

Měření brzdné dráhy automobilu

František Černý¹, Jaroslav Reichl²

¹ČVUT Praha, Fakulta strojní, ²SPŠST Panská, Praha

Abstrakt

V rámci absolventského projektu proměřoval František Černý, tehdy žák SPŠST Panská, brzdou dráhu automobilu s využitím sond firmy Vernier. Měření, zpracování naměřených dat i závěry učiněné na základě měření mohou být inspirací pro další podobná měření.

Úvod od učitele

O automobily a jejich popis se František zajímá už dlouho. Když pak začal v hodinách fyziky pronikat do přesnějšího popisu jeho koníčku, začal se ptát na detaily těch fyzikálních jevů, které souvisely právě s automobily, popisem jejich vlastností i zabezpečovacích prvků v nich se používajících. Současně začínal uvažovat nad tématem absolventského projektu, který musel během čtvrtého ročníku studia vypracovat. Vzhledem k tomu, že v průběhu třetího ročníku studia úspěšně získal řidičské oprávnění, začala se volba tématu absolventského projektu ubírat jedním směrem. Učitele fyziky, který by měl pro Františkův koníček pochopení a který by absolventský projekt zaštilil jako vedoucí, nebylo nutné dlouho hledat.

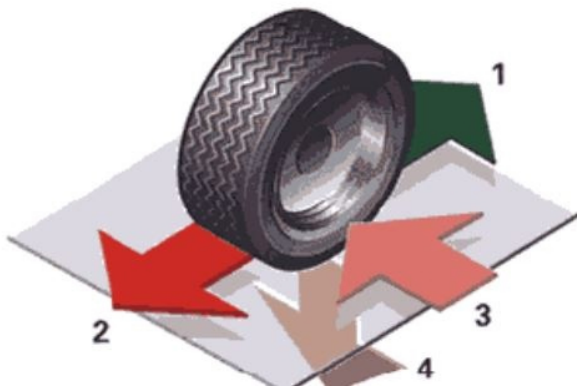
Výběr tématu své budoucí práce (viz [1]) – proměřit brzdou dráhu automobilu na letních i zimních pneumatikách s aktivovaným i deaktivovaným ABS – František pak úspěšně obhájil před předmětovou komisí. V realizaci jeho práce tedy zdánlivě nic nestálo v cestě.

Průběh měření

Teoretický základ – stabilita automobilu, Kammova kružnice, ABS

Protiblokovací systém ABS (*Anti-lock Braking System*) je jedním ze základních prvků aktivní bezpečnosti vozidla (více viz [4]). Byl vyvinut firmou BOSCH v roce 1978, ačkoliv myšlenka na takový systém je téměř o 50 let starší. Systém ale bylo možné zrealizovat až s dostatečně pokročilou elektronikou. Kolo automobilu, ve kterém je aktivován systém ABS, se stále odvaluje a tím se zabraňuje ztrátě adheze mezi kolem a vozovkou. Odvalující se kolo přitom umožňuje zachování stability, ovladatelnosti a říditelnosti vozidla i v mezních situacích (prudké brzdění, brzdění na kluzké vozovce,...). V těchto situacích řidiči většinou začnou brzdit velmi prudce, což způsobí zablokování kol zejména u konvenčních brzdových systémů, v nichž velikost brzdné síly působící v brzdách automobilu závisela na velikosti síly stlačující brzdny pedál. Zablokované kolo pak nepřenáší žádnou boční sílu, a proto neumožňuje zatočení.

K základním předpokladům bezpečné jízdy patří zejména dobrá ovladatelnost automobilu v kritických a nečekaných situacích. K tomu je zapotřebí dobrá přilnavost kol k vozovce, což vyjadřuje pojem adheze. Ta vychází, jak vidíme na obr. 1, ze sil působících za jízdy na plochu kola, které je ve styku s vozovkou.



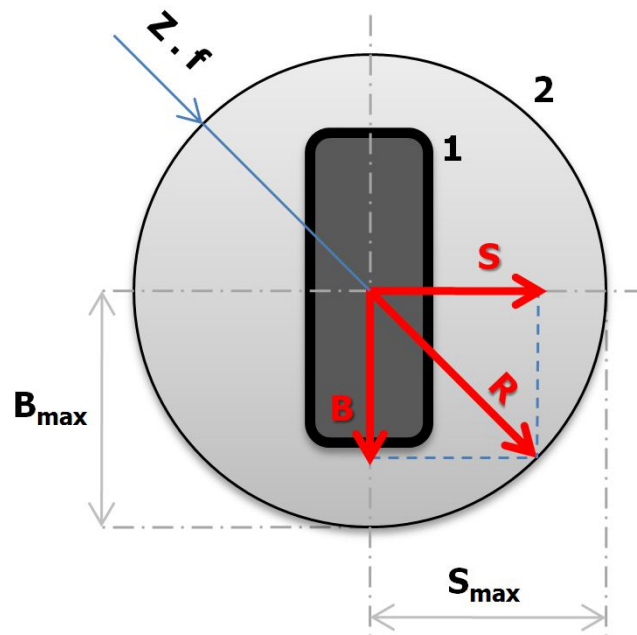
- 1 – hnací síla
- 2 – brzdná síla (působí proti hnací síle)
- 3 – stranové boční síly zajišťující říditelnost vozu
- 4 – tíhová síla spolu se třením umožňuje působení ostatní sil

Obr. 1. Síly působící na kolo, viz [2].

Jízdní vlastnosti automobilu ovlivňuje též moment setrvačnosti automobilu (při jeho otáčení kolem svislé osy) a moment setrvačnosti jeho kol. Současně je třeba vzít v úvahu i odporové síly vzduchu, sílu bočního větru a odstředivou sílu působící během zrychleného pohybu na automobil.

Ke znázornění okamžitých adhezních vlastností vozidla se používá takzvaná Kammova kružnice (viz obr. 2), jejíž průměr je úměrný mezi přilnavosti pneumatiky k vozovce (čím lepší adheze, tím větší je průměr této kružnice). Aby nedošlo ke ztrátě adheze mezi pneumatikou a vozovkou, nesmí výslednice podélných a příčných sil \vec{R} překročit velikost síly \vec{B}_{\max} , která určuje poloměr uvažované kružnice. V praxi však mají pneumatiky větší přilnavost v podélném směru, takže skutečná Kammova kružnice má spíše tvar elipsy.

Pokud je velikost brzdné síly \vec{B} rovna maximální velikosti přenesené síly \vec{R} , pak musí být boční síla \vec{S} rovna nule. V tom případě má kolo nulové boční vedení. Je-li brzdná síla \vec{B} dokonce větší než maximální možná brzdná síla \vec{B}_{\max} , pak se kolo zablokuje a pneumatika se dostává do smyku. Jsou-li kola řídicí nápravy ve smyku bez bočního vedení, vozidlo se stává neovladatelné! Detailně je problematika popsána ve [3].



Obr. 2. Kammova kružnice, viz [3].

Základními součástmi ABS jsou snímače pro zjištění aktuální frekvence otáčení kol, řídicí jednotka pro zpracování signálů z těchto snímačů a akční členy, které zajistí požadovanou odezvu. Signály ze snímačů otáček kol jsou vyhodnoceny řídicí jednotkou, která reguluje velikost brzdné síly pro příslušné kolo automobilu.

Princip rozpoznávání krizových situací je takový, že řídicí jednotka neustále porovnává velikost referenční rychlosti vozu (určena z pohybu dvou diagonálně umístěných kol) s velikostí rychlosti na všech čtyřech kolech. Na základě vznikajících rozdílů zjišťuje zrychlení, zpomalení a skluz každého kola a vypočítává odpovídající řídicí impulsy pro hydraulickou jednotku. V případě náhlého snížení velikosti rychlosti jednoho ze čtyř kol pod naprogramovanou hodnotu oproti referenční velikosti rychlosti je (bez ohledu na polohu brzdového pedálu) odpuštěn brzdý tlak na příslušném pomalejším kole a ihned po jeho odblokování se tento brzdý tlak obnovuje. Podle povahy vozovky probíhá za sekundu 4 až 10 takovýchto regulačních cyklů. (První modely ABS přitom nedokázaly přibrzdit jednotlivá kola, ale pouze dvojice kol. S rozvojem rychlé elektroniky je možné ovládat každé kolo nezávisle.)

Měřicí systém

Prvním problémem, který vyvstal při přípravách realizace absolventského projektu, bylo zvolit měřicí systém a vhodnou metodu měření. Z bezpečnostních důvodů jsem vybral tři počáteční velikosti rychlosti 40 km/h, 55 km/h a 70 km/h, ze kterých jsem plánoval automobil brzdit. Brzdnou dráhu jsem odhadoval v řádu desítek metrů; bylo potřeba tedy zvolit takovou metodu měření, která by tuto vzdálenost dokázala uspokojivě změřit. V úvahu připadalo několik možností.

Jedoucí automobil natočit kamerou a výsledný záznam poté analyzovat. Najít vhodný software by jistě problém nebyl, problém byl najít vhodný úsek silnice, na kterém by měření mohlo probíhat a k němuž by přiléhal několik set metrů dlouhý volný prostor, kam by bylo možné umístit kameru. Ta by musela být na stativu, její osa by musela být kolmá k silnici, po níž by automobil jel, a ještě by musel být automobil na výsledném záznamu dostatečně viditelný, aby bylo možné jeho pohyb analyzovat. Splnění těchto požadavků najednou se ukázalo být nereálné.

Druhou metodou bylo využít senzory firmy Vernier. Jako první mě napadlo použít senzor GoMotion. Ten ale (po konzultaci s vedoucím práce Mgr. Reichlem a jeho kolegy z KDF MFF UK Praha) byl značně nevhodný. Bez velkého šumu je schopen měřit v rozmezí délek několika metrů, nikoliv několika desítek metrů.

Další volbou bylo použití senzoru GPS, který ovšem má příliš malou vzorkovací frekvenci (a to 1 Hz). Pro účely našeho měření, kdy jsem očekával, že automobil bude brzdit po dobu několika sekund, se ukázala tato vzorkovací frekvence jako nedostatečná. Přesto jsem i s tímto senzorem měření provedl a data zpracoval (viz podkapitola Zpracování dat).

Posledním senzorem, který přicházel v úvahu, byl senzor měřící velikost zrychlení. Tento senzor umožňoval nastavit vzorkovací frekvenci 50 Hz, což vedlo k naměření dostatečného množství dat. Bylo ale nutné najít metodu, jak na základě naměřené velikosti zrychlení vypočítat dráhu, kterou automobil urazil (viz podkapitola Zpracování dat).

Vhodný terén

Druhým zásadním problémem bylo najít vhodný terén, který by měl splňovat několik parametrů:

- malý provoz, abychom při měření nerušili ostatní vozidla, chodce a cyklisty a abychom minimalizovali riziko vzniku nehody;
- relativně rovný úsek, na kterém bych se mohl v jedoucím automobilu soustředit na velikost rychlosti, na způsob brždění, ... a nemusel sledovat ještě zatáčky;
- minimální sklon vozovky.

Po delším přemýšlení a hledání se takovým vhodným úsekem silnice ukázala být málo používaná cesta nedaleko Cholupic v jihovýchodní části Prahy.

Deaktivovaný ABS

Od začátku příprav bylo jasné, že měření provedu na letních a zimních pneumatikách, přičemž oboje pneumatiky použiji v automobilu s ABS a v automobilu, který tento systém nemá. Několik dní před začátkem měření se mi podařilo najít pojistku, kterou lze v automobilu ABS deaktivovat, aniž by se řízení automobilu zablokovalo nebo byla jinak ohrožena bezpečnost jízdy. To byla velká výhoda: všechna měření budu moci uskutečnit s jedním automobilem! Odpadne tak problém s nepatrně různými hmotnostmi dvou automobilů, s různým vzorkem použitých pneumatik, ...

Vlastní měření

Vlastní měření jsem provedl pod dohledem vedoucího práce Mgr. Reichla v pondělí 28. října 2019. Nejdříve byla provedena všechna měření (3 různé velikosti počáteční rychlosti, aktivovaný ABS, deaktivovaný ABS) na letních pneumatikách – a to jak pomocí senzoru zrychlení, tak s využitím senzoru GPS. Poté byly pneumatiky vyměněny za zimní a všechna měření byla zopakována.

Automobil jsem řídil sám, vedoucí práce pořídil dokumentační fotografie a obsluhoval datalogger s připojenými senzory. Automobil jsem vždy rozjel a po dosažení dané velikosti rychlosti jsem začal brzdit. Danou velikost počáteční rychlosti jsem hlídal jak s využitím klasického tachometru, tak s využitím aplikace na mobilním telefonu, která nastavenou velikost rychlosti signalizovala akusticky.

Zpracování dat

Naměřená data jsem z formátu dostupného pro datalogger firmy Vernier převedl do formátu *.XLSX a poté data načel do programu *Mathematica*. V něm jsem provedl veškeré výpočty a vykreslil příslušné grafy.

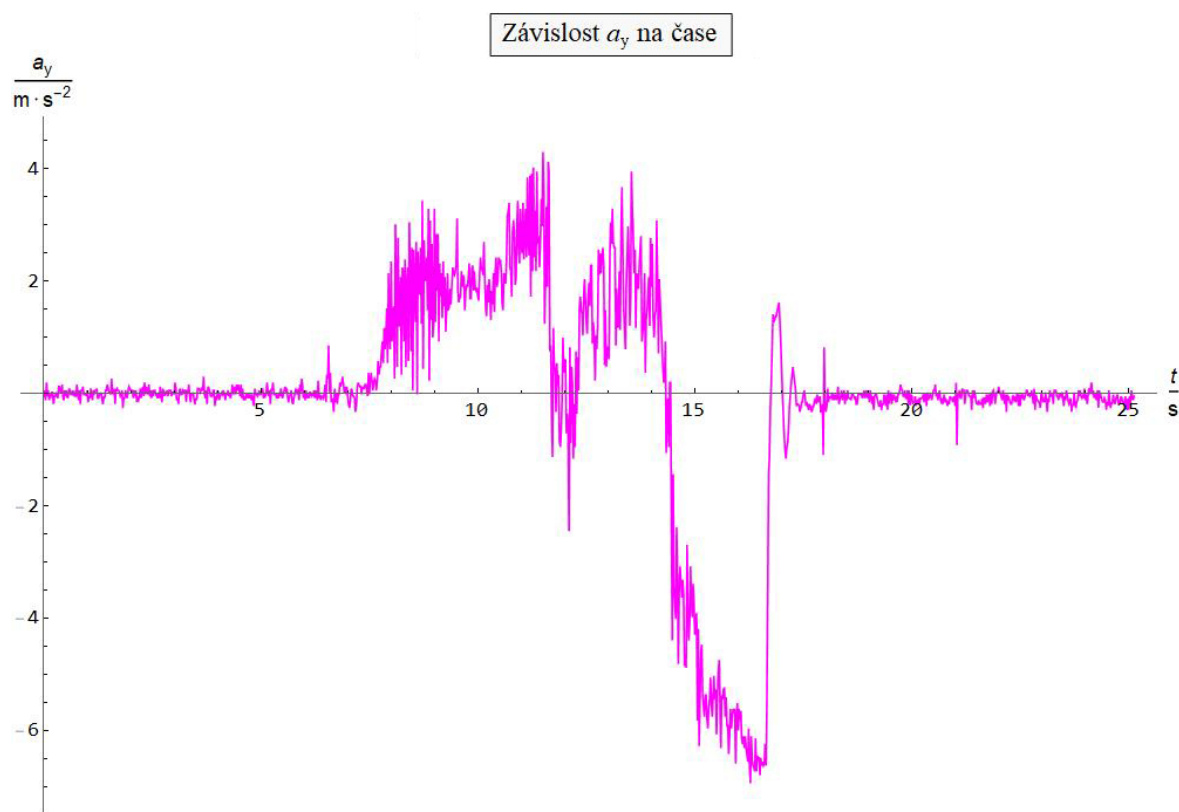
Naměřené velikosti okamžitého zrychlení jsou nespojitě body. Proto je nutné použít metodu řešení diferenčních rovnic, kdy hodnotu nové fyzikální veličiny (v našem případě velikost rychlosti a poté i dráhu) počítáme v jednotlivých časových krocích, které jsou dány vzorkovací frekvencí použitého čidla. V případě použitého akcelerometru je tedy $\Delta t = 0,02$ s.

Výpočet brzdné dráhy vychází ze základního definičního vztahu pro velikost zrychlení: $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$, kde Δv je změna velikosti rychlosti, která nastala za dobu Δt . Z uvedeného vztahu postupně vyjádříme $\Delta v = a \cdot \Delta t$, přičemž platí, že $\Delta v = v - v_0$. A nyní už dostáváme finální vztah $v = v_0 + a \cdot \Delta t$. Veličinu v je nutné chápat jako nově vypočtenou velikost rychlosti na základě předchozí velikosti rychlosti v_0 .

Analogicky pro výpočet dráhy uražené automobilem vyjdeme ze vztahu $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, z něhož vyjádříme $s = s_0 + v \cdot \Delta t$, kde s_0 je dráha vypočítaná v minulém kroku a s je dráha vypočítaná v aktuálním kroku výpočtu.

Následující grafy jsou vykresleny na základě měření na letních pneumatikách při aktivovaném ABS při velikosti počáteční rychlosti 40 km/h. Data jsem ale pochopitelně zpracoval pro všechna měření.

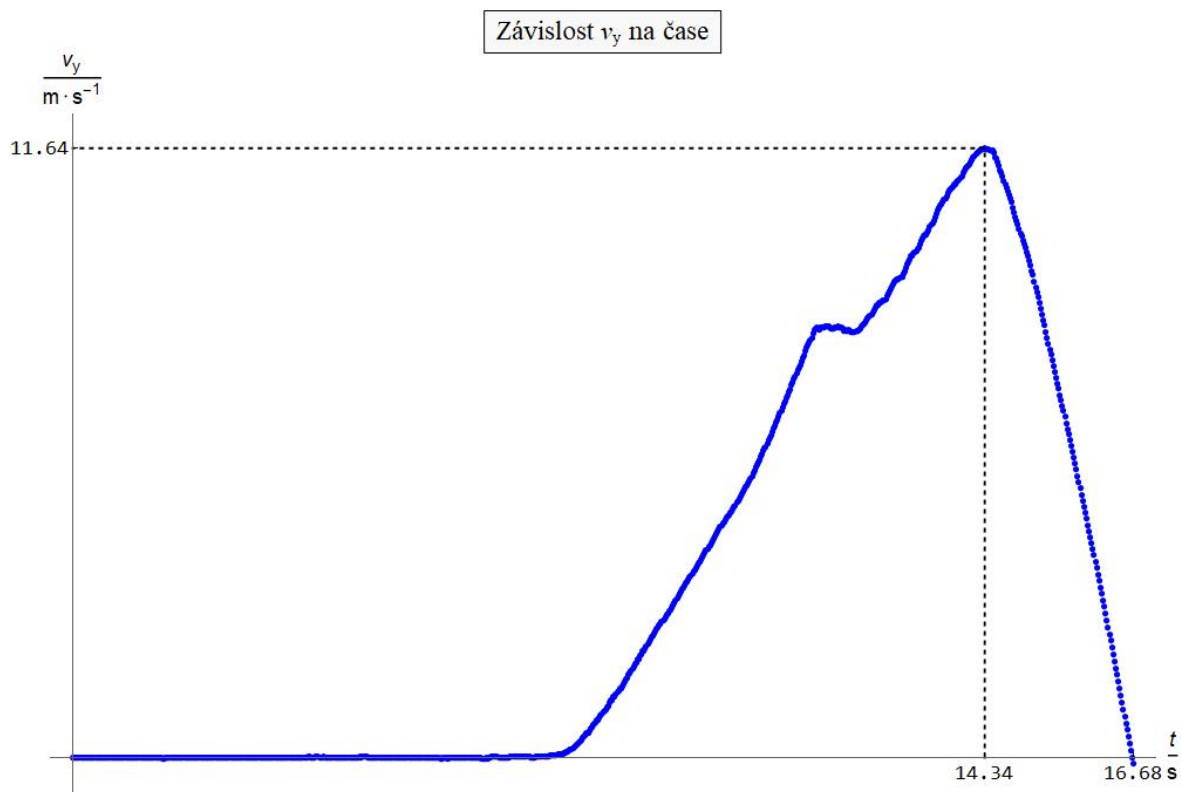
V grafu na obr. 3 je zobrazena závislost velikosti zrychlení a_y na čase t . (Vykreslení složky a_y vyplývá z umístění senzoru zrychlení v automobilu.) Ze začátku je zrychlení v podstatě nulové, neboť v tu chvíli automobil stál na místě, od sedmé sekundy je vidět první „záškrub“: v tu chvíli se automobil začal rozjíždět. Do cca dvanácté sekundy se automobil rozjíždí, pak je vidět změna ve velikosti zrychlení, čemuž odpovídá přecházení na další převodový stupeň. Od cca patnácté sekundy je velikost zrychlení záporná, což odpovídá brzdění automobilu. Zastavení automobilu odpovídá pokles velikosti zrychlení na nulu.



Obr. 3. Graf závislosti zrychlení a_y na čase.

Závislost velikosti rychlosti v_y na čase t je zobrazena v grafu na obr. 4. Jak bylo zmíněno již u přechodného grafu, krátká prodleva v nárůstu velikosti rychlosti je zapříčiněna přecházením na vyšší převodový stupeň. Z maxima grafu lze vyčíst maximální velikost

rychlosti v_y , v tomto případě $11,64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá $41,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Dále lze z grafu odečíst dvě pro nás kritické hodnoty času: časy $14,34 \text{ s}$ a $16,68 \text{ s}$ - čas začátku brždění a čas konce brždění. Tyto hodnoty budou podstatné dále.

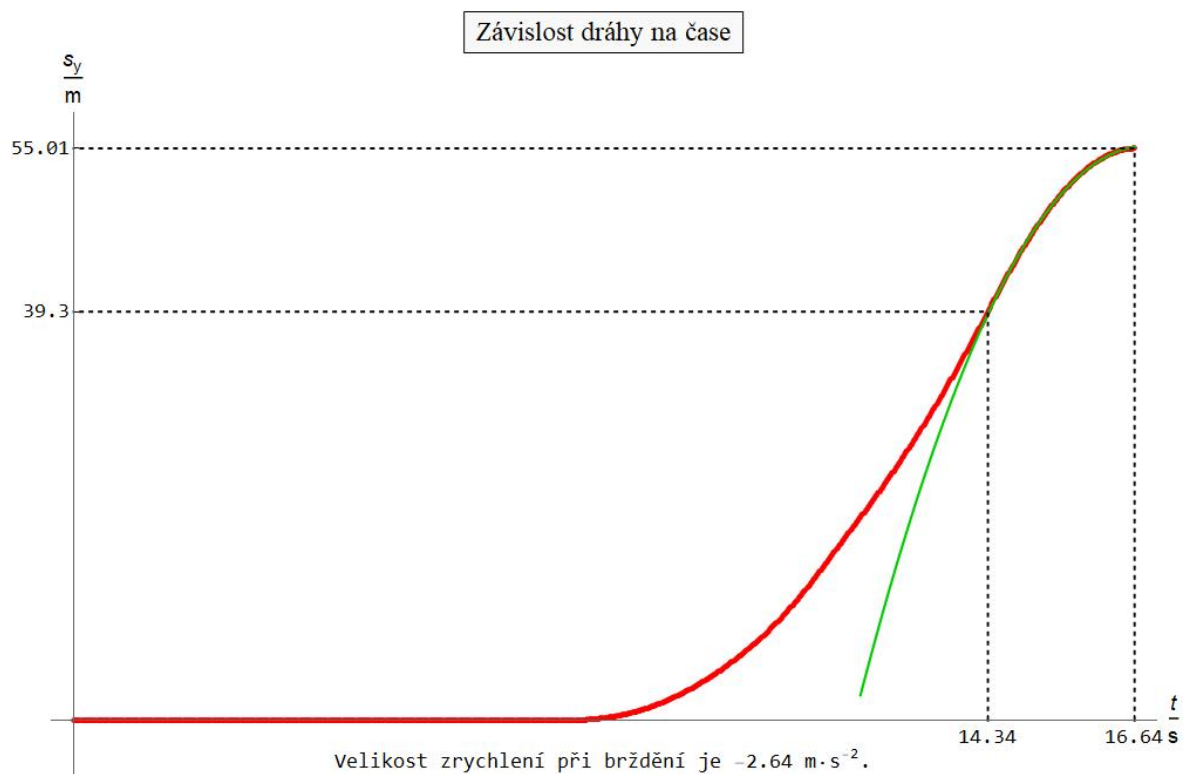


Obr. 4. Graf závislosti velikosti rychlosti v_y na čase.

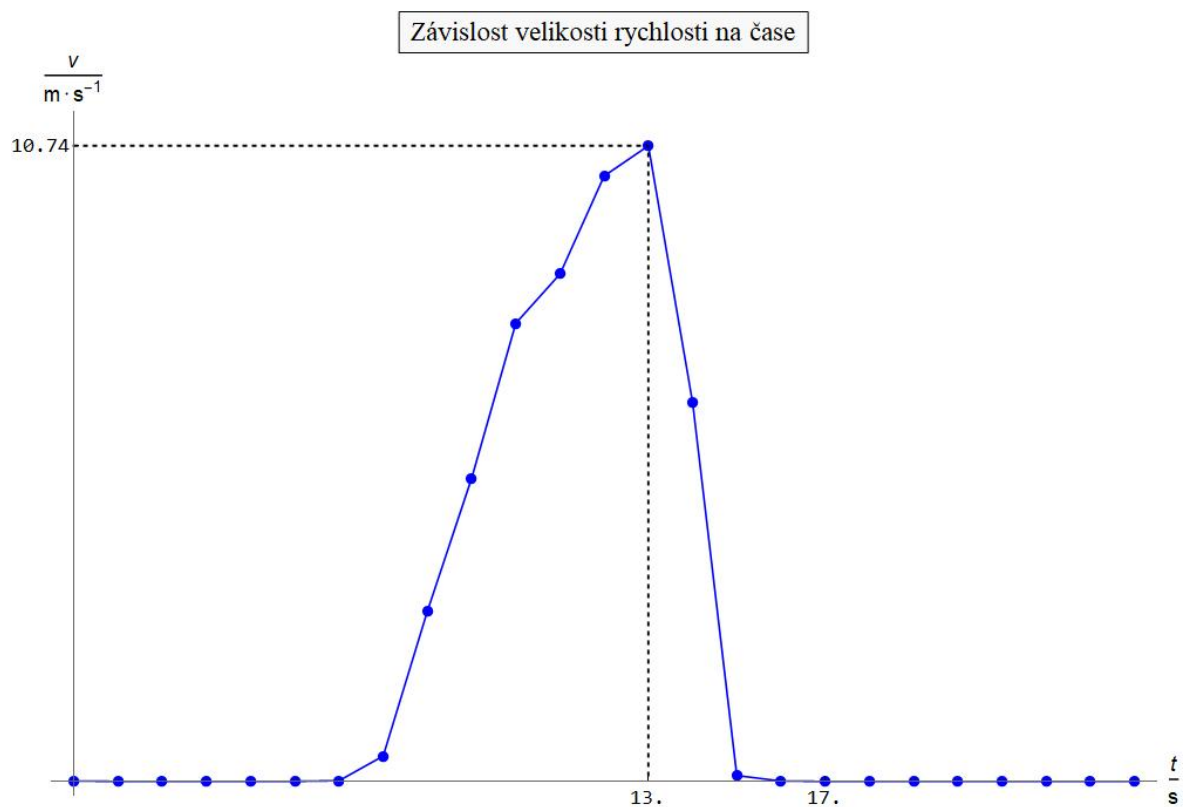
Třetí a nejdůležitější graf je graf závislosti dráhy s_y na čase t , který je zobrazen na obr. 5. V grafu jsou vyznačeny i z minulého grafu odečtené hodnoty času začátku a konce brždění. Na základě těchto časů určíme brzdnou dráhu $15,7 \text{ m}$. V grafu je také zobrazena spojitá křivka prokládající tu část grafu, která odpovídá brždění automobilu. Za předpokladu, že by automobil brzdil se stálým zrychlením, by bylo možné brzdnou dráhu počítat pomocí vztahu $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$, který odpovídá kvadratické funkci v proměnné t . A právě touto křivkou je uvažovaná část grafu proložena. Na základě této závislosti vychází velikost zrychlení při brždění $a_y = -2,64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Na první pohled se může zdát být podivné, že jak závislost dráhy na čase, tak závislost velikosti rychlosti na čase pro brždění odpovídá rovnoměrně zrychlenému pohybu. V grafu závislosti velikosti rychlosti na čase je brždění popsáno lineární závislostí (což odpovídá teorii) a totéž brždění je popsáno v grafu závislosti dráhy na čase kvadratickou funkcí. Přitom ale graf závislosti velikosti zrychlení na čase rovnoměrně zrychlenému pohybu neodpovídá (velikost zrychlení není konstantní). Příčinou je použitá metoda diferenčních rovnic, která drobné nepřesnosti dokáže vyhladit.

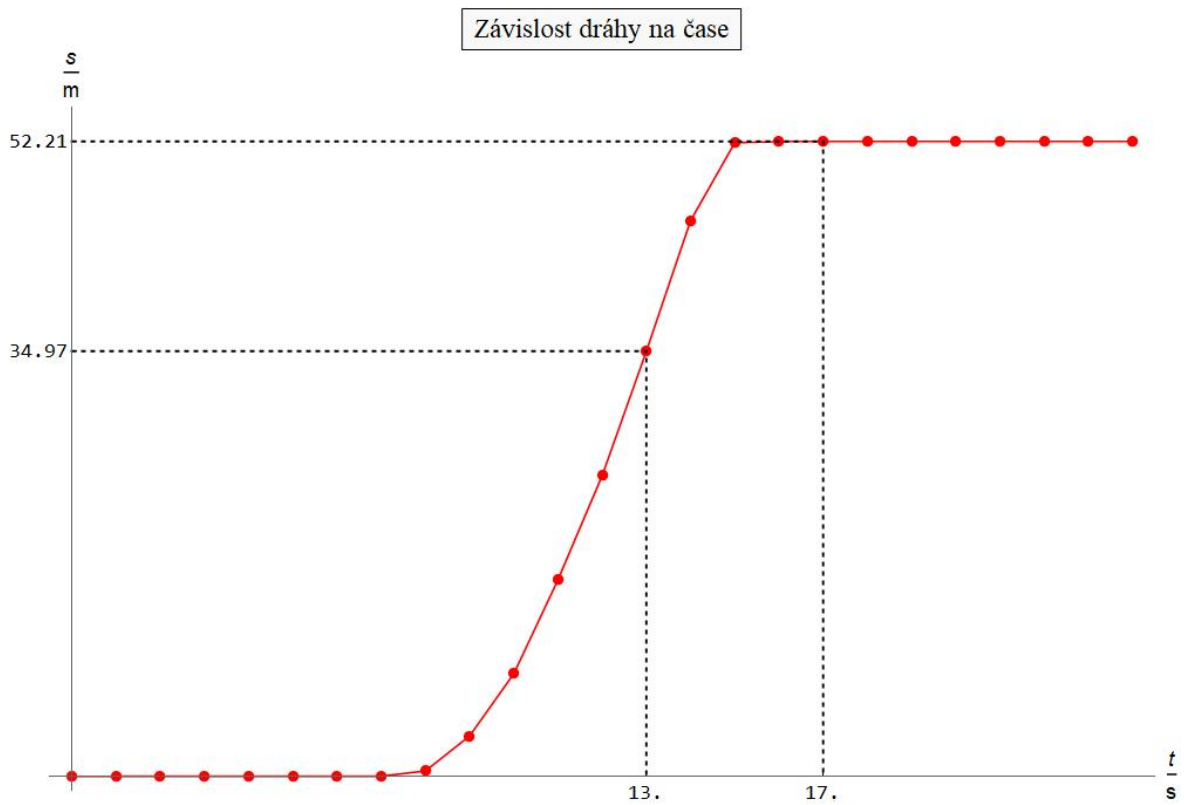
Ačkoliv všechny zobrazené grafy vypadají spojitě, jedná se bodové grafy vykreslené na základě naměřených dat velikostí zrychlení a dopočítaných (bodových) velikostí rychlostí a dráhy. Jedinou spojitou funkcí je kvadratická funkce prokládající data v části grafu odpovídajícímu brždění (viz obr. 5).



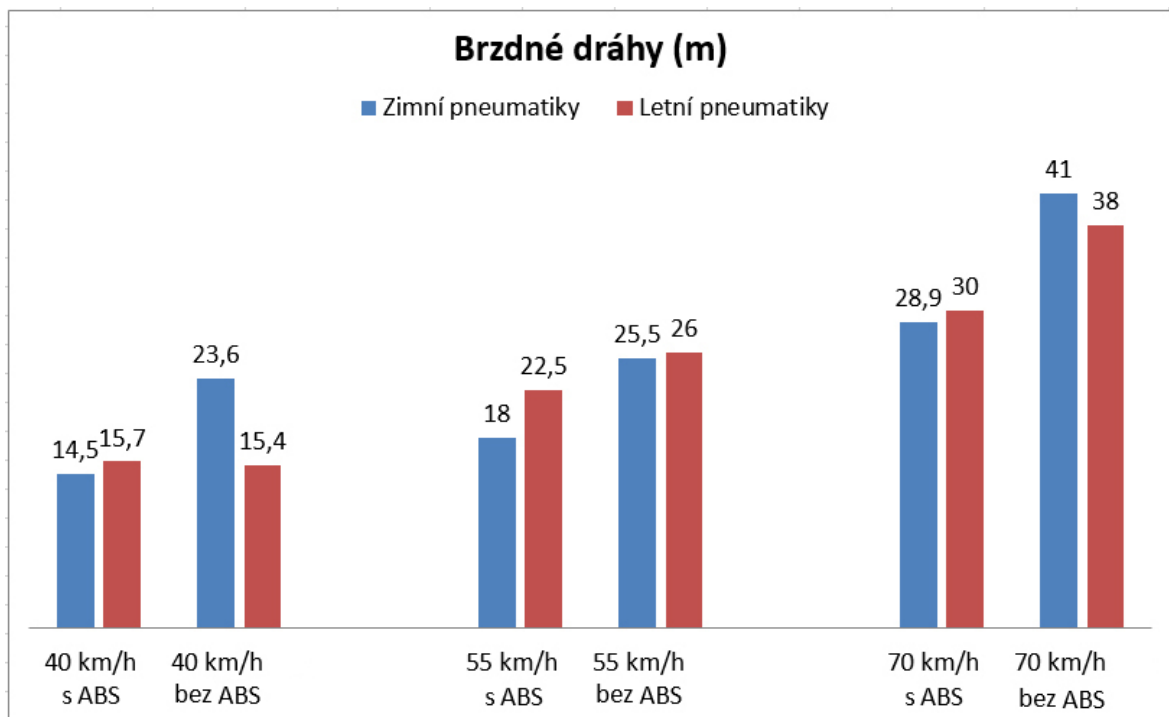
Obr. 5. Graf závislosti dráhy na čase.



Obr. 6. Graf závislosti velikosti rychlosti na čase (senzor GPS).



Obr. 7. Graf závislosti dráhy na čase (senzor GPS).



Obr. 8. Závislost brzdné dráhy na počátečních parametrech automobilu.

Pro porovnání přikládáme ještě grafy závislosti velikosti rychlosti na čase (viz obr. 6) a závislosti dráhy na čase (viz obr. 7) získané na základě dat ze senzoru GPS. Naměřené zeměpisné souřadnice bylo nutné přepočítat na souřadnice polohy (viz např. článek [5]). Ze zobrazených grafů je patrné, že vzorkovací frekvence senzoru GPS není pro přesné měření dostatečná (senzor snímá data pouze jednou za sekundu).

I senzor GPS poskytuje podobné výsledky, jako senzor zrychlení. Pro vyhodnocení měření a vzájemné porovnání brzdných drah byla ale použita data získaná ze senzoru zrychlení.

Analogicky byla provedena další měření (viz popis v podkapitole Vlastní měření), která byla vyhodnocena stejným způsobem. Přehledně naměřené brzdné dráhy zobrazuje obr. 8. Již na první pohled je patrné, že automobil, který měl ABS aktivovaný, má až na jeden případ kratší brzdou dráhu. (Pouze při počáteční rychlosti o velikosti 40 km/h vyšla brzdá dráha s aktivovaným ABS delší. To může být způsobeno právě malou velikostí počáteční rychlosti, které odpovídá i krátká doba brždění, během níž ABS není tak účinný.)

Závěr

Během příprav, vlastního měření a jeho zpracování jsem si ujasnil některé nové pojmy a souvislosti, po konzultaci s vedoucím práce jsem zvládnul problematiku řešení diferenčních rovnic a prohloubil znalosti o programu *Mathematica*. Proto považuji svá měření za úspěšná.

Ač takto komplexní práce vypadala na počátku téměř neřešitelně, díky mému zájmu a díky podpoře vedoucího práce jsem vše zdárně dokončil. Pokud se bude chtít některý z učitelů či žáků zabývat podobným problémem, neváhejte! Nic není tak komplikované, jak to na začátku vypadá!

Literatura

- [1] Černý F.: *ABS*, absolventský projekt, SPŠST Panská, Praha
- [2] Síly působící na kolo. [citováno 10. 8. 2020]. Dostupné online: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17678
- [3] Kammova kružnice přilnavosti. [citováno 10. 8. 2020]. Dostupné online: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/kammova-kruznice-prilnavosti/>
- [4] ABS. [citováno 10. 8. 2020]. Dostupné online: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/abs-anti-lock-braking-system/>
- [5] Reichl J: *Měření se systémem GPS*. [citováno 10. 8. 2020]. Dostupné online: <https://clanky.rvp.cz/clanek/c/G/13539/mereni-se-senzorem-gps.html/>