

**České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta dopravní**

**Czech Technical University in Prague  
Faculty of Transportation Sciences**

Ing. Jaroslav Opava, CSc.

**Energetické aspekty  
vysokorychlostního železničního provozu**

**Energy Aspects  
of the High-Speed Railway Operation**

## **Summary**

More as 40 years of experiences with high-speed railway operation in the world evidences that this transportation subsystem is very effective solution for a ecological and energy saving traffic. For the transport distances up to 1000 km can the high-speed railways successfully compete with the air transport.

Assessment of the limiting driving vehicle output for the given operational conditions. Investigation of the possibility for the operation at an extreme gradient of the railway track. Determination of the high-speed train configuration from point of view of transport and technological requirements.

Power-to-weight ratio given from adhesion limiting. Necessary power-to-weight ratio given through the demand on speed and gradient of the railway line. Installed power-to-weight ratio of the selected traction vehicle and the train unite configuration.

Calculation of the energy consumption for the acceleration up to various speeds on the given railway line gradients. Assessment of increasing of the vehicle resistance at the movement through a tunnel.

Verification of the possibility of the high-speed train operation on the track gradient up to 50 ‰ at utilization of the standard railway energy supply system. Calculation of the minimum headway from point of view of electric energy supply equipments. Functions speed-time and speed-mileage at the ride on the railway line gradient of 50 ‰.

Recommendations of approach at decision making about the conception of the high-speed railway for the purpose of feasibility study elaboration.

## **Souhrn**

Zkušenosti s více než 40 let trvajícím provozem vysokorychlostních železnic ve světě dokazují, že tento dopravní subsystém je efektivním řešením ekologické a energeticky efektivní dopravy, která při přepravních vzdálenostech do 1000 km může úspěšně konkurovat dopravě letecké.

Stanovení mezního trakčního výkonu pro dané provozní podmínky. Zkoumání možnosti provozu na extrémním sklonu trati. Odvození akcelerační schopnosti na různých sklonech trati. Stanovení konfigurace vysokorychlostního vlaku z hlediska provozně technologických požadavků.

Měrný hmotný výkon daný adhezním omezením. Potřebný měrný hmotný výkon daný požadavkem na jízdní rychlost a sklon tratě. Instalovaný měrný hmotný výkon zvoleného trakčního vozidla a dané konfigurace trakční vlakové jednotky.

Výpočet energetické spotřeby pro rozjezdy do různých rychlostí na různých sklonech tratě. Stanovení zvýšení energetické náročnosti v důsledku průjezdu tunelem.

Ověření možnosti vysokorychlostního provozu na traťovém sklonu 50 ‰ z pohledu standardního systému energetického napájení. Výpočet minimálního následného intervalu vlaků z hlediska pevných energetických zařízení dráhy. Časový a dráhový průběh rychlosti při překonávání sklonu 50 ‰.

Doporučení stanovisek při rozhodování o koncepci vysokorychlostní železniční trati pro účely zpracování studie proveditelnosti.

**Klíčová slova:**

vysokorychlostní provoz, mezní adhezní výkon, konfigurace vysokorychlostního vlaku, instalovaný výkon, trakční energetická spotřeba, napájecí systém, minimální následný interval, maximální sklon vysokorychlostní tratě.

**Keywords:**

high-speed operation, limiting adhesion output, high-speed train configuration, installed output, traction energy consumption, power supply system, minimum headway, maximum gradients of a high-speed line.

---

České vysoké učení technické v Praze

Název: Energetické aspekty vysokorychlostního železničního provozu

Autor: Ing. Jaroslav Opava, CSc.

Počet stran: 27

Náklad: výtisků

© Jaroslav Opava, 2009

ISBN

## Obsah

1 Úvod .....	6
2 Mezní trakční výkon .....	6
3 Akcelerační schopnost .....	9
4 Konfigurace trakční jednotky .....	11
5 Energetická spotřeba .....	15
6 Energetické důsledky průjezdu tunelem .....	18
7 Mezní podmínky energetického napájení .....	20
8 Dopravně technologické důsledky .....	22
9 Závěr .....	24
Seznam použité literatury .....	25
Ing. Jaroslav Opava, CSc. ....	27

## 1 Úvod

Provoz vysokými rychlostmi nad 200 km/h tvoří od počátku šedesátých let minulého století v železniční dopravě novou specifickou kvalitativní kategorii a je současně i předpokladem a zárukou perspektivního uplatnění železničního dopravního systému v 21. století. Zkušenosti a rozvojové programy vyspělých železničních správ Evropy a Dálného východu, a v posledním období též USA [9], dokazují oprávněnost tohoto tvrzení. Celková délka evropských vysokorychlostních tratí činí dnes přes 5100 km. Jen ve Francii je v provozu 428 vysokorychlostních vlakových jednotek. Zkušenosti s více než 40 let trvajícím provozem ve světě dokazují, že vysokorychlostní železnice je efektivním řešením ekologické a energeticky úsporné dopravy, která při přepravních vzdálenostech do 1000 km může úspěšně konkurovat dopravě letecké.

Významnou nákladovou položkou výstavby vysokorychlostních tratí jsou náklady na umělé stavby železničního spodku, zejména na tunely a mosty. Cestou k omezení výskytu těchto objektů, a tudíž i k významné redukci potřebných investičních prostředků, je přimknutí trasy k přirozenému terénnímu reliéfu, což však podmiňuje výškový profil trati vykazující, podle konkrétní situace, značné sklony. Za jakých technických a provozně technologických podmínek jsou přijatelné mezní hodnoty traťových sklonů a jaké jsou související energetické nároky, to vše tvoří soubor otázek, které následující pojednání zkoumá.

## 2 Mezní trakční výkon

V oblasti jízdních rychlostí nad 200 km/h je primární otázkou hodnota měrného hmotného výkonu, který lze adhezní vazbou ve styku hnacího kola s kolejnicí s vysokou pravděpodobností realizovat, tj. též za méně příznivých adhezních podmínek. Vzhledem k tomu, že v případě vysokorychlostního provozu je nutno adhezní vazbou přenášet značné výkony, je žádoucí, aby se tak dělo bez neúčinného makroskluzu, který je příčinou jednak enormního opotřebení oběžné plochy hnacích kol, jednak vzniku ztrátového výkonu. Oba tyto fenomény mají dopad na růst provozních nákladů.

Proto je třeba při trakčně energetických rozvahách předcházejících projektovým návrhům pečlivě volit hodnotu adhezního součinitele  $\varphi$ , resp. jeho závislost na jízdní rychlosti  $\varphi(V)$ . Z tohoto důvodu byly zkoumány jednak klasické vzorce, jednak výsledky novodobějších studií a experimentálních prací [8], [10], [11], [12].

Uvažují-li se průměrné hodnoty adhezního součinitele  $\varphi$  mezi údaji velmi optimistickými, danými francouzskými experimenty s lokomotivou CC 21001, a naopak velmi skeptickými, zjištěnými Matsuidarou na japonských rychlovlacích [9], lze dojít k vyjádření závislosti na jízdní rychlosti  $V \geq 100$  km/h, které je dáno vztahem:

$$\varphi = 20,937 \cdot 10^3 (35,67 + V)^{-1} \quad [\text{N/kN, km/h}] \quad (1)$$

Tato zdánlivě konzervativní volba vychází z respektování hledisek vysoké provozní bezpečnosti, spolehlivosti a hospodárnosti [7], [15].

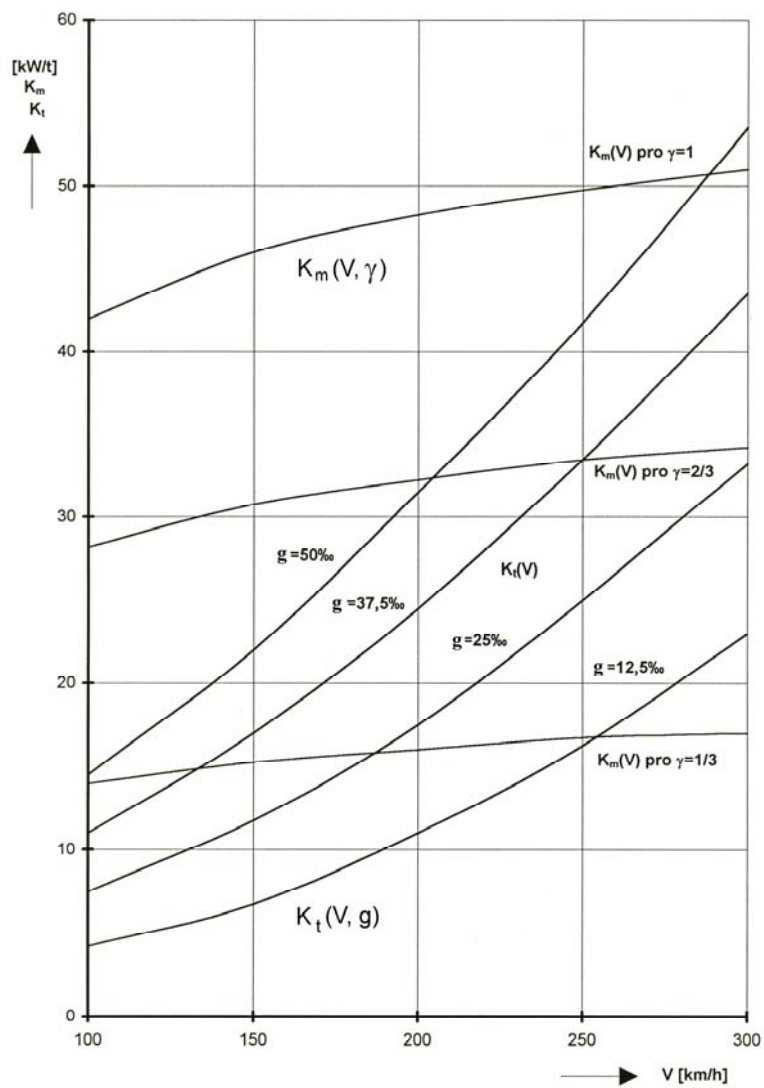
Dnešní stav techniky elektrických trakčních vozidel dovoluje vysoké měrné instalované výkony – u lokomotiv až přes 70 kW/t, které však jsou realizovatelné pouze za ojedinělých, ideálních adhezních podmínek. Pokud adhezní hmotnost  $M_a$  dané elektrické trakční jednotky je nižší než hmotnost celková  $M$ , tj. součinitel poměrné adhezní hmotnosti  $\gamma < 1$ , snižuje se při tomtéž součiniteli adheze a tomtéž využití adhezní hmotnosti charakterizovaném součinitelem  $\varepsilon_a$  [13] mezní disponibilní měrný trakční výkon  $K_m$  v odpovídajícím poměru  $\gamma$ . Platí totiž, že:

$$\gamma = \frac{M_a}{M} \leq 1 \quad [1, \text{t, t}] \quad (2)$$

Pro ilustraci je v obr. 1 znázorněna závislost  $K_m(V)$  pro různé hodnoty součinitele  $\gamma$ . Pro adhezně realizovatelný – disponibilní měrný trakční výkon platí obecný vztah:

$$K_m(V) = \varphi(V) \cdot \varepsilon_a \cdot \gamma \cdot V \cdot 2,72 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW/t, N/kN, 1, 1, km/h}] \quad (3)$$

Potřebný měrný trakční výkon  $K_t(V)$ , který je určován požadavkem



Zdroj: Autor

Obr. 1 Měrný hmotný disponibilní trakční výkon  $K_m$  a potřebný měrný hmotný výkon  $K_t$  v závislosti na jízdni rychlosti  $V$  pro různé hodnoty součinitele poměrné adhezní hmotnosti  $\gamma$  a různé traťové sklony  $g$



na překonání vozidlových a traťových odporů za jízdy danou rychlostí  $V$ , je dán vztahem:

$$K_t(V) = [r_v(V) + g] \cdot V \cdot 2,72 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW/t}] \quad (4)$$

Zde značí:  $r_v$  ..... měrný vozidlový odpor [N/kN],  
 $g$  ..... traťový sklon [‰],  
 $V$  ..... jízdní rychlost [km/h],  
 $\varphi$  ..... součinitel adheze [N/kN],  
 $\varepsilon_a$  ..... součinitel využití adhezní hmotnosti [1].

Grafické znázornění průběhu funkčních závislostí  $K_t(V)$  pro případ vlakové elektrické trakční jednotky s měrným vozidlovým odporem  $r_v(V)$ , odpovídajícím vlakové jednotce TGV-PSE [2], [3], je pro různé sklony  $g$  patrné rovněž v obr. 1.

Uvedené funkční závislosti určují dosažitelné jízdní rychlosti  $V$ , které jsou dány rovností hodnot funkcí podle (3) a (4):

$$K_m(V, \gamma) = K_t(V, g) \quad [\text{kW/t}] \quad (5)$$

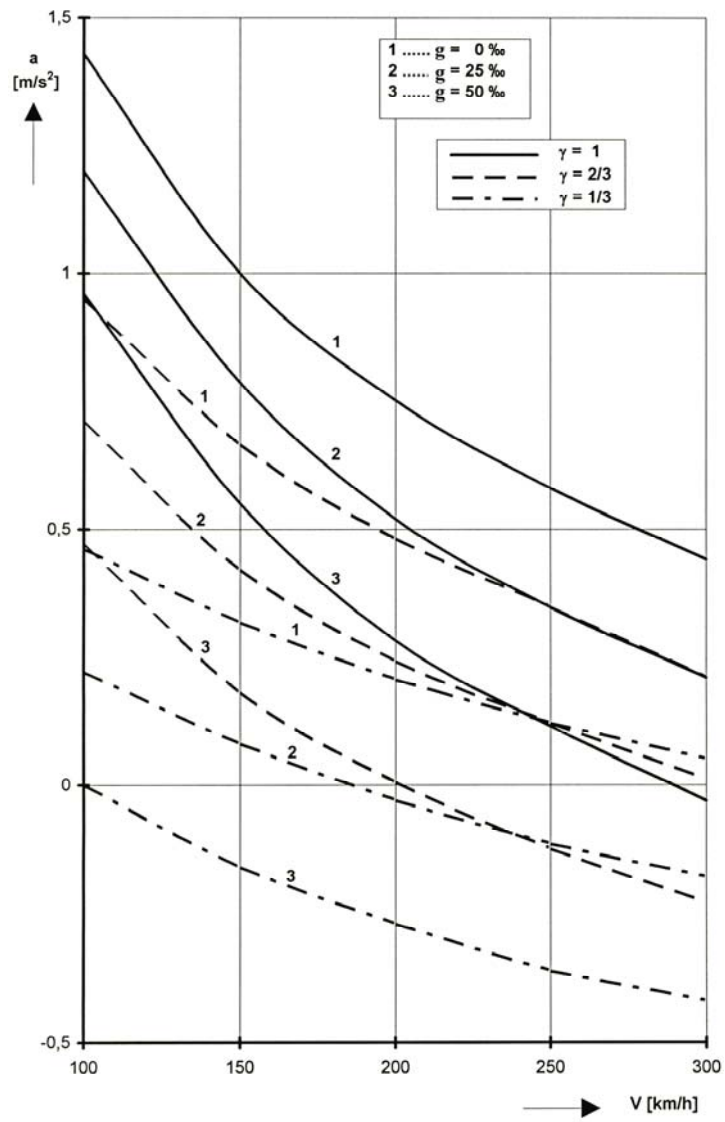
tj. příslušnými průsečíky dotyčných křivek v obr. 1. Tak např. pro  $g = 50$  ‰ a  $\gamma = 1$  je z hlediska uvažovaného adhezního omezení dosažitelná rychlost  $V = 289$  km/h.

### 3 Akcelerační schopnost

Pro posouzení trakčně dynamických vlastností je směřodátne vyjádření akcelerační schopnosti, která je dána funkcí  $a(V)$  pro trakční jednotku v určité konfiguraci dané součinitelem  $\gamma$  na různém traťovém sklonu  $g$ . Představu o konkrétních poměrech poskytuje grafické znázornění v obr. 2. Zde vyjádřená zrychlení jsou obecně dána vztahem:

$$a(V) = \frac{K_m(V, \gamma) - K_t(V, g)}{\xi \cdot V} \cdot 3,6$$

$$[\text{m/s}^2, \text{kW/t}, \text{kW/t}, 1, \text{km/h}] \quad (6)$$



Zdroj: Autor

Obr. 2 Zrychlení  $a$  v závislosti na jízdní rychlosti  $V$  na různých traťových sklonech  $g$  pro různé součinitele poměrné adhezní hmotnosti  $\gamma$

Symbol  $\xi$  značí součinitel vlivu rotujících hmot. Význam symbolů ostatních je zřejmý z výše uvedených vztahů (3) a (4) a z předchozího textu.

Z dosud provedeného rozboru vyúsťujícího do obou uvedených grafů lze odvodit poznatek, že provoz vysokými rychlostmi je z hlediska realizovatelných trakčních výkonů, i při uvažování střízlivých hodnot adhezního součinitele, tj. hodnot  $s$  jeho vysoce pravděpodobným výskytem, reálný i na traťových sklonech v rozmezí 35 až 50 ‰. Podmínkou je odpovídající sestava trakční jednotky, tj. dodržení příslušného hmotnostního poměru  $\gamma$  – viz vztah (2).

#### 4 Konfigurace trakční jednotky

Pro potřebnou hodnotu součinitele  $\gamma$  platí:

$$\gamma(V, g) = \frac{\xi \cdot a(V) \cdot 102 + r_v(V) + g}{\varphi(V) \cdot \varepsilon_a}$$

$$[1, 1, \text{m/s}^2, \text{N/kN}, \text{‰}, 1, 1] \quad (7)$$

Význam symbolů v rovnici (7) je zřejmý ze vztahů (1) až (4) a (6).

Konfigurace trakčních jednotek je obecně velmi rozmanitá a je výsledkem snahy splnit trakčně energetické požadavky na jedné straně a požadavky dopravně technologické na straně druhé.

V tab. 1 jsou uvedeny základní typy konfigurací vysokorychlostních trakčních jednotek rozčleněné do třech charakteristických skupin pro následující typické parametry:

Skupina A – dvě trakční hlavy s hmotností na dvojkolí 17, resp. 20 t s instalovaným hmotným výkonem  $K_{il} = 60 \text{ kW/t}$  a s určitým počtem vložených vozů bez trakčního pohonu.

Skupina B – jedna trakční hlava s hmotností na dvojkolí 17, resp. 20 t, s instalovaným hmotným výkonem  $K_{il} = 60 \text{ kW/t}$  a s určitým počtem vložených vozů a s vozem řídicím.

Skupina C - trakční pohon v určitém počtu vozů vložených s hmotností na dvojkolí 15 t, instalovaným hmotným výkonem  $K_{il} = 35 \text{ kW/t}$  a s vozy řídicími.

Tab. 1 Přehled různých konfigurací trakčních jednotek spolu s charakteristickými parametry

Zdroj: Autor

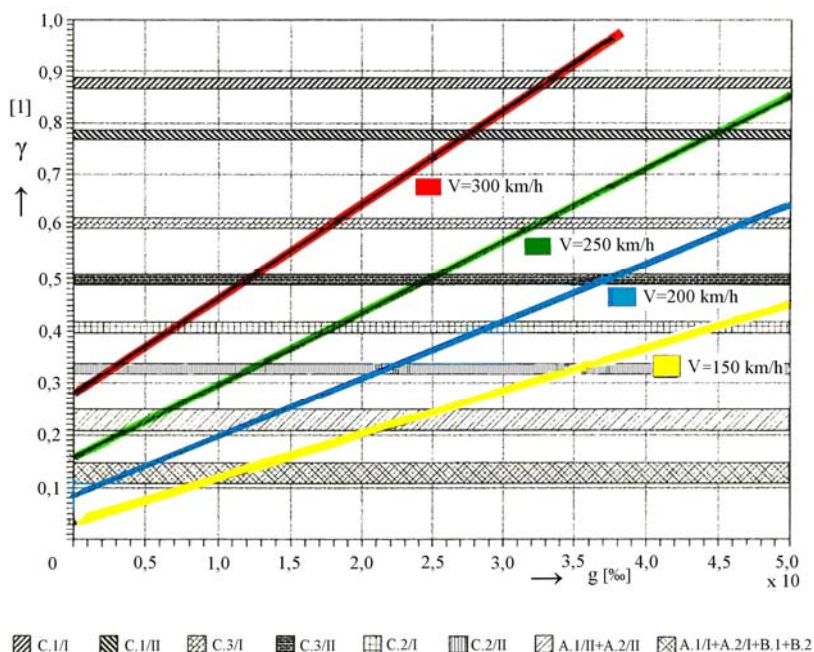
Označení konfigurace	Počet vozů v trakční jednotce				$n_s$ [1]	$M$ [t]	$\gamma$ [1]	$K_i$ [kW/t]	$q_m$ [t/ax]	$I_1$ [A]
	TH	RV	VM	VN						
A.1/I	2	0	0	17	1020	1156	0,12	7,1	17	377
A.2/I	2	0	0	17	1020	1180	0,14	8,2	20	443
A.1/II	2	0	0	8	480	616	0,22	13,2	17	375
A.2/II	2	0	0	8	480	640	0,25	15,0	20	441
B.1	1	1	0	7	480	548	0,12	7,4	17	187
B.2	1	1	0	7	480	560	0,14	8,6	20	221
C.1/I	0	2	15	0	1020	1020	0,88	30,9	15	1448
C.2/I	0	2	7	8	1020	1020	0,41	14,4	15	676
C.3/I	0	2	11	5	1080	1080	0,61	21,4	15	1062
C.1/II	0	2	7	0	540	540	0,78	27,2	15	676
C.2/II	0	2	3	4	540	540	0,33	11,7	15	290
C.3/II	0	2	5	3	600	600	0,50	17,5	15	510

Vysvětlivky k tab. 1:

TH ..... trakční hlava,

RV ..... řídicí vůz, zde vůz bez trakčního pohonu, vybavený stanovištěm strojvedoucího,

- VM ..... vložený vůz vybavený trakčním pohonem,  
 VN ..... vložený vůz bez trakčního pohonu,  
 $n_s$  ..... počet míst k sezení v celé trakční jednotce,  
 $M$  ..... hmotnost obsazené trakční jednotky,  
 $\gamma$  ..... součinitel poměrné adhezní hmotnosti,  
 $K_i$  ..... měrný hmotný instalovaný výkon v trakční jednotce,  
 $q_m$  ..... hmotnost na hnací dvojkolí,  
 $I_1$  ..... proud na sběrači, tj. proud odebíraný z trakčního vedení při měrném výkonu  $K_i$  – viz rovnice (11).



Zdroj: Autor

Obr. 3 Závislost potřebné hodnoty součinitele poměrné adhezní hmotnosti  $\gamma$  na sklonu trati  $g$ , pro udržení různých konstantních rychlostí  $V$  v rozmezí 150 až 250 km/h pro typové konfigurace trakčních jednotek. Pro rychlost 300 km/h je uvažována situace při konečném zrychlení  $0,06 \text{ m/s}^2$

Pro rychlou orientaci při volbě sestavy trakční jednotky z hlediska součinitele  $\gamma$  poslouží grafické znázornění na obr. 3. Označení sestav trakčních jednotek odpovídá symbolice použité v tab. 1, která soustřeďuje charakteristické parametry vybraných typických konfigurací [5], [6], [9].

Tab. 2 Hodnoty traťových sklonů, na nichž lze dosáhnout rychlostí 150, 200, 250 a 300 km/h při vlakových konfiguracích podle tab. 1

Zdroj: Autor

Označení konfigurace	Daná rychlost [km/h] dosažitelná na traťovém sklonu [‰]				$K_i$ [kW/t]
	150	200	250	300	
A.1/I	13,4	5,1	-1,2	-6,9	7,1
A.2/I	16,1	7,1	0,4	-5,6	8,2
A.1/II	28,3	16,3	7,8	0,5	13,2
A.2/II	32,7	19,6	10,4	2,8	15,0
B.1	14,2	5,8	-0,7	-6,5	7,4
B.2	17,0	7,9	1,0	-5,1	8,6
C.1/I	(71,6)	48,8	33,8	22,2	30,9
C.2/I	31,2	18,5	9,5	2,0	14,4
C.3/I	48,4	31,4	19,8	10,6	21,4
C.1/II	(62,5)	42,0	28,3	17,7	27,2
C.2/II	24,6	13,6	5,6	-1,3	11,7
C.3/II	38,8	24,2	14,1	5,8	17,5

Správná volba parametru  $\gamma$  je nutnou, nikoli však postačující podmínkou pro správné určení konfigurace trakční jednotky. Pro úplnost trakčně energetického návrhu vysokorychlostního vlaku je rovněž důležité stanovení odpovídajícího měrného hmotného instalovaného výkonu dané trakční jednotky pro dané provozně technologické podmínky, pro něž platí:

$$K_i = K_{i1} \cdot \gamma = K_t \leq K_m$$

$$[\text{kW/t, kW/t, 1, kW/t, kW/t}] \quad (8)$$

Význam symbolů je zřejmý z výkladu obsaženého v části 2.

Hodnota měrného hmotného výkonu  $K_{i1}$  je dána konstrukční koncepcí daného trakčního vozidla tvořícího součást uvažované trakční vlakové jednotky. Je tudíž dalším z určujících faktorů trakčně energetického návrhu.

V tab. 2 jsou uvedeny hodnoty traťových sklonů, na nichž lze dosáhnout dané rychlosti odpovídající uvažovaným měrným instalovaným výkonům v případě vlakových konfigurací podle tab. 1.

## 5 Energetická spotřeba

Energetická spotřeba pro konání trakční práce pro elektrické trakční vozidlo je obecně dána následujícími vztahy:

- Pro okamžitý činný příkon na sběrači platí:

$$P_{1t}(t) = \frac{F_t [V(t)] \cdot V(t)}{3,6 \eta_{TVE} \{F_t [V(t)], V(t)\}} = U_1(t) \cdot I_1(t) \cdot \lambda(t)$$

$$[\text{kW, kN, km/h, 1, kV, A, 1}] \quad (9)$$

- Energie na sběrači spotřebovaná v uvažovaném časovém intervalu je:

$$E_1(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} P_{1t}(t) \cdot dt \quad [\text{kWh}] \quad (10)$$

Zde značí:

$F_t$  ..... tažná síla na obvodu hnacích kol,

$\eta_{TVE}$  ..... celková energetická účinnost elektrického trakčního vozidla jako funkce jízdní rychlosti  $V$  a tažné síly  $F_t$ ,

$U_1$  ..... napětí na sběrači trakčního vozidla,

$\lambda$  ..... faktor výkonu – celkový účinník.

Pro trakční proud na sběrači – viz též vztah (8) - platí:

$$I_1(V) = \frac{K_i(V) \cdot M}{\eta_{TVE}(V, F_t) \cdot U_1 \cdot \lambda} \quad [\text{A, kW/t, t, 1, kV, 1}] \quad (11)$$

Další symboly jsou vysvětleny v částech 4 a 7.

V tab. 3 jsou uvedeny výsledky výpočtu energetických spotřeb pro konání trakční práce vztahované na sběrač pro případ trakční jednotky o osmi vozech s celkovou hmotností  $M = 420$  t, o měrném hmotném instalovaném výkonu  $K_i = 21,5$  kW/t a se součinitelem  $\gamma = 0,5$ .

Výpočet byl proveden podle SW vyvinutého v Laboratoři dopravní energetiky při Ústavu ekonomiky a managementu dopravy a telekomunikací na Fakultě dopravní ČVUT.

V tab. 4 jsou patrné měrné energetické spotřeby na sběrači odpovídající rozjezdům uvažovaným v tab. 3.

Měrné energetické spotřeby na sběrači pro jízdu konstantní rychlostí na různých traťových sklonech jsou uvedeny v tab. 5.



Tab. 3 Energetické spotřeby a doprovodné veličiny pro rozjezdy v daném rychlostním intervalu uvažované trakční jednotky na různých traťových sklonech

Zdroj: Autor

Traťový sklon [%]	Rychlostní interval [km/h]	Rozjezdová dráha [km]	Doba rozjezdu [s]	Trakční energie na sběrači [kWh]
0	0 ÷ 150	1,484	73,5	50,43
	0 ÷ 250	5,738	147,9	140,87
	0 ÷ 350	30,045	422,2	438,62
25	0 ÷ 150	2,429	116,6	82,36
	0 ÷ 250	16,594	351,9	368,34
50	0 ÷ 150	7,282	303,6	238,57

Tab. 4 Měrné energetické spotřeby vztažené na sběrač a příslušná intervalová zrychlení

Zdroj: Autor

Traťový sklon [%]	Rychlostní interval [km/h]	Měrná trakční energie [Wh/btkm]	Střední zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]
0	0 ÷ 150	80,91	0,57
	0 ÷ 250	58,45	0,47
	0 ÷ 350	34,76	0,23
25	0 ÷ 150	80,73	0,36
	0 ÷ 250	52,85	0,20
50	0 ÷ 150	78,00	0,14

Tab. 5 Měrné energetické spotřeby vztažené na sběrač pro jízdu konstantní rychlostí na různých traťových sklonech při jízdě do stoupání

Zdroj: Autor

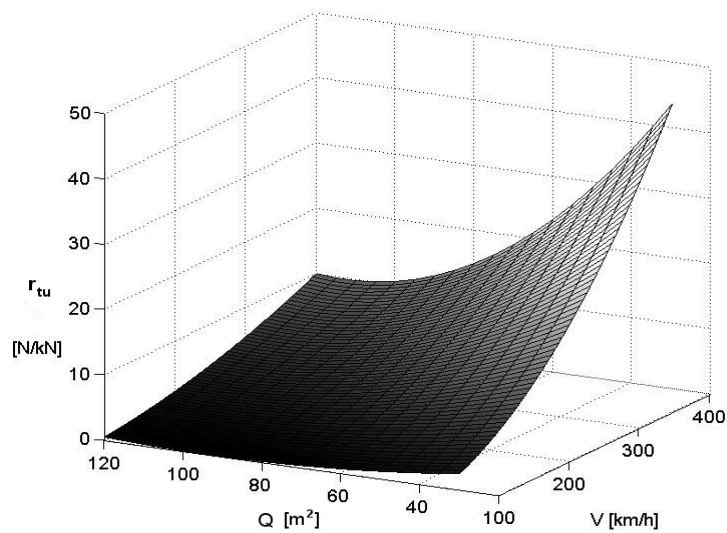
Jízdní rychlost [km/h]	Měrná spotřeba energie [Wh/btkm]				
	Traťový sklon [%]				
	0	12,5	25	37,5	50
150	17,45	56,52	95,59	134,67	173,74
200	26,45	65,52	104,60	143,67	182,75
250	37,58	76,65	115,72	154,80	193,87
300	50,77	89,84	128,92	167,80	

Časový průběh proudu, resp. příkonu při rozjezdu je rozhodující a směrodatný pro dimenzování napájecího systému vysokorychlostní dráhy, a tudíž i pro výši investičních nákladů. Energetická spotřeba naproti tomu významně a trvale ovlivňuje výši provozních nákladů.

## 6 Energetické důsledky průjezdu tunelem

Při průjezdu tunelem se obecně zvýší aerodynamická složka vozidlového odporu. Vzhledem k aktuálnosti daného problému v souvislosti s výstavbou vysokorychlostních tratí byly prováděny četné modelové zkoušky v aerodynamických tunelech a výpočetní simulace.

V trojdimenzionálním grafickém znázornění na obr. 4 je uvedena závislost přírůstku aerodynamického odporu  $r_{tu}$  na ploše tunelového průřezu  $Q$  a na jízdní rychlosti  $V$  pro tunel délky  $L = 1$  km. Z grafu sestrojeného pro trakční jednotku uvažovanou v části 5 plyne, že tradiční hodnoty tunelových průřezů při průjezdu vlaků vysokých rychlostí významně zvyšují aerodynamickou složku vozidlového odporu.



Zdroj: Autor podle [12]

Obr. 4 Přírůstek aerodynamické složky vozidlového odporu  $r_{tu}$  v závislosti na jízdni rychlosti  $V$  a na ploše tunelového průřezu  $Q$

Graf v obr. 4 byl sestaven podle následujícího vztahu:

$$r_{tu} = C \cdot (0,494302 \cdot L^{0,05645} + 0,145193 \cdot e^{-0,7385 \cdot L}) \cdot \left[ \left( \frac{72,02}{Q} \right)^{0,51} \cdot V \right]^{2,06} \cdot \frac{1}{9,81 \cdot M} \quad [\text{N/kN}] \quad (12)$$

Zde značí:

$C$  ..... součinitel aerodynamického odporu platný pro dané vozidlo ve volném prostoru za bezvětří  $[\text{N} \cdot \text{h}^2 \cdot \text{km}^{-2}]$ ,

$L$  ..... délka tunelu [km],  
 $Q$  ..... plocha průřezu daného tunelu [m<sup>2</sup>],  
 $V$  ..... jízdní rychlost vozidla [km/h],  
 $M$  ..... celková hmotnost daného vozidla [t].

Rovnice (12) byla odvozena pro trakční jednotku uvažovanou v části 5 na základě obecného vztahu vycházejícího z výzkumných prací na Technické univerzitě ve Vídni [12].

Přírůstek výkonu na obvodu hnacích kol vynucený nárůstem vozidlového odporu v důsledku přírůstku jeho aerodynamické složky je dán vztahem:

$$\Delta P_{tu} = 2,72 \cdot 10^{-3} \cdot r_{tu} \cdot V \cdot M$$

[kW, N/kN, km/h, t] (13)

Význam symbolů je zřejmý z předchozího výkladu.

Vliv uvedeného jevu zvyšujícího energetickou náročnost vysokorychlostního provozu lze redukovat jedině volbou větších tunelových průřezů, ovšem za cenu významného zvýšení nákladů na vybudování tunelu. Přitom je třeba též respektovat problém vzniku vzduchových tlakových rázů v tunelu působících na těleso vozidla a pronikajících i do prostoru pro cestující [14].

## 7 Mezní podmínky energetického napájení

Dalším úkolem při řešení praktické realizovatelnosti vysokorychlostního železničního provozu obecně, a na tratích s extrémními sklony zejména, je ověření, zda systém energetického napájení, tj. pevná elektrická trakční zařízení, vyhoví výše odvozeným nárokům na trakční výkony [5], [6].

Z důvodů ekonomických by nemělo být technické řešení energetického napájení atypické, tj. nemělo by vybočovat z dnes již tradičního pojetí jak koncepčního, tak konstrukčního řešení v podobě, jak se osvědčilo na vybudovaných vysokorychlostních tratích s menšími sklony [1], [4]. Předpokládá se tudíž, že trakční proudová soustava je 25 kV, 50 Hz s trakčními napájecími stanicemi

osazenými dvěma transformátory o jmenovitém výkonu po 20 MVA. Vzdálenost těchto transformoven budiž  $L_N = 40$  km. Napájení je jednostranné do obou vzájemně propojených stop trakčního vedení dvojkolejné trati. Přívod energie pro trakční transformovny je řešen zvláštním třífázovým vedením 110 kV trasovaným podél trati. To umožní eliminovat asymetrii jednofázového odběru a časovou nerovnoměrnost trakčního konzumu vůči všeužitečné národní energetické síti, na níž je toto vedení připojeno ve vhodných místech.

Každá stopa trakčního vedení je tvořena měděným trolejovým drátem o průřezu  $120 \text{ mm}^2$  a bronzovým lanem nosným  $70 \text{ mm}^2$ . Zpětné vedení je řešeno hliníkovým lanem  $240 \text{ mm}^2$  zavěšeným na podpěrách trakčního vedení. Toto lano je propojeno po krátkých úsecích s jízdními kolejnicemi. Popsané řešení umožní docílit poměrně jednoduchými prostředky měrnou impedanci rozvodu trakčního proudu  $z = 0,092 + j \cdot 0,208$ , čemuž odpovídá  $z = 0,227 \Omega/\text{km}$  a impedanční úhel  $\psi = 73,5^\circ$ .

Dále je ověřována mezní situace při funkčním výpadku sousední napájecí stanice, tj. stav, kdy trakční vozidlo je vzdáleno od napájecího bodu 40 km.

Připustí-li se úbytek napětí v trakčním vedení  $\Delta U = 4$  kV, tj. mezi trakční napájecí stanicí a sběračem trakčního vozidla, je mezní proud v napájecím úseku za reálného předpokladu, že faktor výkonu trakčního vozidla  $\lambda \cong 1$ , dán vztahem:

$$I_N \cong \frac{\Delta U}{L_{N, \max} \cdot z \cdot \cos \psi} \quad [\text{A}] \quad (14)$$

Zde značí:  $\Delta U$  ..... úbytek napětí mezi svorkami trakční napájecí stanice a sběračem trakčního vozidla [V],  
 $L_{N, \max}$  ..... největší vzdálenost trakčního vozidla od napájecího bodu [km],  
 $z$  ..... měrná impedance dané sestavy trakčního vedení [ $\Omega/\text{km}$ ],  
 $\psi$  ..... impedanční úhel dané sestavy trakčního vedení [ $^\circ$ ].

Vzhledem k výše uvedeným podmínkám přenosu elektrické energie trakčním vedením, kdy se po celou dobu průjezdu vlakové jednotky na vedení proudu podílí obě stopy trakčního vedení, lze považovat mezní proud stanovený podle rovnice (14), tj.  $I_N \cong 1100$  A za přijatelný, a to i v případě extrémně vysokých okolních teplot, kdy trvalá zatížitelnost jedné stopy uvažované sestavy trakčního vedení klesá až na 780 A při 40°C při opotřebovaném trolejovém drátu [4]. Zdánlivý příkon  $S$  do trakčního vedení potom, za předpokladu výstupního napětí trakční napájecí stanice  $U_{TNS} = 26,5$  kV, je  $S = 29,15$  MVA, což odpovídá necelým 75 % nominální hodnoty instalovaného výkonu trakční transformovny.

Obecně musí platit podmínka:

$$I_N \geq \sum_{k=1}^n I_{1,k} \quad [\text{A}] \quad (15)$$

Ve zkoumaném případě je  $k = 1$ , což znamená, že v napájecím úseku se nalézá jediný vlak jedoucí do stoupání. Z tab. 1 vyplývá, že pro všechny uvažované vlakové konfigurace, s výjimkou C.1/I, je podmínka daná vztahem (14), resp. (15) splněna.

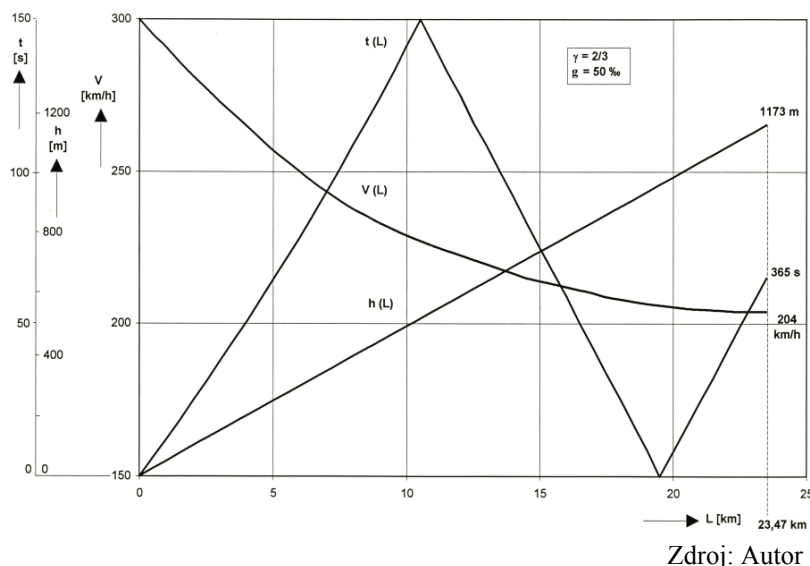
## 8 Dopravně technologické důsledky

Pro posouzení dopravně technologických důsledků za výše uvažovaných mezních trakčně energetických podmínek je směrodatný minimální následný časový interval vlaků  $i_{min}$ , který je z hlediska pevných elektrických trakčních zařízení [5] dán vztahem:

$$i_{min} = \frac{M \cdot L_{N,max}^2 \cdot K_t \cdot z \cdot \cos \psi \cdot 6 \cdot 10^4}{\Delta U \cdot U_1 \cdot V \cdot \eta_{TVE} \cdot \lambda} \quad (16)$$

[min, t, km, kW/t, Ω/km, 1, V, V, km/h, 1, 1]

Pro mezní podmínky zkoumané v části 7 a pro trakční jednotku uvažovanou ve znázornění na obr. 5, tj. při jízdě ustálenou rychlostí 204 km/h do stoupání 50 ‰, je  $i_{min} = 11,8$  min.



Obr. 5 Průběh jízdní rychlosti  $V$ , času  $t$  a překonaného výškového rozdílu  $h$  na ujeté dráze  $L$  při jízdě do stoupání 50 ‰

Pro ucelení názoru na provozní podmínky je účelné odpovědět na otázku poklesu rychlosti ve zkoumaném případě extrémního traťového sklonu. Za tím účelem bylo vypracováno grafické znázornění na obr. 5. Je zde uveden dráhový tachogram  $V(L)$  a chronogram  $t(L)$  jízdy trakční jednotky v sestavě odpovídající součiniteli  $\gamma = 2/3$  do stoupání  $g = 50 \text{ ‰}$  za předpokladu, že rychlost na úpatí tohoto stoupání je 300 km/h.

Z grafu plyne, že např. při souvislém překonání výškového rozdílu  $h = 100 \text{ m}$  poklesne rychlost pouze na 285 km/h. Při výškovém rozdílu  $h = 500 \text{ m}$  je rychlost na vrcholu stoupání 228 km/h, přičemž uplyne od nájezdu do stoupání doba 141 s. Jízdní rychlost se v případě dalšího pokračování jízdy do stoupání  $g = 50 \text{ ‰}$  ustálí na hodnotě 204 km/h po ujetí dráhy 23,47 km a po překonání výškového rozdílu 1173 m.

## 9 Závěr

Provedený rozbor dokazuje reálnost vysokorychlostního železničního provozu na tratích trasovaných se sklonem až 50 ‰ i při uvažování konzervativní, leč i za nepříznivých podmínek vysoce pravděpodobné, hodnoty adhezního součinitele. To je zárukou minimalizace výskytu neúčinného makroskluzu dvojkolí, a tím i energetických ztrát v adhezní vazbě. Rovněž je takto eliminováno nebezpečí vysokého opotřebení oběžné plochy kol a výskytu jejich vážných mikrostrukturálních materiálových poruch [7], [15]. Taktéž se snižuje opotřebení hlav kolejnic. Jmenované skutečnosti přispívají ke snížení provozních nákladů vysokorychlostního železničního systému a v neposlední řadě i provozní bezpečnosti.

Při návrhu konfigurace vysokorychlostní vlakové jednotky pro dané dopravně přepravní podmínky je třeba brát do úvahy, vedle omezení daných adhezní vazbou, trakční požadavky dané jízdou rychlostí a traťovým sklonem a rovněž pro dané konstrukční podmínky třeba uvažovat realizovatelný instalovaný trakční výkon.

Trasování se sklony až 50 ‰ umožní do značné míry eliminovat nutnost výstavby tunelových staveb. Provoz vysokými rychlostmi v tunelech je zdrojem vyšší energetické náročnosti pro konání trakční práce. Vlastní tunelové objekty jsou také, mimo jiné i s ohledem na závazná bezpečnostní opatření, investičně i provozně velmi nákladné.

Vysokorychlostní provoz na stoupáních až do 50 ‰ je reálný i z hlediska standardní koncepce pevných elektrických trakčních zařízení.

Pro vysokorychlostní vozební úkony je nejvhodnějším řešením elektrická trakční jednotka v konfiguraci vyhovující požadovaným trakčním a dopravně přepravním podmínkám. Předností trakčních jednotek je vysoký disponibilní trakční výkon při relativně nízkém vozidlovém odporu.

Využití uvedených poznatků může přispět ke snížení nákladů jak na výstavbu, tak na provoz vysokorychlostních tratí.



## Seznam použité literatury

- [1] BEHMANN, U. Operating and Power Supply Concept of Madrid – Seville High Speed Line. *Elektrische Bahnen*, May 1990, vol. 88, Heft 5. ISSN 0013-5437.
- [2] FORRAY, R.; LACOTE, F. Les resultats de l' explication du TGV Sud–Est. Projekt TGV Atlantique et la mise au point d un futur réseau TGV. *ZEV*, 1986, no. 6/7.
- [3] GUIHEU, CH. La résistance a lavancement des rames TGV-PSE. Bilan des études et resultats des mesures. *Revue Général de Chemin de Fer*, Janvier 1982.
- [4] KIESSLING, F. Overhead Contact System for Madrid – Seville High-Speed Line. *Elektrische Bahnen*, 1990, Heft 5.
- [5] OPAVA, Jaroslav. Harmonizace trakčně energetických podmínek vysokorychlostního provozu. In *PRORAIL '95. Súčasné problémy v koľajových vozidlách. XII. medzinárodná konferencia. Zborník prednášok, časť II., Žilina, 4.-6. októbra 1995*. Ed. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, VTS, 1995, s. 113-118. ISBN 80-7100-288-7.
- [6] OPAVA, Jaroslav. Mezní trakčně energetické podmínky vysokorychlostního provozu. In *1. vědecká konference o dopravě s mezinárodní účastí, díl III.: sborník příspěvků konference, 5. sekce: Dopravní prostředky, Pardubice, 1995*. Ed. Pardubice: UP DFJP a Nadace Jana Pernera, 1995, s. 259-266. ISBN 80-7194-014-3.
- [7] KALOČ, Rudolf; BENEŠ Libor; KOUT, Jan. Valivý kontakt jako dynamický tribologický problém. In *Scientific papers of the University of Pardubice, The Jan Perner Transport Faculty, Series B, No. 10, 2004, p. 45-64*. ISSN 1211-6610.
- [8] *Haftreibung der Lokomotiven unter dem Gesichtspunkt von Konstruktion und Betrieb, ORE B 44/RP 13/D: výzkumná zpráva*. Utrecht: ORE, April 1977. 49 s., 48 příloh.

- [9] OPAVA, Jaroslav. Traction Energy Conditions of Rolling Stock Involved in the Selection of Gradients for High-Speed Rail Alignments. Section 3 of Chapter 5. In *Upgrading Track and Roadbed for High – Speed Rail Operations. Specific Criteria Development: Internal Report No.: DTFR53– 00–P - 00377*. Submitted to United States Department of Transportation, Federal Railroad Administration. Ed. Washington: Jan H. Zicha, PE, January 30, 2001. P. 106-123.
- [10] ČÁP, Jaroslav; LATA, Michael. Auslegung der Adhäsion und ihre Nutzung für die Antriebsdynamik. *EI-Eisenbahningenieur*, Februar 2008.
- [11] LATA, Michael; ČÁP, Jaroslav. Experimental Research the Adhesion Problematic at Experimental Stand of Tram Wheel and Rotary Rail. *Materials Engineering*, No. 2, 2008.
- [12] WENDLER, Ekkehard. *Grundlagen des spurgebundenen Verkehrs*. Aachen: Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft RWTH, 2003.
- [13] JANSÁ, František. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1980, 312 s. OD 31-047-80 05-94.
- [14] GAWTHORPE, Roger. Pressure effects in railway tunnels. *Rail international*, April 2000.
- [15] BENEŠ, Libor; SCHMIDOVÁ, Eva; KALOČ, Rudolf. K problematice plastických pretvoření povrchových vrstev železničního kola. In *Scientific papers of the University of Pardubice, The Jan Perner Transport Faculty, Series B, 1995, p. 57-70*. ISSN 1211-6610.

## **Ing. Jaroslav Opava, CSc.**

Ukončení inženýrského studia v roce 1967 na Vysoké škole dopravní v Žilině, specializace Elektrická trakce a energetika. Inženýrský záznam v oblasti provozu a údržby elektrických kolejových vozidel. V roce 1968 asistent na Katedře elektrické trakce a energetiky na Vysoké škole dopravní v Žilině. Od roku 1970 odborný asistent se zaměřením na výukové předměty Teorie elektrické trakce, Elektrická vozidla, Městské dráhy elektrické. Vedení seminárních cvičení, lektorování přednášek, vedení diplomových prací, participace na řešení výzkumných úkolů, publikační a přednášková činnost. Obhajoba kandidátské disertační práce v roce 1979.

V roce 1975 nástup do Výzkumného ústavu železničního v Praze jako výzkumný pracovník v Oddělení elektrických trakčních vozidel. Od roku 1978 zástupce vedoucího oddělení a samostatný řešitel výzkumně vývojových úkolů. Od roku 1990 vedoucí tohoto oddělení.

V období 1984 až 1994 zástupce ČSD ve Výboru znalců ORE/ERRI A 168 Energetické problémy železnice. Aktivní účast na řešení experimentálních úkolů.

V roce 1994 vědecký asistent ředitele Výzkumného ústavu železničního a od roku 1997 náměstek ředitele pro výzkum. Od roku 1999 současně vedoucí Akreditované zkušební laboratoře č. 1099 v rámci Výzkumného ústavu železničního. V roce 2005 po transformaci Výzkumného ústavu železničního na akciovou dceřinou společnost člen představenstva a technický ředitel.

V období 1993 až 2007 externí učitel na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Zavedení a výuka předmětů Elektrotechnická zařízení dopravní infrastruktury, Elektrická trakce I a II. Člen komise pro státní závěrečné zkoušky.

Od roku 1999 až dosud vedení mezioborového studentského projektu Alternativní řešení vysokorychlostního železničního systému v ČR na ČVUT FD. Od 1. 10. 2006 pracovníkem ČVUT FD – Ústavu ekonomiky a managementu dopravy a telekomunikací. Zde zavedeny předměty Management technologických systémů pozemní dopravy a Ekonomicko-energetická analýza pozemní dopravy a jejich výuka pro bakalářské studium. Pro magisterské studium připraven pro zavedení předmětů Trakční energetika. Školitel doktorandů a výuka specializovaných předmětů doktorského studia Procesní modelování a Trakční energetika. Manažer Laboratoře dopravní energetiky založené na počátku roku 2008. Člen komise pro státní závěrečné zkoušky bakalářského a magisterského studia.