

Petr Škapa

Porovnání železniční a silniční dopravy z hlediska znečišťování ovzduší a čerpání primárních zdrojů energie

klíčová slova: *životní prostředí, exhalace, primární energie.*

1. Úvod

Veškerý dopravní provoz způsobuje zatěžování životního prostředí. Provozování dopravních prostředků na dopravních cestách se různě liší svým dopadem na jednotlivé složky životního prostředí

Pro zvýraznění dopadů jednotlivých druhů dopravy na životní prostředí je příspěvek zaměřen na porovnání železniční a silniční dopravy z hlediska znečišťování ovzduší a čerpání primárních zdrojů energie. Ke znečišťování ovzduší působením jednotlivých druhů dopravy dochází téměř výlučně spotřebou neobnovitelných energetických zdrojů.

2. Znečišťování ovzduší při provozu železniční a silniční dopravy

Znečišťování ovzduší vzniká odvodem chemických substancí z provozu spalovacích motorů do atmosféry. Vyvolané změny mají účinky na lidské zdraví i svět fauny a flóry. Účinky některých škodlivin zůstávají omezeny na okolí jejich zdroje, kde jsou koncentrace nejvyšší a mají tedy převážně lokální efekt (např. emise olova). Účinky jiných škodlivin však zdaleka přesahují okolí zdrojů, např. emise SO₂, CO₂ a jiné plynné exhalace, které ovlivňují klima v širším měřítku.

Emise při provozování dopravních prostředků vznikají při stáčení paliva do skladovacích nádrží, skladování a zbrojení dopravních prostředků palivem a vlastním provozem.

V emisích motorových hnacích vozidel se nalézají mezi jinými následující škodliviny:

- oxid uhličitý CO₂, který se uvolňuje při spalování fosilních paliv. Oxid uhličitý nemá podstatný vliv na lidské zdraví, ale je jednou z příčin vzniku "skleníkového efektu".
- oxid uhelnatý CO. Zdrojem jeho vzniku jsou především zážehové motory, které pracují s bohatou směsí při nedokonalém spalování s nedostatkem kyslíku. Škodlivé účinky na člověka se projevují při vdechování tak, že CO se v krvi váže s hemoglobinem na karboxylhemoglobin, který pak způsobuje nedostatečné okysličování krve.

Ing. Petr Škapa, Doc., CSc., 1940, VŠD Žilina, provoz a údržba dráhových vozidel 1965, VŠDS Žilina externí aspirantura v oboru stavba dopravních strojů a zařízení 1987, habilitace na VŠB Ostrava dopravní technika a technologie 1997, O30/5 GR ČD, ochrana životního prostředí, kontakt (02)23032004

- nespálené uhlovodíky C_xH_y. Jde o snadno odpařitelné těkavé organické látky, které jsou převážně zdraví

škodlivé. Při chodu nezátíženého motoru v nízkých otáčkách dochází k uvolňování polyaromatických uhlovodíků, které jsou převážně karcinogenní. Jejich vliv na zdraví člověka se projevuje zejména v proměnlivém městském provozu.

- oxidy dusíku NOx. Oxidy dusíku vznikají při vysokých teplotách spalování a jejich koncentrace s přebytkem vzduchu klesá. Oxidy dusíku reagují se vzdušnou vlhkostí a vodou a výrazně se podílejí na tvorbě smogu. Působí dráždivě na oči a dýchací cesty a působí výrazně korozivně.
- oxidy síry produkují především vznětové motory. Nebezpečný je zejména oxid siřičitý SO₂, který reaguje s vodou na kyselinu sírovou, což má za následek vznik "kyselého deště". Oxidy síry působí dráždivě, zvyšují korozi materiálů. Působením oxidů síry dochází i k poškozování omítek pozemních staveb apod.
- olovo, dibromid a dichlorid etylénu, které se přidávají do benzinových směsí, aby se dosáhlo požadované oktánové číslo a vyšší prchavosti vedlejších produktů spalování. Tyto látky negativně působí v potravním řetězci. V půdě, rostlinném a živočišném organismu se zpravidla kumulují.

Kromě oxidu uhličitého i metan a některé oxidy dusíku přispívají ke vzniku "skleníkového efektu" přímo, jiné jako např. oxid uhelnatý a uhlovodíky nepřímo. Nespálené uhlovodíky, prchavé organické sloučeniny a oxidy dusíku, olovo, aldehydy, dibromidy a dichloridy jsou potenciálními karcinogeny. Olovo, uhlovodíky a částice sazí jsou pro lidské zdraví všeobecně škodlivé.

2.1 Stanovení emisí

Stanovení množství látek emitovaných do prostředí při provozování dopravních prostředků je obtížné. Vztah mezi spotřebou paliva u motorových hnacích vozidel a emisemi je všeobecně slabý s výjimkou emisí CO₂. Množství emisí závisí na typu a technickém stavu spalovacího motoru, jeho zatížení, na poměru spalovacího vzduchu a paliva, kvalitě paliva apod.

U elektrické trakce budou rozhodující emise z výroby elektrické energie tepelnými zdroji spalující pevné palivo.

2.1.1. Měrné emise motorových hnacích vozidel

Stanovení měrných emisí u železničních motorových hnacích vozidel podle UIC [1] vychází z třibodového modelu. Naměřeným hodnotám emisí v jednotlivých měřících bodech je přidělen váhový faktor, takže výsledná hodnota měrných emisí je váženým průměrem tří naměřených hodnot.

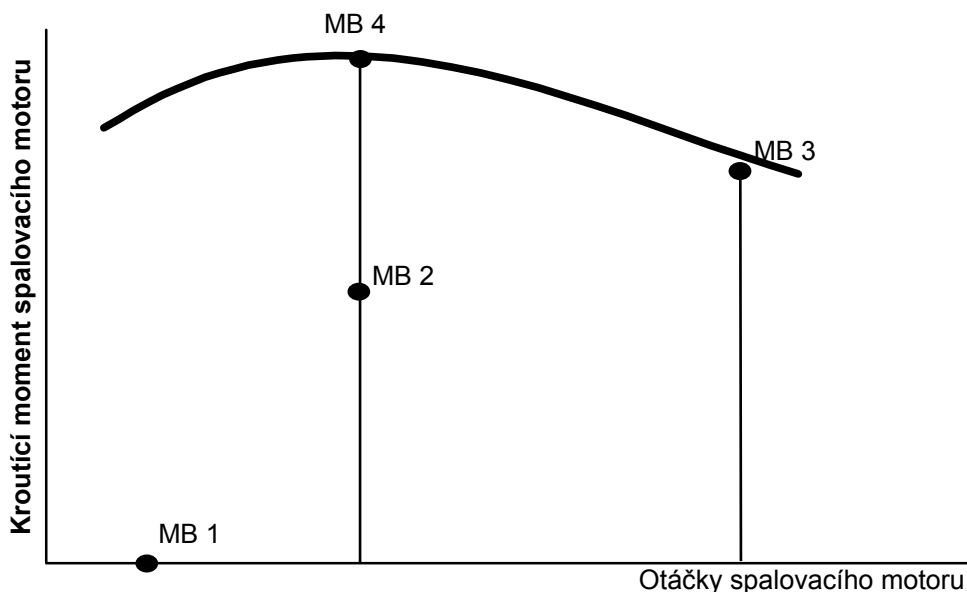
Kouřivost spalovacího motoru se měří při 60 % jmenovitých otáček a 100 % krouticího momentu motoru. Váhové faktory a schéma třibodového modelu jsou uvedeny v tabulce č. 1 a na grafu č. 1.

Tabulka č. 1

Měřící bod	Otáčky spalovacího motoru	Kroutící moment	Váhový faktor
1	Volnoběh		0,60
2	60 % jmenovitých otáček spalovacího motoru	50 %	0,15
3	Jmenovité otáčky spalovacího motoru	100 %	0,25
4	60 % jmenovitých otáček spalovacího motoru	100 %	(1)

(1) jen při měření tmavosti kouře.

Graf č. 1



2.1.2. Výpočet emisí z provozu motorových hnacích vozidel

Výpočet emisí podle metodiky UIC [1] je použitelný pro hodnocení technického stavu vozidla, jeho technických parametrů z hlediska konstrukce, ale je nepoužitelný pro výpočet celkových emisí motorových hnacích vozidel, které jsou provozovány za jiných podmínek než definovaný model měření.

Při řešení emisí z provozu železničních motorových hnacích vozidel je proto vycházeno ze zjednodušeného schématu procesu od těžby ropy (modelu) až po spotřebu paliva motorovým hnacím vozidlem (obr. č. 1). Výpočet vychází ze spotřeby trakčního paliva a to včetně spotřeby pro předtápění a klimatizaci vozových souprav. Při výpočtu emisí motorovými hnacími vozidly jsou uvažovány pouze ztráty vznikající při stáčení, skladování a výdeji paliva.

Stáčení a výdej paliva představuje ztráty 0,4% (odhad). Např. [11] uvádí úniky VOC vztažené na dvě manipulace (stáčení a výdej paliva) ve výši $0,02 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ztráty při skladování paliva ("dýchání nádrže") jsou podle autorizovaných měření prováděných pro ČD zanedbatelné (střední emisní tok ropných uhlovodíků je cca $(2 \text{ až } 9) \cdot 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$).

Při výpočtu emisí je vycházeno ze vztahu:

$$G_{\text{imtr}} = \frac{B_{\text{cmt}}}{(100 - z_1)} \cdot k_1 \cdot k_{\text{imt}} \quad (t) \quad (1)$$

kde:

- G_{imtr} je množství i-té škodliviny emitované do ovzduší při provozování motorové trakce (t),
- B_{cmt} - celková spotřeba trakčního paliva (tis. l),
- k_1 - součinitel převodu objemu spotřebovaného paliva na jeho výhřevnost a použitých jednotek,
- k_{imt} - emisní součinitel i-té škodliviny emitované do ovzduší při provozování motorové trakce ($\text{t}\cdot\text{TJ}^{-1}$),
- z_1 - ztráty při stáčení, skladování a výdeji paliva ($z_1 = 0,4\%$).

2.1.3. Výpočet emisí z provozu elektrických hnacích vozidel

Při stanovení emisí z provozu železničních elektrických hnacích vozidel včetně emisí, které vznikají při klimatizaci vozových souprav napájené z trakčního vedení, je vycházeno ze spotřeby elektrické energie na vstupu do napájecích stanic ČD. Pro výpočet je rozhodující spotřeba elektrické energie z tepelných elektráren spalujících fosilní paliva.

Při řešení lze vycházet ze zjednodušeného schématu (modelu) výroby a spotřeby elektrické energie z tepelných zdrojů spalujících fosilní paliva (obr. č. 2) ve variantě:

- a) těžba, úprava a doprava paliva na skládku energetického zdroje je součástí vlastní spotřeby při výrobě elektrické energie.
- b) těžba, úprava a doprava paliva na skládku energetického zdroje je součástí spotřeby elektrické energie z distribuční sítě.

Pro model výpočtu emisí z provozu elektrické trakce je volena varianta **b**.

Ze Senkeyova diagramu energetických přeměn lze stanovit hodnoty ztrát energetických přeměn u tepelného zdroje, ztrát při transformaci a přenosu elektrické energie do napájecího bodu ČD na straně energetiky.

Vzhledem ke složitosti výpočtu ztrát jednotlivých energetických přeměn při výrobě a distribuci elektrické energie je vycházeno z odborného odhadu.

- vlastní spotřeba při výrobě elektrické energie je odhadována na 7,186%. Odhad je odvozen z [5],
- ztráty při transformaci a přenosu elektrické energie jsou odhadovány na 3,841%. Vzhledem ke složitosti stanovení elektrické energie čerpané z jednotlivých zdrojů pro elektrickou trakci, je volen koeficient vycházející z hrubé a čisté výroby elektrické energie v roce 1997 [5] (tabulka č. 2).

Při výpočtu emisí je dále vycházeno z emisních součinitelů podle [6], které jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Při výpočtu emisí elektrické trakce je vycházeno ze vztahu:

$$B_{ieltr} = \frac{B_{cetr}}{(100 - z_2) \cdot (100 - z_3)} \cdot k_2 \cdot k_{iet} \cdot 10^7 \quad (t) \quad (2)$$

kde:

- B_{ieltr} je množství i-té škodliviny emitované do ovzduší při provozování elektrické trakce (t),
 B_{cetr} - celková spotřeba trakční elektrické energie (MWh),
 z_2 - ztráty vyjádřené jako vlastní spotřeba při výrobě elektrické energie,
 z_3 - ztráty při transformaci a přenosu elektrické energie,
 k_2 - koeficient vyjadřující poměr výroby elektrické energie v tepelných zdrojích spalujících fosilní paliva a celkové výroby elektrické energie,
 k_{iet} - emisní součinitel i-té škodliviny emitované tepelným zdrojem spalujícím fosilní paliva při výrobě elektrické energie ($kg \cdot MWh^{-1}$).

Výroba elektrické energie v ČR v roce 1997 [5] je uvedena v následující tabulce.

Tabulka č. 2

Zdroj	Jednotka	Výroba
Jaderné zdroje	tis. GWh	12 494
Vodní zdroje	tis. GWh	1 839
Parní zdroje	tis. GWh	50 265
Hrubá výroba	tis. GWh	64 598
Čistá výroba	tis. GWh	59 956
Tuzemská spotřeba	tis. GWh	58 768

V tabulce není uvedena výroba elektrické energie větrnými či jinými zdroji, které se na celkové výrobě a spotřebě podílejí cca 0,03 %.

Měrné emise znečišťujících látek při výrobě elektrické energie z tepelných elektráren (rok 1997) [6] jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 3

Znečišťující látka	Jednotka	Emisní součinitel (k_{iet})
Tuhé látky	$kg \cdot (MWh)^{-1}$	0,327
SO ₂	$kg \cdot (MWh)^{-1}$	10,435
NO _x	$kg \cdot (MWh)^{-1}$	1,720
CO	$kg \cdot (MWh)^{-1}$	0,299

2.2. Měrné emise silničních vozidel

Specifickými testy se stanoví měrné emise jednotlivých typů silničních motorových vozidel.

Skutečné emise z provozu motorových vozidel však ovlivňují podmínky, za kterých jsou tato vozidla provozována.

Zkušební testy sice umožňují hodnotit technický stav spalovacích motorů, ale neumožňují stanovit skutečné množství emisí, které znečišťují ovzduší. Emise z dopravy motorovými vozidly lze stanovit "emisními součiniteli" na podkladě:

- dopravních výkonů jednotlivých druhů dopravy a koeficientů charakterizující konkrétní podmínky dopravně přepravního procesu.
- na podkladě chemického složení motorových paliv, předpokládané účinnosti jeho spalování a dalších podmínek, které určují vznik emisí dopravních prostředků.

Emisní součinitelé podle literárních pramenů jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 4

Emisní součinitelé podle druhu dopravy					Emisní součinitelé podle spotřeby paliva	
Škodlivina	Jednotka	Železnice		Silnice	Jednotka	[4]
		Nákladní doprava				
		[2]	[3]	[2]		
CO ₂	g.tkm ⁻¹	41		207	tis.t.TJ ⁻¹	0,0710
CO	g.tkm ⁻¹	0,05	0,03	2,40	t.TJ ⁻¹	1,032
NO _x	g.tkm ⁻¹	0,20	0,20	3,60	t.TJ ⁻¹	1,877
C _x H _y	g.tkm ⁻¹	0,08	0,01	1,10	t.TJ ⁻¹	0,244
SO ₂	g.tkm ⁻¹				t.TJ ⁻¹	0,09412
částice	g.tkm ⁻¹		0,04		t.TJ ⁻¹	0,093
Škodlivina	Jednotka	Osobní doprava				
CO ₂	g.oskm ⁻¹	78		180		
CO	g.oskm ⁻¹	0,13	0,06	11		
NO _x	g.oskm ⁻¹	0,46	0,43	2,1		
C _x H _y	g.oskm ⁻¹	0,30	0,03	2,3		
SO ₂	g.oskm ⁻¹					
částice	g.oskm ⁻¹		0,08			

2.3. Porovnání emisí z provozu jednotlivých druhů dopravy

2.3.1. Celkové emise z dopravy v roce 1996

Podíl dopravy na celkových emisích hlavních škodlivin do ovzduší a podíl jednotlivých druhů dopravy na emisích z dopravy [8] je uveden v následující tabulce.

Tabulka č. 5

Emise z dopravy	CO ₂	CO	NO _x	C _x H _y	SO ₂	Tuhé částice	Pb
Podíl dopravy na celkových emisích (%)	7,8	28,2	43,3	40,2	0,7	3,2	81,2
Celkové emise dopravy (kt/rok)	9 662	250	187	70,8	6,28	5,74	0,13
Silniční doprava celkem (%)	93,0	95,4	92,8	97,4	91,3	91,0	95,7
• individuální doprava (%)	47,4	70,6	31,5	76,4	12,4	4,8	0
• veřejná osobní (%)	2,7	1,5	3,6	1,2	4,6	5	0
• MDH (autobusy) (%)	1,3	0,7	1,7	0,6	2,2	2,4	0

• doprava nákladní (%)	41,6	22,6	56	19,2	72,1	78,8	0
Žel. doprava (motor. trakce) (%)	4,4	2,3	5,8	2	7,5	8,2	0
Letecká doprava (%)	2,3	2,1	0,8	0,4	0,5	0	4,3
Vodní doprava (%)	0,3	0,2	0,6	0,2	0,7	0,8	0

Výpočet celkových objemů emisí jednotlivých druhů doprav je odvozen z celkových emisí z dopravy (tabulka č. 6). Emise jednotlivých druhů doprav v roce 1996 jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 6

Emise z dopravy	CO ₂	CO	NO _x	C _x H _y	SO ₂	Tuhé částice	Pb
Silniční doprava celkem (kt/rok)	8985,660	238,500	173,536	68,959	5,734	5,223	0,122
• individuální doprava (kt/rok)	4259,203	168,381	54,664	52,685	0,711	0,251	0,000
• veřejná osobní (kt/rok)	242,613	3,578	6,247	0,828	0,264	0,261	0,000
• MDH (autobusy) (kt/rok)	116,814	1,670	2,950	0,414	0,126	0,125	0,000
• doprava nákladní (kt/rok)	3738,035	53,901	97,180	13,240	4,134	4,116	0,000
Žel. doprava (motor. trakce)(kt/rok)	425,128	5,750	10,846	1,416	0,471	0,471	0,000
Letecká doprava (kt/rok)	222,226	5,250	1,496	0,283	0,031	0,000	0,006
Vodní doprava (kt/rok)	28,986	0,500	1,122	0,142	0,044	0,046	0,000

Emise ze silniční dopravy výrazně převyšují emise ze železniční dopravy a nejsou ani v poměru dopravních výkonů obou druhů doprav.

2.3.2. Emise železniční dopravy ze spotřeby paliva a trakční elektrické energie

Při výpočtu emisí z provozu železničních motorových hnacích vozidel je vycházeno z celkové spotřeby trakčního paliva a ze vztahu (1). Emisní součinitel i-té škodliviny emitované do

ovzduší je převzat ze [4]. Výsledky výpočtů emisí z provozu motorových hnacích jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 7

Rok	Spotřeba paliva (mil. l)	Škodliviny emitované provozem motorových hnacích vozidel do ovzduší.					
		CO ₂ (t)	CO (t)	NO _x (t)	C _x H _y (t)	SO ₂ (t)	Částice (t)
1994	173,356	432 692,747	6 289,280	11 438,934	1 487,000	573,592	566,767
1995	163,335	409 317,823	5 925,723	10 777,696	1 401,043	540,435	534,004
1996	159,428	397 928,766	5 783,979	10 519,891	1 367,530	527,508	521,231
1997	145,534	363 249,649	5 279,910	9 603,093	1 248,351	481,536	475,806

Při výpočtu emisí z provozu železničních elektrických hnacích vozidel je vycházeno z emisí elektrárenských energetických zdrojů spalujících pevná paliva, z celkové spotřeby elektrické trakční energie a ze vztahu (1). Emisní součinitel i-té škodliviny emitované do ovzduší je převzat ze [6]. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 8

Rok	Spotřeba trakční elektrické energie (GWh)	Škodliviny emitované provozem elektrických hnacích vozidel do ovzduší.			
		Tuhé látky (t)	SO ₂ (t)	N _{ox} (t)	CO (t)
1994	1 366,400	389,565	12 431,531	2 049,088	356,208
1995	1 372,630	391,341	12 488,212	2 058,431	357,832
1996	1 365,360	389,268	12 422,069	2 047,528	355,937
1997	1 255,119	357,839	11 419,104	1 882,210	327,198

2.3.3. Hodnocení postupu při stanovení emisí

Stanovení emisí pomocí "emisních součinitelů" je kvalifikovaným odhadem. Tento kvalifikovaný odhad vede k určité nepřesnosti. Míra nepřesnosti bude záviset na tom do jaké míry známe skutečné emise z jednotlivých doprav. Můžeme však stanovit kvalifikovaný odhad nepřesnosti. Nepřesnost kvalifikovaného odhadu bude vyplývat z náhodných a systematických chyb.

Náhodné chyby při odhadech emisních součinitelů lze charakterizovat:

- nepřesnost měřících zařízení a technik
- nedostatečný reprezentativní vzorek měření
- chybné údaje z hlediska využití vozidel

Systematické chyby při odhadu emisních součinitelů lze charakterizovat:

- chyby při stanovení součinitelů emisí:

chyby při modelování skutečného provozu. Model nemusí plně charakterizovat skutečné, reálné, podmínky (cykličnost rozjezdů, dosahované rychlosti, trakční náročnost)

⇒ chyby v součinitelích emisí převzatých z jiných států. Tyto součinitelé nemusí odpovídat podmínkám v ČR z hlediska vozidlového parku, trakčních podmínek, dopravní rychlosti apod. Tato skutečnost je patrná i z tabulky č. 4.

- chyby při hodnocení parku vozidel a jejich využití:

⇒ chybné odhady parku vozidel, který se podílí na dopravních výkonech. Skutečný park vozidel odvozený z dopravních výkonů nemusí odpovídat modelové situaci. Např. v osobní železniční dopravě z hrtkm nemusí být patrná skutečná skladba (poměr) lokomotiv a kolejových motorových vozů (dále jen kmv) a dále kmv podle řad.

⇒ chybné odhady využití vozidel. Jde zejména o využití silničních vozidel, kde je málo statistických údajů pro toto hodnocení. U železničních vozidel jde o hodnocení prázdných jízd, posunu, služebních a pracovních vlaků apod.

Za uspokojivé lze považovat údaje o spotřebě paliva, odhad emisních součinitelů CO, CO₂, SO₂, NO_x, C_xH_y, pro které je dostatečný soubor měření a hodnocení. Toto se však vztahuje na železniční dopravu. V silniční dopravě je problematická oblast provozu těžkých užitkových vozidel a stanovení emisí při "studených startech" obecně.

Při odhadech emisí z provozu elektrické trakce se dopouštíme nepřesnosti:

- při výpočtu hodnot účinnosti jednotlivých energetických přeměn v Senkeyovém diagramu pro parní elektrárny.

- předpokladem, že elektrická energie pro elektrickou trakci je čerpána v poměru vyrobené elektrické energie jednotlivými zdroji.

Za uspokojivé lze považovat údaje o "hrubé výrobě" elektrické energie v roce 1997 a měrné emise z tepelných elektráren v roce 1997.

Při hodnocení emisí z provozu elektrické trakce v letech 1994 až 1997 je nutno vzít v úvahu jinou strukturu výroby elektrické energie a strukturu hodnot emisí z provozování tepelných elektráren (např. v roce 1996 bylo odstaveno zařízení tepelných elektráren o souhrnném výkonu 1 275 MW, došlo k rekonstrukci tepelných zdrojů z hlediska omezení úniků NO_x, SO₂ apod. Do provozu byla uvedena odsiřovací zařízení o celkovém výkonu 2 710 MW a byla provedena denitrifikace spalin [9]).

3. Primární energie

Při energetickém hodnocení jednotlivých druhů dopravy je účelné toto hodnocení provádět na jednotné bázi a to hodnocením spotřeby primární energie jednotlivých druhů doprav.

3.1. Energetická náročnost dopravy

Spotřebu paliva dopravního prostředku lze obecně vyjádřit vztahem:

$$B_{dp} = \sum b_{it} \cdot t_{it} + \sum b_{io} \cdot t_{io} + \sum b_{ip} \cdot t_{ip} \quad (l) \quad (7)$$

kde:

- b_{it} je měrná spotřeba paliva i-tého regulačního stupně při jízdě tažnou silou (l.min⁻¹),
- t_{it} - doba jízdy tažnou silou na i-tém regulačním stupni (min),
- b_{io} - měrná spotřeba paliva při volnoběhu (l.min⁻¹),
- t_{io} - doba provozu vozidla na volnoběhu v i-tém časovém intervalu (min),
- b_{ip} - měrná spotřeba i-tého pomocného pohonu vozidla (l.min⁻¹),
- t_{ip} - doba provozu i-tého pomocného pohonu vozidla (min).

Rozhodující pro porovnání spotřeby energie jednotlivých druhů doprav bude spotřeba pro trakční účely. Zjednodušené schéma silničního a železničního hnacího vozidla je znázorněno na obr. č. 3 a č. 4.

Jako kritérium energetické náročnosti jednotlivých druhů doprav je volena trakční práce na obvodu hnacích kol. Lze prokázat, že tato práce je úměrná spotřebě energie. Nepřesnost výpočtu bude ovlivněna volnoběžnou spotřebou a spotřebou pomocných pohonů vozidla. Pro další úvahu je vycházeno z měrné trakční práce, kterou lze vyjádřit vztahem:

$$f_o - (o_v + o_t) = k_o \cdot \frac{dV}{dT} \quad (N.kN^{-1}) \quad (8)$$

$$\text{Pro rovnoměrnou rychlost } k_o \cdot \frac{dV}{dT} = 0$$

kde:

- f_o je měrná tažná síla na obvodu hnacích kol (N.kN⁻¹),
- o_v - měrný vozidlový odpor (N.kN⁻¹),
- o_t - měrný traťový odpor (N.kN⁻¹),
- k_o - součinitel, který vyjadřuje vliv rotačních hmot a přepočty použitých velečín,
- dV - diferenciální změna rychlosti (km.h⁻¹),
- dT - diferenciální přírůstek času (min).

Při stejné hodnotě měrného traťového odporu bude o velikosti měrné tažné síle rozhodovat měrný vozidlový odpor, který lze vyjádřit vztahem:

$$o_v = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (N.kN^{-1}) \quad (9)$$

kde:

- a je měrný valivý odpor (N.kN^{-1}),
- b - měrný čepový odpor ($\text{N.kN}^{-1}.\text{h.km}^{-1}$),
- c - měrný odpor prostředí ($\text{N.kN}^{-1}.\text{h}^2.\text{km}^{-2}$).

Předností železniční dopravy ve srovnání s dopravou silniční je nižší měrný valivý odpor. Hodnota měrného valivého odporu u železničních vozidel se pohybuje v rozmezí 1 až 2 (N.kN^{-1}). Měrný valivý, čepový odpor a měrný odpor prostředí je závislý na poměru hmotnosti hnacího vozidla a hmotnosti zátěže (i).

U silničních vozidel je měrný čepový odpor zanedbatelný. Měrný valivý odpor je však výrazně vyšší a je závislý na povrchu vozovky. Jeho hodnota je:

$a_s = 13$ (N.kN^{-1}) pro asfaltový povrch vozovky,

$a_s = 15$ (N.kN^{-1}) pro betonový povrch vozovky,

$a_s = 20$ (N.kN^{-1}) pro kamennou kostku vozovky.

Měrný odpor prostředí lze vyjádřit vztahem:

$$c = \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot S \cdot (V \pm V_o)^2 \cdot Q^{-1} = 0,047 \cdot \frac{c_x \cdot S \cdot (V \pm V_o)^2}{Q} \quad (\text{N.kN}^{-1}) \quad (10)$$

kde:

- ρ je měrná hmotnost vzduchu při definovaném tlaku a vlhkosti (kg.m^{-3}),
- c_x - koeficient tvaru jízdní soupravy (-),
- S - čelní plocha jízdní soupravy (m^2),
- V - rychlost pohybu jízdní soupravy (km.h^{-1}),
- V_o - rychlost větru (km.h^{-1}),
- Q - tíha jízdní soupravy (kN)

Pro porovnání vozidlových odporů při rovnoměrné rychlosti je volen následující model:

a. silniční souprava:

- Pohotovostní hmotnost tahače návěsů (LIAZ 110.571) 6 700 kg
- Pohotovostní hmotnost valníkového návěsu (NV 30.23.20 CT) 7 200 kg
- Hmotnost přepravovaného zboží 20 000 kg
- Celková hmotnost jízdní soupravy **33 900 kg**
- Hodnota i **0,198**

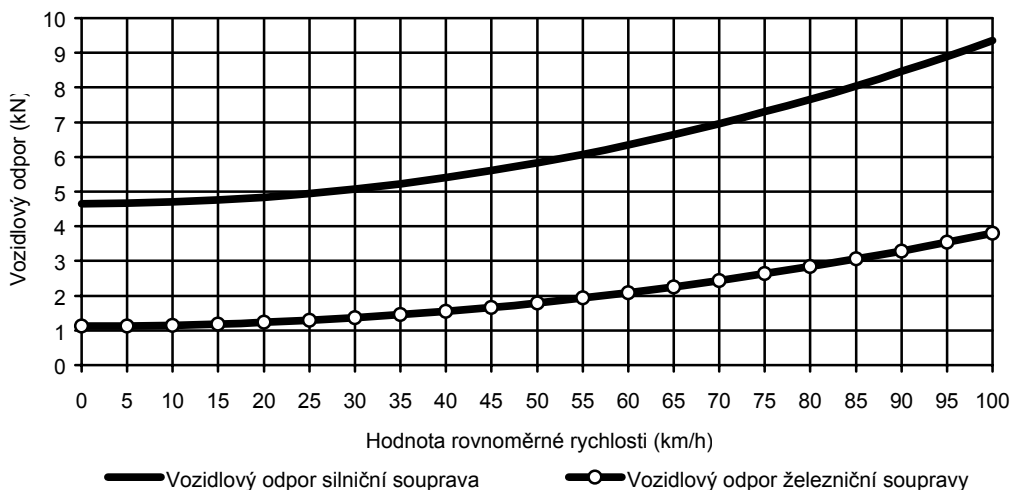
b. železniční souprava pro hodnotu $i = 0,198$

- Hmotnost hnacího vozidla (lokomotivy řady 363) 87 t
- Vlastní hmotnost nákladního vozu 12 t
- Hmotnost přepravovaného zboží na nákladním voze 20 t
- Pro hodnotu $i = 0,198$ bude:
 - ⇒ Počet nákladních vozů v soupravě 11
 - ⇒ Hmotnost přepravovaného zboží 220 t
 - ⇒ Celková hmotnost soupravy (včetně hnacího vozidla) **439 t**

Průběh vozidlového odporu, průběh výkonu na obvodu hnacích kol v závislosti na rovnoměrné rychlosti a při rozjezdu zrychlením $a_r = 32,4 \text{ km.h}^{-1}.\text{min}^{-1}$ je graficky znázorněn na grafu č. 2 a 3.

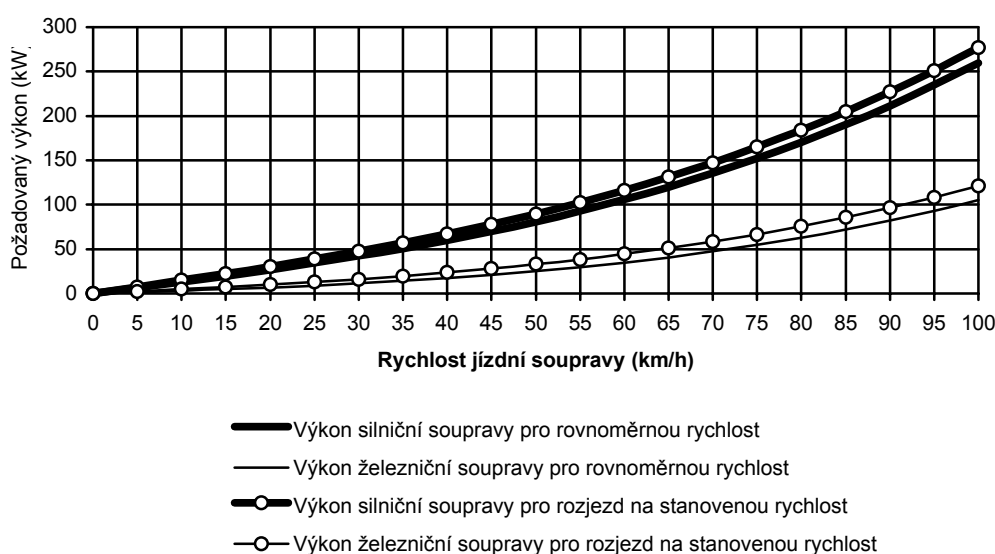
Graf č. 2

**Průběh vozidlového odporu silniční a železniční soupravy
v závislosti na rovnoměrné rychlosti ($i=0,198$).**



Graf č. 3

**Průběh výkonu pro modelovou jízdní soupravu při přepravě 20 tun
zboží ($i=0,198$).**



V grafu č. 2 se výkonem jízdní soupravy rozumí výkon na obvodu hnacích kol. Potřebný instalovaný výkon bude vyšší o ztráty při přenosu výkonu a o potřebný výkon pomocných pohovů (obr. č. 1 a č. 2).

Z grafů č.2 a č.3 je patrné, že pro stejné množství přepravovaného zboží bude nižší energetická náročnost železniční dopravy, což se projeví i nižším znečištěním životního prostředí exhalacemi škodlivin do ovzduší.

3.2 Výpočet primární energie

Při výpočtu spotřeby primární energie u železniční a silniční dopravy je vycházeno ze zjednodušených schémat přenosu energie (obr. č. 1 a č. 2).

U elektrické trakce lze celkovou účinnost energetických přeměn (po vstup do napájecího bodu) na podkladě účinností jednotlivých druhů elektrárenských zdrojů ohodnotit na **20,2%** (včetně externí spotřeby při dopravě paliva, účinnosti jednotlivých druhů výroby elektrické energie apod.). U motorové trakce (i silniční dopravě) lze

účinnost energetických přeměn (po načerpání paliva do nádrže) hodnotit na **87,4%**.

V následujících tabulkách je provedeno porovnání silniční a železniční dopravy z hlediska čerpání primární energie [2].

Tabulka č. 9

Druh dopravy		A	B		
			1	2	3
1	Osobní auta (benzinová směs):				
	• obsah pod 1,4 l	4	7,5	2,61	0,652
	• obsah 1,4 až 2,0 l	4	8,6	2,98	0,745
	• obsah nad 2 l	4	13,4	4,65	1,163
2	Osobní auta (nafta):				
	• obsah pod 1,4 l	4	5,9	2,26	0,565
	• obsah 1,4 až 2,0 l	4	7,2	2,76	0,690
	• obsah nad 2 l	4	9,6	3,65	0,913
3	Autobus:				
	• meziměstský	48	36,7	14,02	0,292
	• minibus	20	28,5	7,08	0,354
	• expresní	46	29,9	11,43	0,248
4	Železnice:				
	• rychlík	563	1527	160,9	0,286
	• příměstský vlak	300	749	78,9	0,263

A počet míst k sezení v dopravní jednotce (os)

B spotřeba energie:

1 spotřeba na 100 km (l), u železnice(kWh)

2 spotřeba primární energie na vozokm (MJ)

3 spotřeba primární energie na přepravovanou osobu (MJ/os)

Měrná spotřeba energie různých druhů dopravy v závislosti na vytížení dopravních prostředků:

a. nákladní doprava:

Dopravní prostředek		A (t)	B (l/100 km)	C (MJ/tkm)		
				50 %	75 %	100 %
1	Silniční doprava:					
	5-nápravový návěs a tahač	38	43,5	1,38	0,99	0,69
	4-nápravový návěs a tahač	32	36,3	1,35	0,86	0,67
	3-nápravový návěs a tahač	20	29,5	1,51	1,07	0,75
	4-nápravové nákladní auto	20	28,5	3,11	2,22	1,55
	3-nápravové nákladní auto	16	23,5	23,5	1,81	0,91
	dodávkový automobil-skříň	3,5	18,5	8,11	5,81	4,06
	dodávkový automobil-město	1,75	15,5	16,01	11,43	8,01
2	Železnice:					
	hromadný substrát				0,61	
	vozová zásilka včetně svozu a odvozu				1,01	

A hrubá hmotnost (t)

B spotřeba pohonných hmot (l/100 km)

C měrná spotřeba energie (MJ/tkm)

Tabulka č. 11

b. osobní doprava.

Dopravní prostředek:		Měrná spotřeba energie (MJ/oskm)			
		25 %	50 %	75 %	100 %
1	Osobní auta (benzinová směs):				
	obsah pod 1,4 l	2,61	1,31	0,87	0,62
	obsah 1,4 až 2,0 l	2,98	1,49	0,99	0,75
	obsah nad 2 l	4,65	2,33	1,55	1,16
	Osobní auta (nafta)				
	obsah pod 1,4 l	2,26	1,13	0,75	0,57
	obsah 1,4 až 2,0 l	2,76	1,38	0,92	0,69
2	Autobus:				
	meziměstský	1,17	0,58	0,39	0,29
	minibus	1,42	0,71	0,47	0,35
	expres	0,96	0,51	0,33	0,25
3	Železnice				
	rychlík	1,14	0,57	0,38	0,29
	příměstský vlak	1,05	0,59	0,35	0,26

4. Závěr

Z hlediska spotřeby energetických zdrojů lze silniční a železniční dopravu charakterizovat:

Z čerpání energie podle jednotlivých druhů doprav lze odvodit:

- ⇒ u osobních automobilů je výrazný rozdíl mezi malými, středními a velkými vozidly (podle kubatury)
- ⇒ i energetická účinnost
- ⇒ při plném vytížení je nejnižší spotřeba železniční a autobusové dopravy
- ⇒ železniční doprava má nejnižší měrnou spotřebu energie

Z hlediska znečišťování ovzduší dopravou nejvíce je zatěžováno životní prostředí emisemi ze silniční dopravy.

Na druhé straně je třeba si uvědomit, že pouze část dopravních výkonů automobilové dopravy by mohla převzít železniční doprava.

Literatura:

- [1] UIC-Kodex 6231-1, 623-2, 623-3, předpisy UIC pro měření emisí motorových hnacích vozidel.
- [2] Možnosti volby internalizace externích nákladů dopravy v EU, Komise EU, Brusel 1995, překlad ODIS-IS Praha, 1996
- [3] Opava, J.: Energetické a ekologické aspekty místních drah a požadavky na vozidlový park, Možnosti lokální dopravy, VĚDĚS Žilina, 1994
- [4] Zpracování podkladů zaměřených ke stabilizaci a k postupnému snižování negativních účinků dopravy na životní prostředí v ČR, ČD Praha, 1995
- [5] Pick, V.: Mochovce, Temelín, Škoda Praha a bezpečnost, Hospodářské noviny, 23.4.1998, str. 9.
- [6] Výroční zpráva SPEZO, ČEZ 1997
- [7] U neuvedených zdrojů, je čerpáno z podkladů O30/5 GŘ ČD
- [8] Zpráva o životním prostředí v České republice v roce 1996, MŽP ČR, říjen 1997
- [9] Aktivita podniků v oblasti ochrany životního prostředí v roce 1996, MŽP ČR, listopad 1997
- [10] Plamínková, J.: Vřesová - elektrárna nové generace, Eko journal Planeta 1998, 7/1998
- [11] Krayzel, Z.: Ochrana ovzduší u čerpacích stanic pohonných hmot v České republice, Planeta 95, 4, str 13
- [12] Graja, J., Mojžíš, V.: Energetická náročnost a ochrana životního prostředí v kombinované dopravě silnice
- [13] Projekt MDS č. 401/330/601 Stabilizace a postup snižování zátěže životního prostředí z dopravy v České