

Juraj Grenčík – Miloslav Klinko *

POTENCIÁL SKRÁTENIA JAZDNÝCH DÔB A ENERGETICKÁ NÁROČNOSŤ VOZIDIEL S NAKLÁPACÍMI SKRIŇAMI NA ŽSR

POTENTIAL REDUCTION OF TRAVEL TIMES AND ENERGY CONSUMPTION OF TILTING BODY VEHICLES ON ŽSR

Dôležitou úlohou železníc v súčasnej dobe je zvyšovanie rýchlosti osobnej dopravy. Táto úloha vyplýva jednak z medzinárodných dohovorov, jednak z potreby zachovania konkurencieschopnosti železnice na dopravnom trhu. V príspevku je uvedená možnosť zvyšovania cestovnej rýchlosti osobnej dopravy na ŽSR, a to použitím vozidiel s naklápacími skriňami. Pre vybrané úseky tratí ŽSR boli vypočítané dosiahnuteľné jazdné doby pre vozidlá klasickej konštrukcie a pre vozidlá s naklápacími skriňami. Z ich porovnania vyplýva výrazné skrátenie dosiahnuteľných jazdných časov. Ďalej je posúdená energetická náročnosť porovnateľných súprav klasickej konštrukcie voči jednotke typu Pendolino na existujúcej trati pri súčasných rýchlostných obmedzeniach a teoretickom obmedzení rýchlosti pri prejazde vlaku s naklápacou technológiou.

1. Úvod

Veľmi zaujímavú problematikou, ktorou sa v súčasnej dobe zaoberá takmer každá európska a svetová železnica, je zvyšovanie rýchlosti železničnej dopravy.

Zvyšovanie rýchlosti je možné zabezpečiť výstavbou nových tratí, alebo radikálnou prestavbou starých tratí. Ale budovanie nových vysokorýchlostných tratí je veľmi náročná úloha, zvlášť v krajinách, ktoré majú vysoko ťažký terén, respektíve ich prostriedky sú značne obmedzené. Preto si Talianske železnice FS a Švédske železnice SJ ako jedny z prvých objednali vozidlá, ktoré by boli schopné dosahovať vysoké rýchlosti aj na existujúcich tratiach s malými polomermi oblúkov – vozidlá s naklápacími skriňami. Tieto vozidlá, podľa skúseností viacerých európskych krajín, sú schopné, aj na doterajších tratiach určených pre osobnú aj nákladnú dopravu, dosahovať vysoké rýchlosti a tým podstatnou mierou znížiť jazdné doby.

2. Vysokorýchlostná doprava v Európe a Japonsku

Podľa štatistík v ostatnom polstoročí od konca druhej svetovej vojny zažili železnice skutočný úpadok. V skutočnosti získ

Increasing the speed of passenger transport becomes an important task facing present-day railways. This task has risen both from the international agreements and from the necessity to keep competitiveness of the railway on the transport market. The paper presents a possibility to increase travel speed of passenger transport on ŽSR (Slovak Railways) by use of tilting body vehicles. For the selected ŽSR track sections accessible travel times were calculated for conventional design vehicles and for tilting body vehicles. From comparison of the results a remarkable reduction of accessible travel times can be found. Further, the energy-consumption demands have been evaluated for similar train sets of conventional design compared with the Pendolino train set during run on the existing track under present-day speed limits and under the theoretical speed limits from curve negotiation by tilting body vehicles.

1. Introduction

An important problem, which almost every European railway has to cope with at present, is increasing the speed of railway transport.

Train speed can be increased by building new railway lines, or by the radical reconstruction of old ones. However, building of new high-speed lines is a very demanding task, especially in countries that have very mountainous terrain or their finances are strictly limited. That is why the Italian Railways FS and Swedish Railways SJ had ordered vehicles that were capable to reach high speed even on existing lines with small curve radii – vehicles with tilting bodies. These vehicles, referring to the experience of several European countries, are able, even on existing tracks used for both passenger and freight traffic, to reach high speed and by that remarkably reduce travel times.

2. High-speed transport in Europe and Japan

According to statistics most of railways within the last half of the century since the end of World War II have experienced real

* ¹Doc.Ing. Juraj Grenčík, CSc., ²Ing. Miloslav Klinko

¹University of Žilina, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machinery Maintenance Engineering, SK-010 26 Žilina, Slovak Republic, Tel.: ++421-89-513 2551, E-mail: juraj.grencik@kosz.utc.sk

²ŽSR (Slovak Railways) Head Office, Department of Organisation and Management, Klemensova 8, SK-813 61 Bratislava, Slovak Republic, Tel.: ++421-7-5058 2016, E-mail: Klinko.Miloslav@zsr.sk

z explozívneho nárastu nákladnej a osobnej dopravy si pripísali železniční konkurenti – cesta a lietadlo. Avšak výlučný nárast týchto druhov dopravy naráža dnes na ich obmedzenia. V skutočnosti, ak trendy v sektoroch cestnej a leteckej dopravy zotrávajú, môžu mať za následok zvýšenie znečistenia životného prostredia a rozpory, ktoré provokujú obranné reakcie pozorované v niektorých miestach hlavne na alpských tranzitných cestách vo Švajčiarsku, Nemecku a Rakúsku. Na relatívny pokles železničnej dopravy, zaznamenaný v ostatných päťdesiatich rokoch odpovedali železnice rozvojom vysokorýchlostnej dopravy. V októbri roku 1964, pri príležitosti Olympijských hier v Tokiu, bola v Japonsku otvorená prvá vysokorýchlostná trať z Tokia do Osaky (515 km). Jazdná rýchlosť 210 km/h, dosahovaná u prvých súprav, zavedením vozidiel novej generácie postupne sa zvýšila na 270 km/h. Napriek bezprostrednému komerčnému úspechu, ktorý táto trať zaznamenala, musela Európa čakať až do roku 1981, kedy sa začala prevádzka na oboch vysokorýchlostných tratiach – „Direttissima“ z Ríma do Florencie a trať TGV z Paríža do Lyonu vo Francúzsku. Prednosti osobnej dopravy vo vysokorýchlostných vlakoch sú už teraz dobre známe a sú cestujúcimi ako aj spoločnosťami všeobecne uznávané. Vysoká rýchlosť nie je samoúčelná, pretože nejde o to, uskutočniť vysoký technický výkon: umožňuje skrátiť jazdný čas po železničnej trati takmer na polovicu a tým jazdný čas od domu po dom (vrátane konečných tratí) podstatne skrátiť, čo je v očiach zákazníka podstatný faktor pri rozhodovaní. Pre schopnosť konkurencie voči osobnému automobilu, ktorý ponúka úplné spojenie od domu po dom a môže jazdiť na diaľnici rýchlosťou až 130 km/h, je potrebná priemerná jazdná rýchlosť vlakov zo stanice do stanice 200 km/h – s vysokými rýchlosťami od 250 do 300 km/h.

Rozšírenie existujúcich tratí pre rozsah rýchlostí 200 až 220 km/h je možné, ak trasa nevykazuje traťové oblúky s polomerom menším než 1500 m. Rozšírenie zahŕňa spevnenie koľajníc a trakčného vedenia, odstránenie železničných úrovňových priestorov a zmenu signalizačných zariadení. V niektorých prípadoch je úprava úzkych traťových oblúkov v ohraničenom rozsahu možná, ale najmä v západnej Európe sa stáva toto riešenie často iluzórnym na hlavných tratiach postavených v minulom storočí podľa urbanizácie. Navyše je potrebné nepodceniť stavebné náklady na týchto intenzívne využívaných tratiach.

3. Aktivity na zvýšenie rýchlosti železníc OSŽD

OSŽD zahŕňa v súčasnosti 25 členských krajín – železnice z Európy a Ázie – od Českej republiky a Poľska na západe cez Čínu na východe a Irán na juhu. OSŽD podporuje kooperáciu v medzinárodnej železničnej preprave medzi krajinami Európy a Ázie. Pretože v jednotlivých krajinách oboch týchto kontinentov vládnu rozdielne podmienky, musel byť pre zvýšenie jazdnej rýchlosti a zavedenie vysokorýchlostnej dopravy najprv analyzovaný objem prepravy a musela byť vytvorená prognóza. Na základe uskutočnených prieskumov boli zachytené a opísané dôležité medzinárodné trate pre prepravu Európa – Ázia. Pri popísaní európskej časti sa plne zohľadnili príslušné podklady UIC ako aj rozhodnutia paneurópskych konferencií ministrov dopravy. Konferencia ministrov OSŽD schválila tento plán tratí na svojom zasadnutí

decline. In fact competitors to railway transport, road and air transport, gained profits from explosive growth of freight and passenger transport. But exclusive growth of these transport modes is hitting its constraints at present. In fact, if trends in road and air transport continue, they may result in increased environmental pollution and conflicts, which provoke defensive reactions observed in some places, especially on Alpine transit roads in Switzerland, Germany and Austria. The relative decline in railway traffic, observed in the last 50 years, was answered by the development of high-speed transport. In October 1964, on the occasion of Olympic games in Tokyo, Japan, the first high-speed line from Tokyo to Osaka (515 km) was opened. The running speed of 210 km/h in the beginning of operation by first train-sets was gradually increased to 270 km/h by introducing vehicles of newer generations. In spite of the immediate commercial success that was observed on this line, Europe had to wait until 1981 when operation on two high-speed lines – “Direttissima” from Rome to Florence and the TGV line from Paris to Lyon, were launched. Benefits from passenger transport by high-speed trains are very well known now and are generally recognised by passengers and railway companies. High speed has not purpose for itself as the goal is not to make a high technical performance; it allows to shorten travel time on the railway line almost to its half and by that door-to-door (including subsidiary lines) travel time can be remarkably shortened, which is a fundamental factor in customers' eyes when deciding on transport mode. To be competitive with a passenger car, which offers complete connection from door to door and can run on a highway at the speed of 130 km/h, the necessary average running train speed from station to station is 200 km/h - with high speeds from 250 to 300 km/h.

Upgrading of existing tracks for speed up to 200 – 220 km/h is possible only if there are not curves of diameter smaller than 1500 m on the line. Track upgrading concerns stiffening of rails and catenary, elimination of railway level crossings and change in the signalling system. In some cases it is possible to modify small track curve radii in a limited extent, but especially in Western Europe this solution is often only illusion on the main roads built in the last century that followed the urbanisation. Moreover, the reconstruction costs must not be underestimated on these intensively operated lines

3. Activities for increasing speed on OSŽD railways

OSŽD is composed of 25 member countries – railways from Europe and Asia - from Czech Republic and Poland in the West to China in the East and Iran in the South. OSŽD promotes cooperation in international railway transport between countries of Europe and Asia. As there are different conditions in the individual countries of both continents, for increase of travel speed and introduction of high-speed transport, at first, the traffic volumes had to be analysed and prognosis had to be created. Based on the realised surveys the important international lines for Europe-Asia transport were recognised and described. In the description of the European part the corresponding UIC materials as well as decisions from pan-European conferences of ministers of transport were considered. The conference of OSŽD ministers had ap-

v roku 1996 v Bratislave. Bolo stanovených deväť hlavných relácií rýchlych a vysokorýchlostných tratí osobnej prepravy, ktoré berú ohľad na budúcu vysokorýchlostnú sieť Európy a túto sieť predlžujú v smere do Ázie.

Bolo ďalej rozhodnuté, že podmienky stanovené v dohode AGC pre najdôležitejšie projekty železničnej infraštruktúry v Európe, budú vo veľkom rozsahu zohľadnené. Rovnako boli stanovené aj cieľové najvyššie rýchlosti na jednotlivých traťových úsekoch ako aj časové rozpätie pre dosiahnutie týchto rýchlostí. Z podkladov vyplýva, že európski členovia OSŽD majú v úmysle zvýšiť jazdnú rýchlosť modernizáciou a výstavbou nových železničných tratí na celkovú dĺžku okolo 18 000 traťových kilometrov. Najprv je plánované hlavne rozšírenie tratí na jazdnú rýchlosť 160 km/h, v budúcnosti aj výstavba nových tratí na 200 km/h. V ďalekom horizonte sa predpokladajú v jednotlivých krajinách novovybudované trate pre jazdné rýchlosti od 300 do 350 km/h. Toto sa týka predovšetkým trate Berlín - Kunowice - Varšava - Minsk - Moskva, ako aj novej trate Sankt Petersburg - Moskva na teritóriu Ruskej Federácie. Zhrnuté zámery pre európsku časť železníc OSŽD sú zobrazené na obr. 1.

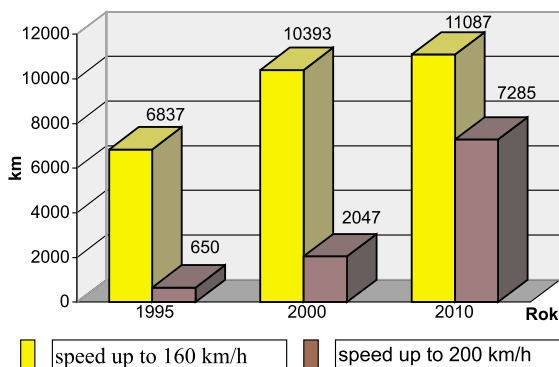
Druhým ťažiskom pri výstavbe budúcej rýchlostnej železničnej siete Európa - Ázia je čínska železnica. Rozvoj národného hospodárstva v Číne má pozitívny vplyv aj na železničnú prepravu: vo výhlade sú výstavba nových tratí, zdvojkolajnenie tratí, elektrifikácia a iné druhy rozširovania. Rozsah tohto rozvoja je možné rozpoznať z plánov pre časové obdobie 1998 - 2002, kedy má byť realizovaná výstavba 5340 nových traťových kilometrov, 2580 kilometrov trate má byť zdvojkolajnených a 4400 kilometrov novelektrifikovaných tratí. Súčasne zavádzajú Čínske železnice (KŽD) postupne rýchlostnú dopravu v osobnej preprave. Na konci roku 1997 dosahovala dĺžka železničných tratí s dovolenou rýchlosťou 140 km/h 5500 kilometrov, a na traťovom úseku o dĺžke 587 kilometrov dosiahla dovolená rýchlosť 160 km/h. Do konca roku 2000 mala dĺžka týchto tratí presiahnuť 8100 km.

4. Súčasný stav techniky vozidiel s naklápacími skriňami vo svete

V súčasnosti sa viaceré krajiny zaoberajú vozidlami s naklápacími skriňami, nakoľko je to veľmi efektívny systém modernej dopravy. Rozlišujeme dva druhy naklápania skrine: prirodzené a nútené. Medzi vlaky s prirodzeným naklápaním skrine patria španielske jednotky RENFE nazvané Talgo. Do skupiny vozidiel s núteným naklápaním skrine patria napríklad talianske jednotky FS Pendolino (obr. 2), z neho odvodené nemecké DB - VT 610, a na inom princípe švédske vozidlo SJ - X 2000. V súčasnej dobe

proved this plan during its session in 1996 in Bratislava. Nine main relations of rapid and very high-speed lines for passenger traffic had been determined, which consider the future high-speed lines network in Europe, and this network is extended towards Asia.

Further, it had been decided that conditions stated in AGC agreement for the most important project of railway infrastructure in Europe, would be respected to a great extent. Similarly, target highest speeds on the individual line sections as well as the time periods for reaching these speeds had been set up. From the materials adopted it results that the European members of OSŽD intend to increase running speed by modernisation and construction of new railway lines with total length of about 18,000 track kilometres. In the first step upgrading of lines to running speed of 160 km/h is planned, in future building of new lines for 200 km/h is planned. On far horizon newly built lines for speed from 300 to 350 km/h are expected in the individual countries. This especially concerns Berlin - Kunowice - Warsaw - Minsk - Moscow line and new line Sankt Petersburg - Moscow in the Russian federation territory. Summarised plans for European part of OSŽD railways are shown in the figure 1.



Obr. 1. Traťové rýchlosti - zámery pre európsku časť železníc OSŽD
Fig. 1. Track speed - plans for European part of OSŽD railways

Second centre for building of future high-speed railway network Europe - Asia is the Chinese railway. Development of Chinese economy has positive influence on railway transport: there are plans for building new lines, construction of double-track lines, electrification and other methods of upgrading. Extent of this development can be seen from plans for the time period 1998 - 2000 when construction of 5.340 km new lines is to be realised, 2.580 km of single track lines should be upgraded to double track and

4,400 km tracks should be electrified. At the same time the Chinese railways (KZD) are introducing rapid transport in passenger traffic. In the end of the year 1997 length of railway tracks with speed limit of 140 km/h was 5.500 km and 587 km track section has speed limit of 160 km/h. By the end of the year 2000 length of these lines should exceed 8,100 km.

4. Current state of tilting body technology in the world

At present a couple of countries are dealing with tilting body railway vehicles as they consider it a very effective system of modern transport. There are principally two kinds of body tilting: natural and forced. Trains with natural body tilting include Spanish train units RENFE called Talgo. The group with forced body tilting include, for example, Italian train sets FD Pendolino, German DB - VT 610 derived from Pendolino, another train set concept Swedish SJ - X 2000. Nowadays, a trend towards the use of trains with tilting technology is starting to grow rapidly, and there is vir-

trend používania vlakov s naklápacou technológiou začína prudko rásť a niet pomaly krajiny v Európe, ktorá by s takýmto projektom neuvažovala. Nemožno nespomenúť ČD, kde napriek ťažkostiam, jednotky radu 680 by mali byť v dohľadnej dobe uvedené do prevádzky pre rýchle spojenie na osi Berlín - Praha - Brno - Viedeň.

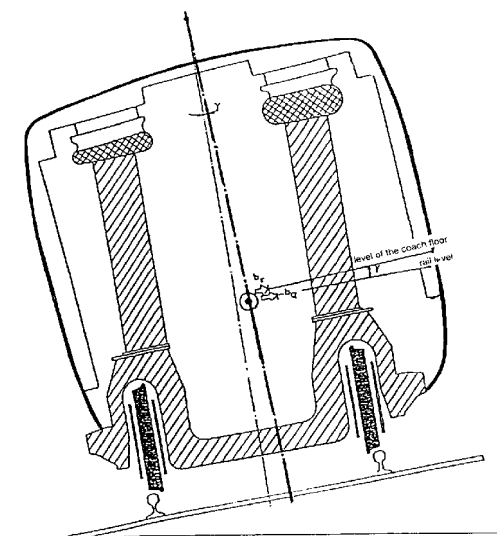


Obr. 2. Vlak Talianskych dráh „Pendolino“, radu ETR 460.
Fig. 2. Italian railways train-set „Pendolino“, series ETR 460.

usually no country in Europe that would not deal with such a project. We have to mention Czech railways CD where, in spite of difficulties, the train unit series 680 are expected to be introduced into operation for rapid connection on the Berlin - Prague - Brno - Vienna line.

4.1 Porovnanie jazdy klasických vlakov s vozidlami s naklápacími skriňami

V súpravách s naklápacími skriňami sa pre zvýšenie rýchlosti naklápa vozňová skriňa v úzkych traťových oblúkoch, aby kompenzovala účinok odstredivej sily na cestujúcich. Nasledujúce obrázky ukazujú efekt z naklopenia skrine u systému s prirodzeným naklápaním (obr. 3) a núteným naklápaním (obr. 4). Z obrázkov jasne vidieť, že nútené naklápanie prináša väčší efekt ako prirodzené, vyžaduje však zložitejšiu konštrukciu a riadiaci systém naklápania.



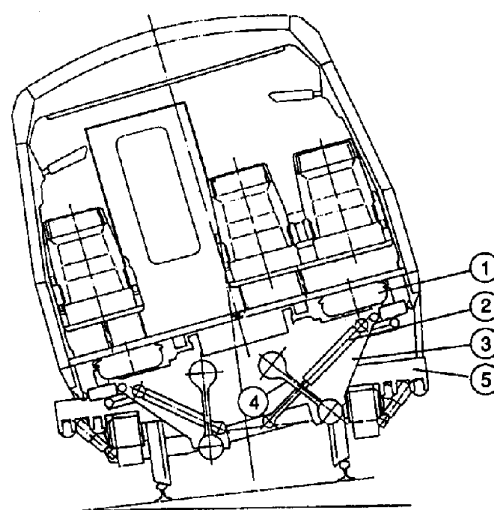
Obr. 3. Princíp prirodzeného naklápania skrine - vlak Španielskych železníc „Talگو Pendular“.

Fig. 3. Principle of natural body tilting - Spanish railways train „Talگو Pendular“.

U klasických vozidiel bez naklápania sa na kompenzáciu odstredivej sily pôsobiacej na vozidlo pri prechode oblúkom prevyšuje vonkajší koľajnicový pás voči vnútornému. Toto prevýšenie sa pri plne kompenzovanej odstredivej sile nazýva teoretické prevýšenie. Silové pomery, respektíve pôsobiace zrýchlenia pri pohybe vozidla v oblúku možno znázorniť na nasledovnom diagrame, kde g predstavuje gravitačné zrýchlenie, a priečne zrýchlenie vyvolané

4.1 Comparison of conventional trains with tilting body trains running in curve

Train sets with tilting bodies do not require reconstruction of curves as the train body tilts in small track radii to compensate effects of centrifugal force on passengers. The following pictures show effect from body tilt for system with natural tilting (figure 3) and with forced tilting (figure 4). The pictures clearly show that forced tilting brings higher effect than the natural one, but it requires more complicated mechanism and control system for body tilting.



Obr. 4. Princíp núteného naklápania skrine - vlak Švédskych železníc „X 2000“. (1 - vypruženie, 2 - hydraulický valec, 3 - naklopný priečník, 4 - záves, 5 - rám podvozku)

Fig. 4. Principle of forced body tilting - Swedish railways train „X 2000“. (1 - air spring, 2 - hydraulic actuator, 3 - tilting bolster, 4 - pendulum, 5 - bogie frame)

To compensate for centrifugal force acting on a vehicle during run in curve the outer rail is superelevated against the inner one (rail cant). This superelevation is called in case of fully compensated centrifugal force a theoretical superelevation. Acting forces or accelerations acting during a run of vehicle in curve are shown in the following diagram, where g stands for gravitation acceleration, a stands for acceleration by centrifugal force, p is a rail supe-

odstredivou silou, p prevýšenie koľaje a e vzdialenosť styčných kružníc dvojkolesia (pre normálny rozchod trate 1435 mm je $e = 1500$ mm).

Platia nasledovné vzťahy:

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (\text{m.s}^{-2}; \text{m.s}^{-1}, \text{m}),$$

pričom:

$$v = \frac{V}{3,6} \quad (\text{m.s}^{-1}; \text{km.h}^{-1})$$

Z rovnosti uhlov α platí pomer: $\frac{a}{g} = \frac{p}{e}$
Odtiaľ pre prevýšenie dostaneme:

$$p = \frac{e}{g} \cdot a \quad (\text{m}; \text{m}, \text{m.s}^{-2})$$

Pre normálny rozchod koľaje 1435 mm, rýchlosť jazdy V a polomer oblúka R sa teda teoretické prevýšenie vypočíta podľa:

$$p_t = \frac{1000 \cdot 1,5(\text{m})}{9,8(\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \cdot 3,6^2} \cdot \frac{V^2}{R} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (\text{mm}; \text{km.h}^{-1}, \text{m})$$

Na železnici sa nepoužíva plne kompenzované teoretické prevýšenie, ale sa pripúšťa určitá veľkosť nevyrovnaného odstrediveho zrýchlenia, čo je reprezentované tzv. nedostatkom prevýšenia (p_{np}). Základným typom prevýšenia u ŽSR je prevýšenie nižšie - p_n , znížené o 70 mm od teoretického. Ďalšími typmi prevýšenia sú prevýšenie znížené, (znížené o 85 mm) a najmenšie, znížené o 100 mm od teoretického.

Pre výpočet prejazdu vozidla s naklápacou skriňou oblúkom potrebujeme určiť maximálnu dovolenú rýchlosť (V_{dm}). Vzorec pre jej výpočet môžeme odvodiť nasledovne:

1. Vzorec pre výpočet maximálnej dovolenej rýchlosti pri jazde oblúkom o polomere R , s maximálnym prevýšením p_m a nedostatkom prevýšenia p_{np} je:

$$V = \sqrt{\frac{R}{11,8} \cdot (p_m + p_{np})} \quad (\text{km.h}^{-1}; \text{m}, \text{mm})$$

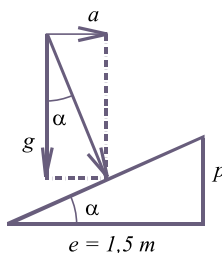
2. Ďalšie zvýšenie rýchlosti pri nezhoršenom pohodlí cestujúceho ($a_n = 0,457 \text{ m.s}^{-2}$) prináša náklon skrine vozidla do oblúka o určitý uhol τ , ktorý reprezentuje dodatočné prevýšenie p_d . Dostávame dovolenú rýchlosť vozidla pri naklonení skrine:

$$V = \sqrt{\frac{R}{11,8} \cdot (p_m + p_{np} + p_d)} \quad (\text{km.h}^{-1}; \text{m}, \text{mm})$$

Toto však nie je úplné riešenie, lebo zvýšená rýchlosť jazdy, okrem kompenzácie priečnej sily pôsobiacej na cestujúceho, prináša aj zvýšenie účinku vozidla na trať.

3. Silové pôsobenie vozidla v oblúku na trať, teda hľadisko bezpečnosti proti vykoľajeniu, aj vplyv na stabilitu koľaje, sa stáva dominantným kritériom. Zahraníčne železničné správy vychádzajú pri zavádzaní vozidiel s naklápacími skriňami do prevádzky z Proud'homových vzorcov. Vyplýva z nich

relevation and e is a distance of wheel-rail contact points on the wheel set (for standard rail gauge of 1435 mm $e = 1500$ mm).



Following equations are valid:

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (\text{m.s}^{-2}; \text{m.s}^{-1}, \text{m}),$$

while:

$$v = \frac{V}{3,6} \quad (\text{m.s}^{-1}; \text{km.h}^{-1})$$

From equal angles α we have: $\frac{a}{g} = \frac{p}{e}$

And from that after substitution:

$$p = \frac{e}{g} \cdot a \quad (\text{m}; \text{m}, \text{m.s}^{-2})$$

For the standard rail gauge of 1435 mm, train velocity V and curve radius R the theoretical superelevation can be calculated from:

$$p_t = \frac{1000 \cdot 1,5(\text{m})}{9,8(\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \cdot 3,6^2} \cdot \frac{V^2}{R} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} \quad (\text{mm}; \text{km.h}^{-1}, \text{m})$$

Railway does not use fully compensated theoretical superelevation, but certain unbalanced lateral force is permitted, which is represented by so called lack of superelevation (p_{np}). The basic type of superelevation on ŽSR is lower superelevation - p_n , lowered by 70 mm from the theoretical one. Other types of superelevation are lowered superelevation, (lowered by 85 mm) and the least, lowered by 100 mm from the theoretical one.

For calculation of tilting body vehicle running in curve, we need to determine the maximum permitted velocity (V_{dm}). Formula for its calculation can be derived as follows:

1. Formula for calculation of maximum permissible velocity at curve with radius R , maximum superelevation p_m and cant deficiency p_{np} is:

$$V = \sqrt{\frac{R}{11,8} \cdot (p_m + p_{np})} \quad (\text{km.h}^{-1}; \text{m}, \text{mm})$$

2. A further increase of speed without reducing passenger ride comfort ($a_n = 0,457 \text{ m.s}^{-2}$) can be gained by tilting the car body inwards toward the curve by certain angle τ , which represents additional superelevation p_d . We get the permissible velocity with use of tilted body:

$$V = \sqrt{\frac{R}{11,8} \cdot (p_m + p_{np} + p_d)} \quad (\text{km.h}^{-1}; \text{m}, \text{mm})$$

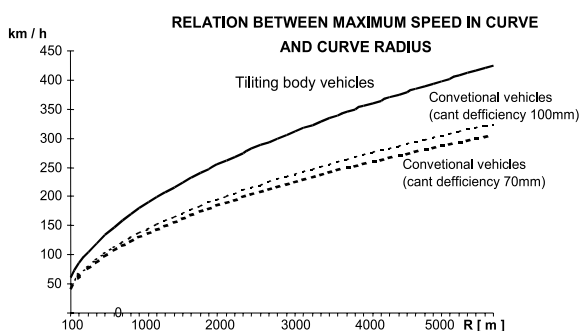
This is not a complete solution because increasing of velocity, besides balancing the centrifugal force effecting passengers, brings increase of vehicle effects on the track.

3. Vehicle forces acting in a curve on the track, that is safety against derailment and track stability, become a dominant criterion. Foreign railways use the Proud'hom's formulae when they prepare operation of tilting body vehicles. These formulae give limit of maximum transversal force between wheel

obmedzenie maximálnej priechnej sily z dvojkolesia na koľaj, ku ktorej môže dôjsť pri nevyrovnanom zrýchlení vozidla $a_{vn} = 1,65 \div 1,8 \text{ m.s}^{-2}$ a len výnimočne $a_{vn} = 2,0 \text{ m.s}^{-2}$. Maximálna dovolená rýchlosť pri celkovom priechnom zrýchlení a_c bude

$$V_{dm} = 3,6 \cdot \sqrt{a_c \cdot R} \quad (\text{km/h}^{-1}; \text{m.s}^{-2}, \text{m})$$

Najvýraznejšou výhodou vozidla s naklápacími skriňami, oproti obyčajnému koľajovému vozidlu je, že oblúkmi môže prechádzať podstatne vyššou rýchlosťou a tým výrazne znížiť jazdnú dobu vlaku. Ak budeme uvažovať oblúky s jednotným prevýšením $p = 150 \text{ mm}$ a nedostatkom prevýšenia 70 mm , resp. 100 mm , môžeme vytvoriť graf závislosti maximálnej rýchlosti prechodu oblúkom od polomeru oblúka, pre vozidlo s naklápacími skriňami a pre obyčajné vozidlo (obr. 5).



Obr. 5. Závislosť maximálnej rýchlosti prechodu oblúkom od polomeru oblúka

Fig. 5. Relation between maximum speed in curve and curve radius

Z grafu vidíme, že vozidlo s naklápacími skriňami môže už pri malých polomeroch oblúkov dosahovať výrazne vyššiu rýchlosť, oproti obyčajným vozidlám. Obmedzenie rýchlosti v oblúku je tu dané spomenutými Proud'homovými vzorcami, z ktorých vyplýva obmedzenie maximálnej priechnej sily pôsobiacej z dvojkolesia na koľaj.

5. Možnosti využitia vozidiel s naklápacími skriňami na ŽSR

Slovenská republika, ako štát stredoeurópskeho regiónu, bude musieť tiež uvažovať o zvyšovaní rýchlosti železničnej dopravy, aby udržala krok s ostatnými krajinami západnej Európy.

and rail, which results in unbalanced centrifugal acceleration of vehicle $a_{vn} = 1.65 \div 1.8 \text{ m.s}^{-2}$ and only exceptionally $a_{vn} = 2.0 \text{ m.s}^{-2}$. The maximum permissible speed at total transversal acceleration a_c will be then:

$$V_{dm} = 3.6 \cdot \sqrt{a_c \cdot R} \quad (\text{km/h}^{-1}; \text{m.s}^{-2}, \text{m})$$

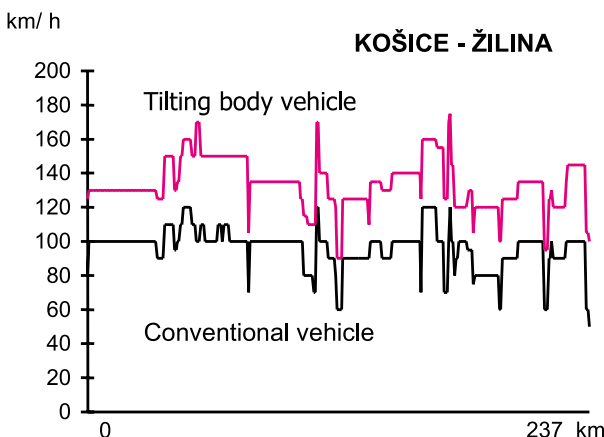
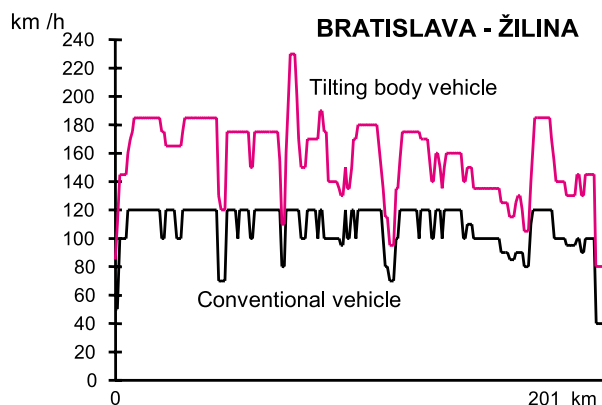
The most important benefit of a tilting body vehicle compared with a conventional one is that it can negotiate curves at substantially higher speed and by that remarkably reduce travel time of a train. If we consider curves with same rail cant (superelevation) of $p = 150 \text{ mm}$ and cant deficiency of 70 mm , respectively 100 mm , we can draw a diagram showing relation between maximum speed in curve and curve radius for a tilting body vehicle and for conventional one (see figure 5).

From the graph one can see that vehicle with tilting body can run at substantially higher velocity in even small curve radii than conventional vehicles. Speed limit in curve is given by already mentioned Proud'hom formulae, from which limit on maximum transversal force acts between wheel and rail.

5. Possibilities in using the tilting body vehicles with ŽSR

Slovak republic as a country of the Central European region will have to consider the increase of the rail traffic speed to keep pace with countries of Western Europe.

Run of the express trains used on ZSR is constrained by maximum track speed, which is very low comparing it with



Obr. 6. Traťová rýchlosť na železničnom úseku Bratislava - Žilina a Košice - Žilina
Fig. 6. Track speed on the railway line Bratislava - Žilina and Košice - Žilina

Jazda expresných vlakov používaných na ŽSR je limitovaná maximálnou traťovou rýchlosťou, ktorá je oproti západným krajinám nízka. Pre vnútroštátnu dopravu je pre ŽSR najdôležitejší traťový úsek Bratislava - Žilina - Košice. Na tomto úseku boli porovnané súčasne a dosiahnuteľné traťové rýchlosti (pozri obr. 6.).

Dosiahnuteľné rýchlosti boli stanovené podľa teoreticky možnej maximálnej rýchlosti prejazdu oblúkom, ale dĺžky úsekov s obmedzením rýchlosti boli uvažované podľa v súčasnosti existujúcich úsekov, pričom v jednotlivom úseku je rýchlosť stanovená zaokrúhlením najnižšej teoretickej traťovej rýchlosti v danom úseku trate.

Pre vybrané traťové úseky na základe zjednodušeného výpočtu dosiahnuteľnej jazdnej doby (použitím spresnenej statickej metódy výpočtu jazdných dôb, bez zastávok) dostaneme výsledky uvedené v nasledujúcej tabuľke (tab. 1). Vybrané traťové úseky sú vozidlá s naklápacími skriňami schopné prekonať oveľa rýchlejšie a tým výrazne zrýchliť dopravu medzi významnými mestami u nás, ako aj spojenia so zahraničím (prepojenie na ČR, Poľsko, Rakúsko, Maďarsko). Vypočítané jazdné doby sú teoreticky dosiahnuteľné, neuvažujú s technologickými časmi a ďalšími časmi, ktoré sa vyskytujú v realnej prevádzke. Skutočný prínos skrátenia jazdnej doby býva menší ako teoretický.

Porovnanie dosiahnuteľných jazdných dôb na vybraných tratiach ŽSR Tab. 1

Traťový úsek	Dosiahnuteľná jazdná doba obyčajného kofajového vozidla	Dosiahnuteľná jazdná doba vozidla s naklápacími skriňami
Bratislava - Žilina - Košice	4 h 19 min	3 h 02 min
Košice - Žilina - Čadca štátna hranica	2 h 52 min	2 h 02 min

5.1 Skracovanie jazdných dôb a energetickej náročnosť

V ďalšom je na vybraných traťových úsekoch uvažované aj so spotrebou elektrickej energie, nakoľko táto hrá dôležitú úlohu pri vyšších rýchlostiach. Spotreba energie bude najmä v budúcnosti predstavovať významnú položku prevádzkových nákladov a preto v prvotných úvahách o zvyšovaní rýchlosti nesmie byť opomenutá.

Pre presnejší výpočet jazdných dôb a spotreby energie bol použitý počítačový program Dynamika. Porovnané boli hmotnosťou si odpovedajúce vlakové súpravy:

- konvenčná - hnacie vozidlo radu 163 plus osobné vozne o celkovej hmotnosti 400 t, spolu 484 t.
- s naklápacími skriňami - jednotka radu ETR 470, celková hmotnosť 490 t, trvalý výkon 5880 kW, maximálna ťažná sila 258 kN

Spotreba energie pre ETR 470 bola počítaná z trakčnej práce s uvažovaním 90 % účinnosťou premeny privádzanej energie, čo u moderných vozidiel možno považovať za reálnu hodnotu. Presnejšie podklady pre výpočet spotreby energie neboli k dispozícii,

western countries. For inland traffic on ZSR the most important line is Bratislava - Žilina - Košice. On this line the existing and accessible track speeds have been compared (see figure 6).

Accessible speed has been determined according to theoretically possible maximum speed during curve negotiation, but lengths of track sections with speed limits were considered according to the currently existing sections, while in the individual sections the track-speed limit was set up by rounding the lowest theoretical track speed limit in the corresponding track section.

For the chosen lines based on a simplified calculation of accessible travel time (using a precise static method for calculation of travel time without considering train stops) we get the results given in the following table (table 1). Chosen lines can be travelled by vehicles with tilting bodies much faster and by that substantially speed up traffic between important towns in Slovakia and connections with foreign countries (connection with the Czech republic, Poland, Austria, Hungary). The calculated travel times are only theoretically accessible, they do not consider traffic technology times and other times existing in real operation. Actual effect from reduced travel time would be smaller than theoretical one.

Comparison of accessible travel times on the chosen ZSR lines Tab. 1

Line	Accessible travel time of conventional railway vehicle	Accessible travel time of tilting body vehicle
Bratislava - Žilina - Košice	4 h 19 min	3 h 02 min
Košice - Žilina - Čadca border crossing	2 h 52 min	2 h 02 min

5.1 Reduction of travel times and energy demands

In the following we consider also trains' energy consumption on the selected lines as this plays an important role when running at high speed. Energy consumption will, especially in future, represent a major part of operational costs, and that's why it cannot be omitted in primary analysis of planned increasing speed.

For more precise calculation of travel times and energy consumption computer program Dynamika has been used. We have compared trains of roughly same weights:

- conventional - electric locomotive series 163 plus passenger coaches of total weight 400 t, all together 484 t.
- tilting body train - unit series ETR 470, total weight of 490 t, permanent power 5880 kW, maximum tractive effort 258 kN

Energy consumption for ETR 470 was calculated from traction work considering 90 % efficiency of input energy conversion, which is a realistic value in case of modern vehicles. More detailed data for energy consumption was not available as the manu-

nakoľko si výrobcovia strážia bližšie technické údaje. Napriek tomu je výpočet dostatočne vypovedajúci a odráža skutočnosť.

Aj keď výkon rušňa radu 163 je výrazne nižší, pre maximálnu rýchlosť 120 km/h v súčasnosti dosahovanú na uvedených tratiach, je tento rušeň postačujúci. Vypočítané jazdné doby pri použití klasického lokomotívneho vlaku a vlaku typu Pendolino radu ETR 470 na tratiach so súčasnými rýchlostnými obmedzeniami sa nelíšili o viac ako 1 % v prospech Pendolina, čo je nevýznamný rozdiel. Prínosy zo zvýšenia rýchlosti pri prejazde oblúkmi však potvrdili výsledky zo zjednodušených výpočtov, i keď rozdiel bol podľa presnejšieho výpočtu o niečo menší. Navyše však pri týchto výpočtoch bolo uvažované jednak s rýchlostnými obmedzeniami v rovnakých úsekoch ako sú v súčasnosti, ale aj s teoretickými limitmi pre každý oblúk, pričom samozrejme nemohlo dôjsť k prekročeniu maximálnej konštrukčnej rýchlosti ETR 470, teda 200 km/h. Vybrané výsledky sú v tabuľke 2.

facturer is reluctant to publish the technical data. In spite of that the calculation is sufficiently accurate and reflects reality.

Although the power of locomotive series 163 is remarkably lower, for maximum speed of 120 km/h currently used on given railway lines this locomotive is good enough. Calculated travel times for conventional locomotive-hauled train and Pendolino train set series ETR 470 on lines with existing speed limits do not differ by more than 1 % in favour of Pendolino, which is a negligible difference. However, benefits from increased speed in curves confirmed results of simplified calculations; although, the difference, according to more precise calculation, was a bit smaller. Moreover, in these calculations we considered speed limits in the same sections as they are at present, yet we also used theoretical speed limits for each curve while certainly the maximum speed of train ETR 470, which is 200 km/h, could not be exceeded. Selected calculation results are in table 2.

Porovnanie jazdných dôb a spotreby energie na vybraných tratiach ŽSR
Comparison of travel times and energy consumption on chosen ŽSR lines

Tab. 2
Tab. 2

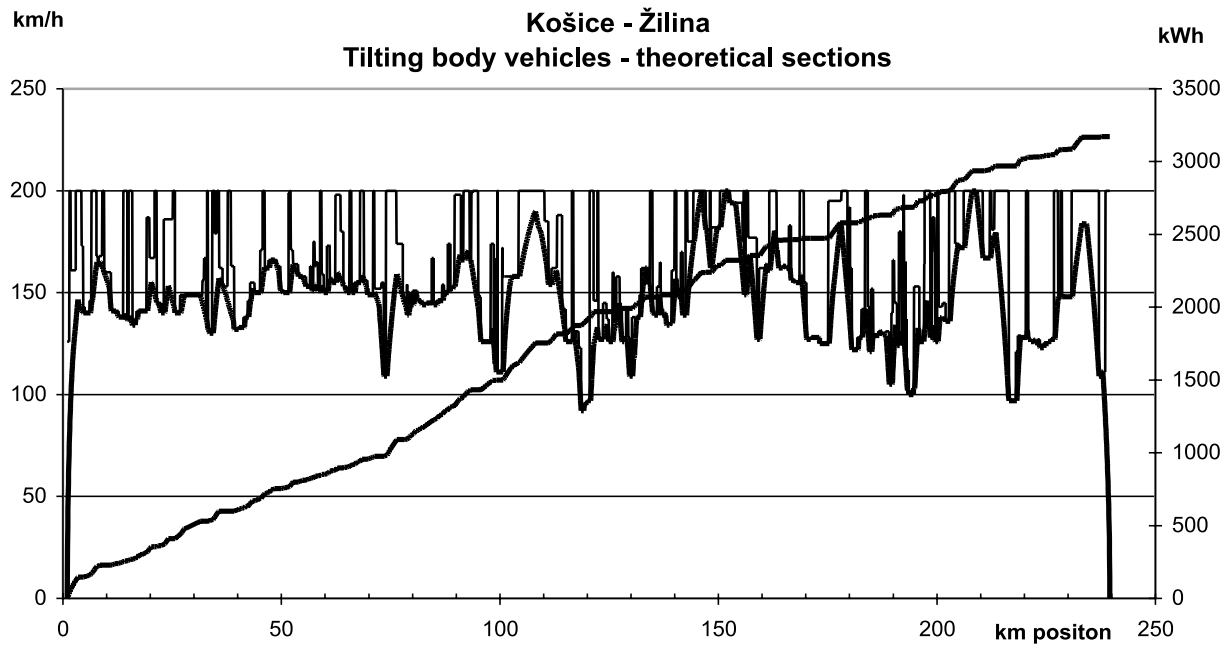
	Track sections existing state		Existing sections for tilting body vehicles		Theoretical sections for tilting body vehicles	
	min	kWh	min	kWh	Min	kWh
Bratislava - Žilina						
163 + 400 t express	120.2	2206	-	-	-	-
ETR 470	120.1	1275	83.54	1782	79.5	2278
Žilina - Košice						
163 + 400 t express	154.1	2374	-	-	-	-
ETR 470	153.6	1626	110.7	1879	102.3	2776
Žilina - Čadca border crossing						
163 + 400 t express	27.8	498	-	-	-	-
ETR 470	27.8	355	19.1	450	18	543

V prípade teoretických rýchlostných limitov pre každý oblúk sa však zreteľne prejavila zvýšená energetická náročnosť, nakoľko dochádzalo k častejším zmenám rýchlosti (zrýchľovanie v miestach s vyššou prípustnou rýchlosťou). Porovnanie pre úsek Košice - Žilina je v grafoch na obr. 7 a obr. 8, kde v prípade teoreticky dosiahnuteľných maximálnych rýchlostí v oblúkoch by sa dosiahla jazdná doba 101,8 min a spotreba energie by činila 3172 kWh, ale pri jazde s obmedzeniami maximálnej rýchlosti v úsekoch ako pri súčasnom stave by síce jazdná doba bola 110,3 min, ale spotreba energie len 2188 kWh, čo je zhruba dve tretiny pri predĺžení času o cca 8 %.

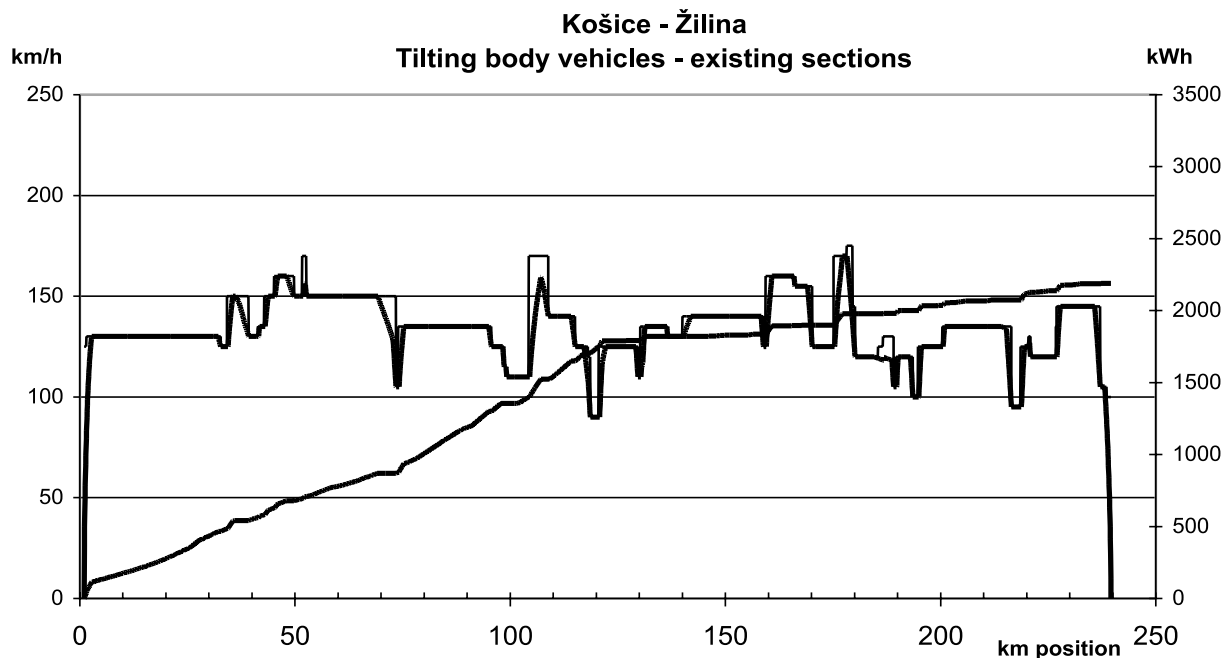
Tento výsledok zároveň vypovedá o potrebe optimalizovať dĺžku úsekov, resp. maximálnu stanovenú rýchlosť, z hľadiska čo najmenej spotreby energie, samozrejme pri zachovaní čo najkratšej jazdnej doby. Už pri zbežnom pohľade na rýchlostné obmedzenia aj pre úseky v dĺžke podľa súčasného stavu je zrejme, že niektoré sú príliš krátke, aby v nich dochádzalo ku krátkodobému zvyšovaniu rýchlosti s jej následným znižovaním. Takáto analýza si však vyžaduje detailné skúmanie traťových pomerov, reálnych možností úprav oblúkov v miestach, kde sú najkritickejšie miesta, a pod.

However, in the case of theoretical speed limits for each curve, increased energy consumption has remarkably gone up, as there were frequent changes in velocity (acceleration in sections with higher permissible speed). Comparison for Košice - Žilina line is in diagrams on figure 7 and 8, where in the case of theoretically permissible velocities in curves the travel time would be 101.8 min and energy consumption would be 3,172 kWh, but in the case of run with maximum speed limits in sections as they exist at present, the travel time would be 110.3 min. However, energy consumption is only 2188 kWh, which is approximately two-thirds while travel time would grow by about 8 %.

This result also shows the necessity to optimise length of the sections or the maximum speed on sections, from the minimum energy consumption point of view, certainly with respect to keep the shortest travel time. When looking at the speed limits for sections with lengths according to the existing state it is clear that some of them are too short for short-time speed increase with consequent deceleration. Such analysis requires more detailed study of track, i.e. real possibilities of curve modifications in sections with the most critical situation, etc.



Obr. 7. ETR 470 - tachogram jazdy a spotreba energie na trati Košice - Žilina, teoretické úseky
Fig. 7. ETR 470 - run diagram and energy consumption on Košice - Žilina line, theoretical sections



Obr. 8. ETR 470 - tachogram jazdy a spotreba energie na trati Košice - Žilina, existujúce úseky
Fig. 8. ETR 470 - run diagram and energy consumption on Košice - Žilina line, existing sections

6. Záver

Cieľom štúdie bolo poukázať na možnosti zvýšenia rýchlosti v existujúcich traťových pomeroch bez výstavby, resp. väčšej rekonštrukcie existujúcich tratí. Zároveň poukázať na energetickú nároč-

6. Conclusion

Aim of the study was to present possibilities for increasing the travel speed in the current situation without construction, or without major reconstruction of existing lines. At the same time,

nosť vozby vyššími rýchlosťami, ktorá tvorí výraznú položku prevádzkových nákladov. Výsledky potvrdzujú možnosť výrazného skrátenia jazdných dôb, zároveň poukazujú na nutnosť venovať pozornosť voľbe úsekov s rýchlostnými obmedzeniami z hľadiska energetiky verus jazdné doby.

to show the energy consumption of trains running at a higher speed, which compose a significant part of the operational costs. The results prove that there is a potential for remarkable shortening of travel times, while at the same time it is necessary to pay attention to selection of track sections with speed limits from the energy consumption versus a travel times point of view.

7. Literatúra - References

- [1] KLINKO, M.: *Možnosti použitia vozidiel s naklápacími skriňami na ŽSR*, Diplomová práca, SjF, ŽU Žilina, 1997
- [2] GREŇČÍK, J., KLINKO, M.: „*Výhody použitia železničných kolajových vozidiel s naklápacími skriňami na ŽSR.*“, s.27-29, *Horizonty dopravy* 1/99
- [3] KRATZ, G.: *Vysokorýchlostné vlaky budúcnosti*, 3. Svetový kongres vysokých rýchlostí EURAILSPEED 98, Berlín 1998
- [4] ŠIMAN, P., PETRÁŠ, J.: Program „*SP Dynamika*“ pre výpočet jazdných dôb a spotreby energie, 1998