

# Mestská hromadná doprava očami fyzika

J. Hirschner, T. Markovič

Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

markoto1@fjfi.cvut.cz

## Abstrakt

Meranie základných mechanických veličín v prostredí Pražskej integrovanej dopravy a ich následná analýza, návod ako postupovať pri meraní v teréne pri použití meracích prístrojov firmy Pasco, eliminácia systematických chýb merania pomocou práce s grafom použitím funkcie linear fit, oboznámenie so špeciálnym softwarom datastudio. Analýza trasy metra A, autobusu 176 a 217 a električky (tramvaje pozn. prekl.) 18. Návrh merania hĺbky polozenia vertikálneho prevýšenia objektov s prístupom pohyblivých schodov. Záznam merania formou grafu.

## 1 Úvod

Mestská hromadná doprava je dopravný systém, ktorý všetci z nás pravidelne používajú. Keďže sa doteraz nevenovala dostatočná pozornosť bližšiemu priblíženiu jednotlivých fyzikálnych aspektov tohto všeobecne známeho systému dopravy študentom, autori tejto práce si dali za povinnosť tento fakt napraviť. Úlohou tohto merania bolo overenie spoľahlivosti meracích prístrojov mechanických veličín fakulty v laboratórne nepriateľskom prostredí Pražskej integrovanej hromadnej dopravy. Rovnako aj zmeranie normálového a dotyčnicového zrýchlenia jednotlivých najfrekventovanejších liniek. Prebehlo aj meranie hĺbky stanice metra na *Náměstí Míru* a porovnanie nameraného údaju s oficiálne udávanými hodnotami. Celá nasledujúca publikácia predpokladá len základnú znalosť mechaniky z dôvodu, že merané veličiny boli len z oblasti kinematiky a dynamiky.

Publikácia obsahuje oboznámenie s meracími metódami a použitými prístrojmi, analýzu trasy metra linky A zo stanice *Depo Hostivař* do stanice *Dejvická*, analýzu trasy autobusu linky 176 zo stanice *Stadion Strahov* na *Karlovo Náměstí*, analýzu trasy električky (tramvaje) linky 18 zo stanice *Moráň* na *Staroměstské Náměstí*, analýzu trasy autobusu linky 217 zo zastávky *Dejvická* na *Koleje Strahov* a analýzu hĺbky polozenia nástupištia stanice metra *Náměstí Míru*, všetko zdokumentované formou grafu.

## 2 Experimentálna realizácia a metódy

Základom celého merania boli meracie prístroje firmy *Pasco*, určené na laboratórne cvičenia fyziky, bežne dostupný prenosný počítač, ktorý bol použitý k integrácii jednotlivých meracích komponentov s programom *Datastudio* a zápisky z merania.

Použité prístroje boli:

*PS-2000 Xplorer Datalogger* - Interface ktorý dokáže zaznamenať údaje poskytnuté meracími prístrojmi do formy vhodnej k spracovaniu v programe *Datastudio*. Funkciou prístroja je aj ukladanie experimentálnych údajov do pamäti pre ich neskorší prenos do osobného počítača.

**PS-2118 PASPORT Acceleration Sensor (2-axis)** - Akceleromer o dvoch osách. Základný prístroj celého merania, ktorý vykonal 100% meraní jednotlivých dopravných prostriedkov.

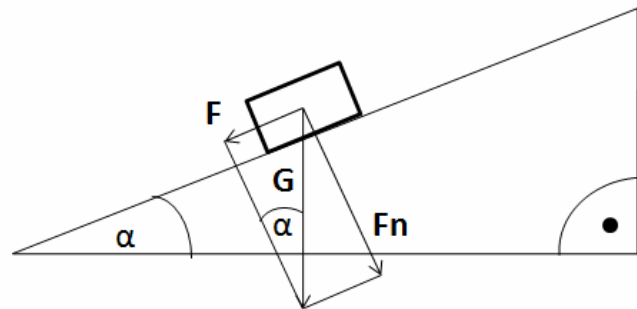
**PS-2103A PASPORT Motion sensor** - senzor pohybu schopný na základe Dopplerovho efektu vypočítať na vzdialenosť 10 metrov relatívnu rýchlosť pohybujúceho sa telesa. Bol použitý na meranie hĺbky polozenia metra.

**Regulárne stopovacie hodinky**

**HP Pavilion dv 6590 ec notebook**

Zapojenie *PS-2000 Xplorer Datalogger* do notebooku *HP Pavilion dv 6590 ec* bolo uskutočnené formou USB kábla. Spracovanie nameraných údajov prebehlo v programe *Datastudio* (obr. 2.1-2.5) voľne dostupným na stiahnutie z oficiálnych stránok firmy *PASCO* [1]. Inštalácia prístrojov bola vo všetkých dopravných prostriedkoch zhodná. Základom bolo postaviť merací prístroj pokiaľ čo najvodorovnejšie a najstabilnejšie k minimalizácii chýb merania. Zápisky z merania boli vytvárané formou denníka na základe voľného pozorovania udalostí zaznamenané spolu s časovým údajom, ktorý bol získaný na základe použitia stopovacích hodínok. Jednotlivé udalosti boli následne dodatočne zanesené do grafu pre názornejšiu ilustráciu (obr. 2.1-2.5). Pri meraní všetkých dopravných prostriedkov bol použitý len *PS-2118 PASPORT Acceleration Sensor (2-axis)* senzor, ktorého 2 osi postačovali na analýzu zmien dostredivých a dotyčnicových (smerových) zložiek zrýchlenia.

Meranie hĺbky polozenia stanice metra prebehlo vo viacerých fázach. Najprv bol pomocou stopovacích hodínok nameraný čas cesty zhora nadol a späť (obr. 2.6). Po položení *PS-2118 PASPORT Acceleration Sensor (2-axis)* senzoru na gumové zábradlie pohyblivých schodov sa ukázalo že y-vá os udáva zrýchlenie v pomere k tiažovému zrýchleniu na povrchu Zeme. Použitím faktu že pohyblivé schody sú inerciálna vzťahná sústava (odvodili sme to na základe našich meraní) a preto je v nej nulové pôsobenie vonkajších síl (s výnimkou pôsobenia sily gravitačnej v našom prípade) [2] sme z pomeru pôsobenia tiažovej a dotyčnicovej sily dostali pomer  $\mu$  (čo je údaj udávaný prístrojom) a odvodili sklon schodov (obr. 1.1) (1):



Obr. 1.1

$$\alpha = \arcsin \mu \quad (1)$$

Následne bola zmeraná rýchlosť postupu pohyblivých schodov pomocou prístroja *PS-2103A PASPORT Motion sensor* a to jeho položením do priestoru medzi pohyblivými schodmi a jeho vertikálnym nasmerovaním o vypočítaný uhol  $\alpha$  smerom proti jednému z experimentátorov. Ten sa viezol po schodoch smerom dolu k prístroju a v priestore medzi schodišťami držal plochý predmet, ktorého relatívnu polohu a rýchlosť zaznamenával už spomenutý pohybový senzor. V programe *Datastudio* sa následne odvodí rýchlosť ktorá sa ukázala ako rovnomerná (obr. 2.1) a pomocou základného kinematického vzorca (2) [3] sa vypočíta dĺžka zábradlia schodišťa z už nameraných hodnôt :

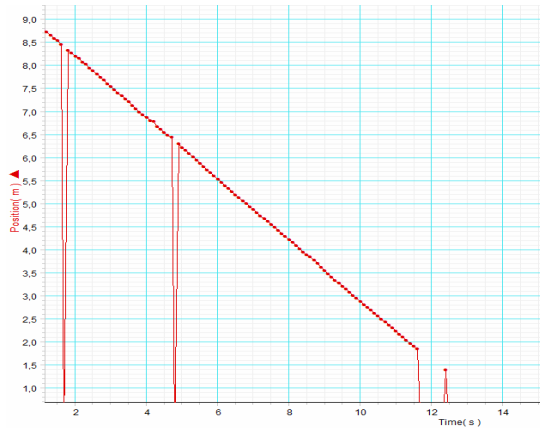
$$s = v \cdot t \quad (2)$$

A použitím ďalšieho základného vzorca (3) sa spočíta samotná hĺbka metra,  $h$  (obr. 1.1):

$$h = s \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

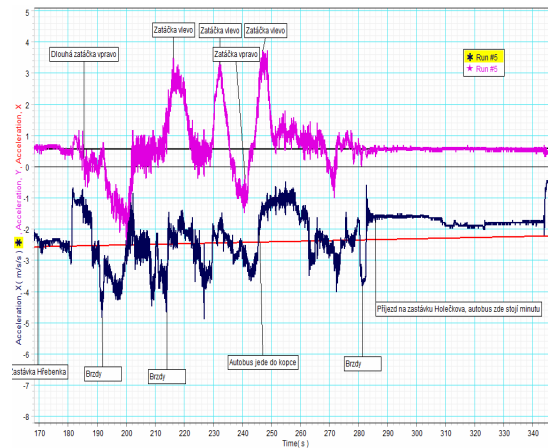
Všetky namerané údaje boli prevedené do prenosného počítača *HP Pavilion dv 6590 ec*, kde boli v programe *Datastudio* následne spracované do formy grafov (obr. 2.1-2.5).

### 3 Výsledky



Obr. 2.1

Lineárny pokles vzdialenosti v závislosti od času implikuje rovnomernú rýchlosť pohybu schodov



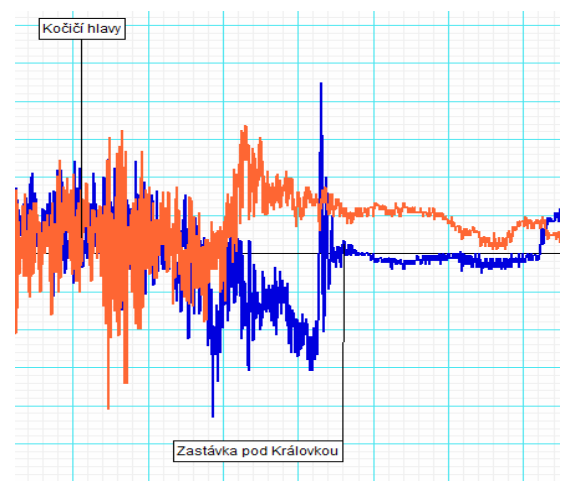
Obr. 2.2

Na grafe linky 176 (autobus) sú zreteľné výchylky spôsobené vertikálnym prevýšením dráhy ako aj ich korekcia funkciou linear fit



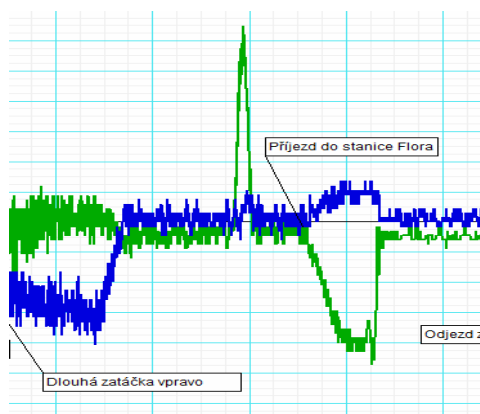
Obr. 2.3

Na grafe električky je zreteľná prevaha smerovej zložky zrýchlenia (červená) nad zložkou normálovou (zelená)



Obr. 2.4

Na grafe linky 217 (autobus) sú zreteľné, rovnako ako aj na 176 linke tzv. spätné rázy po brzdení reprezentované prudkou zmenou smerového zrýchlenia (modrá).



Obr. 2.5

V zázname merania metra sa prejavil zaujímavý fenomén tzv. dobiehania cestovného poriadku reprezentovaný neočakávanou zmenou smerového zrýchlenia (zelená)

Meranie	1.	2.	3.
Čas cesty po schodoch	139.53 s	139.27 s	139.50 s

Obr 2.6

## 4 Diskusia

V grafe rýchlosti pohybu na pohyblivých schodoch sú patrné výchylky. Tie môžu byť spôsobené poškodením prístroja, ktorý bol označený štítkom ako „nefunkčný“, resp. prekážkami inštalovanými v medzischodištnom priestore, kvôli ktorým musela byť doska na ktorú bol zameraný pohybový senzor pravidelne nadvihovaná čím sa mohla prekážka stratiť z dráhy zvukových vln vysielaných meracím prístrojom. To spôsobilo že sa zvukové vlny neodrazili späť k prístroju na analýzu a merací prístroj preto nemohol zaznamenať žiadny pohyb, čo súhlasí so spadnutím hodnoty grafu rýchlosti na nulovú hodnotu. Použitá metóda sa ale ukázala pomerne presná a vypočítaná hĺbka 44,89 m zodpovedá oficiálne udávanej hodnote 52 m [4] (za predpokladu že schody na nástupište, ktoré sme merali sa nachádzajú pod úrovňou povrchu). Preto sa spomenutá metóda môže použiť na meranie vertikálnej polohy ľubovoľného objektu s prístupom pohyblivých schodov (za predpokladu že sa schody pohybujú rovnomerným priamočiarym pohybom). Uvedená metóda je variantou na meranie výšky budovy pomocou známej metódy zmerania zrýchlenia a doby jazdy výťahu.

Pri porovnaní hodnôt zrýchlenia grafu metra a ostatných dopravných prostriedkov je patrné, že jazda metrom je k pasažierom najohľadupľnejšia a zmeny v zrýchlení sa tu najlepšie pozorujú. U ostatných dopravných prostriedkov sú výsledky merania menej spoľahlivé z dôvodu značných otrasov vozidiel a výraznejšieho vertikálneho prevýšenia trasy. Chyba spôsobená vertikálnym prevýšením sa dá eliminovať softwarovo pomocou funkcie *linear fit*. Zo zaznamenaných chýb sme odvodili, že *PS-2118 PASPORT Acceleration Sensor (2-axis)* pracuje na gyroskopickom princípe. To bolo práve vďaka tomu, že na naklonenom svahu keď bolo vozidlo v pokoji, prístroj napriek tomu indikoval zmenu zrýchlenia. Ďalšie znehodnotenie experimentálnych údajov tentoraz spôsobené otrasmi má tiež výpovednú hodnotu, pretože minimálne indikuje stav povrchu vozovky.

Pri bližšom porovnaní údajov smerového a normálového zrýchlenia autobusových liniek a električky (tramvaje pozn. prekl.) vyplynie, že zatiaľ čo v autobuse prevláda absolútna hodnota normálovej zložky zrýchlenia nad smerovou (tečnou pozn. prek.), v električke sa prejavuje opačný trend. Pôsobenie vonkajšej sily tu pasažieri pociťujú výraznejšie pri brzdení resp. rozbíhaní ako pri zatáčaní súpravy.

## 5 Záver

Presnosť získaných experimentálnych údajov závisí od dosiahnutého stupňa izolácie meracieho prístroja od rušivých vplyvov okolitého prostredia. Na druhej strane sú to práve vyššie spomenuté nepresnosti, ktoré pomohli odhaliť princíp fungovania jednotlivých meracích prístrojov (gyroskopický princíp, Dopplerov efekt). Znehodnotený údaje majú stále istú výpovednú hodnotu (zistenie zmeny vertikálnej polohy z naklonenia, kvality vozovky).

Ukázalo sa, že uvedená metóda merania vertikálneho prevýšenia nepriamo, je pomerne presná vzhľadom na dosiahnutý stupeň izolácie. Dala by sa všeobecne použiť na meranie výšky ľubovoľného objektu s prístupom pohyblivých schodov. Hĺbka nástupištia na stanici *Náměstí Míru* bola nameraná týmto spôsobom na 44,89 m.

V prostredí metra údaje získané prístrojmi najviac odpovedali udalostiam pozorovanými experimentátormi. Veľmi zaujímavé tu boli prejavy smerového zrýchlenia mimo staníc tzv. dobiehanie cestovného poriadku. Merania ostatných dopravných prostriedkov boli čiastočne znehodnotený najmä otrasmi vozidla. V električke sa silno prejavuje smerová zložka zrýchlenia na rozdiel od autobusov, kde je presne opačná tendencia vozidla k silným prejavom zrýchlenia normálového. Autobusové linky taktiež prejavujú tendenciu k tzv. spätnému rázu, po zabrzdení sa prejavia tlmiče vozidla a to tak, že po skončení pôsobenia

brzdnej sily sa vrátia späť do pôvodnej polohy. To sa prejaví reakciou na meracom prístroji, ktorý túto udalosť zaznamená ako prudký impulz opačného smeru. Veľkosť tohto impulzu môže dosiahnuť hodnoty vyše  $3 \text{ ms}^{-2}$ .

## 6 Pod'akovanie

Autori by chceli poďakovať najmä ing. Vojtěchovi Svobodovi, Csc. z katedry fyziky FJFI ČVUT za zapožičanie meracích prístrojov bez ktorých by tento experiment nebolo možno uskutočniť, za organizáciu fyzikálneho seminára a za odporúčenie webových stránok firmy PASCO. Poďakovanie patrí aj Fakulte Jadernej a Fyzikálne Inženýrskej, Českého Vysokého Učení Technického, za zapožičanie ďalšej techniky, ktorá bola užitá najmä k príprave tohto príspevku. Svoju vďaku by sme aj radi adresovali vodičom súprav Pražskej integrovanej hromadnej dopravy, za prejavenu trpezlivosť a pochopenie pri našom rozostavovaní prístrojov, nakoľko sme sa snažili obmedziť naše prekážanie ostatným pasažierom na minimum.

## 7 Referencie

- [1] <http://www.pasco.com/support/downloads/home.html>
- [2] I. Štoll, *Mechanika*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1995
- [3] I. Teplička, *Fyzika, pomôcka pre maturantov a uchádzačov o štúdium na vysokých školách*, ENIGMA, Nitra, 2001
- [4] [http://cs.wikipedia.org/wiki/N%C3%A1m%C4%9Bst%C3%AD\\_M%C3%ADru\\_\(stanice\\_metra\\_v\\_Praze\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/N%C3%A1m%C4%9Bst%C3%AD_M%C3%ADru_(stanice_metra_v_Praze))