

**Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Energetická náročnost železniční dopravy ve spojení  
Evropa - Asie**

**Bc. Tomáš Sodomka**

**Diplomová práce  
2012**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Sodomka**  
Osobní číslo: **D10654**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura: Elektrotechnická zařízení**  
Název tématu: **Energetická náročnost železniční dopravy ve spojení Evropa - Asie**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Technické, ekonomické a energetické parametry letecké přepravy mezi Evropou a Asií  
Parametry železnice pro přepravu osob mezi Evropou a Asií  
Parametry železnice pro přepravu zboží mezi Evropou a Asií  
Porovnání parametrů letecké a železniční přepravy mezi Evropou a Asií  
Citlivostní analýza parametrů pro železniční dopravu s ohledem na energetiku vozby  
Analýza různých způsobů elektrického napájení trati a výběr optimálního řešení

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**CERM. Matematika, Fyzika. [s.l.] : BEN, 2010. 110 s.**

**DANZER, Jiří. Elektrická trakce I.. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2008.**

**JANSA, F. Dynamika a energetika elektrické trakce. NADAS, 1980.**

**CERM. Aerodynamika, konstrukce a systémy letadel. [s.l.] : BEN, 2008. 450 s.**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce:

**30. listopadu 2011**

Termín odevzdání diplomové práce:

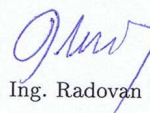
**31. května 2012**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 22. února 2012

## **PROHLAŠUJI:**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Tomáš Sodomka

## **PODĚKOVÁNÍ**

V první řadě bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Pohlovi z firmy Siemens za odborné vedení, všestranné rady a připomínky při zpracování této práce.

Dále vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Radovanu Dolečkovi Ph.D. Ještě by jsem rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

## **ANOTACE**

Diplomová práce se zabývá energetickou náročností železniční dopravy ve spojení Evropa – Asie. Je zde obsažen návrh tratě, výpočet energetické náročnosti, popis zabezpečení a napájení tratě. Dále je zde porovnání parametrů s leteckou dopravou.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Železnice, doprava, model, trať, vysokorychlostní vlak, letadlo, spotřeba

## **ANNOTATION**

This thesis deals with the energy intensity of rail transport in conjunction Europe - Asia. There is included a proposal of tracks, calculation of energy performance, description of security and power lines. Furthermore there is compared parameters with air transport.

## **KEYWORDS**

Railway, transport, model, track, high-speed train, plane, consumption

# OBSAH

ÚVOD.....	- 9 -
<b>1. VYSOKORYCHLOSTNÍ ŽELEZNIČNÍ TRATĚ .....</b>	<b>- 12 -</b>
1.1. Návrh vysokorychlostní železniční tratě .....	- 12 -
1.2. Rozvětvení vysokorychlostní železniční tratě .....	- 12 -
1.3. Shrnutí.....	- 13 -
<b>2. ZABEZPEČENÍ ŽELEZNIČNÍ TRATĚ .....</b>	<b>- 14 -</b>
2.1. Systém ETCS.....	- 14 -
2.2. Funkce ETCS .....	- 15 -
2.3. Aplikační úrovně.....	- 16 -
2.3.1. Aplikační úroveň 1 .....	- 16 -
2.3.2. Aplikační úroveň 2 .....	- 16 -
2.3.3. Aplikační úroveň 3 .....	- 17 -
2.4. Zabezpečení tratě a omezující parametry pro následnou jízdu vlaku....	- 17 -
2.5. Shrnutí.....	- 18 -
<b>3. VYSOKORYCHLOSTNÍ ŽELEZNIČNÍ VOZIDLO PRO PŘEPRAVU OSOB... - 19 -</b>	<b>- 19 -</b>
3.1. Výhody vysokorychlostní železnice .....	- 19 -
3.2. Vytvoření matematického modelu vysokorychlostní vlakové jednotky pro výpočet spotřeby elektrické energie .....	- 20 -
3.2.1. Účinnost pohonu trakční jednotky.....	- 21 -
3.2.2. Účinnost motoru.....	- 22 -
3.2.3. Účinnost transformátoru .....	- 22 -
3.2.4. Účinnost měniče .....	- 22 -
3.2.5. Účinnost převodovky .....	- 23 -
3.2.6. Celková účinnost pohonu .....	- 23 -
3.2.7. Celková účinnost .....	- 24 -
3.2.8. Výpočet parametrů vysokorychlostního vozidla .....	- 24 -
3.2.9. Výpočet jízdních odporů .....	- 26 -
3.2.10. Výpočet kinetické energie .....	- 28 -
3.2.11. Výpočet mechanické trakční práce .....	- 29 -
3.2.12. Výpočet vedlejší spotřeby vozů .....	- 30 -
3.2.13. Výpočet spotřeby elektrické energie .....	- 32 -
3.3. Letecká doprava pro přepravu osob .....	- 36 -
3.4. Specifikace letadla .....	- 36 -
3.4.1. Přímý let Praha - Peking.....	- 37 -
3.4.2. Nepřímý let Praha -Peking.....	- 39 -
3.5. Shrnutí.....	- 43 -
<b>4. POROVNÁNÍ ŽELEZNIČNÍ A LETECKÉ DOPRAVY.....</b>	<b>- 44 -</b>

4.1. Porovnání doprav z časového hlediska .....	- 44 -
4.2. Porovnání doprav z energetického a cenového hlediska .....	- 46 -
4.3. Shrnutí.....	- 48 -
<b>5. PŘEPRAVA ZBOŽÍ.....</b>	<b>- 49 -</b>
5.1. Železniční přeprava zboží .....	- 49 -
5.1.1. Parametry vysokorychlostního vozidla pro nákladní dopravu..	- 49 -
5.2. Letecká přeprava zboží .....	- 58 -
5.3. Námořní přeprava zboží.....	- 60 -
5.4. Shrnutí.....	- 62 -
<b>6. POROVNÁNÍ ŽELEZNIČNÍ, LETECKÉ A NÁMOŘNÍ PŘEPRAVY ZBOŽÍ .....</b>	<b>- 63 -</b>
6.1. Porovnání všech druhů doprav z časového hlediska .....	- 63 -
6.2. Porovnání všech druhů doprav z energetického a cenového hlediska..	- 64 -
6.3. Shrnutí.....	- 66 -
<b>7. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA PARAMETRŮ ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY OSOB .....</b>	<b>- 67 -</b>
7.1. Analýza při změnách rychlosti .....	- 67 -
7.2. Analýza při změnách hmotnosti.....	- 70 -
7.3. Analýza při změnách činitele tvaru čelního vozu .....	- 73 -
7.4. Shrnutí.....	- 75 -
<b>8. NAPÁJENÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ ŽELEZNIČNÍ TRATĚ .....</b>	<b>- 76 -</b>
8.1. Historie elektrické trakce .....	- 76 -
8.2. Napájecí systém 3 kV stejnosměrné .....	- 76 -
8.3. Napájecí systém 25 kV, 50 Hz .....	- 77 -
8.4. Napájecí systém 15 kV, 16,7 Hz .....	- 80 -
8.5. Parametry trakčního vedení pro napájení vysokorychlostních železnic	- 80 -
8.6. Napájení systémem 25 kV 50 Hz .....	- 81 -
8.6.1. Výpočet napájecích systémů .....	- 85 -
8.7. Napájení systémem 15 kV 16,7 Hz .....	- 89 -
8.7.1. Výpočet napájecích systémů .....	- 90 -
8.8. Shrnutí.....	- 92 -
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>- 95 -</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>- 97 -</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>- 99 -</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>- 100 -</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>- 101 -</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>- 103 -</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>- 104 -</b>



## ÚVOD

Historický vývoj naší civilizace je úzce spjat s historickým rozvojem dopravy. Na začátku se lidé pohybovali pouze svépomocí a to na krátké vzdálenosti a pomalu. S vývojem inteligence lidstva se dále rozvíjela i doprava, lidé si začali pro dopravu ochočovat zvířata. Dalším průlomem v dopravě se stal vynález lodě již před 8 000 tisíci lety, později vlaku, automobilu a v neposlední řadě také letadla. Doprava obecně zpřístupnila člověku svět a je stálou součástí každodenního života.

Při bližším zkoumání se dá určit, že odhadem naší planetu pokrývá 1,5 milionů kilometrů železničních tratí, po kterých jezdí přibližně 0,5 milionů lokomotiv, které dávají do pohybu téměř 10 milionů vozů, jak nákladních, tak i pro osobní přepravu. Dále je země pokryta asi 25 miliony kilometry silnic a dálnic, po kterých jezdí okolo půl miliardy osobních a nákladních automobilů. Světová moře a oceány křížuje přibližně 60 tisíc převážně nákladních lodí. V neposlední řadě je zde letecká doprava. Denně převážně z 500 hlavních letišť světa vzlétá tisíce dopravních letadel. To jsou údaje ukazující, proč má doprava nezastupitelné místo v dnešním světě.

Již ve dvacátém století a hlavně na začátku jednadvacátého století je stále důležitější propojení států a národů s okolními kontinenty. Existují základní dvě propojení, jedním z nich je politické a druhým neméně důležitým je hospodářské propojení. Zatímco politika se dá převážně řešit takzvaně od stolu, tak při hospodářském propojení tohoto nelze dosáhnout. Pro hospodářské propojení je nutné použití jednoho z druhů dopravy. V současné době je propojení mezi jednotlivými kontinenty nejvíce rozvinuto v letecké a námořní dopravě. V propojení mezi Evropou a Asií tomu není jinak, využívá se zde převážně letecká a námořní doprava. Společným znakem těchto dvou druhů dopravy a také jejich největší nevýhodou oproti železniční dopravě je závislost na dodávce kapalných uhlovodíkových paliv, tedy na ropě. Jak již je dlouhodobě známo, ropa je neobnovitelným zdrojem energie a nastane tedy doba, kdy ropa dojde a již nikdy nebude. Nejdříve však nastane z ekonomického hlediska obrovská poptávka po ropě a již její nedostatečné množství, tudíž se bude neúměrně zvyšovat její cena.

Jediným druhem dopravy, který má v současné době téměř dokonale vyvinutou a zvládnutou náhradu kapalných uhlovodíkových paliv je pouze železniční doprava. Náhrada spočívá v tom, že místo motorů na kapalná uhlovodíková paliva, které se převážně používají v silniční, letecké a námořní dopravě, jsou tyto motory nahrazeny elektromotory, které jsou závislé na dodávce elektrické energie. Elektrická energie má obrovskou výhodu oproti ropě v tom, že se dá vyrábět z obnovitelných zdrojů. Obnovitelnými zdroji jsou např. sluneční záření, vítr, tok vody a jiné. Další

výhody železniční dopravy jsou nízký valivý odpor mezi kolem a kolejnicí, který je například ve srovnání se silniční dopravou osmkrát menší, nízký aerodynamický odpor celé soupravy, který je způsoben tím, že připojené vozy jedou za sebou v zákrytu. A jednou z největších výhod je vysoká kapacita pro přepravu osob při nízkých energetických nákladech na jejich přepravu.

Aby se zde nehovořilo pouze o výhodách železniční dopravy oproti ostatním druhům dopravy, je zde uvedeno i několik nevýhod. První a také největší nevýhodou železniční dopravy je závislost na postavené dopravní cestě na rozdíl od námořní a letecké dopravy, které se pohybují po přírodních dopravních cestách a stačí vybudovat pouze začátek nebo konec trasy. Konkrétně letadlo létá ve výšce několika tisíc metrů a již z toho je zřejmé, že nepotřebuje žádnou dopravní cestu, pouze místo ke vzletu a přistání, k tomuto účelu slouží letiště. Obdobně je na tom i námořní doprava, která využívá pro svůj pohyb moře a oceány. Z toho vyplývá výhoda minimalizace nákladů na vybudování dopravní cesty u těchto dvou druhů dopravy. Zjednodušeně se dá říci, že náklady jsou spojeny pouze s výstavbou letišť a přístavů. Další nespornou nevýhodou železniční dopravy je nutnost vybudování elektrifikace podél dopravní cesty a trvalé připojení na elektrickou síť, bez které by vlak nemohl jet. Oproti tomu letadlo i loď mají zásobu energie ve formě kapalných uhlovodíkových paliv u sebe na celou cestu, tudíž při pohybu nejsou závislé na externí dodávce energie.

Z výše uvedeného však vyplývá do budoucnosti jako nejvýhodnější propojení mezi jednotlivými kontinenty, konkrétně mezi Evropou a Asií, železniční dopravou, vybudováním elektrifikovaných tratí. Pro přepravu zboží již takovéto dopravní cesty existují, jsou jimi konvenční železnice a u zboží téměř nevadí, jestli se dostane s Evropy do Asie nebo naopak za deset, nebo čtrnáct dní, tudíž stávající konvenční tratě jsou dostačující. Avšak pro přepravu cestujících není stávající železnice schopna konkurovat letecké přepravě a to převážně v rychlosti. V dnešní době je cestovní rychlost okolo 60 km/h u železnice z Evropy do Ruska a u letecké přepravy je cestovní rychlost okolo 800 km/h, z toho vyplývá, že při vzdálenosti trasy např. 5 000 km překonám tuto trasu vlakem asi za 83 hodin. Při stejné vzdálenosti, ale za použití letadla je trasa překonána asi za 6 hodin. Z toho vyplývá nekonkurence schopnost dnešní železniční dopravy při přepravě osob. Jediným řešením je zvýšení cestovní rychlosti a tím i vybudování vysokorychlostních tratí. Při zvýšení cestovní rychlosti na 250 km/h je železnice schopna konkurovat letecké dopravě. S ohledem na menší časové ztráty na začátku a na konci trasy může železniční doprava konkurovat letecké dopravě na vzdálenosti přibližně do 1 000 km. Pro větší vzdálenosti je nutné efektivní využití stráveného času ve vlaku, například cestovat

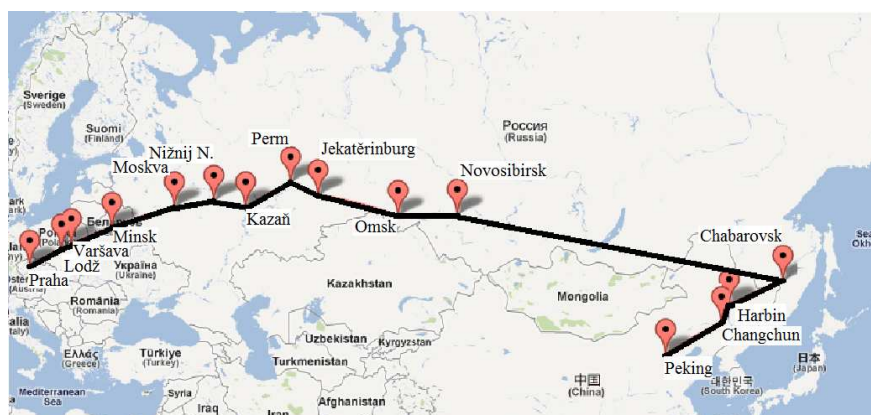
vlakem přes noc, kdy se čas využije pro spánek a výsledek je stejný, jako kdyby člověk spal doma.

# 1 VYSOKORYCHLOSTNÍ ŽELEZNIČNÍ TRATĚ

## 1.1 Návrh vysokorychlostní železniční tratě

Vysokorychlostní železniční trať, která by spojovala Evropu s dálným východem v Číně by měla vést přes největší aglomerace na trase. Tato trať by se dále rozvětvovala v různých částech Evropy a Asie tak, aby byla interoperabilní, aby se cestující pohodlně mohl dostat i do jiných aglomerací navazujícími vysokorychlostními tratěmi, ne pouze do těch, které jsou v přímém směru trasy.

Vysokorychlostní trať podle návrhu by mohla v přímém směru procházet těmito státy. V Evropě Českou Republikou, Polskem, Běloruskem a Ruskem, dále poté v Asii Ruskem a Čínou. Vše je konkrétně vidět na obrázku 1.1. Na tomto obrázku jsou také uvedeny jednotlivé aglomerace. Jedná se o začátek trasy v České Republice v Praze pokračující přes polskou Lodž a Varšavu, běloruský Minsk, dále přes ruskou Moskvu, Nižnij Novgorod, Kazaň, Perm, Jekatěrinburg, Omsk, Novosibirsk, Chabarovsk až do Číny do Harbinu, Changchunu a konec trasy v Pekingu. Jedná se o největší aglomerace na trase. Jejich počty obyvatel a vzdálenosti jsou uvedeny v příloze 1, celková vzdálenost je 10 006 km.



Obr. 1.1 Návrh trati Praha – Peking

Nabízí se zde i mnoho dalších alternativ pro návrh trasy mezi Evropu a Asií. Další možná trasa by mohla začínat ve Francii a vést přes státy Německa, Rakouska, Slovenska, Ukrajiny, Ruska, Mongolska a končit v Číně. Pro tento druhý návrh je mnoho možností rozvětvení, jak po Evropě, tak i po Asii. Avšak tento druhý návrh je velmi špatně realizovatelný a to z důvodu pohoří, která zasahují do trasy převážně v Mongolsku. Tudíž jako jednodušší se jeví trasa přes ruský Chabarovsk i když je delší.

## 1.2 Rozvětvení vysokorychlostní železniční tratě

Při návrhu této vysokorychlostní tratě ve spojení Evropa – Asie, konkrétně

Praha – Peking se uvažují různá rozvětvení jak po Evropě, tak i po Asii. Tyto jednotlivé rozvětvení by měla navazovat na již vybudované, nebo v nejbližší době plánované vysokorychlostní tratě tak, aby bylo ideální řešení pokrytí Evropského a Asijského kontinentu, zejména pak Evropy a Číny. Rozvětvení by mělo navazovat již na vybudované konvenční tratě, které jsou vystavěné jak po Evropě, tak i po Asii. Kde tato možnost není, musely by být vybudovány nové vysokorychlostní tratě, ale větší problém by nastal v Evropě, jelikož Čína již má velmi rozsáhlou síť vysokorychlostních železnic. Všechny rozvětvení a jejich parametry jsou uvedeny v přílohách.

### **1.3 Shrnutí**

V této kapitole je proveden jednoduchý návrh vysokorychlostní železniční trati na trase Praha – Peking, která vede přes největší aglomerace na trase, jedná se o trať podle TSI HS, což je základem kompatibility s evropskou sítí vysokorychlostních i konvenčních železnic. Dále je zde popis jednoduchého rozvětvení. Dalším problémem je rozchod. Rozchod v Rusku je jiný, nežli po Evropě a Číně. Řešení by mohlo být například splítkou dvou rozchodů.

## 2 ZABEZPEČENÍ ŽELEZNIČNÍ TRATĚ

Během desítek let provozu železniční dopravy se i z železniční dopravou vyvíjely zabezpečovací systémy. Zabezpečovací systémy vytvořené v různých zemích se výrazně lišily a v různých obdobích vznikla řada vlakových zabezpečovacích zařízení rozdílné úrovně a většinou tyto zařízení nebyly schopné spolu komunikovat, byly většinou vzájemně nekompatibilní. Protože většina inteligentních států počítá s rozvojem železnice a zvyšováním hustoty vlakové dopravy na mezistátní, dokonce i na mezikontinentální úroveň, musel postupem času vzniknout standard vlakového zabezpečovacího zařízení, které by bylo kompatibilní se všemi zabezpečovacími zařízeními v různých zemích. Tento standard vlakového zabezpečovacího zařízení je označován ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System / European Train Control System, Systém evropského řízení železniční dopravy / Evropský vlakový zabezpečovací systém).

### 2.1 Systém ETCS

Systém je navržen jako interoperabilní pro různé potřeby jednotlivých železničních zpráv. Hlavní cíle systému jsou

- ▲ Dosažení optimální bezpečnosti a spolehlivosti systému
- ▲ Umožnění postupného vylepšování a přestavby systému (možnost bezkonfliktního k vyšším aplikačním úrovním)
- ▲ Možnost postavení a kooperace systému tak, aby fungoval se stávajícími zabezpečovacími systémy (přenos zpráv pomocí speciálních modulů, které umožní příjem od národních vlakových zabezpečovacích systémů a překlad, který je ve formátu vhodný pro ETCS)
- ▲ Možnost aplikace a výstavby podle potřeb jednotlivých železničních správ
- ▲ Dosažení optimálního řešení jak z hlediska efektivnosti, tak i z hlediska ekonomičnosti (zajištění nízkých nákladů na montáž a provoz při porovnání se stávajícími systémy)
- ▲ Zvýšení traťových rychlostí
- ▲ Zajištění bezproblémového přechodu hranic mezi jednotlivými státy z hlediska zabezpečovacího zařízení

## 2.2 Funkce ETCS

Zařízení ETCS se skládá z traťové a vozidlové části a informace mezi nimi probíhají v podobě datových přenosů. Hlavním úkolem ETCS stejně jako každého jiného vlakového zabezpečovacího zařízení je zajištění bezpečnosti vlakové dopravy a aktivní zásah do řízení vlaku v případě selhání nebo omylu lidského faktoru. Na základě přenášených informací kromě dodržování návěstí, respektive v případě ETCS oprávnění k jízdě (MA - movement authority), které obsahuje zejména informaci o délce úseku, pro který je MA platné a o maximální rychlosti v daném úseku vyplývající z postavené jízdni cesty, sleduje tento zabezpečovací systém ještě další ukazatele:

- ▲ Dodržení trasy vlaku (systém kontroluje trasu vlaku a staví mu k tomu korektní vlakovou cestu a na základě postavení vlakové cesty vydává oprávnění k jízdě (MA – movement authority))
- ▲ Směr jízdy vlaku (nesmí se stát, že systém určí nesprávný směr jízdy vlaku na trase)
- ▲ Výpočet statického rychlostního profilu (systém počítá maximální rychlost, kterou vlak nesmí překročit, nebo maximální rychlost, kterou může jet strojvůdce bez intervence (zásahu) zařízení)
- ▲ Výběr nejvíce omezujícího statického rychlostního profilu (systém vybírá nejvíce omezující rychlostní profil mezi různými statickými profily a sestává se z nejvíce omezujících podmínek na trati, kterým musí vlak vyhovět. Výběr musí být proveden s uvažováním nejhorších podmínek také z hlediska bezpečnosti)
- ▲ Výpočet dynamického rychlostního profilu (je proveden s ohledem na nejvíce omezující statický rychlostní profil, dále se uvažují brzdné schopnosti vlaku a také sklonové poměry trasy. Dynamický profil musí být vypočten alespoň tak, aby vlak nouzově zastavil při nejhorších podmínkách z hlediska bezpečnosti)
- ▲ Brzdění (tato funkce zajišťuje řízení brzdných systémů. Když bude vydán příkaz k brzdění, působí systém nejdříve na provozní brzdu a v případě, že provozní brzda z nějakého důvodu nereaguje správně, přejde k použití nouzové brzdy tak, aby zajistil co nejvyšší bezpečnost)
- ▲ Porovnání aktuální rychlosti a polohy vlaku s brzdovou křivkou

(systém určuje rozdíl rychlosti a dráhy mezi brzdícími křivkami a skutečnou rychlostí a polohou vlaku. Skutečná rychlost a poloha vlaku se určuje pomocí balíz, které jsou umístěné na trati a měřením rychlosti, které je prováděno přímo na vozidlech, tzv. odometrie. Toto srovnání umožňuje včasnou reakci a vydání příkazu k aktivaci brzdového systému)

## 2.3 Aplikační úrovně

### 2.3.1 Aplikační úroveň 1

Tato aplikační úroveň zajišťuje bodový přenos informací a je zpravidla použita jako doplněk ke stávajícím traťovým a staničním zabezpečovacím zařízením. Pro bodový přenos musí být trať vybavena bodovými přenosovými zařízeními, balízami, které vlaku předávají potřebné informace pro jízdu vlaku. Balízy jsou také využity jako referenční body pro korekci odometru, pro zjišťování směru jízdy vlaku a také jako počáteční body pro měření vzdálenosti. Balízami jsou přenášeny dva druhy informací. Časově proměnné informace jsou předávány prostřednictvím přepínatelných balíz, které jsou připojeny ke stávajícímu zabezpečovacímu zařízení. Neproměnné informace jsou přenášeny nepřepínatelnými balízami a v případě potřeby sdělit zprávu z vlaku na trať mohou být použity balízy obousměrné.



Obr. 2.1 Aplikační úroveň ETCS 1

Jak je patrné z obrázku 2.1 jedná se o bodové zabezpečovací zařízení, které nemá informaci, pokud vlak zastaví přesně před návěstidlem v poloze stůj. Dojde-li ke změně návěstního znaku na povolující znak, nebude nová informace předána přímo na vlak. O dalším pohybu rozhodne strojvedoucí v závislosti na sledování návěstidla a zabezpečovací zařízení mu nesmí zabránit v rozjezdu.

### 2.3.2 Aplikační úroveň 2

Také zařízení úrovně 2 (obrázek 2.2) je prioritně určeno jako nadstavba stávajícího zabezpečovacího zařízení. Největší rozdíl oproti úrovni 1 je, že proměnné informace nejsou již předávány pomocí proměnných balíz, ale pouze prostřednictvím rádia. Tím odpadají problémy s aktualizací informací při změnách např. návěstidel.



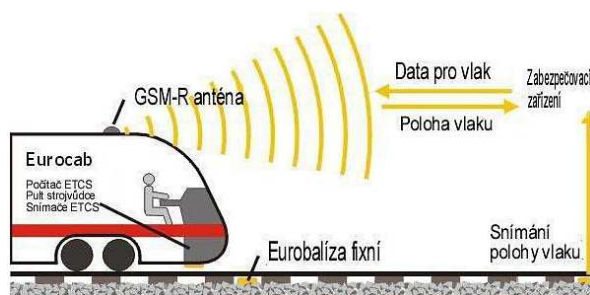
Neproměnné informace mohou být nadále přenášeny pomocí balíz, ale také již pomocí rádia. Balízy slouží na trati hlavně jako referenční body pro měření vzdáleností, určování směru jízdy vlaku a také pro korekci odometru.



Obr. 2.2 Aplikační úroveň ETCS 2

### 2.3.3 Aplikační úroveň 3

Tato úroveň (obrázek 2.3) je určena pro realizaci radiobloku, to znamená z tratě odstranit všechna stávající zařízení, kterými jsou např. návěstidla, kolejové obvody, počítače náprav, přestavníky, ad. A vše řídit dálkově pomocí radioblokové centrály. Je nutné však vybavit vlak, aby byl schopen bezpečně detekovat celistvost vlaku (u ucelených jednotek odpadá tento problém), to že se žádný vůz neoddělil. Vlak nadále sám musí hlásit svou polohu a tím pádem odpadá potřeba zařízení pro detekci vozidel. Pevné balízy však musí na trati zůstat z důvodu, aby bylo odkud vypočítávat vzdálenost ujetou vlakem.



Obr. 2.3 Aplikační úroveň ETCS 3

## 2.4 Zabezpečení tratě a omezující parametry pro následnou jízdu vlaku

Na zde navrhované vysokorychlostní trati je nejvhodnější použít ETCS aplikační úroveň 3, tedy všechno řídit z dálkového ovládacího centra pomocí bezdrátového vysílání GSM-R. Je to z důvodu, že se nemusí na trati stavět žádná návěstidla, kolejové obvody, počítače náprav, ad., dalším důvodem je ekonomické hledisko a také vysoká rychlost vlaku, která dosahuje až 300 km/h. Z ekonomického hlediska je výstavba tohoto zabezpečovacího zařízení zdaleka nejlevnější.

Omezujícími parametry pro následnou jízdu vlaku je brzdná schopnost vlaku, zpoždění přenosového kanálu z předcházejícího vlaku na radioblokovou centrálu a zpět na následující vozidlo, čas opakování oprávnění k jízdě a reakční doba strojvedoucího. Brzdná schopnost vlaku, neboli také zábrzdné zpomalení je  $0,6 \text{ m/s}^2$ .

Výpočet zábrzdné dráhy vlaku při rychlosti 300 km/h

$$s = \frac{v^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot a} = \frac{300^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 0,6} = 5787 \text{ m} = 5,787 \text{ km} \quad (2.1)$$

Kde:  $s$  je dráha pro zabrzdění vlaku

$a$  je zábrzdné zpomalení vlaku

$v$  je rychlost vlaku

Výpočet celkové doby na zastavení vozidla

$$t_c = \frac{s \cdot 3,6}{v} + t_p + t_s + t_{MA} = \frac{5787 \cdot 3,6}{300} + 3 + 5 + 5 = 82 \text{ s} \quad (2.1)$$

Kde:  $s$  je dráha pro zabrzdění vlaku

$t_p$  je přenos z radioblokové centrály

$t_s$  je reakční doba strojvedoucího

$t_{MA}$  je čas opakování oprávnění k jízdě

## 2.5 Shrnutí

Celkový potřebný čas pro zastavení vlaku je 82 s, tento čas nesmí být menší vlivem zabezpečovacího zařízení, ale takto by např. první vlak zpomalil a následující vlaky by musely ihned zpomalit taky. Z toho důvodu je ještě dán přídatný čas k času zabezpečovacího zařízení na rozestup mezi vlaky, který je zvolen o hodnotě 140 s. Tudiž následná jízda vlaku je 222 s.

### 3 VYSOKORYCHLOSTNÍ ŽELEZNIČNÍ VOZIDLO PRO PŘEPRAVU OSOB

Vysokorychlostní železniční vozidlo, nebo také vysokorychlostní elektrická trakční jednotka je vlak, který dosahuje velmi vysoké jízdní rychlosti, minimálně však 250 km/h a je přednostně určen pro vysokorychlostní železnice pro překonávání dlouhých vzdáleností mezi velkými aglomeracemi při co nejkratší době. Podle TS HS SRT jde o vozidlo třídy 1 (rychlost 350 km/h). Vývoj těchto jednotek v poslední době zaznamenal obrovský rozmach a výrobci, kteří nejdou v tomto vývoji s konkurencí, se již velmi těžko vypořádají se ztrátou, kterou nabерou. Pro ukázkou, že tento trend jde stále kupředu, je zde uvedena na obr. 3.1 vysokorychlostní železniční vozidlo vyvinuté firmou Siemens pro německé železnice, které je nazýváno Velaro D.



Obr. 3.1 Vysokorychlostní ucelená jednotka pro německé železnice Velaro D

#### 3.1 Výhody vysokorychlostní železnice

Hlavní výhody vysokorychlostních železnic oproti ostatním druhům dopravy jsou:

- ▲ Vysokorychlostní železnice neprodukuje v místě provozu žádné exhalace.
- ▲ Všechny vysokorychlostní vlaky jsou poháněny elektrickou energií, tudíž nejsou závislé na uhlovodíkových kapalných palivech, tedy na ropě na rozdíl od automobilové, námořní a letecké dopravy, které navíc produkují zdraví škodlivé emise.
- ▲ Při porovnání s ostatními druhy dopravy má vysokorychlostní železnice poměrně nízkou energetickou náročnost, vlivem štíhlosti vozidla, za poměrně malou čelní plochu jsou dopravovány stovky

pasážerů.

- ▲ Další nespornou výhodou je bezpečnost, spolehlivost, komfort a plynulost cestování. Ve statistikách železniční dopravy je znázorněno, že železniční přeprava má méně smrtelných nehod nežli u automobilové dopravy.
- ▲ Další výhodou je účelné využití času. Například při cestě na dlouhou vzdálenost vyjede vlak v noci, jede přes celý den a ještě jednu noc. Cestující přes noc spí, přes den pracují a přes noc zase spí.

Aby zde nebyly pouze výhody, jsou zde uvedeny i nevýhody vysokorychlostních tratí.

- ▲ Nutnost postavení a údržby dopravní cesty, která stojí nemalé finanční prostředky na zřízení. To je největší nevýhodou oproti letecké a námořní dopravě.
- ▲ Další nevýhodou je omezení operativnosti. To znamená, že vysokorychlostní vlaky nemohou zastavovat v jakýchkoli místech své cesty, nýbrž jen v hlavních uzlech vzdálených od sebe stovky kilometrů z důvodu, že by se nevyužila jejich hlavní přednost, vysoký rychlostní potenciál.
- ▲ Další nevýhodou je emise hluku a vibrací do okolního prostředí zejména ve městech a v obydlených částech okolo tratě. K odstranění tohoto vlivu se snižuje technickými prostředky hlučnost vozidel i dopravní cesty, a také se tomu dá zabránit trasováním mimo obydlí.

### **3.2 Vytvoření matematického modelu vysokorychlostní vlakové jednotky pro výpočet spotřeby elektrické energie**

Následující matematický model vysokorychlostní jednotky je určen pro trasu ve spojení Evropa – Asie, konkrétně pro trasu Praha – Peking. V tabulce 3.1 jsou uvedeny základní parametry (TSI HS RST), které jsou potřebné pro výpočet spotřeby elektrické energie vysokorychlostního vozidla. Pro jednoduchost výpočtů jsou zde uvedeny zjednodušující parametry. Prvním zjednodušením je, že se jedná o přímou rovnou trať. Tudiž zde není počítáno se stoupáním, klesáním, a také zde nejsou uvažovány odpory z oblouku. Dalším zjednodušujícím parametrem je, že se nepočítá s jízdou ve ztížených prostorech, např. v tunelu, kde významně stoupá aerodynamický odpor.

Tab. 3.1 Základní parametry vysokorychlostní jednotky pro výpočet spotřeby elektrické energie

počet vozů	$p_{vv}$		16
poměrná adhezní hmotnost	$m_{adh}$	%	50
vlastní hmotnost vozu	$m_{vv}$	t	56
počet sedadel v jednom voze	$p_{mv}$		40
hmotnost cestujícího	$m_{cest}$	kg	80
hmotnost provozních hmot na cestujícího	$m_{pcest}$	kg	50
ekvivalent rotujících hmot trakčního dvojkolí	$e_{rd}$	t	2
ekvivalent rotujících hmot netrakčního dvojkolí	$e_{rdn}$	t	1
počet pohonů	$p_p$		4
počáteční tažná síla jednoho pohonu	$F_{pt1}$	kN	140
rozjezdová tažná síla jednoho pohonu	$F_{rt1}$	kN	140
trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu	$P_{ok1}$	kW	4 400
maximální rychlost	$v_{max}$	km/h	350
cestovní rychlost	$v_{cest}$	km/h	250
měrná hmotnost vzduchu	$r_v$	kg/m <sup>3</sup>	1,2
měrný konstantní člen	$a_k$	N/kN	1,0
tunelový faktor (zde je 1, protože je uvažována širá trať)	$t_f$		1
činitel tvaru čelního vozu	$\lambda_{tp}$		0,3
činitel tvaru vloženého vozu	$\lambda_{tv}$		0,08
činitel tvaru posledního vozu	$\lambda_{tpv}$		0,2
čelní plocha	$S$	m <sup>2</sup>	11,5
měrný lineární člen v obsazeném stavu	$a_{los}$	N/kN/(km/h)	0
účinnost pohonu	$\eta_p$	%	85
střední vedlejší příkon jednoho vozu na sběrači vozidla	$P_v$	kW	30
počet dvojkolí jednoho vozu	$p_{di}$		4
cena elektrické energie na vstupu trakční napájecí stanice (bez DPH)		Kč/kWh	2,2
počet stanic	$p_s$		15

### 3.2.1 Účinnost pohonu trakční jednotky

Účinnost je jedním z nejdůležitějších parametrů elektrických strojů. Jedná se o fyzikální veličinu, která udává poměr mezi výkonem a příkonem stroje. Energie, kterou stroji dodáme musí být vždy vyšší, nežli práce, kterou stroj vykoná. Kdyby tomu bylo naopak, jednalo by se o tzv. Perpetuum mobile. Energie dodaná stroji, která není využita k práci vykonané strojem, se nazývá ztráty. Každý stroj má ztráty ať už vyšší nebo nižší.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.1)$$

kde:  $\eta$  je účinnost (%)

$P_2$  je příkon stroje (W)

$P_1$  je výkon stroje (W)

U trakčních pohonů se snažíme dosáhnout co nejmenších ztrát a co největší účinnosti. Ideální by byla účinnost rovna jedné, ale reálně se dá dosáhnout účinnosti mezi osmdesáti a devadesáti procenty. Ztráty v pohonu se rozdělují mezi více zařízení. V pohonu jsou ztráty v transformátoru, ztráty v měniči, ztráty v převodovce a ztráty v motoru.

### 3.2.2 Účinnost motoru

Účinnost motoru je parametrem, kterým je na motoru udáno, jak přeměňuje elektrickou energii na mechanickou práci. Ztráty při této proměně oteplují motor a mohou se rozdělit do několika hlavních skupin. Jsou to ztráty mechanické, ztráty v železe, ztráty ve vinutí statoru, ztráty ve vinutí rotoru a ztráty přídatné.

Hlavní ztráty jsou ztráty mechanické, které zejména vznikají třením v ložiskách. Ztráty způsobené třením v ložiskách jsou u motoru při stálé teplotě prakticky lineárně závislé na otáčkách motoru. To znamená, že čím vyšší otáčky motoru, tím vyšší i mechanické ztráty.

Ostatní druhy ztrát jsou závislé hlavně na materiálu, ze kterého je motor vyroben a jsou již méně důležité. U tohoto návrhu pohonu je počítáno s účinností motoru 95 %.

### 3.2.3 Účinnost transformátoru

Trakční transformátor je neméně důležitou součástí navrhovaného trakčního pohonu a tudíž v celkové účinnosti musí být zahrnuta i účinnost transformátoru. V praxi se dosahuje účinnosti transformátoru mezi 90 a 99 %. Účinnost transformátoru závisí zejména na jeho výkonu. Čím větší transformátor, tím lepší je jeho účinnost. Naopak účinnost rychle klesá, blíží-li se zatížení transformátoru stavu naprázdno. U tohoto návrhu je počítáno s účinností transformátoru 95 %.

### 3.2.4 Účinnost měniče

Měnič je vlastně zařízení, které slouží ke změně parametrů elektrické energie. Základními parametry elektrické energie jsou elektrické napětí, elektrický proud

a u střídavých napájecích systémů také frekvence. Účinnost měničů je v praxi velmi vysoká a ztráty v používaných měničích dosahují maximálně okolo 5 %. V tomto případě jsou ztráty v měniči u navrhovaného pohonu okolo 2 %, tudíž účinnost je uvažována 98 %.

### 3.2.5 Účinnost převodovky

Převodové ústrojí lze charakterizovat jako transformační člen energie. Převodovka primárně slouží ke změně vstupních otáček hnacího členu, nebo také motoru. Změnou otáček se dosáhne zvýšení síly pohonné jednotky při snížení úhlové rychlosti výstupní hřídele nebo naopak. Platí, že přenesený výkon je stejný, pouze se zvýší síla na hřídeli při poklesu otáček nebo při zvýšení otáček se síla zmenší. Přenos výkonu na převodovce je také ztrátový. U tohoto návrhu je účinnost převodovky 98 %.

### 3.2.6 Celková účinnost pohonu

Do celkové účinnosti pohonu je započítán vliv ztrát v motoru, dále vliv ztrát v transformátoru, ztráty v měniči a také ztráty v převodovce. V tabulce 3.2 jsou uvedeny hodnoty účinností jednotlivých komponent pohonu.

Tab. 3.2 Účinnosti částí trakčního pohonu

část pohonu	účinnost (%)
motor	95
transformátor	95
měnič	98
převodovka	98

Výpočet celkové účinnosti trakčního pohonu:

$$\eta_p = \eta_{TM} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_M \cdot \eta_{pr} \cdot (1 - \beta) = 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot (1 - 0,02) = 0,85 \quad (3.2)$$

kde:  $\eta_{tr}$  je účinnost transformátoru (%)

$\beta$  je poměrný příkon pomocných pohonů (%)

$\eta_M$  je účinnost měniče (%)

$\eta_{TM}$  je účinnost trakčního motoru (%)

$\eta_p$  je účinnost trakčního pohonu (%)

$\eta_{pr}$  je účinnost převodovky (%)

### 3.2.7 Celková účinnost

Celková účinnost se skládá ze dvou složek. První složkou je účinnost pevných trakčních zařízení, která je 90 % a druhou složkou figurující v celkové účinnosti je účinnost trakčního pohonu, která je 85 %.

Výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_c = \eta_{ptz} \cdot \eta_p = 0,85 \cdot 0,9 = 0,765 \quad (3.3)$$

kde:  $\eta_c$  je celková účinnost (%)

$\eta_{ptz}$  je účinnost pevných trakčních zařízení(%)

$\eta_p$  je účinnost trakčního pohonu (%)

### 3.2.8 Výpočet parametrů vysokorychlostního vozidla

Následující tabulka 3.3 bude shrnovat vypočtené parametry, jakými jsou například celková hmotnost vlaku, celkový počet míst, součinitel rotujících hmot obsazeného vozidla, tažná síla ucelené jednotky, trakční výkon na obvodu kol ucelené jednotky, pro výpočet spotřeby elektrické energie na trati Praha - Peking odvozené od základních parametrů uvedených v tabulce 3.1.

Tab. 3.3 Vypočtené parametry pro výpočet spotřeby elektrické energie

<p>vlastní hmotnost celkem</p> $m_{vc} = p_{vv} \cdot m_{vv}$ <p>kde: <math>p_{vv}</math> je počet vozů</p> <p><math>m_{vv}</math> je vlastní hmotnost vozu</p>	t	896
<p>počet sedadel celkem (v celé jednotce)</p> $p_{ms} = p_{vv} \cdot p_{mv}$ <p>kde: <math>p_{vv}</math> je počet vozů</p> <p><math>p_{mv}</math> je počet sedadel v jednom voze</p>		640
<p>celková hmotnost</p> $m_c = m_{vc} + \frac{p_{ms} \cdot m_{cest} + p_{ms} \cdot m_{pcest}}{1000}$ <p>kde: <math>m_{vc}</math> vlastní hmotnost celkem</p> <p><math>p_{ms}</math> počet sedadel celkem</p> <p><math>m_{cest}</math> hmotnost cestujícího</p> <p><math>m_{pcest}</math> hmotnost provozních hmot na cestujícího</p>	t	979,2
<p>hmotnost na dvojkolí</p>	t	15,3



$m_d = \frac{m_c}{p_{vv} \cdot 4}$ <p>kde: <math>m_c</math> je celková hmotnost <math>p_{vv}</math> je počet vozů</p>		
<p>ekvivalent rotujících hmot</p> $e_{rm} = p_{vv} \cdot 4 \cdot \left( \frac{m_{adh} \cdot e_{rd}}{100} + \frac{(100 - m_{adh}) \cdot e_{rdn}}{100} \right)$ <p>kde: <math>p_{vv}</math> je počet vozů <math>m_{adh}</math> poměrná adhezní hmotnost <math>e_{rd}</math> ekvivalent rotujících hmot trakčního dvojkolí <math>e_{rdn}</math> ekvivalent rotujících hmot netrakčního dvojkolí</p>	t	96
<p>součinitel rotujících hmot obsazeného vozidla</p> $1 + \frac{e_{rm}}{m_c}$ <p>kde: <math>e_{rm}</math> je ekvivalent rotujících hmot <math>m_c</math> je celková hmotnost</p>		1,098
<p>rozjezdová rychlost</p> $v_{roz} = \frac{P_{ok1} \cdot 3,6}{F_{rt1}}$ <p>kde: <math>p_{ok1}</math> je trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu <math>F_{rt1}</math> rozjezdová tažná síla jednoho pohonu</p>	km/h	113
<p>počáteční tažná síla ucelené jednotky</p> $F_{pt} = p_p \cdot F_{pt1}$ <p>kde: <math>p_p</math> je počet pohonů <math>F_{pt1}</math> počáteční tažná síla jednoho pohonu</p>	kN	560
<p>rozjezdová tažná síla ucelené jednotky</p> $F_{rt} = p_p \cdot F_{rt1}$ <p>kde: <math>p_p</math> je počet pohonů <math>F_{rt1}</math> rozjezdová tažná síla jednoho pohonu</p>	kN	560
<p>teoretické rozjezdové zrychlení obsazeného vozidla</p> $a_{ter} = \frac{F_{rt}}{m_c + e_{rm}}$ <p>kde: <math>F_{rt}</math> je rozjezdová tažná síla ucelené jednotky <math>m_c</math> je celková hmotnost <math>e_{rm}</math> je ekvivalent rotujících hmot</p>	m/s <sup>2</sup>	0,521
<p>trakční výkon na obvodu kol ucelené jednotky</p> $P_{ok} = P_{ok1} \cdot p_p$ <p>kde: <math>p_{ok1}</math> je trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu</p>	kW	17 600

p <sub>p</sub> počet pohonů		
měrný trakční výkon obsazeného vozidla $P_m = \frac{P_{ok}}{m_c}$ kde: p <sub>ok1</sub> je trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu m <sub>c</sub> celková hmotnost	kW/t	18,0
činitel tvaru celkem $\lambda_{tc} = \lambda_{tp} + \lambda_{tv} \cdot (p_{vv} - 2) + \lambda_{tpv}$ kde: λ <sub>tp</sub> je činitel tvaru čelního vozu λ <sub>tv</sub> činitel tvaru vloženého vozu p <sub>vv</sub> počet vozů celkem λ <sub>tpv</sub> činitel tvaru posledního vozu		1,62
absolutní kvadratický člen $a_{kv} = 0,5 \cdot r_v \cdot \lambda_{tc} \cdot t_f \cdot \frac{S}{3,6^2}$ kde: r <sub>v</sub> je měrná hmotnost vzduchu λ <sub>tc</sub> činitel tvaru celkem S čelní plocha t <sub>f</sub> tunelový faktor	N/(km/h) <sup>2</sup>	0,86
měrný kvadratický člen v obsazeném stavu $a_{kos} = \frac{a_{kv}}{9,81 \cdot m_c}$ kde: a <sub>kv</sub> je absolutní kvadratický člen m <sub>c</sub> celková hmotnost	N/kN/(km/h) <sup>2</sup>	0,000090

Pro lepší dokreslení skutečnosti zde jsou vždy uvedeny ukázky výpočtu parametru vozidla a také vypočtené tabulky pro různé rychlosti vozidla tak, aby bylo možné porovnání.

### 3.2.9 Výpočet jízdních odporů

Na následujících vzorcích a také v následující tabulce 3.4 jsou vidět výpočty a výsledky jízdních odporů. Nejprve je proveden výpočet měrného jízdního odporu v obsazeném stavu vozidla, v dalším kroku je proveden výpočet absolutního jízdního odporu v obsazeném stavu vozidla. Obsazený stav vozidla znamená stoprocentní využití míst cestujícími.

Velkým problémem u vysokorychlostních jednotek jsou jízdní odpory. U vysokorychlostních jednotek je snaha snížit jízdní odpory na minimum. Největším

problémem je odpor aerodynamický, který se začne výrazně projevovat při vysokých rychlostech, řádově již nad 100 km/h. Tento odpor roste z druhou mocninou rychlosti, to znamená, čím vyšší rychlost, tím vyšší aerodynamický odpor. Navíc výkon potřebný k překonání tohoto aerodynamického odporu roste dokonce s třetí mocninou rychlosti. Proto je důležité dosáhnout co nejmenších hodnot aerodynamického odporu zvláště u vysokorychlostních jednotek.

Aerodynamický odpor se dá snižovat vhodným tvarem přední části vozidla, které je uzpůsobeno tak, aby proudění vzduchu bylo pokud možno co nejvíce lineární a ne turbulентní. To znamená, že vzduch by měl po čele vlaku klouzat a ne narážet do něj. Jedním z vhodných tvarů vozidla je tzv. kapkovitý tvar, který je u vysokorychlostních vozidel nejvíce používán. Kapkovitý tvar je vidět na obrázku 4.1, kde je uvedeno vysokorychlostní vozidlo pro německé železnice Velaro D. Dalším důležitým faktorem aerodynamického odporu je, aby ucelená jednotka byla pokud možno ve stoprocentním nebo co nejvyšším zákrytu za sebou.

Výpočet měrného jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_m = a_k + a_{los} \cdot v + a_{kos} \cdot v^2 = 1 + 0,00009 v^2 \quad (3.4)$$

kde:  $a_k$  je měrný konstantní člen (N/(km/h)<sup>2</sup>)

$a_{los}$  je měrný lineární člen v obsazeném stavu (N/(km/h)<sup>2</sup>)

$v$  je rychlost (km/h)

$a_{kos}$  je měrný kvadratický člen v obsazeném stavu (N/(km/h)<sup>2</sup>)

Výpočet absolutního jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_{abs} = \frac{F_m \cdot m_c \cdot 9,81}{1000} \quad (3.5)$$

kde:  $F_m$  je měrný jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)

$m_c$  je celková hmotnost (t)

Tab. 3.4 Vypočtené jízdní odpory

rychlost	km/h	0	50	100	113	150	200	250	300	350
měrný jízdní odpor v obsazeném stavu	N/kN	1,00	1,22	1,90	2,15	3,02	4,59	6,61	9,08	12,0
absolutní jízdní odpor v obsazeném stavu	kN	9,6	11,8	18,2	20,6	29,0	44,1	63,5	87,2	115

### 3.2.10 Výpočet kinetické energie

K výpočtu celkové trakční práce je ještě potřeba znát celkovou kinetickou energii. Výpočet kinetické energie a energií odebraných na rozjezd a rekuperovaných při brzdění je uveden v tabulce 3.5 a na následujících vzorcích.

Výpočet kinetické energie

$$E_k = \frac{0,5 \cdot (m_c + e_{rm}) \cdot v^2}{3,6 \cdot 3,6 \cdot 3\,600} \quad (3.6)$$

kde:  $m_c$  je celková hmotnost (t)  
 $e_{rm}$  je ekvivalent rotujících hmot (t)  
 $v$  je rychlost (km/h)

Výpočet energie odebrané ze sítě 110 kV na rozjezd vozidla

$$E_{od} = \frac{E_k}{\eta_p \cdot \eta_{ptz}} = \frac{E_k}{\eta_c} \quad (3.7)$$

kde:  $E_k$  je kinetická energie při cestovní rychlosti (kWh)  
 $\eta_c$  je celková účinnost (%)  
 $\eta_{ptz}$  je účinnost pevných trakčních zařízení (%)  
 $\eta_p$  je účinnost trakčního pohonu (%)

Výpočet rekuperované energie do sítě 110 kV při brzdění vozidla

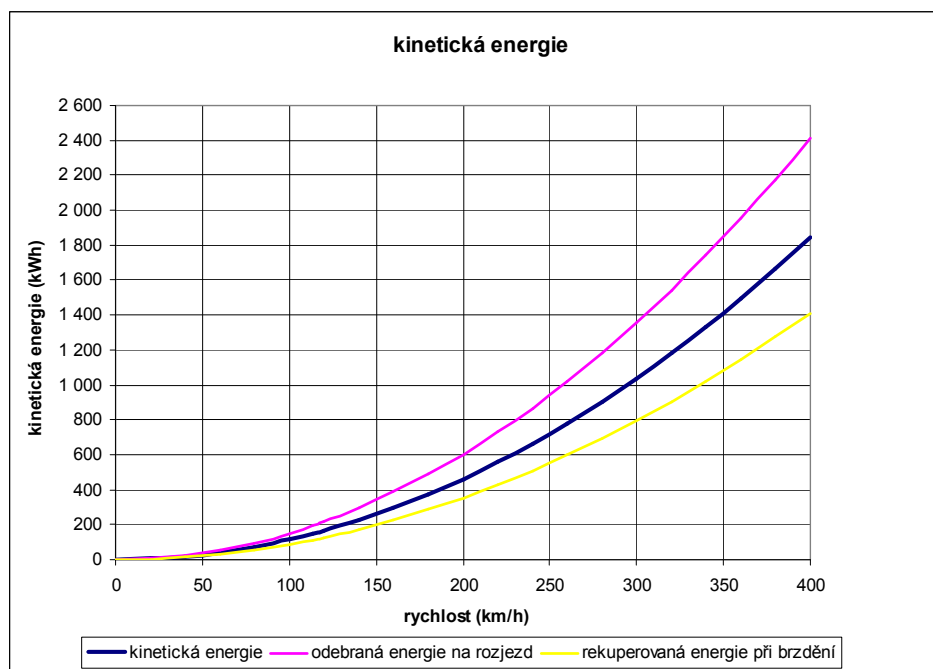
$$E_{re} = E_k \cdot \eta_p \cdot \eta_{ptz} = E_k \cdot \eta_c \quad (3.8)$$

kde:  $E_k$  je kinetická energie při cestovní rychlosti (kWh)  
 $\eta_c$  je celková účinnost (%)  
 $\eta_{ptz}$  je účinnost pevných trakčních zařízení (%)  
 $\eta_p$  je účinnost trakčního pohonu (%)

Tab. 3.5 Kinetická energie

rychlost	km/h	0	50	100	113	150	200	250	300	350
kinetická energie	kWh	0	29	115	147	259	461	720	1 037	1 412
odebraná energie	kWh	0	38	151	192	339	602	941	1 356	1 845
rekuperovaná energie	kWh	0	22	88	113	198	353	551	793	1 080

Následující graf 3.1 shrnuje předcházející tabulku 3.5 a ukazuje, že kinetická energie stoupá z druhou mocninou rychlosti, také je z grafu vidět, že při rozjezdu se projeví celková účinnost negativně (vzroste odebraná energie na rozjezd) a při brzdění se účinnost projeví také negativně (to co se odebere na rozjezd není vozidlo vlivem účinnosti schopno vrátit zpět do sítě 110 kV vlivem rekuperace).



Graf 3.1 Závislost kinetické energie na rychlosti vozidla

### 3.2.11 Výpočet mechanické trakční práce

Na následujícím vzorci a v tabulce 3.6 je uveden výpočet celkové mechanické trakční práce se započítáním vlivu rozjezdu a zastavení ve stanicích. Celkový počet stanic je patnáct, ale vliv rozjezdu a zastavení se počítá jenom čtrnáctkrát a to z důvodu, že na začátku trasy, v Praze se pouze vozidlo rozjíždí, ale nebrzdí. Naopak na konci trasy, v Pekingu vozidlo pouze brzdí, ale již se nikam nerozjíždí.

Výpočet mechanické trakční práce

$$A = (p_s - 1) \cdot E_k + F_{abs} \cdot l + m_c \cdot 9,81 \cdot h \quad (3.9)$$

kde:  $E_k$  je kinetická energie při cestovní rychlosti (kWh)

$p_s$  je počet stanic (celkový počet stanic je 15)

$F_{abs}$  je celková odporová síla při cestovní rychlosti (N/kN)

$l$  je vzdálenost z Prahy do Pekingu (km)

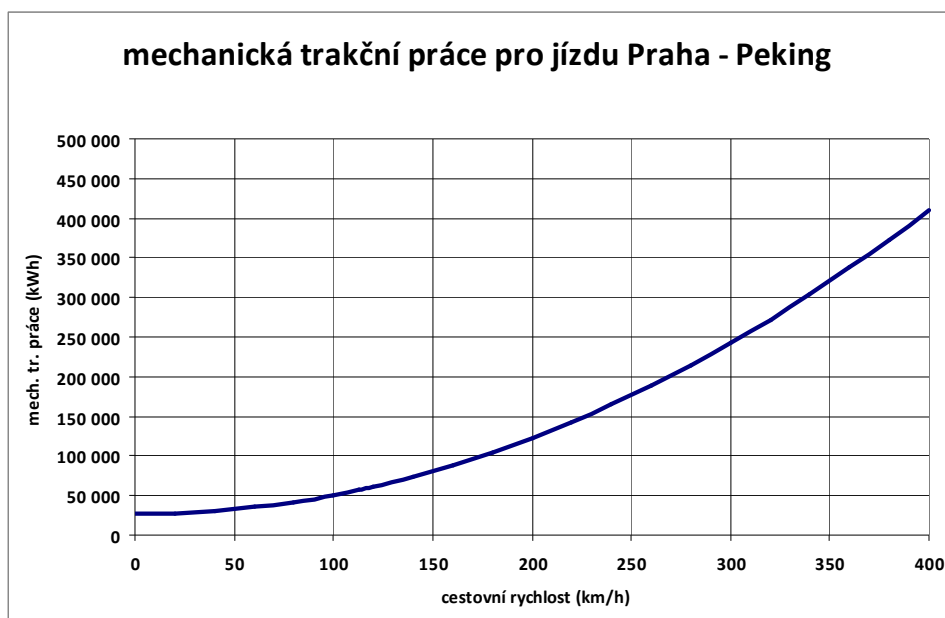
$m_c$  je celková hmotnost (t)

h je rozdíl nadmořských výšek (v tomto případě se neuvažuje)

Tab. 3.6 Mechanická trakční práce pro trasu Praha - Peking

rychlost v	km/h	50	100	113	150	200	250	300	350
mechanická trakční práce	kWh	32 692	50 672	57 311	80 639	122 592	176 531	242 458	320 370

Z tabulky 3.6 je vytvořen graf 3.2, který ukazuje závislost celkové mechanické trakční práce na rychlosti vozidla. Z grafu je vidět, že mechanická trakční práce stoupá s rostoucí rychlostí vozidla. Při rychlostech nad 100 km/h má na mechanickou trakční práci největší vliv aerodynamický odpor vozidla. To znamená čím rychleji vozidlo jede, tím větší práci musí vykonat na překonání převážně aerodynamického odporu. Téměř shodně se projevuje i kinetická energie.



Graf 3.2 Závislost mechanické trakční práce na cestovní rychlosti jízdy vlaku

### 3.2.12 Výpočet vedlejší spotřeby vozů

Rovnice ukazují výpočet vedlejší spotřeby vozů a všechny výsledky jsou shrnuty v tabulce 3.7.

Výpočet gradientu vedlejší spotřeby vozů

$$W_{svv} = \frac{p_{vv} \cdot P_v \cdot 100}{v \cdot \eta_{ptz}} \quad (3.10)$$

kde:  $p_{vv}$  je počet vozů

$P_v$  je střední vedlejší příkon jednoho vozu na sběrači (kW)

$v$  je rychlost (km/h)

$\eta_{ptz}$  je účinnost pevných trakčních zařízení (%)

Výpočet gradientu trakční spotřeby při jízdě rovnoměrnou rychlostí bez započítání vlivu vedlejší spotřeby vozů

$$W_{g1} = \frac{F_{abs} \cdot 100}{3,6 \cdot \eta_c} \quad (3.11)$$

kde:  $F_{abs}$  je absolutní jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)

$\eta_c$  je celková účinnost (%)

Výpočet celkového gradientu trakční spotřeby

$$W_g = W_{svv} + W_{g1} \quad (3.12)$$

kde:  $W_{svv}$  je gradient vedlejší spotřeby (kWh/km)

$W_{g1}$  gradient spotřeby bez započítání vedlejšího výkonu vozů (kWh/km)

Výpočet měrné spotřeby energie

$$W_m = \frac{W_g \cdot 1000}{m_c} \quad (3.13)$$

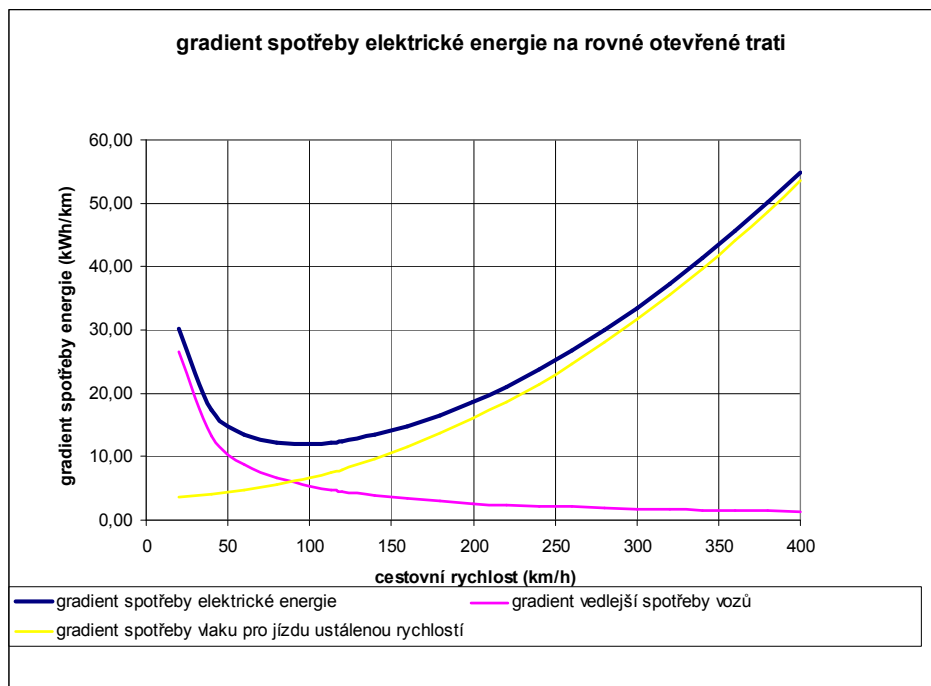
kde:  $W_g$  je gradient spotřeby na rovné otevřené trati (kWh/km)

$m_c$  je celková hmotnost (t)

Tab. 3.7 Spotřeba energie

rychlost v	km/h	50	100	113	150	200	250	300	350
gradient vedlejší spotřeby vozů	kWh/km	10,7	5,3	4,7	3,6	2,7	2,1	1,8	1,5
gradient trakční spotřeby	kWh/km	4,3	6,6	7,5	10,5	16,	23,1	31,7	41,9
celkový gradient trakční spotřeby	kWh/km	14,9	11,9	12,2	14,1	18,7	25,2	33,5	43,4
měrná spotřeba	Wh/tkm	15,3	12,2	12,5	14,4	19,1	25,7	34,2	44,3

Na grafu 3.3 je uvedena závislost gradientu spotřeby energie v závislosti na rychlosti vozidla. To je změna odběru trakční energie v závislosti na rychlosti vozidlu, počtu vozů a na absolutním jízdním odporu.



Graf 3.3 Závislost gradientu spotřeby energie na cestovní rychlosti vozidla na rovné otevřené trati

Z předcházejícího grafu 3.3 je vidět, že celkový gradient spotřeby elektrické energie je součet dvou složek. Gradientu vedlejší spotřeby vozů a gradientu spotřeby elektrické energie. Vše také záleží na rychlosti vozidla, při nižších rychlostech (do 100 km/h) vozidla se více uplatní gradient vedlejší spotřeby vozů a při vyšších rychlostech (od 100 km/h) se více uplatní gradient spotřeby vozů, který je závislý na absolutním odporu, tudíž při vysokých rychlostech se nejvíce uplatní odpor vzduchu, který stoupá z druhou mocninou rychlosti.

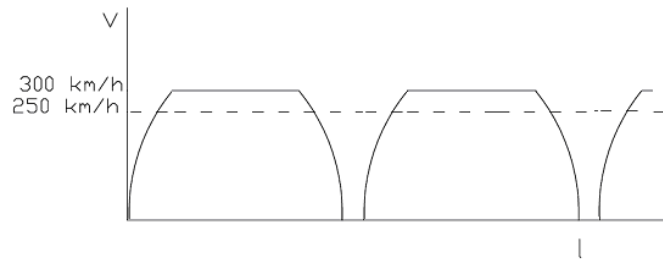
### 3.2.13 Výpočet spotřeby elektrické energie

Nyní jsou již známy všechny potřebné informace pro výpočet celkové trakční práce, spotřebované elektrické energie a ceny za elektrickou energii pro celou navrhovanou trať Praha – Peking se započítáním vlivu účinnosti pevných trakčních zařízení, vlivu účinnosti trakčního pohonu a také vlivu stanic. Vše je názorně uvedeno v tabulce 3.8.

Jelikož je počítáno s cestovní rychlostí 250 km/h, tak efektivní rychlost vozidla pro výpočet jízdního odporu i kinetické energie bude vyšší, jelikož do cestovní rychlosti se započítává doba na rozjezd, brzdění a stání ve stanicích. Tudíž lze uvažovat konstantu pro přepočtení cestovní rychlosti na efektivní rychlost. Tato konstanta je pro dálkové vlaky 1,2. Konstanta nemá vliv na vedlejší spotřebu vozů, tyto hodnoty se počítají při cestovní rychlosti. Vše je konkrétně vidět na obrázku 3.2,



který zobrazuje rychlostní profil. Kde  $v_{ef}$  je rychlost, kterou vozidlo musí mít na trati, tak aby byla dodržena celková cestovní rychlost označená  $v_c$  a je znázorněna čárkovaně. Mezery znázorňují stání ve stanicích.



Obr. 3.2 Závislost cestovní rychlosti na efektivní rychlosti

Výpočet celkové spotřeby elektrické energie

$$A_e = \frac{A(v_{ef}) \cdot 10\,000}{\eta_c} \cdot k + \frac{p_{vv} \cdot P_{1v} \cdot l \cdot 100}{v \cdot \eta_{ptz}} + E_k(v_{ef}) \cdot (p_s - 1) \cdot \left( \frac{100}{\eta_c} - \frac{\eta_c}{100} \right) \quad (3.14)$$

kde:  $A$  je celková trakční práce při efektivní rychlosti (kWh)

$\eta_c$  je celková účinnost (%)

$k$  je konstanta pro přepočet z efektivní rychlosti na cestovní rychlost

$\eta_{ptz}$  je účinnost pevných trakčních zařízení (%)

$p_{vv}$  je počet vozů

$P_{1v}$  je střední vedlejší příkon jednoho vozu (kWh)

$E_k$  je kinetická energie efektivní rychlosti (kWh)

$p_s$  je počet stanic

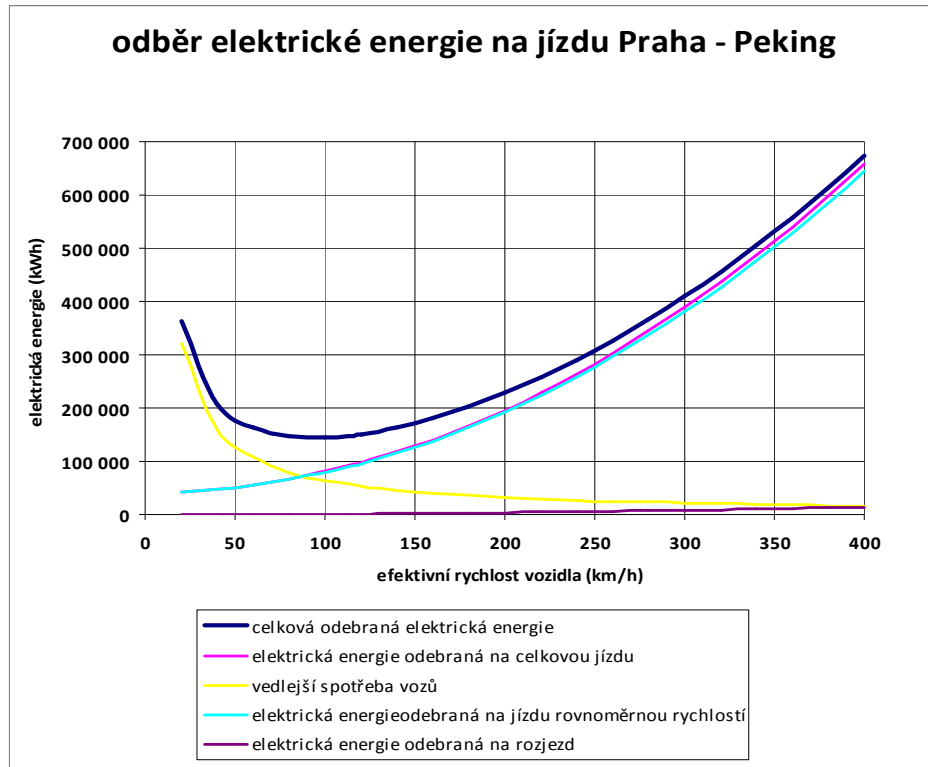
$l$  je vzdálenost z Prahy do Pekingů (km)

$v$  je rychlost (km/h)

Tab. 3.8 Parametry pro výpočet spotřeby elektrické energie a vypočtené hodnoty spotřeby elektrické energie

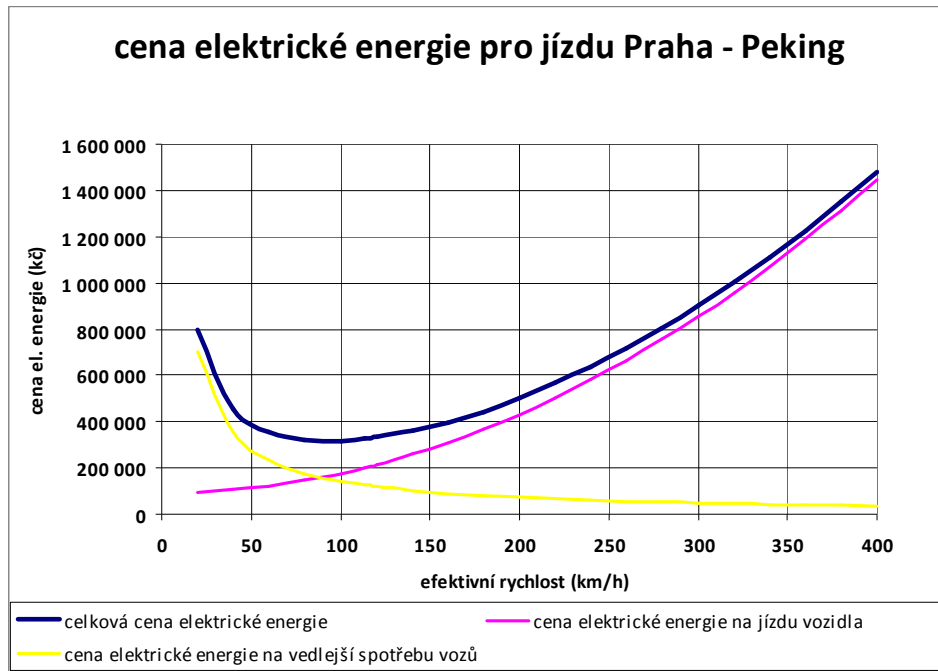
cestovní rychlost	km/h	41,7	83,3	94,2	125	166,7	208,3	250	291,7
efektivní rychlost	km/h	50	100	113	150	200	250	300	350
celková odporová síla	kN	11,8	18,2	20,6	29,0	44,1	63,5	87,2	115,3
kinetická energie	kWh	28,8	115,2	147,1	259,3	460,9	720,2	1037,0	1411,5
odpor ze sklonu	kN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
celková mechanická trakční práce	kWh	32 692	50 672	57 311	80 639	122 592	176 531	242 458	320 370
mech.tr. práce se započítáním účinnosti a konstanty pro cestovní rychlost	kWh	51 282	79 486	89 899	126 492	192 301	276 912	380 326	502 542
energie na vedlejší spotřebu vozů	kWh	128 077	64 038	56 671	42 692	32 019	25 615	21 346	18 297
energie odebraná na rozjezd	kWh	219	875	1117	1 968	3 499	5 467	7 872	10 714
celkový odběr elektrické energie	kWh	179 578	144 399	147 687	171 152	227 819	307 994	409 544	531 553
cena elektrické energie 2,2 Kč/kWh	Kč	395 071	317 678	324 911	376 535	501 201	677 587	900 996	1 169 416

Na grafu 3.4 je zřejmá celková spotřeba elektrické energie v závislosti na rychlosti vozidla při jízdě na rovné otevřené trati na celé trase Praha - Peking. I z tohoto grafu vyplývá, že spotřebovaná energie je součtem dvou dílčích složek. První složkou je energie odebraná na vedlejší spotřebu vozidla, která se zejména projevuje při nízkých rychlostech a druhou významnou složkou je spotřeba elektrické energie potřebné na jízdu vozidla, která se zejména uplatňuje při vysokých rychlostech.



Graf 3.4 Závislost odebrané elektrické energie na cestovní rychlosti vozidla

Poslední graf 3.5 znázorňuje celkovou cenu elektrické energie spotřebovanou na jednu jízdu vozidla z Prahy do Pekingu v závislosti na rychlosti vozidla. I celková cena elektrické energie se převážně skládá ze dvou složek. První složkou je cena elektrické energie na vedlejší spotřebu vozů, která se výrazněji projevuje při nižších rychlostech a druhá složka je cena za energii, která je spotřebována na jízdu vozidla. Tato druhá složka je mnohem významnější při vysokých rychlostech vozidla.



Graf 3.5 Celková cena elektrické energie v Kč na jednu jízdu vlaku

### 3.3 Letecká doprava pro přepravu osob

Letecká doprava je sice nejmladším druhem dopravy, ale v dnešní době si již lze jen těžko představit dopravu osob na dlouhé vzdálenosti bez tohoto druhu dopravy. Tento druh dopravy je v dnešní době nejrychlejší, nejbezpečnější a také pohodlný způsob přepravy osob na dlouhé vzdálenosti. Bezesporu největší výhodou je absence dopravní cesty, jelikož letadlo se pohybuje v průměrné výšce 10 000 km nad povrchem země, kde je velmi řídký vzduch,  $0,3 \text{ kg/m}^3$ . Ovšem nevýhodou letecké dopravy jsou její vysoké provozní náklady, zejména závislost na drahých kapalných uhlovodíkových palivech, tedy ropě, odrážející se ve vysoké ceně letenek. V dnešní době je letecká přeprava schopna převážet 1,7 miliardy cestujících ročně a počítá se s nárůstem kapacity přepravy okolo 5 % ročně.

### 3.4 Specifikace letadla

Pro lety mezi Evropou a Asií se používají letadla velkých rozměrů, kterými jsou například letadlo typu Boeing B777, které je vidět na obr. 3.3, nebo letadlo typu Airbus A330-200, které je vidět na obrázku 3.4.



Obr. 3.3 Boeing B777



Obr. 3.4 Airbus A330-200

Pro leteckou přepravu co se týče nákladů, je velice důležitá cena leteckého paliva, která se mění každým dnem, a také záleží na místě, kde se letecké palivo pořídí. Srovnání ceny paliv je uvedeno v tabulce 3.9.

Tab. 3.9 Cena leteckého paliva (bez DPH)

cena Švýcarsko	Kč/galon	85,6
cena Amerika	Kč/galon	108,3
cena Evropa	Kč/galon	85,5
průměrná cena	Kč/galon	93,1

### 3.4.1 Přímý let Praha - Peking

Pro let z Prahy do Pekingu neexistuje přímá trasa, ale pro výpočet ji zde můžeme uvažovat. Pro výpočet je zde brán pouze jeden typ dopravního letadla, kterým je Airbus A330-200. Základní parametry letadla jsou uvedeny v tabulce 3.10.

Tab. 3.10 Základní parametry Airbus A330-200

Airbus Industrie A330-200		
počet míst (d)	max	253
spotřeba paliva na jedno místo průměr (s)	galon/osobní míle	0,0215
vzdálenost (l)	míle	4 638,3
vzdálenost (l)	km	7 430,6
doba letu (t)	min	780,0
cestovní rychlost	km/h	880

Spotřeba paliva na kapacitu letadla

$$s_c = d \cdot s = 253 \cdot 0,0215 = 5,4395 \text{ galon} / \text{míle} = 12,8518 \text{ l} / \text{km} \quad (3.15)$$

kde: d je počet míst

s je spotřeba paliva na jedno místo (galon/osobní míle)

Spotřeba paliva na celou trasu letu

$$s_t = s_c \cdot l = 5,4395 \cdot 4\,638,3 = 25\,230 \text{ galonů} = 95\,496 \text{ l} \quad (3.16)$$

kde: l je vzdálenost trasy (míle)

s<sub>c</sub> je spotřeba paliva na kapacitu letadla (galon/osobní míle)

V předcházejících výpočtech je spočítána celková spotřeba letadla na jeden let z Prahy do Pekingu. Nyní lze spočítat cenu paliva pro celou trasu letu.

Cena jednoho letu z Prahy do Pekingu

$$c = s_t \cdot p_c = 25\,230 \cdot 93,1 = 2\,348\,913 \text{ Kč} \quad (3.17)$$

kde: p<sub>c</sub> je průměrná cena za galon paliva (Kč)

s<sub>t</sub> je spotřeba paliva na celou trasu letu (galon)

Cena paliva na jedno sedadlo

$$c_s = \frac{c}{p_s} = \frac{2\,348\,913}{253} = 9\,284 \text{ Kč} \quad (3.18)$$

kde: c je celková cena paliva (Kč)

$p_s$  je počet sedadel

Čas jednoho přímého letu

$$t = \frac{l \cdot 1,602}{v} = \frac{4\,638,3 \cdot 1,602}{880} = 8\,h\,37\,min \quad (3.19)$$

Z těchto úvah a výpočtů vychází cena jednoho přímého letu z Prahy do Pekingu letadlem typu Airbus A330-200 pro 253 cestujících na 2 348 913 Kč. Cena paliva na jedno sedadlo je 9 284 Kč a čas strávený v letadle je 8 h 37 min.

### 3.4.2 Nepřímý let Praha -Peking

Nyní zde je rozebráno letadlo Airbus A330-200 poněkud podrobněji, je uvažována trasa letadla stejná jako trasa vlaku i se započtením vlivu přistání a vzletnutí, tudíž letadlo čtrnáctkrát přistane a čtrnáctkrát vzletne.

V tabulce 3.11 jsou uvedeny podrobnější parametry letadla Airbus A330-200 právě pro tento výpočet.

Tab. 3.11 Parametry letadla Airbus A330-200

hmotnost letadla	$m_l$	t	120
počet sedadel	$p_s$		253
hmotnost cestujícího	$m_{cest}$	t	0,08
hmotnost zavazadel	$m_{zav}$	t	0,02
obsazení letadla	ol	%	100
zásoba paliva	$z_p$	dm <sup>3</sup>	139 100
měrná hmotnost paliva	$m_p$	kg/dm <sup>3</sup>	0,75
výška letu	h	m	10 000
rychlost letu	v	km/h	880
čelní plocha letadla (pouze odhad)	S	m <sup>2</sup>	60
měrný odpor vzduchu (pouze odhad)	$C_x$		0,22
měrná hmotnost vzduchu	$r_v$	kg/m <sup>3</sup>	0,3
celková délka letu	l	km	10 006
účinnost pohonu	$\eta$	%	25
výhřevnost	vh	kWh/dm <sup>3</sup>	1,2
počet stanic	$p_s$		15

Z těchto parametrů lze postupně spočítat celkovou spotřebu paliva na celou

trasu letu postupně se všemi přistáními a vzlety v jednotlivých stanicích, kterých je patnáct. Nejprve je zde postupně spočítána celková vzletová hmotnost letadla do které vstupují různé parametry.

Hmotnost letadla na sedadlo

$$m_s = \frac{m_l}{p_s} = \frac{120}{253} = 0,47 \text{ t} \quad (3.20)$$

kde:  $m_l$  je hmotnost letadla (t)

$p_s$  je počet míst

Užitečná hmotnost

$$m_u = \frac{p_s \cdot (m_{cest} + m_{zav}) \cdot ol}{100} = \frac{253 \cdot (0,08 \cdot 0,02) \cdot 100}{100} = 25,3 \text{ t} \quad (3.21)$$

kde:  $m_{cest}$  je hmotnost cestujícího (t)

$m_{zav}$  je hmotnost zavazadel (t)

$ol$  je obsazení letadla (%)

$p_s$  je počet míst

Hmotnost paliva

$$m_p = \frac{z_p \cdot m_p}{1000} = \frac{139100 \cdot 0,8}{1000} = 104,3 \text{ t} \quad (3.22)$$

kde:  $m_p$  je měrná hmotnost paliva ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

$z_p$  je zásoba paliva ( $\text{dm}^3$ )

Vzletová hmotnost

$$m = m_l + m_u + z_p \cdot m_p = 120 + 25,3 + 139,1 \cdot 0,75 = 249,6 \text{ t} \quad (3.23)$$

kde:  $m_l$  je hmotnost letadla (t)

$m_u$  je užitečná hmotnost (t)

$z_p$  je celková zásoba paliva ( $\text{m}^3$ )

$m_p$  je hmotnost paliva ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )

Nyní lze spočítat celkový letový odpor, který je podobný svým výpočtem



měrnému jízdnímu odporu u vlakové jednotky.

Celkový letový odpor

$$F_m = a_{kv} \cdot v^2 = 0,5 \cdot r_v \cdot C_x \cdot \frac{S}{3,6^2} \cdot \frac{v^2}{1000} = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 0,22 \cdot \frac{60}{3,6^2} \cdot \frac{880^2}{1000} = 118,3 \text{ kN} \quad (3.24)$$

kde:  $a_{kv}$  je absolutní kvadratický člen ( $\text{N}/(\text{km}/\text{h})^2$ )

$v$  je rychlost letadla ( $\text{km}/\text{h}$ )

$r_v$  je měrná hmotnost vzduchu v letové hladině 10 000 m ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_x$  je měrný odpor vzduchu

$S$  je čelní plocha letadla ( $\text{m}^2$ )

K výpočtu celkové spotřeby energie je ještě potřeba znát kinetickou a potenciální energii, a také celkovou spotřebu energie ještě bez započítání vlivu kinetické a potenciální energie.

Spotřeba energie bez započítání vlivu kinetické a potenciální energie na celou dráhu letu

$$A = \frac{F_m \cdot l}{3,6} = \frac{118,3 \cdot 10\,006}{3,6} = 328\,839 \text{ kWh} \quad (3.25)$$

kde:  $F_m$  je celkový letový odpor (kN)

$l$  je délka letu (km)

Výpočet kinetické energie

$$E_k = \frac{0,5 \cdot m \cdot v^2}{3\,600 \cdot 3,6 \cdot 3,6} = \frac{0,5 \cdot 249,6 \cdot 880^2}{3\,600 \cdot 3,6 \cdot 3,6} = 2\,071,6 \text{ kWh} \quad (3.26)$$

kde:  $m$  je vzletová hmotnost (t)

$v$  je rychlost letadla ( $\text{km}/\text{h}$ )

Výpočet potenciální energie

$$E_p = \frac{m \cdot g \cdot h}{3\,600} = \frac{249,6 \cdot 9,81 \cdot 10\,000}{3\,600} = 6\,802,3 \text{ kWh} \quad (3.27)$$

kde:  $m$  je vzletová hmotnost (t)  
 $g$  je tíhové zrychlení ( $m/s^2$ )  
 $h$  je výška letu (m)

Výpočet celkové spotřebované energie se započítáním vlivu vzletu a přistání, to znamená, že se kinetická a potenciální energie bude počítat čtrnáctkrát, jelikož v Praze pouze letadlo vzlétá a nepřistává a v Pekingu naopak pouze přistává a nevzlétá.

Celková spotřebovaná energie

$$A_c = A + (p_s - 1) \cdot E_p + (p_s - 1) \cdot E_k = 328\,839 + (15 - 1) \cdot 6\,802,3 + (15 - 1) \cdot 2\,071,6 = 453\,073 \text{ kWh} \quad (3.28)$$

kde:  $A$  je energie bez započítání kinetické a potenciální energie (kWh)  
 $E_p$  je potenciální energie (kWh)  
 $E_k$  je kinetická energie (kWh)  
 $p_s$  je počet stanic

Převod na spotřebu paliva v litrech

$$s_t = \frac{A_c \cdot 100}{\eta \cdot v_h} = \frac{453\,073 \cdot 100}{25 \cdot 10} = 181\,229 \text{ l} \quad (3.29)$$

kde:  $A$  je celková spotřebovaná energie (t)  
 $\eta$  je účinnost spalovacích motorů (%)  
 $v_h$  je výhřevnost paliva ( $kWh/dm^3$ )

Z předcházejících vztahů vychází spotřeba energie na jeden let z Prahy do Pekingu po trase, kterou musí překonat vlak i se započtením vlivu přistání a následného vzletu na 453 073 kWh. V přepočtu na palivo vychází 181 229 l paliva na tuto trasu. To znamená, že letadlo není ani schopno pojmout dostatek paliva, ale muselo by být po cestě dotankováno. Z tohoto důvodu není výsledek výpočtu zcela přesný, a také nepřesnost je v tom, že letadlo za letu mění svou hmotnost v závislosti na spotřebě paliva, ale pro porovnání s železniční přepravou jsou tyto údaje dostačující.

Celková cena paliva

$$c = \frac{s_t \cdot pc}{3,785} = \frac{181\,229 \cdot 93,1}{3,785} = 4\,457\,718 \text{ Kč} \quad (3.30)$$

kde:  $s_t$  je celková spotřeba paliva (l)  
 $pc$  je cena paliva (Kč/galon)

Cena paliva na jedno sedadlo

$$c_s = \frac{c}{p_s} = \frac{4\,457\,718}{253} = 17\,619 \text{ Kč} \quad (3.31)$$

kde:  $c$  je celková cena paliva (Kč)  
 $p_s$  je počet sedadel

Z těchto výpočtů vychází cena jednoho letu z Prahy do Pekingu letadlem typu Airbus A330-200 pro maximálně 253 cestujících po trase srovnatelné z vlakem na 3 873 034 Kč. Cena paliva na jedno sedadlo je 17 619 Kč.

### 3.5 Shrnutí

V této kapitole je proveden návrh vysokorychlostního vozidla. Dále jsou zde vypočítány jeho základní parametry pro různé rychlosti, a také výpočet celkové spotřeby elektrické energie na trati Praha – Peking. Poté je zde proveden energetický výpočet pro leteckou dopravu, jak pro přímý let, tak i pro let, který kopíruje návrh trasy.

## 4 POROVNÁNÍ ŽELEZNIČNÍ A LETECKÉ DOPRAVY

### 4.1 Porovnání doprav z časového hlediska

Pro železniční přepravu je trasa rozdělena na 15 různě dlouhých úseků, a je tudíž mnohem delší nežli u letecké přepravy, konkrétně u přímé letové trasy z Prahy do Peking. Druhý nepřímý let je spočítán s ohledem na trasu železniční dopravy a zahrnuje i patnáct přistání a vzlétnutí. Trasa je stejně dlouhá jako u železniční dopravy a to konkrétně 10 006 km. Jelikož se jedná o různé druhy dopravy, tak mají i různou cestovní rychlost. Nejvyšší cestovní rychlost má letecká doprava a to konkrétně 880 km. Její výhoda se malinko smazává na dlouhých vzdálenostech cestou na letiště a dobou odbavení. Železniční doprava má druhou nejvyšší cestovní rychlost z uvažovaných druhů dopravy, konkrétně 250 km/h.

V následující tabulce 4.1 a jsou uvedeny dopravní vzdálenosti jednotlivých druhů dopravy, časy pro překonání trasy Praha – Peking a cestovní rychlosti.

Tab. 4.1 Časy pro přepravu osob různými druhy dopravy

	cestovní rychlost (km/h)	vzdálenost (km)	čas (h)
přímý let Praha - Peking	880	7 431	8:37
nepřímý let Praha - Peking	880	10 006	11:22
vlak Praha - Peking	250	10 006	40:01

Výpočet času dopravy

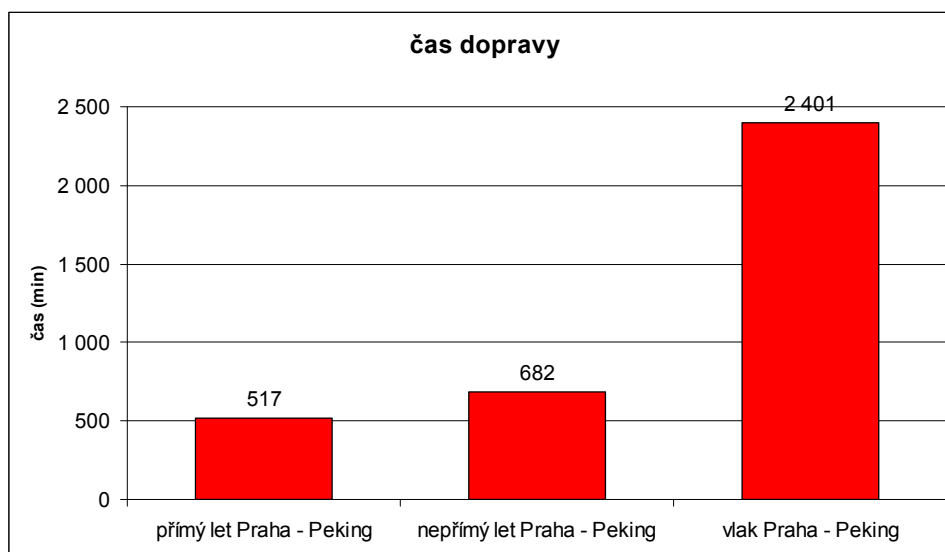
$$t = \frac{s}{v} \quad (4.1)$$

kde: s je celková dráha (km)

v je cestovní rychlost (km/h)

t je čas dopravy (min)

Z předcházející tabulky jsou vidět časy na přepravu osob z Prahy do Peking různými druhy dopravy bez žádného časového omezení, které se týká převážně letecké dopravy, u které je zdržení způsobeno cestou na letiště a odbavovací dobou nejmarkantnější.



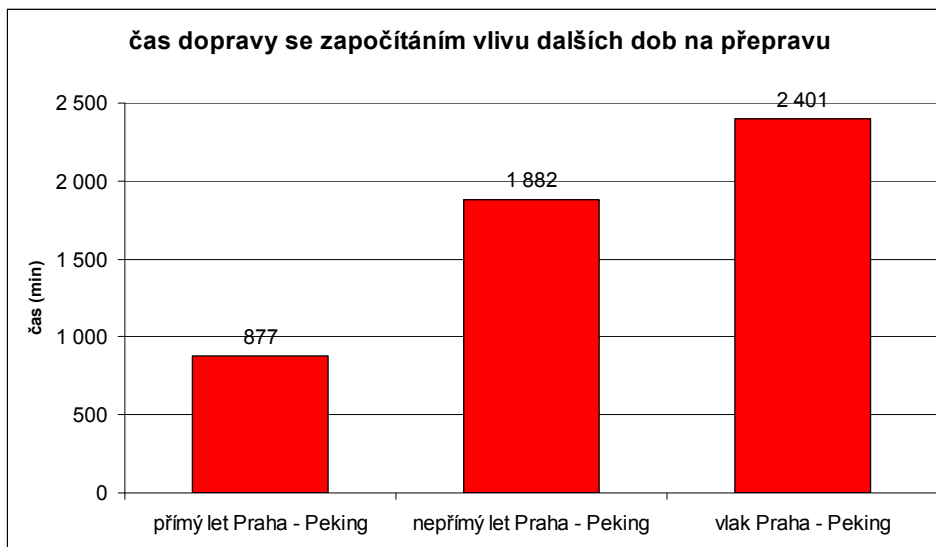
Graf 4.1 Čas dopravy bez započítání vlivu dalších dob na přepravu

Když se budou uvažovat další doby pro přepravu, konkrétně dobu dopravy na letiště, z letiště zpět do centra města a dobu na odbavení na letišti a také při nepřímém letu dobu strávenou přistáním a vzlétnutím v každém městě, časový rozdíl mezi vlakem a letadlem se výrazně sníží.

Čas strávený cestou na letiště a z letiště zpět do centra by přibližně mohl být 180 minut, časy na odbavení také 180 minut a čas strávený mezipřistáním ve městech 60 minut. Následující tabulka 4.2 a graf 4.2 ukazuje cestovní doby již se započítaným vlivem cesty na letiště a zpět, odbavovací doby, a také doby na mezipřistání.

Tab. 4.2 Časy pro přepravu osob různými druhy dopravy se započítáním vlivu dalších dob na přepravu

	cest. rych. (km/h)	vzd. (km)	čas navíc (h)	čas (h)
přímý let Praha - Peking	880	7 431	6:00	14:37
nepřímý let Praha - Peking	880	10 006	20:00	31:22
vlak Praha - Peking	250	10 006	0:00	40:01



Graf 4.2 Čas dopravy se započítáním vlivu dalších dob na přepravu

Z této tabulky je vidět přiblížení vlakové a osobní dopravy k letecké dopravě. Další přiblížení, možná i s mazáním nevyužitě doby ve vlaku je vhodné navržení jízdního řádu. Pro konkrétnost je zde uveden příklad. Letadlem se v obou případech dostaneme do cílového místa v jednom dni. Ale jestliže si uvědomíme, že letíme ráno a přistaneme v Pekingu pozdě večer tak noc před odletem i po příletu spíme. U správného navržení jízdního řádu můžeme vyjet vlakem z Prahy v 11:00 večer a přijet do Pekingu v 7:01 ráno, ale o dva dny déle, bez uvažování vlivu časového posunu. Tato úvaha se vyrovná letecké přepravě, jelikož ve vlaku mohou být lůžkové vozy a tím pádem se dá říci, že při přepravě vlakem ztratí cestující právě noc, kterou by stejně spal, den, který by stejně proseděl v letadle a noc, kterou by stejně prospal po náročném letu. Z toho vyplývá, že časová náročnost přepravy je velmi podobná.

## 4.2 Porovnání doprav z energetického a cenového hlediska

V následující tabulce 4.3 je uvedena spotřeba jednotlivých druhů doprav. Letecká doprava je udána v litrech benzínu spotřebovaných na cestu a železniční doprava je udána v kWh spotřebovaných na celou cestu při rychlosti 250 km/h.

Tab. 4.3 Spotřeba

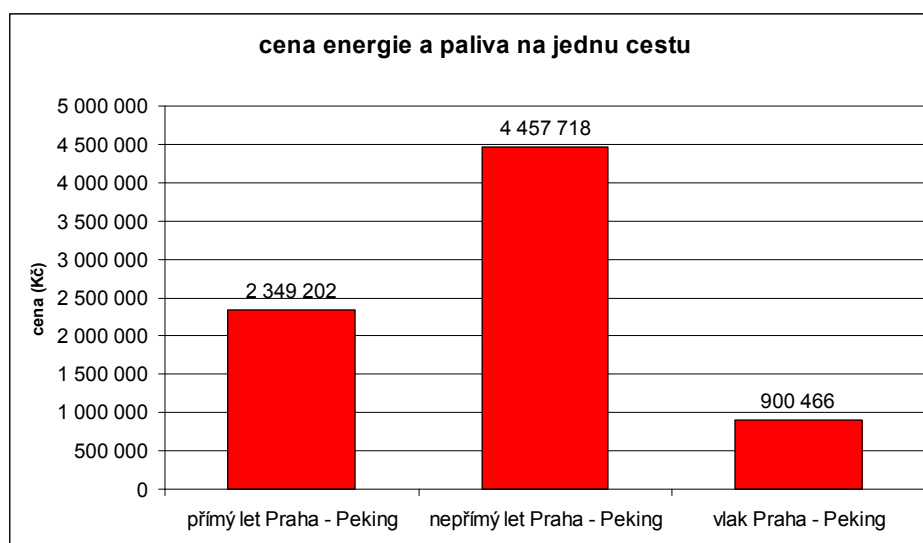
	spotřeba
přímý let Praha- Peking	95 496 l
nepřímý let Praha - Peking	181 229 l
vlak Praha - Peking	409 544 kWh

Předcházející tabulka není přímo vypovídající. Ukazuje pouze spotřebu

jednotlivých druhů dopravy. V následující tabulce 4.4 a grafu 4.3 je tato spotřeba vyčíslena penězi. U železniční dopravy je průměrná cena za 1 kWh 2,2 Kč bez DPH, u letecké dopravy je cena za 1 litr leteckého paliva průměrně 24,6 Kč bez DPH.

Tab. 4.4 Cena za energii a palivo

	cena za energie a palivo
přímý let Praha- Peking	2 349 202
nepřímý let Praha - Peking	4 457 718
vlak Praha - Peking	900 466



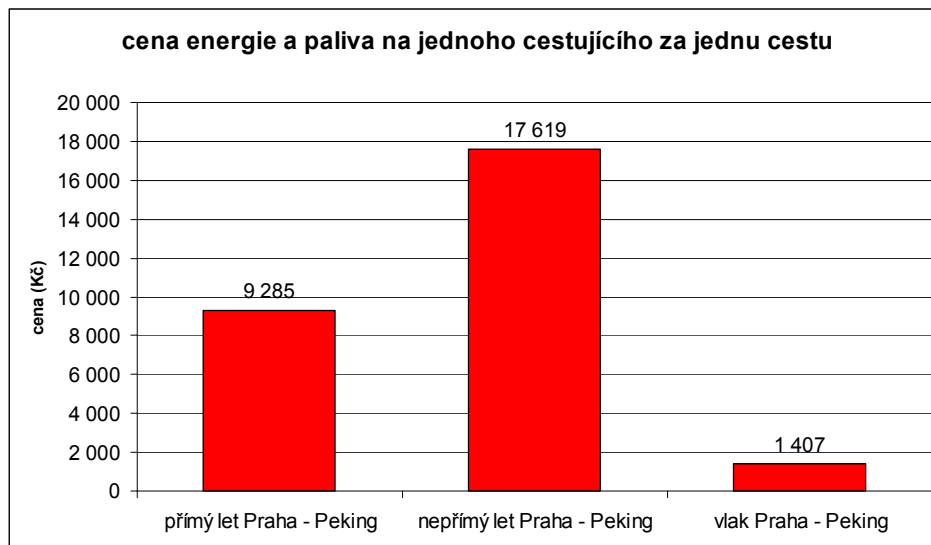
Graf 4.3 Cena energie a paliva

Z předcházejícího grafu a tabulky je vidět celková cena jednotlivých druhů doprav. Tento graf a tabulka udávají celkovou cenu za všechny cestující, což není zcela objektivní, jelikož v letadle je pouze 253 cestujících a ve vlaku naopak 640 cestujících.

Pro objektivnost výpočtů a srovnání je potřeba uvést cenu dopravy za jednoho cestujícího. V následující tabulce 4.5 a grafu 4.4 je uvedena cena za jednoho cestujícího.

Tab. 4.5 Cena za energii a palivo na jednoho cestujícího

	cena za energie a palivo na jednoho cestujícího (Kč)
přímý let Praha- Peking	9 285
nepřímý let Praha - Peking	17 619
vlak Praha - Peking	1 407



**Graf 4.4 Cena energie a paliva na jednoho cestujícího**

Na předcházejícím grafu a v předcházející tabulce je již konkrétně vidět cena dopravy jednoho cestujícího při 100 % obsazení dopravních prostředků. Nejlépe z toho vychází železniční doprava, která má energetické náklady na přepravu jednoho cestujícího nesrovnatelně nižší oproti letecké dopravě.

### **4.3 Shrnutí**

V této kapitole došlo k porovnání letecké a železniční dopravy jak z časového hlediska, tak i z hlediska ceny energie pro jednoho cestujícího. Z časového hlediska vyšla lépe letecká doprava, ale z energetického hlediska (cena energie na jednu jízdu a jednoho cestujícího) vyšla mnohem lépe vysokorychlostní železniční doprava.



## **5 PŘEPRAVA ZBOŽÍ**

Nedílnou součástí dopravy je také přeprava zboží. Zboží může být přepravováno vnitrostátně, mezinárodně v rámci jednoho kontinentu nebo mezikontinentálně. Pro přepravu zboží se používají různé druhy dopravy. Železniční, letecká, námořní a v neposlední řadě silniční doprava.

### **5.1 Železniční přeprava zboží**

Vlaková doprava má potenciál přepravovat zboží na dlouhé vzdálenosti za krátký čas, nepoměrně kratší, nežli lodní, nebo kamionovou přepravou. Letecké přepravě se může docela hodně přiblížit, jelikož zboží by se dalo přepravovat pomocí vysokorychlostních ucelených jednotek k tomu uzpůsobených. Jedná se pouze o přepravu části zboží. Běžné zboží, které je dnes přepravováno lodí, zvládne dopravit konvenční železnice.

#### **5.1.1 Parametry vysokorychlostního vozidla pro nákladní dopravu.**

Vysokorychlostní vozidlo je v dnešní době téměř výhradně používáno pro dopravu osob, ale při určitých změnách by bylo možné vozidlo využít i při přepravě zboží. Přeprava zboží mezi Evropou a Asií je v současnosti provozována za pomoci letecké a lodní dopravy. Při určitých úpravách vysokorychlostní vlakové jednotky je možné uvažovat o přepravě zboží právě těmito jednotkami při velmi vysoké přepravní rychlosti.

Jednotka by se musela upravit např. tak, že by se vyndaly všechny věci potřebné k přepravě osob, tím by se vůz výrazně odlehčil, pro výpočet je uvažována hmotnost vozu po odlehčení 44 t. V tomto specifickém vlaku by nemusela být žádná okna pro cestující, tím by se dala lehce zlepšit aerodynamika.

V následující tabulce 5.1 jsou uvedeny základní parametry vlakové jednotky pro přepravu zboží na trase Praha - Peking.

Tab. 5.1 Základní parametry vysokorychlostní jednotky pro výpočet spotřeby elektrické energie pro přepravu zboží

počet vozů	$p_{vv}$		16
poměrná adhezní hmotnost	$m_{adh}$	%	50
vlastní hmotnost vozu	$m_{vv}$	t	44
maximální hmotnost nákladu na jeden vůz	$m_n$	t	24
ekvivalent rotujících hmot trakčního dvojkolí	$e_{rd}$	t	2
ekvivalent rotujících hmot netrakčního dvojkolí	$e_{rdn}$	t	1
počet pohonů	$p_p$		4
počáteční tažná síla jednoho pohonu	$F_{pt1}$	kN	140
rozjezdová tažná síla jednoho pohonu	$F_{rt1}$	kN	140
trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu	$P_{ok1}$	kW	4 400
maximální rychlost	$v_{max}$	km/h	300
přepravní rychlost	$v_{cest}$	km/h	250
měrná hmotnost vzduchu	$r_v$	kg/m <sup>3</sup>	1,2
měrný konstantní člen	$a_k$	N/kN	1,0
tunelový faktor	$t_f$		1
činitel tvaru čelního vozu	$\lambda_{tp}$		0,3
činitel tvaru vloženého vozu	$\lambda_{tv}$		0,07
činitel tvaru posledního vozu	$\lambda_{tpv}$		0,2
čelní plocha	$S$	m <sup>2</sup>	11,5
měrný lineární člen v obsazeném stavu	$a_{ios}$	N/kN/(km/h)	0
účinnost pohonu	$\eta_p$	%	85
střední vedlejší příkon jednoho vozu	$P_v$	kW	10
počet dvojkolí jednoho vozu	$p_{dj}$		4
cena elektrické energie na vstupu trakční napájecí stanice		kč/kWh	2,2

Následující tabulka 5.2 bude shrnovat vypočtené parametry, pro výpočet spotřeby elektrické energie na trati Praha - Peking odvozené od základních parametrů uvedených v tabulce 5.1.

Tab. 5.2 Vypočtené parametry vozidla pro výpočet spotřeby elektrické energie pro přepravu zboží

<p>vlastní hmotnost celkem</p> $m_{vc} = p_{vv} \cdot m_{vv}$ <p>kde: <math>p_{vv}</math> je počet vozů  <math>m_{vv}</math> je vlastní hmotnost vozu</p>	t	640
<p>celková hmotnost</p> $m_c = m_{vc} + p_{vv} \cdot m_n$ <p>kde: <math>m_{vc}</math> vlastní hmotnost celkem  <math>m_n</math> hmotnost nákladu jednoho vozu</p>	t	1 088
<p>hmotnost na dvojkolí</p> $m_d = \frac{m_c}{p_{vv} \cdot 4}$ <p>kde: <math>m_c</math> je celková hmotnost  <math>p_{vv}</math> je počet vozů</p>	t	17
<p>ekvivalent rotujících hmot</p> $e_{rm} = p_{vv} \cdot 4 \cdot \left( \frac{m_{adh} \cdot e_{rd}}{100} + \frac{(100 - m_{adh}) \cdot e_{rdn}}{100} \right)$ <p>kde: <math>p_{vv}</math> je počet vozů  <math>m_{adh}</math> poměrná adhezní hmotnost  <math>e_{rd}</math> ekvivalent rotujících hmot trakčního dvojkolí  <math>e_{rdn}</math> ekvivalent rotujících hmot netrakčního dvojkolí</p>	t	96
<p>součinitel rotujících hmot obsazeného vozidla</p> $1 + \frac{e_{rm}}{m_c}$ <p>kde: <math>e_{rm}</math> je ekvivalent rotujících hmot  <math>m_c</math> je celková hmotnost</p>		1,088
<p>rozjezdová rychlost</p> $v_{roz} = \frac{P_{ok1} \cdot 3,6}{F_{rt1}}$ <p>kde: <math>p_{ok1}</math> je trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu  <math>F_{rt1}</math> rozjezdová tažná síla jednoho pohonu</p>	km/h	113
<p>počáteční tažná síla ucelené jednotky</p> $F_{pt} = pp \cdot F_{pt1}$ <p>kde: <math>pp</math> je počet pohonů  <math>F_{pt1}</math> počáteční tažná síla jednoho pohonu</p>	kN	560
<p>rozjezdová tažná síla ucelené jednotky</p> $F_{rt} = pp \cdot F_{rt1}$	kN	560

<p>kde: pp je počet pohonů  <math>F_{rt1}</math> rozjezdová tažná síla jednoho pohonu</p>		
<p>teoretické rozjezdové zrychlení zatíženého vozidla</p> $a_{ter} = \frac{F_{rt}}{m_c + e_{rm}}$ <p>kde: <math>F_{rt}</math> je rozjezdová tažná síla ucelené jednotky  <math>m_c</math> je celková hmotnost  <math>e_{rm}</math> je ekvivalent rotujících hmot</p>	m/s <sup>2</sup>	0,47
<p>trakční výkon na obvodu kol ucelené jednotky</p> $P_{ok} = P_{ok1} \cdot pp$ <p>kde: <math>p_{ok1}</math> je trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu  <math>P_p</math> počet pohonů</p>	kW	17 600
<p>měrný trakční výkon zatíženého vozidla</p> $P_m = \frac{P_{ok}}{m_c}$ <p>kde: <math>p_{ok1}</math> je trakční výkon na obvodu kol jednoho pohonu  <math>m_c</math> celková hmotnost</p>	kW/t	16,2
<p>činitel tvaru celkem</p> $\lambda_{tc} = \lambda_{tp} + \lambda_{tv} \cdot (p_{vv} - 2) + \lambda_{tpv}$ <p>kde: <math>\lambda_{tp}</math> je činitel tvaru čelního vozu  <math>\lambda_{tv}</math> činitel tvaru vloženého vozu  <math>P_{vv}</math> počet vozů celkem  <math>\lambda_{tpv}</math> činitel tvaru posledního vozu</p>		1,48
<p>absolutní kvadratický člen</p> $a_{kv} = 0,5 \cdot r_v \cdot \lambda_{tc} \cdot t_f \cdot \frac{S}{3,6^2}$ <p>kde: <math>r_v</math> je měrná hmotnost vzduchu  <math>\lambda_{tc}</math> činitel tvaru celkem  <math>S</math> čelní plocha  <math>t_f</math> tunelový faktor</p>	N/(km/h) <sup>2</sup>	0,79
<p>měrný kvadratický člen v obsazeném stavu</p> $a_{kos} = \frac{a_{kv}}{9,81 \cdot m_c}$ <p>kde: <math>a_{kv}</math> je absolutní kvadratický člen  <math>m_c</math> celková hmotnost</p>	N/kN/(km/h) <sup>2</sup>	0,000074

Na následujících grafech a v tabulkách budou uvedeny parametry pro výpočet spotřeby elektrické energie pro různou rychlost vozidla.

Účinnost trakčního pohonu je stejná jako při návrhu vysokorychlostního vozidla pro dopravu osob.

Výpočet celkové účinnosti trakčního pohonu

$$\eta_p = \eta_{TM} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_M \cdot \eta_{pr} \cdot (1 - \beta) = 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot (1 - 0,02) = 0,85 \quad (5.1)$$

kde:  $\eta_{tr}$  je účinnost transformátoru (%)

$\eta_M$  je účinnost měniče (%)

$\eta_{TM}$  je účinnost trakčního motoru (%)

$\eta_p$  je účinnost trakčního pohonu (%)

$\eta_{pr}$  je účinnost převodovky (%)

Celková účinnost se skládá ze dvou složek. První složkou je účinnost pevných trakčních zařízení, která je 90 % a druhou složkou figurující v celkové účinnosti je účinnost trakčního pohonu, která je 85 %.

Výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_c = \eta_{ptz} \cdot \eta_p = 0,85 \cdot 0,9 = 0,765 \quad (5.2)$$

kde:  $\eta_c$  je celková účinnost (%)

$\eta_{ptz}$  je účinnost pevných trakčních zařízení (%)

$\eta_p$  je účinnost trakčního pohonu (%)

### **Výpočet jízdních odporů**

Na následujících vzorcích a také v následující tabulce 5.3 jsou vidět výpočty a výsledky jízdních odporů, které jsou stejné jako v kapitole 3.2.9, akorát s parametry uvedenými v tabulkách 5.1 a 5.2.

Tab. 5.3 Vypočtené jízdní odpory

rychlost	km/h	0	50	100	113	150	200	250	300
měrný jízdní odpor v obsazeném stavu	N/kN	1,00	1,18	1,74	1,94	2,66	3,95	5,61	7,64
absolutní jízdní odpor v obsazeném stavu	kN	10,7	12,6	18,6	20,7	28,4	42,2	59,9	81,6

V tabulce 5.3 jsou vidět vypočtené hodnoty jízdních odporů a je na nich vidět,

že při zvyšující se jízdní rychlosti se jízdní odpory také výrazně zvyšují.

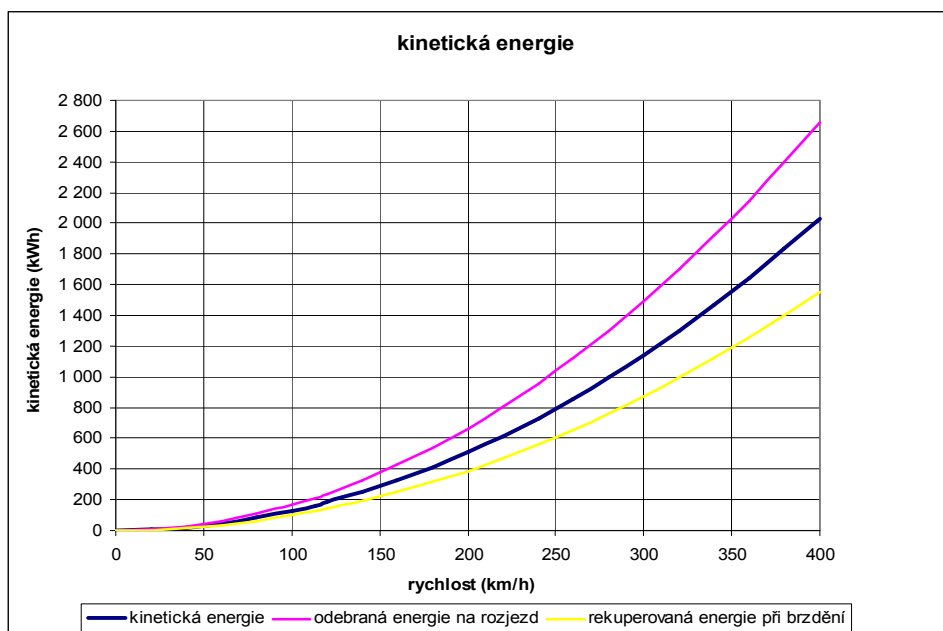
### Výpočet kinetické energie

Výpočet kinetické energie a energií odebraných na rozjezd a rekuperovaných při brzdění je uveden v tabulce 5.4 a na následujících vzorcích. Výpočty jsou obdobné jako v kapitole 3.2.10, akorát s parametry uvedenými v tabulkách 5.1, 5.2 a 5.3.

Tab. 5.4 Kinetická energie

rychlost	km/h	0	50	100	113	150	200	250	300
kinetická energie	kWh	0	32	127	162	285	508	793	1 142
odebraná energie	kWh	0	41	166	212	373	663	1 037	1 493
rekuperovaná energie	kWh	0	24	97	124	218	388	607	874

Následující graf 5.1 shrnuje předcházející tabulku 5.4 a ukazuje, že kinetická energie stoupá z druhou mocninou rychlosti, také je z grafu vidět, že při rozjezdu se projeví celková účinnost negativně (vzroste kinetická energie na rozjezd) a při brzdění se účinnost projeví také negativně (to co se odebere na rozjezd není vozidlo vlivem účinnosti schopno vrátit zpět do sítě vlivem rekuperace).



Graf 5.1 Závislost kinetické energie na rychlosti vozidla

### Výpočet mechanické trakční práce

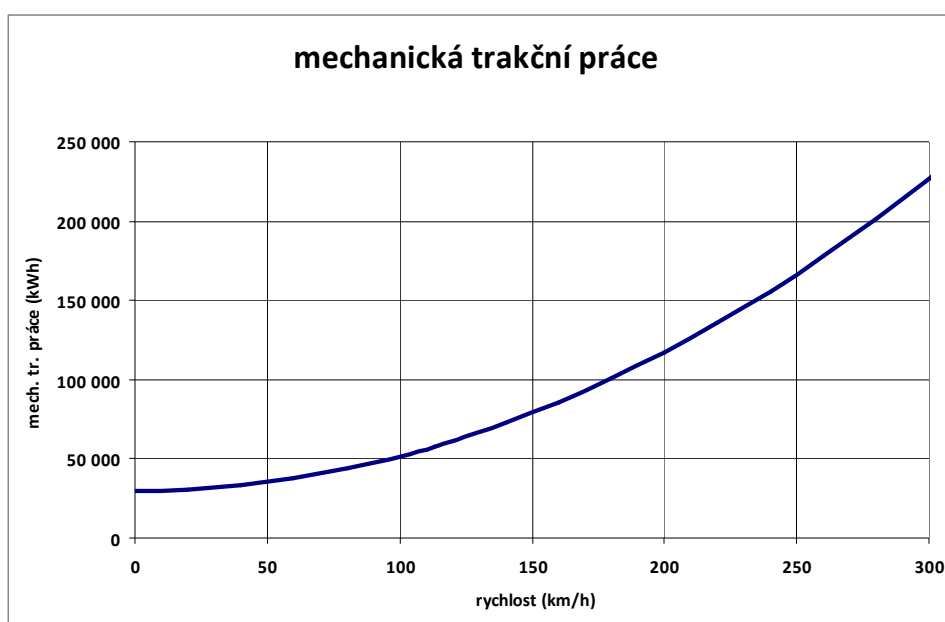
Na následujícím vzorci a v tabulce 5.5 je uveden výpočet celkové mechanické

trakční práce, který je obdobný kapitole 5.2.11 akorát s parametry uvedenými v tabulkách 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4.

Tab. 5.5 Mechanická trakční práce

rychlost v	km/h	50	100	113	150	200	250	300
mechanická trakční práce	kWh	35 141	51 567	57 631	78 943	117 270	166 547	226 775

Z tabulky 5.5 je vytvořen graf 5.2, který ukazuje závislost celkové mechanické trakční práce na rychlosti vozidla.



Graf 5.2 Závislost mechanické trakční práce na rychlosti vozidla

### Výpočet vedlejší spotřeby vozů

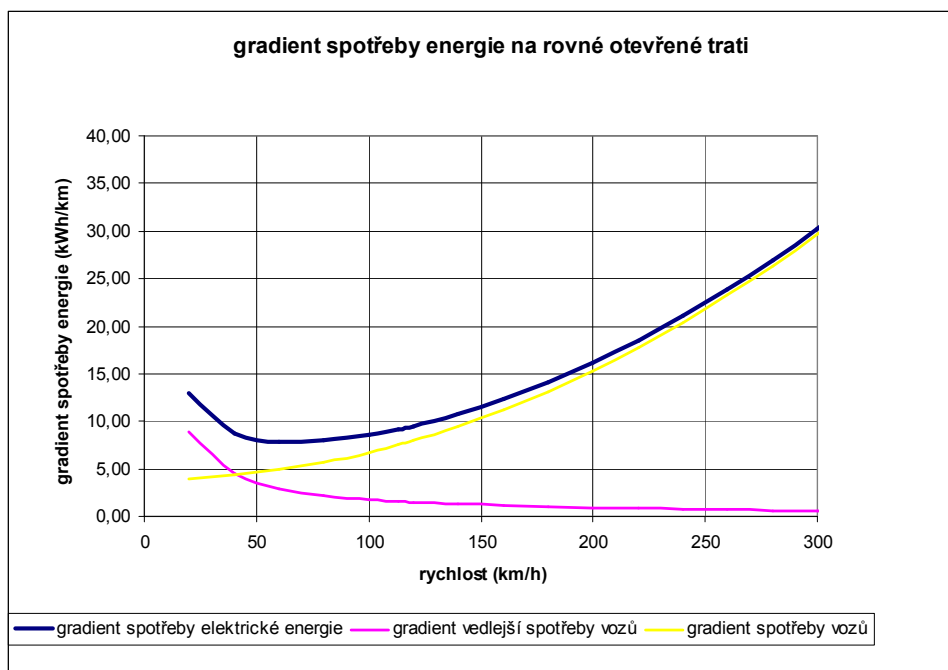
Rovnice ukazují výpočet vedlejší spotřeby vozů a všechny výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.6, výpočet vedlejší spotřeby vozů je shodný s kapitolou 3.2.12.

Tab. 5.6 Spotřeba energie

rychlost v	km/h	50	100	113	150	200	250	300
gradient vedlejší spotřeby vozů	kWh/km	3,56	1,78	1,57	1,19	0,89	0,71	0,59
gradient trakční spotřeby	kWh/km	4,59	6,74	7,53	10,31	15,32	21,76	29,63
celkový gradient trakční spotřeby	kWh/km	8,15	8,51	9,10	11,50	16,21	22,47	30,22
měrná spotřeba	Wh/tkm	7,5	7,8	8,4	10,6	14,9	20,7	27,8

Na grafu 5.3 je uvedena závislost gradientu spotřeby energie v závislosti

na rychlosti vozidla.



Graf 5.3 Závislost gradientu spotřeby energie na rychlosti vozidla na rovné otevřené trati

### Výpočet spotřeby elektrické energie

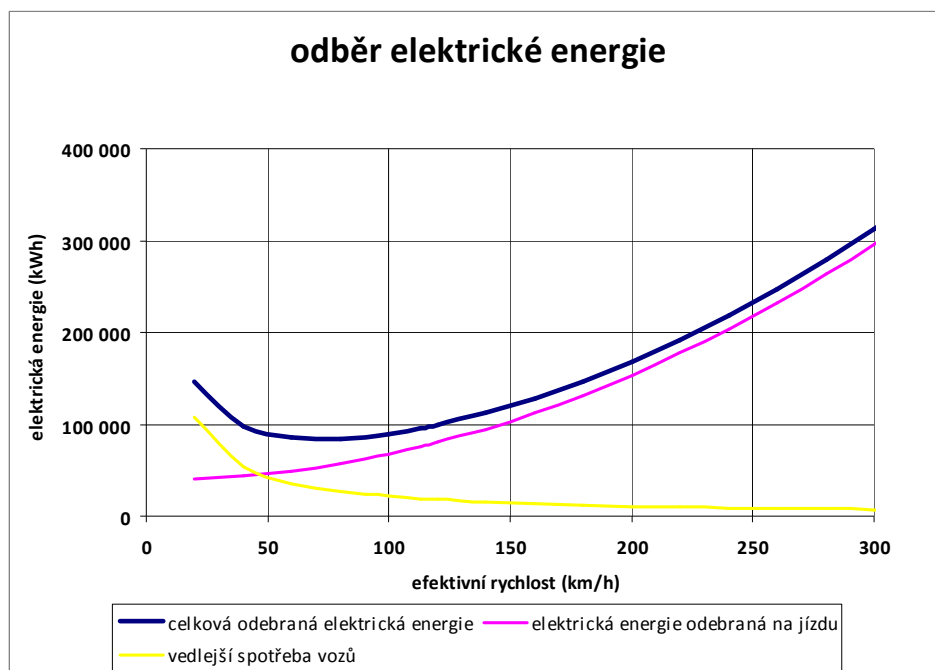
Nyní jsou již známy všechny potřebné informace pro výpočet celkové trakční práce, spotřebované elektrické energie a ceny za elektrickou energii pro celou navrhovanou trať Praha – Peking se započítáním vlivu účinnosti pevných trakčních zařízení, vlivu účinnosti trakčního pohonu a také vlivu stanic. Vše je názorně uvedeno v tabulce 5.7. Výpočet je obdobný jako v části 3.2.13, akorát s parametry z této kapitoly.

Tab. 5.7 Parametry pro výpočet spotřeby elektrické energie a vypočtené hodnoty spotřeby elektrické energie

cestovní rychlost	km/h	41,7	83,3	94,2	125	166,7	208,3	250
efektivní rychlost v	km/h	50	100	113	150	200	250	300
celková odporová síla	kN	12,6	18,6	20,7	28,4	42,2	59,9	81,6
kinetická energie	kWh	31,7	126,9	162,0	285,5	507,5	793,0	1 142,0
odpor ze sklonu	kN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
celková mechanická trakční práce	kWh	35 141	51 567	57 631	78 943	117 270	166 547	226 775
celkový odběr elektrické energie	kWh	88 869	89 717	95 455	119 591	167 820	232 267	312 222
cena elektrické energie 2,2 Kč/kWh	Kč	195 512	197 377	210 001	263 101	369 203	510 987	686 888

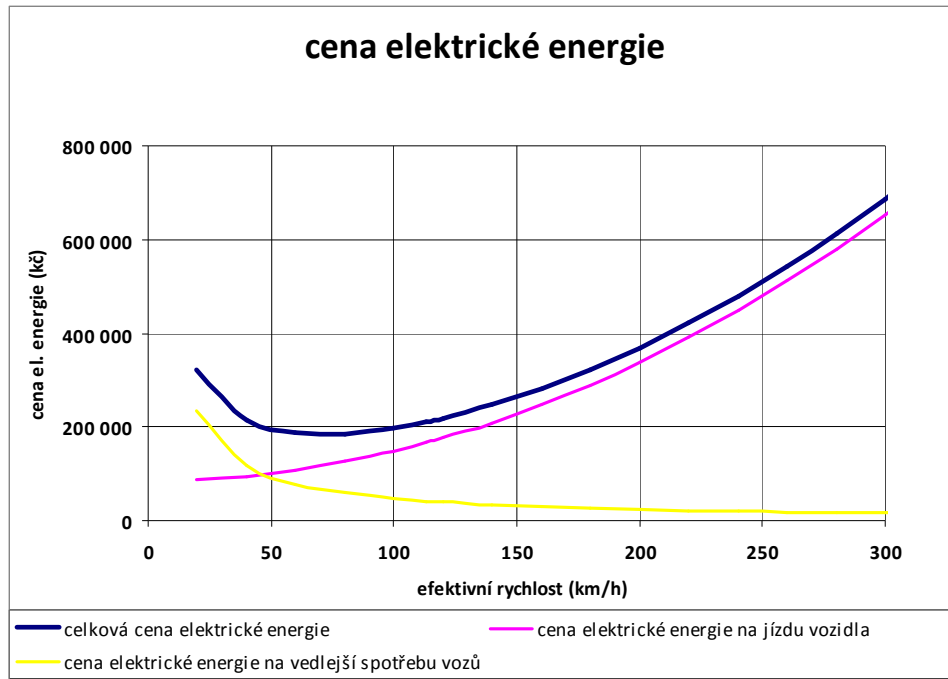


Na grafu 5.4 je zřejmá celková spotřeba elektrické energie v závislosti na rychlosti vozidla při jízdě na rovné otevřené trati na celé trase Praha – Peking. I z tohoto grafu vyplívá, že spotřebovaná energie je součtem dvou dílčích složek. První složkou je energie odebraná na vedlejší spotřebu vozidla, která se zejména projevuje při nízkých rychlostech a druhou významnou složkou je spotřeba elektrické energie potřebné na jízdu vozidla, která se zejména uplatňuje při vysokých rychlostech.



Graf 5.4 Závislost odebrané elektrické energie na rychlosti vozidla

Poslední graf 5.5 znázorňuje celkovou cenu elektrické energie spotřebovanou na jednu jízdu vozidla z Prahy do Pekingu v závislosti na rychlosti vozidla. I celková cena elektrické energie se převážně skládá ze dvou složek. První složkou je cena elektrické energie na vedlejší spotřebu vozů, která se výrazněji projevuje při nižších rychlostech a druhá složka je cena za energii, která je spotřebována na jízdu vozidla. Tato druhá složka je mnohem významnější při vysokých rychlostech vozidla.



Graf 5.5 Celková cena elektrické energie v Kč na jednu jízdu vlaku

Cena elektrické energie pro převoz jedné tuny zboží

$$c_t = \frac{c}{p_{vv} \cdot m_n} = \frac{686\,888}{16 \cdot 24} = 1\,789 \text{ Kč/t} \quad (5.14)$$

kde:  $c$  je celková cena na přepravu zboží (Kč)

$p_{vv}$  je počet vozů celkem

$m_n$  je hmotnost nákladu jednoho vozu (t)

U železniční přepravy vychází cena za převoz jedné tuny zboží na 1 789 Kč.

## 5.2 Letecká přeprava zboží

Pro leteckou přepravu nákladu je zde uvažován jedno z největších nákladních letadel na světě, konkrétně Antonov An-124-100 „Ruslan“, obrázek 5.1. Pro jednoduchost zde nebude uvažován jeho přímý dolet při plně naloženém nákladu okolo 4 000 km, ale bude se počítat dolet na trase Praha – Peking, tedy konkrétně vzdálenost 7 431 km.



Obr. 5.1 Antonov AN-124-100

V tabulce 5.8 jsou uvedeny základní parametry letecké přepravy

Tab. 5.8 Základní parametry pro leteckou přepravu

hmotnost nákladu	m	t	171,2
spotřeba	s	l/h	5 000
průměrná cena paliva (bez DPH)	pc	Kč	24,6
převozní rychlost	v	km/h	850
vzdálenost Praha-Peking	l	km	7 431

Výpočet celkové doby jednoho letu

$$t = \frac{l}{v} = \frac{7\,431 \cdot 60}{850} = 525 \text{ min} \quad (5.15)$$

kde:  $l$  je celková vzdálenost trasy (km)

$v$  je rychlost (km/h)

Z předcházejícího výpočtu vyplývá, že nákladní letadlo by letělo z Prahy do Pekingu 8 hodin a 45 minut.

Výpočet spotřeby paliva na jednu cestu

$$s_c = \frac{s \cdot t}{60} = \frac{5\,000 \cdot 525}{60} = 43\,750 \text{ l} \quad (5.16)$$

kde:  $s$  je průměrná spotřeba (l/h)

$t$  je čas (min)

Celková spotřeba paliva na jeden let je 43 750 l paliva.

Výpočet celkové ceny spotřebovaného paliva na jednu cestu

$$c = s_c \cdot pc = 43\,750 \cdot 24,6 = 1\,076\,250 \text{ Kč} \quad (5.17)$$

kde:  $s_c$  je celková spotřeba (l)  
 $pc$  je průměrná cena paliva (Kč)

Celková cena za palivo na jeden let vychází na 1 076 250 Kč.

Výpočet ceny paliva na přepravu 1 tuny zboží při plném vytížení letadla

$$c_t = \frac{c}{m} = \frac{1\,076\,250}{171,2} = 6\,287 \text{ Kč/t} \quad (5.18)$$

kde:  $c$  je celková cena paliva (Kč)  
 $m$  je hmotnost nákladu (t)

U letecké nákladní dopravy vychází cena převezené tuny zboží při plném vytížení jednoho z největších nákladních letadel na světě na 6 287 Kč.

### 5.3 Námořní přeprava zboží

Následující výpočty se vztahují k trase Praha – Peking. Jelikož ani Praha a ani Peking nejsou přístavní města, bude hlavní část trasy z nizozemského přístavu Rotterdam do čínského přístavu Shanghai. Z obou přístavů budou pro jednoduchost počítány přímé vzdálenosti do cílových měst. Pro představu, jako by byl vytvořen umělý kanál z přístavu do cílových měst. Trasa z Rotterdamu do Shanghaie je 10 409 námořních mil což je 19 277,5 km. Trasa z Rotterdamu do Prahy je 725 km a z Shanghaie do Pekingu je 1 069 km. Z těchto jednotlivých vzdáleností vychází celková trasa jejich součtem na 21 071,5 km.

V následující tabulce 5.9 budou uvedeny základní parametry lodě pro přepravu tzv. suchého nákladu. Bude zde počítáno s největší lodí světa od společnosti Moller-Maersk Group, která je na obrázku 5.2.



Obr. 5.2 Největší nákladní loď světa

Tab. 5.9 Základní parametry pro lodní přepravu

hmotnost nákladu	m	t	334 400
spotřeba	s	t/h	13,7
průměrná cena paliva (bez DPH)	pc	Kč	24,6
převozní rychlost	v	km/h	47
vzdálenost Praha-Peking	l	km	21 071,5

Výpočet celkové doby jedné cesty

$$t = \frac{l}{v} = \frac{21\,071,5 \cdot 60}{47} = 26\,900 \text{ min} \quad (5.19)$$

kde: l je celková vzdálenost trasy (km)

v je rychlost (km/h)

Z předcházejícího výpočtu vyplývá, že loď by plula z Prahy do Pekingu 18 dní 16 hodin a 20 minut.

Výpočet spotřeby paliva na jednu cestu

$$s_c = \frac{s \cdot t \cdot 0,75 \cdot 1\,000}{60} = \frac{13,7 \cdot 26\,900 \cdot 0,75 \cdot 1\,000}{60} = 4\,606\,625 \text{ l} \quad (5.20)$$

kde: s je průměrná spotřeba (t/h)

t je čas (min)

Celková spotřeba paliva na jednu cestu lodí z Prahy do Pekingu vychází z předcházejícího výpočtu na 4 606 625 l paliva.

Výpočet celkové ceny spotřebovaného paliva na jednu cestu

$$c = s_c \cdot pc = 4\,606\,625 \cdot 24,6 = 113\,322\,975 \text{ Kč} \quad (5.21)$$

kde:  $s_c$  je celková spotřeba (l)

$pc$  je průměrná cena paliva (Kč)

Celková cena za palivo na jednu cestu vychází na 113 322 975 Kč. Zdá se to být ohromující částka, ale na následujícím výpočtu je vypočítána cena za převoz 1 t zboží.

Výpočet ceny paliva na přepravu 1 t zboží při plném vytížení lodě

$$c_t = \frac{c}{m} = \frac{113\,322\,975}{334\,400} = 339 \text{ Kč/t} \quad (5.22)$$

kde:  $c$  je celková cena paliva (Kč)

$m$  je hmotnost nákladu (t)

U námořní dopravy vychází cena převezené tuny zboží při plném vytížení největší přepravní lodi na světě na 339 Kč.

## 5.4 Shrnutí

V této kapitole je proveden návrh energetické náročnosti vysokorychlostního vozidla pro přepravu zboží, který se liší od vysokorychlostního vozidla pro přepravu osob. Dále je zde jednoduchý návrh energetické náročnosti letecké nákladní dopravy a námořní dopravy zboží.

## 6 POROVNÁNÍ ŽELEZNIČNÍ, LETECKÉ A NÁMOŘNÍ PŘEPRAVY ZBOŽÍ

### 6.1 Porovnání všech druhů doprav z časového hlediska

Pro spojení kontinentů je důležitý i přísun zboží z jednoho kontinentu na druhý. V předcházející kapitole byly spočítány parametry pro různé druhy dopravy pro převoz nákladů.

Právě, že se jedná o různé druhy přepravy zboží, bude u nich i jiná cestovní rychlost. Nejrychlejší bude letecká přeprava zboží, za ní by měla na druhém místě figurovat železnice a nejpomalejší způsob převozu zboží je po moři. Letecká nákladní doprava má přepravní rychlost 850 km/h, vysokorychlostní železniční přeprava zboží má přepravní rychlost 250 km/h a námořní doprava má přepravní rychlost 47 km/h. V následující tabulce 6.1 a jsou uvedeny dopravní vzdálenosti jednotlivých druhů dopravy, časy pro překonání trasy Praha – Peking a přepravní rychlosti.

Tab. 6.1 Časy pro přepravu osob různými druhy dopravy

	cestovní rychlost (km/h)	vzdálenost (km)	čas (h)
nákladní let Praha - Peking	850	7 431	8:44
vysokorychlostní železnice Praha - Peking	250	10 006	40:01
námořní doprava Praha - Peking	47	21 071,5	448:20

Výpočet času dopravy

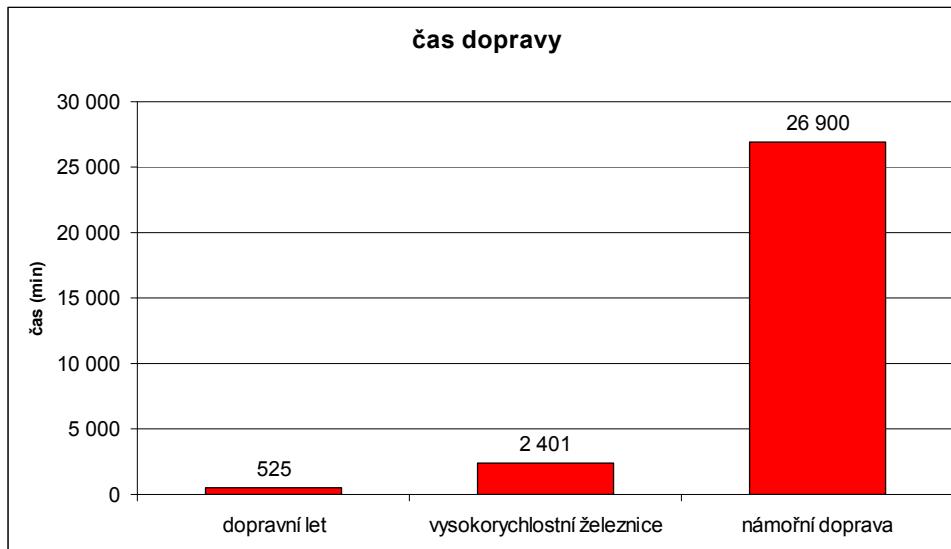
$$t = \frac{s}{v} \quad (6.1)$$

kde: s je celková dráha (km)

v je cestovní rychlost (km/h)

t je čas dopravy (min)

Z předcházející tabulky jsou vidět časy na přepravu zboží z Prahy do Pekingů různými druhy dopravy.



Graf 6.1 Čas dopravy bez započítání vlivu dalších dob na přepravu

Z grafu 6.1 je vidět markantní rozdíl mezi dobou přepravy zboží jednotlivými druhy dopravy. Nejrychlejší, ale jak bude dále vidět i nejdražší (z hlediska energie) je letecká nákladní doprava a nejpomalejší (asi 50x oproti letecké dopravě) a zároveň nejlevnější je námořní doprava.

## 6.2 Porovnání všech druhů doprav z energetického a cenového hlediska

V tabulce je 6.2 je uvedena spotřeba jednotlivých druhů doprav. Letecká a námořní doprava je udána v litrech paliva spotřebovaných na cestu a železniční doprava je udána v kWh spotřebovaných na celou cestu při rychlosti 250 km/h.

Tab. 6.2 Spotřeba

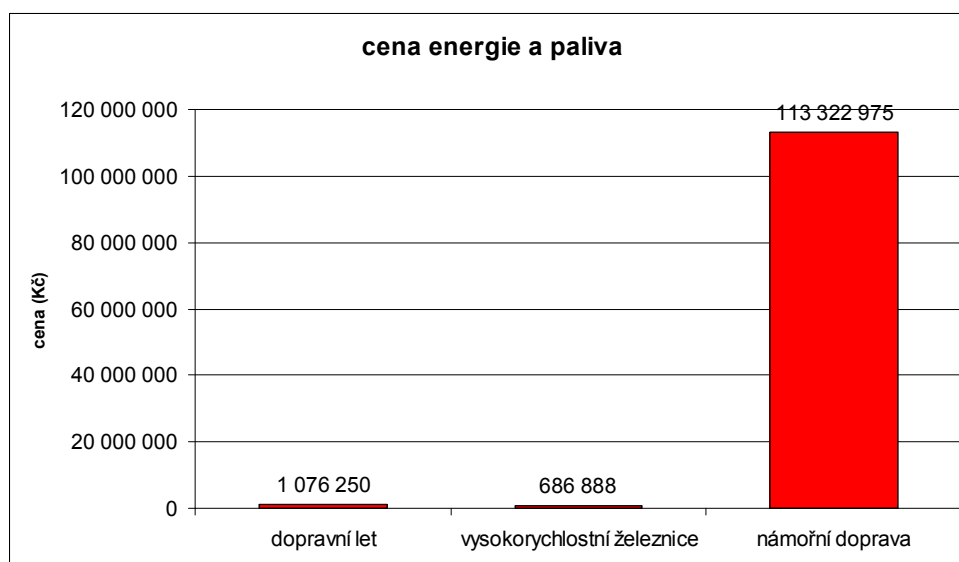
	spotřeba
nákladní let Praha - Peking	43 750 l
vysokorychlostní železnice Praha - Peking	312 222 kWh
námořní doprava Praha - Peking	4 606 625 l

Předcházející tabulka není přímo vypovídající. Ukazuje pouze spotřebu jednotlivých druhů dopravy. V následující tabulce 6.3 a grafu 6.2 je tato spotřeba vyčíslena penězi. U železniční dopravy je průměrná cena za 1 kWh 2,2 Kč bez DPH a u letecké a námořní dopravy je cena za 1 litr paliva průměrně 24,6 Kč bez DPH.



Tab. 6.3 Cena za energii a palivo

	cena za energii a palivo (Kč)
nákladní let Praha - Peking	1 076 250
vysokorychlostní železnice Praha - Peking	686 888
námořní doprava Praha - Peking	113 322 975

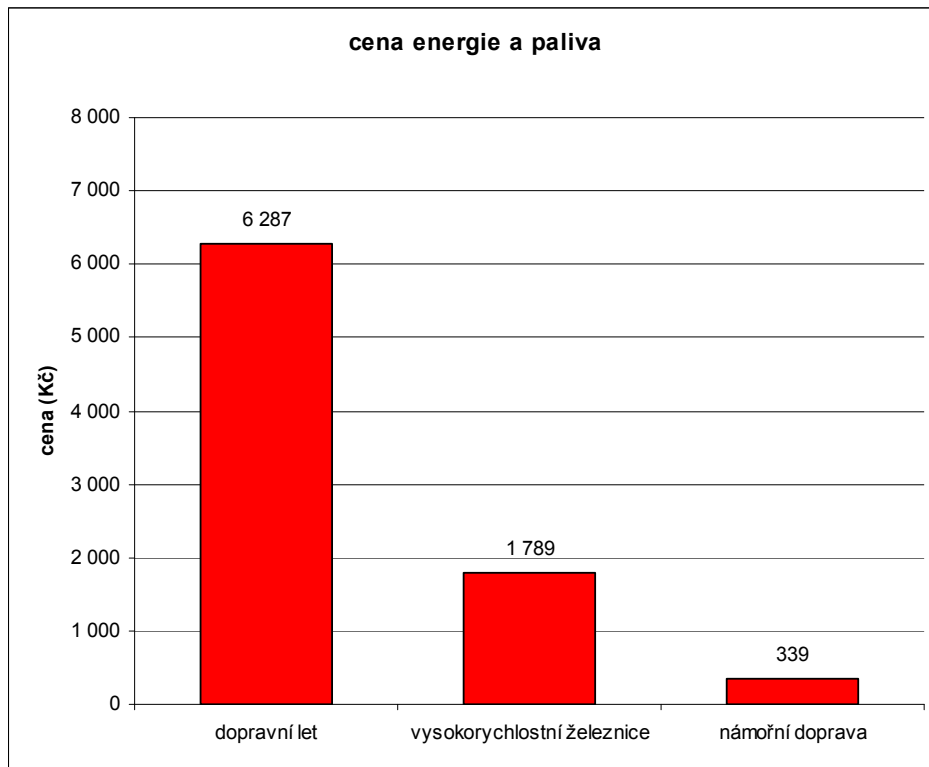


Graf 6.2 Cena energie a paliva na jednu cestu

Z předcházejícího grafu a tabulky je vidět celková cena jednotlivých druhů doprav. Předcházející graf není zcela vypovídající, jelikož to není cena za 1 t zboží, ale za jednu cestu plně naloženého dopravního prostředku. Přepočet na 1 t je uveden v tabulce 6.4.

Tab. 6.4 Cena za energii a palivo na jednoho cestujícího

	cena za energii a palivo na tunu (Kč)
nákladní let Praha - Peking	6 287
vysokorychlostní železnice Praha - Peking	1 789
námořní doprava Praha - Peking	339



Graf 6.3 Cena energie a paliva na jednu tunu zboží

Z grafu 6.3 vyplývá, že nejlevnějším druhem dopravy pro převoz zboží je námořní doprava, v těsné blízkosti je konvenční železnice a naopak nejdražším druhem přepravy zboží je letecká nákladní doprava. Vše je uvažováno při 100 % vytížení kapacity.

### 6.3 Shrnutí

V této kapitole došlo k porovnání letecké, železniční a námořní přepravy zboží jak z časového hlediska, tak i z hlediska ceny energie pro převoz 1 t zboží. Co se týče času, tak nejlépe vychází letecká přeprava, hned za ní je vysokorychlostní železniční přeprava a z daleka nejpomalejší je námořní doprava. Co se týče ceny, tak nejlevnější je námořní doprava, za ní je vysokorychlostní železnice a z daleka nejdražší dopravou pro převoz zboží je letecká doprava.

## 7 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA PARAMETRŮ ŽELEZNIČNÍ DOPRAVY OSOB

V následující kapitole je provedena analýza parametrů pro železniční dopravu osob. Spočívá v tom, že se budou měnit některé vstupní parametry a bude se sledovat změna spotřeby elektrické energie právě při změnách určitých vstupních parametrů.

### 7.1 Analýza při změnách rychlosti

Při této analýze bude měněna cestovní rychlost od 50 do 300 km/h a bude sledována změna odběru elektrické energie na přímé otevřené trati bez započítání vlivu rozjezdu, brzdění, stání ve stanicích a celková účinnost, jak pohonu, tak i pevných trakčních zařízení bude 100 %. Stejně jako u výpočtu parametrů vozidla je brána celková vzdálenost trasy 10 006 km. V tabulce 7.1 jsou uvedeny základní parametry vysokorychlostního vozidla, odvozené od kapitoly 3.2.

Tab. 7.1 Základní parametry vysokorychlostní jednotky pro výpočet spotřeby při změnách rychlosti

počet vozů	$p_{vv}$		16
celková hmotnost	$m_c$	t	979
měrná hmotnost vzduchu	$r_v$	kg/m <sup>3</sup>	1,2
měrný konstantní člen	$a_k$	N/kN	1,0
tunelový faktor	$t_f$		1
činitel tvaru čelního vozu	$\lambda_{tp}$		0,3
činitel tvaru vloženého vozu	$\lambda_{tv}$		0,08
činitel tvaru posledního vozu	$\lambda_{tpv}$		0,2
čelní plocha	S	m <sup>2</sup>	11,5
měrný lineární člen v obsazeném stavu	$a_{los}$	N/kN/(km/h)	0
celková účinnost	$\eta_c$	%	100
střední vedlejší příkon jednoho vozu na sběrači vozidla	$P_v$	kW	30
celková dráha	l	km	10 006

V předcházející tabulce jsou uvedeny základní parametry, které poslouží pro zjednodušený výpočet spotřeby elektrické energie. Na následujících vzorcích je uveden výpočet celkového jízdního odporu v obsazeném stavu vozidla.

Výpočet činitele tvaru

$$\lambda_{tc} = \lambda_{tp} + \lambda_{tv} \cdot (p_{vv} - 2) + \lambda_{tpv} = 0,3 + 0,08 \cdot (16 - 2) + 0,2 = 1,62 \quad (7.1)$$

kde:  $\lambda_{tp}$  je činitel tvaru čelního vozu

$\lambda_{tv}$  činitel tvaru vloženého vozu

$p_{vv}$  počet vozů celkem

$\lambda_{tpv}$  činitel tvaru posledního vozu

Z předcházejícího vzorce vyjde ještě konstantní parametr, který se v této analýze nebude měnit.

Výpočet absolutního kvadratického členu

$$a_{kv} = 0,5 \cdot r_v \cdot \lambda_{tc} \cdot t_f \cdot \frac{S}{3,6^2} = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,62 \cdot 1 \cdot \frac{11,5}{3,6^2} = 0,86 \text{ N}/(\text{km}/\text{h})^2 \quad (7.2)$$

kde:  $r_v$  je měrná hmotnost vzduchu

$\lambda_{tc}$  činitel tvaru celkem

$S$  čelní plocha

$t_f$  tunelový faktor

Tento právě spočtený parametr také bude konstantní, je to vidět ze vzorce, jelikož v něm nefiguruje rychlost.

Výpočet měrného kvadratického členu v obsazeném stavu

$$a_{kos} = \frac{a_{kv}}{9,81 \cdot m_c} = \frac{0,86}{9,81 \cdot 979} = 0,00009 \text{ N}/\text{kN}/(\text{km}/\text{h}^2) \quad (7.3)$$

kde:  $a_{kv}$  je absolutní kvadratický člen

$m_c$  celková hmotnost

Ani v tomto případě nefiguruje ve výpočtu rychlost, tudíž parametr je konstantní.

Výpočet měrného jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_m = a_k + a_{los} \cdot v + a_{kos} \cdot v^2 = 1 + 0,00009 v^2 \quad (7.4)$$

kde:  $a_k$  je měrný konstantní člen (N/(km/h)<sup>2</sup>)  
 $a_{los}$  je měrný lineární člen v obsazeném stavu (N/(km/h))  
 $a_{kos}$  je měrný kvadratický člen v obsazeném stavu (N/(km/h))  
 $v$  je rychlost (km/h)

V tomto výpočtu figuruje rychlost, takže tento parametr se bude měnit a vypočtené hodnoty jsou vidět v tabulce 7.2.

V závislosti na měrném jízdním odporu v obsazeném stavu (tudíž v závislosti na rychlosti) se mění absolutní jízdní odpor v obsazeném stavu. Vypočtené hodnoty jsou také vidět v tabulce 7.2.

Výpočet absolutního jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_{abs} = \frac{F_m \cdot m_c \cdot 9,81}{1000} \quad (7.5)$$

kde:  $F_m$  je měrný jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)  
 $m_c$  je celková hmotnost (t)

Tab. 7.2 Vypočtené jízdní odpory

rychlost	km/h	0	50	100	150	200	250	300	350	0
měrný jízdní odpor v obsazeném stavu	N/kN	1	1,22	1,90	3,02	4,59	6,61	9,08	12	1
absolutní jízdní odpor v obsazeném stavu	kN	9,6	11,8	18,2	29,0	44,1	63,5	87,2	115,3	9,6

Nyní lze již jednoduše vypočítat spotřebu elektrické energie na jízdu vozidla na celé dráze.

$$A = \frac{F_{abs} \cdot l}{3,6 \cdot \eta_c} \quad (7.6)$$

kde:  $F_{abs}$  je celkový jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)  
 $\eta_c$  je celková účinnost (%)  
 $l$  je celková dráha (km)

Výpočet vedlejší spotřeby vozů v obsazeném stavu (kWh)

$$A_v = \frac{p_{vv} \cdot P_v \cdot l}{v} \quad (7.7)$$

kde:  $p_{vv}$  je počet vozů

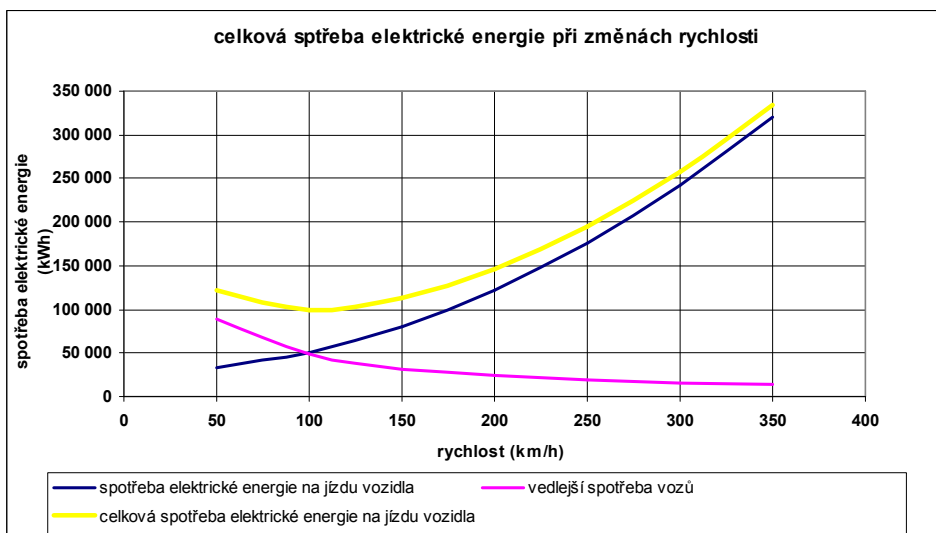
$l$  je celková dráha (km)

$v$  je rychlost vozidla (km/h)

$P_v$  je střední vedlejší příkon jednoho vozu (kWh)

Tab. 7.3 Celková spotřeba elektrické energie v závislosti na rychlosti vozidla

rychlost	km/h	50	100	150	200	250	300	350
vedlejší spotřeba elektrické energie	kWh	88 942	48 029	32 019	24 014	19 212	16 010	13 723
spotřeba elektrické energie na jízdu	kWh	32 692	50 672	80 638	122 590	176 529	242 454	320 365
celková spotřeba elektrické energie	kWh	121 635	98 701	112 657	146 604	195 740	258 463	334 087



Graf 7.1 Závislost spotřeby elektrické energie na rychlosti vozidla

V předešlé tabulce 7.3 a grafu 7.1 je vidět, že celková spotřeba elektrické energie roste kvadraticky v závislosti na rychlosti. Vychází to z výpočtu měrného jízdního odporu, kde se počítá z druhou mocninou rychlosti v závislosti na aerodynamickém odporu. Také je z grafu vidět, že celková spotřeba elektrické energie výrazně závisí na vedlejší spotřebě vozů (čím vyšší rychlost vlaku, tím nižší spotřeba vozů a naopak).

## 7.2 Analýza při změnách hmotnosti

Při této analýze bude měněna hmotnost jednotky od 900 do 1100 t a bude sledována změna odběru elektrické energie na přímé otevřené trati bez započítání vlivu rozjezdu, brzdění, stání ve stanicích, vedlejší spotřeby vozů a celková účinnost, jak pohonu, tak i pevných trakčních zařízení bude 100 %. Stejně jako u výpočtu

parametrů vozidla je brána celková vzdálenost trasy 10 006 km, rychlost vozidla je 300 km/h, základní parametry pro výpočet jsou shodné s kapitolou 7.1., odvozené od kapitoly 3.2.

Výpočet činitele tvaru

$$\lambda_{tc} = \lambda_{tp} + \lambda_{tv} \cdot (p_{vv} - 2) + \lambda_{tpv} = 0,3 + 0,08 \cdot (16 - 2) + 0,2 = 1,62 \quad (7.8)$$

kde:  $\lambda_{tp}$  je činitel tvaru čelního vozu

$\lambda_{tv}$  činitel tvaru vloženého vozu

$p_{vv}$  počet vozů celkem

$\lambda_{tpv}$  činitel tvaru posledního vozu

Z předcházejícího vzorce vyjde ještě konstantní parametr, který se v této analýze nebude měnit.

Výpočet absolutního kvadratického členu

$$a_{kv} = 0,5 \cdot r_v \cdot \lambda_{tc} \cdot t_f \cdot \frac{S}{3,6^2} = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,62 \cdot 1 \cdot \frac{11,5}{3,6^2} = 0,86 \text{ N}/(\text{km}/\text{h})^2 \quad (7.9)$$

kde:  $r_v$  je měrná hmotnost vzduchu

$\lambda_{tc}$  činitel tvaru celkem

$s$  čelní plocha

$t_f$  tunelový faktor

Tento právě spočtený parametr také bude konstantní, je to vidět ze vzorce, jelikož v něm nefiguruje rychlost.

Výpočet měrného kvadratického členu v obsazeném stavu

$$a_{kos} = \frac{a_{kv}}{9,81 \cdot m_c} \quad (7.10)$$

kde:  $a_{kv}$  je absolutní kvadratický člen

$m_c$  celková hmotnost

V tomto případě nebude již parametr konstantní, jelikož ve výpočtu se nachází celková hmotnost vozidla. Vypočtený měrný kvadratický v obsazeném stavu je v tabulce 7.4.

Tab. 7.4 Měrný kvadratický člen v obsazeném stavu

hmotnost	t	900	940	980	1 020	1 060	1 100
měrný kvadratický člen v obsazeném stavu	N/kN/(km/h) <sup>2</sup>	0,0001	0,00009	0,00009	0,00009	0,00008	0,00008

Výpočet měrného jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_m = a_k + a_{los} \cdot v + a_{kos} \cdot v^2 \quad (7.11)$$

kde:  $a_k$  je měrný konstantní člen (N/(km/h)<sup>2</sup>)

$a_{los}$  je měrný lineární člen v obsazeném stavu (N/(km/h))

$a_{kos}$  je měrný kvadratický člen v obsazeném stavu (N/(km/h)<sup>2</sup>)

$v$  je rychlost (km/h)

Výpočet absolutního jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_{abs} = \frac{F_m \cdot m_c \cdot 9,81}{1000} \quad (7.12)$$

kde:  $F_m$  je měrný jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)

$m_c$  je celková hmotnost (t)

Tab. 7.5 Vypočtené jízdní odpory

hmotnost	t	900	940	980	1020	1060	1100
měrný jízdní odpor v obsazeném stavu	N/kN	7,1	6,8	6,6	6,4	6,2	6,0
absolutní jízdní odpor v obsazeném stavu	kN	68,3	65,8	63,5	61,4	59,4	57,6

V předcházející tabulce 7.5 je názorně vidět, že při konstantní rychlosti se při zvyšující hmotnosti mění absolutní jízdní odpor směrem dolů. Při nízké hmotnosti je vysoký jízdní odpor a naopak.

Nyní lze již jednoduše vypočítat celkovou spotřebu elektrické energie na jízdu vozidla na celé dráze.

$$A = \frac{F_{abs} \cdot l}{3,6 \cdot \eta_c} \quad (7.13)$$

kde:  $F_{abs}$  je celkový jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)

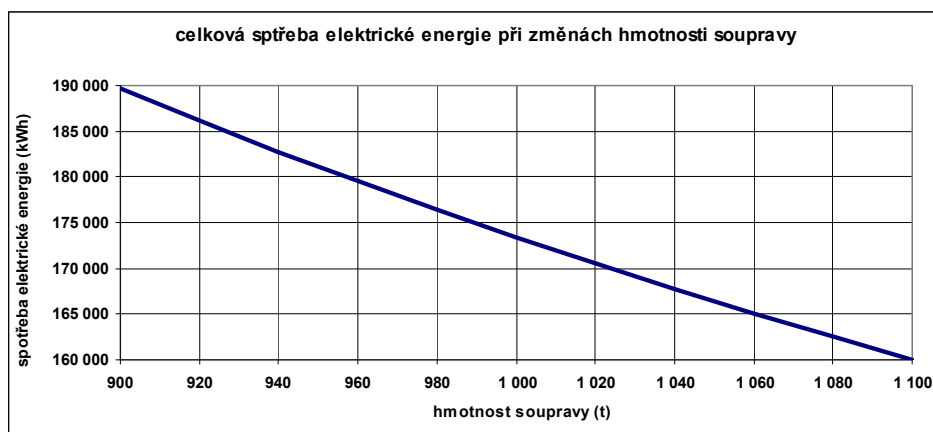
$\eta_c$  je celková účinnost (%)

$l$  je celková dráha (km)



Tab. 7.6 Celková spotřeba elektrické energie v závislosti na hmotnosti vozidla

hmotnost	t	900	940	980	1020	1060	1100
celková spotřeba elektrické energie	kWh	189 714	182 777	176 406	170 535	165 108	160 075



Graf 7.2 Závislost spotřeby elektrické energie na hmotnosti vozidla

V předešlé tabulce 7.6 a grafu 7.2 je vidět, že celková spotřeba elektrické energie klesá s rostoucí hmotností soupravy. Je to z důvodu, že při nízkých hmotnostech soupravy se daleko více projeví jízdní odpor vozidla.

### 7.3 Analýza při změnách činitele tvaru čelního vozu

Při této analýze bude měněn činitel tvaru čelního vozu od 0,2 do 0,4 a bude sledována změna odběru elektrické energie na přímé otevřené trati bez započítání vlivu rozjezdu, brzdění, stání ve stanicích, vedlejší spotřeby vozů a celková účinnost, jak pohonu, tak i pevných trakčních zařízení bude 100 %. Stejně jako u výpočtu parametrů vozidla je brána celková vzdálenost trasy 10 006 km, základní parametry jsou shodné s kapitolou 7.1., odvozené od kapitoly 3.1.

Již v tomto prvním vzorci se mění základní parametr, který je v této analýze uvažován. Vše je vidět v tabulce 7.7.

Výpočet činitele tvaru

$$\lambda_{ic} = \lambda_{tp} + \lambda_{tv} \cdot (p_{vv} - 2) + \lambda_{tpv} \quad (7.14)$$

kde:  $\lambda_{tp}$  je činitel tvaru čelního vozu

$\lambda_{tv}$  činitel tvaru vloženého vozu

$p_{vv}$  počet vozů celkem

$\lambda_{tpv}$  činitel tvaru posledního vozu

Výpočet absolutního kvadratického členu

$$a_{kv} = 0,5 \cdot r_v \cdot \lambda_{tc} \cdot t_f \cdot \frac{S}{3,6^2} \quad (7.15)$$

kde:  $r_v$  je měrná hmotnost vzduchu

$\lambda_{tc}$  činitel tvaru celkem

$S$  čelní plocha

$t_f$  tunelový faktor

Výpočet měrného kvadratického členu v obsazeném stavu

$$a_{kos} = \frac{a_{kv}}{9,81 \cdot m_c} \quad (7.16)$$

kde:  $a_{kv}$  je absolutní kvadratický člen

$m_c$  celková hmotnost

Výpočet měrného jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_m = a_k + a_{los} \cdot v + a_{kos} \cdot v^2 \quad (7.17)$$

kde:  $a_k$  je měrný konstantní člen ( $\text{N}/(\text{km}/\text{h})^2$ )

$a_{los}$  je měrný lineární člen v obsazeném stavu ( $\text{N}/(\text{km}/\text{h})$ )

$a_{kos}$  je měrný kvadratický člen v obsazeném stavu ( $\text{N}/(\text{km}/\text{h})^2$ )

$v$  je rychlost ( $\text{km}/\text{h}$ )

Výpočet absolutního jízdního odporu v obsazeném stavu

$$F_{abs} = \frac{F_m \cdot m_c \cdot 9,81}{1000} \quad (7.18)$$

kde:  $F_m$  je měrný jízdní odpor v obsazeném stavu ( $\text{N}/\text{kN}$ )

$m_c$  je celková hmotnost ( $\text{t}$ )

Nyní lze již jednoduše vypočítat celkovou spotřebu elektrické energie na jízdu vozidla na celé dráze.

$$A = \frac{F_{abs} \cdot l}{3,6 \cdot \eta_c} \quad (7.19)$$

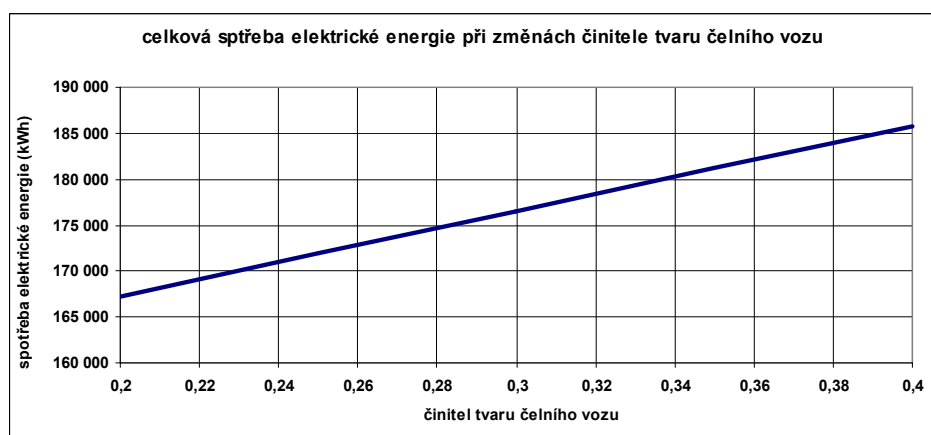
kde:  $F_{abs}$  je celkový jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)

$\eta_c$  je celková účinnost (%)

$l$  je celková dráha (km)

Tab. 7.7 Vypočtené parametry a celková spotřeba elektrické energie v závislosti na činiteli tvaru čelního vozidla

činitel tvaru čelního vozu		0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
činitel tvaru celkem		1,52	1,57	1,62	1,67	1,72
absolutní kvadratický člen	$N/(km/h)^2$	0,81	0,84	0,86	0,89	0,92
měrný kvadratický člen v obsazeném stavu	$N/kN/(km/h)^2$	0,000084	0,000087	0,000090	0,000093	0,000095
měrný jízdní odpor v obsazeném stavu	N/kN	6,27	6,44	6,61	6,78	6,96
absolutní jízdní odpor v obsazeném stavu	kN	60,2	61,8	63,5	65,2	66,8
celková spotřeba elektrické energie	kWh	167 280	171 904	176 529	181 153	185 777



Graf 7.3 Závislost spotřeby elektrické energie na činiteli tvaru čelního vozidla

Z tabulky 7.7 a grafu 7.3 je vidět, že při stejné hmotnosti jednotky a stále rychlosti jednotky, by se musel činitel tvaru čelního vozidla, tedy aerodynamický odpor čelního vozidla markantně zlepšit nebo zhoršit, aby to mělo výrazný vliv na spotřebu elektrické energie při konstantní rychlosti.

## 7.4 Shrnutí

V předcházející kapitole je provedena citlivostní analýza parametrů pro železniční dopravu s ohledem na energetiku vozby. Analýza se zabývá tím, jak se změní spotřeba při změně různých parametru vozidla. Měněnými parametry jsou hmotnost vozidla, rychlost vozidla a činitel tvaru čelního vozu.

## **8 NAPÁJENÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ ŽELEZNIČNÍ TRATĚ**

Železniční napájecí soustava nebo také trakční soustava se skládá z mnoha technických zařízení, které slouží k přenosu elektrické energie z rozvodné sítě směrem na sběrač vozidla, a proto je napájecí soustava nedílnou součástí dopravní cesty elektrifikovaných železnic.

### **8.1 Historie elektrické trakce**

Koncem 19. století se v různých společnostech a různých státech začala rozvíjet elektrifikace železnic. Vznikalo mnoho pokusů o různé napájecí systémy, zjednodušeně se dá říci, že každá společnost rozvíjela svůj vlastní napájecí systém.

V Rakousku - Uhersku a také na světě byla jednou s prvních elektrifikovaných tratí trať Tábor – Bechyně v roce 1903. Její elektrifikaci navrhl F. Křížík, který již o dva roky dříve uvedl do provozu dvounápravový tramvajový vůz v Praze na úseku Modřany – Zbraslav, který byl napájen akumulátory. V následujících letech elektrifikace železnic zaznamenala veliký rozmach, ale byla zbrzděna první světovou válkou.

Některé evropské státy přistoupily k elektrifikaci železnic mezi první a druhou světovou válkou. Nedošlo mezi nimi však k žádné dohodě, tudíž vznikly různé napájecí systémy, 1,5 kV stejnosměrných, 3 kV stejnosměrné, 15 kV 16,7 Hz střídavých, 25 kV a 50 Hz střídavých.

Velký rozvoj elektrifikace nastal až po skončení druhé světové války a to s rozvojem polovodičové techniky a elektrotechniky vůbec. Po rozmachu polovodičové techniky již nebyl problém zvládnout napájecí napětí s průmyslovým kmitočtem 50 Hz. Tento předpoklad vedl k obrovskému nástupu elektrifikace po celém světě a zejména pak v Evropě. Ale v poslední době s rozvojem moderních železničních vozidel a také s obrovským nástupem vysokorychlostních tratí a vlaků se ukazuje, že některé systémy jsou výhodnější a některé již energeticky nestačí a tudíž se téměř nepokračuje s jejich vývojem a modernizací a jsou postupně nahrazovány jinými výhodnějšími systémy.

### **8.2 Napájecí systém 3 kV stejnosměrné**

První zem, kde se tato soustava začala více rozvíjet, byla Itálie koncem 20. let dvacátého století. Po dobrých zkušenostech se tato soustava rozšířila i do dalších zemí, i když to sebou neslo mnoho obtíží. Jedním z mnoha problémů bylo například trvalé řazení dvou trakčních stejnosměrných motorů do série, jelikož trakční stejnosměrný motor nezvládl vyšší napětí nežli 1 500 V stejnosměrných, což je dáno

počtem lamel na komutátoru a jeho možným průměrem.

V dnešní době se již u moderních vysokorychlostních tratí neprovádí jejich elektrifikace touto stejnosměrnou soustavou a to převážně z důvodu jeho hranice přenosu energie na sběrač vozidla. Tudíž pro navrhovanou vysokorychlostní trať není tento systém napájení vhodný a již dále nebude uvažován.

#### **Výhody soustavy 3 kV stejnosměrné**

- ▲ Jednoduchá konstrukce vozidel (bez transformátoru)
- ▲ Měničny mohou být dále od sebe, než u systému 1,5 kV stejnosměrných

#### **Nevýhody soustavy 3 kV stejnosměrné**

- ▲ Ještě dnes občas používaná odporová regulace rozjezdu vozidel
- ▲ Obtížnější zhášení elektrického oblouku
- ▲ Omezení výkonu, který je tato soustava schopna převést přes sběrač na vozidlo
- ▲ Zabezpečení okolí trati proti bludným proudům
- ▲ Větší průřez trolejového drátu
- ▲ Velké úbytky napětí (malá vzdálenost měření oproti střídavým systémům)
- ▲ Obtížná možnost rekuperace do distribuční sítě
- ▲ Nutnost řazení dvou motorů na jednom podvozku trvale v sérii, protože jeden sériový trakční motor není schopen zvládnout takovéto napětí

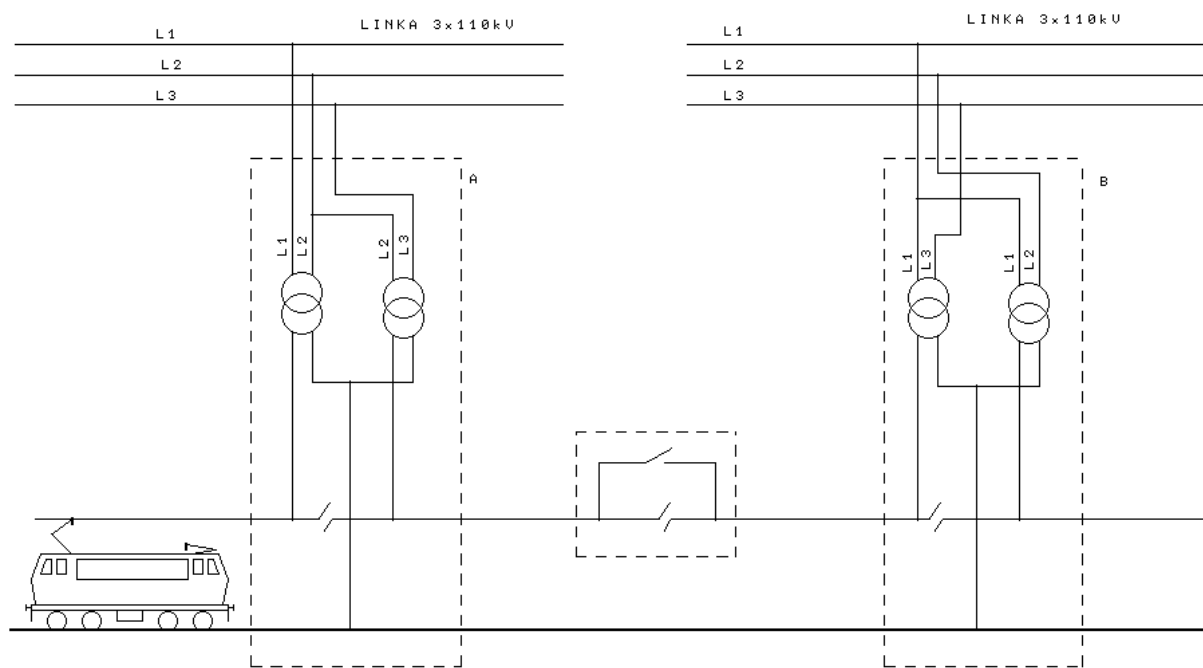
### **8.3 Napájecí systém 25 kV, 50 Hz**

První jednofázová soustava 25 kV 50 Hz se objevila na počátku 30. let 20. století v Maďarsku. Tento systém oproti jiným má výhody v tom, že se nemusí budovat měničny ani zvláštní napájecí síť. Trolejové napětí bylo získáno pouze transformací z všeobecné elektrorozvodné sítě.

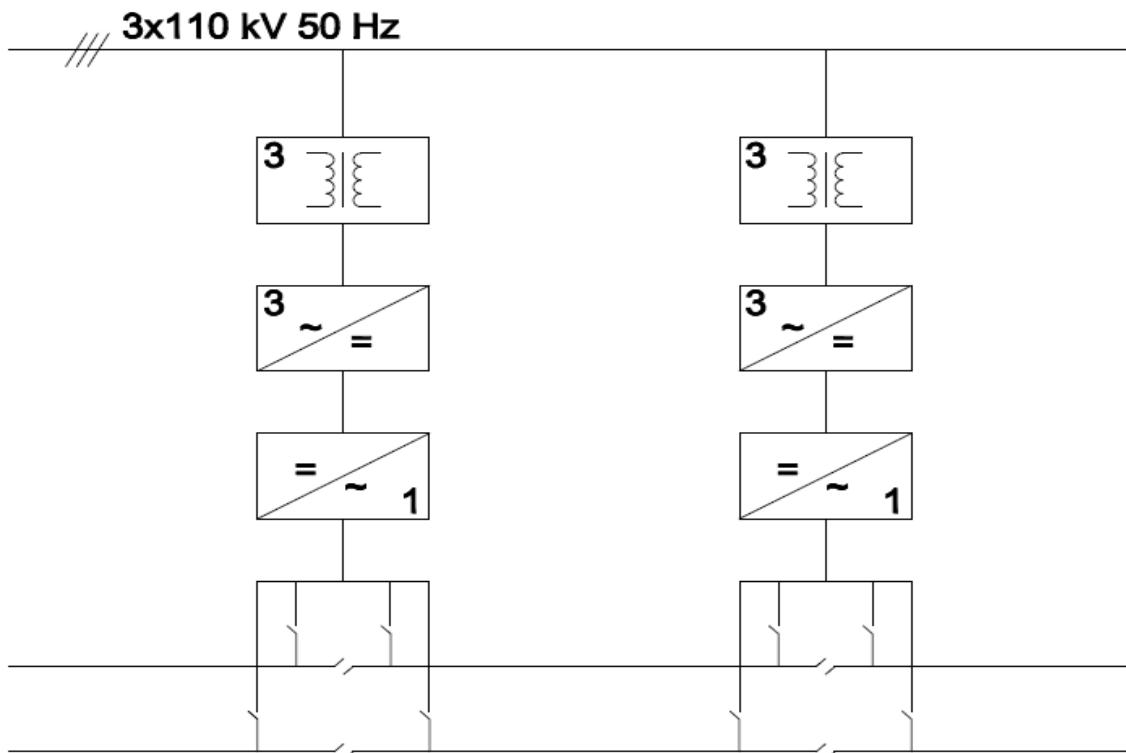
Největší rozmach této napájecí soustavy nastal v 60. letech 20. století s významným rozvojem polovodičové techniky.

V dnešní době je tento systém základním systémem pro vysokorychlostní železnice. Výhodou tohoto systému je napájení z distribuční sítě 3x110 kV 50 Hz. Ale má i některá úskalí, velký reaktanční úbytek (velké  $\omega L$ ), jednostranné napájení, nesymetrické zatížení třífázové soustavy, přerušované napájení vozidel (z důvodu střídání fází). Všechny tyto nevýhody rostou se zvyšující se rychlostí.

Ale v dnešní době tyto nevýhody jsou řešeny, minimalizací odebíraného proudu (zlepšováním aerodynamiky a účinníku), zmenšením impedance (zmenšení průřezu trolejového drátu, nosného lana a zpětného vedení, dále zpětný proud by měl procházet zpětným vedením, ne zemí a ne kolejnicemi, protože tím se sníží reaktance). Jednostranné napájení lze řešit měničovým zapojením, které jsou schopné vytvořit stoprocentně stejné podmínky na výstupu trakčních měničů, tudíž v trolejovém drátu netečou žádné vyrovnávací proudy a je tedy možnost realizace dvoustranného napájení úseku, které významně prodlouží napájené úseky. Dále měničové zapojení umožňuje symetrické zatížení všech tří fází u distribuční sítě, to umožňuje provoz bez přerušování napájení (není nutné vystřídání fází). V České republice je nejčastěji používané jednostranné napájení zapojené do V (obr. 8.1). Koncepte měničové napájecí stanice, která by mohla být použita je na obr. 8.2.



Obr. 8.1 Napájecí stanice 25 kV 50 Hz, zapojená do V



Obr. 8.2 Měničová napájecí stanice

### Výhody soustavy 25 kV 50 Hz

	Jednoduché transformovny	Měničové napájecí stanice
Jednoduchost napájecích stanic	ano	ne
Menší průřez trolejového drátu	ano	ano
Větší odstup napájecích stanic	ano	ano
Nemusí se budovat měnírny	ano	ne
Malé ztráty při přenosu výkonu	ano	ano
Odpadá problém s regulací otáček a výkonu	ano	ano
Možnost dvoustranného napájení	ne	ano
Rekuperace do distribuční sítě	ano	ano

### Nevýhody soustavy 25 kV 50 Hz

	Jednoduché transformovny	Měničové napájecí stanice
Závislost na celostátní energetické síti	ano	ano
Přerušované napájení vozidel	ano	ne
Nesouměrné zatížení distribuční sítě	ano	ne

Při starší zvolené koncepci lokomotiv nutnost  
kompenzace účiníku a filtrace harmonických                      ano                      ne

## 8.4 Napájecí systém 15 kV, 16,7 Hz

Jelikož pro střídavé napětí byla použita frekvence 50 Hz, nebyly první pokusy napájet trakční motor úspěšné. První jednofázový komutátorový trakční motor při frekvenci 50 Hz měl problémy s komutací, neboť do komutující cívky rotoru se transformovalo napětí ze statoru (časově proměnné pole hlavních pólů). Proto byl v některých zemích zaveden vlastní systém pro výrobu a rozvod jednofázové energie, která již nepoužívala frekvenci 50 Hz, ale nižší, 16,7 Hz. Tato síť byla rozšířena v Německu, Rakousku, Švýcarsku a v některých státech severní Evropy. V poslední době jsou zaváděny statické měniče 50 Hz na 16,7 Hz, čímž odpadá potřeba vyrábět a rozvádět jednofázovou elektrickou energii 15 kV, 16,7 Hz.

### Výhody soustavy 15 kV, 16,7 Hz

- ▲ Třetinová induktivní reaktance na trakčním vedení (menší reaktanční úbytek)
- ▲ Tato soustava umožňuje dvoustranné napájení bez změny fáze
- ▲ Dráha může být energeticky nezávislá na celostátní síti

### Nevýhody soustavy 15 kV, 16,7 Hz

- ▲ Systém je zavedený je v malém počtu zemí
- ▲ Nižší napájecí napětí (oproti 25 kV 50 Hz)
- ▲ Vyšší zkratové proudy (oproti 25 kV 50 Hz)

## 8.5 Parametry trakčního vedení pro napájení vysokorychlostních železnic

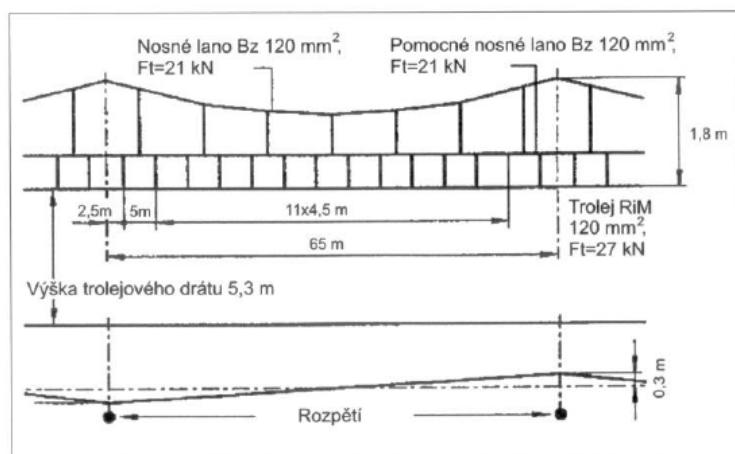
Z předcházejících kapitol je patrné, že pro vysokorychlostní tratě se nehodí veškeré napájecí systémy, požadavky na napájení jsou schopnost dodat vysoký výkon s vysokou účinností, dále schopnost dobrého kontaktu trolej - sběrač (neodskakuje), spojité napájení, možnost rekuperace i do distribuční sítě a příznivé účinky na distribuční síť.

Pro tyto požadavky nevyhovuje napájení 3 kV stejnosměrné, jelikož vede k velkým proudům, velkým úbytkům napětí a těžkému sběrači (odskakuje).



Požadavky vedou k velkému napětí (15 nebo 25 kV), to znamená snížení proudů tekoucích trakčním vedením, malé úbytky napětí na trakčním vedení, a také lehký sběrač (menší možnost odskoku).

Dříve než budou provedeny analýzy těchto napájecích systémů, je potřeba stanovit parametry vedení, kterými jsou například průřez trolejového drátu, průřez nosného lana a další. Sestava trakčního vedení je RE 330 H (obrázek 8.3), která byla vyvinuta ve spolupráci společností ABB, AEG, SIEMENS a DB v Německu a je určena pro vysokorychlostní tratě s rychlostmi až přes 330 km/h. Základními požadavky na tuto síť je spolehlivý odběr elektrické energie při současném použití dvou sběračů při rychlosti 300 km/h a vyšší, další podmínkou jsou co nejnižší celková impedance (malý odpor a indukčnost, odsávací vedení), přesná statická geometrická poloha, přesná dynamická geometrická poloha (velká a stálá svislá tuhost), co nejnižší investiční náklady a náklady na údržbu. Tato sestava trakčního vedení je dimenzována tak, aby byl možný odběr elektrického proudu až 2 000 A, což je pro tuto vysokorychlostní trať dostačující. Maximální rychlost v této soustavě může teoreticky dosahovat hodnot až 380 km/h.



Obr. 8.3 Sestava trakčního vedení RE 330 H

## 8.6 Napájení systémem 25 kV 50 Hz

Následující výpočty ukáží parametry napájecího systému 25 kV a 50 Hz pro jednostranné napájení, dvoustranné napájení a napájení s více odběry v jednom úseku, které jsou omezeny zabezpečovací technikou vycházející z kapitoly 3.4 (následná jízda vlaků je možná až po 222 sekundách). V následující tabulce 8.1 jsou uvedeny základní parametry sestavy trakčního vedení RE 330 H pro napájení 25 kV 50 Hz. Ještě je potřeba zdůraznit, že trakční vedení je složeno z trolejového drátu (legovaná měď), nosného lana (bronz), zesilovacího a zpětného lana (hliník – železo) a parametry v tabulce jsou buďto změřené nebo vycházejí ze zkušenosti

s vysokorychlostními tratěmi. Tato tabulka a následující výpočty budou platit pro veškeré následující kapitoly, kde bude pracováno a počítáno s napájecím napětím 25 kV a 50 Hz.

Tab. 8.1 Základní parametry sestavy trakčního vedení

průřez trolejového drátu	$s_t$	$\text{mm}^2$	120
opotřebení trolejového drátu	$o_t$	%	0
měrný odpor trolejového drátu	$\rho_t$	$\text{ohm mm}^2/\text{m}$	0,024
průřez nosného lana	$s_n$	$\text{mm}^2$	120
měrný odpor nosného lana	$\rho_n$	$\text{ohm mm}^2/\text{m}$	0,025
průřez zesilovacího lana	$s_z$	$\text{mm}^2$	240
měrný odpor zesilovacího lana	$\rho_z$	$\text{ohm mm}^2/\text{m}$	0,028
gradient indukčnosti	$w_l$	$\text{mH/km}$	0,94
gradient odporu zpětného vedení	$w_{zv}$	$\text{ohm/km}$	0,056

Následující výpočty doplňují základní parametry trakčního vedení.

Výpočet gradientu odporu trolejového drátu.

$$w_t = \frac{\rho_t \cdot 1\,000 \cdot (100 - o_t)}{s_t \cdot 100} = 0,2 \text{ ohm} / \text{km} \quad (8.1)$$

kde:  $\rho_t$  je měrný odpor trolejového drátu z legované mědi ( $\text{ohm mm}^2/\text{m}$ )

$o_t$  je opotřebení trolejového drátu (%)

$s_t$  je průřez trolejového drátu ( $\text{mm}^2$ )

Výpočet gradientu odporu nosného lana.

$$w_n = \frac{\rho_n \cdot 1\,000}{s_n} = 0,208 \text{ ohm} / \text{km} \quad (8.2)$$

kde:  $\rho_n$  je měrný odpor nosného lana z bronzu ( $\text{ohm mm}^2/\text{m}$ )

$s_n$  je průřez nosného lana ( $\text{mm}^2$ )

Výpočet gradientu odporu zesilovacího lana.

$$w_z = \frac{\rho_z \cdot 1\,000}{s_z} = 0,117 \text{ ohm} / \text{km} \quad (8.3)$$

kde:  $\rho_n$  je měrný odpor zesilovacího lana z hliník - železo (ohm mm<sup>2</sup>/m)  
 $s_n$  je průřez zesilovacího lana (mm<sup>2</sup>)

Výpočet celkového gradientu odporu vrchního trakčního vedení.

$$w_c = \frac{w_t \cdot w_n \cdot w_z}{(w_t \cdot w_n) + (w_t \cdot w_z) + (w_z \cdot w_n)} = 0,054 \text{ ohm / km} \quad (8.4)$$

kde:  $w_t$  je gradientu odporu trolejového drátu (ohm/km)  
 $w_n$  je gradientu odporu nosného lana (ohm/km)  
 $w_z$  je gradientu odporu zesilovacího lana (ohm/km)

Výpočet celkového gradientu odporu.

$$R = w_c + w_{zv} = 0,11 \text{ ohm / km} \quad (8.5)$$

kde:  $w_c$  je celkový gradient odporu vrchního trakčního vedení (ohm/km)  
 $w_{zv}$  je gradient odporu zpětného vedení (ohm/km)

Výpočet gradientu reaktance.

$$X_l = \frac{2 \cdot \pi \cdot w_l \cdot f}{1000} = 0,295 \text{ ohm / km} \quad (8.6)$$

kde:  $w_l$  je gradient indukčnosti (ohm/km)  
 $f$  je napájecí frekvence (Hz)

Výpočet celkové impedance vedení.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_l^2} = 0,315 \text{ ohm / km} \quad (8.7)$$

kde:  $R$  je celkový gradient odporu (ohm/km)  
 $X_l$  je gradient reaktance (ohm/km)

Výpočet celkového účinníku vedení.

$$\cos \varphi_{ve} = \frac{R}{Z} = 0,35 \quad (8.8)$$

kde:  $R$  je celkový gradient odporu (ohm/km)

Z je celková impedance vedení (ohm/km)

V následující tabulce 8.2 jsou uvedeny základní parametry napájecího systému 25 kV 50 Hz, pro proud odebíraný vozidlem ve fázi s napětím.

Tab. 8.2 Základní parametry napájecího systému 25 kV 50 Hz

jmenovité napájecí napětí	$U_j$	V	25 000
relativní nárůst napětí	$r_{nn}$	%	10
horní mez napětí	$U_h$	V	27 500
rezerva pro kolísání sítě	$r$	%	5
relativní úbytek napětí	$r_{un}$	%	24
dolní mez napětí	$U_d$	V	19 000
rezerva pro vyšší odběr vlaku	$r_v$	%	10
frekvence	$f$	Hz	50

Výpočet nejvyššího provozního napětí.

$$U_{\max p} = \frac{U_h \cdot (100 - r)}{100} = 26\,125 \text{ V} \quad (8.9)$$

kde:  $U_h$  je horní mez napětí (V)  
 $r$  je rezerva pro kolísání sítě (%)

Výpočet nejnižšího provozního napětí.

$$U_{\min p} = \frac{U_d \cdot (100 + r_v)}{100} = 20\,900 \text{ V} \quad (8.10)$$

kde:  $U_d$  je dolní mez napětí (V)  
 $r_v$  je rezerva pro vyšší odběr vlaku (%)

Výpočet disponibilního úbytku napětí pomocí kosinové věty.

$$U_{\text{disp}} = -U_{\min p} \cdot \cos \varphi_{ve} + \sqrt{\left( (U_{\min p} \cdot \cos \varphi_{ve})^2 - (U_{\min p}^2 - U_{\max p}^2) \right)} = 9\,978 \text{ V} \quad (8.11)$$

kde:  $U_{\max p}$  je nejvyšší provozní napětí (V)  
 $\cos \varphi_{ve}$  je účinník vedení  
 $U_{\min p}$  je nejnižší provozní napětí (V)

## 8.6.1 Výpočet napájecích systémů

V této kapitole je uveden výpočet parametrů jednostranného napájení 25 kV 50 Hz pro jeden vlak v napájeném úseku, který jede konstantní rychlostí. Tento systém je zde rozebrán podrobně. Ostatní možnosti napájení (např. dvoustranné napájení nebo více vlaků v úseku) jsou uvedeny na konci této podkapitoly.

V následující tabulce 8.3 jsou uvedeny základní parametry vlaku v napájeném úseku.

Tab. 8.3 Základní parametry vlaku

rychlost jízdy	$v$	km/h	300
hmotnost	$m_c$	t	979,2
jízdní odpor - konstantní člen	$a_k$	N/kN	1
jízdní odpor - kvadratický člen	$a_{kos}$	N/kN/(km/h) <sup>2</sup>	0,00009
zrychlení	$a$	m/s <sup>2</sup>	0
součinitel rotačních hmot	$s_{ov}$		1,098
celková tažná síla	$F_{celk}$	kN	87
počet vozů	$p_{vv}$		16
vedlejší spotřeba jednoho vozu	$P_v$	kW	30
trakční výkon jmenovitý	$P_{jm}$	kW	17 600
účinnost vozidla	$\eta_v$	%	85
celková vedlejší spotřeba	$A_{vedl}$	kW	480
účinník	$\cos \varphi$		1,00

Výpočet měrného jízdního odporu v obsazeném stavu.

$$F_m = a_k + a_{los} \cdot v + a_{kos} \cdot v^2 = 1 + 0,00009 v^2 = 9,1 \text{ kN} \quad (8.12)$$

kde:  $a_k$  je měrný konstantní člen (N/(km/h)<sup>2</sup>)

$a_{los}$  je měrný lineární člen v obsazeném stavu (N/(km/h)<sup>2</sup>)

$v$  je rychlost (km/h)

$a_{kos}$  je měrný kvadratický člen v obsazeném stavu (N/(km/h)<sup>2</sup>)

Výpočet absolutního jízdního odporu v obsazeném stavu.

$$F_{abs} = \frac{F_m \cdot m_c \cdot 9,81}{1000} = 87 \text{ kN} \quad (8.13)$$

kde:  $F_m$  je měrný jízdní odpor v obsazeném stavu (N/kN)  
 $m_c$  je celková hmotnost (t)

Výpočet celkového potřebného trakčního výkonu.

$$P_t = \frac{v \cdot F_{celk}}{3,6} = 7\,285 \text{ kW} \quad (8.14)$$

kde:  $F_{celk}$  je celková tažná síla (kN)  
 $v$  je rychlost vozidla (km/h)

Výpočet celkového činného příkonu.

$$P_c = \frac{100 \cdot P_t}{\eta_v} + A_{vedl} = 9\,050 \text{ kW} \quad (8.15)$$

kde:  $P_t$  je celkový potřebný trakční výkon (kW)  
 $A_{vedl}$  celková vedlejší spotřeba vozidla (kW)  
 $\eta_v$  je účinnost vozidla (%)

Výpočet zdánlivého příkonu.

$$P_z = \frac{P_c}{\cos \varphi} = 9\,050 \text{ kW} \quad (8.16)$$

kde:  $P_c$  je celkový činný výkon (kW)  
 $\cos \varphi$  je účinník

Výpočet proudu při jmenovitém napájecím napětí.

$$I_{jm} = \frac{P_z \cdot 1\,000}{U_{jm}} = 362 \text{ A} \quad (8.17)$$

kde:  $P_z$  je zdánlivý příkon vozidla (kW)  
 $U_{jm}$  je jmenovité napájecí napětí (V)

Výpočet proudu při minimálním napájecím napětí.

$$I_{\min} = \frac{P_z \cdot 1\,000}{U_{\min p}} = 433 \text{ A} \quad (8.18)$$

kde:  $P_z$  je zdánlivý příkon vozidla (kW)

$U_{\min p}$  je nejnižší provozní napájecí napětí (V)

V následující tabulce 8.4 jsou uvedeny základní parametry napájeného úseku.

Tab. 8.4 Parametry napájeného úseku

počet vlaků v úseku	$p_v$		1
faktor úbytku	$f_u$		1

Výpočet gradientu úbytku napětí.

$$U_{ub} = I_{\min} \cdot f_u \cdot p_v \cdot Z = 136 \text{ V/km} \quad (8.19)$$

kde:  $I_{\min}$  je proud při minimálním napájecím napětí (A)

$f_u$  je faktor úbytku

$Z$  je celková impedance vedení (ohm/km)

$p_v$  je počet vlaků v úseku

Nyní již jsou známy všechny potřebné parametry pro výpočet mezní délky napájeného úseku a také pro výpočet napájecí stanice pro vypočtené parametry.

Výpočet mezní délky napájeného úseku.

$$l = \frac{U_{dis}}{U_{ub}} = 73 \text{ km} \quad (8.20)$$

kde:  $U_{dis}$  je disponibilní úbytek napětí (V)

$U_{ub}$  je gradient úbytku napětí (V/km)

Z předcházejícího výpočtu vychází, že mezní vzdálenost napájeného úseku je 73 km, ale vzdálenost napájecích stanic může být až dvojnásobná, jelikož napájíme kolej na jednu i na druhou stranu, tudíž až 146 km.

Na následujících výpočtech je vidět výpočet intervalu následné jízdy vlaků. Z logické úvahy, kdy může být pouze jeden vlak v napájeném úseku vyplývá, že vlaky pojedou stálou rychlostí 300 km/h ve vzdálenosti 73 km od sebe.

Výpočet intervalu následné jízdy vlaků.

$$t_n = \frac{l \cdot 3600}{v} = 876 \text{ s} \quad (8.21)$$

kde:  $l$  je mezní délka napájeného úseku (km)

$v$  je rychlost vozidla (km/h)

Z předcházející jednoduché úvahy a následného výpočtu vyplývá, že vlaky mohou jezdit v intervalu 14 min a 36 s, když budou dodrženy podmínky, že v úseku je pouze jedno vozidlo a pojedou ustálenou rychlostí 300 km/h. Tento předpoklad je splněn i z hlediska zabezpečovací techniky, která umožňuje následnou jízdu vlaků po 3 min a 2 s.

Tab. 8.5 Parametry napájení systémem 25 kV 50 Hz

jednostranné napájení, dva odběry, rozestup na polovinu napájeného úseku, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		2
faktor úbytku		1,5
střední gradient úbytku napětí	V/km	205
mezní délka úseku	km	48,8
rozestup mezi vlaky	km	24,4
vzdálenost napájecích stanic	km	97,5
interval mezi vlaky	h:m:s	0:09:45
jednostranné napájení, maximální počet vlaků v úseku, rozestup na minimální požadavek zabezpečovacího zařízení, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		max
faktor úbytku prvního vlaku		1
gradient úbytku napětí prvního vlaku	V/km	136,4
rozestup mezi vlaky daný zabezpečovací technikou	km	18,5
úbytek napětí na rozestupu mezi vlaky	V	2 524,0
zbývající disponibilní úbytek	V	7 454,0
faktor úbytku druhého vlaku		2
gradient úbytku napětí obou vlaků	V/km	272,9
rozestup mezi vlaky daný zabezpečovací technikou	km	18,5
úbytek napětí na rozestupu mezi vlaky	V	5 048,1
zbývající disponibilní úbytek	V	2 405,9
faktor úbytku druhého vlaku		3
gradient úbytku napětí tří vlaků	V/km	409,3
délka zbývajícího úseku	km	5,9
mezní délka úseku	km	42,9
vzdálenost napájecích stanic	km	85,8
interval mezi vlaky	h:m:s	0:03:42
dvoustranné napájení, jeden odběr, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		1



faktor úbytku		0,5
střední gradient úbytku napětí	V/km	68
mezní délka úseku	km	146,26
rozestup mezi vlaky	km	146,26
vzdálenost napájecích stanic	km	292,53
interval mezi vlaky	h:m:s	0:29:15
<b>dvoustranné napájení, pět odběrů, rozestup na konstantní vzdálenost v napájeném úseku, konstantní rychlost</b>		
počet vlaků v úseku		5
faktor úbytku		1,5
střední gradient úbytku napětí	V/km	205
mezní délka úseku	km	48,8
rozestup mezi vlaky	km	16,3
vzdálenost napájecích stanic	km	97,5
interval mezi vlaky	h:m:s	0:09:45
<b>dvoustranné napájení, maximální počet vlaků v úseku, rozestup na minimální požadavek zabezpečovacího zařízení, konstantní rychlost</b>		
počet vlaků v úseku		max
faktor úbytku prvního vlaku		0,5
gradient úbytku napětí prvního vlaku	V/km	68,2
rozestup mezi vlaky daný zabezpečovací technikou	km	18,5
úbytek napětí na rozestupu mezi vlaky	V	1 262,0
zbývající disponibilní úbytek	V	8 716,0
faktor úbytku druhého vlaku		1,5
gradient úbytku napětí obou vlaků	V/km	204,7
rozestup mezi vlaky daný zabezpečovací technikou	km	18,5
úbytek napětí na rozestupu mezi vlaky	V	3 786,1
zbývající disponibilní úbytek	V	4 929,9
faktor úbytku druhého vlaku		2,5
gradient úbytku napětí tří vlaků	V/km	341,1
délka zbývajícího úseku	km	14,5
mezní délka úseku	km	51,5
vzdálenost napájecích stanic	km	103
interval mezi vlaky	h:m:s	0:03:42

## 8.7 Napájení systémem 15 kV 16,7 Hz

Tato kapitola se bude věnovat výpočtům mezních délek pro napájecí systém 15 kV 16,7 Hz. Systém bude omezen zabezpečovací technikou, která dovolí následnou jízdu vlaku nejdříve po 3 min a 42 s.

Základní parametry trakčního vedení jsou shodné s kapitolou 8.6, konkrétně s tabulkou 8.1.

Výpočty parametrů jsou shodné jako v kapitole 8.6, výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.6.

Tab. 8.6 Parametry trakčního vedení

gradient odporu trolejového drátu	ohm/km	0,2
gradient odporu nosného lana	ohm/km	0,208
gradient odporu zesilovacího lana	ohm/km	0,117
celkový gradient odporu vrchního trakčního vedení	ohm/km	0,054
celkový gradient odporu	ohm/km	0,011
gradient reaktance	ohm/km	0,099
celková impedance vedení	ohm/km	0,148
účinnost vedení		75

V následující tabulce 8.7 jsou uvedeny základní parametry napájecího systému 15 kV 16,7 Hz.

Tab. 8.7 Základní parametry napájecího systému 15 kV 16,7 Hz

jmenovité napájecí napětí	$U_j$	V	15 000
relativní nárůst napětí	$r_{nn}$	%	10
horní mez napětí	$U_h$	V	16 500
rezerva pro kolísání sítě	$r$	%	5
relativní úbytek napětí	$r_{un}$	%	24
dolní mez napětí	$U_d$	V	11 400
rezerva pro vyšší odběr vlaku	$r_v$	%	10
frekvence	$f$	Hz	16,7

Výpočty parametrů jsou shodné jako v kapitole 8.6, výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.8.

Tab. 8.8 Parametry napájecího systému 15 kV 16,7 Hz

nejvyšší provozní napětí	V	15 675
nejnižší provozní napětí	V	12 540
disponibilní úbytek napětí	V	3 910

### 8.7.1 Výpočet napájecích systémů

V této kapitole je uveden výpočet parametrů napájecího systému 15 kV 16,7 Hz, Výpočty jsou shodné s kapitolou 8.6.2, tudíž je zde uvedena pouze výsledná tabulka 8.9.

Tab. 8.9 Parametry napájení systémem 15 kV 16,7 Hz

jednostranné napájení, jeden odběr, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		1
faktor úbytku		1
střední gradient úbytku napětí	V/km	107
mezní délka úseku	km	36,6
rozestup mezi vlaky	km	36,6
vzdálenost napájecích stanic	km	72,2
interval mezi vlaky	h:m:s	0:07:19
jednostranné napájení, dva odběry, rozestup na polovinu napájeného úseku, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		2
faktor úbytku		1,5
střední gradient úbytku napětí	V/km	160
mezní délka úseku	km	24,4
rozestup mezi vlaky	km	12,2
vzdálenost napájecích stanic	km	48,8
interval mezi vlaky	h:m:s	0:04:53
jednostranné napájení, maximální počet vlaků v úseku, rozestup na minimální požadavek zabezpečovacího zařízení, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		max
faktor úbytku prvního vlaku		1
gradient úbytku napětí prvního vlaku	V/km	106,8
rozestup mezi vlaky daný zabezpečovací technikou	km	18,5
úbytek napětí na rozestupu mezi vlaky	V	1 976,1
zbývající disponibilní úbytek	V	1 933,9
faktor úbytku druhého vlaku		2
gradient úbytku napětí obou vlaků	V/km	213,6
délka zbývajícího úseku	km	9,1
mezní délka úseku	km	27,6
vzdálenost napájecích stanic	km	55,2
interval mezi vlaky	h:m:s	0:03:42
dvoustranné napájení, jeden odběr, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		1
faktor úbytku		0,5
střední gradient úbytku napětí	V/km	53
mezní délka úseku	km	73,2
rozestup mezi vlaky	km	73,2
vzdálenost napájecích stanic	km	146,4
interval mezi vlaky	h:m:s	0:14:39
dvoustranné napájení, pět odběrů, rozestup na konstantní vzdálenost v napájeném úseku, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		5
faktor úbytku		1,5
střední gradient úbytku napětí	V/km	160
mezní délka úseku	km	24,4
rozestup mezi vlaky	km	8,13

vzdálenost napájecích stanic	km	48,8
interval mezi vlaky	h:m:s	0:04:53
dvoustranné napájení, maximální počet vlaků v úseku, rozestup na minimální požadavek zabezpečovacího zařízení, konstantní rychlost		
počet vlaků v úseku		max
faktor úbytku prvního vlaku		0,5
gradient úbytku napětí prvního vlaku	V/km	53,4
rozestup mezi vlaky daný zabezpečovací technikou	km	18,5
úbytek napětí na rozestupu mezi vlaky	V	988,0
zbývající disponibilní úbytek	V	2 922,0
faktor úbytku druhého vlaku		1,5
gradient úbytku napětí obou vlaků	V/km	160,2
délka zbývajících úseku	km	18,2
mezní délka úseku	km	36,7
vzdálenost napájecích stanic	km	73,4
interval mezi vlaky	h:m:s	0:03:42

## 8.8 Shrnutí

Pro stanovené parametry sestavy trakčního vedení RE 330 H, které jsou uvedeny v kapitole 8.5 jsou v předcházejících kapitolách spočítány délky napájecích úseků a další vlastnosti, které jsou uvedeny v tabulce 8.10. Napájecími soustavami byly, jednostranné napájení 25 kV 50 Hz, dvoustranné napájení 25 kV 50 Hz, jednostranné napájení 15 kV 16,7 Hz a dvoustranné napájení 15 kV 16,7 Hz. Vše v tabulce je uvedeno s ohledem na zabezpečovací techniku, která dovoluje minimální rozestup mezi vlaky 18,5 km.

Systém 15 kV 16,7 Hz se ve srovnání se systémem 25 kV 50 Hz vyznačuje nižším napětím a nižší frekvencí. Pokud jde o induktivní úbytek, tak jsou na tom oba systémy obdobně, ale pokud jde o činný úbytek, tak je na tom mnohem lépe systém 25 kV 50 Hz.

Výpočet induktivního úbytku.

$$\frac{U_{X_L}}{U} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot P \cdot \frac{f}{U_{nap}^2} \quad (8.22)$$

kde: L je indukčnost vedení (H)

f je frekvence (Hz)

P je výkon napájecího systému (W)

$U_{nap}$  je napětí systému (V)

Na předcházejícím výpočtu je vidět, že se mění pouze napětí a frekvence napájecích systému, proto indukčnost vedení a výkon se nemusí uvažovat. Když se dosadí do rovnice za frekvenci a napětí, tak pro soustavu 25 kV 50 Hz, kde jde o poměr hodnot  $f/U_{nap}^2$  je 0,00000008 a pro soustavu 15 kV 16,7 Hz, kde jde o poměr hodnot  $f/U_{nap}^2$  je 0,000000074. Z toho plyne, že poměr vůči sobě je 1 ku 1,081, což je zanedbatelný rozdíl.

Výpočet činného úbytku.

$$\frac{U_R}{U} = R \cdot P \cdot \frac{1}{U_{nap}^2} \quad (8.23)$$

kde: R je odpor vedení ( $\Omega$ )

P je výkon napájecího systému (W)

$U_{nap}$  je napětí systému(V)

Na předcházejícím výpočtu je vidět, že se mění pouze napětí napájecích systému, proto odpor vedení a výkon se nemusí uvažovat. Když se dosadí do rovnice za napětí, tak pro soustavu 25 kV 50 Hz, kde jde o poměr hodnot  $1/U_{nap}^2$  je 0,0000000016 a pro soustavu 15 kV 16,7 Hz kde jde o poměr hodnot  $1/U_{nap}^2$  je 0,0000000044. Z toho plyne, že poměr vůči sobě je 1 ku 2,78, což je obrovský rozdíl.

Tab. 8.10 Základní vlastnosti napájených úseků pro jízdu stálou rychlostí

parametry úseku	max. délka napájeného úseku	max. rozestup napájecích stanic	max. počet vlaků v jednom úseku
napájecí soustava			
25 kV 50 Hz, jednostranné napájení	42,9	85,8	3
25 kV 50 Hz, dvoustranné napájení	<b>51,5</b>	<b>103</b>	<b>3</b>
15 kV 16,7 Hz, jednostranné napájení	27,6	55,2	2
15 kV 16,7 Hz, dvoustranné napájení	36,7	73,4	2

V tabulce 12.1 jsou uvedeny základní vlastnosti napájených úseků. Z tabulky

vyplývá, že pro navrhovanou sestavu trakčního vedení RE 330 H je nejvýhodnější napájecí soustava 25 kV 50 Hz oboustranné napájení. Hlavní důvody jsou zřejmé z tabulky. Jsou to nejdelší délka možného napájeného úseku a největší vzdálenost napájecích stanic od sebe. Dalšími výhodami tohoto napájení je rovnoměrné zatížení celostátní energetické, menší úbytek napětí díky dvoustrannému napájení a spojitě napájení vlaků při použití měničů (tato technika se používá v Německu na síti 15 kV 16,7 Hz z distribuční sítě 3 kV 50 Hz), menší proudy v systému na rozdíl od soustavy 15 kV 16,7 Hz a malé ztráty při přenosu výkonu. Aby zde nebyly vyzvednuty pouze výhody této napájecí soustavy, tak její nevýhodou je závislost na celostátní energetické síti.

Z tohoto napájecího systému plynou i výhody pro vozidlo. Např. spojitě napájení trakce, spojitě odebrání energie, spojitě napájení palubní sítě a minimální opotřebení spínacích přístrojů.

## ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byl proveden návrh vysokorychlostní železniční tratě ve spojení dvou kontinentů, konkrétně Evropa – Asie. Byla navržena konkrétní trasa, která začíná v hlavním městě České Republiky v Praze a končí v hlavním městě Číny Pekingu. Návrh byl proveden s uvážením stávajících tras, a také přes největší aglomerace na trase. Další věcí u této tratě bylo optimální řešení rozvětvení, jak po Evropě, tak i po Asii. Konkrétní výsledky rozvětvení a systémové jízdní dráhy jsou uvedeny v příloze.

Evropa by se mohla inspirovat tempem výstavby vysokorychlostních tratí v Číně, mohla by to mít za vzor pro propojení Číny s Evropou v době drahých uhlovodíkových paliv.

Pro pojiždění této tratě bylo navrženo vysokorychlostní železniční vozidlo, které splňuje parametry vysokorychlostních železnic. Jedná se konkrétně ucelenou jednotku, která má šestnáct vozů a pojme 640 cestujících. Podmínkou je co nejnižší spotřeba elektrické energie, tudíž v práci byl proveden modelový výpočet spotřeby elektrické energie a ceny elektrické energie, kterou vozidlo potřebuje na jednu jízdu po navrhované trati. Pro možnost srovnání cen dopravy jedné osoby byla provedena analýza letecké dopravy. Z porovnání těchto dvou druhů doprav z časového hlediska vychází lépe letecká doprava oproti železniční dopravě, ale při optimalizaci jízdního řádu, a také se započítáním dob strávených na letišti se čas letadla a železničního vozidla přiblížil. Z cenového hlediska vychází železniční doprava mnohem lépe než letecká doprava. To znamená, že cena energií na přepravu jedné osoby je mnohem nižší u železniční dopravy než u letecké dopravy.

Tyto stejné úvahy byly provedeny i u přepravy zboží na navrhované trati. Byla doplněna ještě námořní doprava. Z časového hlediska opět nejlépe vyšla letecká nákladní doprava, druhá byla železniční nákladní doprava a zdaleka nejpomalejší způsob převozu nákladu je po moři. Ale po moři je způsob přepravy nákladu nejlevnější, poté je železniční přeprava, která je oproti letecké nákladní dopravě zhruba 3,5x levnější.

Dalším bodem práce byla citlivostní analýza parametrů železniční dopravy, kde se postupně měnily parametry navrženého vozidla a sledovala se spotřeba energie vzhledem ke změně různých parametrů.

Posledním bodem diplomové práce byl návrh napájecího systému. Pro tento návrh byla vybrána koncepce trakčního vedení RE 330 H, která byla vyvinuta pro vysokorychlostní železnice. Pro napájení vyšla nejlépe ze všech napájecí soustava

25 kV 50 Hz s měničovými napájecími stanicemi, která umožňuje nejdelší rozestup napájecích stanic díky dvoustrannému napájení, konkrétně 103 km, a také symetrické zatížení distribuční napájecí sítě 3x110 kV 50 Hz při použití měničové techniky, které je obzvláště důležité na rozlehlých neobydlených územích např. v Rusku, kde není téměř žádný další třífázový odběr. Jedná se převážně o oblasti bez osídlení a bez existence jakéhokoli průmyslu.

Hlavním výsledkem diplomové práce je to, že při takovémto návrhu vysokorychlostní železniční tratě a vysokorychlostního železničního vozidla při cestovní rychlosti 250 km/h, je železniční doprava schopna se časově přiblížit letecké dopravě a mít při tom mnohem menší energetické náklady na přepravu jednoho cestujícího nebo jedné tuny zboží oproti letecké dopravě.

Vzhledem k záběru zadaného tématu, nebylo možné obsáhnout celou problematiku návrhu železniční trati, železničního vozidla a jejího napájení, Snažil jsem se však o základní popis návrhu těchto systému. Dalším možným pokračováním by byla možnost rozšíření návrhu tratě například o stoupání a klesání, o možnost projíždění tunely a další. Rozšíření návrhu vozidla by mohlo spočívat v návrhu jeho trakčních motorů, pomocných pohonů a dalších zařízení pro jízdu a komfort cestujících. Možnosti rozšířit systém napájení by mohl spočívat v konkrétním návrhu napájecích stanic. Každá z těchto možností rozšíření práce by již vydala na samostatnou diplomovou práci, kde by byl vytvořen komplexní návrh a popis systému.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [2] REBO. *Velké železniční tratě světa*. [s.l.]: BEN, 2005. 256 s.
- [3] JANSKA F. *Vozidla elektrické trakce*. 2. vydání. NADAS Praha, 1987.
- [4] Pohl, Jiří. *NDN Tech*. Siemens 2011. 1 s.
- [5] Pohl, Jiří. *Napájení elektrických drah*. Prezentace Siemens 2012. 83 s.
- [6] Pohl, Jiří. *Energie*. Prezentace. Siemens. 2011. 73 s.
- [7] Chudáček, V.; Jakl, J.; Lochman, L. *Vlakové zabezpečovací systémy*; Výzkumný ústav železniční: Praha, 1999. 67 s.
- [8] Sodomka, Tomáš. *Energetická náročnost vlakové dopravy Praha-Peking*; Pardubice, 2012. 40 s. Ročníkový projekt II. Univerzita Pardubice
- [9] Sodomka, Tomáš. *Koncepční návrh napájení výukového kolejového úseku na DFJP*, Pardubice, 2012. 29 s. Ročníkový projekt I. Univerzita Pardubice
- [10] Vacek, Dušan. *Trakční vedení pro vysokorychlostní tratě v Německu*; 2008.
- [11] Distance from to. [online]. [cit. 2011-12-11]. Dostupné z: <[www.distancefromto.net](http://www.distancefromto.net)>
- [12] Velaro. [online]. [cit. 2012-03-5]. Dostupné z: <<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/de/fernverkehr/schienerverkehr/hochgeschwindigkeits-intercity/velaro/Seiten/velaro.aspx>>
- [13] Síť vysokorychlostních železnic v roce 2020. [online]. [cit. 2012-03-2]. Dostupné z: <http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/1C84A96D-1F28-4826-9C5E-726A01021EA1/0/VRTEvropa.jpg><http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/1C84A96D-1F28-4826-9C5E-726A01021EA1/0/VRTEvropa.jpg>
- [14] LOCHMAN, Libor. *Užití inteligentních dopravních systémů v zabezpečovací a sdělovací technice na železnicích*. [online]. [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: [http://www.google.cz/imgres?imgurl=http://www.odbornecasopisy.cz/imagesold/a1002092.gif&imgrefurl=http://www.odbornecasopisy.cz/index.php%3Fid\\_documento%3D28575&usg=\\_\\_nOu1fyOQEQ3IMPTtI2dAZN\\_5aHE=&h=145&w=250&sz=11&hl=cs&start=10&zoom=1&tbnid=eSyllf8COLe6DM:&tbnh=64&tbnw=111&ei=x0lbT5mACsza4QSas9XEDw&prev=/search%3Fq%3DETCs%2Ba%20pliak%25C4%258Dn%25C3%25AD%2Buroven%2B1%26um%3D1%26hl%3Dcs%26sa%3DN%26gbv%3D2%26tbn%3Disch&um=1&itbs=1](http://www.google.cz/imgres?imgurl=http://www.odbornecasopisy.cz/imagesold/a1002092.gif&imgrefurl=http://www.odbornecasopisy.cz/index.php%3Fid_documento%3D28575&usg=__nOu1fyOQEQ3IMPTtI2dAZN_5aHE=&h=145&w=250&sz=11&hl=cs&start=10&zoom=1&tbnid=eSyllf8COLe6DM:&tbnh=64&tbnw=111&ei=x0lbT5mACsza4QSas9XEDw&prev=/search%3Fq%3DETCs%2Ba%20pliak%25C4%258Dn%25C3%25AD%2Buroven%2B1%26um%3D1%26hl%3Dcs%26sa%3DN%26gbv%3D2%26tbn%3Disch&um=1&itbs=1)
- [15] *ETCS Level 3*. [online]. [cit. 2012-03-17]. Dostupné z:

[http://www.itcgroup.cz/aitom/upload//web/fotografie/partneri/thumbs/th\\_ansald\\_o\\_level2\\_800x600.jpg](http://www.itcgroup.cz/aitom/upload//web/fotografie/partneri/thumbs/th_ansald_o_level2_800x600.jpg)

- [16] PAVELKOVÁ, Naděžda. *Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie*. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37850](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37850)
- [17] Multimodální přepravní systémy. [online]. [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: <http://www.fd.cvut.cz/projects/k612x1mp/emma.html>
- [18] ŠKAROUPKA, Viktor. *Ruslan An 124 - 100 Cargo*. [online]. [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: <http://arcon.wz.cz/ruslan/>
- [19] BUREŠ, Jiří. *Měrný odpor*. [online]. [cit. 2012-04-26]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/merny-odpor.htm>
- [20] Světově největší města. [online]. [cit. 2011-12-11]. Dostupné z: <http://world.mongabay.com/czech/population/cs.html>
- [21] KUDYN, Vladimír. Ztráty v napájecí soustavě. [online]. [cit. 2012-04-28]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/vts/CLANKY/vts32/3201.pdf>
- [22] Pohl, Jiří. ENE. Siemens 2012. 1 s.
- [23] Aviation fuel [online]. [cit 2011-12-10]. Dostupne z: <http://www.globalair.com/airport/region.aspx>
- [24] K-REPORT: *Střídavá trakční soustava*. [online]. [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.k-report.net/clanky/stahovacky-prezitek-nebo-nutnost/?kapitola=1>

## **SEZNAM ZKRATEK**

např. – například

tab. – tabulka

atd. – a tak dále

tzv – takzvané

ad. – a další

ERTMS – European rail traffic management system (systém evropského řízení železniční dopravy)

ETCS – European train control system (evropský vlakový zabezpečovací systém)

LEU – lineside electronic unit (traťová elektronická jednotka)

RBC – Radio blok centre (radio bloková centrála)

EVC – European vital computer (centrální počítač)

JRU – Juridical recording unit (záznamová jednotka)

MMI – Man machina interface (zobrazovací jednotka)

BTM – Balise transmission module (přenosový modul balíz)

DPH – Daň z přidané hodnoty

SD – Spotřební daň

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Návrh trati Praha – Peking .....	- 12 -
Obr. 2.1 Aplikační úroveň ETCS 1 .....	- 16 -
Obr. 2.2 Aplikační úroveň ETCS 2 .....	- 17 -
Obr. 2.3 Aplikační úroveň ETCS 3 .....	- 17 -
Obr. 3.1 Vysokorychlostní ucelená jednotka pro německé železnice Velaro D....	- 19 -
Obr. 3.2 Závislost cestovní rychlosti na efektivní rychlosti .....	- 33 -
Obr. 3.3 Boeing B777 .....	- 37 -
Obr. 3.4 Airbus A330-200 .....	- 37 -
Obr. 5.1 Antonov AN-124-100 .....	- 59 -
Obr. 5.2 Největší nákladní loď světa .....	- 61 -
Obr. 8.1 Napájecí stanice 25 kV 50 Hz, zapojená do V.....	- 78 -
Obr. 8.2 Měničová napájecí stanice .....	- 79 -
Obr. 8.3 Sestava trakčního vedení RE 330 H.....	- 81 -

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Základní parametry vysokorychlostní jednotky pro výpočet spotřeby elektrické energie .....	- 21 -
Tab. 3.2 Účinnosti částí trakčního pohonu .....	- 23 -
Tab. 3.3 Vypočtené parametry pro výpočet spotřeby elektrické energie .....	- 24 -
Tab. 3.4 Vypočtené jízdní odpory .....	- 27 -
Tab. 3.5 Kinetická energie .....	- 28 -
Tab. 3.6 Mechanická trakční práce pro trasu Praha - Peking .....	- 30 -
Tab. 3.7 Spotřeba energie .....	- 31 -
Tab. 3.8 Parametry pro výpočet spotřeby elektrické energie a vypočtené hodnoty spotřeby elektrické energie .....	- 34 -
Tab. 3.9 Cena leteckého paliva (bez DPH) .....	- 37 -
Tab. 3.10 Základní parametry Airbus A330-200 .....	- 38 -
Airbus Industrie A330-200 .....	- 38 -
Tab. 3.11 Parametry letadla Airbus A330-200 .....	- 39 -
Tab. 4.1 Časy pro přepravu osob různými druhy dopravy .....	- 44 -
Tab. 4.2 Časy pro přepravu osob různými druhy dopravy se započítáním vlivu dalších dob na přepravu .....	- 45 -
Tab. 4.3 Spotřeba .....	- 46 -
Tab. 4.4 Cena za energii a palivo .....	- 47 -
Tab. 4.5 Cena za energii a palivo na jednoho cestujícího .....	- 47 -
Tab. 5.1 Základní parametry vysokorychlostní jednotky pro výpočet spotřeby elektrické energie pro přepravu zboží .....	- 50 -
Tab. 5.2 Vypočtené parametry vozidla pro výpočet spotřeby elektrické energie pro přepravu zboží .....	- 51 -
Tab. 5.3 Vypočtené jízdní odpory .....	- 53 -
Tab. 5.4 Kinetická energie .....	- 54 -
Tab. 5.5 Mechanická trakční práce .....	- 55 -
Tab. 5.6 Spotřeba energie .....	- 55 -
Tab. 5.7 Parametry pro výpočet spotřeby elektrické energie a vypočtené hodnoty spotřeby elektrické energie .....	- 56 -
Tab. 5.8 Základní parametry pro leteckou přepravu .....	- 59 -
Tab. 5.9 Základní parametry pro lodní přepravu .....	- 61 -
Tab. 6.1 Časy pro přepravu osob různými druhy dopravy .....	- 63 -
Tab. 6.2 Spotřeba .....	- 64 -
Tab. 6.3 Cena za energii a palivo .....	- 65 -
Tab. 6.4 Cena za energii a palivo na jednoho cestujícího .....	- 65 -

Tab. 7.1 Základní parametry vysokorychlostní jednotky pro výpočet spotřeby při změnách rychlosti.....	- 67 -
Tab. 7.2 Vypočtené jízdní odpory.....	- 69 -
Tab. 7.3 Celková spotřeba elektrické energie v závislosti na rychlosti vozidla.....	- 70 -
Tab. 7.4 Měrný kvadratický člen v obsazeném stavu.....	- 72 -
Tab. 7.5 Vypočtené jízdní odpory.....	- 72 -
Tab. 7.6 Celková spotřeba elektrické energie v závislosti na hmotnosti vozidla...	- 73 -
Tab. 7.7 Vypočtené parametry a celková spotřeba elektrické energie v závislosti na činiteli tvaru čelního vozidla.....	- 75 -
Tab. 8.1 Základní parametry sestavy trakčního vedení.....	- 82 -
Tab. 8.2 Základní parametry napájecího systému 25 kV 50 Hz.....	- 84 -
Tab. 8.3 Základní parametry vlaku.....	- 85 -
Tab. 8.4 Parametry napájeného úseku.....	- 87 -
Tab. 8.5 Parametry napájení systémem 25 kV 50 Hz.....	- 88 -
Tab. 8.6 Parametry trakčního vedení.....	- 90 -
Tab. 8.7 Základní parametry napájecího systému 15 kV 16,7 Hz.....	- 90 -
Tab. 8.8 Parametry napájecího systému 15 kV 16,7 Hz.....	- 90 -
Tab. 8.9 Parametry napájení systémem 15 kV 16,7 Hz.....	- 91 -
Tab. 8.10 Základní vlastnosti napájených úseků pro jízdu stálou rychlostí.....	- 93 -

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1 Závislost kinetické energie na rychlosti vozidla .....	- 29 -
Graf 3.2 Závislost mechanické trakční práce na cestovní rychlosti jízdy vlaku.....	- 30 -
Graf 3.3 Závislost gradientu spotřeby energie na cestovní rychlosti vozidla na rovné otevřené trati .....	- 32 -
Graf 3.4 Závislost odebrané elektrické energie na cestovní rychlosti vozidla.....	- 35 -
Graf 3.5 Celková cena elektrické energie v Kč na jednu jízdu vlaku .....	- 36 -
Graf 4.1 Čas dopravy bez započítání vlivu dalších dob na přepravu.....	- 45 -
Graf 4.2 Čas dopravy se započítáním vlivu dalších dob na přepravu.....	- 46 -
Graf 4.3 Cena energie a paliva.....	- 47 -
Graf 4.4 Cena energie a paliva na jednoho cestujícího .....	- 48 -
Graf 5.1 Závislost kinetické energie na rychlosti vozidla .....	- 54 -
Graf 5.2 Závislost mechanické trakční práce na rychlosti vozidla .....	- 55 -
Graf 5.3 Závislost gradientu spotřeby energie na rychlosti vozidla na rovné otevřené trati .....	- 56 -
Graf 5.4 Závislost odebrané elektrické energie na rychlosti vozidla .....	- 57 -
Graf 5.5 Celková cena elektrické energie v Kč na jednu jízdu vlaku .....	- 58 -
Graf 6.1 Čas dopravy bez započítání vlivu dalších dob na přepravu.....	- 64 -
Graf 6.2 Cena energie a paliva na jednu cestu .....	- 65 -
Graf 6.3 Cena energie a paliva na jednu tunu zboží .....	- 66 -
Graf 7.1 Závislost spotřeby elektrické energie na rychlosti vozidla .....	- 70 -
Graf 7.2 Závislost spotřeby elektrické energie na hmotnosti vozidla .....	- 73 -
Graf 7.3 Závislost spotřeby elektrické energie na činiteli tvaru čelního vozidla ....	- 75 -

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha č. 1 Počet obyvatel jednotlivých měst a vzdálenosti jednotlivých měst mezi sebou a celková vzdálenost trasy
- Příloha č. 2 Systémový jízdní řád
- Příloha č. 3 Rozvětvení z Prahy
- Příloha č. 4 Systémový jízdní řád pro rozvětvení z Prahy
- Příloha č. 5 Rozvětvení z Varšavy
- Příloha č. 6 Systémový jízdní řád pro rozvětvení z Varšavy
- Příloha č. 7 Rozvětvení z Minsku
- Příloha č. 8 Systémový jízdní řád pro rozvětvení z Minsku
- Příloha č. 9 Rozvětvení z Moskvy
- Příloha č. 10 Systémový jízdní řád pro rozvětvení z Moskvy
- Příloha č. 11 Rozvětvení z Pekingů
- Příloha č. 12 Systémový jízdní řád pro rozvětvení z Pekingů



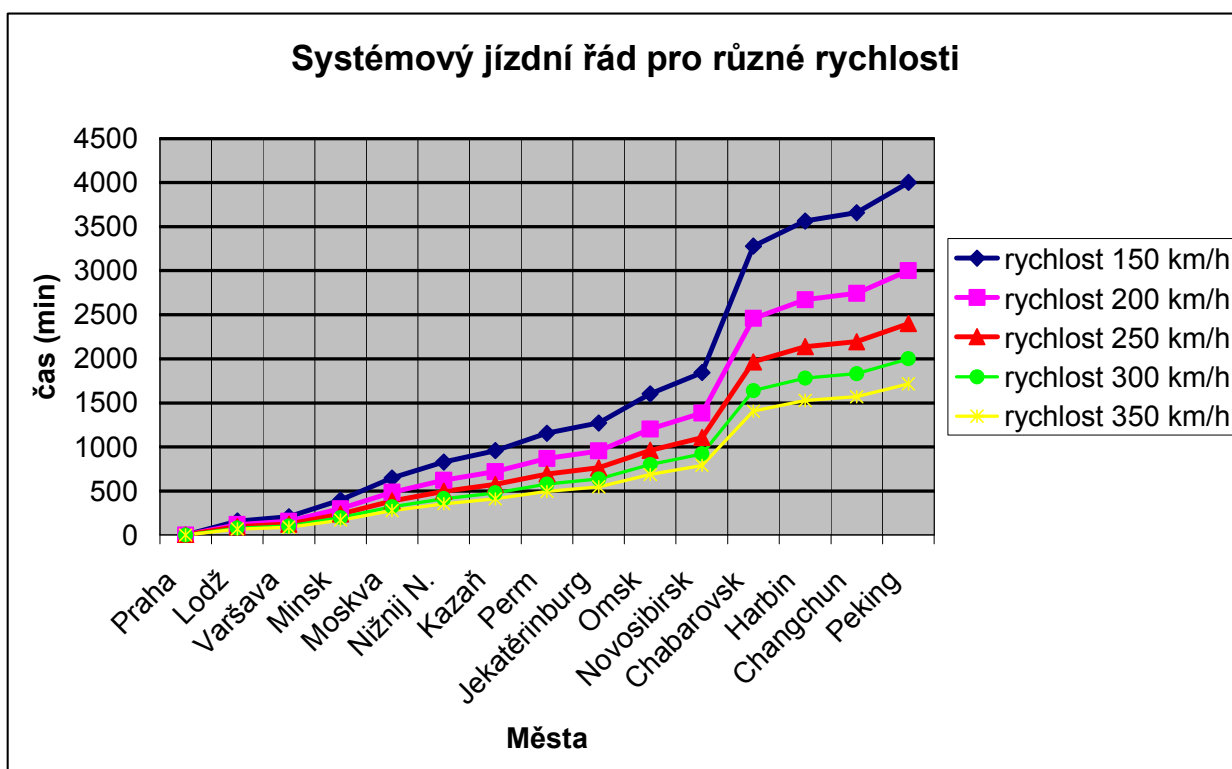
# PŘÍLOHY

**PŘÍLOHA Č. 1 POČET OBYVATEL JEDNOTLIVÝCH MĚST A VZDÁLENOSTI JEDNOTLIVÝCH MĚST MEZI SEBOU A CELKOVÁ VZDÁLENOST TRASY**

město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Praha	1 176 116	0	0
Lodž	764 168	399	399
Varšava	1 700 536	119	518
Minsk	1 789 098	476	994
Moskva	10 433 869	623	1 617
Nižnij N.	1 280 949	455	2 072
Kazaň	1 114 325	323	2 395
Perm	991 741	497	2 892
Jekatěrinburg	1 311 764	291	3 183
Omsk	1 136 799	824	4 007
Novosibirsk	1 394 469	608	4 615
Chabarovsk	577 737	3 580	8 195
Haerbin	3 481 504	713	8 908
Changchun	3 225 557	241	9 149
Peking	11 509 595	857	10 006

## PŘÍLOHA Č. 2      SYSTÉMOVÝ JÍZDNÍ ŘÁD

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Praha	0	0	0	0	0
Lodž	2:40	2:00	1:35	1:20	1:08
Varšava	3:27	2:35	2:04	1:44	1:29
Minsk	6:38	4:58	3:58	3:19	2:50
Moskva	10:47	8:05	6:28	5:23	4:37
Nižnij N.	13:49	10:22	8:17	6:54	5:55
Kazaň	15:58	11:59	9:34	7:59	6:51
Perm	19:17	14:28	11:34	9:38	8:16
Jekatěrinburg	21:13	15:55	12:43	10:37	9:06
Omsk	1,2:43	20:02	16:01	13:21	11:27
Novosibirsk	1,6:46	23:05	18:27	15:23	13:11
Chabarovsk	2,6:38	1,16:59	1,8:46	1,3:19	23:25
Haerbin	2,11:23	1,20:32	1,11:37	1,5:42	1,1:24
Changchun	2,13:00	1,21:55	1,12:35	1,6:30	1,2:08
Peking	2,18:42	2,2:02	1,16:01	1,9:21	1,4:35



## PŘÍLOHA Č. 3 ROZVĚTVENÍ Z PRAHY



město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Praha	1 176 116	0	0
Norimberk	503 673	250	250
Frankfurt	643 821	188	438
Kolín	1 007 119	156	594

město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Praha	1 176 116	0	0
Norimberk	503 673	250	250
Stuttgart	582 443	158	408
Paříž	2 125 017	501	909

město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Praha	1 176 116	0	0
Norimberk	503 673	250	250
Mnichov	1 194 560	149	399
Bologna	373 384	407	806
Řím	2 626 640	304	1110

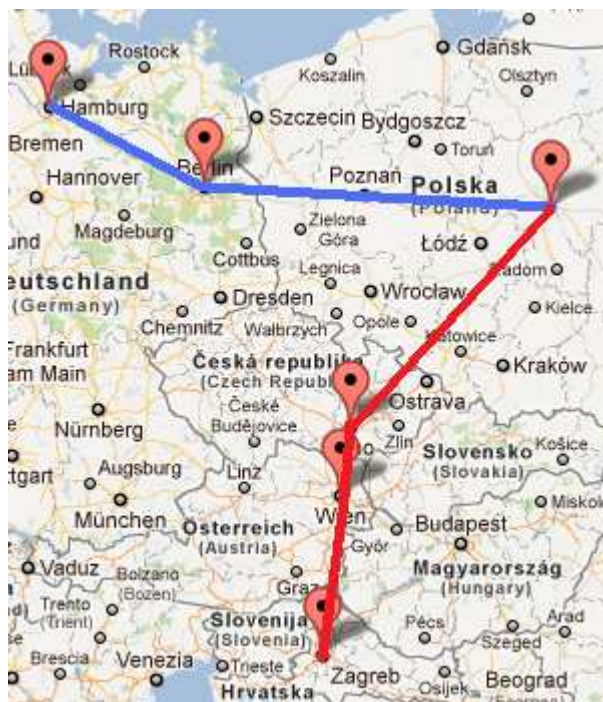
## PŘÍLOHA Č. 4      SYSTÉMOVÝ      JÍZDNÍ      ŘÁD      PRO ROZVĚTVENÍ Z PRAHY

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Praha	0	0	0	0	0
Norimberk	1:40	1:15	1:00	0:50	0:43
Frankfurt	2:55	2:11	1:45	1:28	1:15
Kolín	3:58	2:58	2:23	1:59	1:42

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Praha	0	0	0	0	0
Norimberk	1:40	1:15	1:00	0:50	0:43
Stuttgart	2:43	2:02	1:38	1:22	1:10
Paříž	6:04	4:33	3:38	3:02	2:36

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Praha	0	0	0	0	0
Norimberk	1:40	1:15	1:00	0:50	0:43
Mnichov	2:40	2:00	1:36	1:20	1:08
Bologna	5:22	4:02	3:13	2:41	2:18
Řím	7:24	5:33	4:26	3:42	3:10

## PŘÍLOHA Č. 5 ROZVĚTVENÍ Z VARŠAVY



město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Varšava	1 700 536	0	0
Berlín	3 386 667	518	518
Hamburk	1 704 735	256	774

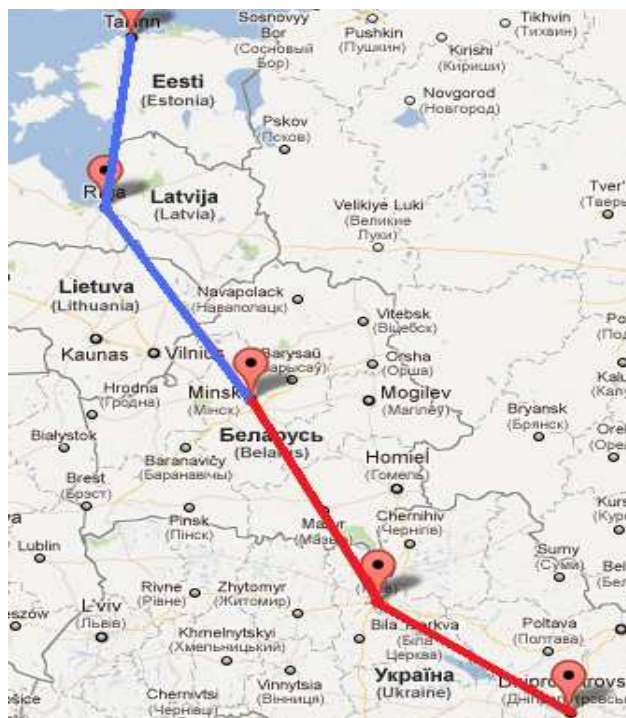
město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Varšava	1 700 536	0	0
Brno	404 345	458	458
Vídeň	1 651 437	111	569
Záhřeb	691 724	268	837

## PŘÍLOHA Č. 6      SYSTÉMOVÝ      JÍZDNÍ      ŘÁD      PRO ROZVĚTVENÍ Z VARŠAVY

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Varšava	0	0	0	0	0
Berlín	3:27	2:35	2:04	1:44	1:29
Hamburk	5:10	3:52	3:06	2:35	2:13

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Varšava	0	0	0	0	0
Brno	3:03	2:17	1:50	1:32	1:19
Vídeň	3:48	2:51	2:17	1:54	1:38
Záhřeb	5:35	4:11	3:21	2:47	2:23

## PŘÍLOHA Č. 7 ROZVĚTVENÍ Z MINSKU



město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Minsk	1 789 098	0	0
Riga	725 032	403	403
Talinn	396 523	281	684

město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Minsk	1 789 098	0	0
Kyjev	2 625 094	444	444
Dnětropol'sk	1 044 094	245	689

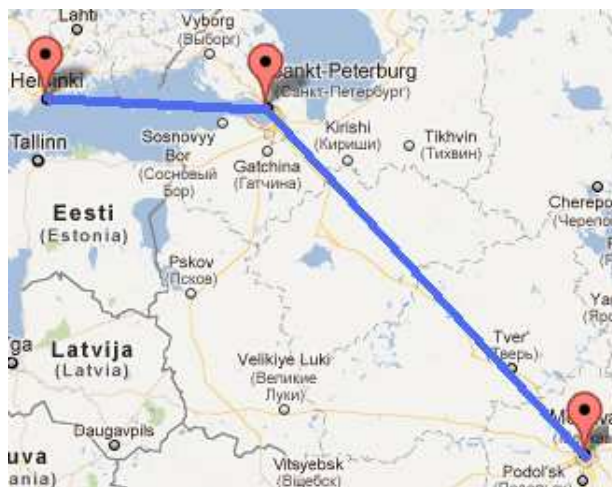


## PŘÍLOHA Č. 8      SYSTÉMOVÝ      JÍZDNÍ      ŘÁD      PRO ROZVĚTVENÍ Z MINSKU

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Minsk	0	0	0	0	0
Riga	2:41	2:01	1:37	1:21	1:09
Talinn	4:34	3:25	2:44	2:17	1:57

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Minsk	0	0	0	0	0
Kyjev	2:58	2:13	1:47	1:29	1:16
Dnětropetrovsk	4:36	3:27	2:45	2:18	1:58

## PŘÍLOHA Č. 9 ROZVĚTVENÍ Z MOSKVVY



město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Moskva	10 433 869	0	0
Petrohrad	4 575 902	654	654
Helsinki	562 713	288	942

## **PŘÍLOHA Č. 10    SYSTÉMOVÝ    JÍZDNÍ    ŘÁD    PRO ROZVĚTVENÍ Z MOSKVY**

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Moskva	0	0	0	0	0
Petrohrad	4:22	3:16	2:37	2:11	1:52
Helsinky	6:17	4:43	3:46	3:08	2:41

## PŘÍLOHA Č. 11 ROZVĚTVENÍ Z PEKINGU



město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Peking	11 509 595	0	0
Tianjin	7 499 181	114	114
Jinan	2 069 266	270	384
Nanjing	3 624 234	539	923
Shanghai	14 348 535	270	1 193

město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Peking	11 509 595	0	0
Shijiazhuang	1 992 474	264	264
Zhengzhou	2 014 125	375	639
Wuhan	4 184 206	467	1 106
Changsha	2 122 873	295	1 401

město	počet obyvatel	vzdálenost měst (km)	celková vzdálenost (km)
Peking	11 509 595	0	0
Yinchuan	475 101	891	891
Xining	767 531	445	1 336
Lhasa	257 400	1 258	2 594

## PŘÍLOHA Č. 12    SYSTÉMOVÝ    JÍZDNÍ    ŘÁD    PRO ROZVĚTVENÍ Z PEKINGU

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Peking	0	0	0	0	0
Tianjin	0:46	0:34	0:27	0:23	0:20
Jinan	2:34	1:55	1:32	1:17	1:06
Nanjing	6:09	4:37	3:42	3:05	2:38
Shanghai	7:57	5:58	4:46	3:59	3:15

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Peking	0	0	0	0	0
Shijiazhuang	1:46	1:19	1:03	0:53	0:45
Zhengzhou	4:16	3:12	2:33	2:08	1:50
Wuhan	7:22	5:32	4:25	3:41	3:10
Changsha	9:20	7:00	5:36	4:40	4:00

město	150 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Peking	0	0	0	0	0
Yinchuan	5:56	4:27	3:34	2:58	2:33
Xining	8:54	6:41	5:21	4:27	3:49
Lhasa	17:18	12:58	10:23	8:39	7:25