

Analýza nahraditelnosti aktivního systému úsekového měření rychlosti pasivním systémem

P. Chmelar¹, L. Rejček^{1,2}, M. Dobrovolný¹

¹ Katedra elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice, Studentská 95, Pardubice

² Ústav fyziky atmosféry, Oddělení aeronomie, AV ČR v.v.i. Praha 4, Boční II 1401, Praha

E-mail : pavel.chmelar@student.upce.cz, lubos.rejcek@student.upce.cz, martin.dobrovolny@upce.cz

Anotace:

Článek popisuje možnosti náhrady aktivního systému měření rychlosti pasivním systémem. Pro tyto účely byla provedena nezávislá měření se dvěma pohyblivými objekty. První je zmenšený model vozidla a druhý je pohyblivý robot Boe-Bot. U obou systémů jsou posouzeny podmínky zaměnitelnosti a přesnost měření pasivního systému. Porovnávané systémy lze využít ve vestavěných aplikacích. Z tohoto důvodu jsou porovnány také rychlosti výpočtů jednotlivých algoritmů pro určení rychlosti.

Annotation:

This paper describes replacing possibilities of active speed measurement systems by passive systems. For this purpose there were performed two independent measurements of moving objects. The first object was represented by a small vehicle model and second by a mobile Boe-Bot robot. Both systems were assessed in terms of the interchangeability and accuracy of the systems. The presented systems can be easily used in embedded applications. For this reason there were also compared calculation speeds of the systems.

ÚVOD

V rámci řešení problematiky navigace autonomního robota v projektu SGS bylo zapotřebí zkonstruovat systém měření rychlosti s minimálními pořizovacími náklady. Požadavkům odpovídal pasivní systém a bylo zapotřebí ověřit jeho přesnost oproti aktivnímu systému.

V dnešní době se pro měření rychlosti nejvíce využívají systémy založené na Dopplerově jevu. Radar vyšle signál o frekvenci desítek GHz, který se odrazí od měřeného dopravního prostředku a z rozdílu vyslané a přijaté frekvence je určena výsledná rychlost. Obdobným způsobem pracují i laserové měřiče rychlosti. Tyto systémy využívá Policie ČR.

Rychlost sledovaného objektu lze měřit také systémy založenými na principu závory. Zmíněné systémy lze rozdělit do dvou skupin. První skupinu označujeme jako aktivní systém. Ke své činnosti vyžaduje ozařování optického prvku. Nejčastěji se využívá laserového paprsku pro jeho směrovost. Příkladem takového systému může být optická závora [4]. Princip jiného pokročilejšího aktivního systému [2] využívá křížovou kovarianci založenou na FFT. Kromě rychlosti měří i délku vozidla.

Druhá skupina je označována jako pasivní systémy. Pro svoji činnost nevyžadují ozařování a pracují na principu změny intenzity okolního světla poblíž měřících čidel. Příkladem systému založeného na tomto principu je měření rychlosti pohybu lana [1]. Zařízení pro měření rychlosti pohyblivých objektů [5] se primárně využito pro měření rychlosti vozidel.

Předchozí články [3], [4] a [5] popisují zejména vlastnosti a principy zkoumaných systémů, ovšem bez hlubší analýzy přesnosti a vzájemné substituce. Tento článek se věnuje možnostem nahraditelnosti aktivního systému měření rychlosti pasivním systémem.

Pro posouzení vhodnosti aplikace bylo nutné provést měření a porovnání chyb obou systémů. Jsou zde shrnuty výsledky provedených měření, které byly realizovány v průběhu roku 2012 na dvou modelových objektech (zmenšený model vozidla a robot Boe-Bot). Vyhodnocení je zejména zaměřeno na přesnost měření pasivního systému v porovnání s aktivním systémem. Pro určení rychlosti pomocí pasivního systému lze využít několik výpočetních metod s různou dobou výpočtu. Jelikož mohou být tyto systémy nasazeny ve vestavěných aplikacích, jsou porovnány také rychlosti výpočtů jednotlivých algoritmů.

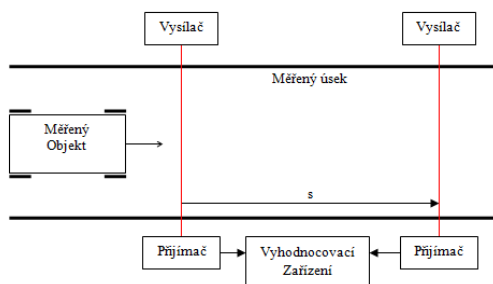
PRINCIP FUNKCE AKTIVNÍHO A PASIVNÍHO SYSTÉMU MĚŘENÍ RYCHLOSTI

Tento článek se zabývá primárně výsledky měření obou systémů. Podrobný popis funkce se nachází ve zdrojích [4] a [5].

Aktivní systém

Aktivní systém měření rychlosti pracuje na principu optické závory. Na okrajích dráhy, po které se pohybuje měřený objekt, jsou umístěny dva vysílače

a dva přijímače. Z obou vysílačů vychází kolmo na dráhu objektu paprsek laseru a dopadá na příslušný přijímač, jako je znázorněno na obrázku (obr. 1). Data z obou přijímačů jsou po celou dobu měření zaznamenávána. Měřený objekt svoji jízdou přeruší nejprve dopadající paprsek na první přijímač a po určité době t také druhý paprsek.



Obr. 1: Princip aktivního systému [4]

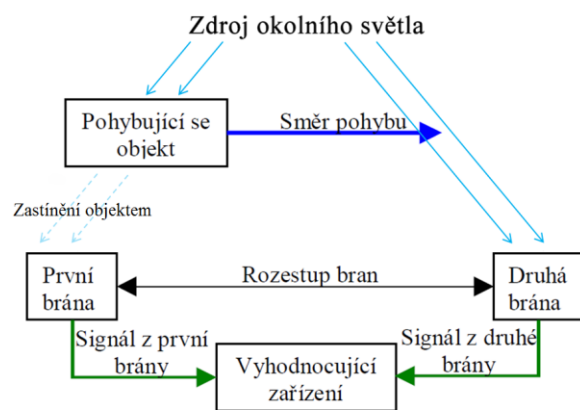
Vysílače a přijímače mají od sebe známý odstup s . Rychlost vozidla se určí pomocí vztahu (1).

$$v = \frac{s}{t} [m/s] \quad (1)$$

Časový úsek t se určí z rozdílu dob mezi přerušením paprsků vlivem průjezdu měřeného objektu.

Pasivní systém

Koncept bránového principu využívá rovněž pasivní systém. Určení neznámé rychlosti pohybujícího se objektu je tedy stanovena podobným způsobem, jako je tomu u aktivního systému.



Obr. 2: Princip pasivního systému [5]

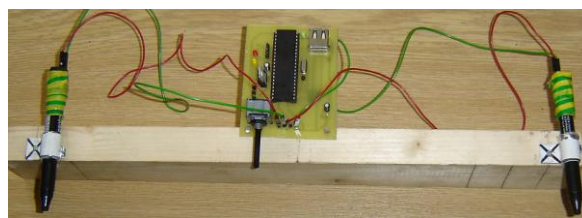
U pasivního systému není brána přímo ozařována. V jejím okolí se vlivem pohybujícího objektu mění emise světelného záření, jež má za následek změny tvaru výstupních signálů. Pro určení rychlosti je zapotřebí použít pokročilejší matematické zpracování.

V této kapitole jsou stručně uvedeny principy obou systémů. Podrobnější popis výstupních signálů a popis problémů s vyhodnocením následuje v dalších kapitolách.

MĚŘENÍ SYSTÉMŮ (POPIS PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ)

Pro účely posouzení možnosti nahraditelnosti aktivního systému pasivním byly v průběhu roku 2012 realizovány dvě skupiny měření na dvou modelových objektech. Prvním je zmenšený model vozidla a druhý je robot Boe-Bot. V rámci jedné skupiny bylo realizováno padesát pokusů, při kterých byly zároveň vyhodnoceny oba posuzované systémy. Jednotlivá měření probíhala za snížených světelných podmínek z důvodu omezení vlivu okolního záření u aktivního systému. Nadměrné okolní osvětlení snižuje strmost a výšku spínacích hran, které jsou klíčové pro přesné určení rychlosti při použití aktivního systému (obr. 4). Měření byla realizována pro oba systémy současně z důvodu zachování konstantních podmínek po dobu jednoho měření.

Na obrázku (obr. 3) je ukázka vytvořeného systému pasivního měření. Skládá se ze dvou optických senzorů a jednotky MCU ATmega16, která zprostředkovává posílání dat do počítače, kde probíhá finální určení rychlosti sledovaného objektu a vyhodnocení výsledků.

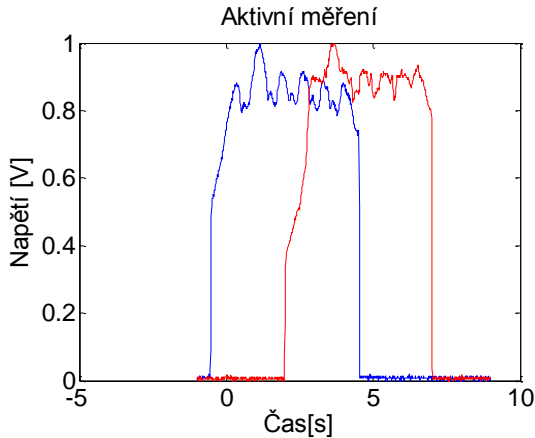


Obr. 3: Přípravek pro pasivní úsekové měření rychlosti vozidel [5]

Zkonstruovaný systém pro měření modelových objektů obsahuje senzory pasivního systému a byl navíc doplněn o senzory aktivního systému (laserový zářič a přijímač v podobě optického detektoru). Vzdálenost senzorů byla nastavena na osový rozestup 10 cm a modelový objekt startoval vždy ze stejné počáteční polohy, 20 cm před prvním senzorem. Senzory pasivního systému byly umístěny o 2,5 cm za senzory aktivního systému.

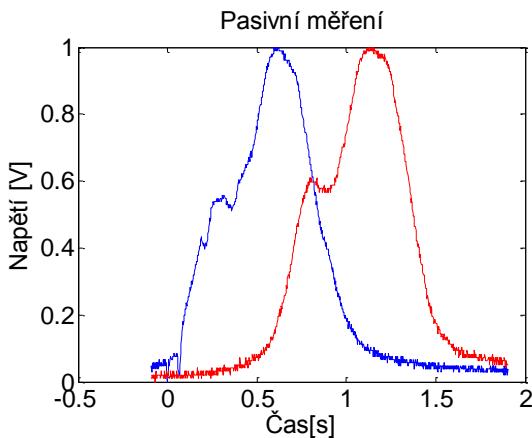
Obě skupiny měření byly statisticky vyhodnoceny z důvodu eliminace nežádoucích chyb, které se mohly vyskytnout při jednotlivých měření. Statistické hodnoty zároveň poukazují na stálost naměřených výsledků.

Na obrázku (obr. 4) jsou průběhy obou senzorů získané aktivním systémem. Po přerušení laserového paprsku dojde na fotoprvek ke skokové změně napětí v důsledku jeho přivření. Počet vzorků, o které jsou navzájem oba průběhy posunuty, lze určit z rozdílu pozic průběhů. V místech překročení nastavené prahové hodnoty je proveden odečet a vyhodnocen rozdíl.



Obr. 4: Příklad signálu získaného z aktivního systému

Následující obrázek (obr. 5) zachycuje průběhy jiného modelu získané pasivním systémem. Výstupy senzorů jsou závislé na tvaru měřeného objektu. Náběžná a sestupná hrana u pasivního systému nemá strmý charakter jako aktivní systém, kde při přerušení paprsku dojde ke skokové změně výstupního napětí.



Obr. 5: Příklad signálu získaného z pasivního systému

Tento jev je způsoben tím, že aktivní systém je v klidovém stavu přímo ozařován a při přerušení paprsku dojde ke skokové změně intenzity světelného toku dopadající na bránu. Pasivní systém vyhodnocuje pouze změny intenzity světla vyvolané pohybem měřeného objektu před senzorem. Vlivem tvaru objektu a jeho odrazivosti může docházet k náhodným změnám intenzity záření. Náběžná a sestupná hrana zachyceného průběhu tak může být nepříznivě ovlivněna jako na obrázku (obr. 5) výše. Z tohoto důvodu pro určení posunutí nelze využít pouhé překročení prahové hodnoty, jinak by mohlo dojít k výrazné chybě určení vzájemného posunu, a tím i měřené rychlosti. Proto je na jeho vyhodnocení zapotřebí aplikovat pokročilejší matematické zpracování.

Metody vyhodnocení posunu signálů

Na vyhodnocení posunu jsou aplikovány algoritmy využívající vlastností signálů uvedených v [3] a [4]. V uvedených zdrojích se pro vyhodnocení aktivního systému využívá odečtení překročení prahových

hodnot. V případě pasivního systému se využívá algoritmu křížové korelace (3), sumy absolutních diferencí (5) a metody nejmenších čtverců (6). Pro analýzu časové náročnosti jednotlivých algoritmů je ve vyhodnocení zahrnuta také klasická korelace (2) a korelace vypočítaná přes spektrum signálu (4).

Pro výpočet je vždy jeden senzorový signál prodloužen o sekvenci konstant ustálených hodnot. Sekvence má velikost J původního signálu a je přidána před a za průběh. Přes prodloužený průběh je posouván výstup druhého senzoru a podle uvedených algoritmů je počítána míra překrytí při určitém posunutí. Akumulátor hodnot je počítán v intervalu $\langle 0, 2 \cdot J \rangle$.

Vztah pro výpočet korelačního koeficientu má tvar (2).

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^J (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^J (x_j - \bar{x})^2 \sum_{j=1}^J (y_j - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Akumulátor r_i nabývá hodnot v rozsahu $\langle -1, 1 \rangle$. Při určení posunutí se hledá globální extrém, reprezentovaný maximem (nejlepší shoda).

Křížová korelace je určena pomocí vztahu (3).

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^J (x_j - \bar{x})(y_{j-i} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^J (x_j - \bar{x})^2 \sum_{j=1}^J (y_{j-i} - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

Jedná se optimalizovaný algoritmus klasické korelace. Posunutí určuje maximum globálního extrému a interval nabývá hodnot v závislosti na velikosti signálů.

Výpočet korelace přes spektrum (4) umožňuje efektivní způsob jejího řešení. Nevýhodou je, že výpočetní platforma musí disponovat implementací rychlé Fourierovy transformace v komplexním prostoru. Není vyžadován akumulátor, výpočet je proveden v jednom kroku.

$$S = \left| F^{-1} [F(x) \cdot F(yt)] \right| \quad (4)$$

Znaménko \cdot v (4) značí násobení prvek po prvku a yt reprezentuje převrácený vektor y .

Jediný z algoritmů, který nevyžaduje matematickou operaci násobení nebo dělení, je suma absolutních diferencí. Jednotlivé prvky akumulátoru jsou určeny dle vztahu (5).

$$S_i = \sum_{j=1}^J |x_j - y_{j+i}| \quad (5)$$

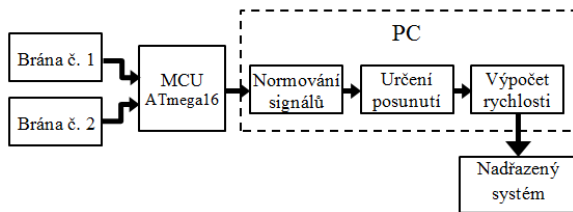
Posunutí se nachází v minimální hodnotě globálního extrému akumulátoru.

Algoritmus metody nejmenších čtverců využívá vztah (6).

$$S_i = \sum_{j=1}^J (x_j - y_{j+i})^2 \quad (6)$$

Stejně jako v případě metody sumy absolutních diferencí se posunutí nachází na pozici minima globálního extrému akumulátoru.

Blokové schéma určení rychlosti je znázorněno na obrázku (obr. 6). Po celou dobu měření přijímá MCU data z obou bran a ta jsou poté zaslána do počítače na vyhodnocení.



Obr. 6: Blokové schéma určení rychlosti

Nejprve je nutné přijatá data normovat z důvodu vyloučení vlivů rozdílů obou signálů, které by mohly způsobit chybné určení jejich posunutí v čase. Následuje blok určení posunutí podle výše uvedených metod. Ze zjištěného posunutí Δ je dle vztahu (7) určena rychlost měřeného objektu v .

$$v = \frac{l}{\Delta \cdot t_v} [m/s] \quad (7)$$

Hodnota l ve vzorci značí osový rozestup senzorů a t_v je vzorkovací kmitočet měření násobený posunutím Δ pro určení času t .

NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

Výsledky měření s oběma modely, provedená dle výše uvedeného postupu, byla přehledně shrnuta do následujících tabulek.

Popis tabulek

První a druhá tabulka (tab. 1) a (tab. 2) obsahuje statisticky vyhodnocená měření ze série pokusů pro první model. Další dvojice tabulek (tab. 3) a (tab. 4) stejná měření pro druhý model. První tabulka pro konkrétní model obsahuje statisticky získaná data pomocí pasivního systému, kde jsou sloupce (v pořadí zleva) pro výpočet rychlosti pomocí křížové korelace, druhý sloupec výpočet rychlosti metodou sumy absolutních diferencí a třetí sloupec metodou nejmenších čtverců. Druhá tabulka měření konkrétního modelu obsahuje sloupce zbývajících metod pro určení posunutí (korelace a korelace přes spektrum). Poslední sloupec obsahuje hodnotu rychlosti určenou aktivním systémem pomocí odečtení překročení prahových hodnot. U každého měření je uvedena průměrná hodnota z padesáti naměřených pokusů, směrodatná odchylka

vyjadřující stálost měření jednotlivých pokusů a posledním údajem je čas potřebný na vyhodnocení posunutí konkrétní metodou. U aktivního systému se jedná o odečtení známých hodnot, z tohoto důvodu není čas uveden.

Tab. 1: Pasivní systém – vyhodnocení dle (3),(5) a (6), 1. soubor měření

Měření	Senzory bez ozáření		
Metoda	Kříž. korelace	SAD	MNČ
Průměr[m/h]	150,87	149,75	150,60
S.o.[m/h]	2,17	2,18	2,10
Čas výpočtu[s]	0,002	0,112	0,107

Tab. 2: Pasivní systém – vyhodnocení dle (2) a (4), aktivní systém, 1. soubor měření

Měření	Senzory bez ozáření		S ozářením
Metoda	Korelace	Kor. sp.	Závora
Průměr[m/h]	150,52	150,87	146,27
S.o.[m/h]	2,12	2,17	2,3779
Čas výpočtu[s]	3,171	0,002	–

Hodnoty v tabulkách pro zmenšený model vozidla naznačují, že všechny použité metody podávají téměř shodné výsledky v rozmezí necelého procenta. Rozdíl mezi výsledkem odečtením hodnot u aktivního systému a metodou nejmenších čtverců u vyhodnocení pasivního systému činí 2,8%.

Tab. 3: Pasivní systém – vyhodnocení dle (3),(5) a (6), 2. soubor měření

Měření	Senzory bez ozáření		
Metoda	Kříž. korelace	SAD	MNČ
Průměr[m/h]	695,02	696,63	694,69
S.o.[m/h]	3,15	4,92	3,10
Čas výpočtu[s]	0,0019	0,110	0,106

Tab. 4: Pasivní systém – vyhodnocení dle (2) a (4), aktivní systém, 2. soubor měření

Měření	Senzory bez ozáření		S ozářením
Metoda	Korelace	Kor. sp.	Závora
Průměr[m/h]	694,65	695,02	678,8
S.o.[m/h]	3,09	3,15	5,77
Čas výpočtu[s]	3,160	0,0017	–

V případě měření s modelem robota Boe-Bot je při prvním pohledu na tabulky větší rozdíl mezi aktivním a pasivním systémem, ale procentuální rozdíl je ve výsledku ještě menší než u prvního modelu a činí 2,2% při porovnání stejných metod vyhodnocení, jako předchozím případem.

Vyhodnocení

Porovnáním směrodatných odchylek obou modelů je potvrzen vliv tvaru měřeného objektu na určení rychlosti. Měřený objekt č. 2 (robot Boe-Bot) má nepravidelný tvar a rozmezí určených rychlostí bylo vyšší než u objektu č. 1 (zmenšený model vozidla) s pravidelnějším tvarem.

Algoritmy využívané pro vyhodnocení vzájemného posunutí signálů ze senzorů podávají stejné výsledky s nepatrným rozdílem. Po přijetí signálu do vyhodnocovacího zařízení je nutné signál znormovat, jinak dochází k nepřesnostem v určení vzájemného posunu. Výsledky použitých metod se poté mohou od sebe lišit a zvýší se pravděpodobnost chyby určení rychlosti.

Dalším aspektem analýzy nahraditelnosti je časová náročnost jednotlivých algoritmů. Časy uvedené v tabulkách byly získány výpočetním softwarem Matlab na platformě Intel Atom. Z naměřených časů je zřejmé, že nejdéle trval výpočet algoritmu klasické korelace a nejméně korelace počítané přes spektrum signálů s křížovou korelací. Vzhledem k tomu, že uvedené časy jsou shodné, je křížová korelace rovněž počítána přes spektrum.

ZÁVĚR

Rozdíly v určení rychlosti mezi aktivním a pasivním systémem jsou malé. Aktivní systém lze nahradit pasivním systémem v případech, kdy není vyžadována striktní přesnost měření. Výhodou pasivního systému jsou jeho pořizovací náklady a lze ho umístit i do míst, kde není možné instalovat laserový zdroj záření. Při nedostatečném ozáření okolní scény je možné využít světelných zdrojů umístěných na sledovaném objektu. Při těchto podmínkách je měření omezeno jen na jeden směr z důvodu změny úhlu měření (viz. [5]). V případě jasového splynutí objektu s pozadím je možné využít spektrálních filtrů k získání složky spektra, která má největší citlivost na přijímač. Při posuzování nahraditelnosti systému je zejména zapotřebí uvážit okolní světelné podmínky měření (viz. výše).

U pasivního systému lze volit mezi algoritmy vyhodnocení vzájemného posunutí. Ve vestavěných aplikacích je požadován algoritmus s nejmenší časovou náročností. Disponuje-li výpočetní platforma algoritmem pro Fourierovu transformaci s implementací komplexní aritmetiky je vhodnou volbou algoritmus korelace počítané přes spektrum. Jinak je možné volit mezi algoritmy sumy absolutních diferencí a metodou nejmenších čtverců.

Cílové zaměření pasivního systému je poskytnutí levnější alternativy pro měření rychlosti pohybujících se objektů. Oproti aktivnímu systému je o několik jednotek procent méně přesný a pro určení rychlosti je zapotřebí využít pokročilejšího matematického zpracování, ale má také své přednosti. Mezi jeho hlavní výhody patří absence aktivního laserového

zářiče, díky tomu je pro měřený objekt těžko detekovatelný. Další výhodou je snadná instalace systému s možností okamžitého měření.

PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl za podpory grantů Univerzity Pardubice SGFEI 05/2013 a SGFEI 01/2013.

LITERATURA

- [1] YONG, Y.; ZIZHUO, X.; KRABICKA, J.; JIAQING, S.; , Non-contact strip speed measurement using electrostatic sensors, In: I2MTC, 2010 IEEE, vol., no., pp.1535-1538, 3-6 May 2010
- [2] CLAVEAU, F.; POIRIER, M.; GINGRAS, D. FFT-based cross-covariance processing of optical signals for speed and length measurement In: ICASSP-97., 1997 IEEE, vol.5, no., pp.4097-4100, 21-24 Apr 1997
- [3] REJFEK, L.; BRÁZDA, V. Radar based passive measurement of vehicle speed in optical spectrum. In: ERAD2012. Toulouse: METEO FRANCE, 2012, s. 6.
- [4] ŠIMÁČEK, Z. *Zjišťování rychlostí dopravních prostředků* [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2012-07-20]. Dostupné z: <https://portal.upce.cz/portal/prohlizeni.html>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [5] REJFEK, L. *Měření rychlosti dopravních prostředků* [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2012-07-20]. Dostupné z: <https://portal.upce.cz/portal/prohlizeni.html>. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.