

UNIVERZITA PARDUBICE
Dopravní fakulta Jana Pernera

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

Tomáš ČEJKA

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Měření rychlosti a zjišťování trajektorie pohybu kolejových vozidel

Tomáš Čejka

Bakalářská práce
2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš ČEJKA**

Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Kolejová vozidla**

Název tématu: **Měření rychlosti a zjišťování trajektorie pohybu kolejových vozidel**

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

Provést rešeršní činnost v oblasti možností měření rychlosti pohybu vozidel se zaměřením na objasnění principů měření a srovnání možností použití jednotlivých systémů v provozu. Na základě rozboru naměřených dat z opakovaných jízd při různém režimu měření zhodnotit reprodukovatelnost a použitelnost systému VGPS a porovnat vyhodnocená data s teoretickým trasováním koleje. Na základě znalosti funkce systému měření navrhnout algoritmus rozkladu signálu na jednotlivé prvky trasování. Vypracujte:

1. Rešerši možností měření rychlosti pohybujících se vozidel.
2. Zpracování naměřených dat.
3. Porovnání dat při různých režimech měření, opakovaných jízdách a s teoretickým trasováním koleje.
4. Analýzu dosažených výsledků.
5. Návrh postupů na rozklad signálu na jednotlivé prvky trasování koleje.

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího BP

Rozsah pracovní zprávy: 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- [1] STEINER, I.; ČERNÝ, J.: GPS od A do Z. eNAV, 2003, 178 s. ISBN: 80-239-0228-8.
- [2] NUTIL, J.: Měřicí technika v průmyslu. Sborník pro kurs. Díl 2. Ostrava, 1980.
- [3] www stránky výrobců měřicí techniky.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Kohout

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: 20. února 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: 1. června 2009



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

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

Byl jsem seznámena 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.

Ve Zhoří dne 26.5.2009

Tomáš Čejka

Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé práce panu Ing. Martinu Kohoutovi za jeho čas a pomoc při zpracovávání bakalářské práce. Dále mé poděkování patří také rodině za podporu.

ANOTACE

Práce je věnována měření rychlosti pohybujících se vozidel. Zabývá se porovnáním přesnosti různých režimů měření pomocí GPS a vyhodnocením naměřených dat s ohledem na prvky trasování koleje. Vypočtená data jsou porovnávána s teoretickým trasováním koleje.

KLÍČOVÁ SLOVA

snímač rychlosti, měření rychlosti, GPS, trasování koleje, poloměr oblouku

TITLE

Speed measurement and taking trajectory of rail vehicle

ANNOTATION

This bachelor work deals with speed measurement of rail vehicles in movement. It is interested in comparing of accuracy of measurement in different mode with GPS and plotting of measuring data with provision for elements of track. Calculated data are confronted with teoretical elements of track.

KEYWORDS

speed sensor, speed measurement, GPS, layout of track, radius of curve

Obsah

Úvod	10
1. Požadavky na snímače rychlosti kolejových vozidel.....	11
2. Měření rychlosti otáčení kola.....	12
2.1. Mechanické otáčkoměry	12
2.2. Elektromagnetické otáčkoměry	14
2.3. Stejnoseměrné elektrické otáčkoměry (tachodynamy)	16
2.4. Střídavé elektrické otáčkoměry (tachogenerátor).....	18
2.5. Impulsní snímač s fotoelektrickým čidlem	20
2.6. Impulsní snímač s indukčností čidlem.....	21
2.7. Impulsní snímač s induktivním čidlem.....	22
2.8. Snímač s Hallovou sondou	24
2.9. Laserové otáčkoměry.....	25
3. Měření rychlosti posuvného pohybu.....	26
3.1. Měření rychlosti pomocí Dopplerova radaru	26
3.2. Měření rychlosti a polohy pomocí GPS	28
3.2.1. Kosmický segment	28
3.2.2. Řídící segment	29
3.2.3. Uživatelský segment.....	29
3.3. Optické měření rychlosti.....	32
3.3.1. Systém OSMES®.....	32
3.3.2. Metoda analýzy optického toku (Optical Flow)	34
4. Zpracování naměřených dat, ověřování vhodnosti snímače VGPS-200 pro identifikaci polohy vozidla při jízdách zkouškách.....	37
4.1. Analýza přesnosti měření absolutní polohy a směrového vektoru snímačem VGPS-200	37
4.1.1. Standardní režim GPS.....	38
4.1.2. Diferenciální režim GPS	40
4.2. Analýza dat s ohledem na prvky teoretického trasování koleje.....	41
4.3. Určení délky a poloměru oblouku.....	44
4.4. Ověření přesnosti výpočtu poloměru oblouku na jiném traťovém úseku..	47
5. Závěr	51
Použitá literatura	52

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma odstředivého otáčkoměru	13
Obr. 2 Závislost otáček na deformaci pružiny	14
Obr. 3 Schéma elektromagnetického otáčkoměru	15
Obr. 4 Schéma tachodynamu	16
Obr. 5 Snímač firmy Uzimex	18
Obr. 6 Schéma tachoalternátoru	18
Obr. 7 Tachogenerátor českého výrobce ATAS elektromotory Náchod a.s.	19
Obr. 8 Schéma impulsního snímače s fotoelektrickým čidlem	20
Obr. 9 Schéma indukčního snímače otáček	21
Obr. 10 Induktivní snímač rychlosti otáčení (1-tyčový magnet, 2-magneticky měkký pólový nástavec, 3-indukční cívka, 4-vzduchová mezera d_L , 5-feromagnetické ozubené kolo, 6-obvodová značka, λ -odstup zubů)	23
Obr. 11 Vyhodnocení napěťového signálu	24
Obr. 12 Hallův tyčový snímač magneticky aktivního rotoru (2-Hallova sonda, 4-pólové kolo, 5-pouzdro)	24
Obr. 13 Schéma fototachometru (laserového otáčkoměru)	25
Obr. 14 Princip funkce měření rychlosti pomocí Dopplerova radaru	27
Obr. 15 Dopplerův radar na spodku jednotky ř. 680	27
Obr. 16 Schéma oběhu satelitů kolem Země	29
Obr. 17 Schéma systému OSMES®	33
Obr. 18 Odražené paprsky od temene kolejnice	33
Obr. 19 Snímač nainstalovaný na kolejovém vozidle	34
Obr. 20 Testování snímače OSMES® při průjezdu zasněženou tratí	34
Obr. 21 Optický tok vypočítaný ze dvou snímků sekvence	35
Obr. 22 Princip detekce významných bodů	35
Obr. 23 Snímač firmy Corrsys-Datron	36
Obr. 24 Umístění snímače na vozidle	36
Obr. 25 VGP-200 Dewetron	38
Obr. 26 Data X,Y z opakovaných jízd stanicí Poříčany (standardní režim)	39
Obr. 27 Závislost směrového vektoru na X-ové souřadnici (standardní režim)	39
Obr. 28 Data X,Y z opakovaných jízd Svitavy-Letovice (diferenciální režim)	40
Obr. 29 Závislost směrového vektoru na X-ové souřadnici (diferenciální režim)	41
Obr. 30 Absolutní poloha (Choceň-Brandýs nad Orlicí)	42
Obr. 31 Průběh směrového vektoru v závislosti na dráze	43
Obr. 32 Rozdíl směrových vektorů v závislosti na dráze (surová data a data po 1. úpravě)	43

Obr. 33 Rozdíl směrových vektorů v závislosti na dráze (data po 1. úpravě a data po 2. úpravě)	44
Obr. 34 Absolutní odchylka směrového vektoru (data po 2. úpravě).....	44
Obr. 35 Porovnání teoretického trasování koleje s daty vypočtenými algoritmem (Choceň-Brandýs nad Orlicí).....	45
Obr. 36 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje (R=654 m)	46
Obr. 37 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje (R=390 m)	46
Obr. 38 Absolutní poloha (Bezprávi-Ústí nad Orlicí)	47
Obr. 39 Průběh směrového vektoru v závislosti na dráze (Bezprávi-Ústí nad Orlicí)	48
Obr. 40 Porovnání teoretického trasování koleje s daty vypočtenými algoritmem (Bezprávi-Ústí nad Orlicí).....	48
Obr. 41 Absolutní poloha, chybný signál snímače	49
Obr. 42 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje (R=404 m)	50
Obr. 43 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje (R=453 m, R=434 m)	50

ÚVOD

Při testování, schvalování nebo běžném provozu železničního vozidla je nutné znát přesnou rychlost vozidla. K tomuto účelu nám slouží snímače rychlosti, které převádějí mechanickou veličinu na veličinu elektrickou. Tyto veličiny jsou následně vyhodnoceny a v kombinaci s dalšími výstupy jiných měřících systémů mohou poskytovat další informace o jízdě měřeného vozidla.

Cílem této bakalářské práce je analýza rozšíření možností použití snímače VGPS-200 pro určení trajektorie pohybu měřeného vozidla s důrazem na prvky trasování koleje. První tři kapitoly seznamují s různými typy snímačů, které lze použít při měření rychlosti kolejového vozidla. V další kapitole najdeme porovnání přesnosti různých režimů měření pomocí GPS, zpracování naměřených dat a algoritmus pro jejich vyhodnocení.

1. POŽADAVKY NA SNÍMAČE RYCHLOSTI KOLEJOVÝCH VOZIDEL

Snímače rychlosti fungují v zásadě na dvou odlišných principech. Prvním z nich je snímání rychlosti otáčení dvojkolí a druhým je snímání rychlosti pohybujícího se prostředí.

Snímat rychlost lze kontaktně nebo bezkontaktně. Kontaktní snímání rychlosti znamená převádění mechanické veličiny na veličinu elektrickou pomocí pevné vazby (např. tachodynamo). Za tyto veličiny jsou považovány nejen proud a napětí, ale také jejich amplitudy, frekvence, periody, změny odporu, kapacity nebo indukčnosti.

Bezkontaktní snímání rychlosti nepotřebuje pevnou vazbu s měřeným objektem. Zaznamenává změny (elektrické, optické, magnetické apod.) prostředí a převádí je na elektrický impuls (např. indukčnostní snímač).

Hlavní požadavky kladené na snímače rychlosti:

- Vysoká spolehlivost (použití vysoce spolehlivých komponent a materiálů)
- Odolnost vůči tvrdým provozním podmínkám (vibrace, nárazy, teplota, vlhkost, elektromagnetické pole)
- Kompaktní rozměry (např. kvůli umístění do ložiskové skříně)
- Vysoká přesnost

2. MĚŘENÍ RYCHLOSTI OTÁČENÍ KOLA

Typy snímačů

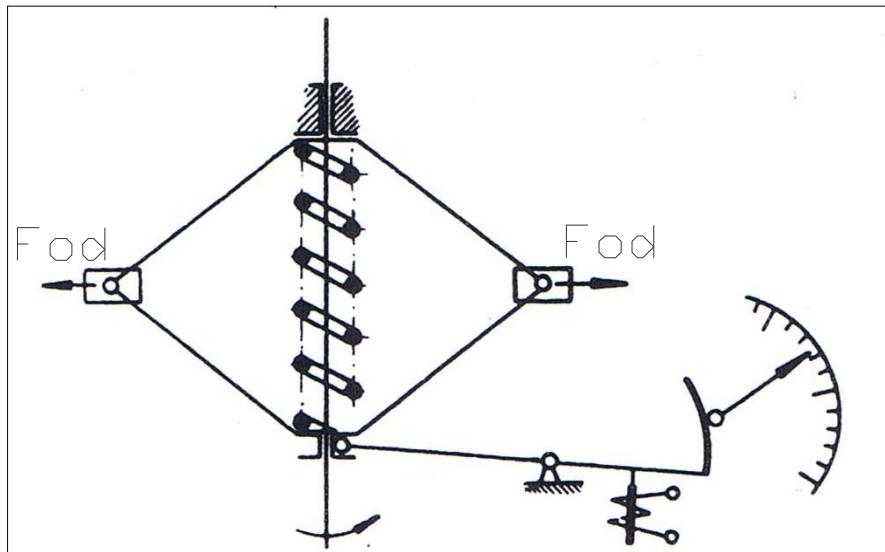
- Mechanické otáčkoměry
- Elektromagnetické otáčkoměry
- Stejnoseměrné elektrické otáčkoměry
- Střídavé elektrické otáčkoměry
- Impulsní snímač s fotoelektrickým čidlem
- Impulsní snímač s indukčností čidlem
- Impulsní snímač s induktivním čidlem
- Snímač s Hallovou sondou
- Laserové otáčkoměry

Tyto typy snímačů bývají nejčastěji umístěny v ložiskové skříně. Jejich hlavní nevýhodou je závislost přesnosti měření na opotřebení dvojkolí, a proto je nutná jejich poměrně častá kalibrace.

2.1. Mechanické otáčkoměry

Mechanický otáčkoměr funguje na principu rostoucí odstředivé síly se zvyšujícími se otáčkami. Odstředivá síla je přes pákový mechanismus převáděna na sílu, která působí na vinutou pružinu a ta se deformuje. Tato deformace je přenášena přes páku a zubový převod přímo na stupnici nebo je snímána snímačem polohy a převáděna na elektrický signál.

Deformace pružiny v závislosti na otáčkách není lineární (1), a proto tomu musí být uzpůsobena i stupnice (dílků nemají stejné rozestupy).

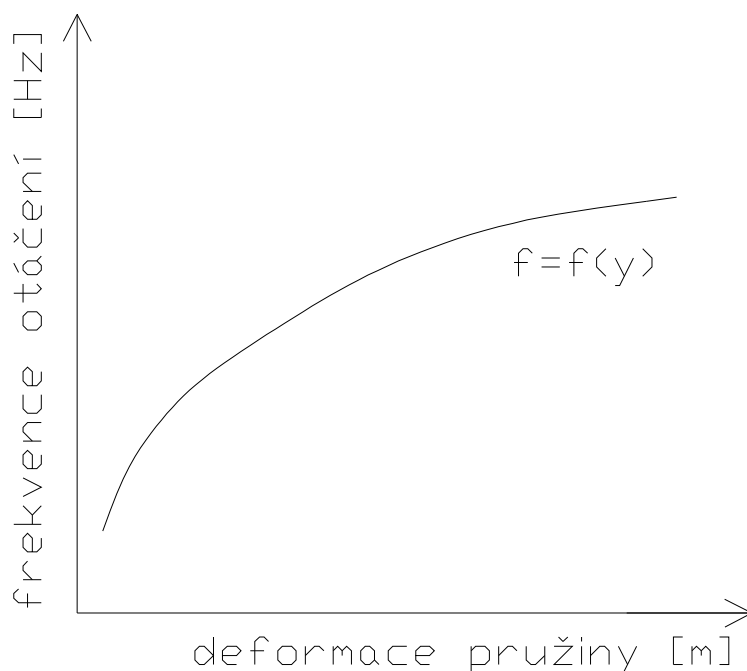


Obr. 1 Schéma odstředivého otáčkoměru

$$f = \sqrt{\frac{2 \cdot y \cdot k}{4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot (l \cdot k - y)}} \quad (1)$$

kde:

- f frekvence otáčení [Hz, s⁻¹]
y deformace pružiny [m]
k tuhost pružiny [Nm⁻¹]
m hmotnost odstředivých těles [kg]
l volná délka pružiny [m]



Obr. 2 Závislost otáček na deformaci pružiny

Rozsah tohoto otáčkoměru lze měnit tak, že změním mechanický převod mezi odstředivými tělesy a stupnicí. Přesnost tohoto mechanického otáčkoměru se pohybuje okolo $\pm 1 \%$ [1].

Nevýhodou otáčkoměrů fungujících na tomto principu je, že samotný snímač vnáší do měřené soustavy brzdící moment způsobený setrvačností odstředivých těles. Tento moment však prakticky nemůže ovlivňovat naměřenou hodnotu, neboť hmotnost rotující části snímače je v porovnání s hmotností dvojkolí zanedbatelná. Informaci o směru otáčení z naměřených hodnot nejsme schopni zjistit.

2.2. Elektromagnetické otáčkoměry

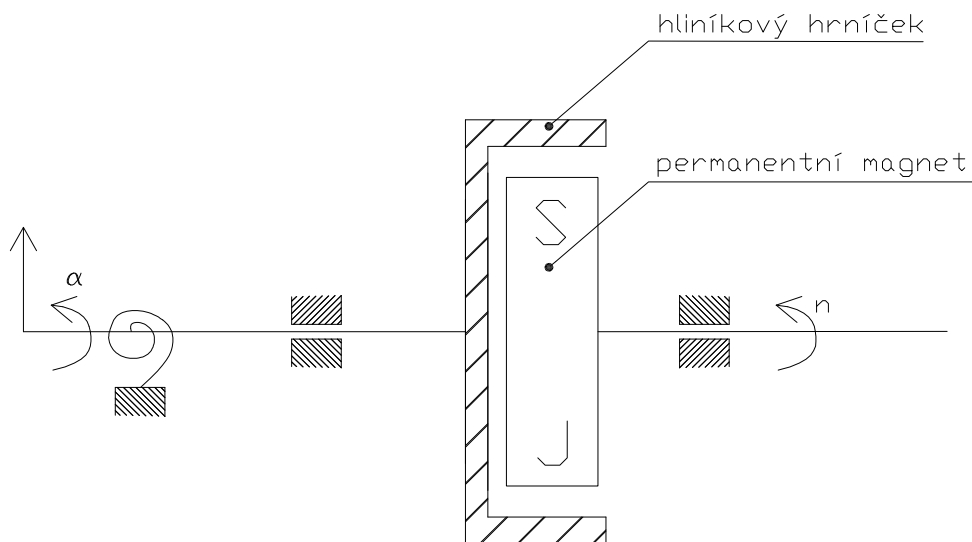
Elektromagnetické otáčkoměry fungují na principu indukce vířivých proudů. Skládají se z permanentního magnetu, který je hřídelí spojen s měřeným strojem, kovového hrníčku (nejčastěji hliníkový), ve kterém se permanentní magnet otáčí. Tím dochází k indukování vířivých proudů a vzniká kroutící moment, který je kompenzován spirálovou pružinou. Deformace pružiny je převáděna snímačem natočení na elektrický signál, který je dále vyhodnocován.

Pro výchylku platí vztah:

$$\alpha = \frac{1}{5 \cdot \pi} \cdot \frac{l \cdot H}{b \cdot h^3 \cdot E} \cdot \frac{\rho_m^2 \cdot \Phi_m^2}{\rho_e} \cdot n \quad (2)$$

kde:

l	délka pružiny	[m]
b	šířka pružiny	[m]
h	tloušťka pružiny	[m]
E	modul pružnosti materiálu	[Pa]
H	tloušťka kotouče	[m]
ρ_e	rezistivita kotouče	[Ω m]
Φ_m	magnetický tok procházející kotoučem	[Wb]
ρ_m	počet pólových dvojic perm. magnetu	[-]
n	otáčky	[min ⁻¹]

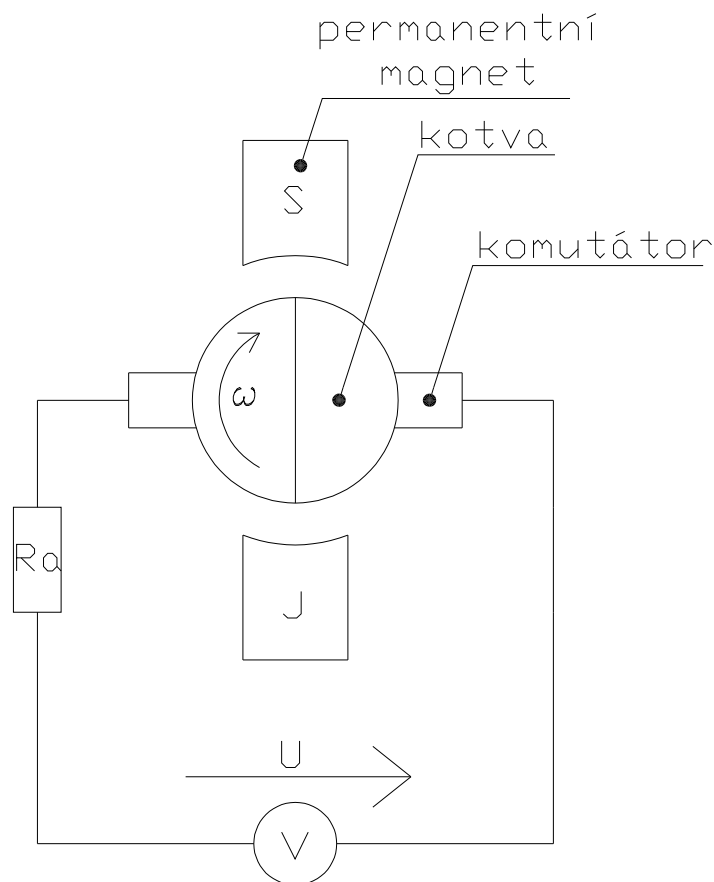


Obr. 3 Schéma elektromagnetického otáčkoměru

Z rovnice (2) vyplývá, že charakteristika tohoto snímače je lineární, lze ho použít pro měření širokého spektra otáček. Přesnost se pohybuje mezi 1 % až 2 %. Tento snímač je nejčastěji používán v dopravní technice jako tachometr.

Nevýhodou tohoto snímače je nutnost izolace od okolního elektromagnetického pole, jinak by docházelo k ovlivňování naměřené hodnoty. Tímto snímačem jsme schopni zjistit změnu směru otáčení [1].

2.3. Stejnosměrné elektrické otáčkoměry (tachodynamy)



Obr. 4 Schéma tachodynamy

Tachodynamo funguje na principu indukce elektrického proudu ve smyčce rotující v magnetickém poli.

Tachodynamo se skládá z magnetického obvodu, který je upraven tak, aby ve vzduchové mezeře bylo dosaženo konstantního magnetického toku Φ a kotvy. Kotva je vyrobena tak, aby měla co nejnižší moment setrvačnosti. Je důležité, aby kotva byla bez feromagnetika. Pokud by tomu tak nebylo, docházelo by ke zpoždění změny napětí za změnou otáček. Výstupní napětí je pak úměrné úhlové frekvenci otáčení kotvy dle vztahu:

UNIVERZITA PARDUBICE DFJP	Bakalářská práce	Str. 17
---------------------------------	-------------------------	---------

$$U_0 = C_{ss} \cdot \Phi \cdot \omega \quad (3)$$

kde:

C_{ss}	konstanta stroje.....	[-]
Φ	magnetický tok	[Wb]
ω	úhlová rychlost	[s ⁻¹]
U_0	výstupní napětí.....	[V]

Velikost výstupního napětí je ovlivněna zatěžovacím odporem, takže indikované napětí voltmetrem je dáno vztahem:

$$U = U_0 - R_a \cdot I_a - \Delta U_k \quad (4)$$

kde:

U	indikované napětí voltmetrem	[V]
R_a	odpor kotvy tachodynamu	[Ω]
I_a	proud procházející kotvou	[A]
ΔU_k	úbytek na kartáčích	[V]

Z důvodu snížení těchto napěťových úbytků je například komutátor vyroben ze stříbrných drátků. Napěťový úbytek je tak jen 10 – 50 mV. Napětí vystupující z tachodynamu je poměrně zvlněné. Polarita výstupního napětí nám udává směr otáčení kotvy. Jelikož je výstup tachodynamu napěťový, je nutné, abychom zohlednili vstupní odpor měřícího přístroje, kterým tachodynamo zatěžíme [1].

Závislost indikovaného napětí voltmetrem na otáčkách kotvy je lineární. Je tedy nutné, aby na základě změřeného napětí byly dopočítány otáčky. Na štítku tachodynamu je uvedena citlivost (např. 10 V / 1000 min⁻¹) a provede se výpočet dle vztahu:

$$n = \frac{U}{10} \cdot 1000 \quad (5)$$

n	počet otáček.....	[min ⁻¹]
-----	-------------------	----------------------

Nevýhodou je možné rušení okolních elektromagnetických systémů. Tyto snímače lze umístit do ložiskové skříně nebo bývají součástí kompaktních ložiskových jednotek TBU, kde je instalována celá řada diagnostických prvků (snímače teploty, vibrací, atp.).

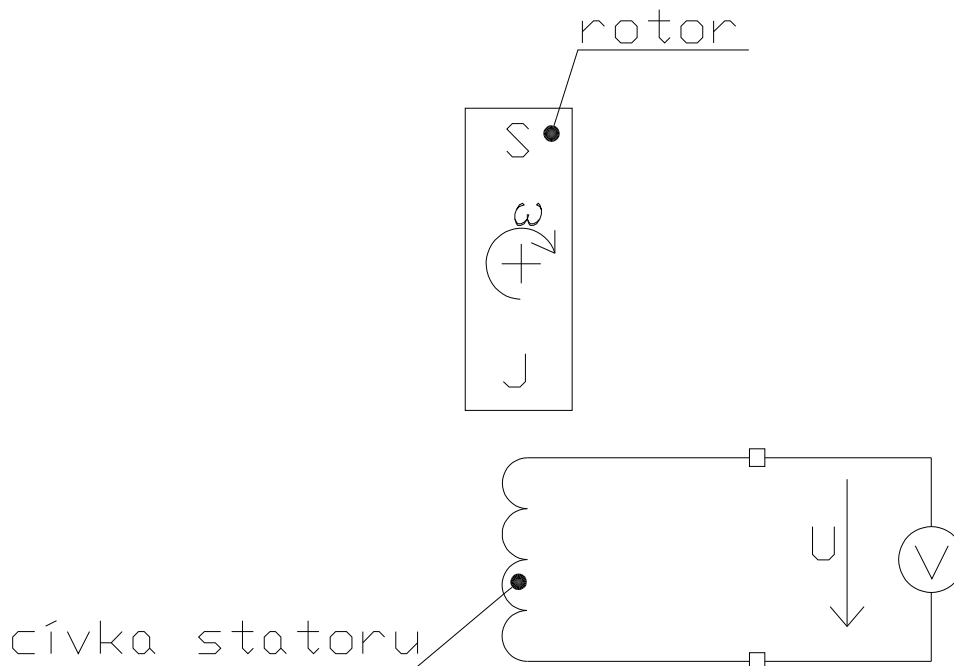


Obr. 5 Snímač firmy Uzimex

2.4. Střídavé elektrické otáčkoměry (tachogenerátor)

Tachogenerátor funguje na principu indukce elektrického proudu v cínce, kolem které je točivé magnetické pole.

Výstupním signálem tachogenerátoru je střídavé napětí. Stator je tvořen vícepólovým vinutím a rotor je tvořen několika pólovými dvojicemi permanentních magnetů (na Obr. 6 pro jednoduchost pouze jedna pólová dvojice). Pro měření malých otáček bývá až dvanáct pólových dvojic. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem je poměrně velká, aby se při zkratu nezeslabil magnetismus rotoru.



Obr. 6 Schéma tachogenerátoru

Nejstarším typem je generátor s otočným magnetem. Rotor je tvořen permanentním magnetem, který je mechanicky spojen s otáčející součástí. Otáčením magnetu dochází k indukování napětí. Toto napětí je střídavé a měříme jeho frekvenci. Při změně rychlosti otáčení se mění kmitočet a amplituda napětí. Kmitočet je vázán k rychlosti otáčení vztahem:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (6)$$

kde:

n rychlost otáčení rotoru..... [min⁻¹]
f frekvence elektrického proudu [Hz, s⁻¹]
p počet pólových dvojic [-]

Výstupní napětí se pohybuje v rozmezí 10 až 100 V. Pouze však v nezátíženém stavu (není připojen na měřicí ústřednu) je závislost napětí na otáčkách lineární. Příčinou nelinearity v zatíženém stavu je indukční složka impedance statoru. Maximální dovolené zatížení bývá řádově 10⁻³ až 1 W. Citlivost těchto snímačů se pohybuje kolem 1 mV/(rad.min⁻¹). Při měření vyšších otáček (nad 10 000 min⁻¹) dochází k oteplení rotoru a to způsobuje teplotní chybu [1].

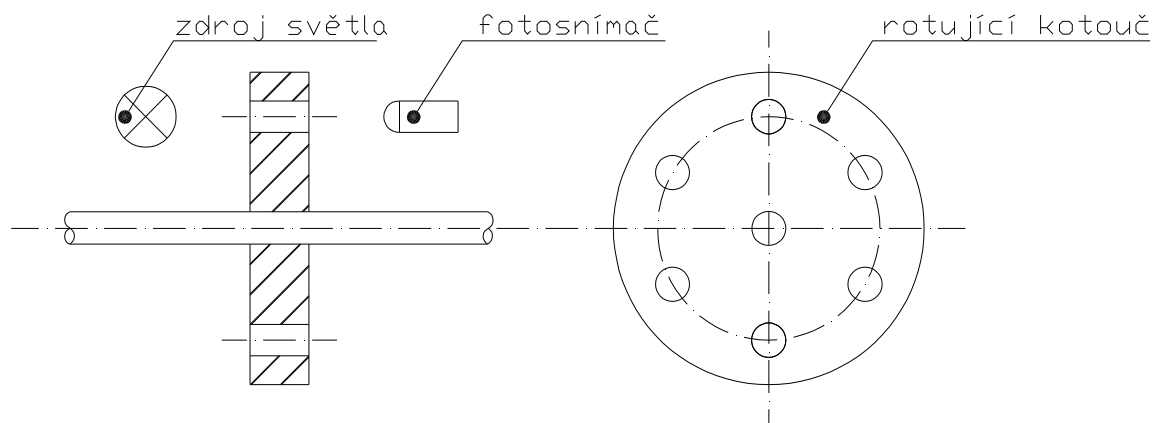


Obr. 7 Tachogenerátor českého výrobce ATAS elektromotory Náchod a.s.

Tímto snímačem opět vnášíme do soustavy brzdny moment, který nám však neovlivňuje naměřenou veličinu. Tento typ otáčkoměru není vhodný pro měření velmi malých rychlostí. Další nevýhodou je, že nejsme schopni z výstupního signálu zjistit směr otáčení.

2.5. Impulsní snímač s fotoelektrickým čidlem

Impulsní snímač otáček funguje na principu vyhodnocení světelných impulsů procházejících děrovaným kotoučem, které dopadají na fotosnímač. Elektrický výstup je následně vyhodnocen.



Obr. 8 Schéma impulsního snímače s fotoelektrickým čidlem

Snímač rychlosti s fotoelektrickým čidlem (Obr. 8) se skládá z kotouče (spojen s měřeným strojem), který je opatřen otvory. Tyto otvory jsou pravidelně rozmístěny po jeho obvodu a periodicky propouštějí světelné impulsy při rotaci kotouče, které jsou fotosnímačem (fotodioda, fototranzistor) převáděny na elektrické impulsy. Ty jsou následně zesíleny a čítačem vyhodnocovány. Takto lze sledovat frekvenci impulsů až do 10^4 s^{-1} . Maximální možný počet snímaných otáček je dán vztahem:

$$n_{mez} = \frac{f_{mez} \cdot 60}{p} \quad (7)$$

kde:

n_{mez}	mezní počet otáček	$[\text{min}^{-1}]$
f_{mez}	mezní frekvence optoelektrického snímacího prvku	$[\text{Hz}, \text{s}^{-1}]$
p	počet otvorů v kotouči	$[-]$

Tento typ snímače nám však neposkytuje informaci o směru otáčení. Abychom tuto informaci ze systému získali, je nutné, aby na měřeném stroji byly tyto snímače dva. Tyto snímače musí být vůči sobě pootočený o úhel α .

Další podmínkou je:

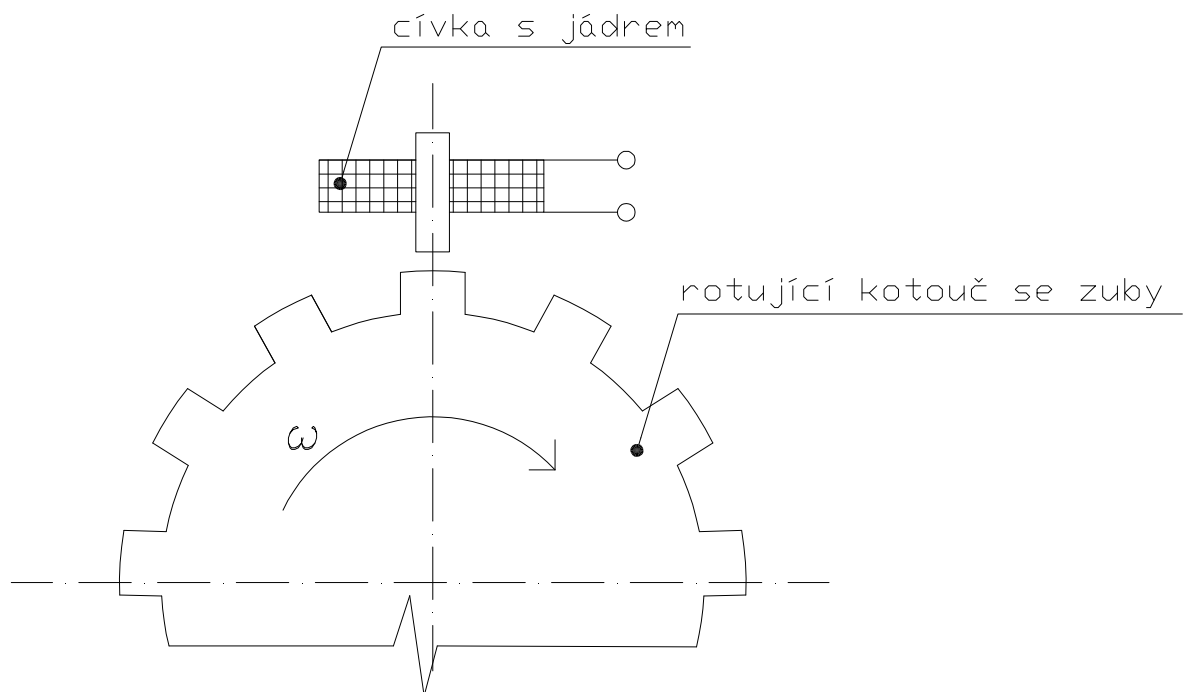
$$\alpha \neq \frac{\beta}{2} \quad (8)$$

kde:

α úhel natočení děrovaných kotoučů vůči sobě.....[rad]

β úhel mezi otvory děrovaného kotouče.....[rad]

2.6. Impulsní snímač s indukčností čidlem



Obr. 9 Schéma indukčního snímače otáček

Snímač rychlosti s indukčním čidlem se skládá z kotouče (hnán měřeným strojem), který je opatřen zuby, a z cívky s jádrem. Frekvence změn indukčnosti cívky je lineárně závislá na rychlosti otáčení kotouče. Indukčnost cívky je dána vztahem:

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (9)$$

$$R = R_{Fe} + R_{vzd} \quad (10)$$

kde:

L	indukčnost cívky	[H]
N	počet závitů cívky	[-]
R _{Fe}	magnetický odpor jádra cívky	[Ω]
R _{vzd}	magnetický odpor vzduchové mezery	[Ω]

Cívka s jádrem je napájena zdrojem napětí. Změna indukčnosti cívky se projeví kolísáním napětí podle rychlosti otáčení ozubeného kola. Tyto snímače se umisťují do ložiskové skříně.

$$n = \frac{f \cdot 60}{z} \quad (11)$$

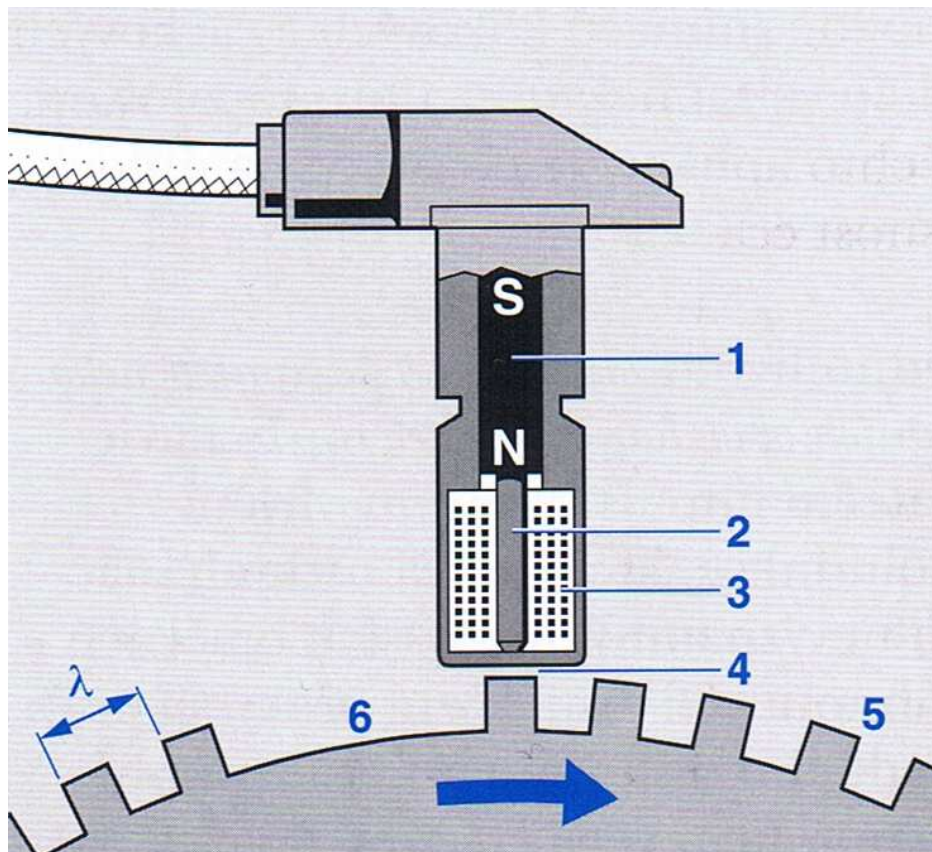
kde:

n	počet otáček	[min ⁻¹]
f	frekvence změn napětí	[Hz, s ⁻¹]
z	počet zubů ozubeného kola	[-]

Maximální měřitelné otáčky jsou limitovány mezní frekvencí indukčnostního snímače [1]. Tento typ snímače nám neposkytuje informaci o směru otáčení měřeného objektu. To lze vyřešit stejným způsobem jako u snímače s fotoelektrickým čidlem instalací dalšího ozubeného kola. Je třeba zajistit izolaci indukčnostního snímače od okolního elektromagnetického pole (např. od trakčních motorů), aby nedocházelo ke znehodnocování naměřených veličin.

2.7. Impulsní snímač s induktivním čidlem

Induktivní snímače využívají indukční zákon k měření rychlosti otáčení. Vytváří tedy na svém dvoupólovém výstupu napětí U_A, které je úměrné časové změně magnetického toku Φ.



Obr. 10 Induktivní snímač rychlosti otáčení (1-tyčový magnet, 2-magnetický měkký pólový nástavec, 3-indukční cívka, 4-vzduchová mezera d_L , 5-feromagnetické ozubené kolo, 6-obvodová značka, λ -odstup zubů)

$$U_A = U_{ind} = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (12)$$

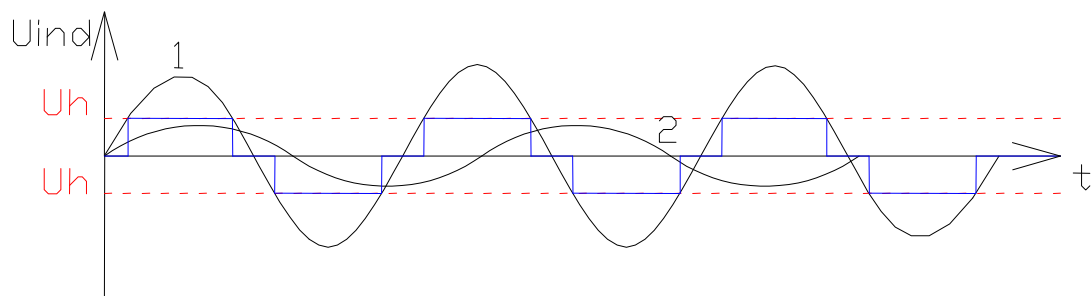
kde:

U_{ind}	indukované napětí	[V]
$d\Phi$	změna magnetického toku	[Wb]
dt	časová změna	[s]
n	počet závitů v cívce	[-]

Výstupním signálem z indukčního snímače je tedy indukované napětí. Podkladem pro určení rychlosti je frekvence výstupního napětí U_A . Rychlost otáčení se pak určí ze vztahu (11), který platí i pro indukčnostní snímač.

Nevýhodou těchto snímačů je závislost na konstantní vzduchové mezeře d_L . Pokud tato mezera není konstantní a ozubené kolo kmitá, dochází ke změnám indukovaného napětí, které znehodnocují měření [5]. Je nutné, aby byl

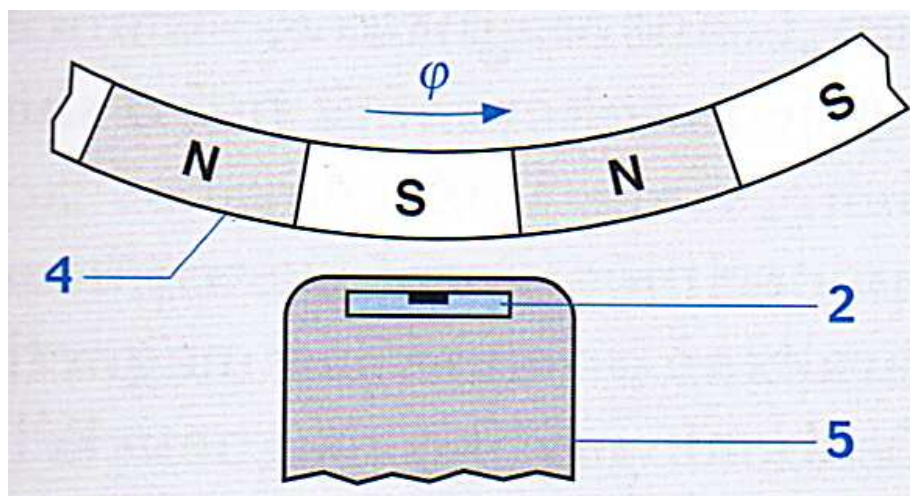
induktivní snímač izolovaný od okolního elektromagnetického pole. Tento druh snímače nám neposkytuje informaci o směru otáčení. Další nevýhodou je neschopnost snímat velmi malé rychlosti otáčení. Vyhodnocovací obvod je nastaven na hraniční hodnotu indukovaného napětí (Obr. 11). Při malých otáčkách je toto indukované napětí velmi malé, může se nacházet pod hraniční hodnotou indukovaného napětí, na které je obvod nastaven, a nezaznamená otáčení (signál 2).



Obr. 11 Vyhodnocení napěťového signálu

2.8. Snímač s Hallovou sondou

Hallový snímač se výborně hodí ke snímání magneticky aktivního rotoru (pólové kolo). Snímač je řízen jen polaritou měnící se v okolí magnetického nulového bodu. S rostoucí vzduchovou mezerou klesá sice změna magnetizace, poloha pracovního bodu $B=0T$ se však již nemění. Kolísání vzduchové mezery nemůže při tomto uspořádání způsobovat chybové impulsy, protože nevede ke změně pólů, která charakterizuje pouze probíhající měřený pohyb. [



Obr. 12 Hallův tyčový snímač magneticky aktivního rotoru (2-Hallová sonda, 4-pólové kolo, 5-pouzdro)

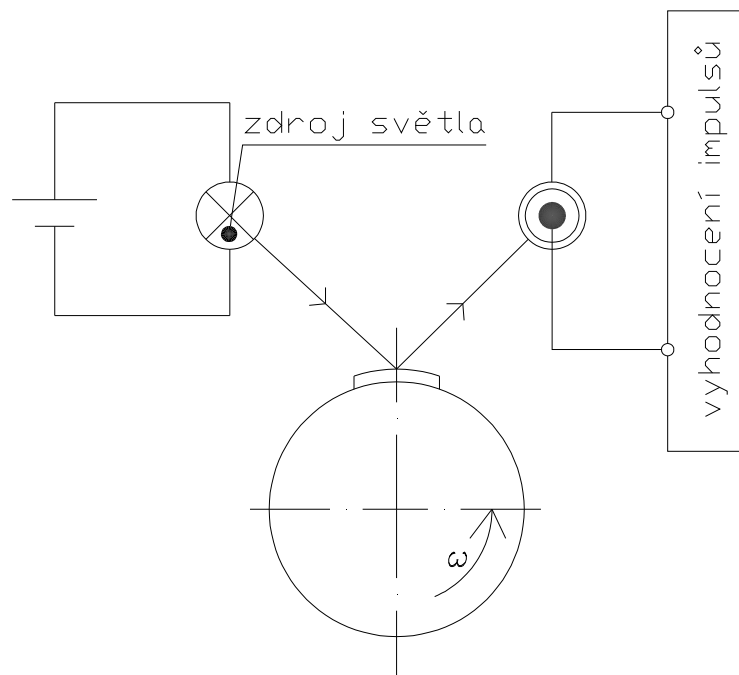
Vystupující veličinou tohoto snímače je napětí s určitou frekvencí. Otáčky pólového kola jsou dopočítány dle vztahu (11) s tím rozdílem, že místo počtu zubů je dosazen počet pólových dvojic magneticky aktivního rotoru [5].

Nevýhodou tohoto snímače je nutnost izolace od okolního elektromagnetického pole.

2.9. Laserové otáčkoměry

Laserový otáčkoměr vysílá trvalý nepřerušovaný světelný paprsek. Ten dopadá na speciální odrazku nalepenou na rotující součásti. Ta vždy při průchodu odrazí paprsek zpět a ten je pak sejmut optikou otáčkoměru. Fotodioda převede optický signál na elektrický, který je dále zpracováván. Měřící rozsah bývá značně široký a při splnění podmínek pro měření jsou výsledky jednoznačné. Problémem může být činnost snímače v prostředí, kde hrozí znečištění reflexní značky. Pro tyto přístroje se někdy rovněž užívá označení fototachometr.

Tento typ otáčkoměru nám neposkytuje informaci o směru otáčení. Pro zjištění této informace je nutné nainstalovat ještě jeden snímač, který by byl pootočený vůči snímači prvnímu. Toto pootočení však nesmí být 180° . Pokud na fototachometr umístíme po jeho obvodu více reflexních značek, dosáhneme větší citlivosti na změnu rychlosti.



Obr. 13 Schéma fototachometru (laserového otáčkoměru)

3. MĚŘENÍ RYCHLOSTI POSUVNÉHO POHYBU

Existuje několik způsobů, jak měřit rychlost posuvného pohybu (nezávisle na otáčení dvojkolí). Mezi nejpoužívanější metody měření rychlosti pohybujícího se vozidla patří:

- Měření rychlosti pomocí Dopplerova radaru
- GPS (Global Positioning Systém)
- Optické metody měření rychlosti

3.1. Měření rychlosti pomocí Dopplerova radaru

Pro měření rychlosti jízdy vůči zemi v_F se používají jednoduché (low cost – levné) Dopplerovy radary s malým dosahem pracující s frekvencí 24 – 35 GHz.

Kombinovaná vysílací / přijímací hlava má svůj radarový paprsek nasměrovaný ve směru jízdy pod úhlem α šikmo k zemi (Obr. 14). Pokud by zde (na zemi) byl přijímač, přijímal by signál s vyšší frekvencí f_1 , než byla frekvence původně vysílaná f_0 (Dopplerův efekt), protože by se zdroj vysílání (vysílač) pohyboval k němu.

$$f_1 = f_0 \frac{c}{c - v_f \cdot \cos \alpha} \quad (13)$$

kde:

f_1	frekvence odraženého signálu	[Hz]
f_0	frekvence vyslaného signálu	[Hz]
c	rychlost šíření signálu.....	[ms ⁻¹]
v_f	rychlost vozidla vůči zemi.....	[ms ⁻¹]

Zem však odráží signál zpět ke kombinované vysílací / přijímací hlavě. Nyní má signál v místě příjmu ještě vyšší frekvenci f_2 , protože se tentokrát přijímač pohybuje ke zdroji.

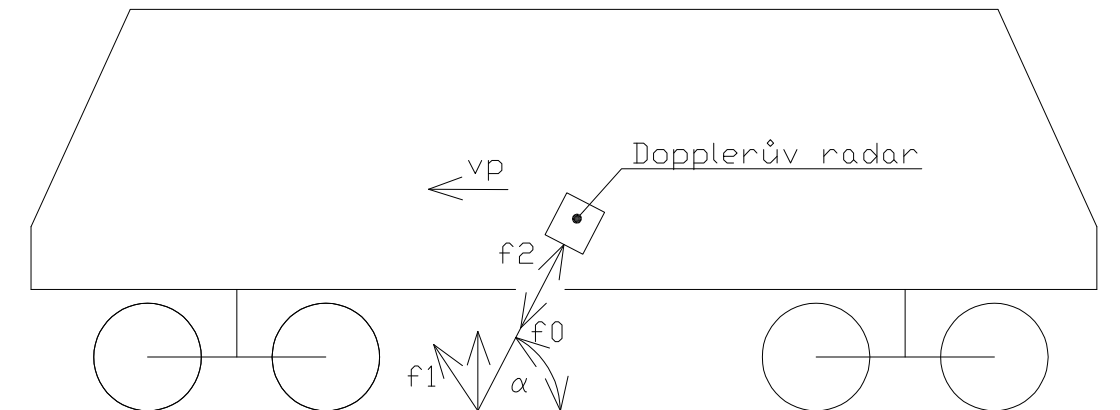
$$f_2 = f_1 \cdot \frac{c + v_f \cdot \cos \alpha}{c} = f_0 \cdot \frac{c + v_f \cdot \cos \alpha}{c - v_f \cdot \cos \alpha} \quad (14)$$

kde:

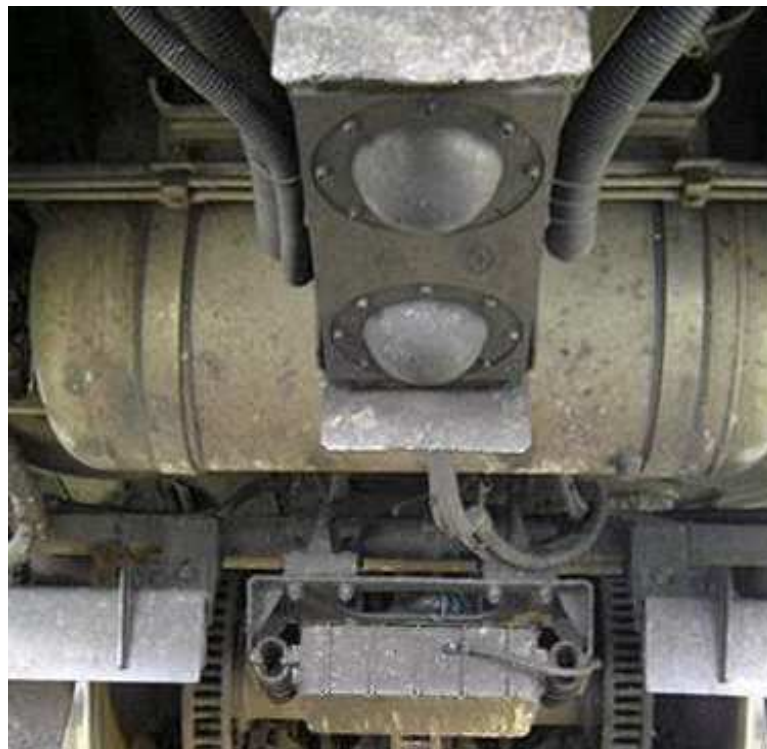
f_2	frekvence přijímaného signálu.....	[Hz]
-------	------------------------------------	------

po úpravě:

$$v_f = \frac{c}{\cos \alpha} \cdot \frac{f_2 - f_0}{f_2 + f_0} \quad (15)$$



Obr. 14 Princip funkce měření rychlosti pomocí Dopplerova radaru



Obr. 15 Dopplerův radar na spodku jednotky ř. 680

Tento způsob měření rychlosti nám poskytuje velmi přesnou informaci o okamžité rychlosti pohybu vozidla. Nezbytnou podmínkou pro správnou funkci tohoto systému je nerovný povrch, na který elektromagnetické vlnění dopadá (nedošlo by k odrazu zpět k přijímači). Jelikož elektromagnetický svazek

dopadá do štěrkového lože nebo na pražce, je tato podmínka bezpečně splněna.

3.2. Měření rychlosti a polohy pomocí GPS

Global Positioning System, zkráceně GPS, je vojenský navigační družicový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických, který dokáže s několikametrovou přesností určit pozici kdekoliv na Zemi. Přesnost GPS lze ještě zvýšit až na přibližně 1 cm s použitím metod jako je Diferenciální GPS (DGPS).

Celý systém GPS je možné rozdělit do tří segmentů:

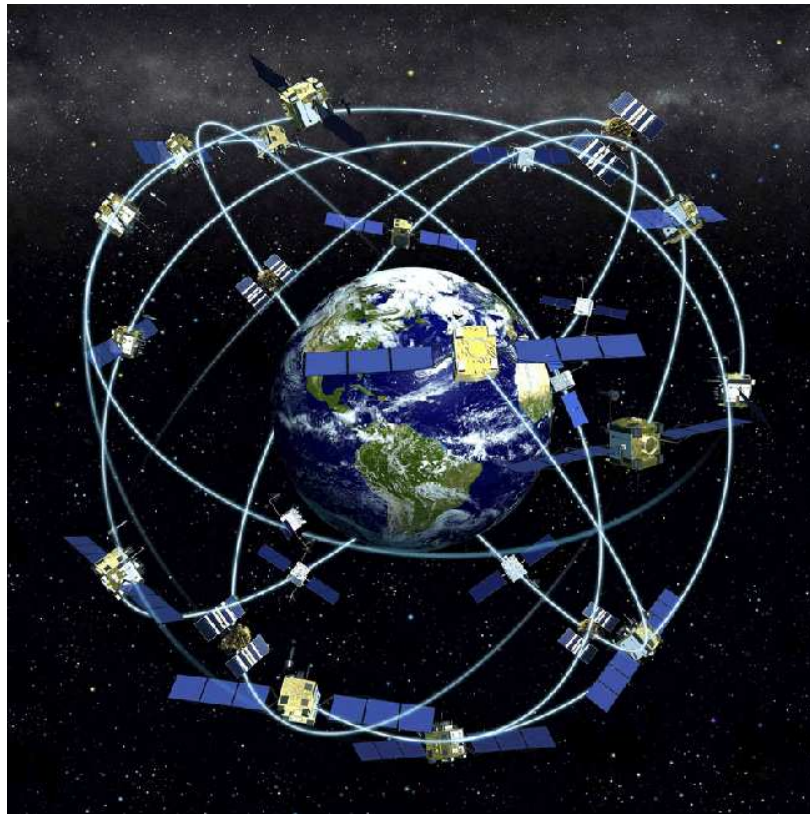
- Kosmický
- Řídící
- Uživatelský

3.2.1. Kosmický segment

Kosmický segment tvoří 24 družic (Obr. 16), ze kterých jsou tři záložní a obíhají Zemi na šesti drahách (sklon dráhy 55°) vzájemně posunutých o 60° ve výšce 20 000 km nad povrchem Země (oběžná doba je tedy 11h a 58 min - pozemský pozorovatel vidí každý den stejnou dráhu, avšak družice vychází vždy o 4 minuty dříve).

Družice vysílají na několika kmitočtech, které jsou zvoleny záměrně, aby byly odolné vůči meteorologickým vlivům.

- L1 (1575,42 MHz), je určen pro civilní uživatele GPS
- L2 (1227,62 MHz), šifrovaný kód určený pro autorizované uživatele (armáda)
- L3 (1381,05 MHz), odhaluje signály související se startem balistických raket, s jadernými výbuchy či jinými zdroji vysokoenergetického infračerveného záření
- L4 (1841,40 MHz), eliminuje ionosferické zpoždění
- L5 (1176,45 MHz), tzv. SoL (Safety of Life) signál určený pro leteckou navigaci



Obr. 16 Schéma oběhu satelitů kolem Země

3.2.2. Řídící segment

System GPS je řízen z ústředí Navstar Headquarters na letecké základně (AFB) Los Angeles v Californii v USA. Hlavní pozemní stanice se nachází na letecké základně Falcon v Coloradu a hlavní operační řídicí středisko na letecké základně Schriever v Coloradu, které provozuje letectvo Spojených států amerických (USAF), 2nd Space Operations Sq. Po světě je rozmístěno 5 dalších monitorovacích stanic (Havajské ostrovy, Kwajalein, Diego Garcia, Ascension, Colorado Springs) a 3 povelové stanice (Kwajalein, Diego Garcia, Ascension).

3.2.3. Uživatelský segment

Uživatelský segment tvoří vlastní GPS přijímač, což je přijímač signálu s rozprostřeným spektrem. Přijímače GPS poslouchají tyto signály od minimálně tří a maximálně dvanácti satelitů a z těchto údajů vyhodnocují svojí přesnou pozici, spolu s rychlostí a směrem posunu. K určení polohy postačí signál tří satelitů, pro zjištění nadmořské výšky alespoň čtyř a pro zjištění přesného času pouze jeden satelit. Čím větší počet družic se daří současně zachytit, tím přesnější jsou udávané souřadnice.

Při určování polohy jsou známy vzdálenosti k družicím a poloha těchto družic. Je tedy možné sestavit několik rovnic o několika neznámých. Tato soustava rovnic dává jednoznačné řešení, jen pokud je počet rovnic (měření) roven počtu neznámých. Na první pohled by se tedy zdálo, že k určení polohy ve třírozměrném prostoru stačí příjem signálů tří družic. Ve skutečnosti to však neplatí.

Další neznámou, která je v systému GPS obsažena, je zpoždění mezi signálem vyslaným a signálem přijatým. Zpoždění se měří tak, že se v přijímači porovnávají časové značky v přijímaném signálu s časovými značkami „hodin“ přijímače. Tedy např. když v čase 12 hodin 5 minut dojde k přijetí časové značky „12 hodin“, pak zpoždění je 5 minut. Tento postup dává správné výsledky jen tehdy, pokud jsou „hodiny“ přijímače zcela synchronní s „hodinami“ vysílače. Zdánlivě to není problém, protože je možno vyrobit relativně přesné hodiny. Přesnost však není dostačující. Jestliže se hodiny přijímače odchyľují od hodin družice o jednu milisekundu a vzhledem k tomu, že zpoždění se násobí rychlostí světla, byla by chyba vzdálenosti téměř 300 km, což výsledek měření činí nepoužitelným. Aby k takovýmto chybám nedocházelo, považuje se odchylka hodin přijímače od hodin družic za další neznámou. Proto místo tří (polohových) neznámých existují čtyři a pro jejich určení je třeba přijímat signály čtyř družic.

Přesto je běžné, že GPS přijímač začne navigovat již při příjmu signálu tří družic. Důvodem je, že většina uživatelů se nachází na zemském povrchu a proto jejich poloha není třírozměrná, ale dvojrozměrná. Přijímače při příjmu signálů tří družic tedy předpokládají, že jsou na povrchu Země a určí tři neznámé (zeměpisná šířka, délka a odchylka hodin). Protože však povrch Země není zcela přesně definován (předpoklad koule je aproximace prvního stupně, druhá aproximace je rotační elipsoid s poloosami 6 378 a 6 356 km), má takto určená poloha poměrně velkou chybu, a proto je v těchto situacích na displeji varovné hlášení typu „2D navigation“. Plnohodnotná navigace (označovaná 3D navigation) začne až od příjmu signálu čtyř družic.

Jak je výše uvedeno, má systém GPS 24 družic a průměrně je v našich zeměpisných šířkách vidět (tj. jsou nad obzorem a lze přijímat jejich signál) 8 družic. Může se zdát, že úvahy o tom, zda jsou k dispozici 3 nebo 4, jsou neopodstatněné. To, že je družice nad obzorem, je však samo o sobě nedostatečné, protože se uživatel jen málokdy pohybuje ve zcela otevřeném terénu. Většinou je část oblohy do určitého úhlu (elevační maska) zakryta, čímž se může počet použitelných družic významně snížit.

Algoritmus výpočtu polohy družice je popsán v definici GPS. Vstupem tohoto algoritmu jsou parametry dráhy družice, které jsou v signálu vysílaném družicí. Těmto parametrům říkáme efemeridy. Efemeridy zjišťují pozemní stanice systému GPS, které sledují družice a z jejich pohybu předpovídají efemeridy, které pak odesílají na družici a ta je zařazuje do svého vysílání. Jsou proto možné dva typy chyb - chyba v predikci efemerid a chyba pohybu družice (např. v důsledku nárazu meteoritku).

Přesnost běžných GPS přijímačů se pohybuje kolem 7-10 m. Ta však závisí na odkrytém výhledu na oblohu. Pokud tomu tak není, např. v lese, tak se přesnost sníží na 20-30 m.

U GPS zaměření je důležité z pohledu přesnosti rozlišovat mezi měřením polohy a výšky. Měření výšky vzhledem k úzkému svazku spojnic mezi přijímačem a družicemi není ideální a přesnost zaměření výšky bývá až dvakrát horší, než při zaměření polohy [4].

Existuje však poměrně dost možností jak přesnost GPS systému zvýšit, jsou to:

- Průměrování pozice přijímače
- Diferenciální korekce DGPS
- GPS s barovýškoměrem

Tab. 1 Srovnání metod měření podle dosažené přesnosti [4]

Metoda	Přesnost v poloze	Přesnost ve výšce	Čas měření
Běžné měření	7-10 m	15-20 m	průběžně
Průměrování	5-7 m	10-15 m	3-5 min
GPS s barovýškoměrem	7-10 m	až 2,5 m	průběžně
GPS + DGPS	1-5 m	pod 10 m	průběžně

Nevýhodou tohoto systému měření je, že je nutné mít stále velmi dobrý výhled na oblohu. Proto tento systém špatně funguje například při jízdě vozidla v zářezu, nefunguje vůbec v případě jízdy vozidla v tunelu. Čím více satelitů snímač zachytává, tím je měření přesnější.

3.3. Optické měření rychlosti

Tento způsob měření je vhodný pro měření rychlosti přímo na jedoucím vozidle. Jeho výhoda spočívá v tom, že nemáme výsledky měření zatížené chybou od protočení dvojkolí. Měříme tedy rychlost čistě posuvného pohybu. Touto problematikou se zabývá firmy Siemens a Corrsys-Datron.

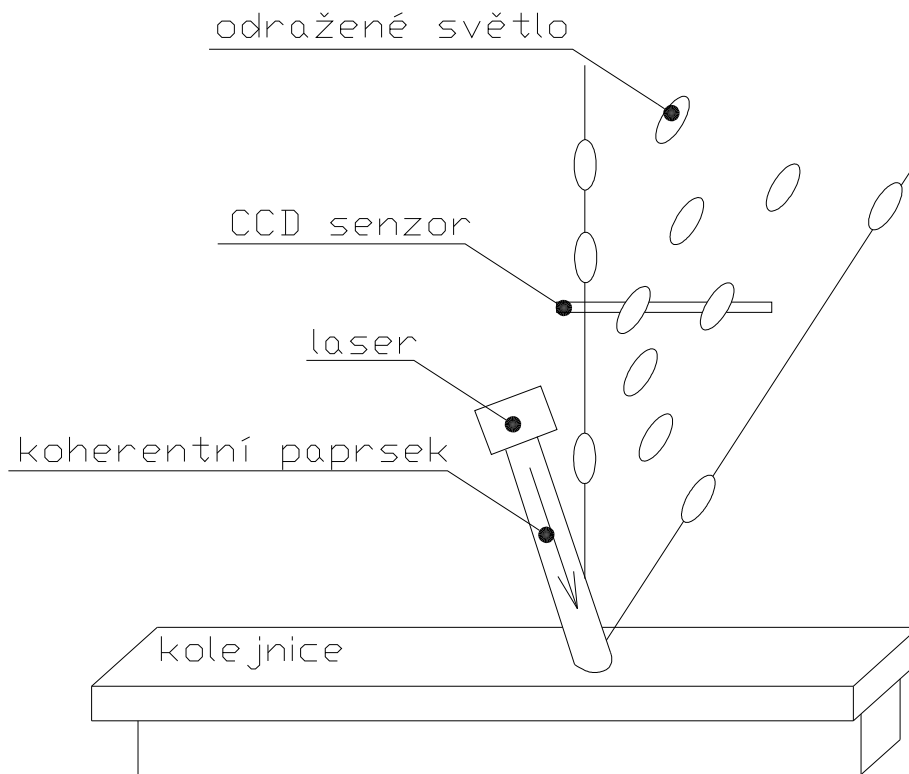
3.3.1. Systém OSMES®

Jedná se o metodu bezkontaktního měření rychlosti, která je patentována jako metoda OSMES® (optical speed measurement). Tato metoda byla rozvinuta firmou Siemens pro měření dynamických vlastností kolejových vozidel. Mezi hlavní výhody bezkontaktního měření rychlosti patří:

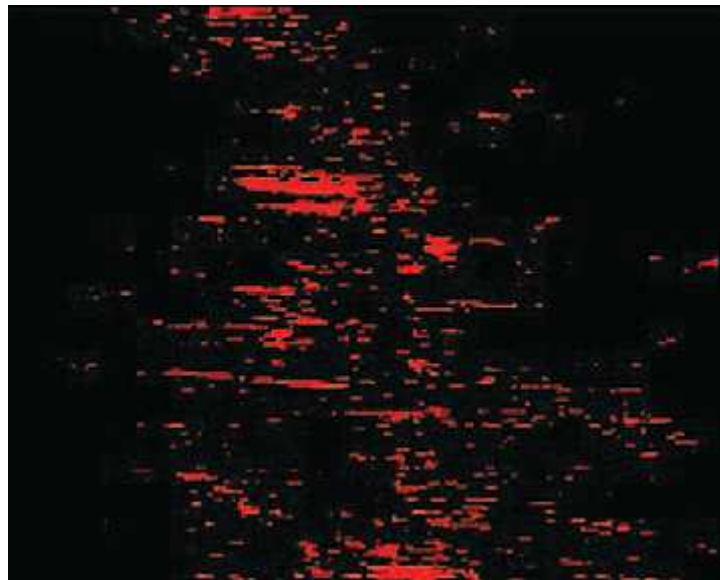
- Nezávislost na otáčení kola
- Kompatibilita se všemi zabezpečovacími zařízeními
- Není potřeba kalibrace z důvodu opotřebení dvojkolí
- Přesnější než ostatní kontaktní metody měření
- Větší spolehlivost systému
- Široký rozsah měřených rychlostí

Tento systém funguje (Obr. 17) na principu odrazu koherentního zdroje světla. Jako zdroj koherentního světla je použit laser, který vysílá paprsek na temeno kolejnice. Jelikož povrch kolejnice není hladký, paprsek se neodrazí zpět jako celý, ale dojde k jeho rozprostření. Tento rozprostřený odraz je snímán (Obr. 18). Snímání odrazu se provádí v konstantním časovém kroku. Vždy dva odrazy jsou porovnávány a zjistí se posun obrazu. Tento posun se změří, a protože známe časový interval mezi vznikem jednotlivých odrazů, můžeme velmi snadno dopočítat rychlost vozidla. Lze tedy říci, že změřená rychlost je prakticky rychlostí okamžitou, protože interval mezi jednotlivými obrazy se pohybuje od 200 μ s do 600 μ s.

Existuje celá řada faktorů, které mají vliv na přesnost měření. Velmi záleží na povrchu temene kolejnice. Pokud se vozidlo pohybuje po málo frekventované trati, může být problém s korozí temene kolejnice, která tak hůře odráží světelný paprsek a může způsobovat chybu měření. Mezi další faktory, které mohou mít vliv na přesnost, patří například: prašnost prostředí, déšť, námraza a sníh (Obr. 20), průhyb kolejnice při působení kolové síly. Řídící elektronika však dokáže velmi rychle reagovat na změnu vlastností odrazové plochy a patřičně modifikovat zdroj světla (Obr. 20).



Obr. 17 Schéma systému OSMES®



Obr. 18 Odražené paprsky od temene kolejnice



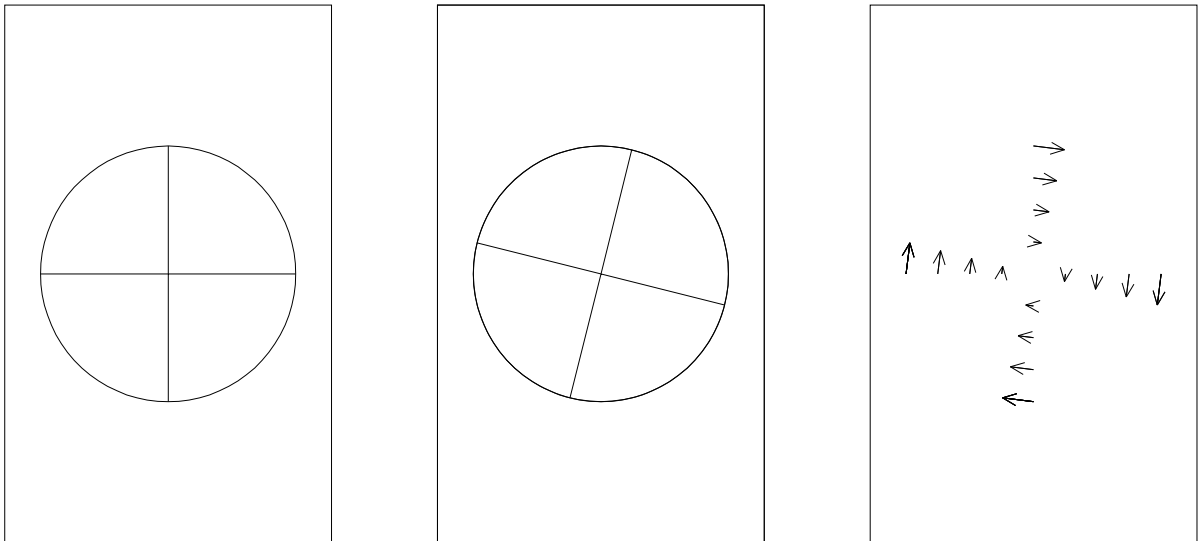
Obr. 19 Snímač nainstalovaný na kolejovém vozidle



Obr. 20 Testování snímače OSMES® při průjezdu zasněženou tratí

3.3.2. Metoda analýzy optického toku (Optical Flow)

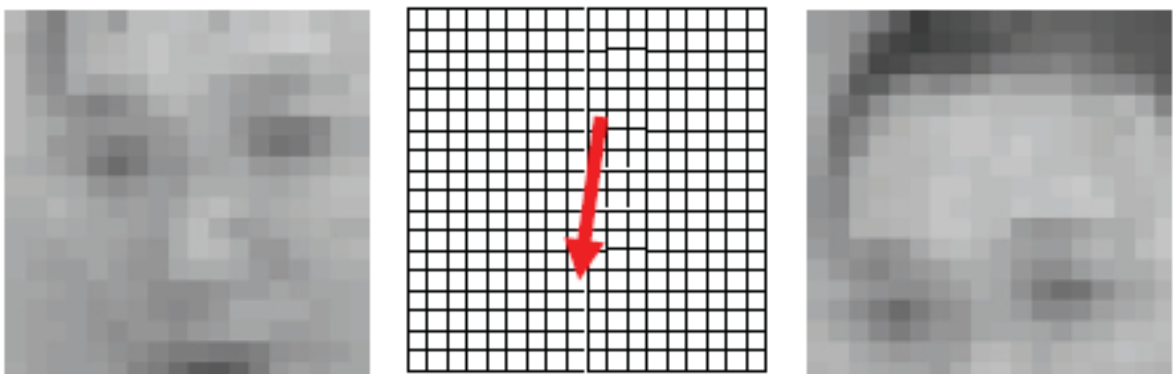
Metoda výpočtu optického toku zachycuje všechny změny obrazu za časový interval dt . Každému bodu obrazu odpovídá dvojrozměrný vektor rychlosti vypovídající o směru a velikosti rychlosti pohybu v daném místě obrazu. Optický tok lze využít v situacích, kdy je pozorovaná scéna statická a pohybující se je pozorovatel (kamera), statický pozorovatel a pohybující se scéna anebo v případě současného pohybu objektů i kamery.



Obr. 21 Optický tok vypočítaný ze dvou snímků sekvence

Detekci významných bodů (Obr. 22) lze použít v případech, kdy časové intervaly mezi snímky nelze považovat za velmi malé vzhledem k časovým konstantám určující pohyb v obraze. Aplikační postup metody se skládá ze dvou kroků. Prvním je samostatné nalezení významných bodů obrazu (např. hraniční body, jasově odlišné plochy apod.) a druhým je nalezení korespondence těchto bodů mezi jednotlivými obrazy [9].

Tuto metodu pro železniční techniku rozvinula a zdokonalila firma Corrsys-Datron. Snímač se skládá z kamery, která snímá temeno kolejnice a LED diod, které nasvětlují kolejnici infračerveným světlem. Obrazy jsou v konstantním časovém kroku vyhodnocovány (8–512 ms). Nevýhodou těchto snímačů je náchylnost na prašné prostředí. Proto se snímače vhodně krytují (Obr. 23).



Obr. 22 Princip detekce významných bodů



Obr. 23 Snímač firmy Corrsys-Datron



Obr. 24 Umístění snímače na vozidle

4. ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT, OVĚŘOVÁNÍ VHODNOSTI SNÍMAČE VGPS-200 PRO IDENTIFIKACI POLOHY VOZIDLA PŘI JÍZDNÍCH ZKOUŠKÁCH

Na dislokovaném pracovišti v České Třebové se objevila otázka, která se týká možností dalšího využití naměřených dat pomocí snímače VGPS-200 primárně určeným pro měření rychlosti. Je nutné zjistit, zda lze naměřená data použít i pro vyhodnocení pohybu vlaku tzn., zda se vlak pohybuje v přímé koleji, přechodnici nebo v oblouku.

4.1. Analýza přesnosti měření absolutní polohy a směrového vektoru snímačem VGPS-200

Datový soubor, který bude analyzován, obsahuje následující informace:

- Čas
- Absolutní x-ová souřadnice
- Absolutní y-ová souřadnice
- Rychlost
- Směrový vektor rychlosti (odchylka od severu)

Použitý byl snímač VGPS-200 od firmy Dewetron (Obr. 25):

Tab. 2 Parametry snímače VGPS-200 (údaje výrobce)

Měření rychlosti	
Přesnost měření	0,1 kmh ⁻¹
Vzorkovací frekvence	200 Hz
Rozsah měř. rychlostí	0,5-500 kmh ⁻¹
Analogový výstup	25 mV/kmh ⁻¹
Měření změny polohy	
Přesnost měření	< 20 cm/km
Vzorkovací frekvence	200 Hz
Digitální výstup	500 pls/m
Měření absolutní polohy	
Přesnost měření	< 40 cm
Vzorkovací frekvence	20 Hz
Rozlišení změny polohy	< 10 cm



Obr. 25 VGP-200 Dewetron

4.1.1. Standardní režim GPS

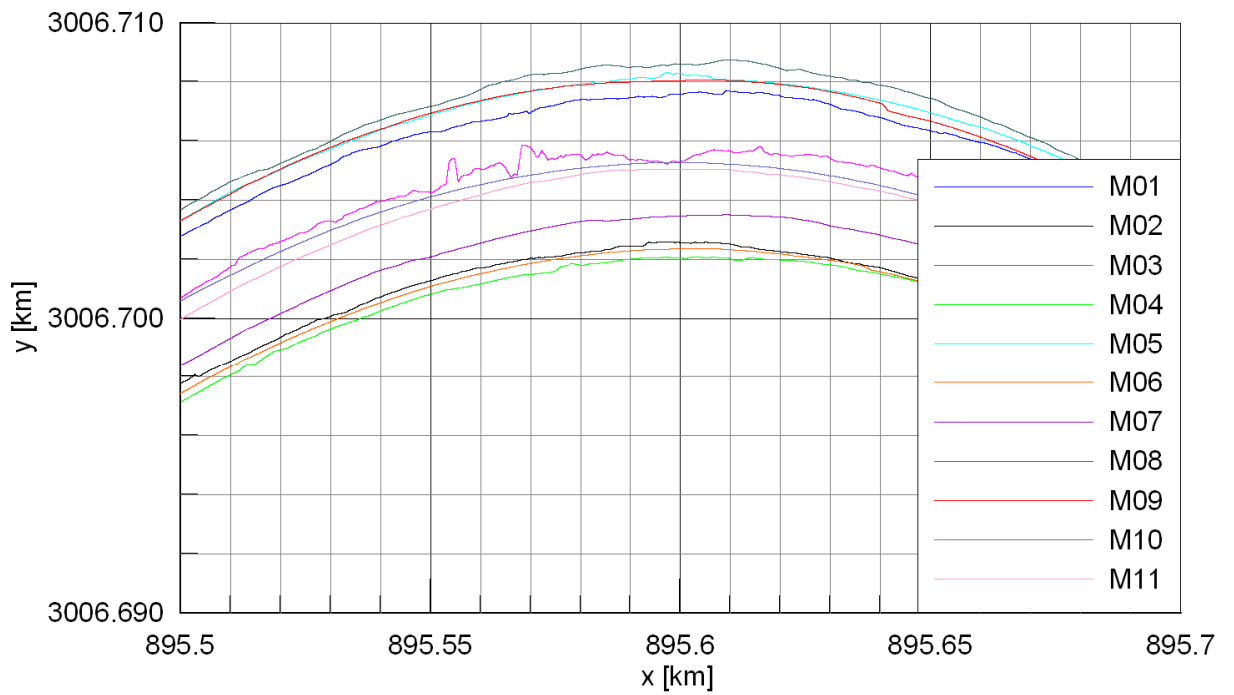
Pro analýzu přesnosti záznamu absolutní polohy a směrového vektoru snímače VGPS-200 při standardním režimu byla provedena opakovaná měření při průjezdu stanicí Poříčany po 0., 1. i 2. staniční koleji.

Na Obr. 26 jsou znázorněna naměřená data (X, Y). Je patrné, že se jedná o jízdu obloukem o konstantním poloměru, což jednoznačně dokládá Obr. 27, kde směrový vektor narůstá lineárně. Zaznamenané absolutní odchylky (Obr. 26):

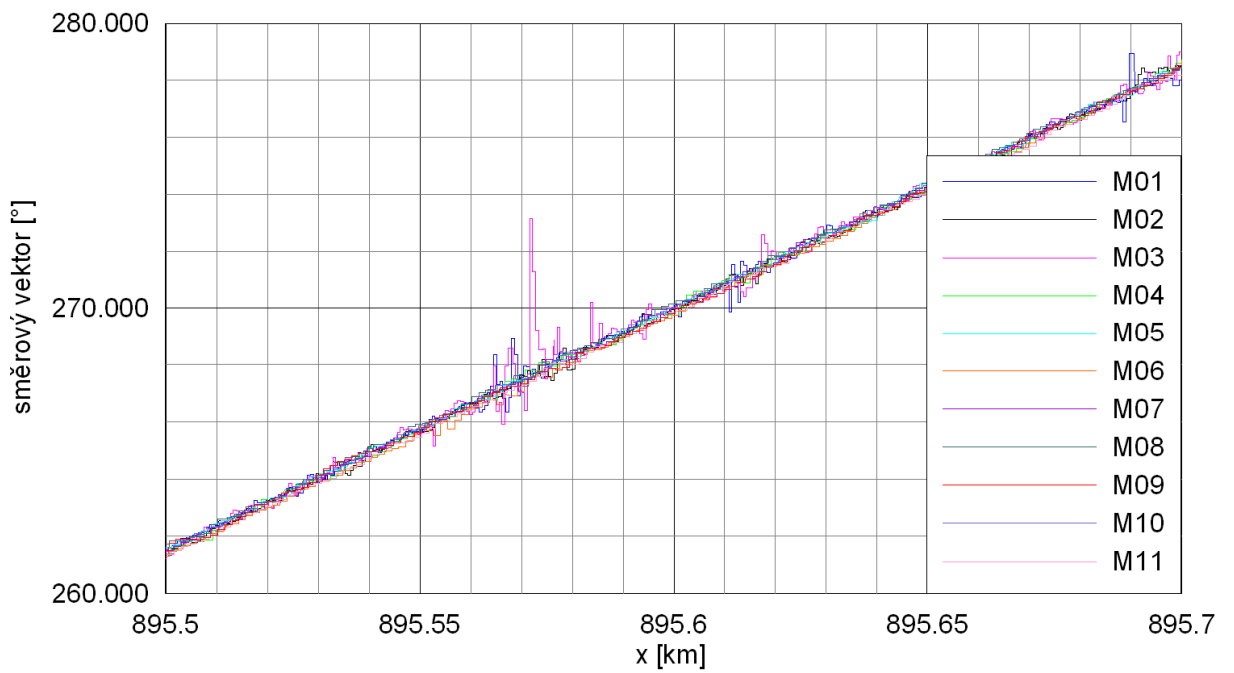
- jízda po 1. staniční koleji (M02, M04, M06), absolutní odchylka je asi 0,5m
- jízda po 2. staniční koleji (M01, M05, M08, M09), absolutní odchylka je asi 1m
- jízda po 0. staniční koleji (M03, M07, M10, M11), zde je jasně patrné, že hodnota M07 je značně odchylena od ostatních a proto je absolutní odchylka asi 2,5m

Lze tedy konstatovat, že maximální odchylka při standardním režimu snímače VGPS-200 se pohybuje kolem 2,5 m. Přesnost uváděná výrobcem při standardním režimu je 3 m.

Odchyly směrového vektoru (Obr. 27) v závislosti na absolutní X-ové souřadnici jsou zcela zanedbatelné. Z toho vyplývá, že pro analyzování pohybu vozidla v oblouku, přechodnici a přímě koleji bude přesnější použití směrového vektoru.



Obr. 26 Data X,Y z opakovaných jízd stanicí Poříčany (standardní režim)



Obr. 27 Závislost směrového vektoru na X-ové souřadnici (standardní režim)

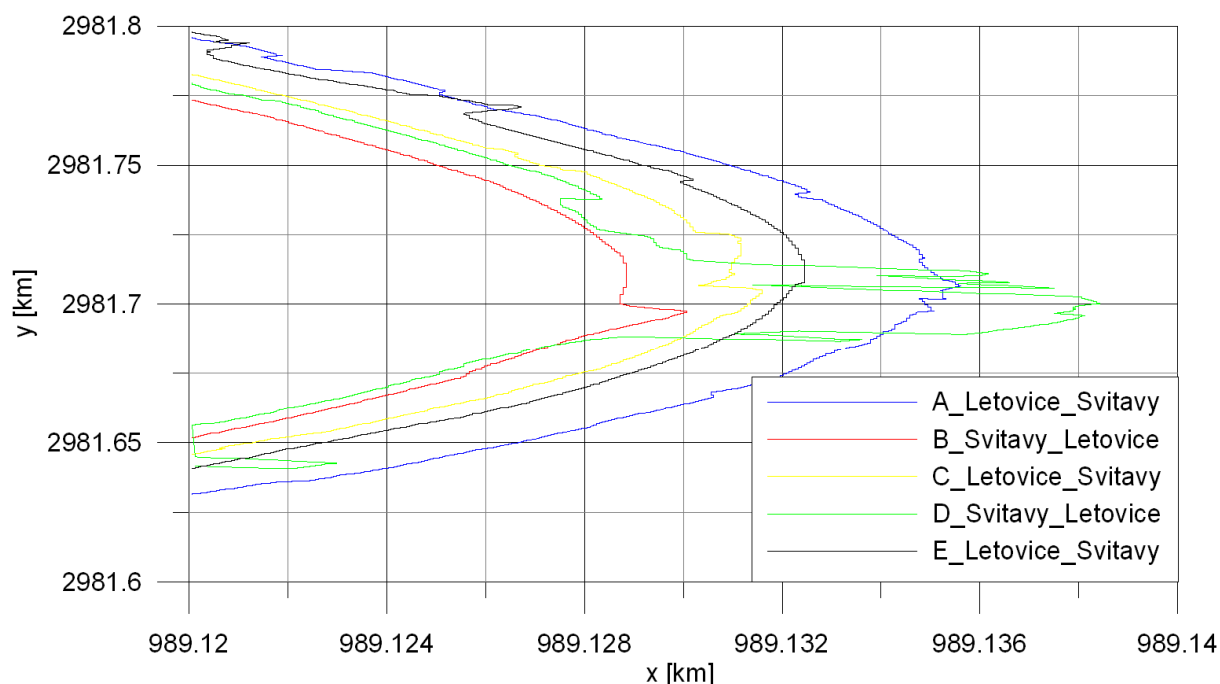
4.1.2. Diferenciální režim GPS

Pro analýzu přesnosti měření snímače VGPS-200 v diferenciálním režimu byla použita data naměřená při opakovaném průjezdu mezi stanicemi Svitavy a Letovice (Obr. 28).

Opakovaná jízda po 1. traťové koleji (měření B, D) vykazuje absolutní odchylku asi 9 m. Je to způsobeno velkým rozkmitem naměřených hodnot při jízdě D.

Opakovaná jízda po 2. traťové koleji (měření A, C, E) vykazuje absolutní odchylku asi 5 metrů.

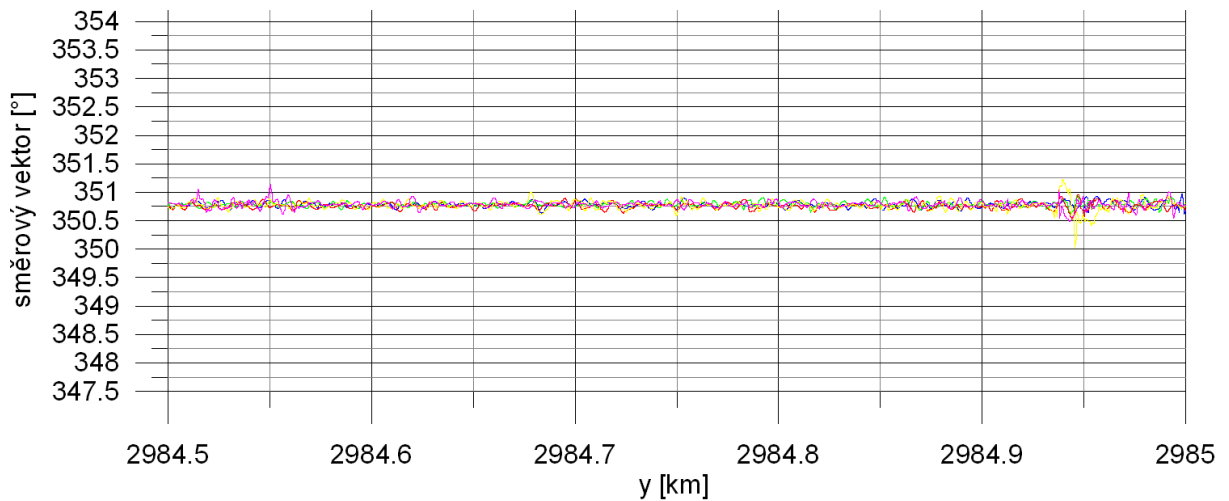
Diferenciální režim tedy při měření absolutní polohy nepřináší žádné zpřesnění naměřených veličin. Výrobce uvádí přesnost při použití diferenciálního režimu 1,8 m. Této přesnosti se však výsledky měření ani nepřibližují. Je to způsobeno tím, že při měření v diferenciálním režimu používá snímač pouze některé z dostupných satelitů. Tím je snížena operabilita tohoto měřicího systému za ztížených podmínek (špatné počasí, jízda v zářezu, jízda zalesněnou krajinou apod.).



Obr. 28 Data X,Y z opakovaných jízd Svitavy-Letovice (diferenciální režim)

Na Obr. 29 je znázorněn průběh směrového vektoru v závislosti na Y-ové souřadnici. Zde se jedná o jízdu v přímé trati. Odchyly směrového vektoru jsou

zanedbatelné. Pro vyhodnocení směru pohybu vozidla s ohledem na prvky trasování koleje bude přesnější použití směrového vektoru.



Obr. 29 Závislost směrového vektoru na X-ové souřadnici (diferenciální režim)

4.2. Analýza dat s ohledem na prvky teoretického trasování koleje

Pokud se vozidlo pohybuje v přímé koleji, měl by být rozdíl směrových vektorů rychlosti v ideálním případě roven 0, v přechodnici by měl narůstat nebo klesat a v oblouku by se měl ustálit na určité konstantní hodnotě (16), která je dána vzorkovací frekvencí GPS snímače, poloměrem oblouku a rychlostí, kterou se pohybuje vozidlo v oblouku.

$$\varphi = \frac{V \cdot 180}{3,6 \cdot R \cdot f \cdot \pi} \quad (16)$$

kde:

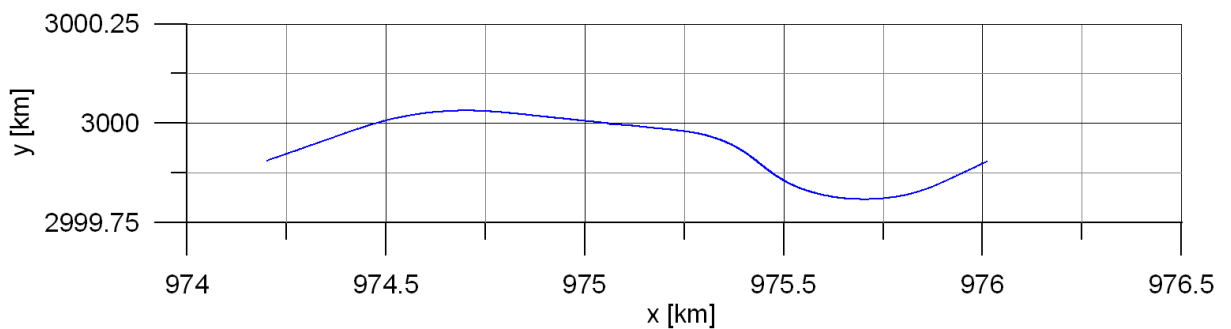
φ	rozdíl směrových vektorů	[°]
V	rychlost.....	[kmh ⁻¹]
R	poloměr oblouku.....	[m]
f	vzorkovací frekvence.....	[Hz,s ⁻¹]

Tato situace je v praxi nedosažitelná, a proto je nutné data matematicky upravovat. Pro tuto analýzu byl vyvinut algoritmus, který data vyhladil a umožnil další zpracování. V algoritmu bylo použito klouzavého průměru. Naměřená data

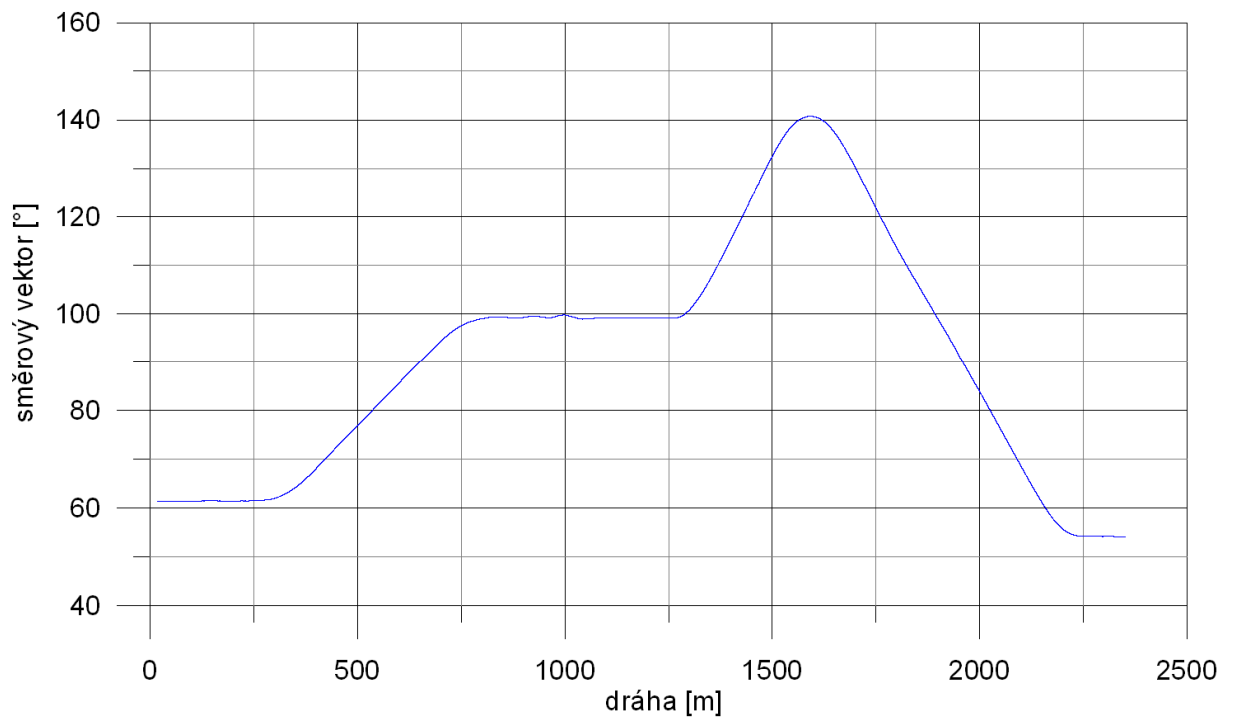
(Choceň-Brandýs nad Orlicí) jsou na Obr. 30 a na Obr. 31. Na Obr. 32 je porovnání surových dat s daty po první úpravě klouzavým průměrem. Z Obr. 33 zjistíme, že absolutní odchylka upravených dat kolem střední hodnoty se pohybuje kolem $0,0007^\circ$. Absolutní odchylka neupravených dat se pohybuje kolem $0,05^\circ$.

Z upravených dat lze určit, kdy se vozidlo nachází v přímé koleji, přechodnici nebo oblouku. Stále však tato data nejsou vhodná pro určení poloměru oblouku. Pro další vyhlazení průběhu odchylky směrových vektorů v závislosti na dráze (Obr. 33) je nutné použít ještě jednou klouzavého průměru, tentokrát aplikovaného na odchylky směrových vektorů. Absolutní odchylka se pak pohybuje kolem $0,0001^\circ$ (Obr. 34).

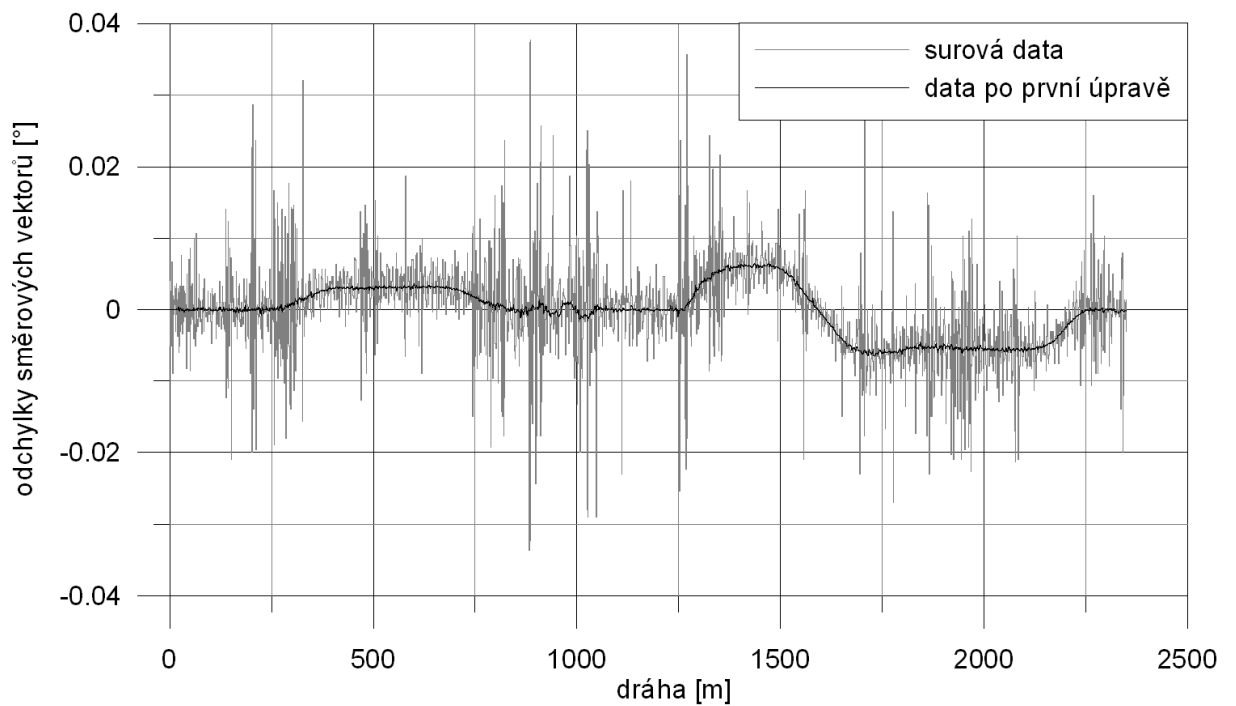
Z Obr. 33 je zřejmé, že použití klouzavého průměru data nijak neposunulo, pouze došlo k nepatrnému zkreslení začátku a konce přechodnice. Toto zkreslení však nemá vliv na výpočet poloměru oblouku.



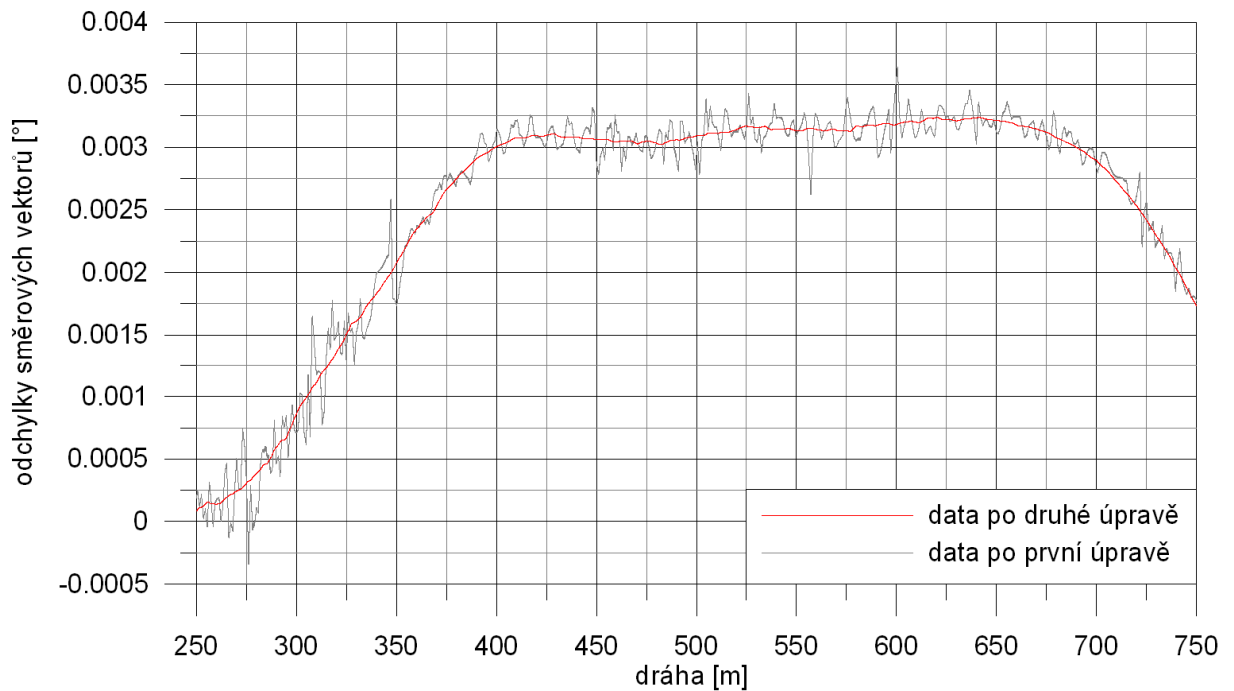
Obr. 30 Absolutní poloha (Choceň-Brandýs nad Orlicí)



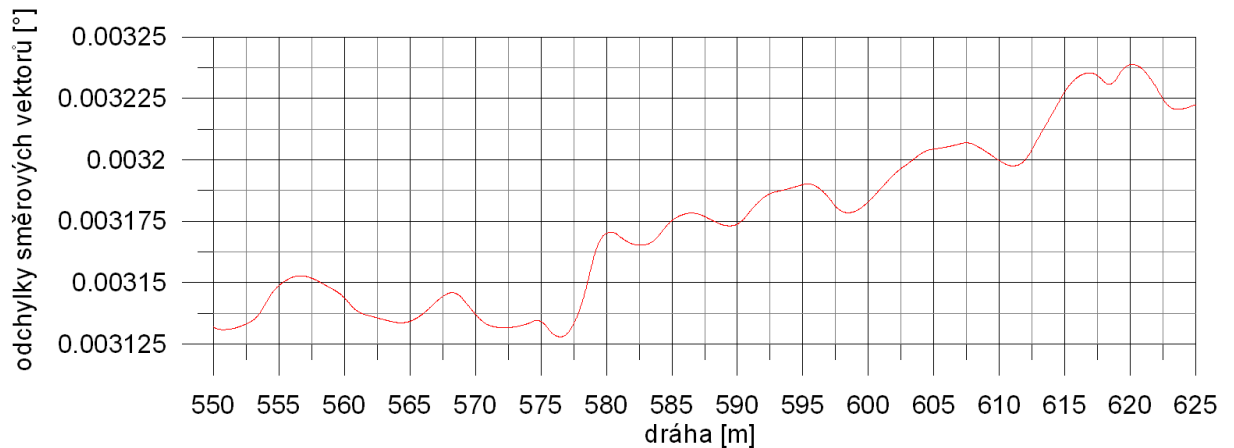
Obr. 31 Průběh směrového vektoru v závislosti na dráze



Obr. 32 Rozdíl směrových vektorů v závislosti na dráze (surová data a data po 1. úpravě)



Obr. 33 Rozdíl směrových vektorů v závislosti na dráze (data po 1. úpravě a data po 2. úpravě)



Obr. 34 Absolutní odchylka směrového vektoru (data po 2. úpravě)

4.3. Určení délky a poloměru oblouku

Jednoduchou úpravou vztahu (16) lze velmi jednoduše dopočítat poloměr oblouku. Algoritmus pro výpočet tohoto poloměru, je nastaven tak, aby nebyl citlivý na špičky signálu v přímé trati. Nevýhodou tohoto algoritmu je, že přesně nepostihuje začátek a konec přechodnice. Algoritmus je necitlivý na výpočet poloměru oblouků s velkým poloměrem (např. při $V=50 \text{ kmh}^{-1}$ a $f_{vz}=600 \text{ m}$ je $R_{\max}=1320 \text{ m}$).

Algoritmus přiřazuje odchylkám směrových vektorů logický operátor 1 nebo 0. Operátor 0 přiřazuje tehdy, je-li vozidlo v přímé trati nebo na začátku přechodnice. Operátor 1 přiřazuje tehdy, je-li vozidlo v oblouku nebo v části přechodnice. Je-li přiřazen logický operátor 1, spustí se výpočet poloměru oblouku. Logický operátor je přiřazován na základě porovnání odchylky směrového vektoru s hodnotou 0,001. Tato hodnota byla určena na základě statistického zpracování naměřených dat. 1 přiřazuje, je-li odchylka větší než tato hodnota.

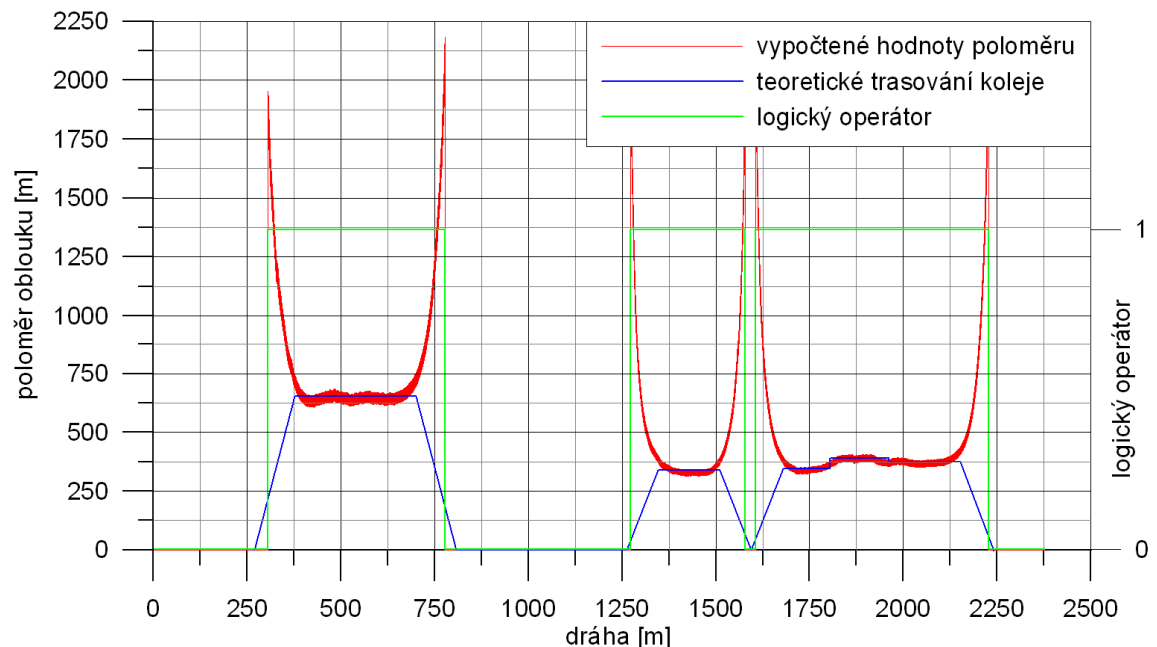
Na Obr. 35 jsou znázorněny vypočtené hodnoty poloměru oblouků, teoretické trasování koleje v závislosti na dráze.

Přesnost tohoto výpočtu je ověřena na Obr. 36 a Obr. 37. Na Obr. 36 se střední hodnota vypočteného poloměru pohybuje kolem 645 m. Teoretický poloměr tohoto oblouku je 654 m.

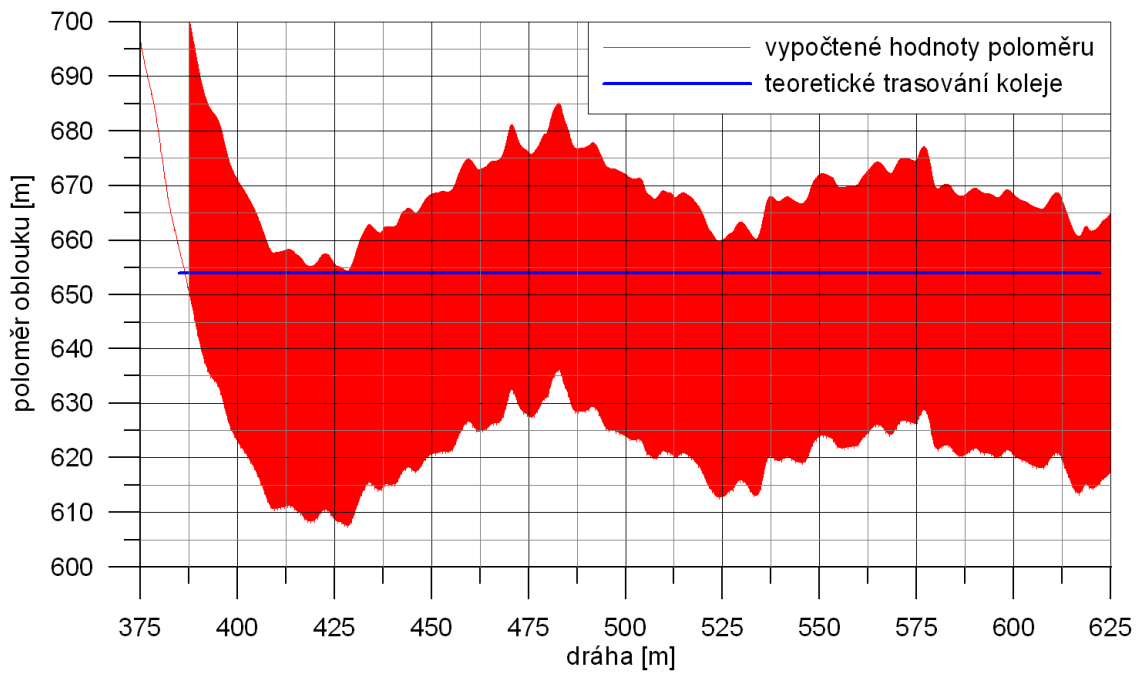
Na Obr. 37 se střední hodnota vypočteného poloměru pohybuje kolem 390 m, což se shoduje s teoretickým poloměrem oblouku.

Přesnost tohoto výpočtu na základě naměřených dat se pohybuje kolem 10 m.

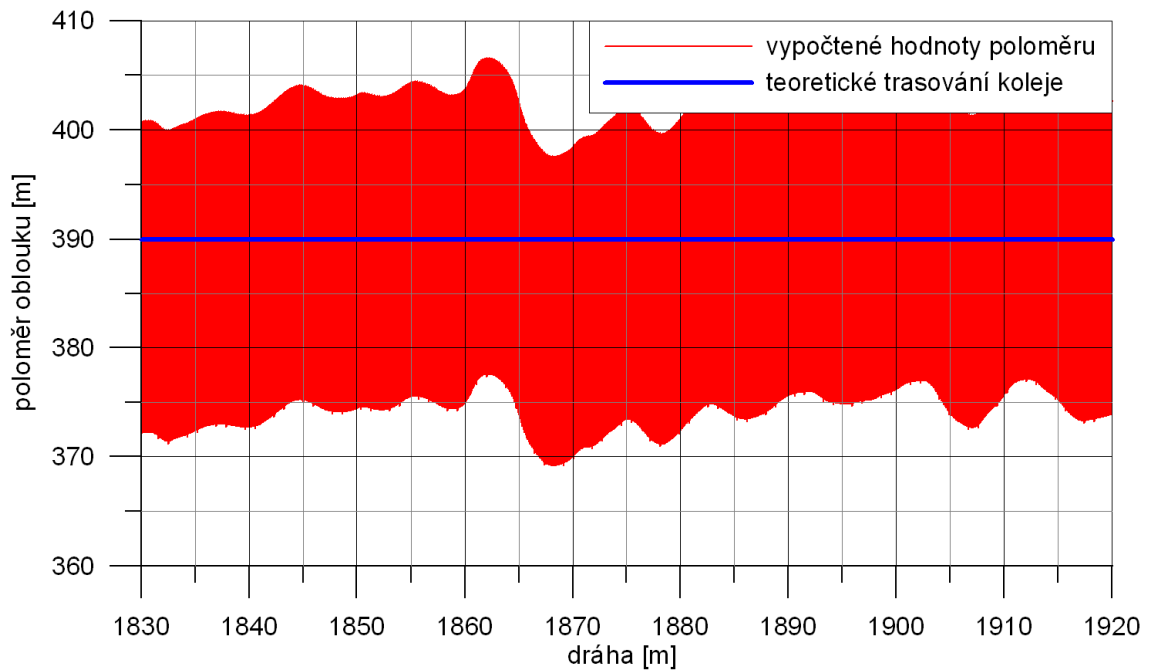
Přesnost určení délky oblouku je nízká a je to dáno použitím klouzavého průměru. Například při $V=72 \text{ kmh}^{-1}$ a $f_{vz}=600 \text{ Hz}$ se průměruje na dráze 40 m.



Obr. 35 Porovnání teoretického trasování koleje s daty vypočtenými algoritmem (Choceň-Brandýs nad Orlicí).



Obr. 36 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje ($R=654$ m)



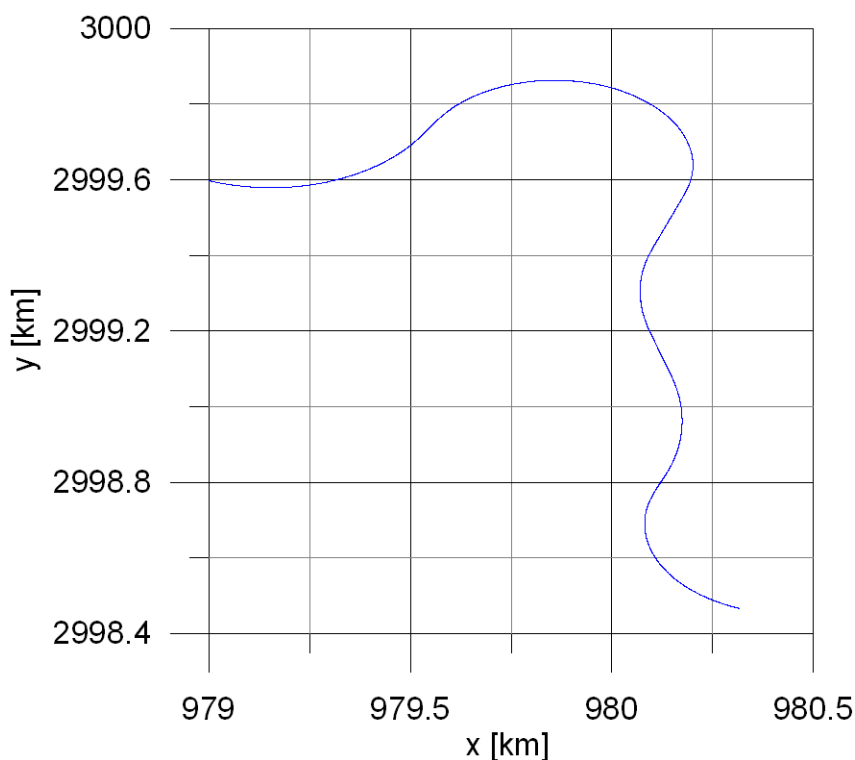
Obr. 37 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje ($R=390$ m)

4.4. Ověření přesnosti výpočtu poloměru oblouku na jiném traťovém úseku

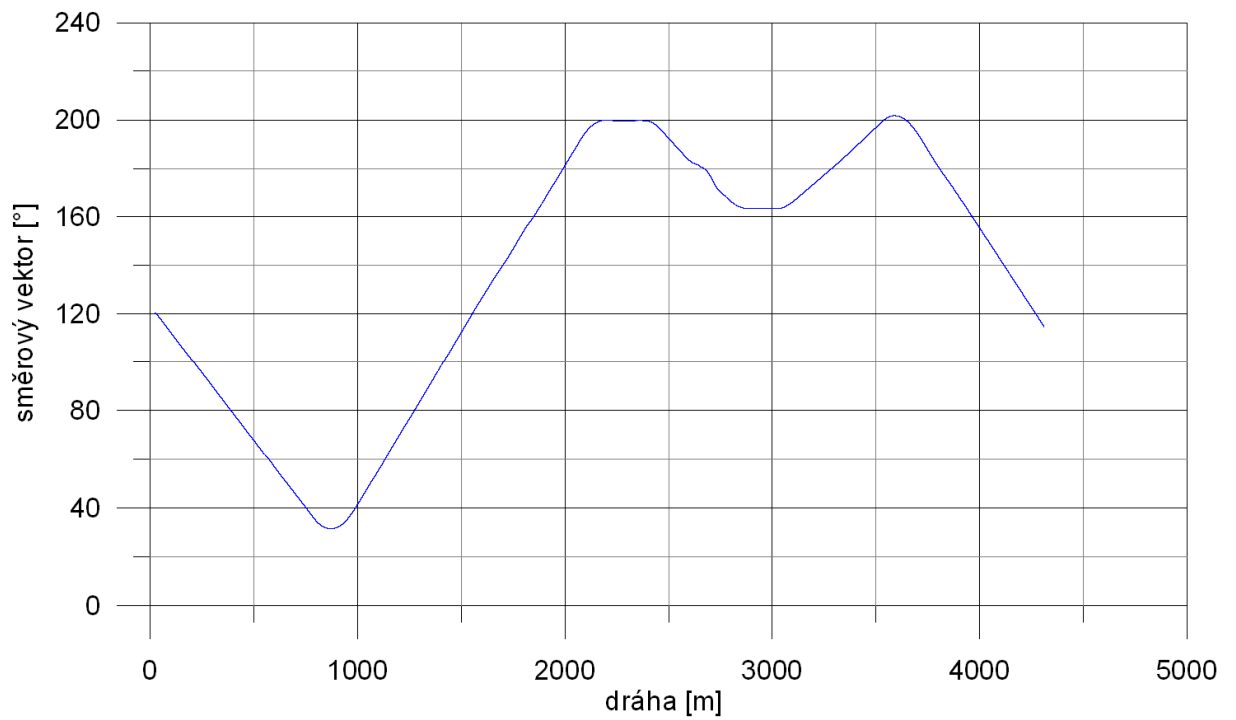
Pro ověření přesnosti výpočtu byla analyzována data z úseku Bezpráví-Ústí nad Orlicí (Obr. 38 a Obr. 39).

Na Obr. 40 jsou znázorněny vypočtené hodnoty poloměru a teoretické trasování koleje. Z obrázku je patrné, že mezi 500-600 m dochází k zvýšení poloměru oblouku na asi 565 m. Na Obr. 39 nejsou mezi 500-600 m vidět žádné výrazné odchylky, a proto je možné, že došlo na trati ke stavebním úpravám, které nebyly zaznamenány do teoretického trasování koleje.

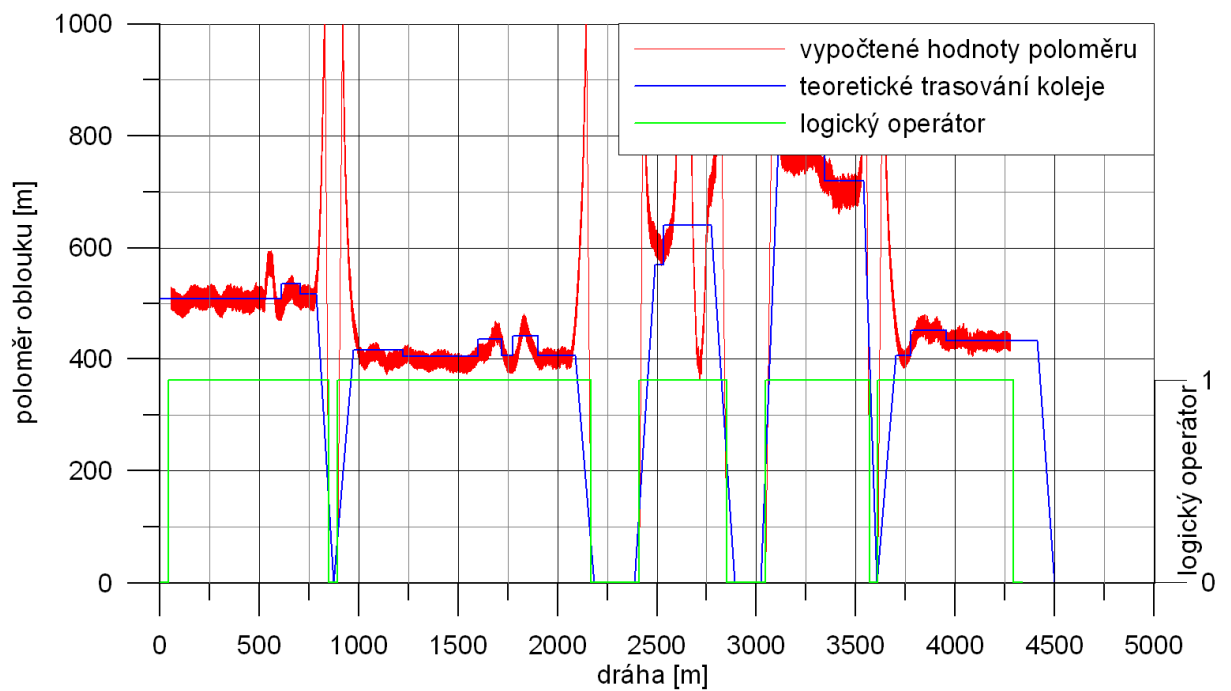
Mezi 2500-2850 m dojde k prudkému rozkolísání naměřených dat, které mají vliv na výsledky poloměru oblouku (Obr. 41). Trať v tomto oblouku vede podél prudkého svahu, který je zpevněn betonovou opěrnou zdí. Je tedy možné, že snímač ztratí některé z dostupných satelitů nebo dojde k odrazu signálu od betonové zdi a tím i jeho zkreslení.



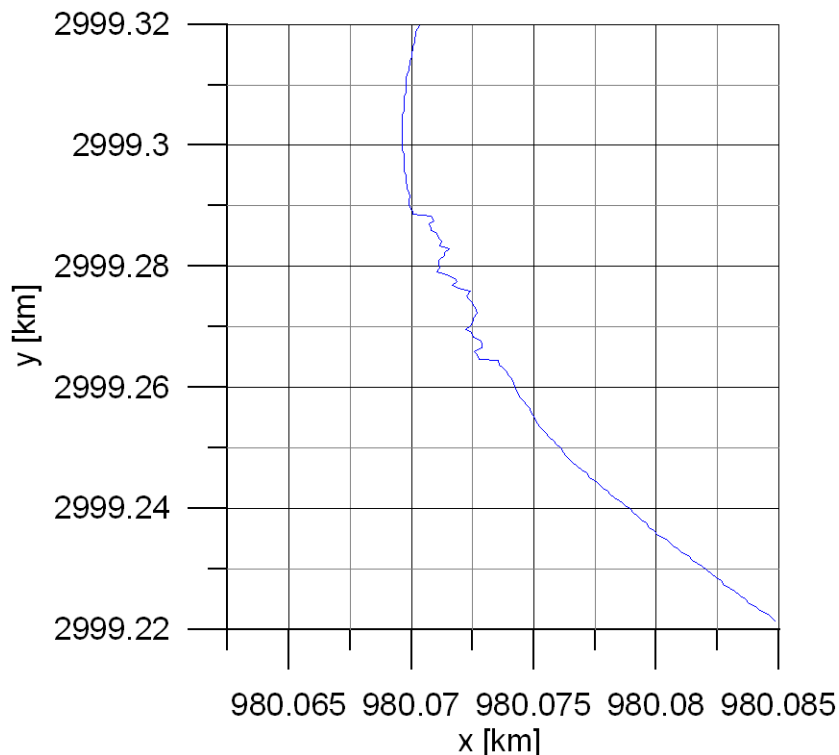
Obr. 38 Absolutní poloha (Bezpráví-Ústí nad Orlicí)



Obr. 39 Průběh směrového vektoru v závislosti na dráze (Bezpráví-Ústí nad Orlicí)



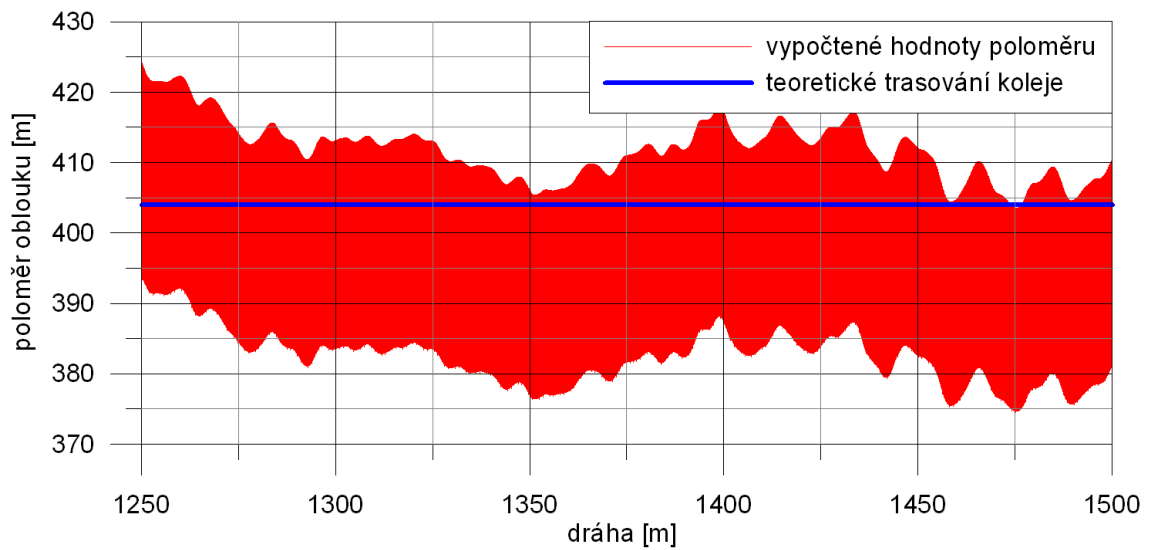
Obr. 40 Porovnání teoretického trasování koleje s daty vypočtenými algoritmem (Bezpráví-Ústí nad Orlicí)



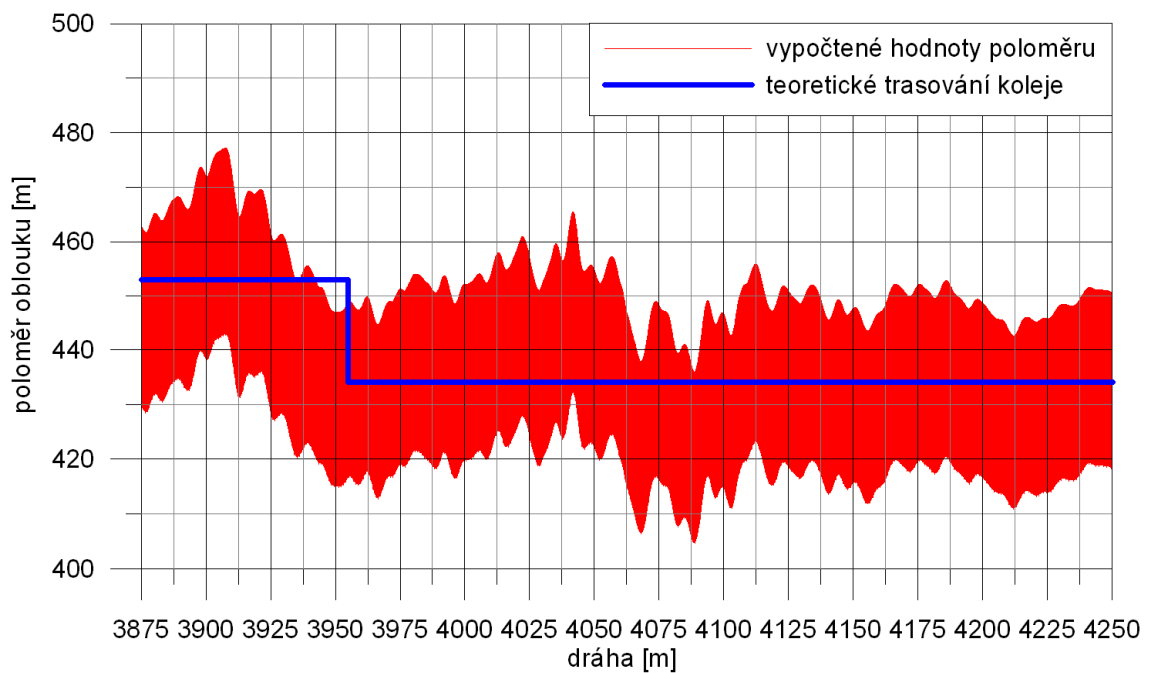
Obr. 41 Absolutní poloha, chybný signál snímače

Teoretický poloměr oblouku na Obr. 42 je 404 m. Vypočtená hodnota poloměru oblouku z naměřených dat se pohybuje kolem 397 m.

Teoretický poloměr oblouku na Obr. 43 je 453 m a bez přechodnice se mění na 434 m. Na úseku, kde je teoretický poloměr oblouku 453 m se vypočtené hodnoty poloměru pohybují kolem 450 m. Na úseku s teoretickým poloměrem oblouku 434 m se vypočtené hodnoty poloměru oblouku pohybují kolem 435 m. Přesnost se tedy pohybuje kolem 5 m. Při změně poloměru oblouku je patrné, že dochází ke zaoblení grafu vypočtených hodnot poloměru. Je to dáno statistickým zpracováním naměřených dat.



Obr. 42 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje ($R=404$ m)



Obr. 43 Porovnání přesnosti výpočtu poloměru oblouku s teoretickým trasováním koleje ($R=453$ m, $R=434$ m)

5. ZÁVĚR

Na základě porovnání výsledků měření absolutní polohy pomocí snímače VGPS-200 v diferenciálním režimu bylo zjištěno, že diferenciální režim nepřináší prakticky žádné zpřesnění naměřených dat, neboť trať není vedena pouze širokou krajinou, kde je minimum překážek, ale může být vedena v zářezu, v zalesněné krajině nebo v zastavbě. Všechny tyto faktory ovlivňují přesnost měření. Standardní režim měření je tedy vhodnější, protože snímač využívá všech dostupných satelitů a není tolik náchylný na překážky v prostoru.

Úpravou a zpracováním dat lze postihnout jednotlivé prvky trasování koleje. V signálu se samozřejmě mohou vyskytovat značné nepřesnosti, objasnit však lze pouze některé z nich (okolí trati, špatné počasí, apod.).

Výpočet poloměru oblouku lze na základě upravených naměřených dat realizovat. Porovnáním teoretického trasování koleje s vypočtenými hodnotami poloměru je zjištěno, že přesnost určení poloměru oblouku se pohybuje kolem 10 metrů. Tato přesnost je při měření na vozidle dostatečná. Délku oblouku není možné přesně postihnout, protože úpravou naměřených dat dojde ke zkreslení v místě přechodu přímé trati do přechodnice a přechodnice do oblouku. Toto zkreslení roste se zvyšující se základnou klouzavého průměru, kterým upravujeme surová data, a se zvyšující se rychlostí vozidla. Délku oblouku lze z grafu pouze orientačně odečíst. Skutečná délka oblouku dle teoretického trasování koleje je vždy o něco větší.

Lze tedy konstatovat, že data naměřená snímačem VGPS-200 primárně určeným pro přesné měření rychlosti zkoušeného vozidla jsou vhodná i pro analýzu trajektorie vozidla. Algoritmus výpočtu poloměru oblouku je necitlivý na oblouky velkých poloměrů.

UNIVERZITA PARDUBICE DFJP	Bakalářská práce	Str. 52
---------------------------------	-------------------------	---------

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JENČÍK, Josef, VOLF, Jaromír. *Technická měření*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
- [2] KRÍŽ, Rudolf, VÁVRA, Pavel. *Strojírenská příručka*. Praha : Scientia, 1993. 205. ISBN 80-85827-00-3.
- [3] LISCHNER, Ray. *Delphi v kostce : Pohotová referenční příručky*. Ivo Magera; Luděk Horčíčka. Praha : Computer Press, 2000. 543 s. ISBN 80-7226-361-7.
- [4] STEINER, Ivo, ČERNÝ, Jiří. *GPS od A do Z*. Praha : ENav s.r.o., 2003. 176 s. ISBN 80-239-0228-8.
- [5] ZABLER, Erich, et al. *Snímače v motorových vozidlech*. Jurgen Crepin; Tomáš Kampán. Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 2001. 148 s. ISBN 80-903132-5-6.
- [6] ATAS *Elektromotory Náchod a.s. : tachodynamika a tachogenerátory* [online]. 2008 [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <http://www.atas.cz/products.php?sekce=2&menuid=33&lng=cz>.
- [7] *Automatizace - snímače* [online]. 2009 [cit. 2009-03-07]. Dostupný z WWW: <http://www.snimace.xf.cz/otackomery-mechanicke-indukcni.php>.
- [8] *CORRSYS DATRON : CORREVIT* [online]. c2008 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: http://www.corrsys-datron.com/Support/PDF_Downloads/ProductRange-RAIL.pdf.
- [9] HORÁK, Karel. *Dynamické obrazy : Optický tok* [online]. 2008 [cit. 2009-05-03]. Dostupný z WWW: <http://www.uamt.feec.vutbr.cz/vision/TEACHING/MPOV/12%20-%20Dynamicke%20obrazy.pdf>.
- [10] *Siemens : Optical speed measurement* [online]. c2009 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: http://transportation.siemens.com/ts/en/pub/products/ra/products/track_vacancy/osmes.htm.
- [11] Snímání polohy a otáček pomocí Hallova senzoru. *Studijní materiály FEL ČVUT Praha* [online]. 2006 [cit. 2009-03-02]. Dostupný z WWW: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/cviceni/Navody%20na%20cviceni/>.
- [12] *QTEST měřící a přístrojová technika* [online]. 2009 [cit. 2009-03-15]. Čeština. Dostupný z WWW: http://www.qtest.cz/mereni-otacek/otackomery.htm?gclid=CJPI5s7Rn5oCFc4TzAod0yR_6A.

UNIVERZITA PARDUBICE DFJP	Bakalářská práce	Str. 53
---------------------------------	-------------------------	---------

[13] *Wikipedia : alternátor* [online]. c2000 [cit. 2009-05-07]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Altern%C3%A1tor>.

[14] *Wikipedia : komutátor* [online]. c2000 , 14.4.2009 [cit. 2009-05-06].
Dostupný z WWW:
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Komut%C3%A1tor_\(elektrotechnika\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Komut%C3%A1tor_(elektrotechnika)).