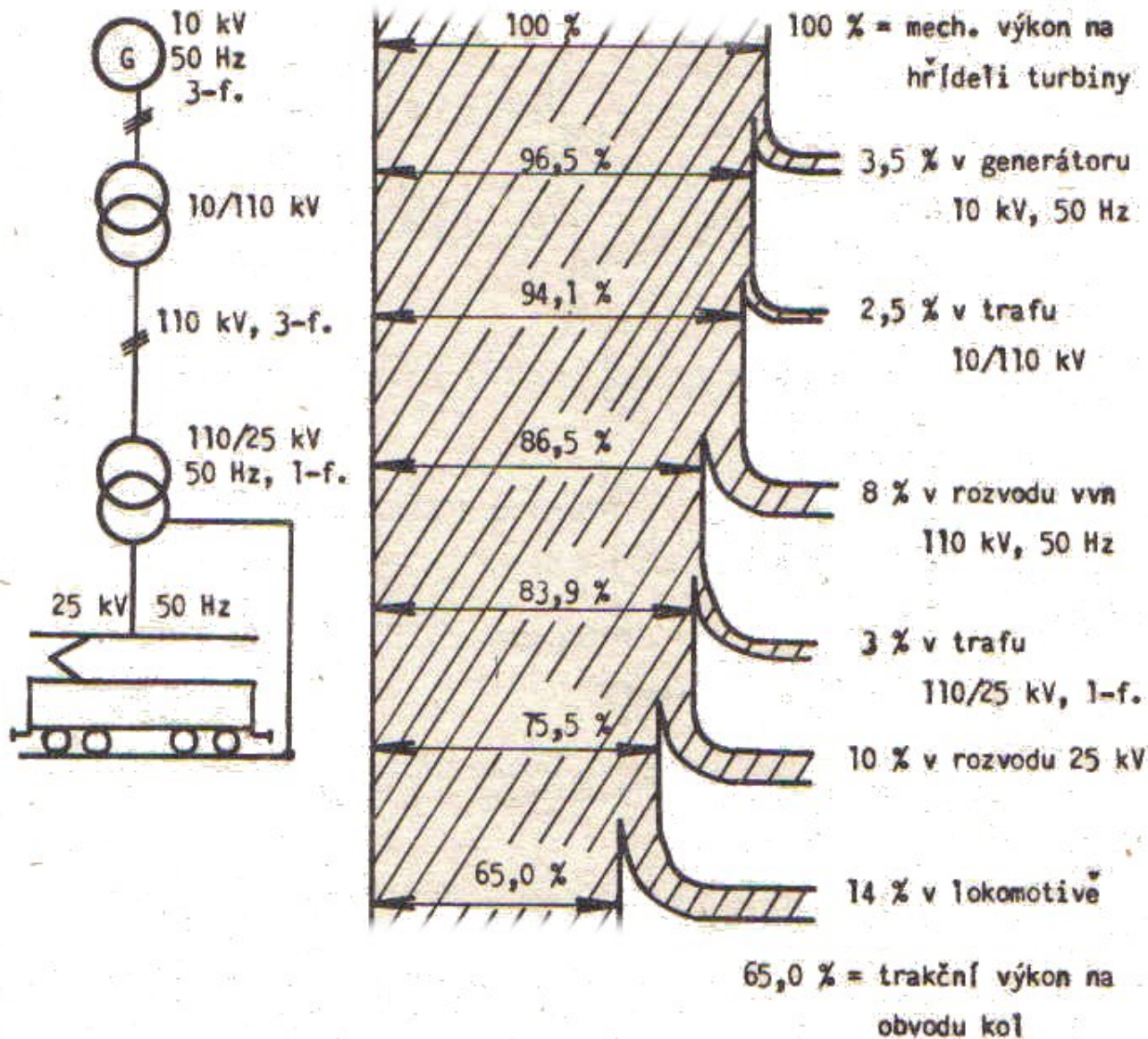
Spotřeba tekutých paliv v dopravě a ostatních odvětvích, a prognóza vývoje [24].



Elektrická vozba (EV) na železnici.



Elektrická vozba (EV) na železnici.



Energetická účinnost elektráren vztažená na en. obsah prvotního zdroje energie

Elektrárna	Prvotní energie	Účinnost [%]	Jmenovitá účinnost EV [%]	Střední účinnost EV [%]
Vodní	Vodní spád	cca 85	až 60	až 50
Tepelná kondenzační	Uhlí	30 ÷ 40	20 ÷ 30	18 ÷ 25
Tepelná zplynovací	Uhlí	až 55	až 40	až 35
Větrná	Větrná	40 ÷ 45	*)	-
Jaderná	Jaderná	< 1	**)	-

*) Využitelnost výkonu v provozu 12 ÷ 16 %; výkupní cena (ČR 2009): **11,91 ÷ 12,89 Kč/kWh.**

) Účinnost tepelného cyklu asi 30 %; výrobní cena (JE Dukovany, 2009): **0,60 Kč/kWh.

Měrná spotřeba EE pro jízdu

Před rozdělením ČSFR a ČSD byly průměrné roční spotřeby na ČSD

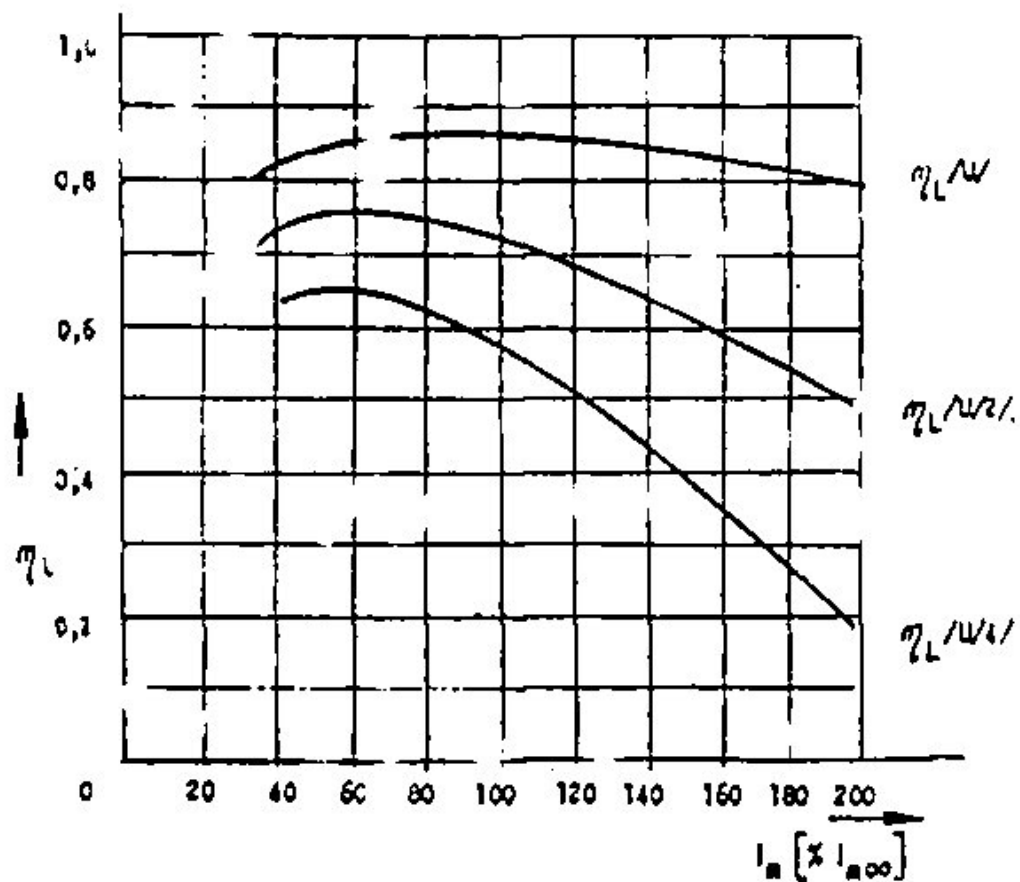
- asi 21 Wh/tkm na soustavě 3 kV DC,
- asi 23 Wh/tkm na soustavě 25 kV/50 Hz.

Současné určování měrných spotřeb na ZSR – podle ÚRSO

Merné spotreby skupín druhov vlakov používané pri rozdeľovaní spotreby elektriny sú v nasledujúcej tabuľke:

trakčná napäťová úroveň	skupina druhov vlakov	jednotka	merná spotreba			
			december až február	marec až máj	jún až august	september až november
3kV DC	osobné vlaky	kWh/tis.hrtkm	41,7	35,6	33,0	37,2
	ostatné vlaky osobnej dopravy	kWh/tis.hrtkm	28,8	25,0	22,1	24,7
	vlaky nákladnej dopravy	kWh/tis.hrtkm	15,9	15,9	15,9	15,9
	rušňové vlaky	kWh/tis.hrtkm	31,6	31,6	31,6	31,6
25 kV AC	osobné vlaky	kWh/tis.hrtkm	40,2	34,8	31,8	36,2
	ostatné vlaky osobnej dopravy	kWh/tis.hrtkm	31,7	24,5	21,2	26,9
	vlaky nákladnej dopravy	kWh/tis.hrtkm	14,8	14,8	14,8	14,8
	rušňové vlaky	kWh/tis.hrtkm	33,2	33,2	33,2	33,2

Účinnost EL 25 kV, 50 Hz při plném a dílčím napětí



Maglev – elektrizovaný dopravní systém s magnetickou levitací.

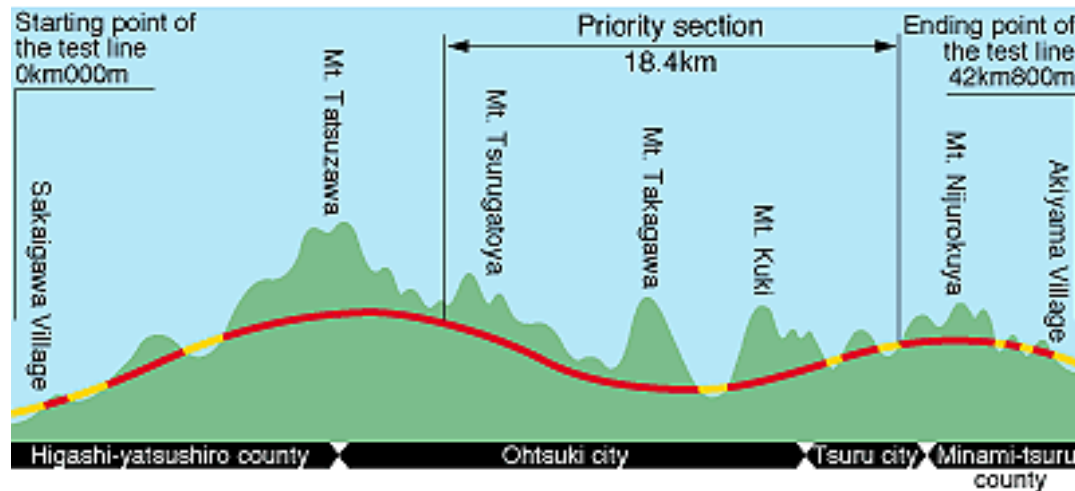
Transrapid (Německo) s elektromagnetickou levitací.



Transrapid je kromě zkušební tratě v Emslandu (DE) v provozu od roku 2004 také v Šanghaji, kde na 30 km dlouhé trati jezdí max. rychlostí 430 km/h a trať z letiště Pudong do centra urazí za 8 minut průměrnou rychlostí 225 km/h.

Maglev – elektrizovaný dopravní systém s magnetickou levitací.

Yamanashi (Japonsko) s levitací elektrodynamickou.



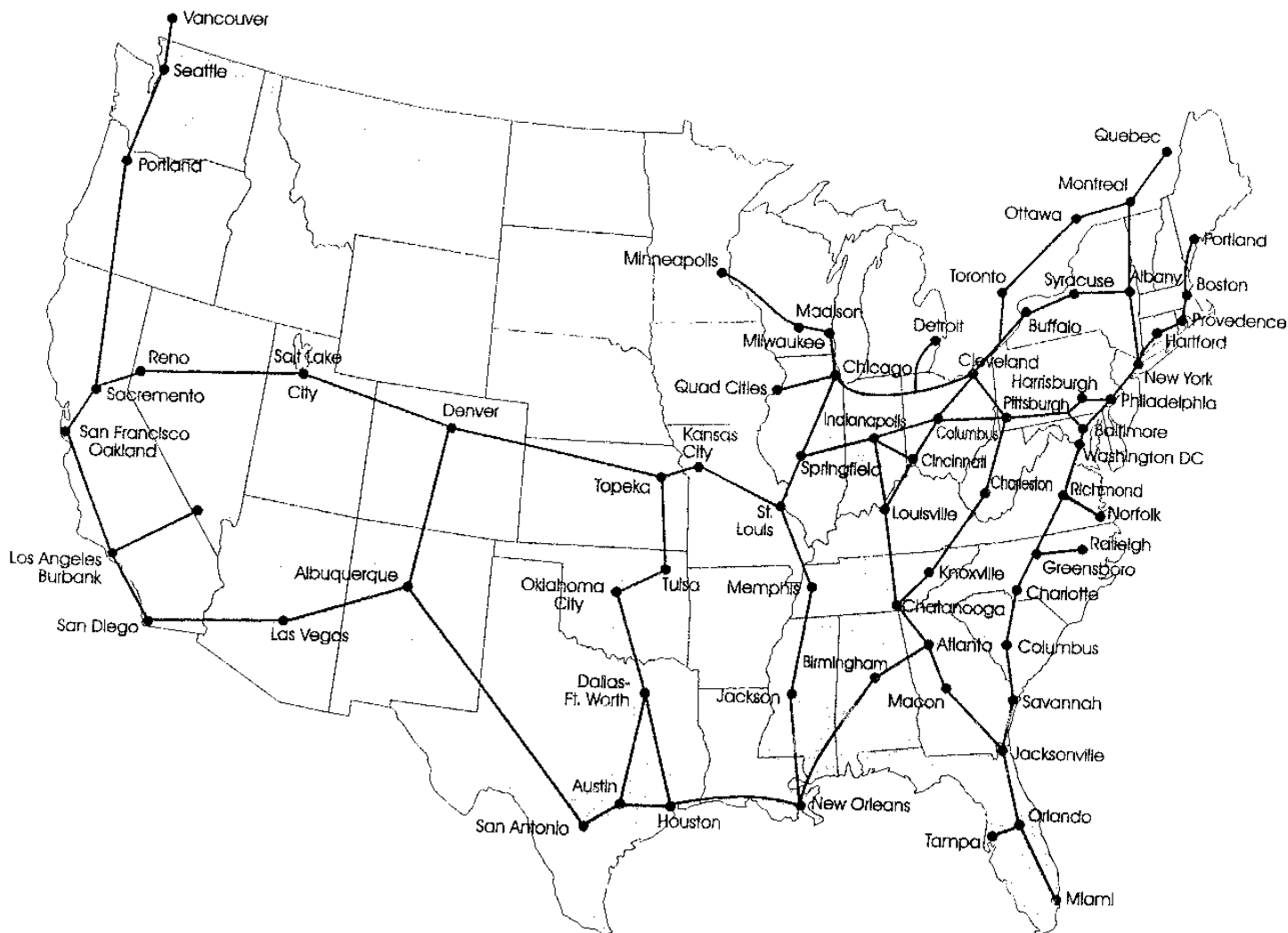
Dvoukolejná“ Yamanashi Maglev Test Line (42 km) byla uvedena do provozu v r. 1997. Dříve byla vozidla maglevu testována v Miyazaki. Cílem testů je optimalizace jednotlivých uzlů vozidla i trati. Přitom bylo dosaženo rekordní rychlosti 581 km/h (třívozová souprava, (2003) a rekordu relativní rychlosti při míjení dvou souprav 1026 km/h v roce 2004.

Soupravy jsou tří až pětivozové, **provozní rychlost by měla být 500 km/h.** Už v roce 2004 měla vozidla najeto celkem 400 tisíc km a bylo přepraveno 80 tisíc cestujících (2005 se svezl i korunní princ Naruhito).

Souprava MLX01 v Yamanashi



Navrhovaná síť maglevu v Severní Americe [1].



Další vlastnosti maglevu [1].

- **při rychlosti 500 km/h spotřebuje jen $\frac{1}{2}$ primární energie jako auta při pouhých 100 km/h,**
- **při rychlosti 500 km/h jen $\frac{1}{4}$ primární energie proti tryskovým letadlům na stejnou vzdálenost,**
- **při rychlosti 350 km/h jen $\frac{1}{8}$ až $\frac{1}{4}$ oproti letadlům,**
- **při rychlosti 400 km/h má být spotřeba energie nižší o $\frac{1}{3}$ i proti vlakům na VRT.**

Dostupnost zdrojů paliv a energií pro dopravu

Odhad zásob fosilních zdrojů energie (1990).

Druh zdroje energie	Využitelné zásoby [roky]	Geologické zásoby [roky]
Ropa	40	140
Zemní plyn	55	100
Uhlí	250	1700
Uran ¹⁾	90	140
Uran ²⁾	5400	8400

Využití v: ¹⁾ pomalých ²⁾ rychlých jaderných reaktorech

Světové zásoby ropy a zemního plynu – odhady 2002

Surovina	Ropa ¹⁾ (mld. barelů)	Ropa ²⁾ (mld. barelů)	Zemní plyn ¹⁾ (10 ¹² ft ³)	Zemní plyn ²⁾ (10 ¹² ft ³)
Svět celkem	1 212, 881	1 017,763	5,501 424	5,919 369

¹⁾ PennWell Corporation, *Oil & Gas Journal*, Vol. 100, No. 52 (December 23, 2002) .

²⁾ Gulf Publishing Co., *World Oil*, Vol. 223, No. 8 (August 2002).

Rok	1998	1999	2000	2001	2002
Světová spotřeba celkem	73,86	75,61	76,90	77,12	77,43

(USA: 22,635 mil barelů/den = 29,2 % světové spotřeby)

Svět celkem ročně (2001): 28 261,95 mil barelů = **28,26195 .10⁹ barelů/rok.**

Ropa: do vyčerpání světových zásob (při spotřebě v roce 2002) = 43 roků.

Plyn: doba do vyčerpání světových zásob = cca 65 roků.

Světové zásoby ropy a zemního plynu – odhady 2010

- **Světové zásoby ropy: 1,354 mld. barelů** (znatelný nárůst oproti 2002)
- **Světová spotřeba ropy: 86,1 mil. barelů/den (= 31,4265 mld.barelů/rok)**
- **Doba do vyčerpání světových zásob (při spotřebě jako v roce 2009) = 43 roků.**
- Odhad doby do vyčerpání zásob ropy je tedy prakticky stejný v roce 2010 jako v r. 1990! Nicméně **vyčerpatelnost zásob fosilních paliv je jistá a jediným jistým zdrojem energie pro dopravu v budoucnosti je elektrická energie.**
- *Poznámka 1:* Už dnes se v Evropě přepravuje 80 % hmotnosti nákladů na elektrizovaných železnicích [23].
- *Poznámka 2:* V současné době pracuje ve světě 30 experimentálních termojaderných reaktorů (TOKAMAK).
- Projekt nov generace reaktorů **ITER** na základě široké mezinárodní spolupráce. **Vyrobená energie má být u ní 10-krát větší než spotřeba.** Projekt v hodnotě 6 mld. US \$ má být realizován v Cadarache (Francie).

Porovnání druhů dopravy z dalších hledisek

Parametr	Doprava na železnici : silnici
Valivý odpor kolo/kolejnice : pneu/cesta	1 : (5 až 10), maglev: 0
Měrná spotřeba paliva [dm^3/tkm] motorová kolej. vozba : automobily	1 : (4 až 6)
Měrná spotřeba energie přepočtená na měrnou energii primárního zdroje [kJ/tkm], elektrizovaná trať : automobily	1 : 5 (EE z fosilních paliv) 1 : 10 (EE z vodních el.)

Porovnání druhů dopravy z dalších hledisek

Rychlost jízdy	(2 až 3) : 1 (železnice) ¹⁾ (4 až 5) : 1 (maglev)
Riziko nehod	Velmi malé : velmi vysoké ²⁾
Negativní vlivy na životní prostředí	Menší/žádné : velmi velké

¹⁾ Na VRT až **350 km/h** v osobní dopravě, až **160 km/h** v nákladní.

²⁾ Na silnicích zahyne ve světě **cca 1 mil. osob ročně**, další **2 mil. se zraní**, většinou těžce.

Porovnání druhů dopravy z dalších hledisek



Souprava VELARO pro systém 25 kV, 50 Hz a novou trať Madrid – Barcelona s $V_{\max} = 350$ km/h.

Jmenovitý výkon jednotky je 8800 kW.

Porovnání druhů dopravy z dalších hledisek

Přitom spotřeba energie např. u TGV-A je jen 1,5 dm³ ekvivalentu motorové nafty /osobu a 100 km při rychlosti jízdy 300 km/h [17].

Negativní vlivy na životní prostředí ukazuje tab. 8 [4]:

Tab. 8 Emise zplodin v dopravě v ČR (1999) [21].

Doprava	Železnice	Silnice
Emise SO ₂ [t]	127	3 464
Emise SO ₂ [%]	3,5	96,5
Emise CO ₂ [t]	4 795	343 612
Emise CO ₂ [%]	1,38	98,62

Zábor půdy je pro kapacitně adekvátní dálnici násobně větší než pro železnici.

Porovnání druhů dopravy z dalších hledisek

Komplexní vyhodnocení negativních vlivů dopravy na životní prostředí v EU v roce 2000 dle studie vypracované nezávislými konzultantskými firmami INFRAS (www.infras.ch) a IWW (www.iww.de) pro UIC, ve které jsou tyto negativní vlivy (**externality**) vyjádřeny finančně.

Doprava	Nákladní	Osobní]
Letecká	205	48
Silniční	88	87
Autobusová	-	38
Železniční	19	20
Vodní (vnitrostátní)	17	-
Náklady	[€/1000 tkm]	[€/1000 oskm]

Externality (negativní vlivy dopravy vyvolávající dodatečné náklady), jsou zapříčiněny např.:

- nehodami,
- změnou klimatu,
- hlukem dopravy,
- znečištěním vzduchu.

Metody určování spotřeby energie pro jízdu vozidla

- Nejpřesnější určení spotřeby paliva nebo EE pro jízdu je **měření spotřeby na vozidle**. Po oddělení železniční infrastruktury ŽSR od dopravců je cena za spotřebovanou elektřinu dopravcům účtována za odběr na sběrači EHV.
- Protože EHV nebyla výrobcí EHV vybavena elektroměry, byly dosud odběry zjišťovány výpočtem na základě Rozhodnutí ÚRSO podle tab. 2. V současnosti však už jsou na většině EHV provozovaných na tratích ŽSR **elektroměry instalovány** a bude tak možno spotřebu jednotlivých EHV a dopravců určovat přesně.

Metody určování spotřeby energie pro jízdu vozidla

- ***Výpočet spotřeby energie pro jízdu pomocí odporových výšek***
- Pro výpočet spotřeby energie nebo paliva pro jízdu vozidel lze použít **metodu výpočtu pomocí odporových výšek a ztrátových složek**, uvedenou dříve. V praxi byla používána upravená varianta této metody s pomocí **grafů měrné spotřeby energie pro typové vlaky**.
- Tyto metody bylo dříve nutné využívat **při dimenzování napájení** (napájecích stanic, trakčního vedení atd.) nově budovaných nebo elektrizovaných tratí, u kterých byl znám jejich podélný profil a předpokládané typy a počty vozidel (vlaků) a jejich střední rychlosti v budoucím provozu.

Počítačové simulace jízdy vozidel

Počítače umožnily rychlé a přesné řešení diferenciální rovnice jízdy vozidla uvedené dříve,

$$a = (F_t - F_0 - F_{sred} - F_b) / m. \quad \xi = dv/dt = d^2l/dt^2$$

s řešením

$$v = \int a \cdot dt \quad a \quad l = \int v \cdot dt$$

což umožňuje získat **časové a dráhové tachogramy jízdy**, $v = f(t)$ a $v = f(l)$, které věrně popisují jízdu vozidla, a **dráhový chronogram** $t = f(l)$ na určení **jízdních dob**. Z nich lze potom odvodit **časové průběhy příkonu HV** a spotřebu energie pro jízdu.

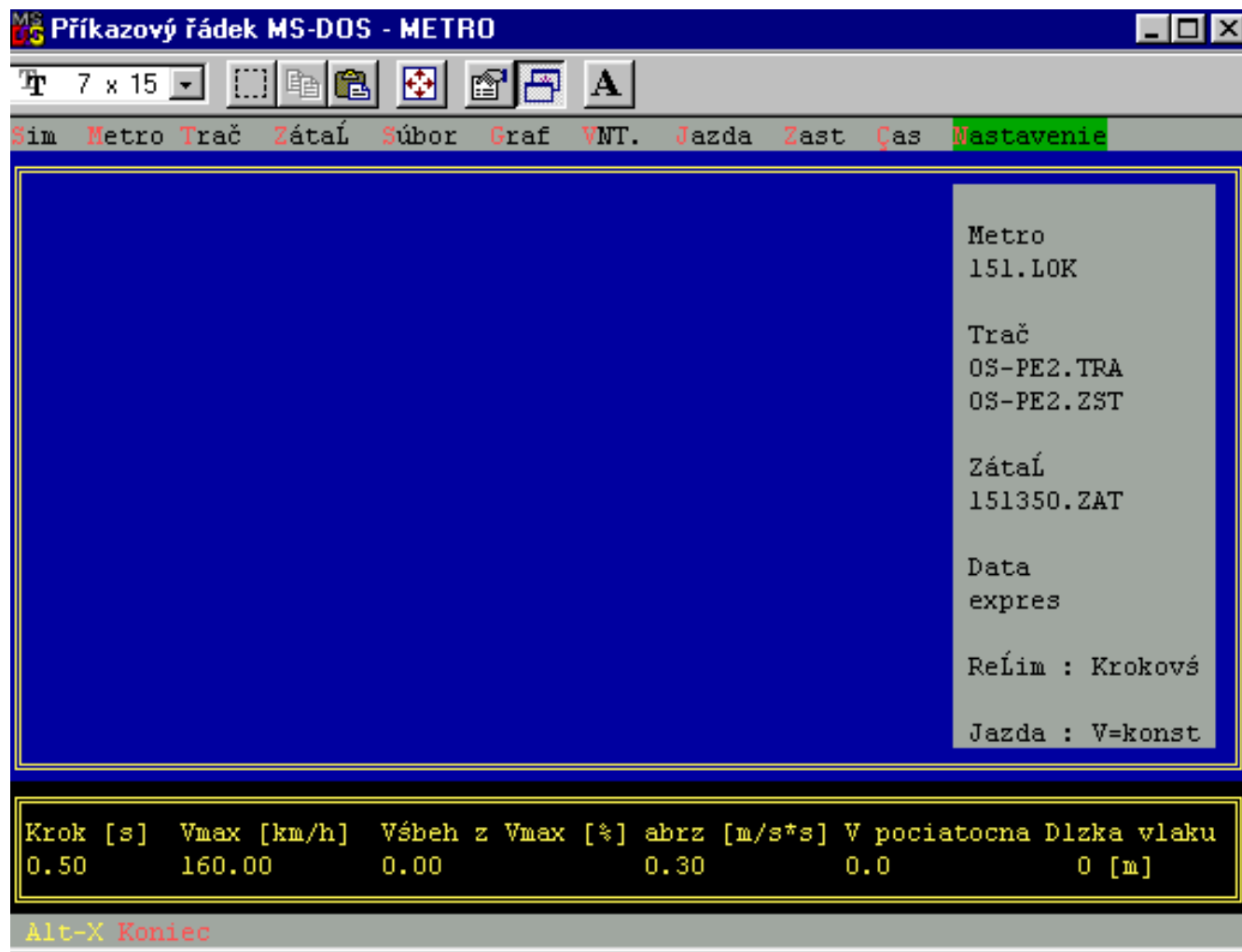
$$A_t = \int P_t \cdot dt, \quad W = A_t / \mu.$$

Simulace jízdy vlaku na KVES ŽU Žilina

- Počítačové simulace jízdy vlaku jsou na KVES (dříve KETE) ŽU prováděny od 60-tých let, a to na
- analogových elektronických počítačích MEDA T,
- elektromechanickém trakčním integrátoru Amsler,
- na digitálních počítačích.

Simulace jízdy vlaku na KVES ŽU Žilina

Program Metro - zadávání



Simulace jízdy vlaku na KVES ŽU Žilina

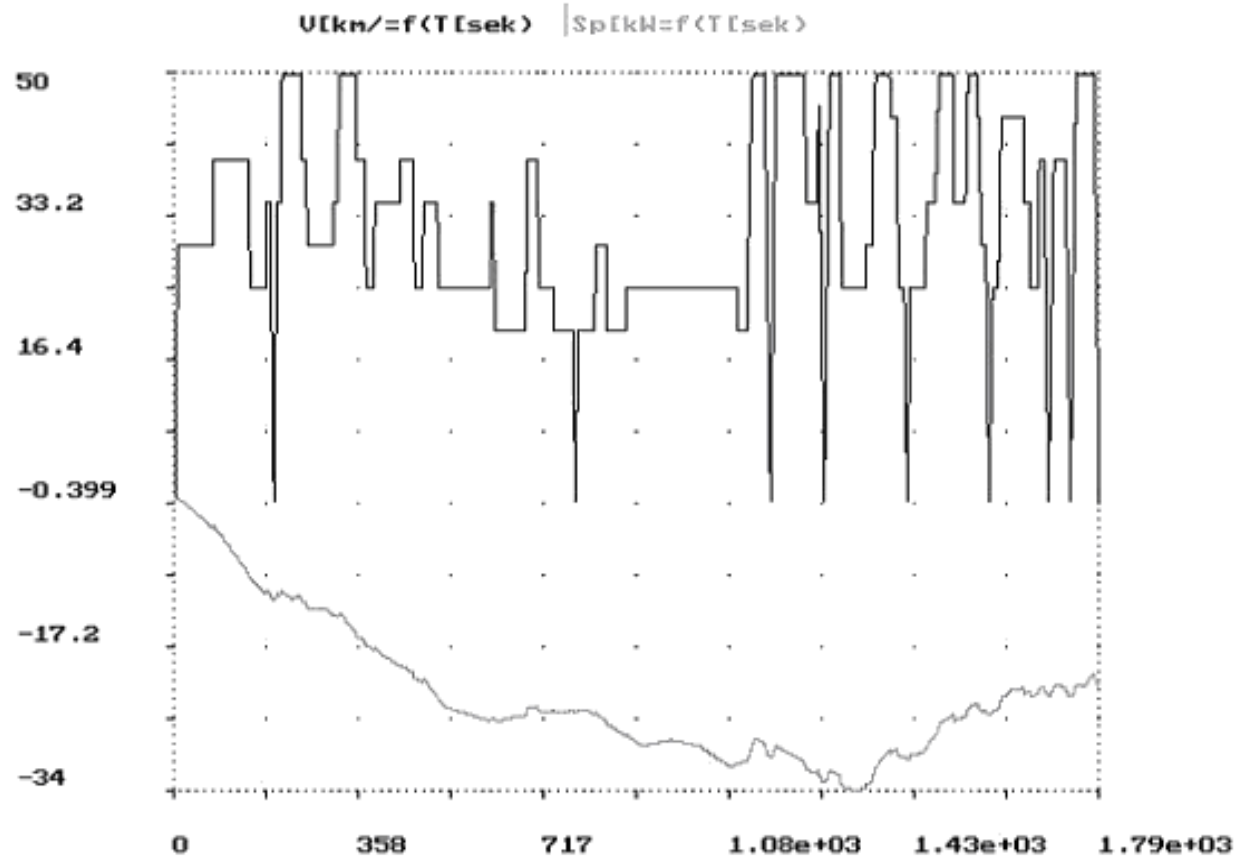
Program Metro – grafický výstup



Obr. 17 Grafický výstup simulace jízdy Ostrava hl.n. – Petrovice st.hr.

Simulace jízdy vlaku na KVES ŽU Žilina

Časový tachogram jízdy EJ 425.95 na úseku Š. Pleso – S. Smokovec a časový průběh rekuperované energie



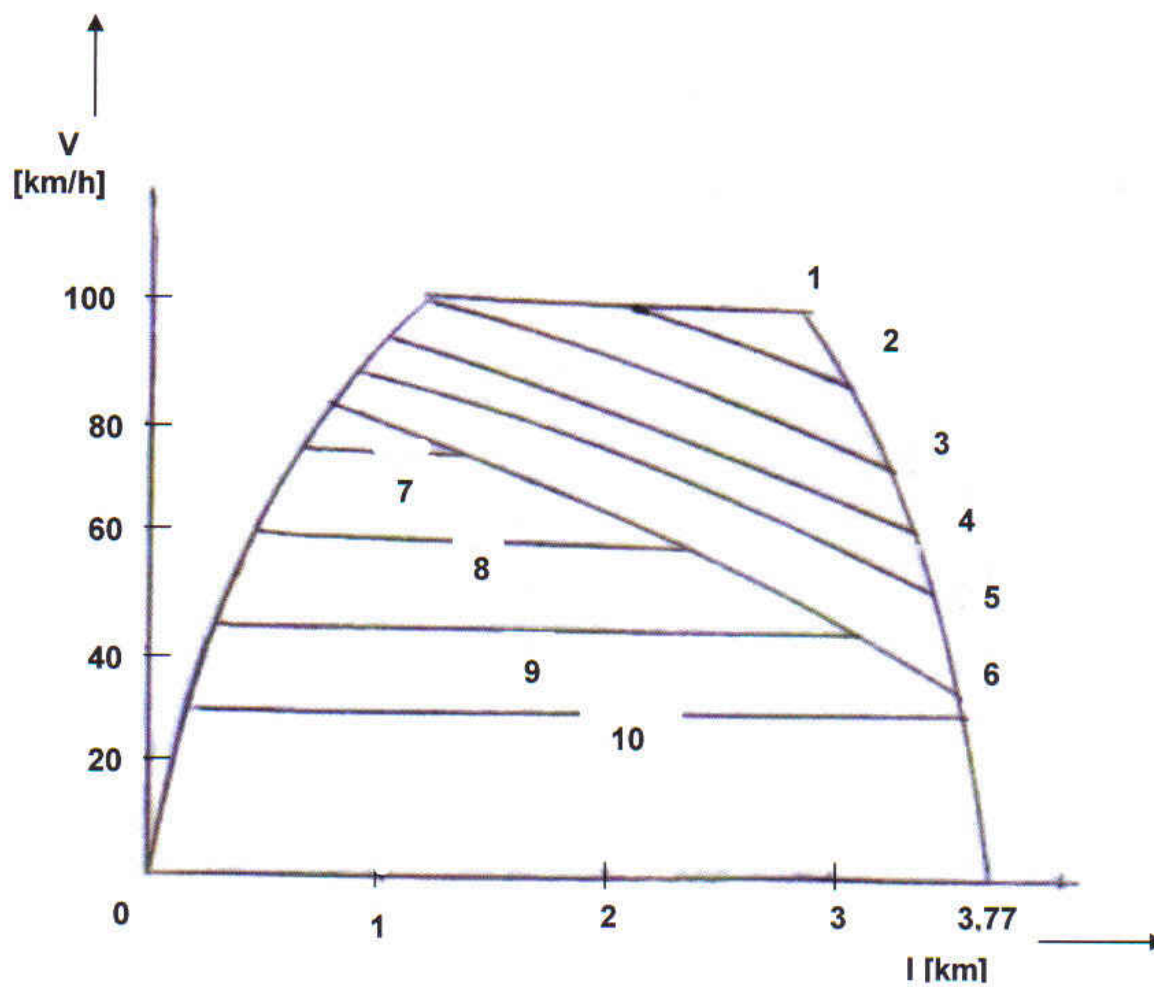
Úspory elektrické energie pro jízdu rekuperací brzdné energie vozidla.

- V uvedeném příkladu pro jednotku TEŽ v procentním vyjádření činí **možné** úspory elektrické energie rekuperací pro trať:
- Š. Pleso - S. Smokovec a zpět: **60,1 %**,
- S. Smokovec - Poprad-Tatry a zpět: **57,6 %**,
- S. Smokovec - T. Lomnica a zpět: **57,6 %**,
- a průměrně pro všechny tratě TEŽ **58,83%.**

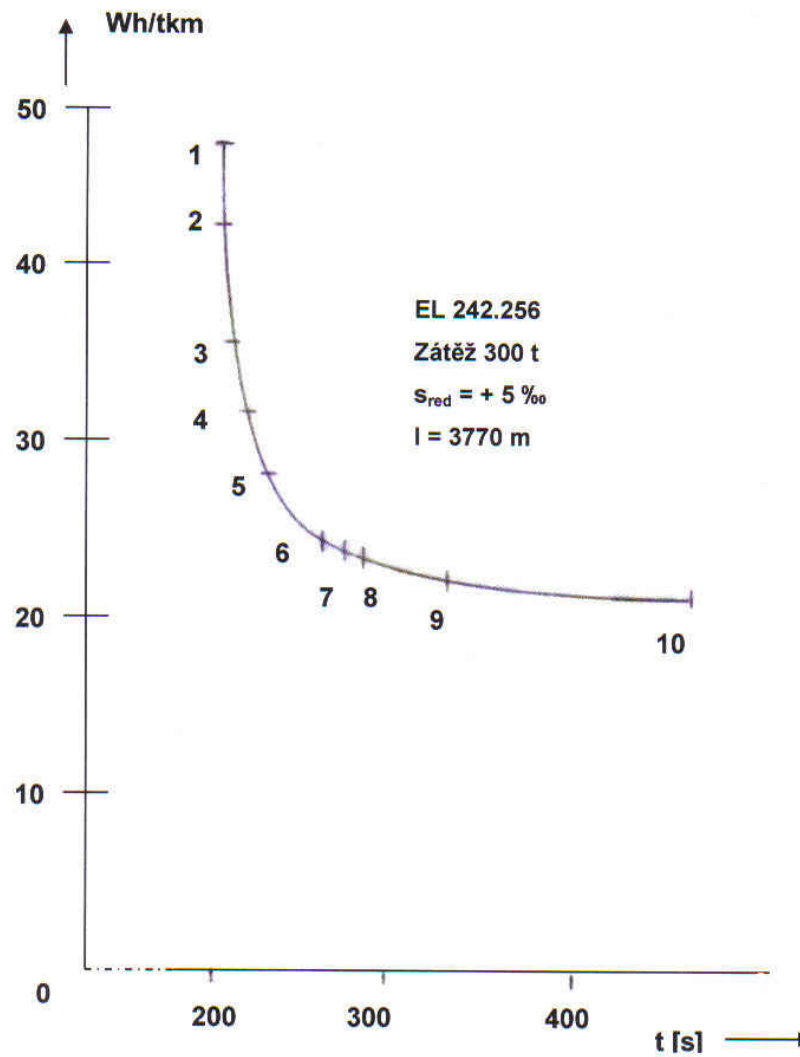
Úspory brzdových zdrží při EDB do odporu.

- Elektrodynamickým brzděním do odporu lze docílit značných úspor litinových brzdových zdrží, a tedy v konečném důsledku též energie, spotřebované při jejich výrobě, a surovin na výrobu litiny. V železničním provozu vznikají navíc značné finanční úspory tím, že není nutné často odstavovat vozidla kvůli výměně zdrží.
- **Úspora zdrží podle různých provozních podmínek je [13] až asi 95 %.**

Úspory EE optimální technikou jízdy



Úspory EE optimální technikou jízdy



AVV, automatické vedení vlaku (VÚŽ - AŽD/ČD)

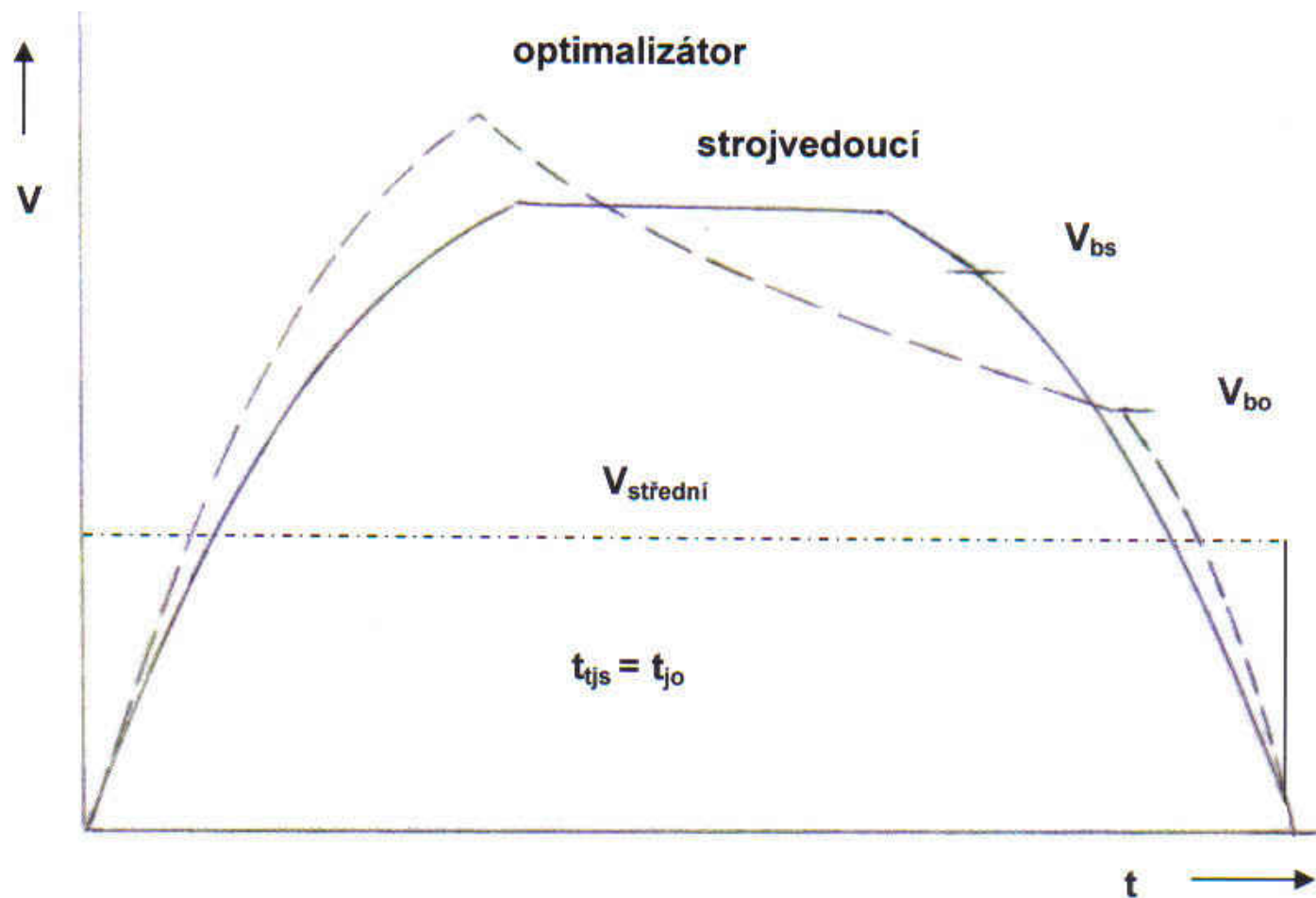
- **AVV má funkce:**
- **automatického vedení vlaku s dodržením rychlostních omezení,**
- **přesného cílového brzdění (± 1 m; ± 5 s) – železnice,**
- **optimalizace spotřeby energie optimální technikou jízdy.**

Instalován sériově na jednotkách 471, EL 380 i na motorových HV.

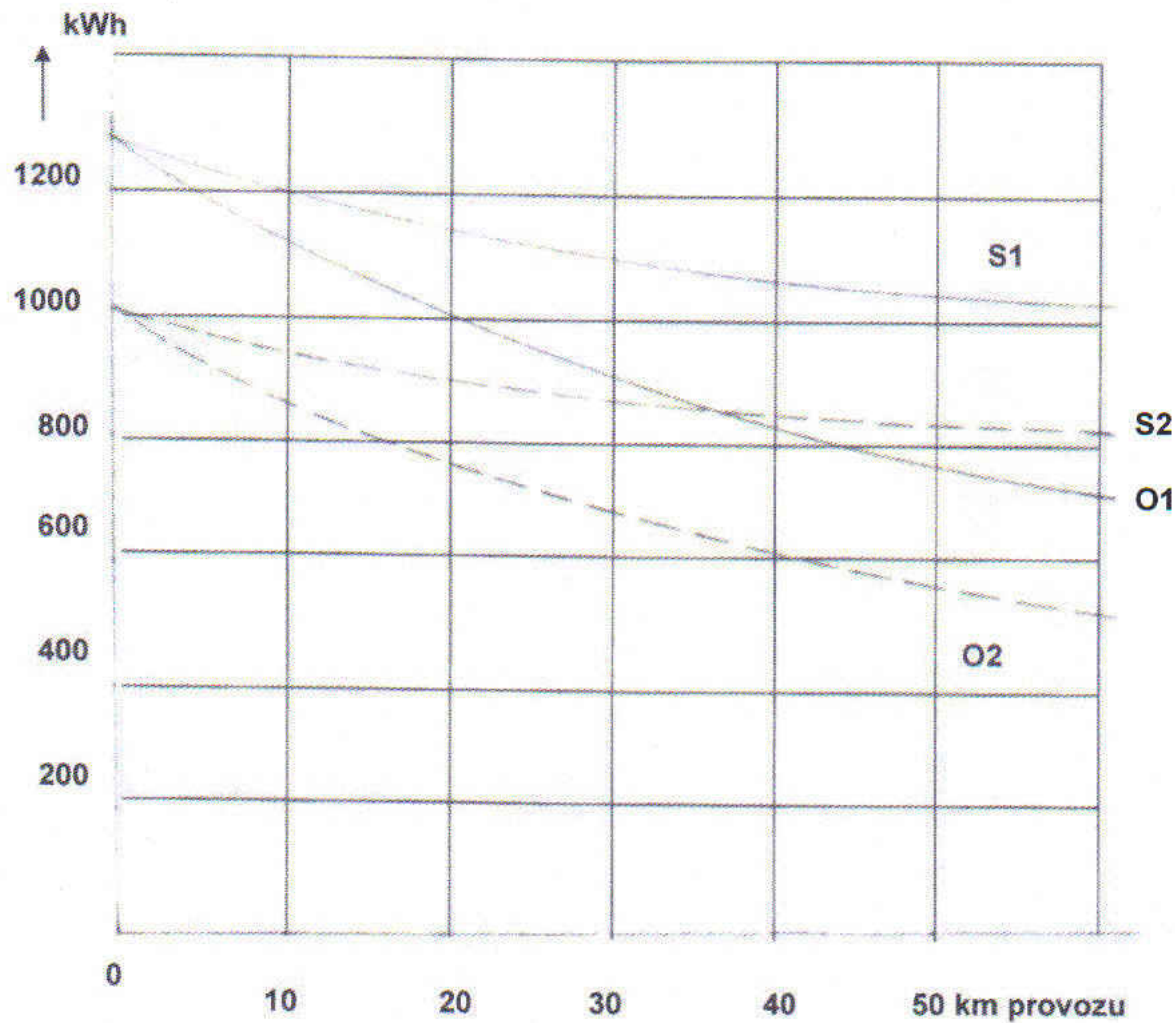
Informační body pro AVV



***AVV, automatické vedení vlaku (VÚŽ - AŽD/ČD),
optimalizace jízdy***



***AVV, automatické vedení vlaku (VÚŽ - AŽD/ČD),
optimalizace jízdy, trať Praha – Kolín (62 km).***



AVV = unikátní automatizační systém pro železniční tratě.

- Automaticky řídí vlak
- Automaticky přesně brzdí
- Optimalizuje spotřebu energie