



**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření**

**Bakalářská práce**

# **Bezkontaktní měření rychlosti kolejových vozidel**

**Michal Koldinský**  
Kybernetika a robotika

**Srpen 2021**

**Vedoucí práce: Ing. Michal Janošek, Ph.D.**





# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koldinský** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **483608**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Bezkontaktní měření rychlosti kolejových vozidel**

Název bakalářské práce anglicky:

**Contactless train speed measurement**

Pokyny pro vypracování:

Na základě rešerše stavu techniky navrhnete metodu pro bezkontaktní měření rychlosti kolejového vozidla (senzory na vozidle). Soustředte se na cenově dostupné senzory s korelační, případně s Dopplerovou metodou měření rychlosti. Dbejte rozsahu měření, přesnosti a spolehlivosti v různých situacích na železnici (různé povrchy tratě, akcelerace, decelerace). Navrženou metodu ověřte teoreticky (na syntetických datech). Nepovinně též na reálných datech z měření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Engelberg, Thomas. 'Design of a correlation system for speed measurement of rail vehicles.' Measurement 29.2 (2001): 157-164.
- [2] Schubert, R., P. Heide, and V. Magori. 'Microwave Doppler sensors measuring vehicle speed and travelled distance: Realistic system tests in railroad environment.' Proc. MIOP'95 Microw. & Optronics C.. 1995.
- [3] Wrobel, Shannon Alicia. Multi-function LIDAR Sensors for Non-contact Speed and Track Geometry Measurement in Rail Vehicles. Diss. Virginia Tech, 2013.
- [4] Malvezzi, M., Vettori, G., Allotta, B., Pugi, L., Ridolfi, A., Cuppini, F., & Salotti, F. (2011, May). Train position and speed estimation by integration of odometers and IMUs. In 9th World Congress on Railway Research, Lille, France (pp. 22-26).

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Michal Janošek, Ph.D., katedra měření**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.01.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce:  
**do konce letního semestru 2021/2022**

Ing. Michal Janošek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



## Poděkování / Prohlášení

Rád bych tímto poděkoval Ing. Michalovi Janoškovi, Ph.D. za pomoc a odborné rady při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům z firmy IXPERTA, s. r. o., za doporučení zajímavého tématu práce. V neposlední řadě patří poděkování také mé rodině a přátelům za podporu po celou dobu studia.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 13. 8. 2021

.....

## Abstrakt / Abstract

Bakalářská práce se zabývá možnostmi bezkontaktního měření rychlosti vlaku pomocí senzorů umístěných na soupravě. Znalost přesné rychlosti a polohy vlaku v každém časovém okamžiku je základní informací pro bezpečné, spolehlivé a optimální řízení provozu na železnici.

Cílem práce je prozkoumat možnosti korelačního měření rychlosti vlaku (doplňkově měření Dopplerovou metodou) a otestovat vhodné senzory pro korelační měření i s ohledem na jejich cenu.

Nejprve byl vytvořen simulátor chování senzorů při jízdě vlaku, na kterém byla ověřena použitelnost korelace pro měření rychlosti pomocí optických senzorů. Následně byly provedeny laboratorní experimenty s magnetickým, ultrazvukovým a optickým senzorem, v rámci kterých byly korelovány signály při přejezdu snímače nad upevněním kolejnice k pražci.

Na závěr byly analyzovány a porovnány výsledky z měření jednotlivých senzorů. Klíčovou vlastností pro úspěšné korelační měření je snímací frekvence použitých senzorů a jejich přesnost měření. Za nejvhodnější ze zkoumaných snímačů pro korelační měření vlaku byl vybrán optický senzor vzdálenosti pracující na principu Time of flight, ultrazvukové snímače se neosvědčily kvůli jejich nízké snímací frekvenci a vzájemnému ovlivňování při umístění senzorů blízko sebe.

**Klíčová slova:** Rychlost vlaku, korelace, simulace jízdy vlaku, ultrazvukový senzor, optický senzor, magnetický senzor, inerciální senzory, Dopplerův radar

This bachelor thesis studies the possibilities of contactless train speed measurement using sensors located on the vehicle. Knowledge of the exact speed and position of the train in every moment is the basic information for safe, reliable and optimal management of railway traffic.

The aim of the work is to explore the possibilities of correlation measurement of train speed (or measurement by Doppler method) and to test suitable sensors for correlation measurement regarding their price.

First, a simulator of sensor behaviour during train ride was created. In the simulation was verified the applicability of correlation for speed measurement with optical sensors. Subsequently, laboratory experiments were performed with a magnetic, ultrasonic and optical sensor, in which the signals during the passage of the sensor over the rail fastening to the sleeper were correlated.

Finally, the results of measurements of used sensors were analysed and compared. The key feature for successful correlation measurement is the working frequency of the sensors and their measurement accuracy. An optical distance sensor working on the time of flight principle was chosen as the most suitable sensor for correlation train speed measurements. Ultrasonic sensors have low sensing frequency and affect each other.

**Keywords:** Train speed, correlation, train ride simulation, ultrasonic sensor, optical sensor, magnetic sensor, inertial sensor, Doppler radar

**Title translation:** Contactless train speed measurement

# Obsah /

<b>1 Úvod</b> .....	1
<b>2 Současné metody měření rychlosti a polohy vlaku používané v praxi</b> .....	2
2.1 Rychloměry .....	2
2.2 Globální družicový navigační systém .....	2
2.3 Evropský vlakový zabezpečovací systém .....	3
<b>3 Určení rychlosti korelační metodou</b> .....	5
<b>4 Uvažované senzory</b> .....	8
4.1 Senzory vzdálenosti .....	9
4.1.1 Optické senzory .....	9
4.1.2 Ultrazvukové senzory ....	10
4.1.3 Srovnání senzorů vzdálenosti .....	11
4.2 Magnetické senzory .....	12
4.2.1 Lindometer .....	14
4.3 Inerciální senzory .....	15
4.4 Mikrovlnné senzory .....	15
<b>5 Simulace korelačního měření s vybranými senzory</b> .....	17
5.1 Model kolejového svršku .....	17
5.2 Simulace jízdy se senzory .....	17
5.3 Simulované senzory .....	19
5.4 Výsledky .....	20
<b>6 Měření</b> .....	22
6.1 Magnetické senzory .....	24
6.2 Ultrazvukový senzor .....	25
6.2.1 Softwarové řízení senzoru .....	27
6.2.2 Chyby senzoru .....	28
6.2.3 Měření s jedním senzorem .....	28
6.2.4 Měření se dvěma senzory .....	31
6.3 Optický senzor .....	33
6.3.1 Měření s jedním senzorem .....	34
6.3.2 Měření s jedním senzorem se štěrkem .....	35
6.4 Shrnutí výsledků .....	37
<b>7 Závěr</b> .....	39
<b>Literatura</b> .....	41
<b>A Kód pro řízení ultrazvukového senzoru</b> .....	45
<b>B Obsah příložené složky</b> .....	47

## Tabulky / Obrázky

<b>4.1.</b> Porovnání základních parametrů senzorů vzdálenosti . . . . .	12
<b>5.1.</b> Přehled vlastností simulovaných senzorů . . . . .	19
<b>6.1.</b> Přehled korelačních koeficientů z naměřených dat jedním ultrazvukovým senzorem . . . . .	30
<b>6.2.</b> Výstupní rychlosti z korelace při měření se dvěma ultrazvukovými senzory . . . . .	32
<b>6.3.</b> Přehled korelačních koeficientů z naměřených dat optickým senzorem . . . . .	35
<b>6.4.</b> Přehled korelačních koeficientů z naměřených dat optickým senzorem se šterkem . . . . .	36
<b>2.1.</b> Eurobalíza s anténou . . . . .	4
<b>2.2.</b> Dopplerův radar . . . . .	4
<b>3.1.</b> Schéma korelačního měření rychlosti . . . . .	6
<b>3.2.</b> Princip korelačního měření rychlosti . . . . .	7
<b>4.1.</b> Kolejový svršek . . . . .	9
<b>4.2.</b> Schéma dvoukolí na kolejích . . . . .	9
<b>4.3.</b> Princip funkce triangulačního senzoru . . . . .	10
<b>4.4.</b> Princip funkce Time of flight senzoru . . . . .	11
<b>4.5.</b> Princip funkce ultrazvukového senzoru . . . . .	11
<b>4.6.</b> Diferenciální senzor vířivých proudů . . . . .	13
<b>4.7.</b> Výstupní signál diferenciálního senzoru vířivých proudů . . . . .	14
<b>4.8.</b> Lindometer . . . . .	15
<b>4.9.</b> Princip funkce Dopplerova radaru . . . . .	16
<b>5.1.</b> Vygenerovaný profil kolejového svršku . . . . .	18
<b>5.2.</b> Odchylka od skutečné rychlosti pro vybrané senzory . . . . .	21
<b>6.1.</b> Kolejnice typu T . . . . .	22
<b>6.2.</b> Schéma upevnění typu K . . . . .	23
<b>6.3.</b> Použité upevnění typu K . . . . .	23
<b>6.4.</b> Měřicí systém v laboratoři . . . . .	23
<b>6.5.</b> Měření s modulem LDC1000 EVM . . . . .	25
<b>6.6.</b> Ultrazvukový senzor HC-SR04 . . . . .	26
<b>6.7.</b> Úhlová charakteristika senzoru HC-SR04 . . . . .	26
<b>6.8.</b> Průběhy signálů senzoru HC-SR04 – odeslání vlny . . . . .	26
<b>6.9.</b> Průběhy signálů senzoru HC-SR04 – přijmutí vlny . . . . .	27
<b>6.10.</b> Časovací diagram měření . . . . .	28
<b>6.11.</b> Průběhy signálů senzoru HC-SR04 – reset . . . . .	29
<b>6.12.</b> Průběhy signálů senzoru HC-SR04 – chyba . . . . .	29
<b>6.13.</b> Přejezd ultrazvuku nad pražcem . . . . .	30



<b>6.14.</b>	Přejezd dvojice ultrazvuků nad pražcem .....	32
<b>6.15.</b>	Průběh $R(\tau)$ při korelaci dvou signálů .....	33
<b>6.16.</b>	Optický senzor TF Mini-S .....	34
<b>6.17.</b>	Přejezd optického senzoru nad pražcem .....	35
<b>6.18.</b>	Přejezd optického senzoru nad pražcem se štěrkem.....	36
<b>6.19.</b>	Porovnání signálů ze senzorů s profilem upevnění .....	38



# Kapitola 1

## Úvod

Znalost přesné polohy vlaku, respektive jeho absolutní rychlosti, je klíčová informace při řízení železniční dopravy. Informace je to důležitá nejen pro strojvedoucího, který musí vědět, jak rychle se souprava pohybuje a která všechna návěstidla jsou na trati v zábrzdě vzdálenosti před ním, aby na ně mohl včas a správně zareagovat. Stejně tak musí znát přesnou polohu a rychlost vlaku dispečer železniční dopravy a výpravčí v dopravnách, aby mohli bezpečně a spolehlivě naplánovat a ve správný čas postavit vlakovou cestu dané soupravě. V poslední řadě jsou tyto informace zásadní pro správnou funkci (polo)automatických zabezpečovacích zařízení či nejrůznějších asistenčních aplikací pro strojvedoucí.

V současné době je rychlost vlaku měřena nejčastěji pomocí rychloměrů, které měří úhlovou rychlost otáčení kol. Tento způsob měření kromě vlastní chyby měření rychloměru výrazně ovlivňují další vnější vlivy – při špatných adhezivních podmínkách (např. mokré kolejnici) dochází často k prokluzování kol, při brzdění naopak dochází k zaseknutí kol a následně klouzání vlaku po kolejích.

Pro měření polohy vlaku se kromě interakce s nákladními pevnými prvky (balízkami) na železniční infrastrukturu využívá satelitní navigace – GNSS (Globální družicový navigační systém). Jeho použitím je možné za optimálních podmínek získat v civilním módu přesnou polohu (a následně i rychlost) s přesností na nízké jednotky metrů. Tento systém má ale kromě malé přesnosti i další své limity – vyžaduje otevřený a široký výhled na oblohu, který často v údolích a v městské zástavbě není dostatečný a například v tunelech není vůbec žádný.

Z tohoto důvodu jsou potřeba další metody měření rychlosti kolejových vozidel. Cílem práce je prozkoumat možnosti bezkontaktního měření rychlosti vlaku a navrhnout vhodnou metodu pro měření rychlosti. Z ekonomického hlediska má smysl uvažovat pouze snímače umístěné na soupravě – vybavit senzory trať jako takovou je velmi nákladné. Pro tento účel můžeme využít vhodné bezkontaktní senzory (optické, ultrazvukové, magnetické) pro určení rychlosti na základě korelace jejich signálu nebo snímače pracující na Dopplerově principu. Využitelnost této metody je kromě zpřesnění hodnoty aktuální polohy či rychlosti i v rámci vývoje autonomního vlaku. V případě vybavení každého vagónu těmito senzory můžeme také kromě vlastní rychlosti hlídat i celistvost vlaku jako takového.

Na začátku práce jsou shrnuty současné metody měření rychlosti a polohy vlaku (Kapitola 2) a popsán princip korelačního měření (Kapitola 3). V Kapitole 4 jsou popsány uvažované senzory pro korelační měření – senzory vzdálenosti (optické a ultrazvukové), magnetické senzory, inerciální senzory a mikrovlnné senzory. V další části byla vytvořena simulace korelačního měření při pohybu vybraných senzorů nad kolejovým svrškem měřící jeho profil (Kapitola 5). Následně byla v Kapitole 6 provedena laboratorní měření s magnetickým indukčnostním senzorem, ultrazvukovým a optickým snímačem a byla analyzována naměřená data a porovnány vlastnosti jednotlivých senzorů.

## Kapitola 2

# Současné metody měření rychlosti a polohy vlaku používané v praxi

### 2.1 Rychloměry

Zdaleka nejčastějším způsobem měření rychlosti vlaku jsou rychloměry snímající pomocí optické či magnetické značky úhlovou rychlost, s jakou se otáčí kola vlaku (podobně jako fungují rychloměry v automobilu). Ze znalosti poloměru kola vlaku se následně do počítává aktuální rychlost, případně se integrací získá ujetá vzdálenost.

Jak již bylo naznačeno v úvodu, nejedná se bohužel za některých podmínek o příliš spolehlivý způsob měření rychlosti. Při rozjezdu či zrychlování vlaku může docházet při ztrátě adheze (například díky vlhké/mokré koleji) k nežádoucímu prokluzování kol vlaku, při kterém se kola otáčí rychleji než jaká je skutečná rychlost soupravy. Rychloměr ukazuje díky tomu vyšší rychlost jízdy.

Opačný problém může nastat při brzdění vlaku, kdy opět vlivem ztráty přilnavosti mezi kolem a kolejnicí se kola vlaku otáčí pomaleji (či vůbec), zatímco souprava se setrvačností pohybuje dále vyšší rychlostí – vlak v tomto případě klouže neovladatelně po kolejích a rychloměr ukazuje nižší rychlost než ve skutečnosti. Tento jev způsobil v kombinaci s vysokou rychlostí v nedávné době některé nehody na české železnici<sup>1</sup>.

Strojvedoucí se snaží o maximální ovladatelnost vlaku a oba tyto nežádoucí jevy se pokouší omezit pískováním (posypáním kolejnice před koly jemným pískem), ale v praxi se těmto jevům úplně vyhnout nedá. Rychloměry jsou pro eliminaci falešných rychlostí umísťovány na nápravy, které nejsou poháněny, což ovšem není vždy možné. Především brzdění představuje problém, protože brzdy jsou umístěny na všech nápravách, aby se maximalizoval brzdňý účinek. U rychloměrů se také využívá redundance, kdy jsou snímače umístěny na několika nápravách zároveň a jednotlivé měřené hodnoty rychlostí jsou mezi sebou porovnávány a vyhodnocovány. Kvůli bezpečnosti se pak při rozjezdu používá a zobrazuje minimální měřené rychlost, při zpomalování naopak nejvyšší. [1]

Integrováním rychlosti v čase dostaneme ujetou vzdálenost vlaku. Pokud ovšem budeme integrovat nepřesné hodnoty rychlosti, tak výsledná vzdálenost bude mít velkou odchylku od skutečně ujeté vzdálenosti, protože chyby měření se při integraci sčítají. V případě, kdy budeme spolehlivě znát ujetou vzdálenost vlaku, můžeme určit polohu kombinací mapových podkladů železniční sítě a pevných bodů, od kterých měříme ujetou vzdálenost (například stanice, přejezdy nebo poslední známá přesná poloha z GNSS).

### 2.2 Globální družicový navigační systém

GNSS (Global Navigation Satellite System) slouží k určování pozice na Zemi a obsahuje americký poziční systém GPS, ruský GLONASS, evropský systém Galileo, čínský

<sup>1</sup> <https://www.novinky.cz/krimi/clanek/ze-srazky-vlak-u-kdyne-vini-strojvedouciho-40368396>

BeiDou a další. Všechny tyto systémy využívají družice na oběžné dráze Země, které vysílají signál s informacemi o své dráze a přesném času směrem k Zemi. Po přijetí signálu z několika družic je možné pomocí různé doby letu signálu z různých směrů určit polohu přijímače kdekoli na Zemi. Jednotlivé systémy samostatně dosahují při širokém otevřeném výhledu na oblohu v civilní variantě přesnosti až jednotek metrů, vzájemnou kombinací systémů je možné tuto přesnost ještě zvýšit. Na základě změny polohy v čase je možné určit i rychlost pohybu přijímače.

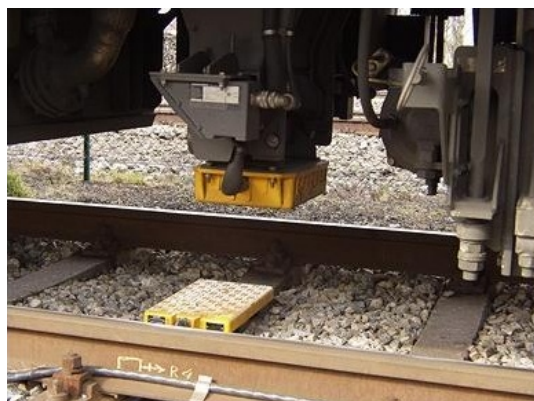
Ohledně využití satelitní navigace na železnici v současné chvíli probíhají živé diskuze, napanuje však zatím shoda na parametrech certifikace, kterých musí jednotlivé lokalizační jednotky dosahovat. Poloha musí být určena ve všech případech s dostatečnou přesností na to, aby bylo možné rozlišit polohu vlaku na jednotlivých kolejích (i ve velkých stanicích). Hlavním bezpečnostním problémem ale stále zůstává relativně velká nespolehlivost v místech s omezeným výhledem na oblohu, kterých je kolem železnice bohužel hodně – hustá zástavba ve městech, hlubší údolí, zářezy v kopcích a skalách či železniční tunely – zde přesnost systému výrazně klesá a je zde nutné kombinovat GNSS s dalšími senzory určujícími polohu jinými způsoby. Jisté komplikace představuje i radiofrekvenční rušení od okolních telekomunikačních sítí či rušení přímo od lokomotivy. Potenciál využití GNSS na železnici je obrovský, proto v tomto směru probíhá velký technologický vývoj a po schválení potřebných bezpečnostních parametrů čeká tento systém rychlá implementace do drážních systémů. [2]

## 2.3 Evropský vlakový zabezpečovací systém

European Train Control System, neboli ETCS, je centrální evropský zabezpečovací systém. Je nedílnou součástí evropského systému řízení železniční dopravy ERTMS (European Rail Traffic Management System). Má postupně nahradit více než dvacet různých národních zabezpečovačů a umožnit cestu jedné soupravy po celé Evropě bez nutnosti výměny lokomotivy na hranici téměř každého státu. Přestože základní parametry ETCS byly definovány již v polovině devadesátých let minulého století, jeho implementace jednotlivými státy a dopravci probíhá velmi pomalu a je velmi finančně nákladná, v České republice zatím tento systém centrálně spuštěn nebyl.

Určování aktuální rychlosti vlaku a ujeté vzdálenosti je nezbytné pro správnou a bezpečnou funkci celého systému. ETCS vyžaduje vybavení tratě takzvanými Eurobalízami (Obrázek 2.1), které jsou umístěny uprostřed kolejiště v pravidelných intervalech (zpravidla u hlavních návěstidel). Při přejezdu vlaku se čtečkou nad touto balízkou dochází k přenosu informací mezi vozidlem a zabezpečovacím zařízením, jedna z těchto informací je i přesná poloha této balíčky (a tím pádem i vlaku v momentě přejezdu).

Mezi jednotlivými Eurobalízami je také potřebné znát přesnou polohu (respektive ujedou vzdálenost od poslední balíčky) a rychlost vlaku, proto v rámci ETCS musí být každá souprava vybavena několika nezávislými odometrickými senzory – senzory otáček kol (rychloměrem), Dopplerovým radarem (Obrázek 2.2) či akcelerometry, záložně také GNSS modulem. Senzory pracují nezávisle, aby v případě výpadku jednoho mohlo pokračovat měření dále. Dle požadavků systému nesmí chyba přesnosti integrování měřené rychlosti na ujetou vzdálenost přesáhnout interval  $\pm(5 \text{ m} + 5 \%)$  [3]. Po projetí následující balíčky je měřená vzdálenost (stejně tak i aktuální chyba měření) vynulována a měření vzdálenosti začíná znovu od začátku. [4]



**Obrázek 2.1.** Eurobaliza se čtecí anténou na vlaku [5]



**Obrázek 2.2.** Dopplerův radar na podvozku vlaku [6]

# Kapitola 3

## Určení rychlosti korelační metodou

V matematické statistice vyjadřuje korelace vzájemný vztah dvou (nebo i více) veličin (hodnot, znaků, procesů). Korelační koeficient  $\rho$  nám říká informaci o tom, jak moc se změnou jedné veličiny změní veličina druhá, respektive jak moc si jsou obě veličiny podobné. Hodnota korelačního koeficientu rovna plus 1 znamená přímou závislosti mezi veličinami (signály mají stejný průběh), hodnota 0 značí nekorelovatelnost daných signálů (není mezi nimi žádná známá závislost). Čím bližší hodnota k jedné, tím si jsou signály podobnější.

Korelační koeficient se spočítá podle vzorce

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (1)$$

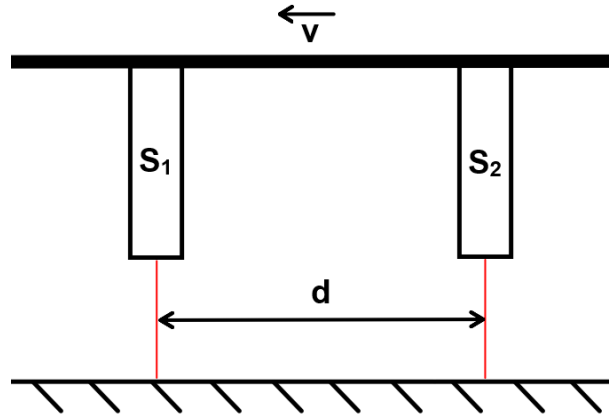
kde  $X$  a  $Y$  jsou náhodné veličiny,  $\text{cov}(X, Y)$  je kovariance veličin  $X$  a  $Y$  a  $\sigma$  je směrodatná odchylka dané veličiny. Korelace je kovariance dvou normovaných náhodných veličin. V případě dvou náhodných signálů tvoří jednotlivé kombinace korelačních koeficientů korelační matici  $2 \times 2$

$$M = \begin{pmatrix} \rho(X, X) & \rho(X, Y) \\ \rho(Y, X) & \rho(Y, Y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho(X, Y) \\ \rho(X, Y) & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

kde v druhé části využíváme vlastnosti, že  $\rho(X, X) = \rho(Y, Y) = 1$  a  $\rho(X, Y) = \rho(Y, X)$ .

V teorii signálů se korelací, respektive vzájemnou (cross) korelací, vyjadřuje míra podobnosti průběhů dvou signálů. Využití korelace pro měření rychlosti vychází z jednoduchého principu – pomocí dvou snímačů vzdálených od sebe o pevnou vzdálenost  $d$  ve směru pohybu snímáme nějakou náhodnou proměnnou veličinu. Díky posunutí senzorů ve směru pohybu bude signál z druhého senzoru opožděn oproti prvnímu o časový interval  $\Delta t$ , který je závislý na rychlosti pohybu. Měřenou veličinou může být například difúzní odraz záření od nerovností na povrchu zkoumaného objektu, u hrubšího povrchu jeho přesný profil (přesná vzdálenost od senzoru) či libovolná jiná náhodná vlastnost povrchu (např. magnetické vlastnosti). Schéma principu měření rychlosti korelační metodou je na Obrázku 3.1.

Pro korelační měření nejsou vhodné pravidelně se opakující struktury/vlastnosti povrchu předmětu, protože vedou na mnohoznačnost měření. Tomu lze ale částečně zabránit zajištěním, že se bude korelovat pouze signál z jedné (pro oba senzory té samé) periody opakujícího se signálu, například signálu z přejezdu senzorů nad jedním a tím samým pražcem – třeba tím, že vzdálenost  $d$  mezi snímači bude menší než minimální vzdálenost mezi dvěma pražci.



**Obrázek 3.1.** Schéma korelačního měření rychlosti – dva senzory  $S_1$  a  $S_2$  ve vzájemné vzdálenosti  $d$  od sebe měří libovolnou stejnou náhodnou vlastnost povrchu, nad kterým se pohybují rychlostí  $v$ .

Pro výpočet korelace si označíme (diskrétní) signál z prvního senzoru  $s_1(nT)$  a z druhého senzoru  $s_2(nT)$ . Cílem je nalézt v záznamu z druhého senzoru opožděný záznam prvního senzoru (viz Obrázek 3.2). Hledáme takové zpoždění  $\tau$ , které minimalizuje střední kvadratickou odchylku  $D$  mezi signály, tedy

$$D = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (s_1(nT - \tau) - s_2(nT))^2, \quad (3)$$

kde  $N$  je počet vzorků signálů, na kterých provádíme korelaci. Závorku v sumě můžeme roznásobit, čímž dostaneme následující

$$D = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_1^2(nT - \tau) - \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N s_1(nT - \tau)s_2(nT) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_2^2(nT). \quad (4)$$

Z rovnice je patrné, že první a poslední člen bude vždy nezáporný, nemusíme je dále uvažovat. Pro minimalizaci  $D$  potřebujeme maximalizovat prostřední člen, tedy hledáme maximum funkce

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_1(nT - \tau)s_2(nT) \quad (5)$$

pro všechna možná  $\tau$ .

Pro spojité signály je hledání korelace dvou signálů analogické, hledáme maximum funkce

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_1(t - \tau)s_2(t)dt. \quad (6)$$

Oba tyto předpisy nápadně připomínají definici konvoluce, pomocí které se také v praxi jednotlivé hodnoty  $R(\tau)$  počítají. Nás ale v obou případech zajímá hodnota  $\tau$ , ve které  $R(\tau)$  nabývá maxima, tedy hledáme

$$\tau_{\max} = \arg \max_{\tau} R(\tau). \quad (7)$$

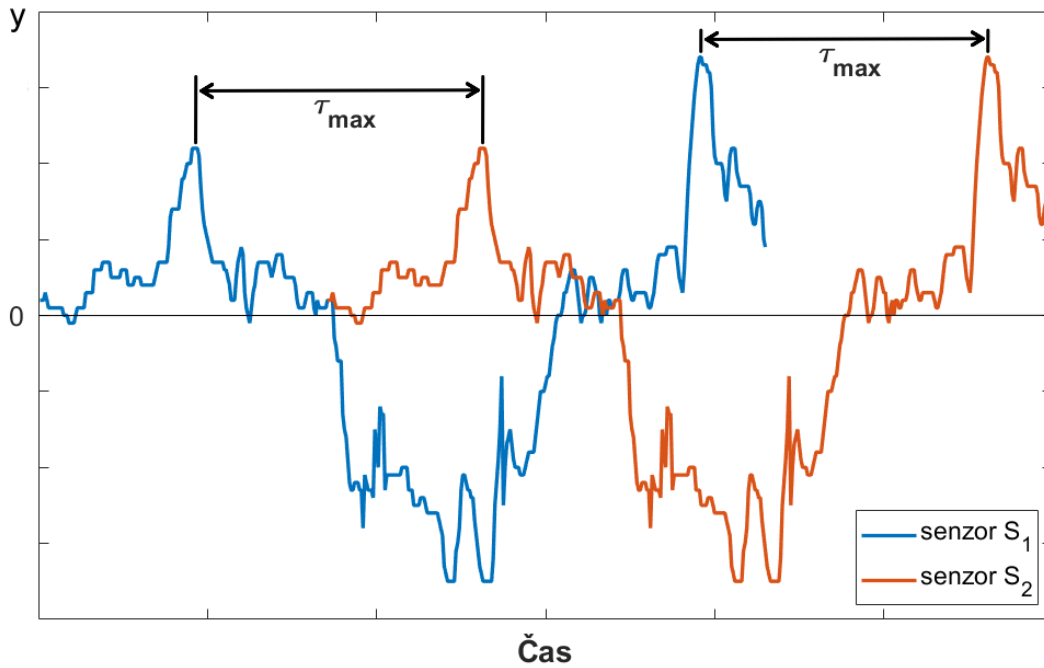


V diskretních signálech není výstupem korelace přímo časová konstanta  $\tau_{\max}$ , ale počet vzorků  $n$ , o kolik jsou jednotlivé signály mezi sebou posunuté. Při pevně dané snímací frekvenci  $f$  je převod následující

$$\tau_{\max} = \frac{n}{f}. \quad (8)$$

Ve chvíli, kdy známe  $\tau_{\max}$  a vzdálenost  $d$  mezi senzory, je určení rychlosti již triviální

$$v = \frac{d}{\tau_{\max}}. \quad (9)$$



**Obrázek 3.2.** Princip korelačního měření rychlosti s vyznačenou hledanou hodnotou  $\tau_{\max}$

V praxi nikdy nebudou výstupní signály z obou senzorů identické, budou nestejně zatíženy šumem a jinými rušivými vlivy. Při porovnávání signálů mezi sebou se avšak vliv tohoto šumu dokáže díky průměrování dobře potlačit (čím delší signály koreluje, tím lépe) – střední hodnota šumu je nulová. To je právě jedna z velkých výhod korelace – velká odolnost vůči rušení. [7, 8]

## Kapitola 4

### Uvažované senzory

Pro korelační měření rychlosti vlakové soupravy je možno využít více druhů senzorů pracujících na různých fyzikálních principech. Potřebujeme měřit nějakou náhodnou vlastnost měnícího se okolí při jízdě vlaku, případně vlastnost některé z pohyblivých částí vlaku, která přímo závisí na rychlosti.

V první variantě můžeme využít senzory vzdálenosti, které umístíme na podvozek soupravy do konstantní výšky a budeme měřit přesnou vzdálenost senzoru od kolejového svršku (oblast mezi kolejemi, Obrázek 4.1). Tento povrch se kromě pražců obvykle skládá z náhodně vysypaného štěrku o velikosti kamenů 31,5 mm až 63 mm [9], jeho povrch má tedy náhodnou strukturu. Další možností je například detekování pražců, respektive uchycení kolejnic k pražcům. Toto uchycení se skládá obvykle z podkladnice, železniční svěrky a šroubů, které mají jiné magnetické vlastnosti než samotná kolej a jsou vystouplé nad okolní štěrk. Snímání uchycení pražce má i jiné výhody, je možné jej detekovat i v místech s pevnou jízdni dráhou či na mostech, kde obvykle měření profilu kolejového svršku není možné (kvůli hladkému povrchu mezi kolejemi).

Ve druhé variantě můžeme senzorem pozorovat například průchod značky, kterou umístíme na vhodné místo na kole soupravy (to vyžaduje ale kromě umístění senzorů i zásah do vlaku jako takového a to nechceme). Jinou možností je snímat magnetické vlastnosti kola při otáčení s tím, že předpokládáme, že kolo není homogenní. Práce s koly vlaku má avšak své nevýhody – při jízdě poměrně často dochází k prokluzu kol lokomotivy (díky nízkému součiniteli tření mezi kolejnicí a kolem), navíc kolo nemá v celé délce konstantní poloměr, směrem ven se zužuje (má kuželovitý či jiný tvar, viz Obrázek 4.2 – záleží na konkrétním výrobcí soupravy a druhu vlaku).

V obou případech ale musíme dávat pozor na dostatečný rozsah měření. Pro využití v nákladní dopravě potřebujeme pokrýt rychlosti od 0 do 120 km/h, tedy přibližně 0 až 33 m/s. V osobní dopravě je v České republice nejvyšší povolená rychlost na některých úsecích v současné chvíli až 160 km/h, tedy 44 m/s (i když málokterý osobní vlak této rychlosti skutečně při jízdě může dosáhnout).

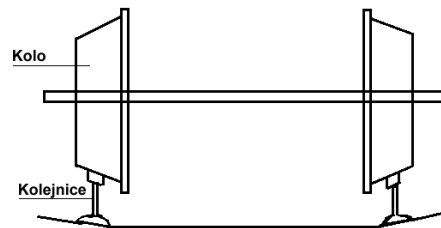
Na zrychlování či zpomalování vlaku během jednotlivých měření nemusíme brát příliš ohled, vlaky díky své obrovské hybnosti a setrvačnosti mění svou rychlost velmi neochotně, velmi pomalu. Hodnoty zrychlení vlaku při běžné jízdě se pohybují do 0,5 m/s<sup>2</sup> [10]. Nedopustíme se tedy velké chyby, pokud budeme uvažovat rychlost během maximálně sekundového intervalu za konstantní.

Pro takto velký rozsah měření rychlostí potřebujeme pro použití korelace minimálně několik stovek vzorků dat na každý metr, který vlak urazí. To dává zvětšené nároky na snímací frekvenci použitých senzorů, která musí dosahovat hodnot kHz a více. I v případě použití snímače se spojitým výstupem by bylo nutné signál pro další zpracování zdigitalizovat pomocí rychlého AD převodníku, což klade nároky na použití dalšího hardwaru.

Dále je popsán princip funkce senzorů vzdálenosti, magnetických senzorů a inerciálních senzorů vhodných pro korelační měření rychlosti vlaku.



**Obrázek 4.1.** Kolejový svršek [11]



**Obrázek 4.2.** Schéma dvoukolí na kolejích [12]

V závěru kapitoly jsou popsány také mikrovlnné senzory pracující na jiném principu – využívají pro měření rychlosti místo korelace Dopplerův jev, čili změnu frekvence vlnění vlivem vzájemného pohybu přijímače a vysílače.

## 4.1 Senzory vzdálenosti

Senzorů vzdálenosti pracujících na nejrůznějších fyzikálních principech je celá řada. Pro naše účely se nejvíce hodí optické snímače vzdálenosti či ultrazvukové senzory, které jsou zde popsány dále. Uvažujeme snímače umístěné na podvozku lokomotivy, kde je vzdálenost od povrchu železničního svršku zhruba 30 až 50 cm. Vyžadované rozlišení senzoru je v řádu nízkých jednotek milimetrů a lepší, oproti tomu přesnost měření absolutní vzdálenosti zde není důležitá (díky následnému normování signálu).

Kromě tohoto je důležitým údajem velikost zorného pole (Field of view – FoV), který charakterizuje jak velkou plochu snímaného povrchu senzor při svém měření zabírá (nikdy se v praxi nebude jednat o bodové senzory). Pro rozlišení co nejmenších detailů je třeba mít zorné pole co nejmenší, jinak bude u hrubého povrchu železničního svršku docházet k jeho vyhlazování (senzor vzdálenost povrchu v zorném úhlu nějakým způsobem „průměruje“<sup>1</sup>). Těmito parametry spolu s požadavkem na vysokou snímací frekvenci jsou dány požadavky na použitelné senzory.

### 4.1.1 Optické senzory

Optických senzorů je mnoho, dosahují vysokých přesností ( $\mu\text{m}$ ,  $\text{nm}$ ) a velkých rozsahů měření ( $\mu\text{m}$  až mnoho kilometrů). Některé druhy optických snímačů jsou silně závislé na odrazivosti měřeného předmětu (difúzní) či přímo vyžadují odrazku na měřeném objektu (reflexní senzory). Zmíněné senzory jsou kvůli této závislosti pro naše použití nevhodné, proto je dále neuvažujeme. Malou či žádnou závislost na odrazivosti zkoumaného tělesa mají triangulační a Time of flight senzory. Obecnou nevýhodou optických snímačů je jejich malá odolnost vůči špíně a prachu, při zašpinění optických prvků (výstupní/vstupní čočky) mohou přestat úplně fungovat.

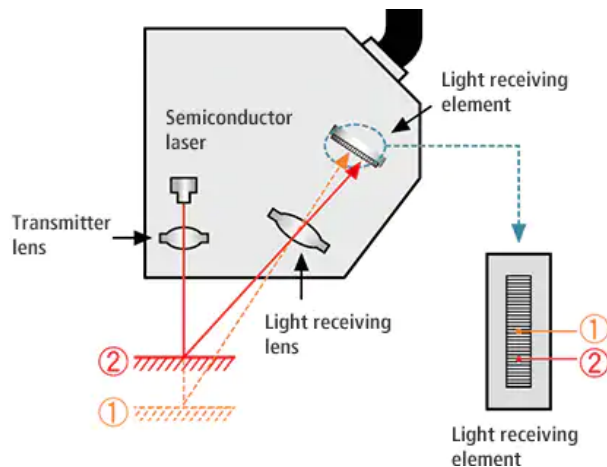
#### Triangulační senzory

Triangulační senzory využívají, jak napovídá název, princip optické triangulace. Obsahují zdroj záření – laser nebo LED – kterým svítí na zkoumaný objekt, na kterém vytváří světelný bod. Záření se od objektu odrazí zpět, projde optickou soustavou a dopadne na polohově citlivý detektor (PSD – position sensitive photo-detector) či na CCD (charge-coupled device) snímač. Podle místa dopadu odraženého paprsku na detektor se určí úhel dopadu paprsku. Ze znalosti úhlu dopadu a vzdálenosti snímače

<sup>1</sup> Nebude se jednat přesně průměr, ale o nějakou váženou 2D okénkovou funkci (window function).

od zdroje záření se jednoduchou triangulací vypočítá vzdálenost světelného bodu od senzoru. [13]

Tyto senzory jsou málo závislé na odrazivosti a tvaru povrchu, protože stačí jeden jediný odražený paprsek (s intenzitou větší, než je detekovatelné minimum) ve směru snímače pro určení vzdálenosti [13]. Rozsah měření těchto senzorů se pohybuje od půl milimetru do jednoho metru, dosahují měřící frekvence stovek Hz až desítky kHz a jsou velmi přesné. Schéma fungování triangulačního snímače je na Obrázku 4.3.



**Obrázek 4.3.** Princip funkce triangulačního senzoru vzdálenosti [14]

#### ■ Time of flight senzory

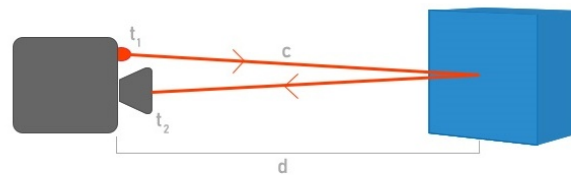
Senzory měřící dobu letu paprsku, neboli „Time of flight“ senzory, měří vzdálenost přímou metodou. Rychlost šíření světelného paprsku je jedna ze základních fyzikálních konstant, která je pevně daná. Světlo urazí za 1 ns vzdálenost 30 cm – pro přesná měření na krátké vzdálenosti jsou kladeny velké nároky na přesnost měření času. Sensor vyše velmi krátký světelný pulz a změří dobu, za kterou se jeho odraz od předmětu vrátí zpět. Z toho se už jednoduše určí hledaná vzdálenost předmětu. Rozsah měření těchto senzorů začíná na desetíně metru (právě kvůli velkým nárokům na přesné měření času) a dosahuje až několika kilometrů. Rozlišení těchto snímačů je menší v porovnání s triangulačními senzory a dosahují měřící frekvence v jednotkách kHz. Schéma fungování tohoto senzoru včetně rovnice pro výpočet vzdálenosti je na Obrázku 4.4.

### ■ 4.1.2 Ultrazvukové senzory

Princip funkce ultrazvukových senzorů je obdobný jako u Time of flight senzorů, jen se místo světelného pulzu používá ultrazvuková vlna. Ultrazvuk je akustické vlnění s vyššími frekvencemi, než jsou frekvence slyšitelné lidským uchem, tedy více než 20 kHz.

Základem senzoru je piezoelektrický měnič, který svým rozkmitáním vyše ultrazvukovou vlnu. Ta se šíří prostředím rychlostí zvuku a odrazí se od snímaného předmětu zpět. Následně je v (obvykle tom samém) měniči detekována.

Podle doby letu a rychlosti šíření vlny se určí vzdálenost daného předmětu. Rychlost šíření zvukové vlny je však oproti světlu velmi malá, nelze tedy dosáhnout velmi vysokých snímacích frekvencí. Navíc v tomto případě není ani tato rychlost v čase konstantní, záleží na parametrech okolního prostředí, především na tlaku a teplotě. Pro korelační měření ale není konkrétní rychlost šíření důležitá, hlavní je, že oba použité senzory jsou ovlivněny okolními podmínkami stejně. Při umístění snímače do blízkosti



$d$  = vzdálenost  
 $c$  = rychlost světla  
 $t_1$  = čas vyslání signálu  
 $t_2$  = čas přijetí signálu

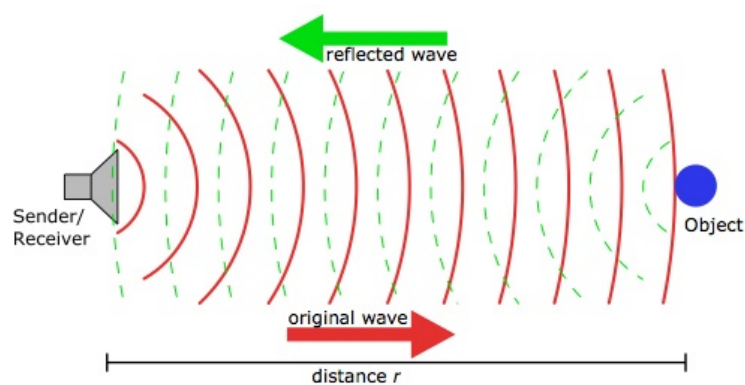
$$d = [(t_2 - t_1) * c] / 2$$

**Obrázek 4.4.** Princip funkce Time of flight senzoru včetně vzorce pro výpočet vzdálenosti [15]

kola vlaku může docházet k ovlivňování senzorů od vysokofrekvenčního akustického rušení od vlaku, především při brzdění. Proto by bylo vhodné použít senzory pracující na co nejvyšší frekvenci ultrazvukového spektra, stovky kHz a více.

Další nevýhodou je tzv. mrtvý čas, který je způsobený dokmitáváním měniče po odeslání vlny. V této době není senzor schopný detekovat navracenou vlnu, snímač je během této doby slepý. Tuto nevýhodu lze částečně eliminovat použitím druhého měniče, kdy jeden slouží jako vysílač (sender, transmitter) a druhý jako přijímač (receiver) signálu. Naopak velkou výhodou oproti optickým senzorům je odolnost vůči prachu a špíně. Snímače jsou tvořeny kmitající membránou, která svými mechanickými kmity brání usazování nečistot a dochází tak k samočištění povrchu senzoru.

Rozsah měření těchto senzorů je od jednotek milimetrů do desítek metrů. Schéma funkce ultrazvukového snímače je na Obrázku 4.5. [16]



**Obrázek 4.5.** Princip funkce ultrazvukového senzoru [17]

### 4.1.3 Srovnání senzorů vzdálenosti

Porovnání jednotlivých základních parametrů průmyslově vyráběných senzorů vzdálenosti je v Tabulce 4.1.

Druh senzoru	Rozsah měření	Rozlišení	Měřicí frekvence	Cena
Triangulační	0,5–1 000 mm	30–10 000 nm	1–50 kHz	10k Kč
Time of flight	0,1–3 000 m	0,1–10 mm	0,1–10 kHz	1k Kč
Ultrazvukový	2–6 000 mm	0,3–5 mm	max. stovky Hz	2k Kč

**Tabulka 4.1.** Porovnání základních parametrů senzorů vzdálenosti. Cena je orientační pro senzory měřící na min. vzdálenost 50 cm s min. frekvencí 1 kHz (s výjimkou ultrazvukových).

Ze srovnání je patrné, že pro naše uvažované korelační měření rychlosti se nejlépe hodí optické triangulační senzory. Mají vhodný rozsah měření, velmi velké rozlišení a dosahují velkých snímacích frekvencí, jsou avšak z dané skupiny výrazně dražší. Dobrých vlastností dosahují také Time of flight senzory, které mají vhodný rozsah měření, dosahují velkých snímacích frekvencí, ale mají nižší rozlišení. Poslední v pořadí skončily ultrazvukové senzory, které jsou limitovány především malými snímacími frekvencemi, což je dáno malou rychlostí šíření zvuku ve vzduchu.

## 4.2 Magnetické senzory

Pro korelační měření rychlosti vlaku je možné také využít magnetické senzory, které reagují na přítomnost magnetického materiálu ve svém okolí.

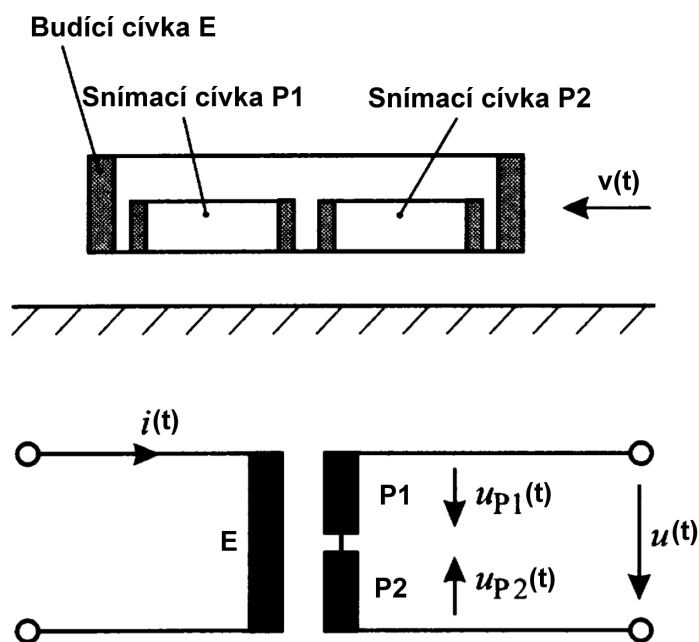
První možností je využít senzory magnetické indukce, které reagují změnou indukčnosti cívky na přítomnost magnetického materiálu v okolí. Tyto senzory mají ale obvykle krátký dosah měření v jednotkách centimetrů, pro větší vzdálenosti je nutné použít velké cívky a dosáhnout velkého vyzařovaného výkonu, což je nákladné a energeticky náročné.

Druhou možností magnetických senzorů jsou (diferenciální) senzory vířivých proudů (eddy-current sensor) [18]. Tyto snímače obsahují budící cívku, která je připojena ke zdroji střídavého proudu o vysoké frekvenci. Proud procházející touto cívkou generuje primární střídavé magnetické pole. Ve vodivých materiálech v blízkosti cívky se indukují vířivé proudy (též Foucaultovy proudy – pojmenované po svém objeviteli).

Lenzův zákon nám říká, že „Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou“ [19]. Vířivé proudy v materiálu v souladu s tímto zákonem generují magnetické pole opačného znaménka, než je primární pole budící cívky (snaží se bránit změně současného stavu). Výsledné magnetické pole je snímáno dvěma cívkami, které jsou umístěné vedle sebe ve směru pohybu. Uspořádání cívek a schéma zapojení senzoru vířivých proudů je na Obrázku 4.6.

Snímací cívky jsou zapojené navzájem diferenciálně tak, aby při působení shodného pole na obě cívky bylo výstupní napětí nulové. Snímač vířivých proudů pak reaguje pouze na nerovnoměrnosti podél trati, homogenní pole (kolejnici, šum) nedetekuje, stejnosměrná složka signálu stejně nemá pro korelaci žádný význam. Díky tomu nereaguje ani na další rušivé vlivy, jako je například kmitání odpružení podvozku vlaku při jízdě, které se projevuje změnou vzdálenosti senzoru od země – působí totiž na obě snímací cívky shodně.

Senzor se hodí pro detekci přítomnosti svěrky a podkladnice, kterými je upevněna kolejnice k pražci a které jsou obě obvykle z elektricky vodivých materiálů. Kromě toho detekuje další vodivé předměty v cestě, například vedlejší koleje u výhybek, případně nejrůznější kabeláž v kolejišti. Bylo by možné s ním detekovat i nehomogenity v kolejnici jako takové, kvůli bezpečnostním předpisům ale není možné umístit cokoli na vlak



**Obrázek 4.6.** Diferenciální senzor vířivých proudů: uspořádání cívek (nahore), schéma zapojení (dole). Převzato z [18], upraveno.

těsně nad kolejnicí. Ve větší vzdálenosti nad kolejnicí jsou dominantní v detekci právě upevnění kolejnice a další větší vodivé předměty.

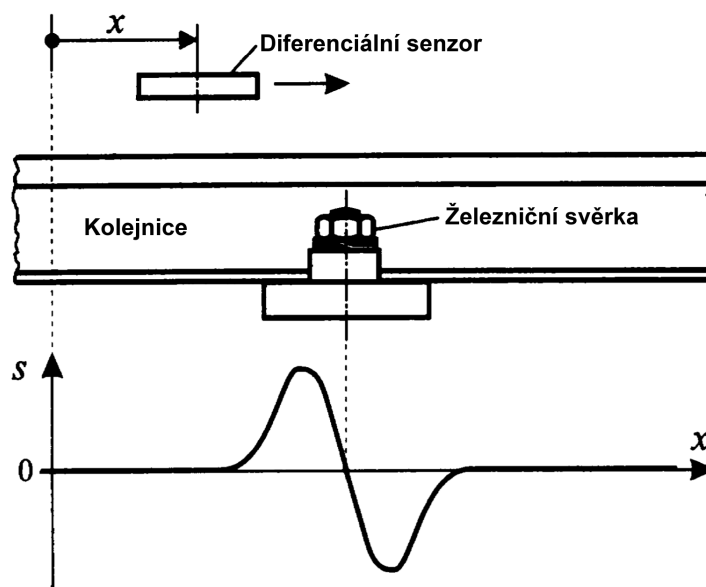
Při průjezdu nad upevněním pražce se nejprve zvýší magnetická indukce v jedné snímací cívce, díky čemuž bude mít indukované napětí v obou cívkách různou velikost a po odečtení dostaneme nenulovou hodnotu výstupního napětí. Ve chvíli, kdy je pražec uprostřed senzoru, jsou indukovaná napětí v obou cívkách shodná a výstupní napětí je tak nulové. Nakonec se zvýší magnetická indukce v druhé snímací cívce oproti první a výstupní napětí bude opět nenulové a identické jako při průjezdu nad první cívkou, jen s opačným znaménkem (což je dáno právě diferenciálním zapojením cívek). Průjezd snímače nad pražcem je znázorněn na Obrázku 4.7.

Pro použití korelace je nutné použít dva tyto senzory za sebou ve směru pohybu, přičemž jejich vzdálenost musí být menší, než je vzdálenost dvou pražců na trati od sebe. Každý snímač by měl také pracovat na rozdílné budící frekvenci, aby se zabránilo vzájemnému ovlivňování senzorů. Pozor musíme dát také na to, aby výsledné magnetické pole senzoru nenarušilo činnost jiných zařízení ve vozidle nebo v okolí trati.

I tento senzor dosahuje větších rozměrů a vyšší spotřeby při provozu. Výhodou těchto senzorů ale je, že fungují nezávisle na počasí – déšť, vítr, prach a podobně na jeho funkci nemají vliv. Dokonce bude funkční i v případě, kdy je kolejiště zasypáno sněhem a pražce jsou skryté pod vrstvou sněhu.

Pokud bychom předem znali vzdálenost mezi jednotlivými pražci na trati (tyto vzdálenosti jsou většinou standardizovány), tak by nám pro určení rychlosti vlaku stačilo použít pouze jeden tento snímač. Pomocí Fourierovy řady bychom rozložili výstupní signál senzoru a podle frekvence výskytu jednotlivých pražců a jejich známé vzdálenosti je určení aktuální rychlosti již triviální. [20]

Tyto senzory dokáží detekovat velmi přesně i výhybku na trati a odlišit ji od pražce, sekundární magnetické pole vedlejší kolejnice je mnohem silnější než v případě detekování uchycení pražců. Pokud tuto vlastnost spojíme se znalostí železniční sítě (mapy



**Obrázek 4.7.** Výstupní signál diferenciálního senzoru vířivých proudů při průjezdu nad pražcem se svěrkou. Převzato z [18], upraveno.

– například z veřejně přístupné Open Street Map<sup>1</sup>), kde jsou zachyceny polohy všech kolejí, výhybek a podobně, tak je možné touto kombinací zvýšit přesnost určení polohy a dokonce přesně určit kolej, po které se aktuálně vlak pohybuje. [21]

#### ■ 4.2.1 Lindometer

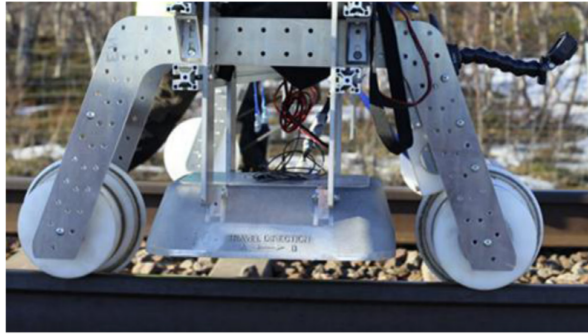
Konkrétní realizace diferenciálního senzoru vířivých proudů pro kolejová vozidla je detailně popsána v [22]. V této práci švédský tým sestrojil diferenciální snímač vířivých proudů, kterému dal název „Lindometer“. Měřicí systém je koncipován tak, že se pohybuje 65 mm nad temenem hlavy kolejnice a detekuje přítomnost svěrky. Jeho primárním cílem je pomoci s údržbou železničních tratí – má za úkol detekovat místa (pražce), kde by měla být svěrka držící kolejnici na pražci, ale z nějakého důvodu zde chybí. Na tato místa pak lze cíleně a efektivně posílat pracovníky dráhy na údržbu. Sekundárním cílem bylo testování cross-korelačního měření rychlosti soupravy.

Lindometer obsahuje dva nezávislé 20 cm za sebou umístěné senzory, každý z nich odpovídá schématu z Obrázku 4.6. Primární (budící) cívka jednoho senzoru má rozměry 70 x 155 x 18 mm, uvnitř které jsou umístěny dvě snímací cívky. Aby se zamezilo vzájemnému ovlivňování obou senzorů, je jedna primární cívka buzena střídavým proudem o frekvenci 18 kHz, druhá o frekvenci 27 kHz. V obou případech protéká budící cívkou proud 3 A. Napájení Lindometeru je tedy energeticky poměrně náročné, vyzářený výkon je velký. Celý tento měřicí systém je zachycen na Obrázku 4.8.

Výsledky testování Lindometeru v laboratorních podmínkách i na železnici ukázaly funkčnost systému jak pro detekování chybějících svěrek, tak jeho využitelnost pro korelační měření – výstupem jsou spolehlivé nezašuměné signály. Autoři práce ale korelaci jako takovou s naměřenými daty neprováděli, tady je nutné dále pokračovat ve výzkumu a analyzovat data i s tímto cílem využití. [22]

<sup>1</sup> <https://www.openstreetmap.org/>





**Obrázek 4.8.** Měřicí systém Lindometer [22]

### 4.3 Inerciální senzory

Další kategorií senzorů využitelných pro korelační měření rychlosti vlaku jsou inerciální senzory (IMU - Inertial Measurement Unit) [23]. Tyto senzory obvykle obsahují tři akcelerometry měřící zrychlení ve třech navzájem kolmých osách a tři gyroskopy, které měří úhlovou rychlost kolem daných os.

Dvojici těchto snímačů můžeme umístit na rám podvozku – každý nad jinou nápravu dvojkolí, která jsou od sebe navzájem posunuta o určitou vzdálenost (= rozvor kol). Každý tento senzor bude měřit pohyby (vibrace) nápravy ve vertikálním směru – stačí tedy použít jednodušší verzi IMU jednotek měřící pouze v jedné ose.

Kolejnice nejsou nikdy dokonale hladké, vždy se na nich nějaké nepravidelné nerovnosti vyskytují, které pohybují s dvojkolím nahoru a dolů při přejezdu přes ně. Tyto pohyby se poté přenáší na podvozek, kde je možné je detekovat. Druhé dvojkolí přes stejnou nerovnost také přejezdí, ale s drobným časovým zpožděním. Korelací mezi těmito dvěma signály můžeme zjistit dané časové zpoždění a následně při znalosti rozvoru kol dopočítat rychlost pohybu.

Dle výsledků popsanych v [23] lze touto metodou dosáhnout velmi přesných a spolehlivých výsledků, při měření na vlaku v rychlostech do 200 km/h dosáhli maximální chyby rychlosti menší než 1 %.

Nevýhodou této metody je potřeba dostatečně citlivých IMU jednotek, které dokáží spolehlivě tyto malé nerovnosti na kolejích detekovat, které jsou ale už poměrně cenově nákladné. Další nevýhodou je, že hlavní zdroje těchto nerovností byly dříve kolejnicové spoje (místa, kde se potkávají dva na sebe navazující kusy kolejnic), na kterých docházelo díky spáře a ne vždy identické výšce kolejnic ke známému „drncání“ vlaku. V dnešní době jsou už však tyto spoje nahrazovány bezстыkovou kolejí (kolejnice jsou k sobě svařovány), kde je spoj bez spáry následně dohladka obroušen. I tak se ale na kolejnici vyskytují jiné detekovatelné nerovnosti dané opotřebením kolejnic, i když nejsou tak výrazné.

### 4.4 Mikrovlnné senzory

Mikrovlnné senzory, neboli také Dopplerovy radary, jsou senzory rychlosti. Ke své funkci využívají (na rozdíl od předešlých senzorů) Dopplerův jev, tedy změnu frekvence odeslaného a přijatého signálu (vlnění), která je způsobena nenulovou vzájemnou (radiální) rychlostí vysílače a přijímače. Závislost je dána rovnicí

$$f_r = f_t \frac{c + v}{c - v}, \quad (1)$$

kde  $f_t$  je frekvence odesílaného signálu,  $f_r$  frekvence přijatého signálu,  $c$  rychlost šíření signálu v prostředí (pro elektromagnetické vlnění rychlost světla) a  $v$  je vzájemná rychlost vysílače a přijímače. Z rovnice si již jednoduše vyjádříme hledanou vzájemnou rychlost

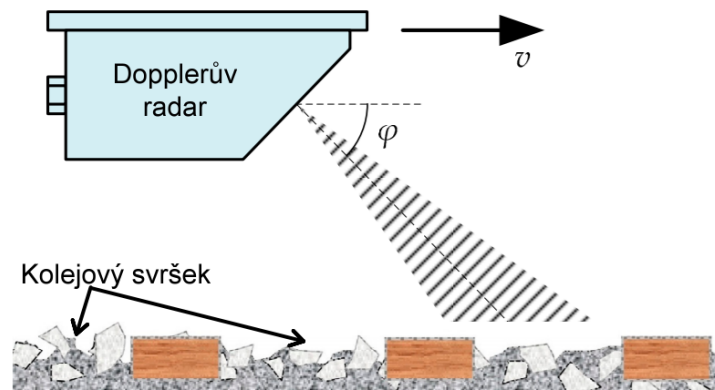
$$v = c \frac{f_r - f_t}{f_r + f_t}. \quad (2)$$

Dopplerovy radary obvykle pracují s elektromagnetickým zářením o frekvencích v řádu desítek GHz, jedná se tedy o mikrovlnné záření. Vyšlou mikrovlnnou vlnu o přesně dané frekvenci, ta se odrazí od měřeného pohybujícího objektu zpět a díky vzájemné rychlosti změni svou frekvenci. Navrácená vlna je přijata zpět v senzoru, kde je analyzována její frekvence a z ní se následně vypočítá vzájemná rychlost. Použitím mikrovlnných vln navíc dochází k eliminaci problému s ušpiněním čela senzoru, mikrovlny usazeným prachem a podobnými malými nečistotami proniknou. Tento způsob dosahuje vysoké přesnosti měření rychlosti.

Měření rychlosti vlaku Dopplerovým radarem je v dnešní době již poměrně běžně používáno a je jednou ze součástí odometrie systému ETCS. Snímač je zde umístěn zespodu lokomotivy a pod určitým úhlem  $\varphi$  snímá povrch kolejového svršku. Radar nemůže snímat kolejový svršek kolmo, protože v tom případě by vzájemná radiální rychlost byla nulová, naopak nemůže být umístěn ani vodorovně (horizontálně), protože by se odeslaná vlna neměla od čeho odrazit zpět. Z tohoto důvodu je nutné upravit Rovnici (2), aby reflektovala úhel, pod kterým je povrch snímán [24]

$$v = c \frac{f_r - f_t}{(f_r + f_t) \cos \varphi}. \quad (3)$$

Schéma funkce senzoru s vyznačeným úhlem  $\varphi$  je na Obrázku 4.9.



**Obrázek 4.9.** Schéma principu funkce Dopplerova radaru na železnici. Převzato z [24], upraveno.

Pro použití v systému ETCS musí být senzor certifikován, musí dosahovat vysoké spolehlivosti a malé chyby měření. Obvykle jsou používány vícekanálové radary, které měří v jeden moment rychlost na více místech a jednotlivé výsledky analyzují a porovnávají. Tyto požadavky zvyšují cenu senzoru. Výrobcem mikrovlnných radarů pro ETCS odometrii je například firma DEUTA<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> <https://www.deuta.com/en/radar-sensors.aspx>

# Kapitola 5

## Simulace korelačního měření s vybranými senzory

Pomocí programu *Matlab* byl vytvořen simulátor jízdy soupravy se senzory nad kolejovým svrškem. Skládá se ze dvou částí – vytvoření modelu profilu kolejového svršku a samotné simulace jízdy a měření senzorů nad ním. Následně byly do simulátoru do-sazeny parametry vybraných skutečných senzorů.

### 5.1 Model kolejového svršku

Nejprve se vytvoří 1D model kolejového svršku, který zachycuje profil trati – prostor (uprostřed) mezi kolejemi ve směru jízdy. V tomto prostoru se obvykle nachází pouze periodicky se opakující pražce a železniční šterk mezi nimi (viz Obrázek 4.1). Pražce mají většinou hladkou rovnou strukturu, ale šterk mezi pražci je rozsypan náhodně – má náhodnou strukturu, což je právě pro použití korelace důležité.

Vstupem do modelu kolejového svršku jsou následující parametry:

- Délka generovaného modelu: definuje délku trati v centimetrech, pro kterou se generuje tento model. Výchozí hodnota je 10 000 cm, tedy 100 metrů.
- Velikost pražce: definuje velikost (šířku) pražce v centimetrech. Výchozí hodnota je 25 cm (obvykle se pohybuje mezi 15–30 cm [25]).
- Vzdálenost dvou pražců: definuje vzdálenost v centimetrech, jak daleko jsou od sebe středy dvou pražců. Výchozí hodnota je 60 cm (nejčastější hodnota; obvykle se pohybuje mezi 55–70 cm [26]).

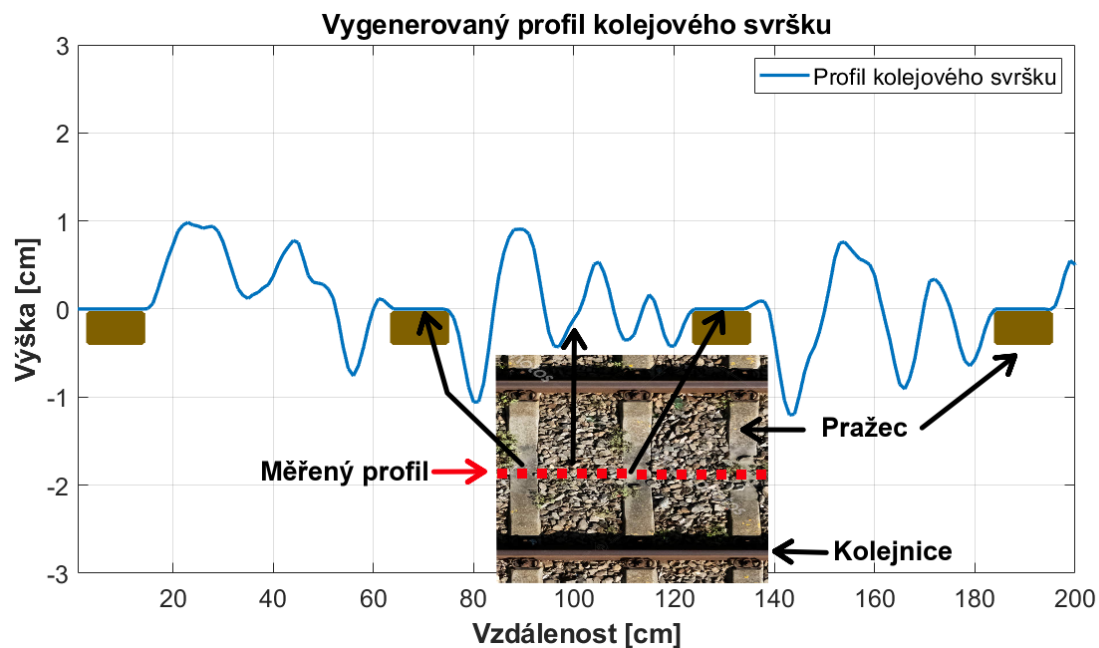
Po zadání těchto parametrů se vytvoří pole o velikosti požadované délky generovaného modelu. Do pole jsou následně vloženy náhodné hodnoty dle normálního (Gaussova) rozdělení s jednotkovým rozptylem. To představuje náhodně rozsypané kameny šterku mezi kolejemi.

Následně jsou do pole vloženy s hodnotou 0 pražce podle zadaných hodnot velikosti pražce a vzdálenosti dvou pražců (mezera mezi pražci je dána vzdáleností dvou pražců minus velikost pražce). Pražce jsou tedy posunuty do základní (nulové, střední) výšky.

Výsledné pole hodnot je ještě vyhlazeno (aby se eliminovaly velmi prudké skoky tam a zpět) a předáno jako parametr do další části programu – do části simulující jízdu se senzory. Ukázka části vygenerovaného profilu kolejového svršku je na Obrázku 5.1.

### 5.2 Simulace jízdy se senzory

V druhé části programu se simuluje samotná jízda se senzory nad dříve vygenerovaným profilem kolejového svršku. Vždy se provádí simulace jízdy se dvěma senzory se stejnými vlastnostmi (parametry), které jsou pro reálné snímače vyčteny z katalogového listu. Senzory jsou od sebe navzájem posunuty o vzdálenost  $d$  ve směru pohybu. Na základě



**Obrázek 5.1.** Ukázka vygenerovaného profilu kolejového svršku (modře). Hnědým obdélníkem jsou znázorněny pražce (zde o šířce 15 cm). Prostor pod modrou čarou představuje kromě pražců jednotlivé kameny šterku.

simulovaných výstupů ze senzorů se následně provádí výpočet korelace a porovnává se reálná rychlost pohybu s vypočítanou rychlostí pomocí korelace.

Parametry této části simulace jsou následující:

- Model kolejového svršku, který byl vygenerován podle předchozí podkapitoly.
- Rychlost pohybu: definuje rychlost pohybu  $v$  v km/h, jakou se simulovaně pohybují senzory nad kolejovým svrškem (tedy jak rychle vlak jede).
- Snímací frekvence senzorů: definuje frekvenci v Hz, s jakou snímají senzory profil kolejového svršku (kolik měření provedou za sekundu).
- Vzdálenost senzorů: definuje vzdálenost  $d$  v centimetrech, jak daleko od sebe jsou za sebou ve směru pohybu oba snímače. Výchozí hodnota je 200 cm (2 metry). Rozvor kol (vzdálenost mezi dvěma dvojkolími) podvozku vlaku je obvykle mezi 180 a 250 cm [27], hodnota je tedy volena tak, aby bylo možné senzory umístit na jeden společný podvozek.
- Perioda aktualizace: definuje dobu, po kolika sekundách jízdy se provádí výpočet korelace. Výchozí hodnota je 1 sekunda. Výpočet korelace se v tomto případě neprovádí nad celým 100 metrovým úsekem trati, ale pouze nad tak dlouhým úsekem, který vlak projede danou rychlostí za 1 sekundu.
- Výška senzoru nad povrchem: definuje výšku v centimetrech, v jaké se pohybují senzory nad profilem kolejového lože. Výchozí hodnota je 40 cm.
- Zorný úhel senzoru (FoV) / rozměr bodu měření: definuje zorný úhel ve stupních (případně přímo rozměr bodu měření), ve kterém snímá sensor daný povrch. V ideálním případě by byly všechny senzory bodové, to však v praxi není možné.
- Počet desetinných míst: definuje rozlišení senzoru (nejmenší hodnotu, kterou je sensor schopný rozlišit). Udává počet desetinných míst, na který se zaokrouhuje měřená hodnota. Nula odpovídá rozlišení 1 cm, jednička odpovídá rozlišení 0,1 cm atd.
- Směrodatná odchylka: definuje velikost směrodatné odchylky přenosnosti měření senzoru v centimetrech.

Po spuštění se nejprve převede rychlost na m/s a pro zadanou hodnotu rychlosti a snímací frekvence se spočítá vzdálenost dvou vzorků od sebe. Podle zadaného zorného úhlu a výšky senzoru nad povrchem se také vypočítá velikost snímané oblasti (stopy), kterou senzor v jeden moment zaznamenává a jejíž vzdálenost nějakým způsobem „průměruje“ (nebo dostaneme zadanou rovnou tuto velikost). K tomu se vytvoří normované koeficienty okénkové funkce o dané velikosti (použito je zde Tukey window<sup>1</sup> s parametrem 0,5).

Dále se vytvoří 2 pole (pro každý senzor jedno) o velikosti součinu snímací frekvence a periody aktualizace – do těchto polí se budou následně ukládat „naměřená“ data a bude se s nimi provádět korelace.

Nyní je pro každou hodnotu v tomto poli nasimulována měřená hodnota. V daném jednom bodě měření se vezme oblast kolem tohoto bodu o velikosti snímané oblasti senzoru a konvolucí se na ni aplikují předpočítané koeficienty okénkové funkce, čímž dostaneme jednu číselnou hodnotu. Následně se tato hodnota zatíží bílým šumem se zadanou směrodatnou odchylkou a výsledek se po zaokrouhlení na daný počet desetinných míst uloží do výsledného pole. Poté se výpočet posune dále o vzdálenost mezi dvěma vzorky, kde se celý proces opakuje.

Výpočet hodnot pro druhý senzor probíhá stejným způsobem, pouze jsou dané body, ve kterých probíhá výpočet, posunuty o vzdálenost mezi senzory (uvažujeme tedy, že snímače měří synchronizovaně, oba ve stejnou chvíli).

Po vypočítání všech hodnot v polích je provedena s těmito dvěma poli korelace. Po nalezení maximální hodnoty  $R(\tau)$  a tím určení počtu vzorků, o které jsou mezi sebou oba signály posunuté, se při znalosti zadané vzdálenosti senzorů a jejich snímací frekvence určí rychlost, s jakou se senzory pohybují. Ta je následně porovnána se zadanou rychlostí na začátku simulace.

## 5.3 Simulované senzory

Následně bylo na stránkách různých výrobců dohledáno pět konkrétních optických senzorů, které byly vybrány jako vhodné pro korelační měření. Použity byly 3 Time of flight a 2 triangulační optické snímače s různými vlastnostmi. Jejich katalogové údaje byly následně doplněny do simulace. Přehled vlastností použitých senzorů je uveden v Tabulce 5.1.

Senzor	Snímací frekvence	Rozsah měření	FoV	Rozlišení	Směrodatná odchylka	Cena
TF-Luna	až 250 Hz	0,2–8 m	2 °	10 mm	0,25 cm	500 Kč
TF Mini-S	až 1 kHz	0,1–12 m	2 °	10 mm	0,5 cm	1k Kč
TF 03-100	až 10 kHz	0,1–100 m	0,5 °	10 mm	3 cm	5k Kč
OM70-P0600	2 kHz	0,1–0,6 m	0,3 mm	3 μm	9 μm	43k Kč
ILD1420-500	až 4 kHz	0,1–0,6 m	1,1 mm	0,5 μm	40 μm	60k Kč

**Tabulka 5.1.** Přehled vlastností simulovaných senzorů [28, 29, 30]. Sloupec FoV odpovídá buď zornému úhlu jako takovému nebo průměru měřené oblasti (stopy).

První 3 senzory jsou od čínského výrobce Benewake a pracují na principu Time of flight, zbylé dva – snímač OM70-P0600 od švýcarské firmy Baumer a senzor ILD1420-500 od firmy Micro-Epsilon z Německa – pracují na triangulačním principu. Ceny v tabulce jsou přibližné a odpovídají ceně za jeden kus, pro použití korelace s dvěma senzory je nutné tedy tuto cenu vynásobit dvěma.

<sup>1</sup> <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/tukeywin.html>

## 5.4 Výsledky

Nejprve byly simulováním ověřeny vztahy mezi přesností měření a některými zadanými parametry – vždy se pro dané měření měnil pouze jeden parametr, ostatní zůstaly stejné:

- Snímací frekvence: čím větší snímací frekvence, tím přesnější dostáváme výsledky rychlosti z korelace. Zvýšením snímací frekvence na dvojnásobek se odchylka sníží na polovinu.
- Vzdálenost mezi senzory: opět platí, že čím větší vzdálenost, tím přesnější dostáváme výsledky rychlosti. Zvýšením vzdálenosti mezi senzory na dvojnásobek se odchylka opět sníží na polovinu. Nicméně čím větší vzdálenost, tím více je nutné posunout minimální rychlost, od které lze korelaci provést. Navíc možnosti umístění senzoru na vozidlo jsou omezené, oba senzory musí i v oblouku procházet tím samým místem, takže není možné je umístit kamkoliv. Umístění na společný podvozek je tedy nejlepší variantou.
- Vzdálenost dvou pražců, velikost pražce a výška senzoru nad povrchem: jejich přesné hodnoty parametrů (v rámci reálných mezí) nehrají roli.
- Perioda aktualizace: zvyšování její hodnoty nad 1 sekundu nemá žádný velký přínos. Snižováním její hodnoty ale opět dojde k tomu, že při nižších rychlostech za tuto dobu souprava neujede ani vzdálenost mezi oběma senzory. Např. při vzdálenosti senzorů 200 cm a periodě aktualizace 0,5 s začne korelace vracet smysluplné výsledky až při rychlostech přes 20 km/h.

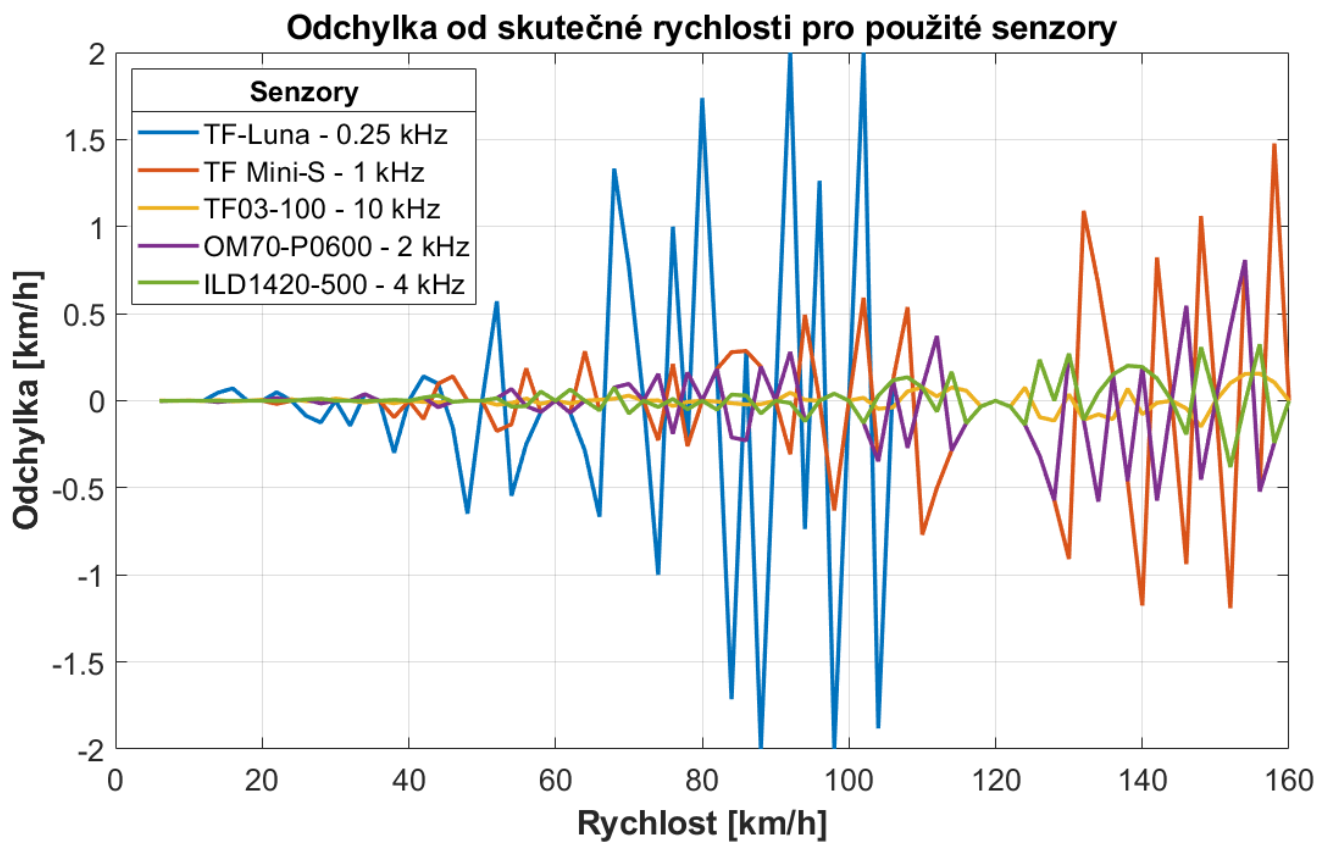
Cílem je tedy použít senzory s co největší snímací frekvencí a umístit je co nejdále od sebe, což nám zajistí velmi dobré výsledky při středních a vyšších rychlostech.

Dále byla s parametry senzorů uvedených v Tabulce 5.1 provedena samotná simulace. Za rychlost pohybu byly zvoleny hodnoty od 8 km/h po 2 km/h do 160 km/h (menší rychlosti než 8 km/h nemá smysl uvažovat – korelace se v tomto zapojení pro velmi pomalou jízdu nehodí). Ostatní parametry byly ponechány na výchozích hodnotách. Výstup ze simulace je na Obrázku 5.2.

Z obrázku vyplývá, že dle simulace je použití senzorů pro korelační měření možné a poskytují poměrně přesné informace o aktuální rychlosti. (Při důvěře v přesnost hodnot udávaných katalogových údajů, na které se bohužel ne vždy lze spolehnout.) Korelace je velmi silný nástroj, dokáže dát přesné výsledky i s nepřesnými senzory.

Závislost odchylky na snímací frekvenci senzorů je patrná i zde. Senzor TF-Luna je v grafu ukončen už při rychlosti 106 km/h, při vyšších rychlostech poskytuje odchylky v řádech desítek i stovek km/h. Snímací frekvence tohoto snímače je pro vyšší rychlosti naprosto nedostatečná.

Senzor TF 03-100 poskytuje sice nejlepší výsledky (díky velmi vysoké snímací frekvenci), má ale velkou směrodatnou odchylku, proto jsou jeho výsledky velmi podobné se senzorem ILD1420-500, který má snímací frekvenci dva a půl krát menší. Nicméně ve prospěch TF 03-100 je i to, je výrazně levnější.



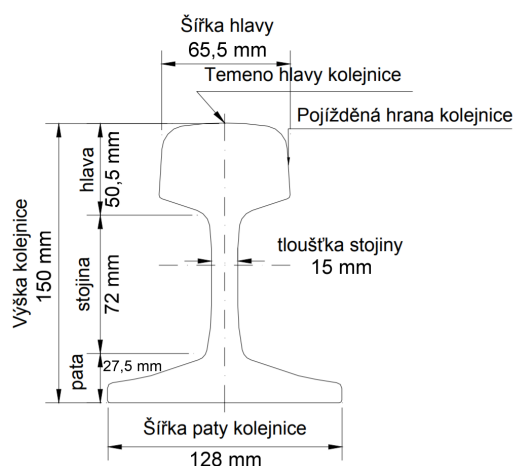
**Obrázek 5.2.** Odchylka vypočítané rychlosti pomocí korelace od skutečné rychlosti pro pětici vybraných optických senzorů. Vzdálenost senzorů = 200 cm, perioda aktualizace = 1 s, výška senzoru nad povrchem = 40 cm.

# Kapitola 6

## Měření

Experimentální měření byla provedena v laboratorních podmínkách. Byla použita širokopatní železniční kolejnice typu T, kterou v dnešní době stále ještě můžeme nalézt na regionálních tratích, postupně však dožívá.

Výška kolejnice typu T je 150 mm, šířka paty 128 mm, šířka hlavy 65,5 mm a tloušťka stojiny 15 mm (viz Obrázek 6.1). Hmotnost této kolejnice je zhruba 50 kg/m. Svými parametry je velmi podobná moderním kolejnicím typu UIC 60 (hlavní koridorové tratě) a S 49 (vedlejší a regionální tratě, náhrada kolejnice typu T).



**Obrázek 6.1.** Pojmenování základních částí kolejnice s doplněnými rozměry kolejnice typu T. Převzato z [31], upraveno.

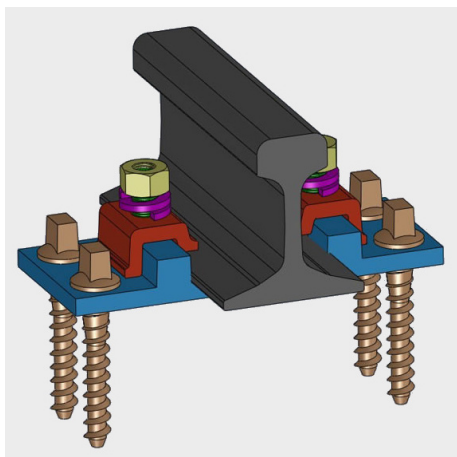
Spolu s kolejnicí byla použita žebrová podkladnice s upevněním typu K s tuhou svěrkou ŽS 4 (Obrázky 6.2 a 6.3). Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů upevnění, poskytuje spolehlivé a stabilní upevnění kolejnice k pražci. Pomalu je ale toto upevnění při rekonstrukcích na hlavních tratích nahrazováno pomocí moderních pružných spon, které vyžadují menší kontrolu a údržbu.

Pro simulování přejezdu senzoru nad kolejnicí byl použit lineární posuvník v jedné ose E-MY2H<sup>1</sup>, který má délku 30 cm a nastavitelnou rychlost pohybu od 0,1 do 1 m/s. Tento posuvník byl umístěn do nastavitelné výšky  $h$  nad kolejnicí. Střed posuvníku byl umístěn tak, aby se nacházel nad prostředkem svěrky s matkou. Při přejezdu je tedy jezdec posuvníku třetinu délky posuvníku nad stolem, třetinu nad upevněním kolejnice k pražci a poslední třetinu opět nad stolem, při přejezdu je po obou stranách upevnění volný prostor. Celý měřicí systém je zachycen na Obrázku 6.4.

V této části práce je místo snímání profilu kolejového svršku snímáno upevnění koleje k pražci (viz červená tečkovaná čára na Obrázku 6.3). Jednak je jednodušší tato měření

<sup>1</sup> Katalogový list: [https://www.smc.eu/portal\\_ssl/WebContent/resources/docs/e-actuator\\_pdf/E-MY2\\_cat\\_en.pdf](https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/resources/docs/e-actuator_pdf/E-MY2_cat_en.pdf)

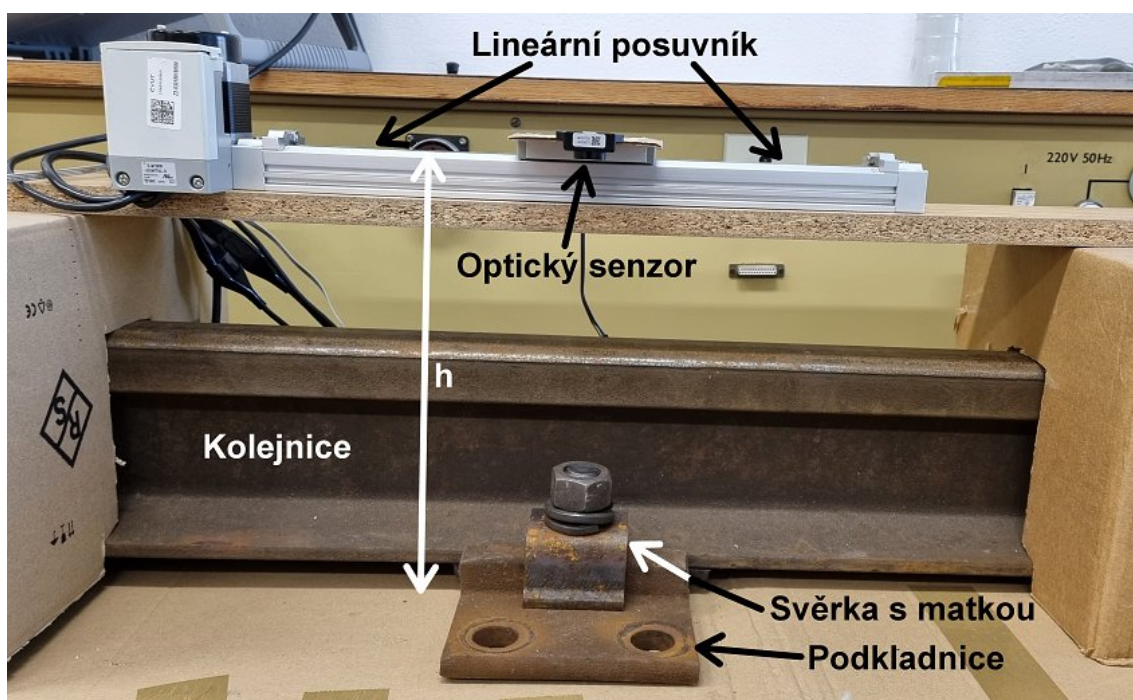




**Obrázek 6.2.** Schéma upevnění typu K – kolejnice šedou barvou, podkladnice modře, svěrka ŽS 4 červeně, matka na svěrce žlutě [32]



**Obrázek 6.3.** Použité upevnění kolejnice k pražci typu K s tuhou svěrku ŽS 4 ve stanici Tábor. Červenou tečkovanou čarou je označeno místo snímané senzory.



**Obrázek 6.4.** Postavený měřicí systém v laboratoři - kolejnice, podkladnice a svěrka s matkou; nad nimi ve výšce  $h$  lineární posuvník s optickým senzorem TF Mini-S.

provádět v laboratoři, dále upevnění výrazně více vystupuje nad okolní terén, takže je možné použít méně přesné senzory. Navíc umožňuje využít korelaci trochu odlišným způsobem – pokud snímače umístíme k sobě blíže, než je nejmenší vzdálenost mezi dvěma pražci, můžeme mezi sebou korelovat i tyto periodicky se opakující signály. Bližším umístěním senzorů k sobě dokážeme spolehlivě měřit rychlost i při menších rychlostech pohybu vlaku.

## 6.1 Magnetické senzory

Diferenciální senzor vířivých proudů v rámci práce pro svou mohutnost, materiální a energetickou náročnost realizován nebyl. Jeho funkčnost a dosažené výsledky jsou v podobě Lindometeru popsány v [22] a v Kapitole 4.2.1.

Místo toho byly provedeny laboratorní experimenty s malým a úsporným modulem LDC1000EVM<sup>1</sup> od firmy Texas Instruments, který slouží k měření a převodu indukčnosti na digitální signál. K modulu se připojí libovolný LC obvod (paralelní zapojení ploché cívky a kondenzátoru) jako senzor.

Oscilující LC obvod generuje střídavé magnetické pole. Ve chvíli, kdy se k cívce přiblíží vodivý materiál, se v něm vytvoří vířivé proudy (eddy current) s vlastním elektromagnetickým polem. Toto pole následně zpětně ovlivňuje původní magnetické pole LC obvodu, způsobuje v něm ztráty a mění indukčnost obvodu. Modul měří obě změny těchto vlastností – ztráty měří velikostí paralelní rezonanční impedance  $R_p$  a podle změřené hodnoty rezonanční frekvence určuje aktuální indukčnost obvodu [33]. Naměřená rezonanční frekvence  $f$  se následně na indukčnost převede podle rovnice

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}, \quad (1)$$

kde  $L$  je hledaná indukčnost cívky,  $f$  rezonanční frekvence LC obvodu a  $C$  je kapacita kondenzátoru obvodu, která je pro daný obvod konstantní.

Modul LDC1000EVM má rozlišení 16 bitů pro měření  $R_p$  a 24 bitů pro měření frekvence. Odebíraný proud modulu i LC obvodu dosahuje maximální hodnoty 10 mA. Cena samotného čipu LDC1000<sup>2</sup> se pohybuje kolem 110 Kč, čip s vyhodnocovací deskou LDC1000EVM stojí kolem 2 200 Kč (plus cena LC obvodu). Primární použití těchto snímačů je detekce přítomnosti kovových materiálů, jako senzory přiblížení nebo jako (bez)dotyková tlačítka.

Modul LDC1000EVM se zapojuje přímo do USB portu počítače, ze kterého je i napájen 5 V. Pomocí specializovaného programu od Texas Instruments je modul v PC konfigurován (například se zde zadává velikost připojeného kondenzátoru LC obvodu) a jsou v něm zobrazována aktuálně měřená data  $R_p$  a  $L$ , která je možné vyexportovat do CSV.

Vzdálenost, na kterou je senzor schopen detekovat vodivý materiál, závisí na průměru cívky a materiálu jejího jádra. Pro vzduchové cívky obecně platí, že maximální snímací vzdálenost se pohybuje kolem 50–100 % průměru cívky. Pokud tedy chceme detekovat přítomnost podkladnice, svěrky a matky nad pražcem, potřebujeme cívku o průměru minimálně 25 cm.

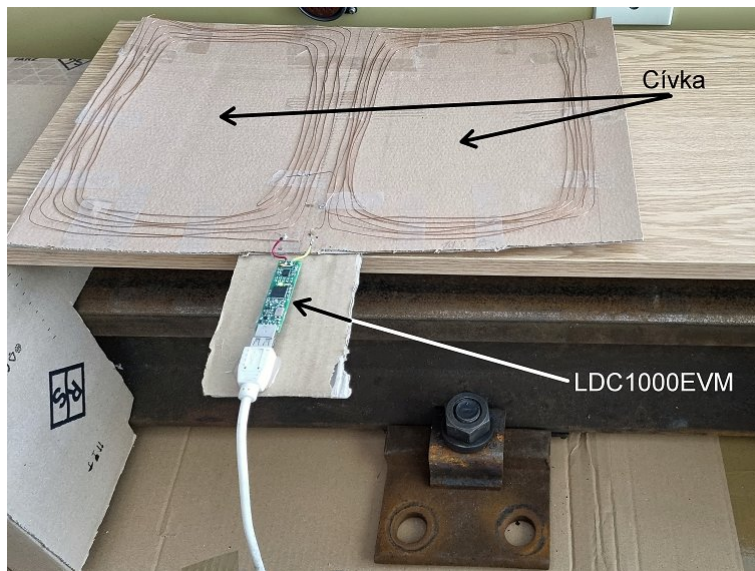
Nejprve byla namotána plochá obdélníková cívka o třech závitech a rozměrech 20 x 25 cm, jejíž indukčnost byla kolem 10  $\mu\text{H}$  a k ní byl paralelně připojen kondenzátor o kapacitě 100 pF. Tato cívka dokázala detekovat vodivý materiál (kolejnici) při přiblížení pouhé 3 cm nad kolejnicí (potřebujeme detekovat přítomnost upevnění pražce, které je o dost níže).

V druhém případě byla namotána diferenciální cívka, která vznikla antiparalelním zapojením dvou cívek vedle sebe o rozměrech 20 x 25 cm s pěti závity (viz Obrázek 6.5), každá o indukčnosti okolo 15  $\mu\text{H}$  (kondenzátor zůstal stejný). Použitím diferenciální cívky se mělo docílit ignorování detekce nedůležité statické složky (kolejnice), jednotlivé indukčnosti cívek by se od sebe odečetly na hodnotu blízkou nule. V případě, kdy by

<sup>1</sup> Modul se skládá z čipu LDC1000 a vyhodnocovacích a komunikačních obvodů.

<sup>2</sup> Katalogový list: <https://www.mouser.com/datasheet/2/405/lcdc1000-556645.pdf>

se jedna z cívek dostala nad upevnění pražce a změnila se tak její indukčnost, by došlo k rozvážení diferenciální cívky jako celku a výsledná indukčnost by již nebyla nulová. (Průběh indukčnosti při přejezdu by byl podobný jako na Obrázku 4.7, i když se jedná o jiný fyzikální princip měření.)



**Obrázek 6.5.** Měření s modulem LDC1000EVM a diferenciálními antiparalelně zapojenými cívkami

Bohužel ani toto zapojení nevedlo k očekávaným výsledkům, vzájemná indukčnost takto velkých cívek je minimální. K odečtení indukčností antiparalelně zapojených cívek na nulu nedošlo. V tomto zapojení reagovala cívka na přítomnost kolejnice na vzdálenost cca 7 cm, což je stále hodně pod minimální potřebnou vzdáleností. Navíc byla cívka velmi citlivá i na přítomnost dielektrik ve své blízkosti (ruka, deska stolu).

Hlavním problémem této myšlenky je, že modul LDC1000EVM není pro takováto měření s velkou cívkou na velké vzdálenosti určen. RC oscilátor dokáže napájet maximálním proudem v jednotkách mA, elektromagnetické pole cívky a její vyzářený výkon je pak velmi malý. Ideální výkon (proud) by byl přitom potřeba minimálně o 2–3 řády vyšší (viz Kapitola 4.2.1).

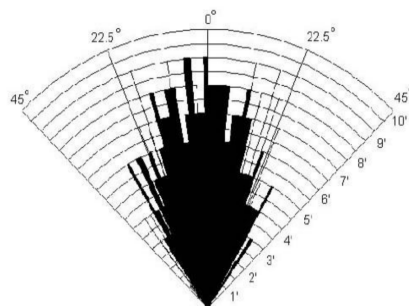
## 6.2 Ultrazvukový senzor

Pro experimentální měření byl použit díky své nízké ceně, jednoduchosti a velkému rozšíření ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-SR04<sup>1</sup> (Obrázek 6.6). Tento senzor má oddělený vysílací a přijímací měnič a má malý vyzářovací (zorný) úhel 15° (viz Obrázek 6.7), snímaný kužel je tedy oproti jiným ultrazvukovým senzorům úzký – při vzdálenosti 30 cm má snímaný kruh poloměr necelé 4 cm. Snímač měří na vzdálenost od 2 cm do 4 m s deklarovaným rozlišením 3 mm. Odebíraný pracovní proud dosahuje maximální hodnoty 15 mA. Cena senzoru se pohybuje kolem 50 Kč za kus. Změřená statická směrodatná odchylka měření tohoto senzoru z 12 tisíc vzorků na vzdálenost 30 cm při snímací frekvenci 100 Hz dosahuje 0,2 cm a mezi jednotlivými kusy senzorů se výrazně neliší.

<sup>1</sup> Katalogový list: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

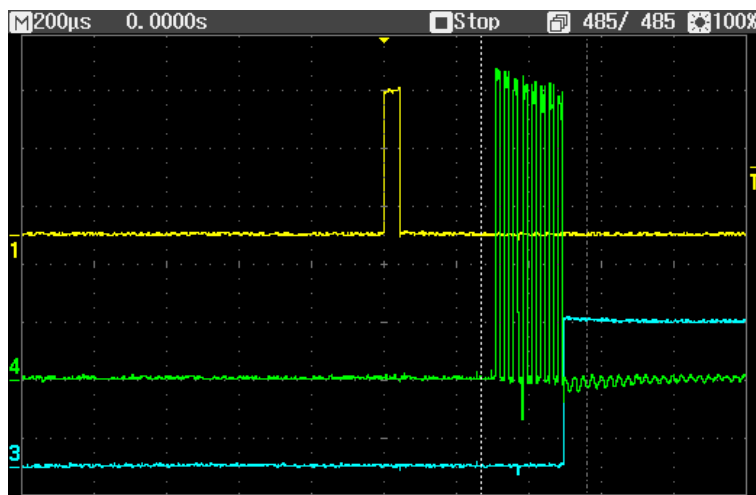


**Obrázek 6.6.** Ultrazvukový senzor HC-SR04 [34]



**Obrázek 6.7.** Úhlová charakteristika senzoru HC-SR04 (zorné pole – Field of view) [35]

Tento snímač má čtyřvodičové zapojení, kromě napájení 5 V DC a zemního vodiče obsahuje také trigovací a echo pin. Po odeslání pulzu o minimální délce 10  $\mu$ s na trigger pin reaguje senzor vysláním osmi 40 kHz ultrazvukovými pulzy. Po odeslání poslední zvukové vlny dojde k nastavení výstupního echo pinu na 5 V (High) a na této hodnotě zůstává až do potvrzení přijmutí osmého odraženého pulzu komparátorem<sup>1</sup> v přijímacím měničci. Poté je echo pin nastaven zpět na zem (Low). Zachycené průběhy signálů na osciloskopu jsou na Obrázcích 6.8 a 6.9.



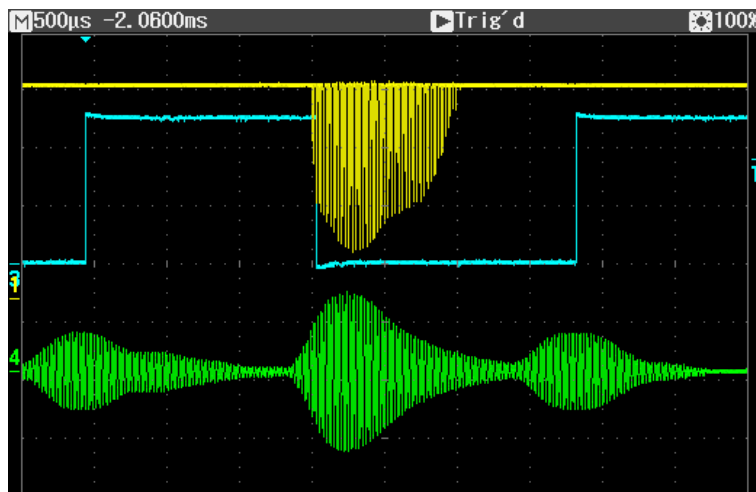
**Obrázek 6.8.** Zachycené signály senzoru HC-SR04 – trigger pin žlutě (2 V/dílek), echo pin modře (2 V/dílek), vyslání 8 pulzů do vysílacího měniče zeleně (odeslání ultrazvukových vln – 1 V/dílek).

Vzdálenost předmětu od senzoru je úměrná délce signálu na echo pinu podle vzorce

$$d = v \frac{t}{2} = 340 \frac{t}{2} = 170t \text{ [m]}, \quad (2)$$

kde  $d$  je vzdálenost předmětu od senzoru v metrech,  $v$  je rychlost šíření zvuku v prostředí (pro vzduch platí přibližně  $v = 340 \text{ m/s}$ ) a  $t$  je doba trvání echo pinu ve stavu High v sekundách (odpovídá době šíření vlny od snímače k překážce a zpět, proto je

<sup>1</sup> Schéma zapojení senzoru HC-SR04: [http://www.pcserviceselectronics.co.uk/arduino/Ultrasoni c/HC-SR04-cct.png](http://www.pcserviceselectronics.co.uk/arduino/Ultrasoni%20c/HC-SR04-cct.png)



**Obrázek 6.9.** Zachycené signály senzoru HC-SR04 – echo pin modře (2 V/dílek), výstupní signál z přijímacího měniče zeleně (přijaté ultrazvukové vlny – 0,5 V/dílek), výstup komparátoru žlutě (1 V/dílek).

nutné dělit dvěma). Pro měření vzdáleností v centimetrech a stopování času v mikrosekundách upravíme rovnici do tvaru

$$d_{cm} = 17000t = 17000 \cdot 10^{-6}t_{\mu s} = 0,017t_{\mu s} \approx \frac{t_{\mu s}}{58,8} [cm], \quad (3)$$

kde  $d_{cm}$  je vzdálenost předmětu od senzoru v centimetrech a  $t_{\mu s}$  je doba trvání echo pinu ve stavu High v mikrosekundách.

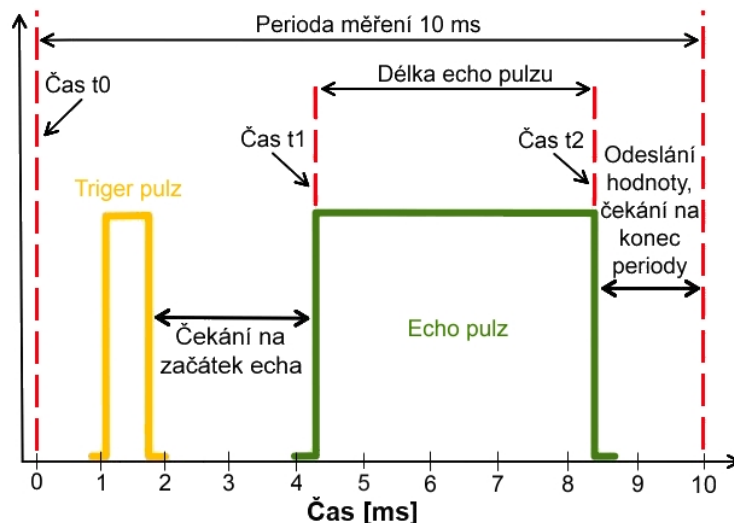
### 6.2.1 Softwarové řízení senzoru

Softwarové řízení tohoto senzoru pomocí Arduino UNO<sup>1</sup> či desky STM32 Black Pill<sup>2</sup> je poměrně jednoduché, časovací diagram běhu programu je znázorněn na Obrázku 6.10. Po spuštění a inicializaci programu se nejprve uloží hodnota interního času kontroléru  $t1$  v  $\mu s$  jako začátek periody, která je ukončena po uběhnutí času  $t0$  plus 10 ms. Po začátku periody je vyslán 20  $\mu s$  dlouhý pulz na trigger pin. Následně se čeká na náběžnou hranu signálu na echo pinu, v okamžiku jejího příchodu se uloží hodnota času  $t1$  v  $\mu s$  (čas od spuštění programu). Při sestupné hraně na echo pinu se opět zaznamená aktuální hodnota času  $t2$ . Z rozdílu těchto dvou časů  $t2-t1$  se určí podle Rovnice (3) vzdálenost senzoru od překážky. Čas po 9. ms periody je vyhrazen pro odeslání měřené hodnoty a v případě potřeby na reset senzoru. Vypočtená hodnota se odesílá pomocí UART sériové linky do počítače rychlostí 2 Mbit/s, kde je zaznamenána a/nebo vykreslena do grafu.

Tato část kódu se následně periodicky opakuje v nekonečném cyklu, jehož délka je nastavena na 10 ms (tedy snímáme s frekvencí 100 Hz). Předpokládáme zde, že překážka leží od snímače dostatečně blízko na to, aby v každé periodě vždy přišla sestupná hranu na echo pinu. Pokud z nějakého důvodu nepřijde včas (překážka je dále, vlna se od ní odrazila úplně pryč atd.), tak musíme senzor vyresetovat tím, že na pár  $\mu s$  vypneme napájení snímače. Jinak by se stalo, že by echo signál z jednoho cyklu přešel do následujícího cyklu a senzor by nereagoval na nový trigger signál.

<sup>1</sup> <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

<sup>2</sup> <https://stm32-base.org/boards/STM32F103C8T6-Black-Pill.html>



**Obrázek 6.10.** Časovací diagram běhu programu pro měření s ultrazvukovým senzorem. Čas na ose x je pouze ilustrativní.

Při uvažované vzdálenosti senzoru umístěného na podvozku vlaku od kolejového svršku do 50 cm, jehož doba echo signálu odpovídá necelým 3 ms, lze dosáhnout maximální snímací frekvence kolem 330 Hz. Při této hraniční frekvenci je ale senzor už více zašuměný, proto zde byla při měření použita menší snímací frekvence.

### 6.2.2 Chyby senzoru

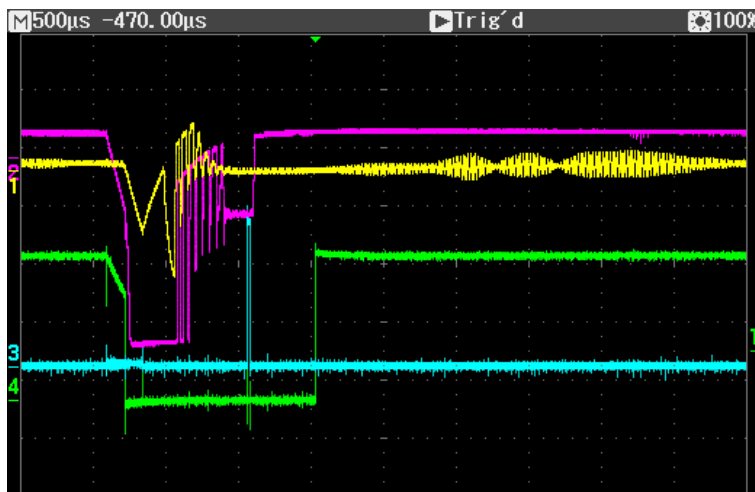
Jak bylo zmíněno výše, v případě špatného odrazu čeká stále senzor na odražený signál, který ale nepřichází nebo ho komparátor nedokáže správně detekovat. Automatické ukončení echo signálu v případě nedetekování překážky proběhne až po 38 ms, což je nepoužitelné pro snímání s frekvencí 100 Hz. Senzor je nutné před koncem 10 ms cyklu nějakým způsobem vyresetovat, v tomto případě byl proveden reset vypnutím napájení snímače na 250  $\mu$ s. K tomuto účelu je v cyklu využít čas po 9. ms, pokud tedy do 9 ms od začátku cyklu neskončí echo signál na hodnotě Low, tak se přistoupí k vypnutí napájení senzoru a na sériovou linku je poslána hodnota indikující chybový stav. Průběh jednotlivých signálů při resetování senzoru je zachycen na Obrázku 6.11.

Po opětovném spuštění napájení je senzor prakticky ihned schopen reagovat na nový trigger signál, k výpadku měřené hodnoty dochází tedy pouze v rámci jedné periody.

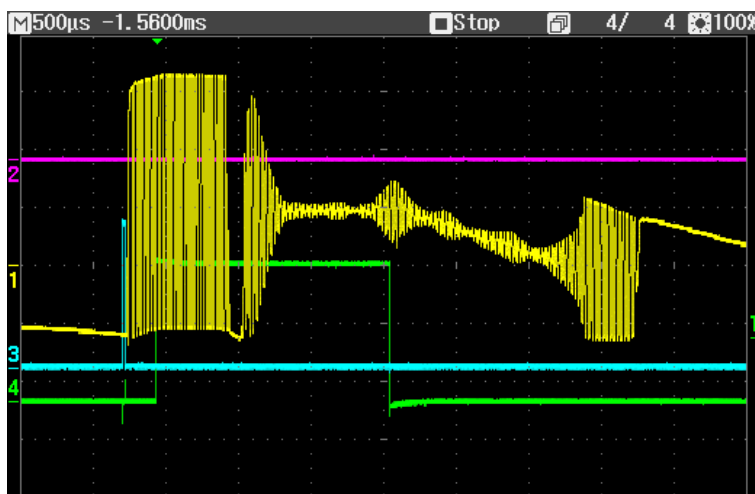
Druhým možným chybovým stavem ultrazvukového senzoru je, že senzor (komparátor) zareaguje na nějakou cizí ultrazvukovou vlnu než na tu, která patří k aktuálně vyslanému signálu. Může se například jednat o opožděný anebo mnohonásobný odraz z minulého cyklu od (vzdálenější) překážky (čím větší snímací frekvence, tím je k tomu snímač náchylnější). V tomto případě dojde k přepnutí echo signálu do hodnoty Low příliš brzy, předmět se bude jevit v bližší vzdálenosti než v jaké ve skutečnosti je. Jednoduše detekovat, že k této chybě došlo, není bohužel možné. V následném zpracování dat je však částečně možné tyto chybové hodnoty vyfiltrovat. Průběhy signálů pro popsany chybový stav jsou zachyceny na Obrázku 6.12.

### 6.2.3 Měření s jedním senzorem

Nejprve bylo v laboratoři provedeno měření s jedním ultrazvukovým senzorem, který byl umístěn na lineární posuvník E-MY2H do základní výšky 30 cm nad povrch stolu. Snímač byl na posuvníku upevněn tak, aby se pohyboval rovnoběžně s kolejnicí přímo



**Obrázek 6.11.** Zachycené signály senzoru HC-SR04 v případě vyresetování senzoru – napájení senzoru fialově (1 V/dílek), výstupní signál z přijímacího měniče žlutě (přijaté ultrazvukové vlny – 0,1 V/dílek), echo pin zeleně (2 V/dílek), trigger pin modře (2 V/dílek).



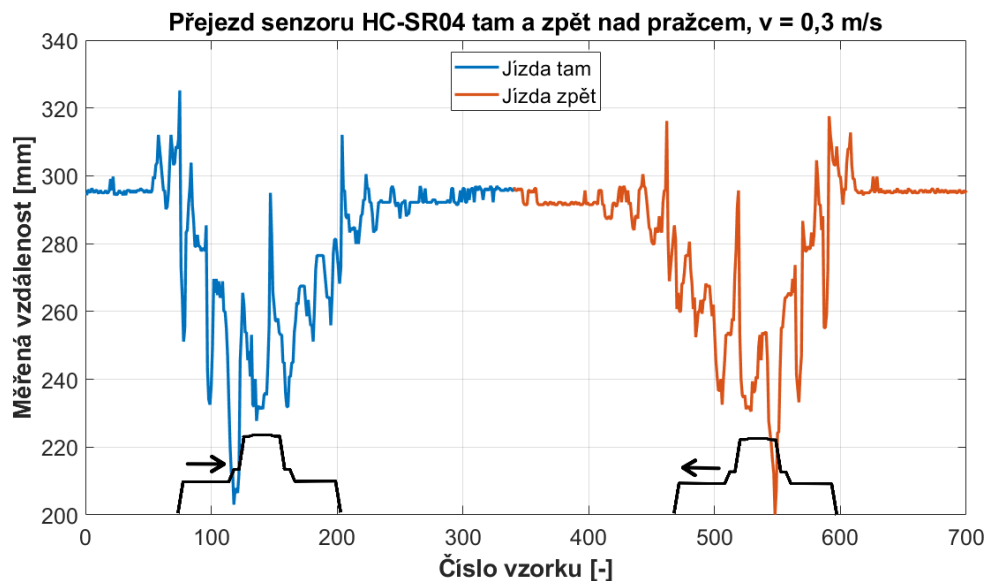
**Obrázek 6.12.** Zachycené signály senzoru HC-SR04 v případě reakce na cizí ultrazvukovou vlnu – napájení fialově (1 V/dílek), výstupní signál z přijímacího měniče žlutě (přijaté ultrazvukové vlny – 0,1 V/dílek), echo pin zeleně (2 V/dílek), trigger pin modře (2 V/dílek). Komparátor zde zareagoval na zvukový signál příliš brzy, správně měl nastavit zelený echo pin na Low až později zhruba po dvakrát delším čase, kdy dorazila skutečná odezva na vyslaný signál.

nad matkou, kterou je upevněna svěrka (viz Obrázek 6.2). Zdrojový kód softwaru této části pro řízení Arduina napsaný v Arduino IDE<sup>1</sup> je v Příloze A.

Zachycený průjezd senzoru nad pražcem tam a zpět rychlostí 0,3 m/s vidíme na Obrázku 6.13. Senzor je nejprve v klidu, poté se rozjede a přejede nad svěrkou na konec posuvníku (modrý průběh), zde je opět chvíli v klidu a nakonec se rozjede a projede nad svěrkou v opačném směru (oranžový průběh).

Na obrázku vidíme, že snímač při průjezdu nad upevněním k pražci nedokáže měřit přesně profil podkladnice a svěrky s matkou. Dochází zde k různým falešným odrazům ultrazvukových vln, které toto způsobují (hlavně v místech, kde se skokově mění výška

<sup>1</sup> <https://www.arduino.cc/en/software>



**Obrázek 6.13.** Přejezd ultrazvukového senzoru tam a zpět nad upevněním kolejnice k pražci rychlostí 0,3 m/s. Černou barvou je v grafu naznačen měřený profil upevnění (není v měřítku).

měřeného profilu). Další nepřesnost je dána tím, že senzor vždy snímá nějakou plochu danou jeho zorným úhlem a „průměruje“ její vzdálenost od senzoru.

Z grafu je ale patrné, že si jsou oba průběhy zrcadlově velmi podobné. Falešné odrazy jsou replikovatelné, což je důležité zjištění pro následné použití korelace. Pokud by nebyly oba průběhy přibližně zrcadlově symetrické a obsahovaly by různý náhodný šum, bylo by následné použití korelace k určení rychlosti velmi nepřesné až zcela nemožné.

Následně byly naměřeny čtyři sady dat přejezdů nad upevněním pražce s jedním ultrazvukovým senzorem, každá sada obsahuje zachycený přejezd tam a zpět pětkrát. Po zachycení byla data načtena a analyzována v programu *Matlab*, kde byla nejprve sada dat rozdělena na jednotlivé úseky přejezdů tak, aby jejich vzájemná korelace v daném směru jízdy byla nulová ( $\tau_{max} = 0$ ). Poté byly tyto úseky samostatně znormovány (od všech hodnot úseku se odečetla jejich průměrná hodnota). Z těch upravených dat se následně spočítaly korelační koeficienty  $\rho(X, Y)$  mezi každými dvěma přejezdy v daném směru jízdy. Výstupy z této analýzy jsou zachyceny v Tabulce 6.1.

Data	Rychlost [m/s]	$\rho(X, Y)$ [-] – směr tam			$\rho(X, Y)$ [-] – směr zpět		
		max	min	průměr	max	min	průměr
1. soubor	0,3	0,99	0,98	0,99	0,99	0,96	0,98
2. soubor	0,3	0,98	0,95	0,97	0,99	0,96	0,97
3. soubor	1	0,99	0,95	0,97	0,99	0,93	0,96
4. soubor	1	0,99	0,96	0,98	0,99	0,94	0,97

**Tabulka 6.1.** Přehled korelačních koeficientů  $\rho(X, Y)$  z naměřených dat jedním ultrazvukovým senzorem. Každý soubor dat obsahuje zaznamenaných 5 přejezdů nad pražcem směrem tam a 5 směrem zpět. Korelační koeficient je pro každý směr počítán pro všechny možné dvojice pěti zachycených přejezdů, průměr je tedy počítán z 10 hodnot.

Z tabulky vyplývá, že jednotlivé průběhy signálů při přejezdu nad pražcem jsou dobře replikovatelné, jednotlivé signály si jsou z 93 až 99 % podobné. Podobnost mezi signály nijak výrazně neklesá ani se zvyšující se rychlostí jízdy, kdy je při stejné snímací frekvenci upevnění navzorkováno méně vzorky než při nižší rychlosti.



### 6.2.4 Měření se dvěma senzory

Měření se dvěma ultrazvukovými senzory probíhá podobně jako s jedním senzorem, jen potřebujeme odečítat a odesílat více hodnot zároveň. Snímače byly opět umístěny na lineární posuvník do základní výšky 30 cm nad povrchem stolu. Senzory byly upevněny na společné desce 12 cm za sebou ve směru pohybu tak, aby projížděly nad matkou, kterou je upevněna svěrka.

Při řízení těchto senzorů potřebujeme synchronizovaně trigrovat a odečítat hodnoty ze dvou ultrazvukových snímačů. Nejprve se odešle společný 20  $\mu$ s dlouhý trigger pulz, kterým se na senzorech spustí měření. Po odeslání 8 ultrazvukových pulzů každým senzorem nastaví každý senzor výstupní echo pin na hodnotu High. Tento pin je přiveden na vstupní pin desky BlackPill<sup>1</sup> pro každý snímač zvlášť. Na každou náběžnou hranu napětí na těchto pinech reaguje BlackPill interruptem, ve kterém se do proměnné uloží aktuální hodnota interních hodin čipu.

Ve chvíli, kdy se výstupní echo pin nastaví na zem (Low), reaguje BlackPill znovu interruptem, ve kterém si opět uloží aktuální hodnotu hodin. To se provede nezávisle u obou ultrazvukových senzorů, každý senzor začne měřit v trochu jinou dobu a každý snímač bude měřit v jiném místě s jinou dobou odezvy. Odečtením těchto dvou hodnot z každého senzoru zvlášť se získají dvě doby trvání echo pulzu, které se po vydělení konstantou dle Rovnice (3) odesílají jako vzdálenosti oddělené mezerou sériovou linkou do počítače rychlostí 2 Mbit/s. Volání v nekonečném cyklu a resetování snímače je řešeno stejně jako bylo popsáno výše pro jeden senzor.

Bohužel kvůli velikosti lineárního posuvníku E-MY2H, který má na délku pouze 30 cm, nebylo možné v laboratorních podmínkách umístit od sebe senzory na větší vzdálenost, než je 12 cm (při zachování podmínky, že oba přejezdou nad celým uchycením kolejnice k pražci). Při takto blízko u sebe umístěných snímačích dochází bohužel k jejich vzájemnému ovlivňování a rušení. Tyto nežádoucí jevy jsou zachyceny při průjezdu senzorů tam a zpět nad pražcem na Obrázku 6.14.

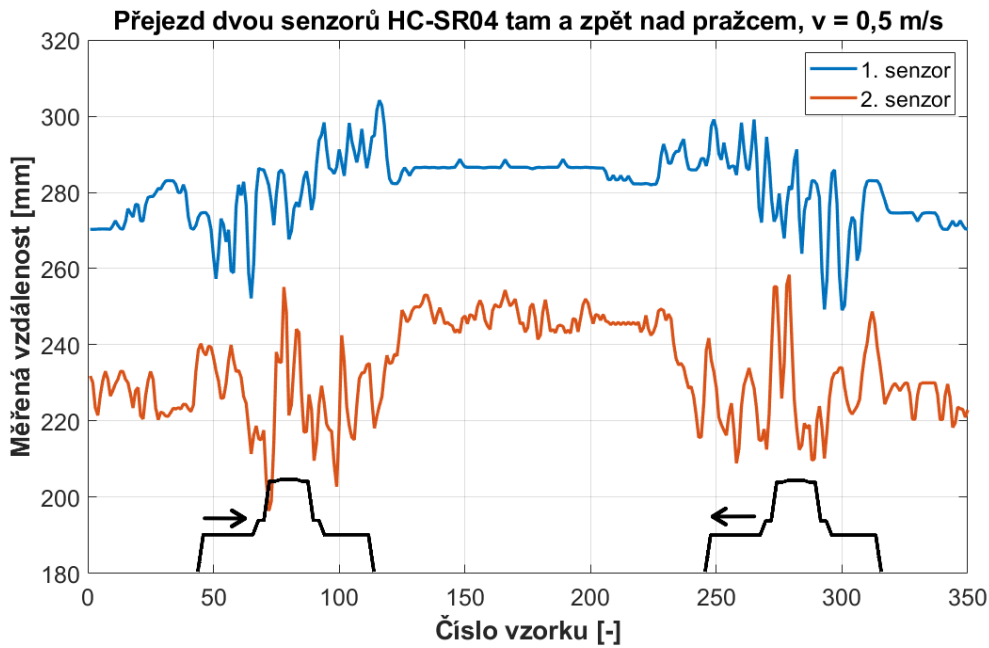
Na obrázku vidíme výstupní signály ze dvou za sebou umístěných snímačů. Přestože jsou oba senzory ve stejné výšce nad stolem, vidíme, že měřená vzdálenost druhého senzoru je posunut zhruba o 40 mm níže než první senzor. Výstupní signál průjezdu dvou senzorů nad pražcem se také výrazně liší od průjezdu jediného senzoru (viz srovnání s Obrázkem 6.13). Oba snímače jsou navíc více zašuměné.

To je dáno právě vzájemným ovlivňováním senzorů, pokud jsme zkusili snímače oddálit od sebe více, rušení přestalo a oba senzory měřily podobně stabilně a přesně. Nicméně i tak je z obrázku patrné, že v levé polovině obrázku modrý signál předbíhá oranžový signál a v pravé polovině je to naopak (kvůli přejezdu v opačném směru). Bohužel z důvodů uvedených výše nebylo možné při laboratorním měření umístit snímače dále od sebe, proto následující měření byla provedena se senzory blízko u sebe. I v této konfiguraci je ale viditelný posun mezi jednotlivými signály.

Při použití v praxi mohou být od sebe snímače dostatečně daleko na to, aby k vzájemnému ovlivňování nedocházelo. Navíc už jen samotné zvětšení vzdálenosti senzorů od sebe zvyšuje přesnost korelace jako takové. Další možností eliminace vzájemného rušení by bylo vytvoření ochranných „kuželů“ z pevného materiálu kolem každého senzoru tak, aby se odstínila nežádoucí ultrazvukové signály z cizích směrů.

Následně byla provedena série pěti měření přejezdů dvojice senzorů nad uchycením koleje k pražci při dvou rychlostech přejezdu – 0,5 m/s a 1 m/s. Zachycená data byla poté opět načtena do programu *Matlab*. Nejprve byly v datech detekovány nesmyslně

<sup>1</sup> Zde byla použita deska BlackPill kvůli rychlejšímu hodinovému cyklu a tím pádem rychlejšímu vykonávání instrukcí – BlackPill STM32 má rychlost hodin 72 MHz, Arduino UNO pouhých 16 MHz.

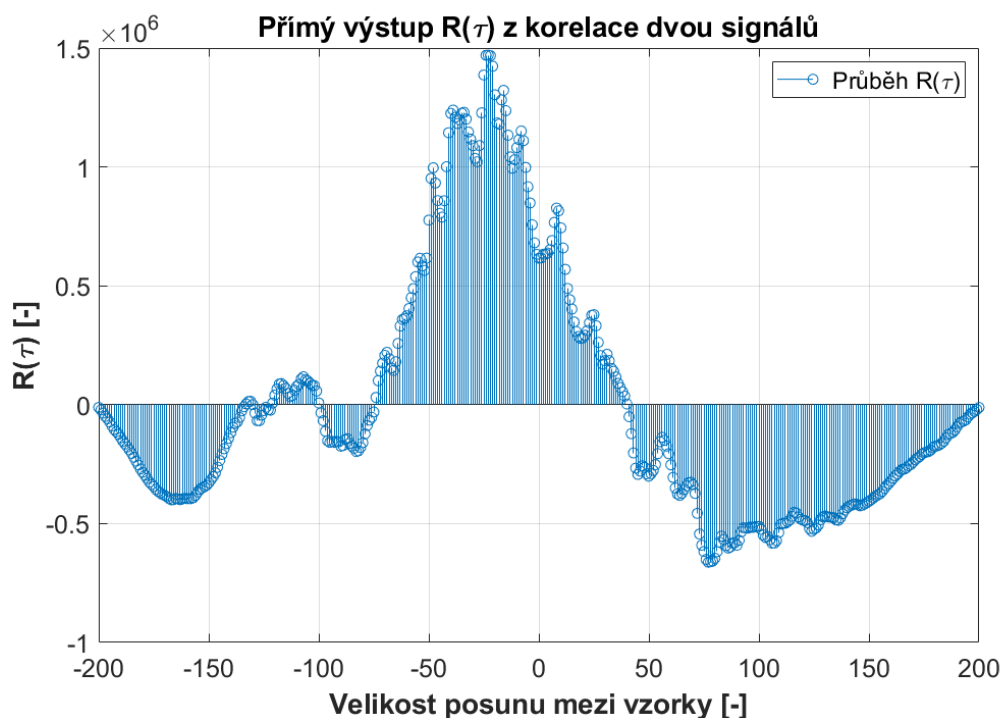


**Obrázek 6.14.** Přejezd dvou ultrazvukových senzorů umístěných 12 cm za sebou rychlostí 0,5 m/s tam a zpět nad upevněním kolejnice k pražci. Černou barvou je v grafu naznačen měřený profil upevnění (není v měřítku).

vychýlené body (outliers), které pochází z chyb snímačů a ty byly následně nahrazeny průměrnou hodnotou dané sady dat. Dále se od signálu z každého senzoru odečetla jeho průměrná hodnota (znormování dat). Nad těmito upravenými sadami dat se následně provedla korelace, jejíž výstupem je počet vzorků, o kolik je jedna sada posunuta oproti druhé (viz Obrázek 6.15). Z toho následně určíme při znalosti vzdálenosti senzorů od sebe a snímací frekvence rychlost, s jakou se senzory pohybují. Vypočítané hodnoty rychlostí pomocí korelace jsou v Tabulce 6.2.

Skutečná rychlost [m/s]	Pořadí	Výstup korelace: rychlost [m/s]	
		Tam	Zpět
0,5	1	0,36	-0,30
	2	0,48	-0,30
	3	0,50	-0,39
	4	0,50	-0,44
	5	0,50	-0,30
1	1	0,52	-0,43
	2	0,52	-0,24
	3	0,75	-0,34
	4	0,75	-0,35
	5	0,52	-0,36

**Tabulka 6.2.** Vypočítaná rychlost z korelace signálů ze dvou senzorů při dvou rychlostech přejezdu nad pražcem. Znaménko u rychlosti je také výstupem z korelace – směrem tam je brána rychlost v kladném smyslu (první senzor předbíhá druhý), v opačném směru v záporném smyslu (druhý senzor předbíhá první).



**Obrázek 6.15.** Průběh  $R(\tau)$  při korelaci dvou signálů. Souřadnice  $x$  maximální hodnoty  $R(\tau)$  odpovídá počtu vzorků, o kolik jsou jednotlivé signály posunuté.

Z tabulky vyplývá, že korelace dokáže spolehlivě rozlišit směr pohybu. Přesnost určení konkrétní rychlosti není velká, nicméně řádově si hodnoty rychlostí odpovídají. Nejsou ve výsledcích žádné nesmyslně vysoké ani nesmyslně nízké hodnoty, korelace dokáže i u ne úplně optimálně zapojených snímačů řádově přesně určit jejich časové zpoždění. Za skutečnou rychlost je zde navíc brána hodnota nastavená na posuvníku, která nebyla nijak ověřována. Na začátku pohybu posuvníku dochází ke zrychlování pohybu z nuly na nastavenou hodnotu a ke konci naopak k brzdění, což může mít vliv u takto krátkého posuvníku na výsledky měření.

## 6.3 Optický senzor

V této části byly provedeny experimenty s optickým senzorem, konkrétně se senzorem TF Mini-S<sup>1</sup> od firmy Benewake (Obrázek 6.16) – se stejným senzorem, který byl použit v simulaci v Kápitole 5.3. Vybrán byl pro svou příznivou cenu, vysokou snímací frekvenci a přesvědčivé výsledky v simulační části. Přestože je z obchodních důvodů označován jako LiDAR (Light Detection And Ranging) snímač, nepoužívá laser k určování vzdálenosti. Obsahuje pouze infračervenou LED a příslušnou optiku, vzdálenost určuje podle doby letu světelného paprsku v jednom bodě – jedná se tedy o Time of flight senzor. Jeho rozměry jsou 45 x 15 x 16 mm, jde o malý optický snímač.

Rozsah měření tohoto snímače je od 10 cm do 12 m (při 90% odrazivosti překážky) s rozlišením 1 cm, maximální nastavitelná snímací frekvence je 1 000 Hz. Zorný úhel senzoru jsou 2°, při vzdálenosti 40 cm má tedy snímaný kruh poloměr 0,7 cm. Maximální odebíraný proud je 200 mA (při měření na velké vzdálenosti), obvyklý kolem 50 mA.

<sup>1</sup> Katalogový list: [https://cdn.sparkfun.com/assets/8/a/f/a/c/16977-TFMini-S\\_-\\_Micro\\_LiDAR\\_Module-Product\\_Manual.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/8/a/f/a/c/16977-TFMini-S_-_Micro_LiDAR_Module-Product_Manual.pdf)



**Obrázek 6.16.** Optický senzor TF Mini-S [36]

Jeden kus tohoto senzoru stojí kolem 1 000 Kč. Změřená statická směrodatná odchylka měření tohoto senzoru z 120 tisíc vzorků při snámací frekvenci 1 000 Hz na vzdálenost 40 cm dosahuje 0,1 cm.

Snímač je napájen 5 V DC a s okolím komunikuje sériově pomocí UART sběrnice (případně I2C sběrnice). Nastavení senzoru (nastavení snímací frekvence, sběrnice apod.) probíhá pomocí přesně definovaných příkazů (posloupností znaků) v manuálu přes sériovou linku, přes kterou jsou i čteny aktuální hodnoty měřené vzdálenosti.

Senzor byl řízen pomocí STM32 Black Pill se specializovanou knihovnou<sup>1</sup> pro jednoduché ovládání tohoto snímače. Black Pill na rozdíl od Arduino Uno disponuje více než jedním hardwarovým sériovým rozhraním (Arduino sice obsahuje druhé softwarové rozhraní, jeho přenosová rychlost je však omezená), proto byla provedena měření s ním. Po spuštění napájení senzoru a inicializaci sériové komunikace byl snímač nastaven na práci při snímací frekvenci 1 000 Hz a posílání hodnot v milimetrech. V Black Pillu byly vyčítány naměřené hodnoty ze sériové linky od senzoru a následně přeposílány přes druhou sériovou linku do počítače, kde byly zaznamenávány a vykreslovány do grafu.

### ■ 6.3.1 Měření s jedním senzorem

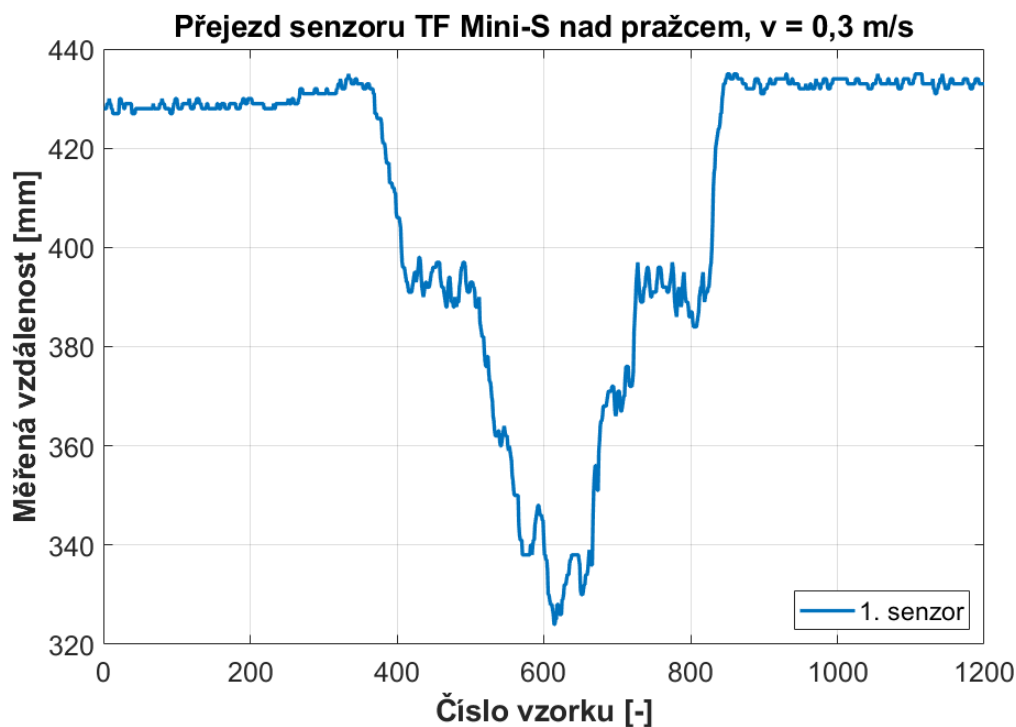
Nejdříve bylo opět provedeno měření s jedním optickým senzorem, který byl přidělán na lineární posuvník do výšky 43 cm. TF Mini-S sice dokáže měřit už od 10 cm, ale při malých vzdálenostech je jeho výstup nestabilní a zašuměný, proto byl umístěn výše než ultrazvukový senzor. Přejezd tohoto senzoru nad pražcem s upevněním je zachycen na Obrázku 6.17.

Na obrázku vidíme, že je senzor nejdříve v klidu, poté se na posuvníku rozjede a přejezd nad uchycením pražce. Oproti ultrazvukovému snímači je zaznamenaný profil podkladnice a svěrky s matkou mnohem detailnější a přesnější, nedochází zde k žádným chybným odrazům (jako u ultrazvuku), což je jeden z přínosů optického senzoru. Navíc optický snímač měří s vyšší snímací frekvencí, přejezd máme tedy navzorkován více vzorky.

V zaznamenaném profilu je dokonce patrné, že senzor nejdříve vjede nad podkladnici a chvíli se nad ní pohybuje (měřená vzdálenost kolem 390 mm), následně vjede nad svěrku s matkou (nejmenší měřená vzdálenost) a nakonec zase nad podkladnici (viz Obrázek 6.2 a 6.4).

Následně byly naměřeny čtyři sady dat přejezdů optického senzoru nad upevněním pražce, v každé sadě je zachycen pětkrát přejezd tam a zpět. Po zaznamenaní byla data opět načtena do programu *Matlab* a analyzována stejným způsobem jako u ultrazvuku v Kapitole 6.2.3. Po vypočítání hodnot korelačních koeficientů  $\rho(X, Y)$  mezi každými dvěma přejezdy v daném směru jízdy byl vytvořen výstup v podobě Tabulky 6.3.

<sup>1</sup> <https://github.com/budryerson/TFMini-Plus>



**Obrázek 6.17.** Přejezd optického senzoru TF Mini-S nad upevněním kolejnice k pražci rychlostí 0,3 m/s

Data	Rychlost [m/s]	$\varrho(X, Y)$ [-] – směr tam			$\varrho(X, Y)$ [-] – směr zpět		
		max	min	průměr	max	min	průměr
1. soubor	0,3	0,997	0,996	0,997	0,997	0,994	0,995
2. soubor	0,3	0,997	0,996	0,996	0,997	0,996	0,996
3. soubor	1	0,996	0,995	0,996	0,997	0,995	0,996
4. soubor	1	0,997	0,995	0,996	0,997	0,995	0,996

**Tabulka 6.3.** Přehled korelačních koeficientů  $\varrho(X, Y)$  z naměřených dat optickým senzorem. Každý soubor dat obsahuje zaznamenaných 5 přejezdů nad pražcem směrem tam a 5 směrem zpět. Korelační koeficient je pro každý směr počítán pro všechny možné dvojice pěti zachycených přejezdů, průměr je tedy počítán z 10 hodnot.

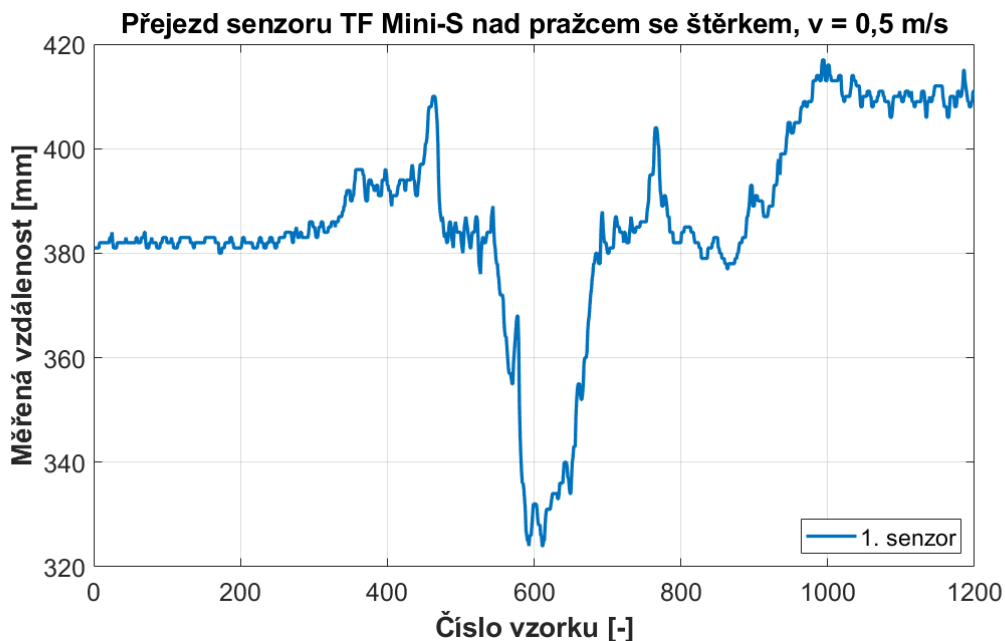
Z tabulky vyplývá, že u optického senzoru je shoda jednotlivých signálů ve všech případech větší než 99 %. Signály si jsou o řád podobnější než v případě ultrazvukových snímačů (což je dáno přesnějším měřením a větší snímací frekvencí). Signály z tohoto optického senzoru se tedy velmi hodí k použití korelace, což se ukázalo už v simulační části.

### 6.3.2 Měření s jedním senzorem se šterkem

V další části byla provedena série podobných měření jako v předešlém případě, pouze byl při tom na stůl kolem upevnění pražce a kolejnice rozsypán šterk simulující skutečné rozmanité podmínky kolem upevnění kolejnice k pražci. Na samotném pražci a uchycení kolejnice v praxi běžně žádné kameny za normálních podmínek nejsou. Zaznamenaný přejezd senzoru nad upevněním v tomto případě vypadá trochu odlišně (viz Obrázek 6.18).

Z obrázku je patrné, že šterk kolem kolejnice má vliv nejen na měření mimo pražec (kde místo rovné desky stolu zaznamenává jednotlivé kameny), ale i na samotný

přejezd nad pražcem. Naměřené hodnoty mimo pražec jsou také posunuty níže, což je dáno právě přítomností kamenů na stole, které zmenšily volný prostor mezi senzorem a povrchem pod ním.



**Obrázek 6.18.** Přejezd optického senzoru TF Mini-S nad upevněním kolejnice k pražci a s kolem umístěným štěrskem rychlostí 0,5 m/s

Opět byla provedena v těchto podmínkách série čtyř měření a výsledky byly analyzovány stejným způsobem jako v předešlých případech. Výsledky jsou zachyceny v Tabulce 6.4.

Data	Rychlost [m/s]	$\rho(X, Y)$ [-] – směr tam			$\rho(X, Y)$ [-] – směr zpět		
		max	min	průměr	max	min	průměr
1. soubor	0,5	0,98	0,63	0,77	0,98	0,64	0,84
2. soubor	0,5	0,95	0,58	0,75	0,97	0,92	0,95
3. soubor	1	0,98	0,81	0,89	0,98	0,82	0,91
4. soubor	1	0,96	0,53	0,80	0,97	0,83	0,89

**Tabulka 6.4.** Přehled korelačních koeficientů  $\rho(X, Y)$  z naměřených dat optickým senzorem s kolem umístěným štěrskem. Každý soubor dat obsahuje zaznamenaných 5 přejezdů nad pražcem směrem tam a 5 směrem zpět. Korelační koeficient je pro každý směr počítán pro všechny možné dvojice pěti zachycených přejezdů, průměr je tedy počítán z 10 hodnot.

Z tabulky vyplývá, že se zasypáním okolí kolejnice štěrskem snížila podobnost mezi jednotlivými signály, senzor měří na nerovném povrchu (i díky nenulové měřené optické stopě) více náhodně. Pořád je ale v naměřeném profilu velmi výrazně patrné místo, kde se přejíždí nad pražcem a i tyto signály jsou díky tomu pro korelaci vhodné.

Kvůli vyšší ceně optického senzoru a omezenému přístupu do laboratoře během pandemie covid-19 nebylo bohužel realizováno měření se dvěma optickými senzory TF Mini-S za sebou, mezi nimiž by mohla být přímo počítána rychlost pomocí korelace. U optických snímačů díky svému principu měření a malému zornému úhlu nebude docházet k vzájemnému ovlivňování senzorů, jako to bylo pozorováno u ultrazvukových snímačů.

## 6.4 Shrnutí výsledků

Měření s magnetickými senzory bylo realizováno pouze se senzorem indukčnosti LDC1000EVM, který se ukázal jako nepoužitelný pro korelační měření. Modul vytváří pouze slabé elektromagnetické pole, není určen pro měření na vzdálenosti ve vyšších jednotkách centimetrů, vyzářený výkon je příliš malý. Oproti tomu diferenciální senzor vířivých proudů vytváří dostatečně silné magnetické pole, jeho konstrukce je ale mohutná, těžká a při provozu spotřebovává mnoho energie. V rámci této práce senzor vířivých proudů sestaven a testován nebyl, jeho realizace a výsledky jsou detailně popsány v [18] a [22]. Z uvedených prací vyplývá, že tyto snímače je možné použít pro korelační měření rychlosti vlaku.

Ultrazvukový senzor pro měření vzdálenosti HC-SR04 je malý levný ultrazvukový snímač s malým zorným úhlem (mezi ultrazvuky). Při měření s ním docházelo k různým chybovým stavům (díky špatným odrazům ultrazvukových vln od překážek). Ze stejného důvodu neodpovídá měřený profil přejezdu nad upevněním skutečnosti, chyby jsou však dobře replikovatelné, takže nepředstavují pro korelační měření větší překážku. Statická směrodatná odchylka měření tohoto senzoru je 0,2 cm.

Při měření s jedním ultrazvukovým senzorem si byly jednotlivé měřené signály z 93 až 99 % podobné (a tím pádem dobře korelovatelné). Následné měření se dvěma stejnými senzory zároveň ukázalo, že dochází bohužel při umístění snímačů blízko sebe k jejich vzájemnému ovlivňování, v použité laboratorní sestavě je nebylo možné umístit dále od sebe. I tak jsme ale ověřili základní funkčnost měření rychlosti pomocí korelace s těmito senzory – dokázali jsme spolehlivě rozlišit směr pohybu a řádově přesně i rychlost pohybu, nedostali jsme žádné nesmyslné hodnoty rychlostí. Nicméně pro potvrzení použitelnosti ultrazvukových senzorů pro korelační měření rychlosti vlaku je nutné provést další měření ve vyšších rychlostech (a se šterkem mezi pražci, kde bude více docházet k chybovým odrazům), aby se i zde ověřila jejich funkčnost – nejlépe přímo na vlaku.

Ultrazvukové senzory mají bohužel omezenou maximální snímací frekvenci (kolem 330 Hz) danou rychlostí šíření ultrazvukové vlny, hodí se tedy pro měření při nižších rychlostech jízdy, což stále představuje zdroj pro velké množství aplikací (například v nákladní dopravě). Pro praktické použití by místo snímače HC-SR04 byly vhodnější senzory pracující na vyšší frekvenci ultrazvukového spektra než je 40 kHz (kvůli snížení vlivu vysokofrekvenčního rušení od běžného provozu vlaku) a s co nejmenším zorným úhlem. Podobné senzory o frekvencích ve stovkách kHz se dají pořídit za řádově tisíce korun.

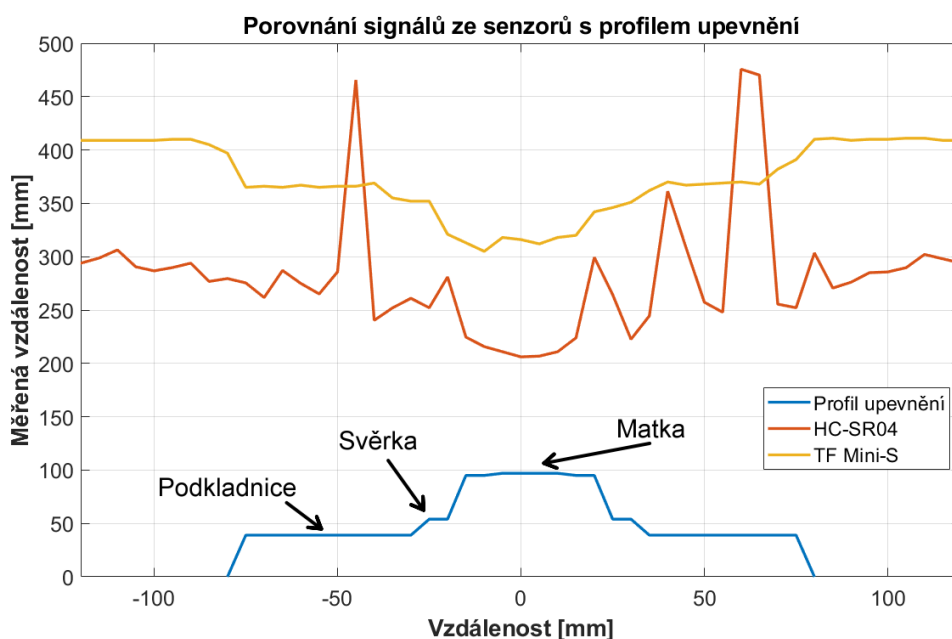
Optický snímač TF Mini-S pracující na principu Time of flight je malý spolehlivý optický snímač s velmi malým zorným úhlem (oproti ultrazvuku i jiným optickým senzorům). Jeho rozlišení dosahuje sice jednoho centimetru, avšak na rozdíl od ultrazvuku měří prakticky bez chybových stavů. Výstupní signál při přejezdu senzoru nad upevněním kolejnice k pražci odpovídá předpokládanému průběhu a i zde je tento signál replikovatelný. Statická směrodatná odchylka měření optického senzoru je 0,1 cm.

Podobnost signálů při měření s jedním snímačem přesáhla ve všech případech 99 %, korelace zde funguje velmi spolehlivě. Následně byly ještě kolem upevnění rozsypány kameny simulující šterk mezi pražci, díky čemuž se snížila podobnost mezi signály na průměrné hodnoty mezi 75 a 95 procenty, korelace s nimi ale stále funguje velmi dobře. I v případě optického senzoru jsme tak ověřili základní funkčnost tohoto snímače pro korelační měření rychlosti vlaku. S optickým senzorem bohužel nebylo provedeno měření se dvěma senzory pro jejich vyšší pořizovací cenu a omezené časové možnosti. Pro potvrzení použitelnosti této metody s optickým senzorem v praxi je třeba v budoucí práci

tato měření doplnit a rovněž s ním realizovat měření ve vyšších rychlostech. Za otestování také stojí optické reflexní senzory, se kterými pro jejich vysokou cenu experimenty provedeny nebyly.

Optické senzory mají vyšší snímací frekvence v jednotkách kHz, dokáží tedy pokrýt i vyšší rychlosti pohybu. Nepochází u nich k vzájemnému rušení při provozu ani k rušení s jinými zařízeními na vlaku a měří vzdálenost spolehlivě. Jedinou velkou nevýhodou je jejich malá odolnost vůči znečištění při provozu.

Na Obrázku 6.19 je porovnání signálu z ultrazvukového a optického senzoru při přejezdu nad upevněním kolejnice k pražci. Měření bylo provedeno staticky, hodnoty byly odečítány po 5 mm na ose x se senzorem v klidu. Ultrazvukový senzor HC-SR04 byl umístěn do základní výšky 30 cm nad desku stolu, optický senzor TF Mini-S do výšky 42 cm.



**Obrázek 6.19.** Porovnání signálů z optického a ultrazvukového senzoru s profilem upevnění kolejnice k pražci.

Z porovnání vychází lépe optický senzor – dosahuje vyšších snímacích frekvencí, vykazuje téměř nulovou chybovost a jeho výstupy jsou lépe replikovatelné. Nevýhodou je jeho o něco vyšší cena a menší odolnost vůči znečištění.



# Kapitola 7

## Závěr

V úvodu bakalářské práce jsou popsány současné metody měření polohy a rychlosti vlaku na železnici, které pro náročnější aplikace vykazují vysoké chybovosti a nepřesnosti (nebo pro správnou funkci vyžadují komunikaci se stacionární železniční infrastrukturou). Přitom znalost přesné rychlosti a polohy vlaku v každém časovém okamžiku je základní informací pro bezpečné, spolehlivé a optimální řízení provozu na železnici. Hlavním cílem práce bylo prozkoumat a ověřit možnosti bezkontaktního měření rychlosti kolejového vozidla pomocí korelační metody s cenově dostupnými senzory umístěnými na vozidle.

Nejprve byla provedena rešerše současných pokusů o korelační měření rychlosti vlaku pomocí nejrůznějších snímačů – optických, ultrazvukových, magnetických či inerciálních. Přestože velké množství prací na toto téma přináší slibné výsledky, žádná z těchto korelačních metod nedosáhla dosud velkého uvedení do praxe. Okrajově byly zkoumány i senzory rychlosti pracující na principu Dopplerova jevu, které naopak své uplatnění našly jako součást odometrie (nejen) evropského vlakového zabezpečovače.

Pro ověření funkčnosti korelace byl vytvořen simulátor jízdy vlaku po kolejích. Do simulace byly následně dosazeny parametry skutečných senzorů vzdálenosti, které při jízdě měřily profil kolejového svršku mezi kolejemi. Simulací bylo potvrzeno, že korelační měření rychlosti vlaku pomocí senzorů vzdálenosti je možné provádět. Klíčovým parametrem pro přesnost tohoto měření i ve vyšších rychlostech jízdy je vysoká snímací frekvence snímačů, ideálně kHz a více.

V další části práce bylo provedeno laboratorní měření s magnetickým, ultrazvukovým a optickým senzorem. U zkonstruovaného magnetického senzoru se ukázalo, že je pro svůj malý výkon pro korelační měření nepoužitelný. Ultrazvukovým a optickým senzorem vzdálenosti byl při pomalém přejezdu snímán profil upevnění kolejnice k pražci – podkladnice a svěrky s matkou.

Ultrazvukový senzor vykazoval sice poměrně mnoho chybových stavů (ve kterých měřil nesmyslné hodnoty vzdálenosti), tyto stavy však byly dobře replikovatelné, takže nepředstavují velký problém pro korelaci. Jednotlivé měřené profily byly mezi sebou velmi podobné. Při měření se dvěma ultrazvukovými snímači docházelo mezi nimi k vzájemnému ovlivňování měření, avšak i tak bylo možné se signály provést korelaci, výsledkem které byla řádově přesná hodnota rychlosti. Ultrazvukové senzory z principu své funkce ale bohužel nemůžou dosáhnout vyšších snímacích frekvencí než je zhruba 330 Hz, rychlost šíření zvuku je malá. Najdou tedy uplatnění při nižších rychlostech pohybu.

S optickým snímačem pracujícím na principu Time of flight bylo dosaženo spolehlivějšího a rychlejšího měření bez chybových stavů. Měřené profily upevnění byly mezi sebou prakticky identické, korelace díky tomu poskytovala jednoznačné výsledky. Při měření se šterkem kolem upevnění pražce vykazovaly měřené signály větší odchylky mezi sebou, stále je ale korelace dokázala potlačit. Zde bohužel nebylo realizováno měření se dvěma optickými senzory pro jejich vyšší cenu. Pro svou vyšší snímací frekvenci a přesnější a spolehlivější měření poskytuje optický senzor lepší výsledky než ultrazvukový snímač.

V rámci simulační části i při měření v laboratoři bylo ověřeno, že je možné provádět korelační měření se senzory s cenami v řádu tisíců korun. Všechny hlavní body zadání bakalářské práce byly splněny.

V budoucí práci během dalšího studia či v zaměstnání by bylo vhodné provést měření s vybranými senzory (včetně reflexních) i při vyšších rychlostech pohybu, aby byla ověřena funkčnost korelace na celém potřebném rozsahu měření. Dále by bylo potřeba provést měření v reálných podmínkách se štěrkem mezi pražci – ideálně přímo na vlaku. Samostatnou výzvu představuje sestavení a otestování v provozu vlastního magnetického senzoru vířivých proudů, stejně jako sestavení měřící jednotky analyzující měřená data a poskytující aktuální rychlost v reálném čase.

## Literatura

- [1] MEI, T.X. a H. LI. Measurement of Absolute Vehicle Speed With a Simplified Inverse Model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2010, **59**(3), 1164-1171 [cit. 2021-8-10]. ISSN 0018-9545. Dostupné z: doi: 10.1109/TVT.2010.2040199
- [2] KAČMAŘÍK, Petr, Lubor BAŽANT, Karel VESELÝ, Michal PAVEL a Peter GURNÍK. *Družicová navigace pro bezpečnou lokalizaci vlaků* [online]. Praha: Vědeckotechnický sborník ČD, 2019 [cit. 2021-8-10]. 47/2019. ISSN 1214-9047. Dostupné z: [https://vts.cd.cz/documents/168518/233051/03\\_4719\\_Kacmarik%2C+Bazant%2C+Vesely%2C+Pavel%2C+Gurnik\\_Druzicova+navigace+pro+bezpecnou+lokalizaci+vlaku\\_kor.pdf/3fb2a83e-4532-46d4-874a-c8c5b30d2eef](https://vts.cd.cz/documents/168518/233051/03_4719_Kacmarik%2C+Bazant%2C+Vesely%2C+Pavel%2C+Gurnik_Druzicova+navigace+pro+bezpecnou+lokalizaci+vlaku_kor.pdf/3fb2a83e-4532-46d4-874a-c8c5b30d2eef)
- [3] ERTMS/ETCS: Performance Requirements for Interoperability. *European Railway Agency - ERA* [online]. European Railway Agency - ERA, c2018, 17. 12. 2015 [cit. 2021-8-7]. Dostupné z: [https://www.era.europa.eu/sites/default/files/file/esystem/ertms/ccs\\_tsi\\_annex\\_a\\_-\\_mandatory\\_specifications/set\\_of\\_specifications\\_3\\_etcs\\_b3\\_r2\\_gsm-r\\_b1/index014\\_-\\_subset-041\\_v320.pdf](https://www.era.europa.eu/sites/default/files/file/esystem/ertms/ccs_tsi_annex_a_-_mandatory_specifications/set_of_specifications_3_etcs_b3_r2_gsm-r_b1/index014_-_subset-041_v320.pdf)
- [4] RDG Guidance Note ETCS On-Board Equipment. In: *Rail Delivery Group* [online]. Londýn: Rail Delivery Group, 2017 [cit. 2021-8-10]. Dostupné z: <https://www.raildeliverygroup.com/media-centre-docman/acop/281-rdg-gn-nti-005etcson-boardequipmentv2/file.html>
- [5] POLÍVKA, Vladimír. *Analýza významových dat přenášených přenosovým systémem eurobalízy v ETCS L1* [online]. Pardubice, 2011 [cit. 2021-8-10]. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/39381/PolivkaV\\_Anal%C3%BDza\\_v%C3%BDznamov%C3%BDch\\_JO\\_2011.pdf](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/39381/PolivkaV_Anal%C3%BDza_v%C3%BDznamov%C3%BDch_JO_2011.pdf). Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Jan Ouředníček, Ph.D.
- [6] Soubor:Etcs471042\_08\_doppleruvradar.jpg. *Wikipedie* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-8-10]. Dostupné z: [https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Etcs471042\\_08\\_doppleruvradar.jpg](https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Etcs471042_08_doppleruvradar.jpg)
- [7] GOGOASA, I, M MURPHY a J SZAJMAN. An extrinsic optical fibre speed sensor based on cross correlation. *Measurement Science and Technology* [online]. 1996, **7**(8), 1148-1152 [cit. 2021-4-10]. ISSN 09570233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/7/8/010
- [8] QINGMIN, Wang, Su MUBIAO, Liu YUHONG a Yang YAOEN. A Kind of Real-time Speed Measuring System of High Speed Train Based on Ethernet. *Procedia Engineering* [online]. 2012, **29**, 1218-1222 [cit. 2021-4-10]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2012.01.116
- [9] *Předpis SŽDC S3: Železniční svršek, Díl X, Kolejové lože a jeho uspořádání* [online]. Změna č. 4. Správa železniční dopravní cesty, 2021 [cit. 2021-6-15]. Dostupné z: [https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/139626480/SZDC\\_S3\\_Dil\\_10\\_sezm1az4\\_20210301.pdf](https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/139626480/SZDC_S3_Dil_10_sezm1az4_20210301.pdf)

- [10] Fyzika na (školním) výletě aneb akcelerometr ve vlaku. *FyzWeb* [online]. Praha: Katedra didaktiky fyziky, MFF UK v Praze, 7. 4. 2010 [cit. 2021-8-7]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=150>
- [11] BUDAI, David. „Nechte nás tu jezdit,“ prosí nadšenci. Opuštěné vlakové tratě ale stojí miliony. *Blesk.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, c2001-2021, 10. 5. 2016 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://www.blesk.cz/clanek/zpravy-udalosti/393176/nechte-nas-tu-jezdit-prosi-nadsenci-opustene-vlakove-trate-ale-stoji-miliony.html>
- [12] SAUTYA, Malay. Coning of Wheels in Railway. *Civil Engineering* [online]. Civil Engineering, c2021, 16. 12. 2018 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://civilnoteppt.com/coning-of-wheels-and-object-of-providing/>
- [13] VOJÁČEK, Antonín. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha: HW server, c1997-2014, 13. 7. 2015 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [14] 1D Laser Displacement Sensors. *Keyence* [online]. Itasca (Illinois): Keyence, c2021 [cit. 2021-4-14]. Dostupné z: [https://www.keyence.com/ss/products/measure/measurement\\_library/type/laser\\_1d/](https://www.keyence.com/ss/products/measure/measurement_library/type/laser_1d/)
- [15] Time of Flight senzor. *Alza.cz* [online]. Praha: Alza.cz, c1994-2021, 16. 8. 2019 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/time-of-flight-senzor>
- [16] VOJÁČEK, Antonín. Ultrazvukové senzory přiblížení - funkce, provedení, použití. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. Praha: HW server, c1997-2014, 7. 7. 2017 [cit. 2021-4-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ultrazvukove-senzory-priblizeni-funkce-provedeni-pouziti.html>
- [17] Ultrasonic Sensor SRF-04. *EPro Labs* [online]. Chennai: ePro Labs, c2016 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: [https://wiki.eprolabs.com/index.php?title=Ultrasonic\\_Sensor\\_SRF-04](https://wiki.eprolabs.com/index.php?title=Ultrasonic_Sensor_SRF-04)
- [18] ENGELBERG, Thomas. Design of a correlation system for speed measurement of rail vehicles. *Measurement* [online]. Elsevier, 2001, **29**(2), 157-164 [cit. 2021-6-12]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0263-2241\(00\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0263-2241(00)00043-9)
- [19] LENZŮV ZÁKON. *FyzWeb* [online]. Praha: Katedra didaktiky fyziky, MFF UK v Praze [cit. 2021-3-24]. Dostupné z: <https://fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/LENZ/POPIS.HTM>
- [20] GEISTLER, A. a F. BOHRINGER. Robust velocity measurement for railway applications by fusing eddy current sensor signals. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium* [online]. IEEE, 2004, 664-669 [cit. 2021-6-19]. ISBN 0-7803-8310-9. Dostupné z: doi:10.1109/IVS.2004.1336463
- [21] HENSEL, Stefan, Carsten HASBERG a Christoph STILLER. Probabilistic Rail Vehicle Localization With Eddy Current Sensors in Topological Maps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* [online]. 2011, **12**(4), 1525-1536 [cit. 2021-6-19]. ISSN 1524-9050. Dostupné z: doi:10.1109/TITS.2011.2161291
- [22] CHANDRAN, Praneeth, Matti RANTATALO, Johan ODELIUS, Håkan LIND a Stephen M FAMUREWA. Train-based differential eddy current sensor system for rail fastener detection. *Measurement Science and Technology* [online]. 2019, **30**(12) [cit. 2021-7-28]. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6501/ab2b24

- [23] MEI, T. X. a H. LI. A novel approach for the measurement of absolute train speed. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2008, **46**(sup1), 705-715 [cit. 2021-8-6]. ISSN 0042-3114. Dostupné z: doi:10.1080/00423110802036984
- [24] DU, Lei, Qiao SUN, Jie BAI, Xiaolei WANG a Tianqi XU. Speed Calibration and Traceability for Train-Borne 24 GHz Continuous-Wave Doppler Radar Sensor. *Sensors* [online]. 2020, **20**(4) [cit. 2021-8-6]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s20041230
- [25] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Vojtěch LANGER. *Železniční stavby II: Základní součásti železničního svršku* [online]. Brno, 2006, 29 s. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BN02-Zeleznici%20stavby%20II/M04-%C5%BDelezn%C4%8Dn%C3%AD%20svr%C5%A1ek%20-%20z%C3%A1kladn%C3%AD%20sou%C4%8D%C3%A1sti.pdf>. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [26] *Předpis SŽDC S3: Železniční svršek, Díl XI, Uspořádání stykované a bezstykové koleje* [online]. Změna č. 3. Správa železniční dopravní cesty, 2019 [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: [https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/139626480/SZDC\\_S3\\_Dil\\_11\\_sezm1az3\\_20190301.pdf/](https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/139626480/SZDC_S3_Dil_11_sezm1az3_20190301.pdf/)
- [27] Pojezdy podvozkových vozidel. *Vagony.cz* [online]. Nové Město nad Metují: Vagony.cz, 2018 [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: [https://www.vagony.cz/pojezdy/pojezdy\\_podvozkovykh\\_vozidel.html](https://www.vagony.cz/pojezdy/pojezdy_podvozkovykh_vozidel.html)
- [28] Benewake technology support. *Benewake* [online]. Peking: Benewake, c2017 [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: <http://en.benewake.com/support>
- [29] OM70-P0600.HV0350.VI: Distance sensors. *Baumer: Passion for Sensors* [online]. Westerlo (Belgie): Baumer, c2021 [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: [https://www.baumer.com/medias/\\_\\_secure\\_\\_/Baumer\\_OM70-P0600.HV0350.VI\\_EN\\_20210409\\_DS.pdf?mediaPK=9017424052254](https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_OM70-P0600.HV0350.VI_EN_20210409_DS.pdf?mediaPK=9017424052254)
- [30] OptoNCDT: Laser displacement sensors (triangulation). *Micro-Epsilon* [online]. Ortenburg: Micro-Epsilon, c2021 [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat--optoNCDT--en.pdf>
- [31] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Vojtěch LANGER. *Železniční stavby II: Železniční svršek - kolejnice* [online]. Brno, 2006, 29 s. [cit. 2021-6-26]. Dostupné z: <https://adoc.pub/eleznini-stavby-ii629bcddcfff7ff72f2602c45e38acf8235850.html>. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [32] Železniční Svorka Hraje Rozhodující Roli V Systému Upevnění Kolejnic. *Sincholdrail* [online]. Dongzhuang (Čína): SINCHOLD Port Engineering, 8. 5. 2017 [cit. 2021-6-26]. Dostupné z: <http://cz.sincholdrail.org/info/rail-clamp-plays-a-crucial-role-in-rail-fasten-19267321.html>
- [33] LDC1001 Inductance-to-Digital Converter. *Texas Instruments* [online]. Dallas: Texas Instruments, c1995-2021 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1001.pdf>
- [34] HC-SR04 Ultrasonic Sensor. *Parshav Elecom* [online]. Sheffield (Spojené království): Parshav Elecom, c2019 [cit. 2021-6-26]. Dostupné z: <https://www.parshavelecom.com/product-page/hc-sr04-ultrasonic-sensor>
- [35] Ultrasonic ranging module : HC-SR04. *Electro Schematics* [online]. Cambridge (Massachusetts): Electro Schematics, c2021, 3. 11. 2010 [cit. 2021-6-26]. Dostupné

z: <https://www.electroschematics.com/wp-content/uploads/2013/07/HC-SR04-datasheet-version-2.pdf>

- [36] TFmini-S 12m cost-effective distance sensor. *Benewake* [online]. Peking: Benewake, c2017 [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <http://en.benewake.com/product/detail/5c345e26e5b3a844c472329c.html>

# Příloha A

## Kód pro řízení ultrazvukového senzoru

```
// definice funkci pro primy pristup do registru
// - vyrazne rychlejsi, nez jsou funkce Arduina
// prevzato z http://masteringarduino.blogspot.com/2013/10/
// fastest-and-smallest-digitalread-and.html
#define portOfPin(P)\
  (((P)>=0&&(P)<8)?&PORTD:(((P)>7&&(P)<14)?&PORTB:&PORTC))
#define ddrOfPin(P)\
  (((P)>=0&&(P)<8)?&DDRD:(((P)>7&&(P)<14)?&DDRB:&DDRC))
#define pinOfPin(P)\
  (((P)>=0&&(P)<8)?&PIND:(((P)>7&&(P)<14)?&PINB:&PINC))
#define pinIndex(P)((uint8_t)(P>13?P-14:P&7))
#define pinMask(P)((uint8_t)(1<<pinIndex(P)))

#define pinAsInput(P) *(ddrOfPin(P))&~pinMask(P)
#define pinAsOutput(P) *(ddrOfPin(P))|=pinMask(P)
#define digitalLow(P) *(portOfPin(P))&~pinMask(P)
#define digitalHigh(P) *(portOfPin(P))|=pinMask(P)
#define isHigh(P)((*(pinOfPin(P))& pinMask(P))>0)
#define isLow(P)((*(pinOfPin(P))& pinMask(P))==0)

// definice cisel pinu
const byte pTrig = 2;
const byte pEcho = 3;
const byte VCC = 4;

// inicializace promennych, do kterych se ukladaji data
unsigned long odezva;
unsigned long vzdalenost;
unsigned long programStart;
bool measuring = true;
volatile unsigned long trigStart = 0;
// nastaveni delky jedne periody mereni v mikrosekundach
const unsigned int duration = 10000;

void setup() {
  // nastaveni pinu
  pinAsOutput(pTrig);
  pinAsInput(pEcho);
  pinAsOutput(VCC);
  // spusteni seriove komunikace s PC rychlosti 2 Mb/s
  Serial.begin(2000000);
  // zapnuti napajeni senzoru
  digitalHigh(VCC);
}
```

```
void loop()
{
    // zaznamenani casu zacatku cyklu v mikrosekundach
    programStart = micros();
    measuring = true;
    // nastaveni triger pinu na zem, pote odeslani triger pulzu
    digitalWrite(pTrig);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(pTrig);
    delayMicroseconds(20);
    digitalWrite(pTrig);

    // cekani na zacatek echa
    while(isLow(pEcho)) {
        // ukonceni v pripade, ze se blizi konec periody a echo neprislo
        if (micros()-programStart >= duration-1000){
            measuring = false;
            // odeslani chyboveho stavu
            Serial.println("0");
            break;
        }
    }

    // ulozeni casu nabezne hrany na echo pinu
    trigStart = micros();
    // cekani na konec echa
    while(isHigh(pEcho)) {
        // ukonceni v pripade, ze se blizi konec periody a echo neskoncilo
        if (micros()-programStart >= duration-1000){
            measuring = false;
            // odeslani chyboveho stavu
            Serial.println("1");
            // restart senzoru - vypnuti napajeni
            digitalWrite(VCC);
            delayMicroseconds(250);
            digitalWrite(VCC);
            break;
        }
    }

    // pokud echo signal vcas skoncil, prisla senstupna hrana
    if (measuring) {
        // vypocet doby trvani echo pulzu, prepocet na vzdalenost
        odezva = micros()-trigStart;
        vzdalenost = odezva*100 / 58.3;
        // odeslani merene vzdalenosti do PC
        Serial.println(vzdalenost);
    }
    // cekani na konec periody
    if (micros()-programStart < duration){
        delayMicroseconds((unsigned int)(duration-(micros()-programStart)));
    }
}
```



## Příloha B

### Obsah přiložené složky

- **optika/** – obsahuje zdrojový kód v programu *Matlab* sloužící k analýze naměřených dat optickým senzorem TF Mini-S, výpočtu korelačních koeficientů a směrodatné odchylky. V podsložce **data/** jsou naměřené hodnoty ve formátu **.log**. Dále obsahuje zdrojový kód pro řízení senzoru napsaný v *Arduino IDE*.
- **simulace/** – obsahuje zdrojový kód simulátoru v programu *Matlab*.
- **ultrazvuk/** – obsahuje zdrojový kód v programu *Matlab* sloužící k analýze naměřených dat ultrazvukovým senzorem HC-SR04 a výpočtu korelace / korelačních koeficientů a směrodatné odchylky. V podsložce **data/** jsou naměřené hodnoty ve formátu **.log**. Dále obsahuje zdrojový kód pro řízení jednoho senzoru i dvou senzorů zároveň napsaný v *Arduino IDE*.