VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021 Bc. Martin Mičulka

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

DETEKCE NÁPRAVY V SYSTÉMU VÁŽENÍ ZA JÍZDY
AXLE DETECTION IN THE WEIGHING VEHICLE SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Martin Mičulka
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Martin Mičulka ***ID:*** 183137

Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Detekce nápravy v systému vážení za jízdy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout metodiku detekce dvojmontáže kol u kamionů v systému pro vážení vozidel za jízdy. Téma práce je vypisováno ve spolupráci se společností CROSS Zlín, a.s.

1. Proveďte literární rešerši v oblasti systémů pro vážení vozidel za jízdy – systémy weigh-in-motion (WIM). Dále proveďte průzkum dostupných řešení těchto systémů.
2. Proveďte průzkum dostupných metod detekce dvojmontáže kol u kamionů (šikmé piezosenzory, free-flow senzory s vlastní detekcí dvojmontáže, atd.)
3. Navrhněte metodiku pro detekci dvojmontáže kol.
4. Navrhněte strukturu programu pro zpracování naměřených dat a vyhodnocení detekce dvojmontáže kol. Program realizujte.
5. Otestujte vytvořený program.
6. Proveďte simulaci vlivu umístění senzoru na výslednou detekci dvojmontáže.
7. Dosažené výsledky zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIM Data Analyst´s Manual, US Department of Transportation, Publication No. FHWA-IF-10-018. Online – dostupné: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/wim/pubs/if10018/if10018.pdf

Termín zadání: 8.2.2021 ***Termín odevzdání:*** 17.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá detekcí dvojmontáže v systémech vážení za jízdy (WIM - Weight in Motion). Primárním cílem je vytvoření softwaru pro simulaci detekce dvojmontáže, kdy je posuzován vliv umístěni senzoru pod různými úhly do vozovky. Práce dále obsahuje rešerši dostupných řešení systémů vážení za jízdy a využívaných senzorů. Následně obsahuje software pro rozpoznání jednoduché montáže nebo dvojmontáže z reálně naměřených dat. Softwarové řešení byly vyvíjeny za pomocí programovacího jazyka Python v3.7. K vývoji zdrojových kódů bylo použito vývojové prostředí PyCharm Community Edition 2020.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vážení za jízdy, WIM, detekce dvojmontáže, simulace, piezoelektrický senzor, Python, PyCharm Community Edition

ABSTRACT

This master's thesis deals with the Weight in Motion systems (WIM). The main goal is to create simulation software that detects dual tires assembly with respect to the angle with which the sensor is embedded into the road. Thesis also contains literature search of available solutions of weighing systems and the sensors which are used in these systems. Subsequently, the thesis contains software for recognizing simple assembly or dual tires assembly from real measured data. Software solutions were developed using programming language Python v3.7. All source codes were developed in PyCharm Community Edition 2020.

KEYWORDS

Weight in Motion, WIM, detection of dual tires, simulation, piezoelectric sensor, Python, PyCharm Community Edition

MIČULKA, Martin. *Detekce nápravy v systému vážení za jízdy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2021, 84 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Martin Mičulka
VUT ID autora:	183137
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Detekce nápravy v systému vážení za jízdy

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucím diplomové práce paní Ing. Soně Šedivé, Ph.D. a panu Ing. Janu Görigovi za odborné vedení, vstřícnost při konzultacích, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Rovněž bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu v průběhu studia a nesmírnou trpělivost.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek **12**

Úvod **13**

1 Vážení za jízdy **14**
1.1 HS-WIM (High Speed Weight-In-Motion) 15
1.1.1 CrossWIM 15
1.1.2 KiTraffic WIM 17
1.1.3 Camea UnicamWIM 18
1.1.4 Kapsch WIM 19
1.2 LS-WIM (Low Speed Weight-In-Motion) 20
1.2.1 Tenzováhy 20
1.3 Legislativa 21

2 Snímače využívané v systému WIM **23**
2.1 Indukční smyčka 23
2.2 Piezoelektrické senzory 24
2.3 Optické senzory 25

3 Detekce dvojmontáže **26**
3.1 Dvojmontáž 26
3.2 Detekce dvojmontáže pomocí šířky pneumatiky 26
3.3 Detekce dvojmontáže pomocí šikmých piezosenzorů 28

4 Metodika detekce dvojmontáže **29**

5 Návrh softwaru pro detekci **31**

6 Software pro detekci dvojmontáže **33**
6.1 Python 33
6.1.1 Pomocné knihovny 33
6.2 Detekce dvojmontáže 34

7 Simulace vlivu umístění senzoru **37**
7.1 Simulace 38
7.1.1 Stopa pneumatiky 40
7.1.2 Funkce senzoru 41
7.2 Výpočet rozměrů stopy 42
7.3 Ověření výpočtu rozměrů stopy 44

7.3.1 Příklad výpočtu 48
7.3.2 Vyhodnocení měření 48

8 Zhodnocení simulací **50**
8.1 Porovnání s reálnými daty 50
8.1.1 Volba úhlů 52
8.2 Simulace pneumatik 53

Závěr **57**

Literatura **59**

Seznam příloh **63**

A Grafy simulace s porovnáním s reálnými daty **64**

B Grafy simulace pneumatik - 5 bar **69**

C Grafy simulace pneumatik - 8,5 bar **79**

D Obsah elektronické přílohy **84**

Seznam obrázků

1.1 Konfigurace systému CrossWIM Statistika 16
1.2 Konfigurace systému CrossWIM Předselekce 16
1.3 Konfigurace systému CrossWIM Přímé pokutování 17
1.4 Konfigurace systému OptiWIM 17
1.5 KiTraffic WIM pro ochranu mostů 18
1.6 Schéma umístění systému UnicamWIM 19
1.7 Řešení Kapsch WIM 20
1.8 Stanoviště dynamické nápravové váhy společnosti Tenzováhy s.r.o. . . 21
2.1 Princip funkčnosti indukční smyčky 23
2.2 Schéma konstrukce piezoelektrického kabelu 24
2.3 Průřez senzoru s piezoelektrickým krystalem 25
2.4 Princip funkčnosti optického vlákna 25
3.1 Dvojmontáž kol na kamionu 26
3.2 Stanoviště pro měření šířky pneumatiky 27
3.3 Stopa pneumatiky 28
4.1 Schéma konfigurace měřícího stanoviště 29
4.2 Graf jednoduché montáže kola 30
4.3 Graf dvojmontáže 30
5.1 Přehledové schéma softwaru 32
6.1 Příklad vložení knihovny do programu 33
6.2 Nalezené vrcholy pro jednoduchou montáž 36
6.3 Nalezené vrcholy pro dvojmontáž 36
7.1 Přehledové schéma softwaru pro animaci 37
7.2 Vzhled okna s animací a detekcí 38
7.3 Porovnání reálné stopy a simulační stopy 40
7.4 Struktura bodů pro vykreslení senzoru 41
7.5 Styčná plocha pneumatiky 42
7.6 Schéma nákladního vozidla 44
7.7 Schéma kamionu s návěsem 44
7.8 Schéma pneumatik ve dvojmontáži 46
8.1 Měření doby časové prodlevy Δt 50
8.2 Porovnání reálného signálu se simulovaným pro signál č.1 52
8.3 Schéma úhlu náklonu senzoru 52
8.4 Příklad porovnání dvou simulovaných signálů 53
A.1 Simulace reálného signálu č.1 64
A.2 Simulace reálného signálu č.2 65
A.3 Simulace reálného signálu č.3 66

A.4 Simulace reálného signálu č.4 67
A.5 Simulace reálného signálu č.5 68
B.1 Pneumatika č.1 69
B.2 Pneumatika č.2 70
B.3 Pneumatika č.3 71
B.4 Pneumatika č.4 72
B.5 Pneumatika č.5 73
B.6 Pneumatika č.6 74
B.7 Pneumatika č.7 75
B.8 Pneumatika č.8 76
B.9 Pneumatika č.9 77
B.10 Pneumatika č.10 78
C.1 Pneumatika č.1 79
C.2 Pneumatika č.3 80
C.3 Pneumatika č.4 81
C.4 Pneumatika č.7 82
C.5 Pneumatika č.8 83

Seznam tabulek

1.1 Možné aplikace systému UnicamWIM 19
1.2 Základní parametry dynamické nápravové váhy VM-1.2 20
1.3 Nejvyšší možné zatížení náprav motorového vozidla 21
1.4 Nejvyšší možné zatížení náprav přípojného vozidla 22
1.5 Nejvyšší povolené hmotnosti vozidel 22
7.1 Naměřená data dvojmontáže nákladního vozidla 45
7.2 Naměřená data vzdáleností mezi pneumatikami 46
7.3 Naměřená a vypočtená data vzdáleností mezi pneumatikami 47
8.1 Zjištěné velikosti stop pro reálná data 51
8.2 Doba časové prodlevy pro porovnání s reálnými daty 51
8.3 Vybrané pneumatiky pro simulaci 53
8.4 Vypočtené velikosti stop pro vybrané pneumatiky - 5 bar 54
8.5 Vypočtené velikosti stop pro vybrané pneumatiky - 8,5 bar 54
8.6 Doba časové prodlevy pro jednotlivé úhly náklonu senzoru - 5 bar . . 55
8.7 Doba časové prodlevy pro jednotlivé úhly náklonu senzoru - 8,5 bar . 56

Seznam symbolů a zkratek

WIM	Weight-In-Motion
HS-WIM	High Speed Weight-In-Motion
LS-WIM	Low Speed Weight-In-Motion
A_c	Kontaktní plocha [m^2]
F	Síla [N]
p	Tlak v pneumatice [Pa]
L	Délka [m]
m	Hmotnost [kg]
$2l_1$	Délka kontaktní plochy [m]
$2l_2$	Šířka kontaktní plochy [m]
$\Delta 2l_1$	Odchylka délky kontaktní plochy [m]
$\Delta 2l_2$	Odchylka šířky kontaktní plochy [m]
d_s	Průměr zatížené pneumatiky [m]
$mezera$	Mezera mezi pneumatikami umístěnými ve dvojmontáži [m]
$\Delta mezera$	Odchylka mezery mezi pneumatikami umístěnými ve dvojmontáži [m]

Úvod

Tato práce se věnuje systémům dynamického vážení za jízdy se zaměřením na detekci dvojmontáže. Tyto systémy jsou důležité z důvodu zajištění delší životnosti silnic. S rostoucí dopravní situací, kdy jezdí stále více a více kamionů, podléhají rychlejšímu opotřebení, zejména zapříčiněním přetížených kamionů [4]. Z těchto zřejmých důvodů je nutné sledovat parametry projíždějících kamionů. Konkrétně v našem případě jejich hmotnost a dodržování platných předpisů pro danou zemi. Práce je zaměřena na řešení vyvinuté společnosti CROSS Zlín a.s., kde je věnována pozornost detekci dvojmontáže. Správné určení, zda se jedná o jednoduchou či zdvojenou montáž kol, je důležité z pohledu legislativy [9], kdy jsou stanovené odlišné limity zatížení pro jednoduchou a dvojitou montáž. Ve zmíněném řešení od společnosti CROSS Zlín a.s. se využívá šikmých piezosenzorů pro detekci dvojmontáže.

V první části práce je provedena rešerše dostupných řešení vážení za jízdy, které jsou dostupné na světovém trhu, a jejich popis. Následující kapitola je věnována detailnějšímu popisu základních snímačů využívaných v systémech vážení za jízdy. Jedná se primárně o indukční smyčku, dále o senzory založené na piezoelektrickém jevu a optické senzory. Třetí kapitola popisuje metody pro zjištění dvojmontáže. Základní metoda zjištění je pomocí měření šířky pneumatiky, případně právě pomocí šikmých piezosenzorů, kdy je možné zjišťovat podle výstupního průběhu, zda je namontována na nápravě jednoduchá montáž nebo dvojmontáž. Další částí práce je návrh struktury programu pro detekci montáže z naměřených dat. Tento program je následně realizován v kapitole č. 6.

Poslední částí diplomové práce je vytvoření softwaru pro simulaci vlivu umístění senzoru pod různými úhly na výslednou detekci dvojmontáže. Pro software jsou předem stanovené cíle, které jsou popsány na začátku kapitoly 7.

Tato diplomová práce navazuje na semestrální práci [1].

1 Vážení za jízdy

Pojem vážení za jízdy vychází z anglické zkratky WIM (Weight-In-Motion). Jde o systémy umožňující vážení vozidel v dopravě. Nacházejí své uplatnění z důvodu stále rostoucí dopravy a nutnosti hlídat opotřebení povrchů dopravních staveb. Provoz nadměrně zatížených vozidel má za následek rychlejší opotřebení povrchů, a tudíž zkrácení jejich životnosti a nutnost jejich častějších oprav. Proto byla stanovena pravidla pro maximální hmotnosti vozidel, u kterých bylo nutné zajistit jejich kontrolu dodržování. [2]

Jedním z prvních systémů byly kontrolní měřicí stanoviště, kdy docházelo k odklánění nákladních vozidel a jejich převážení na odstavných stanovištích. Nevýhodou těchto systémů bylo přerušování plynulosti dopravy a někdy zastavení i nepřetížených vozidel. Proto bylo nutné vyvíjet systémy umožňující plynulé měření za jízdy, kdy není nutné přerušovat jízdu. Tyto systémy rovněž umožňují měření dalších parametrů vozidla, jakými jsou například rychlost jízdy, typ vozidla, podhuštění pneumatik apod. [4] Jako doplněk systému pro dynamické vážení stále slouží odstavná kontrolní stanoviště, kde dochází už k případnému převážení přetíženého vozidla a jeho následnému přerušení v provozu a pokutě.

Základní pojmy pro práci se systémy WIM z pohledu legislativy jsou [3]:

- statické vážení - vážení celkové hmotnosti vozidla a zatížení jednotlivých náprav ve statickém režimu
- vážení za jízdy - proces, ve kterém je za pomocí dynamického měření zjišťováno celkové zatížení náprav vozidla za běžného provozu
- hmotnost vozidla - celková hmotnost soupravy vozidla včetně všech prvků spojených s vozidlem
- náprava - osa, roztažená na šířku vozidla, obsahující dvě, případně více kolových montáží
- zatížení na nápravu - určitá část hmotnosti vozidla působící v danou chvíli přes nápravu na snímač zatížení
- skupina náprav - skupina dvou či více náprav stejného vozidla. Je definována celkovým počtem náprav, jejichž vzdálenosti jsou dány legislativou
- zatížení na skupinu náprav - celkové zatížení všech náprav definovaných skupinou náprav

Systémy pro vážení za jízdy je možné rozdělit na dvě základní skupiny:

- HS-WIM (High Speed Weight-In-Motion) - jedná se o systémy, ve kterých je umožněno vysokorychlostní vážení vozidel. Vozidla jsou vážená při běžné cestovní rychlosti, kdy senzory jsou nejčastěji umístěny ve vozovce a nevzbuzují pozornost řidiče. [3]
- LS-WIM (Low Speed Weight-In-Motion) - jsou systémy, ve kterých je nutné

měřit při nízkých rychlostech, nejčastěji do 10 km/h. Z tohoto důvodu je nutné přerušení plynulé jízdy. Uplatnění nacházejí jako kontrolní stanoviště pro ověření naměřených údajů ze systémů HS-WIM a nebo jako vážící zařízení v logistických centrech, průmyslových areálech apod. Tyto systémy rovněž často umožňují vážení ve stoje. [8]

Následující podkapitoly se věnují popisu dostupných řešení několika firem s jejich rozdělením podle dříve zmíněných dvou skupin.

1.1 HS-WIM (High Speed Weight-In-Motion)

Systémy dynamického vážení jsou uzpůsobené k vážení za běžného provozu. Řešení následně zmiňovaných firem nachází uplatnění na dálnicích, po kterých směřují důležité zásobovací cesty. Všechny jsou certifikovány pro přímé vymáhání přestupku a slouží i pro statistické vyhodnocování dopravy s měřením dalších veličin.

1.1.1 CrossWIM

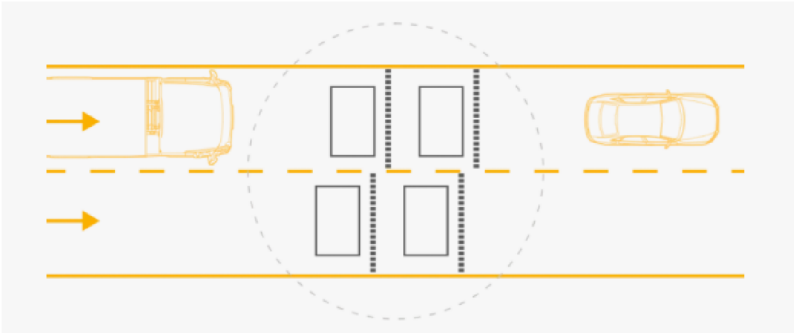
Diplomová práce se soustředí na systém vyvinutý společností CROSS Zlín a.s., která systém nabízí ve čtyřech možných řešeních - statistika, předselekce, přímé pokutování a OptiWIM. Data z měření jsou zpracována pomocí firemního softwaru, kde je možné vidět reporty, statistiku, vizualizaci vozidel společně se sledovanými parametry. Snímače, využívané v systémech vážení za jízdy, jsou detailněji popsány v následující kapitole 2. Následující podkapitoly jsou věnovány popisu dříve zmíněných nabízených řešení firmy CROSS Zlín a.s. Tato kapitola čerpá z brožury společnosti dostupné ze zdroje [4].

CrossWIM Statistika

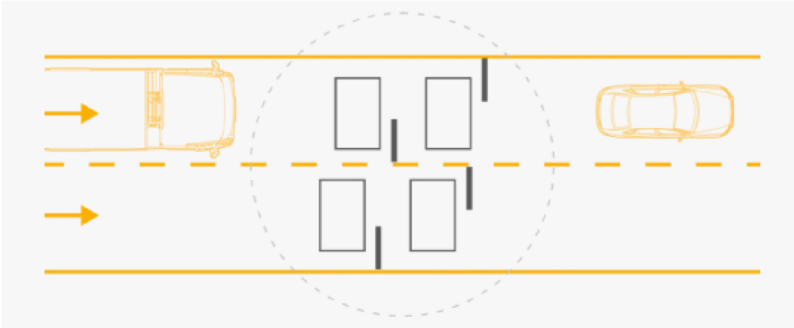
Aplikace systému pro statistické získávání dat. Dokáže přesně klasifikovat vozidla, měřit rychlost a orientačně zvážit vozidlo. Systém pracuje s přesností pro vážení ± 20% , která je pro tuto aplikaci plně dostačující. Smyslem tohoto využití je statistické sledování přetíženi silnic a detailních statistik o silničním provozu. Typickou konfigurací pro statistickou funkci je složení dvou indukčních smyček na jízdní pruh v kombinaci se dvěma řadami piezo senzorů. Základní konfigurace je zobrazena na obrázku 1.1.

CrossWIM Předselekce

Systém sloužící pro detailnější klasifikaci vozidel a vážení s přesností ± 7%. Na základě online systému je možné odhalit možné porušení předpisů a jeho následné



Obr. 1.1: Konfigurace systému CrossWIM Statistika[4]

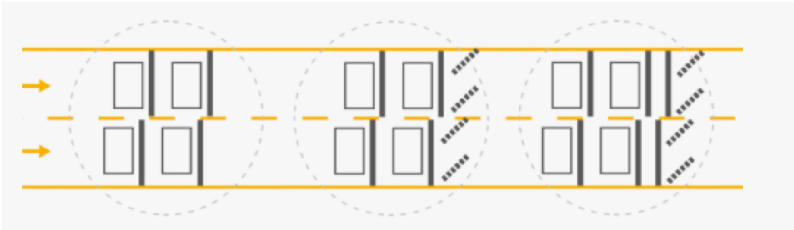


Obr. 1.2: Konfigurace systému CrossWIM Předselekce[4]

odklonění na kontrolní převážení na statických či přejezdových vahách. Parametry k měření jsou zde rychlost, počet náprav, délka vozidla, hmotnostní zatížení nápravy a celková hmotnost vozidla. Konfigurace pro daný způsob počítá s využitím dvou indukčních smyček a jedné řady vážících senzorů na jízdní pruh (viz obrázek 1.2). Systém bývá doplněn příslušenstvím, kterým jsou kamery pro rozpoznání registračních značek, senzory pro měření rozměrů vozidel a informačními tabulemi pro odklon potenciálních vozidel s přestupkem.

CrossWIM Přímé pokutování

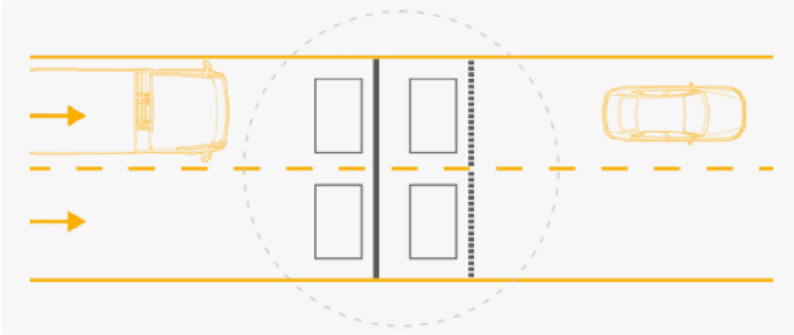
CrossWIM pro přímé pokutování je schopný vážit přetížená vozidla s přesností ± 5% a automaticky je pokutovat. Je certifikovaný pro zajištění důkazů pro přestupkové řízení, kde vytváří dokumentaci k přímému pokutování. Doporučená konfigurace je zobrazena na obrázku 1.3. Skládá se ze dvou indukčních smyček, dvou (popřípadě tří) váhových senzorů a šikmé řady piezosenzorů pro kvalitnější určení klasifikace vozidel. Doplňkové příslušenství bývá totožné jako u konfigurace pro předselekci. Navíc se zde ještě využívá přehledových kamer, které umožňují zachycení fotek či videa v přímém přenosu.



Obr. 1.3: Konfigurace systému CrossWIM Přímé pokutování[4]

OptiWIM

Systém využívající technologii optických vláken. Výrobce udává, že se jedná o první free-flow vysokorychlostní váhy na světě. Velkou výhodou je možnost vážit přesně ve všech částech silnice, respektive měření je nezávislé na okamžité poloze kol nad senzorem během přejezdu. Výrobcem udávaná nejvyšší přesnost je ± 3%. Dále řešení nabízí měření šířky vozidla, přímou detekci dvojmontáže a zároveň zjištění podhuštěných pneumatik. Pro instalaci do vozovky se používá tzv. U-lůžko. Tímto je zajištěna snazší údržba, kdy není nutné zasahovat do povrchu vozovky a vše je možné opravit přímo v U-lůžku. Příklad konfigurace viz obrázek 1.4.



Obr. 1.4: Konfigurace systému OptiWIM[4]

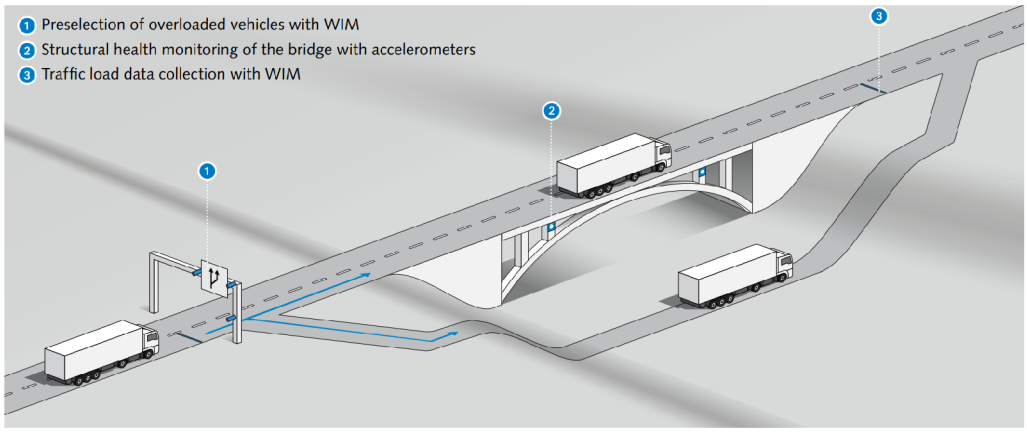
1.1.2 KiTraffic WIM

Řešení WIM od švýcarské společnosti Kistler Group. Jedná se o přímou konkurenci firmy CROSS Zlín a.s. Společnost v současné době nabízí podobná řešení pro systémy WIM. Konkrétně se jedná o tyto řešení [5]:

- Sběr dopravních dat - jedná se o statistické sbírání dat pro vyhodnocování objemu dopravy. Systém váží celkovou hmotnost vozidla s přesností ± 15%.

- Ochrana mostů - řešení pro zvýšení životnosti mostů. Systém zajistí odklon přetížených vozidel mimo sledovaný most. Součástí řešení je systém pro monitoring stavu mostu za pomocí akcelerometrů. Příklad aplikace pro ochranu mostů je na obrázku 1.5.
- Předselekce - aplikace pro odhalení vozidel, u kterých je podezření na porušení legislativy. Po zvážení dochází k odklonu vozidla na kontrolní stanoviště, pro přesnější zvážení na statické váze. Výrobcem udávaná přesnost pro tuto aplikaci je ± 10%.
- Přímé pokutování - systém certifikovaný pro zajištění důkazů pro přestupkové řízení. Řešení dosahuje přesnosti ± 5%.
- Průmyslové vážení - statická verze WIM. Slouží pro kontrolní vážení v přístavech, průmyslových areálech apod. Účelem této aplikace je předejít přetížení vozidel a vyhnutí se následným problémům s porušením legislativy.

Výstupem zmiňovaných řešení je primárně celková váha vozidla a jednotlivá zatížení na nápravu. Systém, ale nabízí i doplňkové výstupy, které jsou totožné s výstupy dříve zmiňovaného řešení společnosti CROSS Zlín a.s. (viz kapitola 1.1.1). Příkladem lze uvést detekci dvojmontáže, detekci podhuštěných pneumatik, rychlost vozidla atd.



Obr. 1.5: KiTraffic WIM pro ochranu mostů[5]

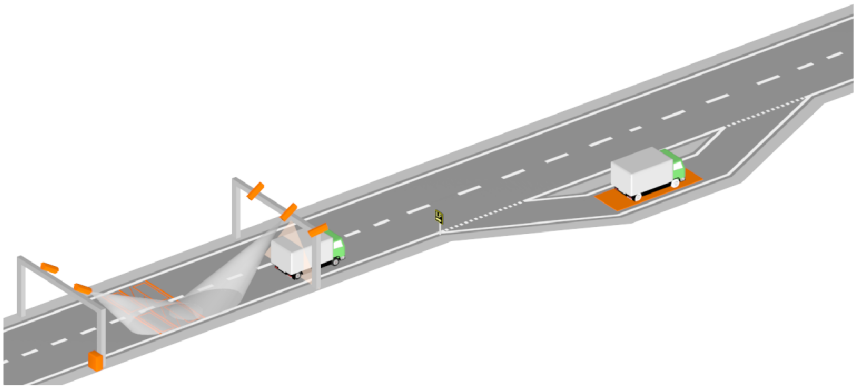
1.1.3 Camea UnicamWIM

Systémové řešení od společnosti CAMEA spol. s.r.o. Jedná se o komplexní řešení pro vážení vozidel za jízdy při nízkých i vysokých rychlostech. Systém měří zatížení jednotlivých kol, náprav a celkovou hmotnost vozidla. Umožňuje tři druhy použití, kdy každý způsob má vlastní toleranci. Druhy aplikací jsou v následující tabulce 1.1 [6].

Aplikace	Tolerance
Vymáhání	δ 5-7 %
Preselekce	δ 10-15 %
Statistiky	δ 15-25 %

Tab. 1.1: Možné aplikace systému UnicamWIM

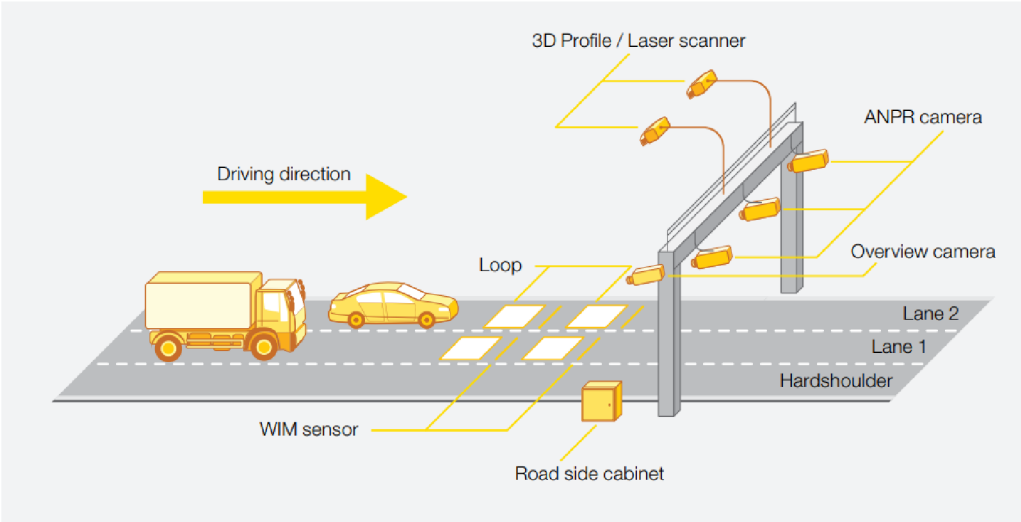
Aplikace pro vymáhání je určena pro přímé pokutování. Předselekce je aplikace, při které je vozidlo zváženo a při zjištění možného přetížení je vozidlo odkloněno na kontrolní stanoviště s kontrolní váhou. Zde je následně převáženo a případně pokutováno. Poslední možnou aplikací je aplikace za účelem zjištěni statistiky, pro určení opotřebení vozovky a možnosti předcházet jejímu poškození. Na základě možných řešení jsou doporučeny i postupy instalace. Na určeném místě pro vážení jsou do vozovky instalovány senzory. Pro detekci přítomnosti auta jsou využívány indukční smyčky. Následně jsou doplněny váhovými senzory a volitelně doplněny o další snímače (např. měření šířky, poziční senzory) [6].



Obr. 1.6: Schéma umístění systému UnicamWIM[6]

1.1.4 Kapsch WIM

Jedná se o řešení rakouské společnosti Kapsch. Nabízí možnosti měření zatížení jednotlivých náprav, celkové váhy, detekci dvojmontáže a měření rychlosti. Princip se od předešlých řešení neliší. Nicméně značnou výhodou je použití tohoto řešení společně s jinými produkty od společnosti Kapsch. Příkladem lze uvést systém výběru mýtného. [7]



Obr. 1.7: Řešení Kapsch WIM [7]

1.2 LS-WIM (Low Speed Weight-In-Motion)

Systémy sloužící jako kontrolní doplněk pro systémy HS-WIM. Rovněž mají velké uplatnění v dopravním průmyslu, jakožto kontrolní váhy při nakládání v logistických centrech apod. Významným představitelem je zde společnost Tenzováhy s.r.o. z Olomouce.

1.2.1 Tenzováhy

Společnost nabízí široké spektrum řešení pro nízko-rychlostní vážení za jízdy. Technickým řešením společnosti jsou dynamické nápravové váhy VM-1.2. Jsou určeny pro zjištění celkové hmotnosti nákladu a zatížení jednotlivých náprav vozidla. Vážení vozidla probíhá dynamickým přejetím přes můstek, kdy je následně vážení automaticky vyhodnoceno a zpracováno. Kontrolní stanoviště zobrazuje obrázek 1.8. Základní parametry vážení zobrazuje tabulka 1.2. [8]

Vážící rozsah jedné nápravy	400 - 20 000 kg
Počet náprav	neomezené
Rychlost jízdy při vážení	1 - 6 km/h
Nejvyšší povolená rychlost	10 km/h
Max. průměr pneumatiky	1800 mm

Tab. 1.2: Základní parametry dynamické nápravové váhy VM-1.2

Obr. 1.8: Stanoviště dynamické nápravové váhy společnosti Tenzováhy s.r.o. [8]

1.3 Legislativa

Pro možnost využití dříve zmíněných systémů je nutné znát příslušnou legislativu daných států, ve kterých je plánováno využití. Legislativou jsou dána pravidla, která určují vztah mezi účastníky provozu, jejich dopravními prostředky a dopravní infrastrukturou. Z pohledu této práce je důležitá vyhláška č. 209/2018 Sb. platná pro ČR - vyhláška o hmotnostech, rozměrech a spojitosti vozidel. [9] Jsou zde určeny hmotnostní limity pro vozidla dle různých kategorií, počtu náprav a dílčích rozvorů mezi nimi. Tabulka 1.3, uvedena níže, uvádí hmotnostní limity zatížení pro nápravy motorového vozidla. Tabulka 1.4 uvádí hmotnostní limity zatížení pro nápravy přípojného vozidla. Následně silniční vozidla nesmí překročit ani maximální celkovou hmotnost. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.5.

Druh nápravy	Povolené max. zatížení
Jednotlivá náprava	10,0 t
Jednotlivá hnací náprava	11,5 t
Součet zatížení obou náprav u dvojnápravy při jejím dílčím rozvoru:	
< 1,0 m	11,5 t
1,0 - 1,3 m	16,0 t
1,3 - 1,8 m	18,0 t
1,3 - 1,8 m, v případě vybavení hnacích náprav dvojmontáži je maximální povolené zatížení na nápravu:	19,0 t
Součet zatížení všech náprav trojnápravy	27,0 t

Tab. 1.3: Nejvyšší možné zatížení náprav motorového vozidla [9]

Druh nápravy	Povolené max. zatížení
Jednotlivá náprava	10,0 t
Součet zatížení obou náprav u dvojnápravy pří jejím dílčím rozvoru:	
< 1,0 m	11,0 t
1,0 - 1,3 m	16,0 t
1,3 - 1,8 m	18,0 t
Součet zatížení všech náprav trojnápravy pří jejím dílčím rozvoru:	
< 1,3 m	21,0 t
1,3 - 1,4 m	24,0 t
1,4 - 1,8 m	27,0 t

Tab. 1.4: Nejvyšší možné zatížení náprav přípojného vozidla [9]

Druh vozidla	Povolená celková hmotnost
Motorové vozidlo se dvěma nápravami	18,0 t
Motorové vozidlo se třemi nápravami	25,0 t
Motorové vozidlo se třemi nápravami, kdy hnací náprava je opatřena dvojmontáží	26,0 t
Motorové vozidlo se čtyřmi a více nápravami	32,0 t
Přívěs se dvěma nápravami	18,0 t
Přívěs se třemi nápravami	24,0 t
Přívěs se čtyřmi a více nápravami	32,0 t

Tab. 1.5: Nejvyšší povolené hmotnosti vozidel [9]

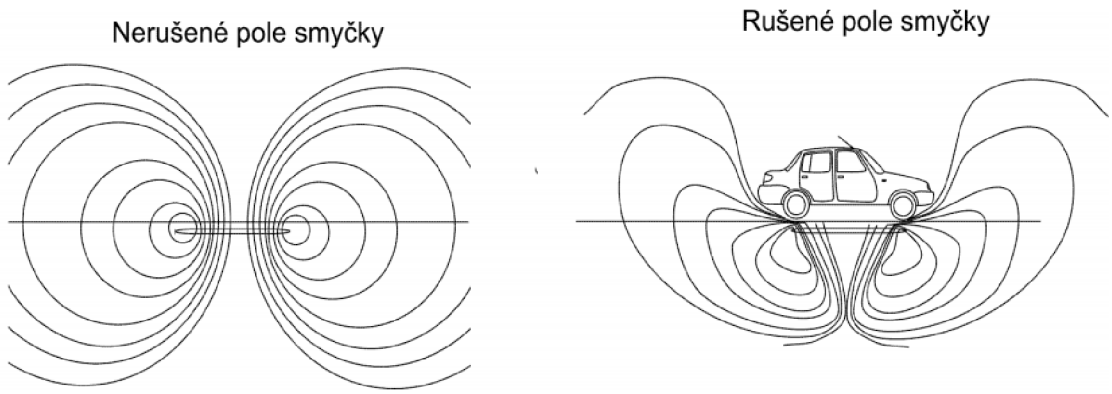
2 Snímače využívané v systému WIM

Kapitola se věnuje základním snímačům, využívaných v systémech vážení za jízdy. Mezi nejběžněji využívaný snímač patří indukční smyčka. Následně se pro vážení využívají piezoelektrické snímače a u nejnovějších systémů se jedná o optické senzory. Následující podkapitoly se věnují detailnějším popisům těchto snímačů. [2]

2.1 Indukční smyčka

Základním snímačem je indukční smyčka, která má za úkol detekovat přítomnost vozidla. Jedná se o nejčastěji využívaný detektor v dopravě. Rovněž je možné ji využívat pro zjištění dalších parametrů. Příkladem v kombinaci dvou indukčních smyček jsme schopni zjistit rychlost vozidla. Z tohoto důvodu se jedná i o základní prvek systémů vážení za jízdy.

Indukční smyčka se skládá z jednoho či více závitů metalického vodiče, zesilovače a řídicí jednotky. Samotné závity jsou uloženy do povrchu vozovky. Při pokládání je nutné brát zřetel na hloubku uložení. Platí, že čím hlouběji je smyčka uložena, tím menší je citlivost. Při průjezdu vozidla nad smyčkou se sníží její induktance, čímž dojde ke zvýšení frekvence oscilátoru, snížení amplitudy a dojde k posunu fáze. Obrázek 2.1 ukazuje příklad změny při průjezdu vozidla nad smyčkou. Kromě detekování vozidla je možné z výstupu zjišťovat rychlost vozidla, vzdálenost náprav a klasifikovat. V systémech vážení za jízdy se využívá nejčastěji kombinace dvou indukčních smyček na jízdní pruh, kdy ze znalosti jejich vzájemné vzdálenosti dopočítáváme požadované parametry. [10]



Obr. 2.1: Princip funkčnosti indukční smyčky [10]

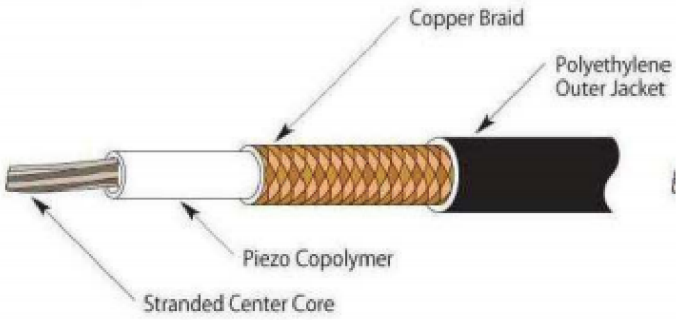
Výhodou indukčních smyček je jejich cenová dostupnost. Další výhodou je jejich relativně snadná a rychlá instalace. Jedná se o osvědčenou a spolehlivou technologii

poskytující dostatečně přesná data. Na druhou stranu přinášejí i nevýhody v případě opravy, kdy je nutné zasahovat do povrchu vozovky. Rovněž životnost smyček se odvíjí od kvality silnice a jejího opotřebení.

2.2 Piezoelektrické senzory

Základním principem využívaným u piezoelektrických senzorů je piezoelektrický jev. Jedná se o schopnost krystalu generovat napětí při deformaci. Napětí generované senzorem je úměrné síle nebo hmotnosti (kola nebo nápravy), která působí na senzor. Nejčastěji využívanou látkou, vykazující piezoelektrický jev, je křemen. V současné době se podle druhu konstrukce dělí na dva typy:

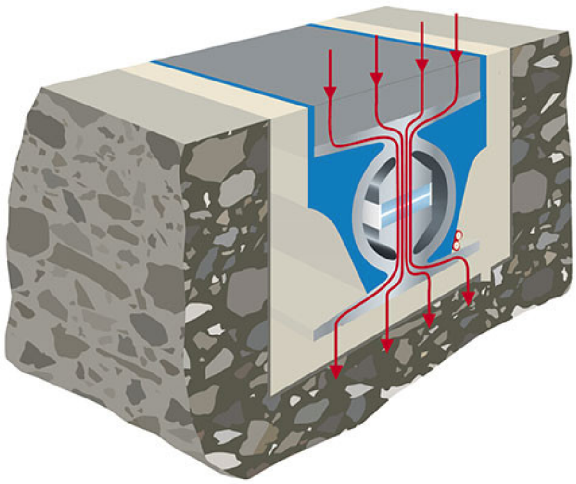
- Piezoelektrické kabely - jedná se vzhledově o obdobu klasického koaxialního kabelu, nicméně místo klasického vnitřního izolátoru je použit piezopolymetrický materiál. Obrázek 2.2 ukazuje schéma konstrukce. Hlavní výhodou tohoto řešení je vysoká odolnost proti elektromagnetickému rušení.



Obr. 2.2: Schéma konstrukce piezoelektrického kabelu [11]

- Piezoelektrické krystaly - senzor obsahuje krystal křemene. Ten je usazen uprostřed hliníkového profilu, který je zalitý elastickým materiálem. Průřez tohoto typu senzoru je možné vidět na obrázku 2.3. Předností senzorů s piezoelektrickým krystalem je citlivost pouze na vertikální působení tlaku, zatímco piezoelektrické kabely jsou citlivé na síly ze všech směrů.

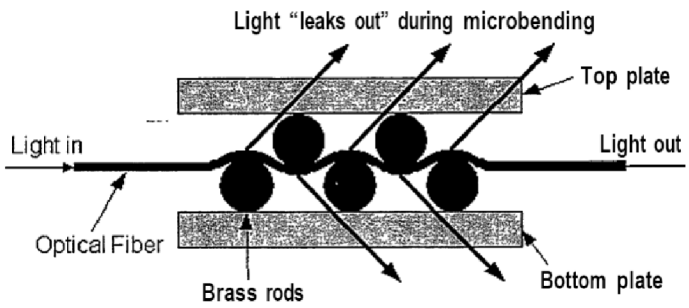
Oba konstrukční typy senzorů jsou do vozovky uloženy v tzv. U-lůžku do předem vyfrézované drážky. Ta je následně zalita epoxidovou zálivkou a po zatvrdnutí je zbroušena, aby senzor byl na stejné úrovni jako povrch vozovky. [10] [11]



Obr. 2.3: Průřez senzoru s piezoelektrickým krystalem [12]

2.3 Optické senzory

Jedná se o relativně novou technologii s velkým potenciálem pro využití v systémech vážení za jízdy. Optické senzory se vykazují vysokou přesností - přesnost ve zmíněném řešení dosahuje ± 3%. Fungují na principu mikroohybů optického vlákna, při kterém dochází k rozptylu světelného paprsku. Následně se vyhodnocuje útlum světelného paprsku. Princip senzoru zobrazuje obrázek 2.4. Instalace probíhá obdobným způsobem jako u piezoelektrických senzorů, kdy je vlákno uloženo do U-lůžka, poté je struktura položena do drážky ve vozovce a zalita. Přední výhodou této technologie je vysoká odolnost proti elektromagnetickému rušení a její nízká teplotní závislost. [10]



Obr. 2.4: Princip funkčnosti optického vlákna [10]

3 Detekce dvojmontáže

3.1 Dvojmontáž

Pojmem je myšleno spojení dvou pneumatik v jednu. Nejčastější uplatnění nachází u kamionů za účelem zvýšení nosnosti a zvýšení povoleného maximálního zatížení na nápravu. Nicméně je možné i využití u autobusů případně u zemědělských strojů, příkladem traktorů. Zde je to za účelem využití v měkkém terénu z důvodu zvýšení plochy pneumatik a následném snížení tlaku na zeminu jeho rozložením na větší plochu. Ukázku dvojmontáže na kamionu je možné vidět na obrázku 3.1. Rozdíl pneumatik pro jednoduchou montáž a dvojmontáž je v discích. Ty jsou vypouklé tak, aby mohly být vypouklými stranami sešroubovány k sobě. Tyto disky, které působí dutě, lze rovněž vidět na nadcházejícím obrázku 3.1. Výhody, které přináší dvojmontáž, je tedy zvýšení povoleného zatížení na nápravu a celkovou hmotnost. Rovněž přináší větší stabilitu vozidla nebo návěsu při nepříznivých podmínkách. Na druhou stranu přináší i nevýhody spojené se zvýšenou ekonomickou zátěží, kdy je zvýšená spotřeba paliva a jsou zde větší náklady na pneumatiky.

Obr. 3.1: Dvojmontáž kol na kamionu [13]

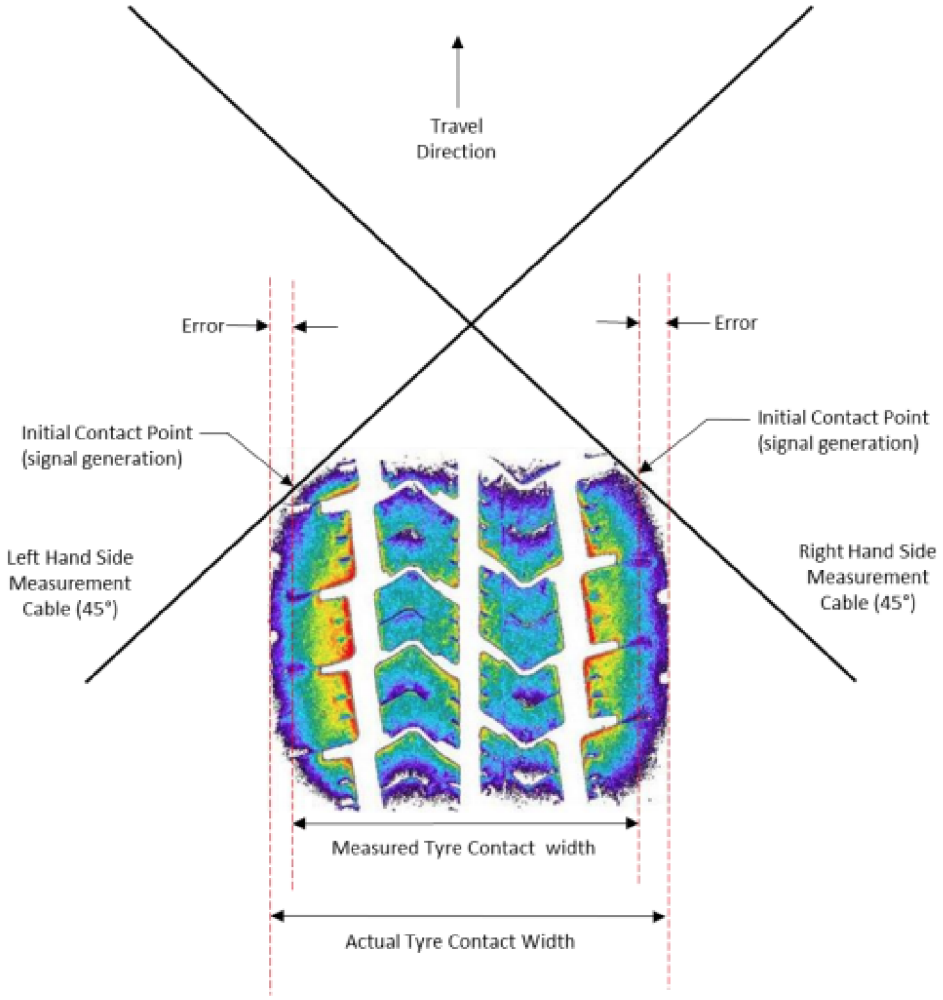
3.2 Detekce dvojmontáže pomocí šířky pneumatiky

Základní metodou pro rozpoznávání dvojmontáže je za pomocí měření šířky pneumatiky. Tento problém se dá řešit umístěním dvou piezokabelů, které budou na sebe

kolmé a zároveň budou svírat uhel 45° na směr jízdy. Takovéto měřící stanoviště vidíme zde 3.2.

Obr. 3.2: Stanoviště pro měření šířky pneumatik [14]

Měření spočívá v zachycení stopy pneumatiky (viz 3.3). Pro určení, o jakou montáž se jedná, je potřeba si stanovit průměrné hodnoty šířky pneumatiky. Nicméně se zde vyskytují chyby, kdy například pro osobní auta je průměrná šířka pneumatiky 175 mm, ale podle měření daným způsobem byla okolo 130 mm. Problém nastává u samotné stopy, v idealizovaném případě se počítá s tím, že pneumatika zanechává obdélníkovou stopu. V reálném případě tomu tak není z důvodu zaoblení pneumatiky, která poté zanechává zkreslenou stopu, se kterou je nutné počítat. Rovněž se zde do chyby měření promítá podhuštění pneumatiky nebo nadměrné nahuštění, které způsobí zúžení zanechané stopy a větší zaoblení na okrajích. V obrázku 3.3 je tento problém ohraničen intervaly *Error*. Ověření funkčnosti pro kamiony proběhlo za pomocí naměření testovacích vzorků šířky pneumatiky. Pro detekci dvojmontáže byly stanoveny průměrné hodnoty šířky jednoduchých montáží a dvojmontáží. V případě detekování jednoduché montáže je použit rozsah 265 mm až 320 mm. U dvojmontáže je stanovený rozsah 530 mm až 630 mm. Určené rozsahy odpovídají pneumatikám dostupným na trhu pro danou montáž. Ve finální fázi je po změření stopy výsledek zařazen do jednoho z rozsahů a je tady určeno jaká montáž byla na vozidle použita. [14]



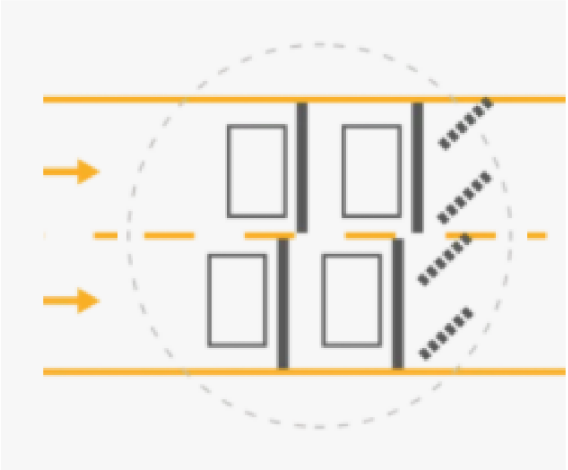
Obr. 3.3: Stopa pneumatiky [14]

3.3 Detekce dvojmontáže pomocí šikmých piezosenzorů

Metoda založená na detekování přítomnosti dvojmontáže za pomocí piezoelektrických snímačů uložených pod úhlem 40° do vozovky. Příklad měřicího stanoviště s takovým zapojení lze vidět na obrázku 4.1 v nadcházející kapitole. Senzory postupně zachycují průjezd pneumatik. Ze zaznamenaných průběhů se poté stanovuje o jakou montáž se jedná. Podrobnější popis následuje v další kapitole 4.

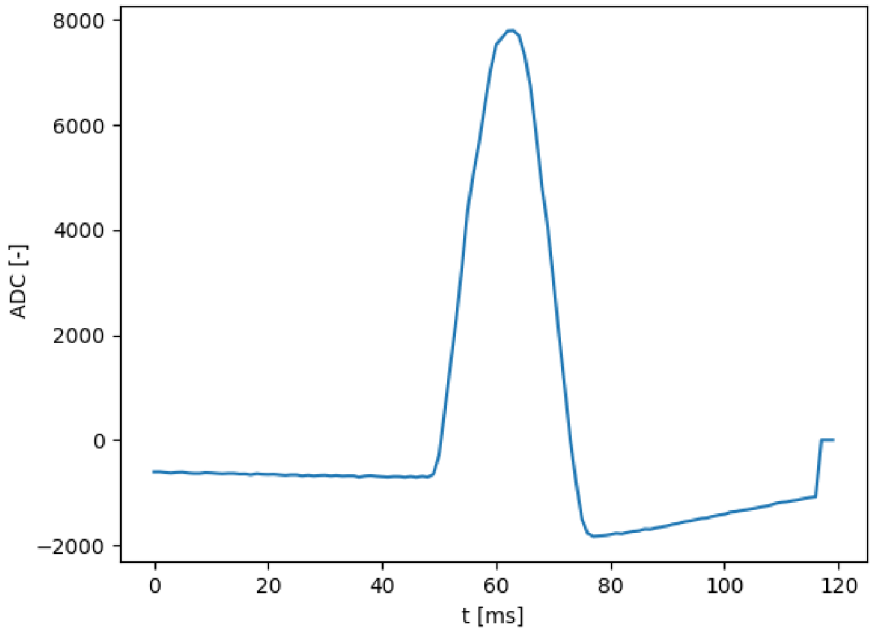
4 Metodika detekce dvojmontáže

V této diplomové práci se pro zjištění dvojmontáže používá měření za pomocí piezoelektrických senzorů. Ty jsou umístěny šikmo do povrchu vozovky pod úhlem 40°, kdy 0° je úhel rovnoběžný s okrajem vozovky a 90° je umístění senzoru kolmo na směr provozu, za indukční smyčky a vážící senzory. Jejich úkol je upřesnit kvalifikaci vozidel a zajistit zjištění přítomnosti dvojmontáže. Umístění senzoru je patrné z následujícího obrázku 4.1. Jedná se o reálné umístěni používané v systémech vážení za jízdy. Obdélníky zde znázorňují dvě indukční smyčky na jeden jízdní pruh. Za nimi následují vážící senzory s piezokrystaly. Posledními senzory jsou právě zmiňované dva šikmé piezosenzory na jízdní pruh.

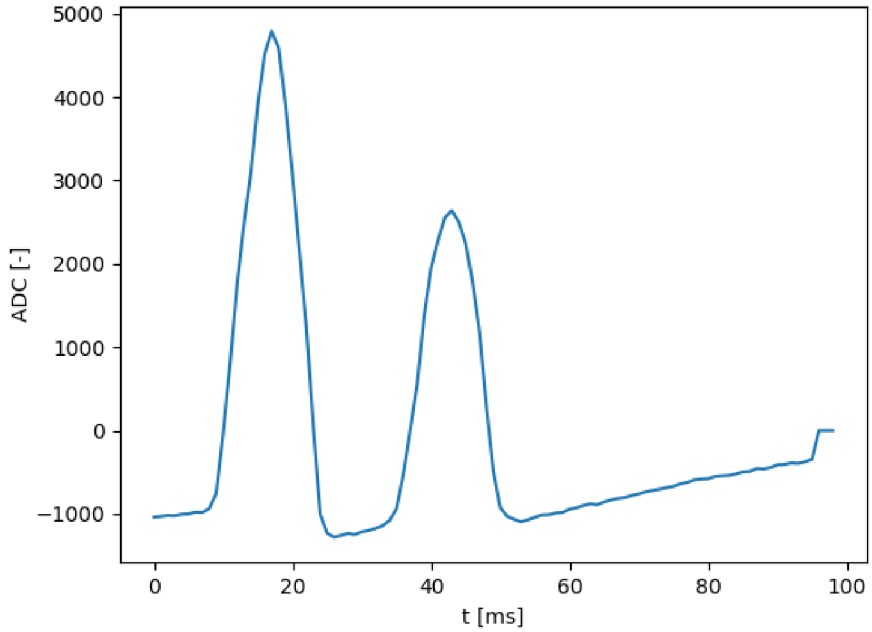


Obr. 4.1: Schéma konfigurace měřícího stanoviště [4]

Deformací snímače při průjezdu kamionu se generuje napětí, které je úměrné hmotnosti působící na snímač. Výstupem je závislost hodnoty z AD převodníku na čase. Samotnou hodnotu z AD převodníku je možné považovat jako hmotnost, kterou je pneumatika zatížena . U tohoto měření není kladen důraz na měření hmotnosti, proto je hodnota označována jako ADC [-]. Grafy na následující stránce zobrazují příklady průběhů pro jednoduchou montáž (viz 4.2) a pro dvojmontáž (viz 4.3). Z grafů je jednoznačně patrné určení, jaká montáž je použita. V prvním případě je zde pouze jeden puls, který značí průjezd pouze jednoho kola. Naproti tomu v druhém případě hned po prvním pulsu následuje druhý, který znamená vjezd druhého kola na snímač. Průběhy jsou vygenerovány z naměřených testovacích dat. Testovací data byla dodána firmou, přičemž se jedná o reálná výstupní data ze systému umístěného na dálnici.



Obr. 4.2: Graf jednoduché montáže kola



Obr. 4.3: Graf dvojmontáže kol

5 Návrh softwaru pro detekci

Kapitola se věnuje popisu plánovaného návrhu softwaru pro rozpoznávání dvojmontáže v systémech vážení za jízdy. Na následující straně se nachází obrázek 5.1, který popisuje základní přehledové schéma plánovaného softwaru. Následuje detailnější popis jednotlivých částí schématu. Zároveň na tuto kapitolu navazuje kapitole č. 6, kde je detailní popis průběhu vývoje softwaru.

Načtení dat ze souboru - prvotní část zadání je správně načítat data. Data jsou exportovaná ve formátu *csv*. Jedná se o soubor, kde jsou data oddělena oddělovači. V našem případě se zde nacházejí tři sloupce, oddělené za pomocí tabulátorů a data obsažené v nich jsou v hexadecimálním formátu. Proto je vhodné data převést a vykreslit si jejich průběhy pro snazší pochopení výstupních dat.

Vyfiltrování dat - mezi naměřenými daty se nachází i zašuměné průběhy, které mohou narušit výsledné rozpoznání. Proto je vhodné tato data najít a odstranit.

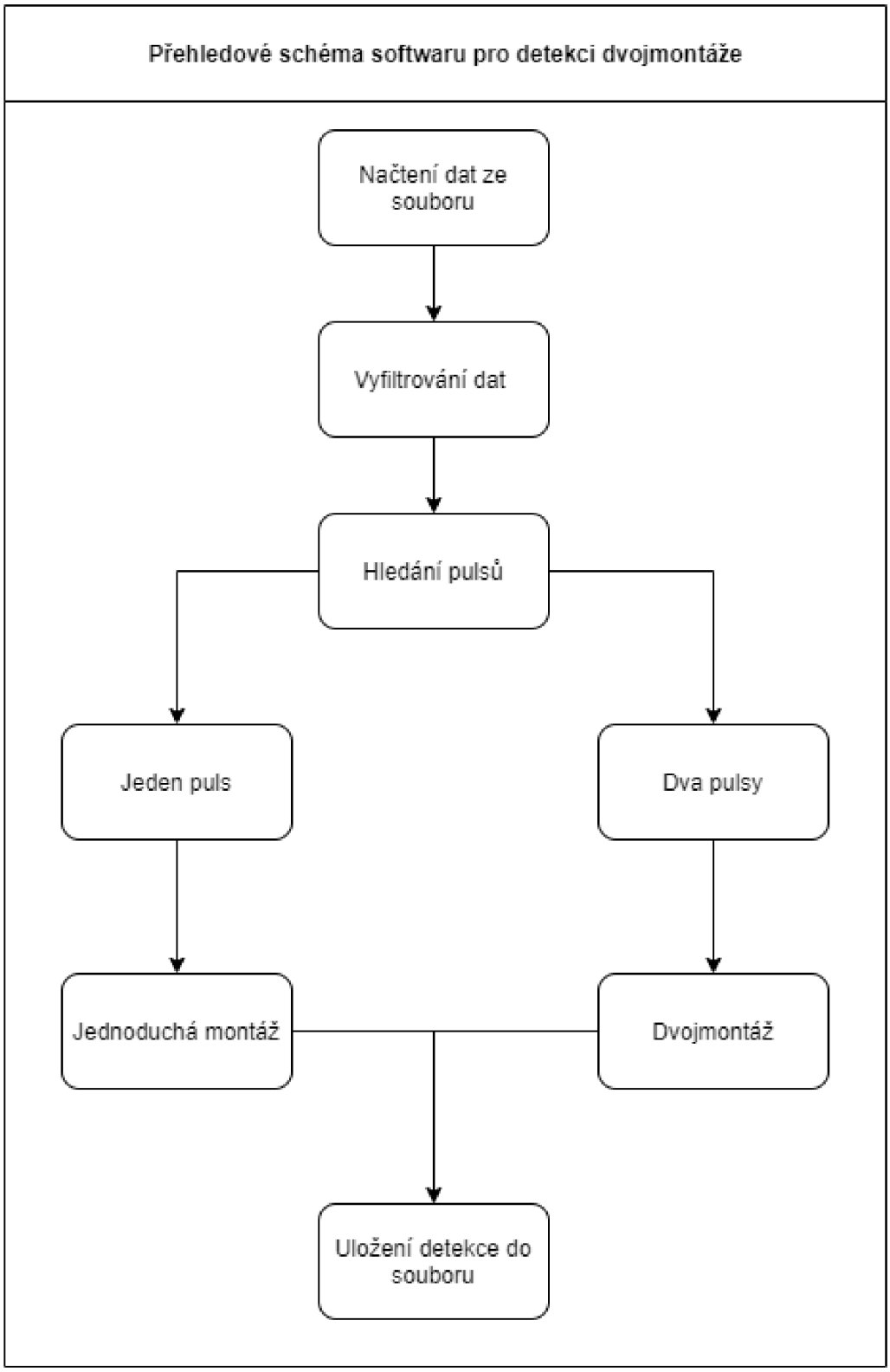
Hledání pulsů - následně po vyfiltrování chybných dat je na řadě hledání počtu pulsů nacházejících se v průběhu. Po prohledání průběhů a zjištění jejich počtu, přichází rozhodování na základě počtu nalezených pulsů.

Jeden puls - v případě nálezu jednoho pulsu, jak lze vidět na obrázku 4.2, lze prohlásit, že na dané straně nápravy se jedná o jednoduchou montáž.

Dva pulsy - obdobný způsob nálezu jako v předchozím případě, nicméně pokud jsou nalezeny dva pulsu (viz obrázek 4.3) je na kamionu namontovaná dvojmontáž.

Jednoduchá montáž, dvojmontáž - souvisí s předchozími dvěma body. Na základě zjištění v předchozích příkladech je jednotlivým nápravám přiřazeno, zda jsou osazeny jednoduchou montáží nebo dvojmontáží.

Uložení detekce do souboru - po určení je vhodné uložit dané zjištění do tabulky a správně přiřadit k nápravě.



Obr. 5.1: Přehledové schéma softwaru

6 Software pro detekci dvojmontáže

Tato kapitola popisuje vývoj softwaru pro detekci dvojmontáže z reálných dat. Dále je věnována programovacímu jazyku Python, ve kterém je program vyvíjen. Konkrétně se jedná o verzi 3.7. Samotný software je naprogramován podle přehledového schématu na obrázku 5.1 a je detailněji popsán v této kapitole.

6.1 Python

Programovací jazyk Python je interpretovaný, objektově orientovaný programovací jazyk. Díky vysokoúrovňovým datovým strukturám nachází uplatnění v oblasti tzv. rapid aplication development, kdy jsou v průběhu vývoje softwaru vytvářeny různé prototypy. Tento způsob umožňuje odhalení chyb již v průběhu vývoje programu a je minimální riziko, že se objeví velký problém na konci vývoje. Rovněž má využití jako skriptovací jazyk. Samotnou filosofii Pythonu je důraz na přehlednou a jednoduchou čitelnost kódu. Syntaxe kódu je tedy co nejjednodušší a je to zajištěno velkým množstvím knihoven obsahujících funkce pro řešení mnoha problémů. Při jejich použití je využito co nejméně řádků kódu. Vytvořený program není kompilován do spustitelného programu, ale překládán pouze do byte kódu, který je poté implementován. Tímto je možná snadná přenositelnost a spustitelnost programu na různých platformách. Python je vyvíjen jako open source projekt. Existuje tedy mnoho různých implementací pro různá prostředí. [15]

Při vývoji softwaru pro detekci dvojmontáže a softwaru pro simulaci vlivu umístění senzoru na detekci je využito několika pomocných knihoven, kterým je věnována podkapitola č. 6.1.1 níže.

6.1.1 Pomocné knihovny

Python je v hojné míře využíván vědeckou komunitou. Přispívá k tomu velké množství pomocných knihoven sloužících k usnadnění a urychlení práce. Knihovny je prvně potřeba nainstalovat a poté je importovat do programu. Vzhled části kódu pro importování knihovny do programu zobrazuje obrázek 6.1.

```
import numpy as np
import math
```

Obr. 6.1: Příklad vložení knihovny do programu

Mnou používané knihovny v programech jsou následující:

- NumPy - základní vědecká knihovna pro numerické výpočty. Knihovna poskytuje různé nástroje pro práci s vícerozměrnými poli nebo maticemi. Příkladem lze uvést nástroje pro matematické, logické operace, diskrétní furierovou transformaci, základní statistické funkce nebo různé simulace. Jádro knihovny tvoří objekt *ndarray*. Jedná se o n-dimenzionální pole, na které jsou vázané dříve zmíněné nástroje. [16]
- Matplotlib - jedná se o vykreslovací knihovnu pro Python a další knihovny. Primárně pro vizualizaci dat získaných za pomocí NumPy. Slouží k vytváření 2D, či 3D grafů, případně vykreslení různých simulaci nebo animací. Vzhledově a syntaxí je podobný programu MATLAB. V této práci je knihovna využita pro animaci průběhu přejezdu dvojmontáže přes senzor. [17]
- SciPy - knihovna pro vědecké výpočty. Přidává řešení složitějších matematických problémů. Knihovna je rozdělena na několik podkategorií, sloužících pro řešení různých problémů. Příkladem *optimize* (optimalizace, výpočet kořenů rovnic), *signal* (zpracování signálů), *fft* (Fourierova transformace), *stats* (statistika) atd. [18]
- Math - obsahuje běžně využívané matematické funkce. [19]
- Shapely - knihovna pro práci s geometrickými objekty. Umožňuje vykreslování širokého spektra geometrických tvarů a následné funkce pro geometrické výpočty. [20]

6.2 Detekce dvojmontáže

Základem detekce dvojmontáže je soubor s naměřenými daty ze senzoru (viz kapitola 4) po převodu z A/D převodníku (viz elektronická příloha). Data jsou ukládána ve formátu *csv*, kdy jako oddělovač je použitý tabulátor. V souboru se nachází tři sloupce. Pro mé potřeby je důležitý poslední sloupec, ve kterém se nachází potřebná reálná data pro detekci dvojmontáže. Data jsou uložena v hexadecimálním tvaru, proto je použita funkce z knihovny *NumPy* pro převod hodnoty na tvar *int16*.

Takto převedená data je potřeba prahovat. Data obsahují pohyblivou nulu, pro kterou je potřeba najít začátek průběhu, který je rozpoznatelný podle prudkého nárůstu hodnoty signálu. Tento začátek je hledán za pomocí funkce ořezání. Na začátku je vytvořeno pole nazvané *orezat*, do kterého jsou vloženy čtyři bool hodnoty *False*. Následně za pomocí cyklu jsou porovnávány rozdíly čtyř po sobě jdoucích bodů a testuje se splnění podmínky, kdy je rozdíl dvou hodnot vedle sebe větší než hodnota podmínky. Podmínka je nastavena na hodnotu 200, protože změny na začátku signálu jsou minimální a proto je tato hodnota dostačující. Po splnění podmínky je do pole *orezat* uložena na danou pozici hodnota *True*. V případě, že jsou splněny

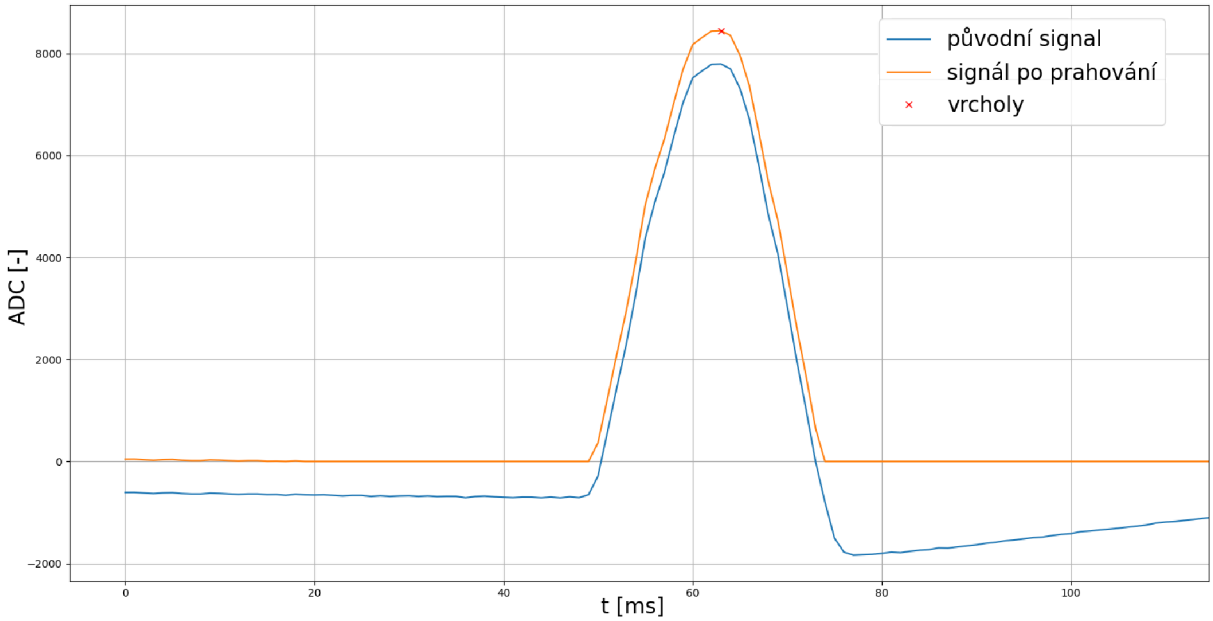
všechny podmínky (hodnota pole je *True*), je nalezený začátek signálu, který je prohlášen za novou nulu. K tomuto bodu je přičtena jeho hodnota a následně i k dalším bodům po něm. Hodnoty signálu, předcházející tomuto bodu, jsou nulovány. Tímto je zajištěn správný signál, ve kterém je již možné vyhledávat jednotlivé vrcholy.

Samotné vyhledávání vrcholů je založeno na funkci *find_peaks* z knihovny *SciPy*. Funkce vyhledává na principu vyhledávání lokálního maxima v jednorozměrném poli, přičemž jednoduše porovnává sousední hodnoty. Její parametry jsou následující: [18]

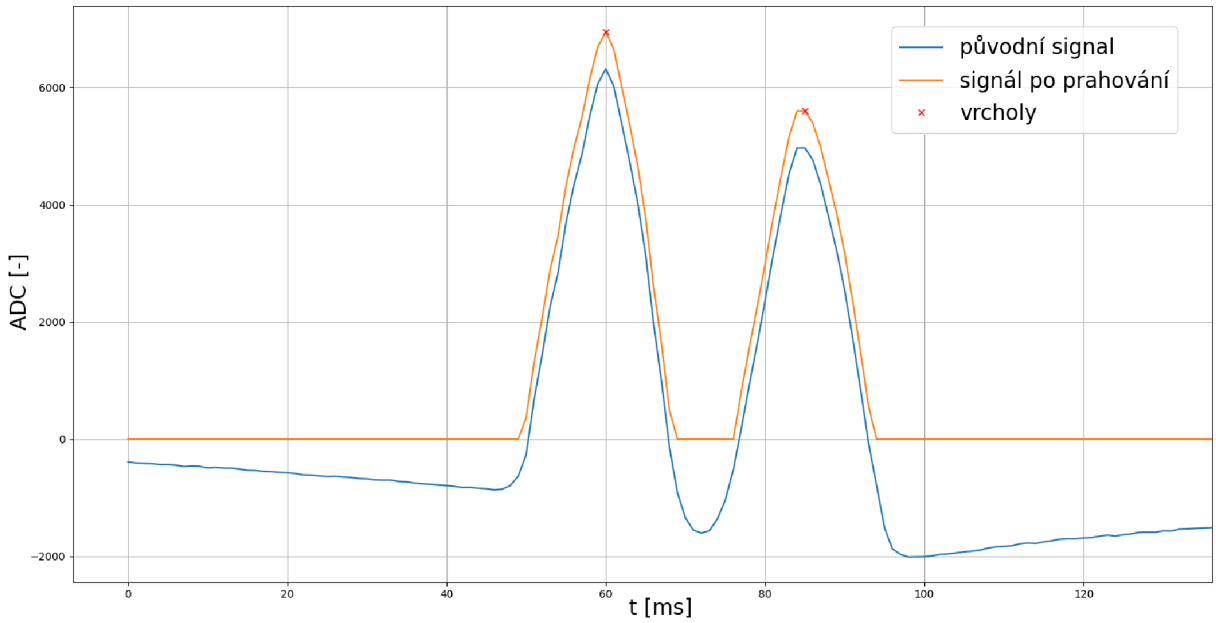
- x - vstupní signál, ve kterém chceme vyhledávat.
- *height* - požadovaná výška vrcholu. Pokud je zadána pouze jedna hodnota, je tato hodnota brána jako minimální požadovaná. V případě zadání druhé hodnoty, je vrchol vyhledáván v daném intervalu hodnot.
- *threshold* - minimální výška mezi sousedními vrcholy.
- *distance* - hodnota určující minimální vzdálenost mezi sousedními vrcholy. Vždy jsou odstraňovány menší vrcholy, dokud není splněna podmínka pro všechny zbývající vrcholy.
- *prominence* - důležitost jednotlivých vrcholů. Jedná se o minimální výškovou vzdálenost mezi jednotlivými vrcholy.
- *width* - požadovaná šířka špičky ve vzorcích, nebo-li šířka vrcholu podle x-ové osy.
- *wlen* - nachází využití při výpočtu prominence vrcholů. Pro jeho použití je nutné zadat jeden z parametrů *width* nebo *prominence*.
- *rel_height* - slouží k výpočtu šířky vrcholu.

V mém konkrétním případě je využit parametr x, kde je na vstup vložen upravený signál. Následně je použitý parametr *height*, který je nastavený na hodnotu 2500, kdy je tato hodnota určena jako spodní hodnota zatížení pneumatiky ve dvojmontáži. Druhým používaným parametrem je *prominence*. Tento parametr je používán, aby nebyly vyhledávány vrcholy hned vedle sebe a tímto se předešlo chybné detekci. Výstupem funkce je hledaný počet špiček. Dalším krokem softwaru je roztřídění podle počtu špiček. Pokud počet špiček v signálu je nula - je rozhodnuto, že se jedná pouze o šum a signál není ukládán do souboru. V případě, že je vyhledána jedna špička - do souboru je zaznamenána detekce jednoduché montáže. V posledním případě, kdy jsou nalezeny dvě špičky - jedná se o dvojmontáž a výsledek je zapsán do souboru.

Výstupní soubor, do kterého jsou zaznamenávány výsledky rozpoznání, je ve formátu *csv*. Je do něj zapisován výsledek detekce o jakou montáž se jedná a prahovaný signál, ze kterého bylo toto rozpoznání určeno. Struktura uloženého souboru obsahuje hlavičku s popisem *Detekce* a *Signál*. Pod nimi následují dvě dříve zmíněné položky - *detekovaná montáž* a *signál*.



Obr. 6.2: Nalezené vrcholy pro jednoduchou montáž



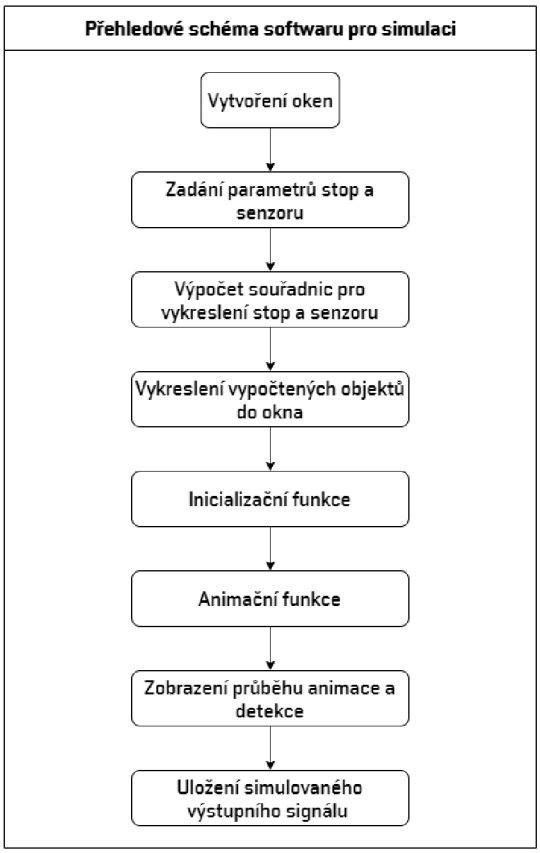
Obr. 6.3: Nalezené vrcholy pro dvojmontáž

7 Simulace vlivu umístění senzoru

Kapitola popisuje vývoj softwaru pro simulaci vlivu umístění senzoru na detekci dvojmontáže. Účelem softwaru je simulovat výstupní data senzoru po průjezdu pneumatiky pod různými úhly. Hlavní cíle programu jsou následující:

- vykreslení dvojice stop dle vypočtených parametrů (šířka stopy a mezera mezi nimi)
- vykreslení senzoru dle zadaných parametrů (počáteční souřadnice, úhel náklonu, délka a šířka). Úhel náklonu senzoru bude v rozsahu od 0-90°, přičemž 90° simuluje umístění kolmo na směr dopravy.
- úhel pohybu pneumatiky bude rovnoběžný s okrajem vozovky(tj. není počítáno s různými úhly nájezdu pneumatiky na senzor)
- animace průběhu přejezdu přes senzor s výstupní detekcí
- zajištění obdobného tvaru výstupního signálu předchozím porovnáním výstupu simulace s reálnými daty

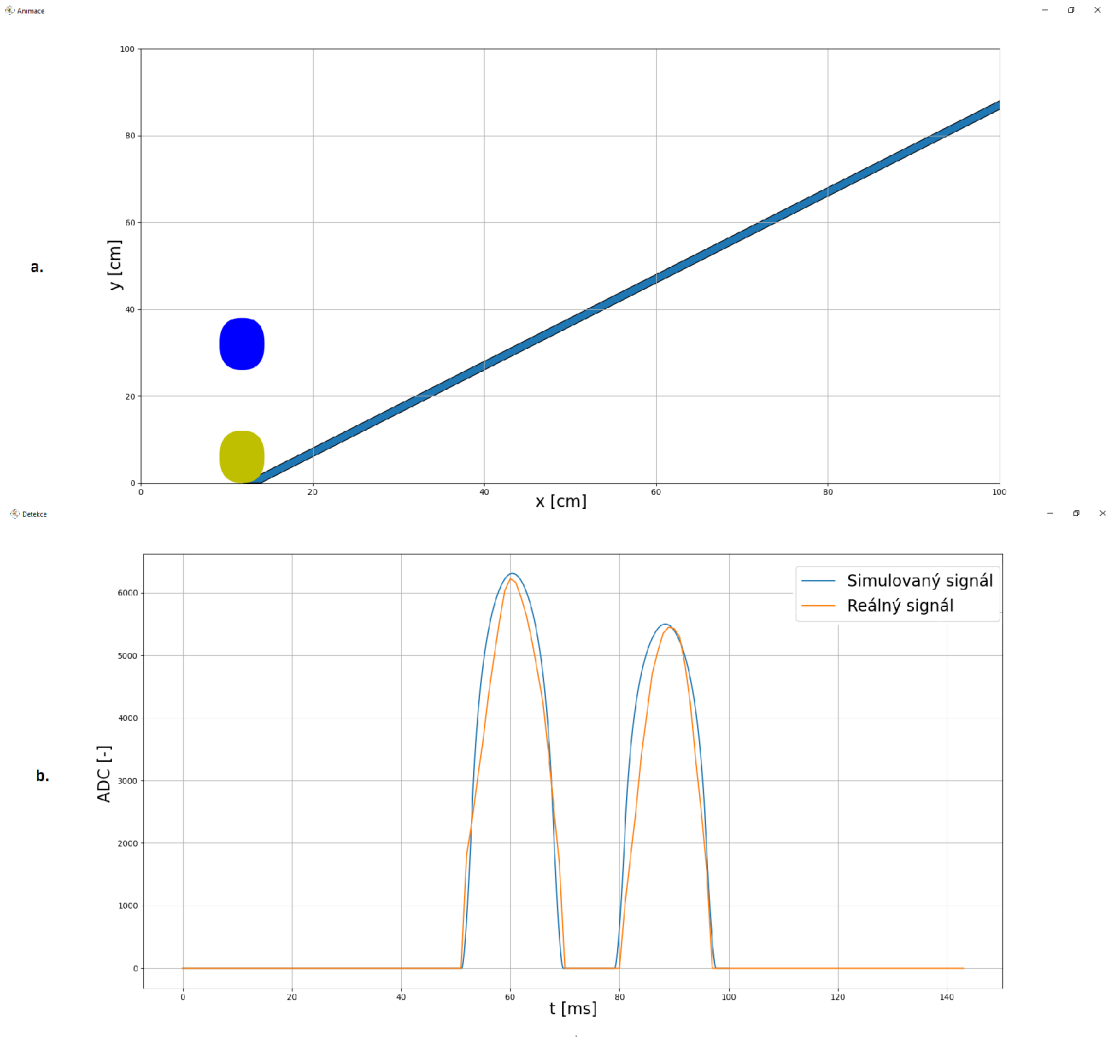
Následující obrázek zobrazuje přehledové schéma programu pro simulaci. Dané bloky jsou detailněji popsány v této kapitole.



Obr. 7.1: Přehledové schéma softwaru pro animaci

7.1 Simulace

Výsledný program pro simulaci je rovněž vytvořen za pomocí programovacího jazyka Python. Je tvořen dvěma okny - první je okno animace (viz 7.2a), ve kterém je možno sledovat průběh simulace. Skládá se ze dvou stop a senzoru, vykreslených dle požadovaných parametrů. Druhé okno (viz 7.2b) zobrazuje průběh detekce průjezdu stop přes senzor. V případě porovnávání výstupu simulace s reálnými daty je zde přidán průběh reálných dat (oranžový průběh v grafu). Podrobnějšímu popisu se věnují podkapitoly uvedené níže.



Obr. 7.2: Vzhled okna s animací (a) a detekcí (b)

Základem je knihovna Pythonu s názvem *Matplotlib*. V ní je využita podknihovna *Animation*, která nabízí funkci *FuncAnimation*. Ta je schopná vytvářet základní animace. Následující body popisují její parametry. [17]

- *fig* - okno animace.
- *func* - funkce, která je volána vždy při každém kroku animace.
- *init_func* - inicializační funkce, v niž jsou vytvořené objekty, které budou následně animované.
- *frames* - určuje počet kroků animace.
- *interval* - zpoždění mezi jednotlivými kroky animace v ms.
- *blit* - bool hodnota sloužící k optimalizaci. Pokud je nastavena na hodnotu $True$ je výsledný obraz překreslován.
- *repeat* - bool hodnota určující, zda se má animace opakovat nebo ne.

Nejdůležitější části algoritmu je animační funkce pojmenována *animate*. Jedná se o parametr *func* a je tedy volána při každém kroku animace. Jako první krok jsou v ní nastavovány souřadnice stop, vytvořených podle postupu v kapitole 7.1.1. Následuje rozhodování, zda dochází k průniku mezi stopami a senzorem. V prvotní fázi vývoje probíhala detekce pouze stavově. Byly nadefinované tři stavy - 0 (žádný průnik), 1 (na senzoru se nachází jedna pneumatika) a 2 (na senzoru se nachází dvojmontáž). Za tímto účelem byla použita funkce *intersect*. Výstupem je buď hodnota *True* - dochází k průniku nebo *False* - nedochází k průniku. Pro každou stopu se tyto podmínky testují zvlášť. Zmíněné testování je využíváno ve finálním algoritmu.

Reálná data průběhů reflektují závislost zatížení na senzoru. Pro přiblížení se k reálným datům je potřeba tento vliv promítnout do simulace. K detekci průniku je přidána funkce pro sledování překrytí stopy se senzorem. Skládá se z funkce *intersection*, kdy její návratová hodnota jsou souřadnice tvaru překrytí. Na tento nově získaný objekt je možné použít příkaz *area*. Tímto je vypočtena plocha překrytí, která je následně násobena amplitudovou konstantou, čímž je zajištěna stejná amplituda signálu pro porovnání s reálnými daty. Vypočtená hodnota je zapisována do pole a následně vynesena do okna detekce v závislosti na čase. Výpočet velikostí stop jsou popsány v kapitole 7.2.

7.1.1 Stopa pneumatiky

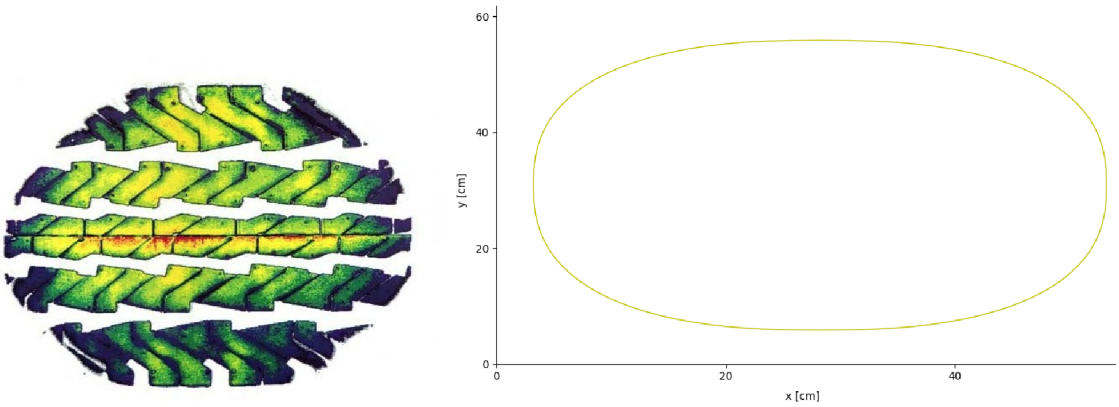
Pro správnou simulaci je důležitý tvar stopy pneumatiky. Z počátku bylo využíváno hodně zjednodušené stopy v podobě obdélníku. Později byla nahrazená tzv. superelipsou, kdy se jedná o křivku, zachovávající si geometrické rysy poloviční hlavní osy a poloviční vedlejší osy a symetrii okolo nich. Parametrický popis popisují rovnice 7.1 a 7.2. Změnami exponentu r je možné docílit různých křivek. Pro $r = 2$ je výstupem elipsa, pokud je $r < 2$, výsledný tvar se blíží kosočtverci. Mnou využívaná hodnota exponentu je $r > 2$, kdy se výstup přibližuje obdélníku a jedná se o mnou hledaný tvar podobný reálnému tvaru stopy. Porovnání příkladu reálné stopy pneumatiky a stopy pneumatiky využívané při simulaci vyobrazuje 7.3a a 7.3b. [23]

$$x = a \cdot cos^{2/r} \cdot t \tag{7.1}$$

$$y = b \cdot sin^{2/r} \cdot t \tag{7.2}$$

kde:

a, b ... délka poloos [m]
r ... exponent [-]



(a) (b)

Obr. 7.3: a) Reálná stopa [21] a b) Simulační stopa

Pro vykreslení vypočtených stop do objektu animace je použita podknihovna *Patches* obsažena v knihovně *Matplotlib*. Konkrétně je využita funkce pro vytvoření polygonu. Prvním parametrem je vložení pole obsahující souřadnice. Následně jsou využity ještě dva parametry - *Closed* (určuje, jestli polygon bude uzavřený) a *Facecolor* (barva polygonu).

7.1.2 Funkce senzoru

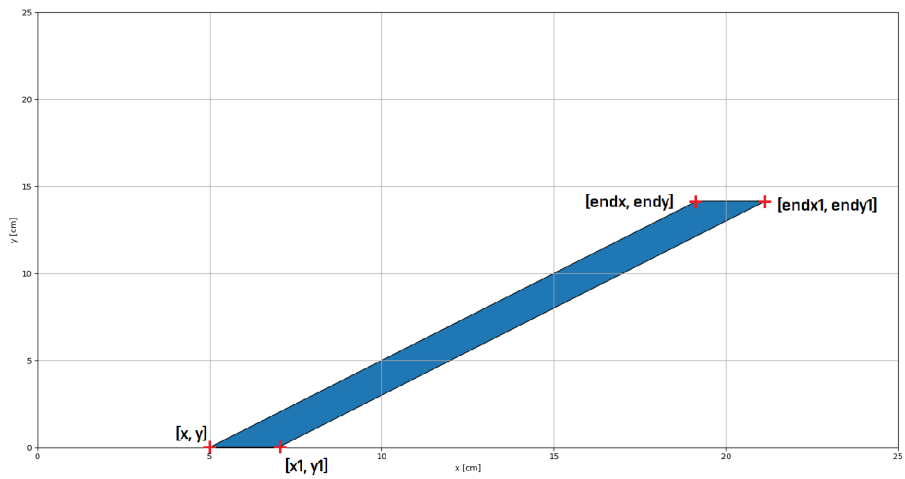
Pro vykreslení senzoru je vytvořena funkce *sensor*. Má čtyři vstupní parametry - *point, angle, length a width*. Prvním vstupním parametrem je *point* - slouží k zadání vstupních souřadnic [x, y] senzoru. K počátečním souřadnicím je přičtený parametr *width* (vznik bodů x_1 a y_1), čímž je zajištěna počáteční úsečka, od které je vynášen požadovaný senzor do prostoru. Ke správnému rozšíření do prostoru je potřebný výpočet koncových bodů, které jsou vypočteny pomocí goniometrických funkcí. Pro jejich použití je potřeba knihovny *math*. Knihovna obsahuje všechny základní matematické funkce. Koncové body jsou počítány podle vztahů 7.3 a 7.4. V mém případě využívám funkce *sin, cos, tan a radians*. Poslední zmiňovaná slouží pro převod stupňů na radiány. Po zajištění potřebných bodů je možné vytvořit finální senzor. K tomuto slouží funkce *Polygon*, ve které jsou zadány jako argument čtyři vypočtené souřadnice.

$$endx = x + length \cdot cos(angle) \tag{7.3}$$

$$endy = y + length \cdot sin(angle) \tag{7.4}$$

kde:

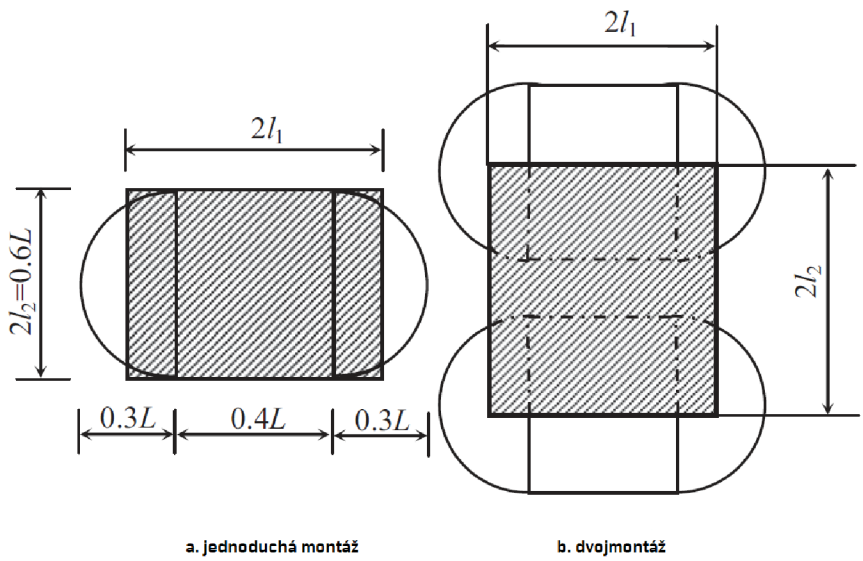
x, y	... počáteční body
$endx, endy$	... koncové body
$length$	... délka senzoru [cm]
$angle$	... úhel náklonu senzoru [°]



Obr. 7.4: Struktura bodů pro vykreslení senzoru

7.2 Výpočet rozměrů stopy

Pro správnou simulaci výstupního signálu je nutné znát rozměry stopy, které jsou zadávány do simulace. Výpočtu rozměrů je věnována tato kapitola, která čerpá z knihy [22]. Je zde využíváno tvaru kontaktní plochy dle obrázku 7.5. Tvar kontaktní plochy je složen z obdélníku o rozměrech $0,4L \cdot 0,6L$ a dvou půlkruhů s poloměrem $0,3L$. Výsledná styčná plocha pro jednoduchou montáž (vyšrafovaná oblast obr. 7.5a) je poté obdélník s délkou $2l_1$ a šířkou $2l_2$. Pro dvojmontáž je výsledná délka plochy $2l_1$ totožná. V případě šířky se zde vychází z toho, že samotné l_2 je polovina vzdálenosti mezi středy obou pneumatik. Finální šířka je poté rozměr $2l_2$, při kterém je použit průměr kontaktní plochy jednoduché montáže d_s při zatížení. Styčná plocha dvojmontáže je vyšrafovaný obdélník na obr. 7.5b. Následují samotné vzorce pro popsaný výpočet.



Obr. 7.5: Styčná plocha pneumatiky [22]

Prvním výpočtem je zjištěna styčná plocha jednoduché montáže s vozovkou. Je získána pomocí vztahu 7.5, kdy je potřeba znát sílu působící na nápravu a tlak nahuštění pneumatiky.

$$A_c = \frac{F}{p} \ [\mathrm{m}^2] \tag{7.5}$$

kde:

A_c ... kontaktní plocha [m^2]
F ... síla [N]
p ... tlak pneumatiky [Pa]

Druhým výpočtem je délka L. Vztah je odvozen z tvaru kontaktní plochy, ve které je možné počítat plochu dle vztahu 7.6. Následnou úpravou je mnou využívaný výpočet L, viz rovnice 7.7. Posledním výpočtem je průměr jednoduché montáže d_s při zatížení pomocí 7.8.

$$A_c = 0,4L \cdot 0,6L + \pi \cdot (0,3L)^2 = 0,5227L^2 \text{ [m}^2\text{]} \tag{7.6}$$

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0.5227}} \text{ [m]} \tag{7.7}$$

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot A_c}{\pi}} \text{ [m]} \tag{7.8}$$

Díky předchozím výpočtům je možné zjistit hledané rozměry stopy. Vzorec 7.9 slouží pro výpočet délky plochy a následující vzorec 7.10 je pro výpočet její šířky. Příklad výpočtu s dosazením se nachází v kapitole 7.3.

$$2l_1 = \frac{A_c}{0,6 \cdot L} \text{ [m]} \tag{7.9}$$

$$2l_2 = 1,5 \cdot d_s \text{ [m]} \tag{7.10}$$

kde:

$2l_1$ ... délka kontaktní plochy [m]
$2l_2$ ... šířka kontaktní plochy [m]
L ... délka [m]
d_s ... průměr zatížené pneumatiky [m]

Z daných výpočtů je využíván získaný rozměr šířky. Pro zajištění vstupních dat do simulace je potřeba tento rozměr rozdělit na dvě stopy pneumatik a mezeru mezi nimi. K tomuto účelu je použit vzorec 7.11, umožňující použití pouze v případě, kdy je znám rozměr použité pneumatiky ve dvojmontáži. Následně je tento vypočtený rozměr mezery odečten od šířky celkové stopy a ta je podělena dvěma. Tímto jsou zajištěna vstupní data do simulace.

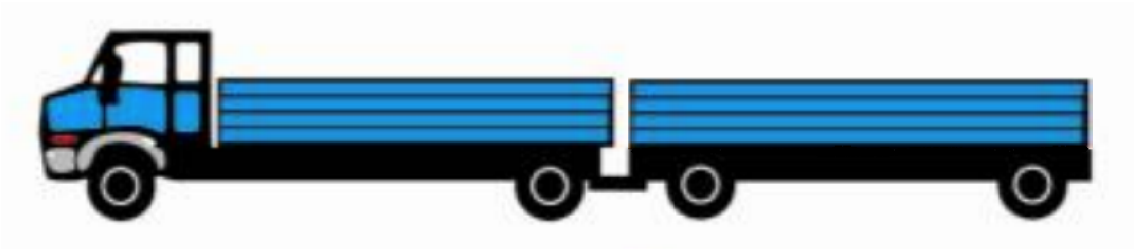
$$mezera = (min.\ osová\ vzd.) - (šířka\ ráfku) \text{ [m]} \tag{7.11}$$

$$šířka\ jedné\ stopy = \frac{2l_2 - mezera}{2} \text{ [m]} \tag{7.12}$$

7.3 Ověření výpočtu rozměrů stopy

Kapitola se věnuje ověření výpočtu velikosti stopy pneumatik při zatížení a mezery mezi pneumatikami. Primárním cílem tohoto měření bylo reálné ověření výpočtu plochy stop pneumatiky v klidovém stavu. Druhým cílem bylo zjištění rozměru mezery mezi pneumatikami, umístěnými ve dvojmontáži a následném porovnání této hodnoty s údaji udávanými výrobci v katalogových listech.

Měření proběhlo na zatíženém nákladním vozidle Renault Premium 340. Jedná se o dvounápravový tahač, kdy zadní náprava byla opatřena dvojmontáží. K tahači byl zapojený přívěs se dvěma nápravami opatřenými dvojmontáží, na kterých rovněž proběhlo měření. Následně proběhlo měření na dvou kamionech, které byly opatřeny dvojmontáží na zadní nápravě, přičemž jeden z nich měl návěs opatřený dvojmontáží. Schéma vozidel zobrazuje obrázek 7.6 a 7.7.



Obr. 7.6: Schéma nákladního vozidla [24]

Obr. 7.7: Schéma kamionu s návěsem [24]

Postupně jsem provedl měření na třech nápravách. Postup měření byl následovný. První byl změřen tlak v pneumatice za pomocí manometru (v obchodní branži označován jako pneuměřič) s rozsahem 0,5-12 baru. Následovalo měření samotného rozměru stopy pneumatiky za pomocí svinovacího metru s rozsahem 3 m,

kdy postupně byla změřena délka a šířka stopy. Každé měření proběhlo desetkrát. Závěrem byla změřena osová vzdálenost mezi středy ráfků a vzdálenost mezi pneumatikami. Pro výpočty rozměrů byly použity vztahy z kapitoly 7.2. Výsledky měření a vypočtené hodnoty, respektive katalogové hodnoty (zdroje: [25][26][27][28][29]) , se nachází v následujících tabulkách 7.1 (ověření velikosti stopy) a 7.2 (ověření velikosti mezery). Jednotlivé řádky v tabulkách si vzájemně odpovídají.

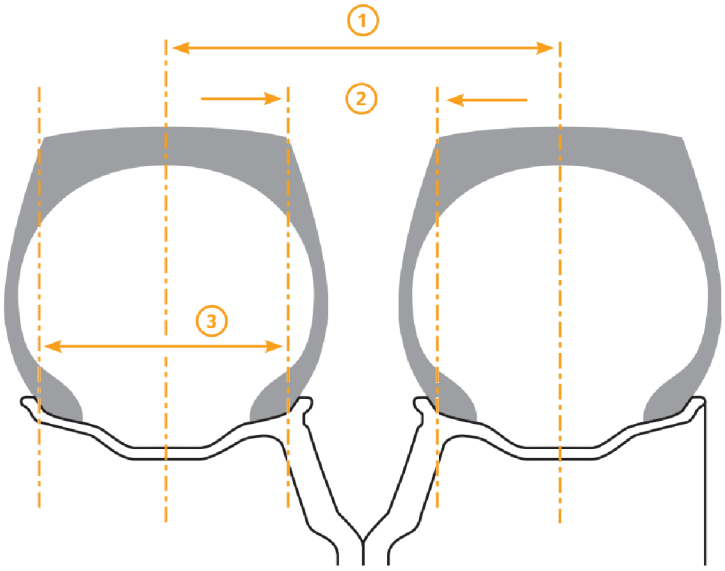
Nákladní vozidlo									
				Změřeno		**Vypočteno**			
č.	**Rozměr**	**m** [kg]	**p** [bar]	**$2l_1$** [cm]	**$2l_2$** [cm]	**$2l_1$** [cm]	**$2l_2$** [cm]	**$\Delta 2l_1$** [cm]	**$\Delta 2l_2$** [cm]
1.	285/70 R19,5	10 000	8,8	38,9	56,8	40,2	56,5	1,3	0,3
2.	285/70 R19,5	10 000	8,8	38,9	56,8	40,2	56,5	1,3	0,3
3.	315/70 R22,5	14 000	9,0	43,0	65,5	47,1	66,1	4,1	0,6
4.	315/70 R22,5	14 000	8,9	43,5	65,8	47,3	66,5	3,8	0,7
5.	315/70 R22,5	13 500	8,9	44,0	65,0	46,5	65,3	2,5	0,3
6.	315/70 R22,5	13 500	8,9	43,7	64,9	46,5	65,3	2,8	0,4
Přívěs (Návěs)									
7.	235/75 R17,5	7 000	7,4	32,5	51,9	36,7	51,6	4,2	0,3
8.	235/75 R17,5	7 000	7,5	33,0	52,0	36,5	51,2	3,5	0,8
9.	235/75 R17,5	7 000	7,6	32,5	50,5	36,2	50,9	3,7	0,4
10.	235/75 R17,5	7 000	7,5	32,9	51,0	36,5	51,2	3,6	0,2
11.	285/70 R19,5	13500	8,8	41,8	64,5	46,7	65,7	4,9	1,2
12.	285/70 R19,5	13500	8,8	41,5	64,8	46,7	65,7	5,2	0,9
13.	285/70 R19,5	13500	8,9	42,3	65,2	46,5	65,3	4,2	0,1
14.	285/70 R19,5	13500	8,8	42,0	65,3	46,7	65,7	4,7	0,4

Tab. 7.1: Naměřená data dvojmontáže nákladního vozidla

Pro vyhodnocení rozměrů stopy jsou vypočteny rozdíly délky a šířky za pomocí následujících vztahů 7.13 a 7.14. Výsledné hodnoty rozdílů se nacházejí v tabulce 7.1. Pro zjištění mezery mezi stopami je potřeba znát rozměry udávané výrobcem v katalogových listech. Obrázek 7.8 zobrazuje schéma dvojmontáže s třemi kótami. Kóta č.1 značí minimální osovou vzdálenost pro bezproblémové použití vybrané pneumatiky v dvojmontáži. Č.2 - mezera mezi pneumatikami a č.3 - šířka ráfku. Dle tohoto schématu je počítána mezera mezi stopami. Jedná se o rozdíl minimální osové vzdálenosti a šířky ráfku (viz rovnice 7.15). Z dané hodnoty je rovněž vypočtena odchylka od naměřené hodnoty (rovnice 7.16). Dané rovnice se nacházejí níže v textu.

Nákladní vozidlo					
			Změřeno	**Katalogové hodnoty**	
č.	**Výrobce**	**Pneumatika**	**Osová vzdálenost [cm]**	**Šířka ráfku [cm]**	**Min. osová vzdálenost [cm]**
1.	Goodyear	Regional RHD2	32,0	20,9	31,8
2.	Goodyear	Regional RHD2	31,7	20,9	31,8
3.	Bridgestone	M729	35,5	22,9	-
4.	Bridgestone	M729	35,6	22,9	-
5.	Hankook	DL20w	36,2	22,9	35,1
6.	Hankook	DL20w	35,8	22,9	35,1
Přívěs (Návěs)					
7.	Matador	THR4	29,8	17,1	26,2
8.	Matador	THR4	29,0	17,1	26,2
9.	Nokian	E-truck Drive	30,0	17,1	26,2
10.	Nokian	E-truck Drive	29,7	17,1	26,2
11.	Hankook	TH22	32,8	20,9	31,8
12.	Hankook	TH22	33,1	20,9	31,8
13.	Hankook	TH22	32,5	20,9	31,8
14.	Hankook	TH22	32,7	20,9	31,8

Tab. 7.2: Naměřená data vzdáleností mezi pneumatikami



Obr. 7.8: Schéma pneumatik ve dvojmontáži [30]

Nákladní vozidlo				
		Změřeno	**Vypočteno**	
č.	**Pneumatika**	**Mezera$_1$ [cm]**	**Mezera$_2$ [cm]**	**ΔMezera [cm]**
1.	Regional RHD2	10,1	10,9	0,8
2.	Regional RHD2	9,9	10,9	1,0
3.	M729	11,0	-	-
4.	M729	10,8	-	-
5.	DL20w	11,5	12,2	0,7
6.	DL20w	11,2	12,2	1,0
Přívěs				
7.	THR4	9,0	9,1	0,1
8.	THR4	9,0	9,1	0,1
9.	E-truck Drive	9,5	9,1	0,4
10.	E-truck Drive	9,4	9,1	0,3
11.	TH22	10,2	10,9	0,7
12.	TH22	10,1	10,9	0,8
13.	TH22	10,6	10,9	0,3
14.	TH22	10,3	10,9	0,6

Tab. 7.3: Naměřená a vypočtená data vzdáleností mezi pneumatikami

$$\Delta 2l_1 = |2l_{1změřeno} - 2l_{1vypočteno}| \tag{7.13}$$

kde:

$\Delta 2l_1$ ... rozdíl délky stopy [cm]
$2l_{1změřeno}$ ... naměřená délka stopy [cm]
$2l_{1vypočteno}$ ... vypočtená délka stopy [cm]

$$\Delta 2l_2 = |2l_{2změřeno} - 2l_{2vypočteno}| \tag{7.14}$$

kde:

$\Delta 2l_2$ ... rozdíl šířky stopy [cm]
$2l_{2změřeno}$ ... naměřená šířka stopy [cm]
$2l_{2vypočteno}$ ... vypočtená šířka stopy [cm]

$$mezera = (min.\ osová\ vzd.) - (šířka\ ráfku)\ [\mathrm{cm}] \tag{7.15}$$

$$\Delta mezera = (mezera_1) - (mezera_2)\ [\mathrm{cm}] \tag{7.16}$$

7.3.1 Příklad výpočtu

Příklad vypočtu rozměrů stop a jejich odchylek od naměřených hodnot je ukázán pro první řádek tabulky 7.1. Prvním krokem je výpočet kontaktní plochy dle rovnice 7.5.

$$A_c = \frac{F}{p} = \frac{m \cdot g}{p \cdot 100000} = \frac{10000 \cdot 9,81}{8,8 \cdot 100000} = 0,1115 \text{ m}^2 \tag{7.17}$$

Následuje výpočet délky L (viz rovnice 7.7) a průměru (viz rovnice 7.8).

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0.5227}} = \sqrt{\frac{0,1115}{0,5227}} = 0,4619 \text{ m} \tag{7.18}$$

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot A_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1115}{\pi}} = 0,3767 \text{ m} \tag{7.19}$$

Finální rozměry stop jsou délka l_1 dle rovnice 7.9 a šířka l_2 podle rovnice 7.14:

$$2l_1 = \frac{A_c}{0,6 \cdot L} = \frac{0,1115}{0,6 \cdot 0,4619} = 0,402 \text{ m} = 40,2 \text{ cm} \tag{7.20}$$

$$2l_2 = 1,5 \cdot d_s = 1,5 \cdot 0,3767 = 0,565 \text{ m} = 56,5 \text{ cm} \tag{7.21}$$

Odchylky mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami rozměrů stopy:

$$\Delta 2l_1 = |2l_{1změřeno} - 2l_{1vypočteno}| = |38,9 - 40,2| = 1,3 \text{ cm} \tag{7.22}$$

$$\Delta 2l_2 = |2l_{2změřeno} - 2l_{2vypočteno}| = |56,8 - 56,5| = 0,3 \text{ cm} \tag{7.23}$$

Následuje výpočet mezery mezi stopami a její odchylka:

$$mezera = (min.\ osová\ vzd.) - (šířka\ ráfku) = 31,8 - 20,9 = 10,9 \text{ cm} \tag{7.24}$$

$$\Delta mezera = (mezera_1) - (mezera_2) = |10,1 - 10,9| = 0,8 \text{ cm} \tag{7.25}$$

7.3.2 Vyhodnocení měření

Měřením, které bylo popisováno v této podkapitole, byla ověřována velikost kontaktní plochy dvojmontáže a následně velikost mezery mezi pneumatikami umístěnými ve dvojmontáži. Celkově bylo naměřeno 14 vzorků, přičemž každé měření vzdálenosti proběhlo desetkrát. Naměřené hodnoty vzdálenosti v tabulkách jsou zprůměrované hodnoty těchto měření. Bylo to z důvodu minimalizování chyby vzniklé

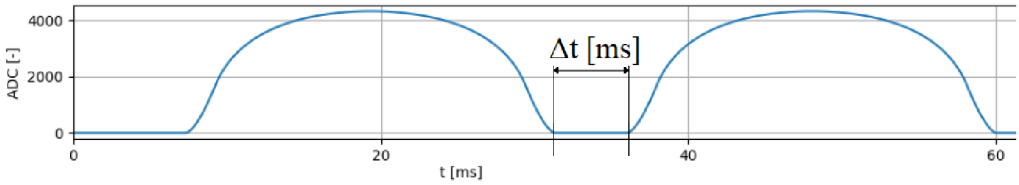
při přikládání metru k montáži. K naměřeným hodnotám byly dohledány jejich katalogové hodnoty a poté vypočítány odchylky, dle zmíněných vzorců v předcházející kapitole. Měření dopadlo úspěšně a byla ověřena použitelnost vzorců pro simulaci. V případě měření šířky stopy dvojmontáže (viz tabulka 7.1) dosahovala největší odchylka $\Delta 2l_2$ hodnoty 1,2 cm. Zbylé odchylky se pohybovaly do jednoho centimetru. Proto lze měření prohlásit za úspěšné. Dané odchylky mohly nejpravděpodobněji vzniknout měřením na nerovném povrchu. V případě měření délky stopy byla největší odchylka $\Delta 2l_1 = 5{,}2$ cm. Tato hodnota je rovněž přijatelná, z důvodu následného nepoužívání této hodnoty v samotné simulaci. Nicméně daná odchylka, zde mohla vzniknou rovněž nerovnostmi povrchu.

Měření mezery mezi pneumatikami probíhalo stejným způsobem. Hodnoty pro výpočet mezery se nachází v tabulce 7.2. Za pomocí těchto hodnot byly vypočteny katalogové mezery a porovnány s naměřenými. Vypočtené hodnoty odchylek mezery se nachází v tabulce 7.3. Největší odchylka je $\Delta Mezera = 1$ cm. Tato odchylka je větší než byla předpokládána, nicméně měření se dá prohlásit za úspěšné, z důvodu, že zbylé hodnoty odchylek se pohybují v průměru okolo 0,5 cm. Tyto odchylky mohly vzniknout rovněž nerovnoměrným povrchem, případně nepřesnosti při měření z důvodu ztížených podmínek při přístupu k montáži.

Pro zpřesnění daných výpočtů by bylo potřeba naměření a ověření na dalších vzorcích, ale pro použití těchto výpočtu v diplomové práci je toto měření průkazné a dostačující. Naměřené rozměry jsou součástí elektronické přílohy.

8 Zhodnocení simulací

Kapitola se věnuje vyhodnocení simulací dvěma způsoby. Prvním způsobem je porovnání výstupu simulace s reálnými daty (viz elektronická příloha). Druhým způsobem je výběr pneumatik pro umístění do dvojmontáže a nasimulování jejich průběhů při přejezdu senzoru. Důležitým parametrem pro rozpoznání dvojmontáže v obou případech je doba časové prodlevy Δt mezi vrcholy. Měřenou dobu časové prodlevy Δt vyobrazuje obrázek 8.1. Hodnota je zde měřena bez tolerance - doba časové prodlevy je měřena pouze v rozsahu, kdy hodnota ADC [-] je rovna 0. Doba časové prodlevy je závislá na rychlosti přejezdu stopy přes senzor. V simulaci je využívána konstantní rychlost stopy 36 km/h.



Obr. 8.1: Měření doby časové prodlevy Δt

8.1 Porovnání s reálnými daty

Prvním ze způsobů pro vyhodnocení simulace je porovnání výstupního signálu s reálně naměřenými daty. Jedná se o stejná data použitá pro tvorbu prvního softwaru pro detekci dvojmontáže. Data jsou obsažena v elektronické příloze, kdy se jedná o reálné průběhy pro senzor umístěný pod úhlem 40°. Z tohoto důvodu je výsledné porovnání pouze pro tento úhel. Pro porovnání byly využity již prahované průběhy reálných dat. Prahování probíhalo stejným způsobem jako u prvního softwaru (postup je zapsán v kapitole 6.2). Problém při tomto způsobu porovnání nastává v neznalosti použité pneumatiky na dané dvojmontáži - není možné jednoznačné využití vzorců popsaných v kapitole 7.2. V tomto případě je postupováno následovně. Jako hmotnost je brána hodnota vrcholu ADC, kdy je vybrán nižší z vrcholů. Následně je stanoven hustící tlak, dle běžně využívaných tlaků v reálných podmínkách (tj. 6 - 10 barů). Dále je pro takto stanovenou hmotnost a tlak vypočítána šířka stopy dvojmontáže, která je poté rozdělena podle průběhu reálných dat na dvě stejné šířky jedné stopy a mezeru. Výpočtem jsou určeny reálné rozměry stop (viz tabulka 8.1), které je potřeba přepočítat poměrově pro účely simulace. Jedná se o procentuální zmenšení o 11% - tato hodnota je získána procentuálním zmenšením, kdy je jako původní nula považován úhel 45°. Tuto hodnotu je potřeba snížit o daná procenta

na úhel 40°, kdy v tomto úhlu je uložen senzor do vozovky. Délka stopy je zde určena experimentálně a pohybuje se okolo 6 cm. Porovnání simulovaného a reálného signálu zobrazuje obrázek 8.2. Jedná se o porovnání pro signál č.1 pod úhlem 40°. Z obrázku je možné prohlásit, že signály jsou téměř totožné. Odchylka je způsobena nerovnoměrným zatížením pneumatik v reálném průběhu a rovněž i dříve zmíněnou neznalostí pneumatik a jejich hustících tlaků. Zbylé grafy jsou obsaženy v příloze A.

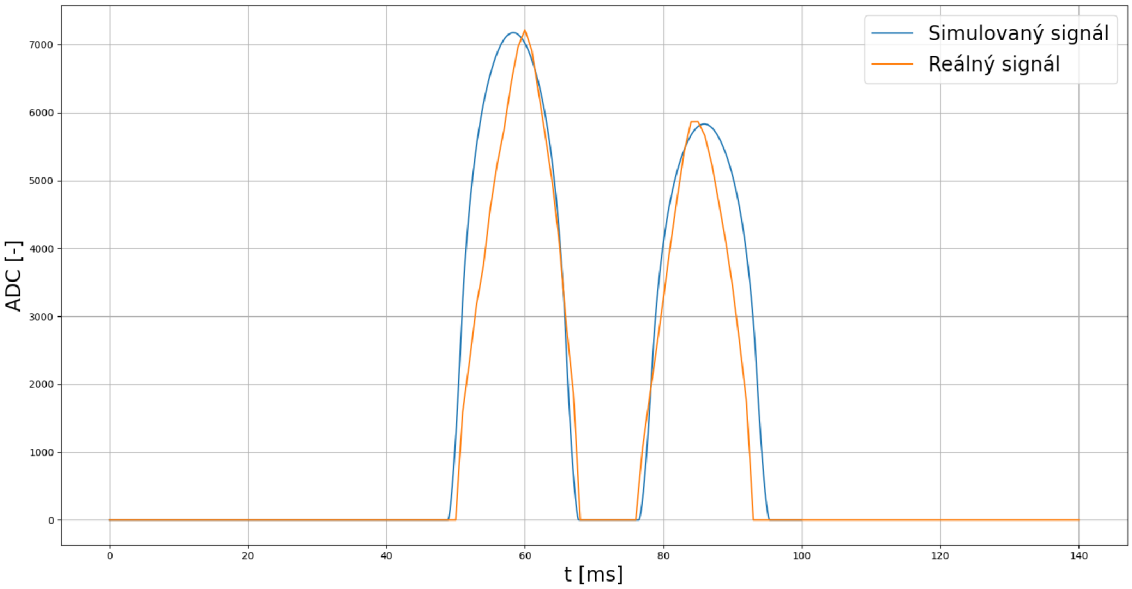
Následující tabulka 8.2 obsahuje změřené doby časové prodlevy Δt pro různé úhly. V případě úhlu 40° je pro porovnání přidána doba časové prodlevy pro reálný signál. V případě porovnání pro simulované a reálné Δt pro úhel 40° byla největší odchylka signálu č.3, kdy činila $\Delta t = 3{,}6$ ms. Odchylka mohla být způsobena nepřesností v určení rozměrů šířky. Pro umístění senzoru pod úhlem 70° nebyla zjištěna doba časové prodlevy, proto je tento úhel nevhodný pro detekci dvojmontáže. Pro zbylé úhly již byla naměřena Δt - je možná jednoznačná detekce dvojmontáže. S ohledem na zjištěné doby se jako nejlepší umístění jeví úhel 55°. Je zde umožněna detekce pro všechny testované signály a nejdelší doba časové prodlevy dosahuje 3,6 ms.

Signál č.			**Rozměry stopy**		
	m [kg]	**p** [bar]	**Délka** [cm]	**Šířka** [cm]	**Mezera** [cm]
1.	5865	10,0	6,2	14,0	12,0
2.	5875	10,0	6,2	14,0	10,0
3.	3600	7,0	6,2	12,0	14,0
4.	5740	10,0	6,2	12,0	14,0
5.	5450	8,5	6,1	15,0	13,0

Tab. 8.1: Zjištěné velikosti stop pro reálná data

Doba časové prodlevy Δt [ms]						
Signál č.	**35°**	**40° (Sim.)**	**40° (Reál.)**	**45°**	**55°**	**70°**
1.	11,4	8,2	8,0	6,4	2,7	-
2.	8,9	6,5	8,0	4,6	1,5	-
3.	13,7	10,6	14,0	8,0	3,7	-
4.	13,7	10,6	10,0	8,0	3,7	-
5.	12,8	9,8	10,0	7,4	3,6	-

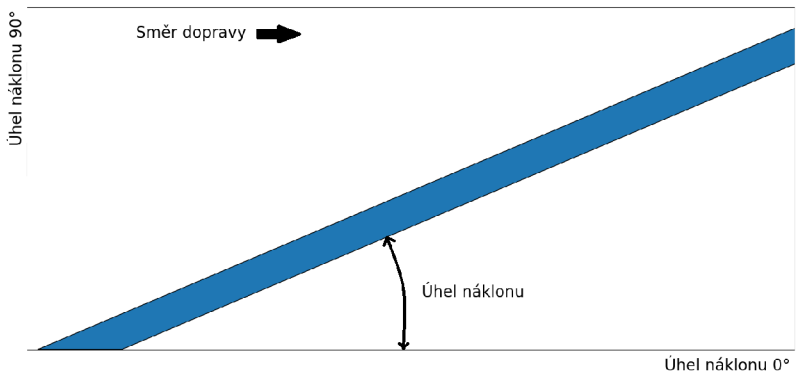
Tab. 8.2: Doba časové prodlevy pro porovnání s reálnými daty



Obr. 8.2: Porovnání reálného signálu se simulovaným pro signál č.1

8.1.1 Volba úhlů

Pro simulaci byly zvoleny hodnoty náklonu senzoru 35°, 40°, 45°, 55° a 70°. Krajní hodnota úhlu byla zjištěna pro nejširší pneumatiku, aby senzor zachytil celý její přejezd. Senzor má délku 2,5 m a šířka pneumatiky je 0,95 m. Pro průjezd v ideálním případě (pneumatika najíždí na senzor rovnoběžně s okrajem vozovky). Výsledný úhel je 22°. Jedná se o krajní hodnotu v ideálním případě, nicméně reálně pneumatiky najíždějí na senzor pod různými úhly. Z tohoto důvodu byl zvolen začátek na 35°. Následuje reálné umístění senzoru pod úhlem 40°. Poté 45° pro zjištění blízkého chování detekce v okolí reálného umístění senzoru. Poslední dva úhly jsou 55°a 70°. Schéma úhlu náklonu senzoru zobrazuje následující obrázek 8.3.



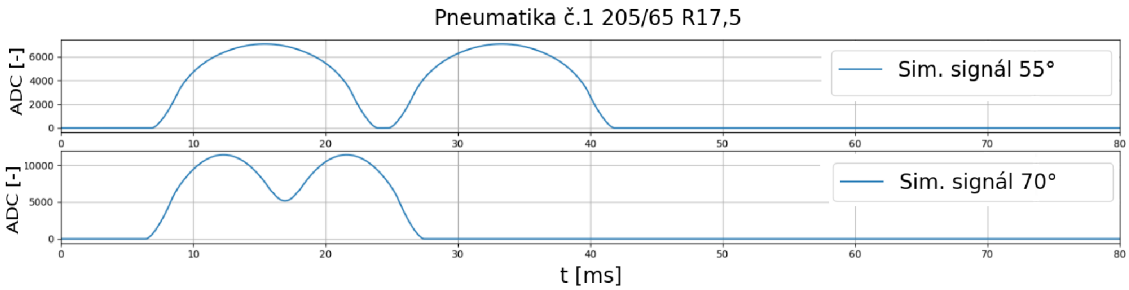
Obr. 8.3: Schéma úhlu náklonu senzoru

8.2 Simulace pneumatik

Druhým způsobem vyhodnocení detekce dvojmontáže za pomocí simulace je určen výběrem pneumatik vyráběných pro dvojmontáž a nasimulování jejich průběhu po přejezdu přes senzor. Pneumatiky jsou vybrány s ohledem na pokrytí co nejširšího spektra vyráběných pneumatik pro dvojmontáže. Vybrané pneumatiky jsou vypsané v tabulce 8.3. K pneumatikám jsou pomocí katalogových listů doplněny požadované hustící tlaky a jejich maximální nosnost [30][31]. Z těchto hodnot jsou vypočítány za pomocí vztahů v kapitole 7.2 a postupu uvedeném v příkladu výpočtu (kapitola 7.3.1) rozměry stop pro simulaci. Již vypočtené hodnoty rozměrů stop zobrazuje tabulka 8.4. Jedná se o hodnoty pro spodní hodnoty tlaku z předchozí tabulky (tzn. všechny rozměry jsou pro hustící tlak 5 bar). Tabulka 8.5 zobrazuje vypočtené rozměry stopy pro hodnotu tlaku huštění 8,5 baru.

č.	**Rozměr**	**Nosnost [kg] na nápravu při tlaku huštění**		**Výrobce**
		5 bar	**8,5 bar**	
1.	205/65 R17,5	4 370	6 685	Continental AG
2.	225/75 R17,5	5 060	-	Continental AG
3.	245/70 R19,5	6 540	10 000	Continental AG
4.	275/70 R22,5	7 870	12 035	Continental AG
5.	295/55 R22,5	7 245	-	Continental AG
6.	305/70 R19,5	7 585	-	Continental AG
7.	325/95 R24	11 770	18 000	Continental AG
8.	13.00 R22,5	9 370	14 325	Continental AG
9.	14.00 R20	12 355	-	Continental AG
10.	16.00 R20	16 530	-	Michelin

Tab. 8.3: Vybrané pneumatiky pro simulaci



Obr. 8.4: Příklad porovnání dvou simulovaných signálů

č.	Rozměr pneumatiky	Rozměry stopy		
		Délka [cm]	Šířka [cm]	Mezera [cm]
1.	205/65 R17,5	6,0	20,85	7,86
2.	225/75 R17,5	6,0	21,98	9,36
3.	245/70 R19,5	6,0	25,39	9,85
4.	275/70 R22,5	6,0	27,63	11,25
5.	295/55 R22,5	6,0	26,88	10,04
6.	305/70 R19,5	6,0	26,42	12,45
7.	325/95 R24	6,0	33,40	14,54
8.	13.00 R22,5	6,0	30,12	12,34
9.	14.00 R20	6,0	33,06	17,20
10.	16.00 R20	6,0	36,14	24,10

Tab. 8.4: Vypočtené velikosti stop pro vybrané pneumatiky - 5 bar

č.	Rozměr pneumatiky	Rozměry stopy		
		Délka [cm]	Šířka [cm]	Mezera [cm]
1.	205/65 R17,5	6,0	19,57	7,86
3.	245/70 R19,5	6,0	23,82	9,85
4.	275/70 R22,5	6,0	25,95	11,25
7.	325/95 R24	6,0	31,33	14,54
8.	13.00 R22,5	6,0	28,23	12,34

Tab. 8.5: Vypočtené velikosti stop pro vybrané pneumatiky - 8,5 bar

Výsledné grafy pro tabulku 8.4 se nacházejí v příloze B. Průběh jednotlivých simulací potvrzuje očekávaný trend, kdy se celková doba přejezdu se zvyšujícím úhlem náklonu snižovala. Pro znázornění daného trendu je vystřižen simulovaný průběh pro pneumatiku č. 1, viz obrázek 8.4 na předchozí stránce. Z obrázku je patrné, že pro umístění senzoru pod úhlem 55° trvala celková doba přejezdu dvojmontáže přes senzor přibližně 42 ms, zatímco pro úhel náklonu 70° již byla pouze přibližně 27 ms. Tento zmíněný trend je následně patrný na přiložených grafech, kde se nachází i srovnání se zbylými úhly. Z pohledu detekce dvojmontáže je klíčová dříve zmíněná mezera mezi vrcholy, kdy snímaná hodnota klesá do nuly. Následující tabulka 8.6 zobrazuje dobu časové prodlevy Δt, po kterou vznikla daná mezera. Z daných hodnot je patrné, že mezera nevznikla pouze v sedmi případech pro umístění senzoru pod úhlem

70° (pro pneumatiky č. 1, 2, 3, 4, 5, 6 a 8). Ve zbylých případech výstupní signál klesl na nulu po změřenou dobu časové prodlevy Δt. V daných případech je možná jednoznačná detekce dvojmontáže. S ohledem na dobu časové prodlevy mezery se jako nejlepší umístění jeví úhel 55°, kdy bylo možné detekovat dvojmontáž pro všechny vybrané pneumatiky. Doba intervalu se zde průměrně pohybovala okolo 5 ms, což je dostačující. V případě umístění senzoru pod úhlem 35° byla doba intervalu pro nejširší pneumatiky zbytečně dlouhá (pneumatika č.10 měla Δt = 27,7 ms). Naopak pro úhel senzoru 70° už zde mezera pro některé pneumatiky nevznikala. Nejedná se tedy o vyhledávaný jev pro detekci dvojmontáže. V případě hustícího tlaku 8,5 baru se výsledné grafy nacházejí v příloze C. Objevuje se zde totožný trend snižování celkové doby přejezdu se zvyšujícím se úhlem náklonu senzoru. Tabulka doby časové mezery pro hustící tlak 8,5 baru 8.7 se nachází na následující stránce. V případě umístění senzoru pod úhlem 70° byla detekce možná pouze v jednom případě (pneumatika č.7), kdy zde vznikla Δt = 0,2 ms. Pro zbylé úhly již byla detekce možná a rovněž se zde jako nejlepší umístění senzoru jeví úhel 55°, kdy nejdelší doba časové prodlevy byla 5,3 ms a nejkratší byla 0,7 ms. Pro úhel senzoru 35° byla doba časové prodlevy dlouhá, pohybovala se v rozsahu od 6,5 ms do 15,4 ms.

Doba časové prodlevy Δt [ms]					
č.	**35°**	**40°**	**45°**	**55°**	**70°**
1.	6,6	4,8	3,3	0,7	-
2.	8,6	6,4	4,7	1,8	-
3.	9,3	7,1	5,2	2,2	-
4.	11,1	8,6	6,6	3,2	-
5.	9,5	7,3	5,4	2,4	-
6.	12,6	9,8	7,5	3,9	-
7.	15,4	12,3	9,6	5,5	0,3
8.	12,6	9,8	7,6	4,0	-
9.	18,7	15,0	12,0	7,1	1,2
10.	27,7	22,4	18,2	11,5	3,6

Tab. 8.6: Doba časové prodlevy pro jednotlivé úhly náklonu senzoru - 5 bar

Doba časové prodlevy Δt [ms]					
č.	**35°**	**40°**	**45°**	**55°**	**70°**
1.	6,5	4,7	3,2	0,7	-
3.	9,2	7,0	5,2	2,2	-
4.	11,1	8,6	6,4	3,1	-
7.	15,4	12,2	9,5	5,3	0,2
8.	12,5	9,8	7,6	3,9	-

Tab. 8.7: Doba časové prodlevy pro jednotlivé úhly náklonu senzoru - 8,5 bar

Závěr

Diplomová práce se věnuje systému vážení za jízdy, který byl vytvořen společností CROSS Zlín a.s. Hlavním cílem práce bylo vytvoření softwaru simulujícího umístění senzoru pro detekci dvojmontáže pod různými úhly na směr provozu. Hlavního cíle bylo dosaženo za pomocí programovacího jazyka Python.

Prvním bodem zadání bylo provedení literární rešerše dostupných řešení systémů pro vážení za jízdy. Systémy jsou děleny do dvou kategorií - High Speed Weight in Motion a Low Speed Weight in Motion. V první kategorii je popsáno již zmíněné řešení od společnosti CROSS, kdy byly popsány i jednotlivé varianty, ve kterých je dané řešení dostupné. Konkrétně se jedná o statistiku, předselekci, přímé pokutování a OptiWIM. Následně byly popsány řešení KiTraffic WIM (společnost Kistler Group), Camea UnicamWIM a Kapsch WIM. Zástupce pro druhou skupinu tvoří řešení společnosti Tenzováhy s.r.o. z Olomouce.

Druhým bodem zadání byl průzkum metod, kterých je využíváno pro detekci dvojmontáže. Základním principem je detekce dvojmontáže za pomocí měření šířky pneumatiky. Druhá metoda, využívaná v řešení popsaném v diplomové práci, je založena na měření signálu z šikmo umístěných piezosenzorů. Součástí tohoto průzkumu jsou senzory využívané v systémech vážení za jízdy. Jedná se o indukční smyčku (detekce přítomnosti vozidla), piezoelektrické senzory (vážení) a optické senzory (vážení).

Následujícím bodem zadání bylo vytvoření metodiky pro detekci dvojmontáže. Tato metodika je rozvedena v kapitole 4. Způsob detekce je zde založen na výstupním signálu z šikmo umístěných piezoelektrických senzorů. Navazující kapitola 5 popisuje návrh realizace softwaru pro detekci dvojmontáže s využitím zmíněné metodiky. Samotný software je založen na vyhledávání vrcholů v signálu. Na základě zjištěného počtu vrcholů je rozhodováno, zda se jedná o jednoduchou montáž nebo dvojmontáž. Realizace programu proběhla úspěšně. Jako hlavní rozpoznávací prvek byla použita funkce *find_peaks*, která vyhledává zmíněné vrcholy v signálu. Ověření programu proběhlo za pomocí naměřených dat poskytnutých firmou. Jednalo se o naměřená data z reálného provozu. Kontrola funkčnosti proběhla manuální kontrolou průběhů se zjištěnou detekcí.

Šestým bodem zadání bylo vytvoření simulace vlivu umístění senzoru pod jiným úhlem a následný vliv tohoto umístění senzoru na samotnou detekci dvojmontáže. Pro daný software byly vymezeny cíle (viz začátek kapitoly 7), kterých má být dosaženo. Konkrétně se jedná o umožnění vykreslení dvojice stop pneumatik dle vypočtených parametrů (šířka stopy a mezera mezi nimi), vykreslení senzoru dle zadaných parametrů a jeho náklon, který je v rozsahu od 0° do 90°. Úhel 90° simuluje umístění senzoru kolmo na směr dopravy (viz obrázek 8.3). Dalšími vytyčenými

body byl stanovený rovnoběžný pohyb stop rovnoběžně s okrajem vozovky, animace průběhu přejezdu stop přes senzor s výstupní detekcí a kontrola výstupního signálu simulace s reálnými daty poskytnutými firmou. Jedná se o totožná reálná data využívaných v předchozím softwaru pro detekci dvojmontáže. Všech zmíněných cílů bylo vytvořeným softwarem dosaženo.

Byl naprogramován software umožňující umístění senzoru pod úhly v daném rozsahu a jeho vykreslení dle dalších zadaných parametrů (délka, šířka a počáteční souřadnice). Následně pomocí animace software simuluje přejezd stopy pneumatik přes senzor. Velikost stop je zjišťována podle výpočtů popsaných v kapitole 7.2. Za účelem ověření výpočetního postupu bylo provedeno kontrolní měření na 14 dvojmontážích. Měření proběhlo úspěšně a potvrdilo platnost výpočtů (viz kapitola 7.3). Výstupem simulace je signál, ze kterého je vyhodnocován vliv umístění. Porovnání výstupu simulace s reálnými daty probíhalo pro úhel 40°, kdy se jedná o reálné umístění senzoru v reálném provozu. Výsledné grafy obsahuje příloha A. Porovnání je zde pouze pro zmíněný úhel senzoru 40° a pro zbylé úhly jsou zde pouze simulované průběhy. Simulace byla prováděna pro úhly 35°, 40°, 45°, 55° a 70°. Porovnání proběhlo úspěšné a simulované průběhy dosahují očekávaného trendu, kdy se celková doba přejezdu dvojmontáže přes senzor při zvyšujícím se úhlu náklonu zkracuje. Vyhodnocení simulace následně proběhlo pro vybrané portfolio vyráběných pneumatik pro dvojmontáže. Výsledné grafy pro tyto pneumatiky obsahují přílohy B a C. Hlavním parametrem vyhodnocení simulace byla doba časové prodlevy Δt mezi jednotlivými vrcholy, kdy hodnota ADC klesá do nuly. Jako nejlepší úhel pro detekci dvojmontáže se projevil úhel 55°. Při tomto úhlu byla možná detekce dvojmontáže pro všechny simulované průběhy. Pro reálné rozměry stop byla hodnota Δt do 5 ms. Pro vypočtené stopy dle portfolia pneumatik byla nejvyšší hodnota časové prodlevy $\Delta t = 11{,}5$ ms. V případě nejvyššího úhlu umístění senzoru 70° již nevznikala daná mezera - úhel je nevhodný pro detekci dvojmontáže. V případě zbylých testovaných úhlů byla umožněna detekce, nicméně doba časové prodlevy již byla neúměrně dlouhá.

Celkové zhodnocení se nachází v předcházející kapitole 8. Závěry simulace je nutné brát s jistou rezervou z důvodu, že v reálném provozu pneumatiky najíždějí na senzor v různých pozicích. Rovněž se zde vyskytují různé závady na pneumatikách (příkladem podhuštění pneumatik), které zkreslují výstupní signál.

Literatura

[1] MIČULKA, Martin. *Detekce nápravy v systému vážení za jízdy.* Brno, 2021. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Soňa Šedivá.

[2] US Department of Transportation. *WIM Data Analyst´s Manual, Publication No. FHWA-IF-10-018. [online].* Dostupné také z: `https://www.fhwa.dot.gov/pavement/wim/pubs/if10018/if10018.pdf`

[3] ČMI. *Váhy pro kontrolní vysokorychlostní vážení silničních vozidel za pohybu.* In: Brno: Český metrologický institut, 2016, 111-OOP-C010-15, 22 s. [cit. 2020-10-21] Dostupné také z: `https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/Uredni_deska/OOP/111-OOP-C010-15.pdf`

[4] CROSS Zlín. *Vážení za jízdy* [online]. Zlín, 05/2018n. l. [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: `https://www.cross-traffic.com/root/download/vazeni-za-jizdy.pdf`

[5] KISTLER. *Weigh In Motion: The key to sustainable road management and protection.* In: Winterthur Switzerland: 2020, 200-746e-04.20, 28 s. [cit. 2020-10-21] Dostupné také z: `https://www.kistler.com/files/download/200-746e.pdf`

[6] *Vážení za jízdy (WIM).* CAMEA, spol. s r.o. [online]. In: Brno [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: `https://www.camea.cz/cz/doprava/vazeni-za-jizdy-wim/`

[7] Kapsch TrafficCom AG. *Kapsch WIM.Weigh-In-Motion. In: Vídeň: 1000005651-09-EN, 2 s. [cit. 2020-10-21] Dostupné také z:* `https://www.kapsch.net/us/ktc/downloads/datasheets/video-sensor/Kapsch-KTC-DS-WIM.pdf?lang=en-US`

[8] *Dynamické nápravové váhy VM-1.2 pro automatické vážení vozidel za jízdy. TENZOVÁHY, s.r.o. [online]. In: Olomouc [cit. 2020-10-22]. Dostupné z:* `https://www.tenzovahy.cz/dynamicke-napravove-vahy-pro-automaticke-vazeni-vozidel-za-jizdy`

[9] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 209/2018 Sb., o hmotnostech, rozměrech a spojitelnosti vozidel. In: Zákony pro lidi.cz [online]. AION CS 2010-2020 [cit. 2020-10-22]. Dostupné z:* `https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-209#f6259038`

[10] PŘIBYL, O. *Detektory zasahující do vozovky, úvod do detekce. In: Praha, Ústav aplikované matematiky ČVUT v Praze, Fakulta dopravní . [cit. 2020-10-21].*

[11] TE CONNECTIVITY *Piezo Copolymer Coaxial Cable. TE Connectivity company [online]. In: 07/2017 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z:* https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FPiezo_Copolymer_Coaxial_Cable%7FA1%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_Piezo_Copolymer_Coaxial_Cable_A1.pdf%7F1005801-1

[12] KISTLER. *WIM. In: Winterthur Switzerland [cit. 2020-12-09] Dostupné také z:* https://www.kistler.com/en/glossary/term/wim/

[13] *Dual Tires for Light Truck Use. KIANGITI [online]. In: 2/29/2016 [cit. 2020-10-22]. Dostupné z:* http://kiangiti.com/index.aspx?Article=Dual-Tires-for-Light-Truck-Use&Lang=en

[14] MCGARVEY, Terence. *Measurement of tyre width and assembly type (single or double tyre) [online]. 2016. [cit. 2020-12-26]. ISSN 0347-6030.*

[15] Python Software Foundation. *What is Python? Python [online]. [cit. 2021-04-20].* Dostupné z: https://www.python.org/doc/essays/blurb/

[16] The SciPy community. *What is NumPy? NumPy v1.20 Manual [online]. 2021 [cit. 2021-04-20].* Dostupné z: https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html

[17] The Matplotlib development team. *Matplotlib: Python plotting. Matplotlib 3.4.1 documentation [online]. 2021 [cit. 2021-04-20].* Dostupné z: https://matplotlib.org/stable/index.html

[18] SciPy developers. *Scientific computing tools for Python [online]. 2021 [cit. 2021-04-20].* Dostupné z: https://scipy.org/about.html

[19] Python Software Foundation. *Math — Mathematical functions [online]. [cit. 2021-04-20].* Dostupné z: https://docs.python.org/3/library/math.html#module-math

[20] GILLIES, Sean. *The Shapely User Manual v1.7.0 [online]. 2020 [cit. 2021-04-20].* Dostupné z: https://shapely.readthedocs.io/en/stable/manual.html

[21] *Contact patch. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-04-21].* Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_patch

[22] YANG, Shaopu, Liqun CHEN a Shaohua LI. *Dynamics of vehicle-road coupled system. Berlin: Springer, 2015, xv, 327 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-7-03-042528-7.*

[23] WEISSTEIN, Eric W. *Superellipse: From MathWorld–A Wolfram Web Resource. [online]. [cit. 2021-04-22].* Dostupné z: https://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html

[24] Federal Highway Administration. *Traffic monitoring guide. [online]. 2013 [cit. 2021-04-22].* Dostupné z: https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/tmguide/tmg_fhwa_pl_13_015.pdf

[25] Continental Matador Rubber, s.r.o. *Katalogový list pneumatiky Matador v. en2017.02 [online]. 2017 [cit. 2021-04-23].* Dostupné z: https://blobs.matador-tyres.com/www8/servlet/blob/1825692/67d3cf57f96e4fa87628302e0dd6170f/hr-4-product-overview-delivery-range-data.pdf

[26] The Goodyear Tire and Rubber Company. *Katalogový list pneumatiky Goodyear v. 05/2016 [online]. 2016 [cit. 2021-04-23].* Dostupné z: https://www.goodyeartrucktires.com/pdf/resources/publications/sellsheets/regional_rhs_rht_sell_sheet.pdf

[27] Bridgestone Commercial Solutions. *Katalogový list pneumatiky Bridgestone v. 20.1 [online]. 2020 [cit. 2021-04-23].* Dostupné z: https://commercial.bridgestone.com/content/dam/commercial/bridgestone/pdfs/data-books/Bridgestone-Truck-Tire-DataBook.pdf

[28] Nokian Tyres plc. *Katalogový list pneumatiky Nokian v. 6.6 [online]. 2021 [cit. 2021-04-23].* Dostupné z: https://dc602r66yb2n9.cloudfront.net/file/dl/i/C37sJA/zFdkuqML3-WXBXPnrncrUA/NokianHeavyTyres_TechnicalTireManual_v6.6_2021-4.pdf

[29] Hankook Tire Europe Headquarters. *Katalogový list pneumatiky Hankook [online]. 2019 [cit. 2021-04-23].* Dostupné z: https://www.hankooktire.com/cz/files/technical-manual/2019_Technical_Manual_Product_Information.pdf

[30] Continental Reifen Deutschland GmbH. *Katalogový list pneumatiky Continental v. cz2018.07 [online]. 2018 [cit. 2021-04-23].* Dostupné z: https://blobs.continental-tires.com/www8/servlet/blob/2738002/6914b745b4bd92a199025f321f95a280/databook-cvt-data.pdf

[31] Michelin Česká Republika s.r.o. *Technický katalog CZ: Pneumatiky Michelin pro nákladní vozidla a autobusy [online]. 2019 [cit. 2021-04-23].* Dostupné z: `https://www.michelin.cz`

Seznam příloh

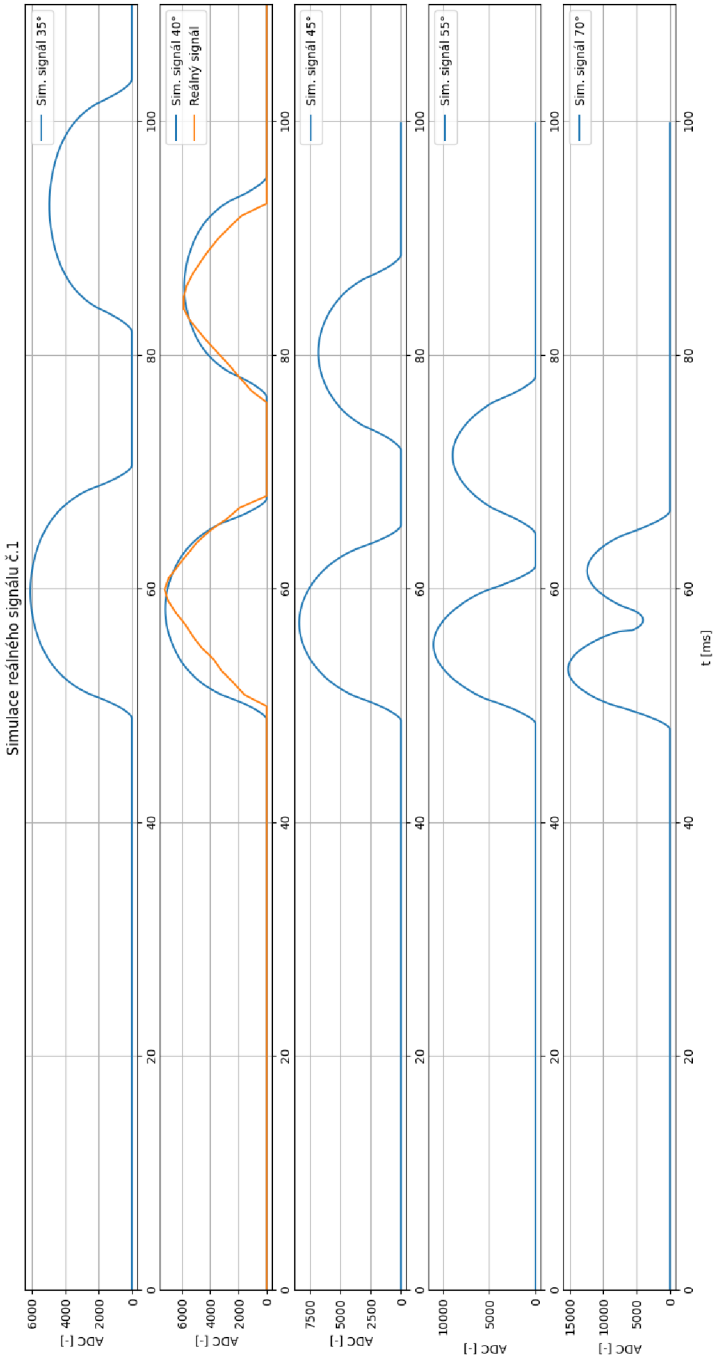
A Grafy simulace s porovnáním s reálnými daty **64**

B Grafy simulace pneumatik - 5 bar **69**

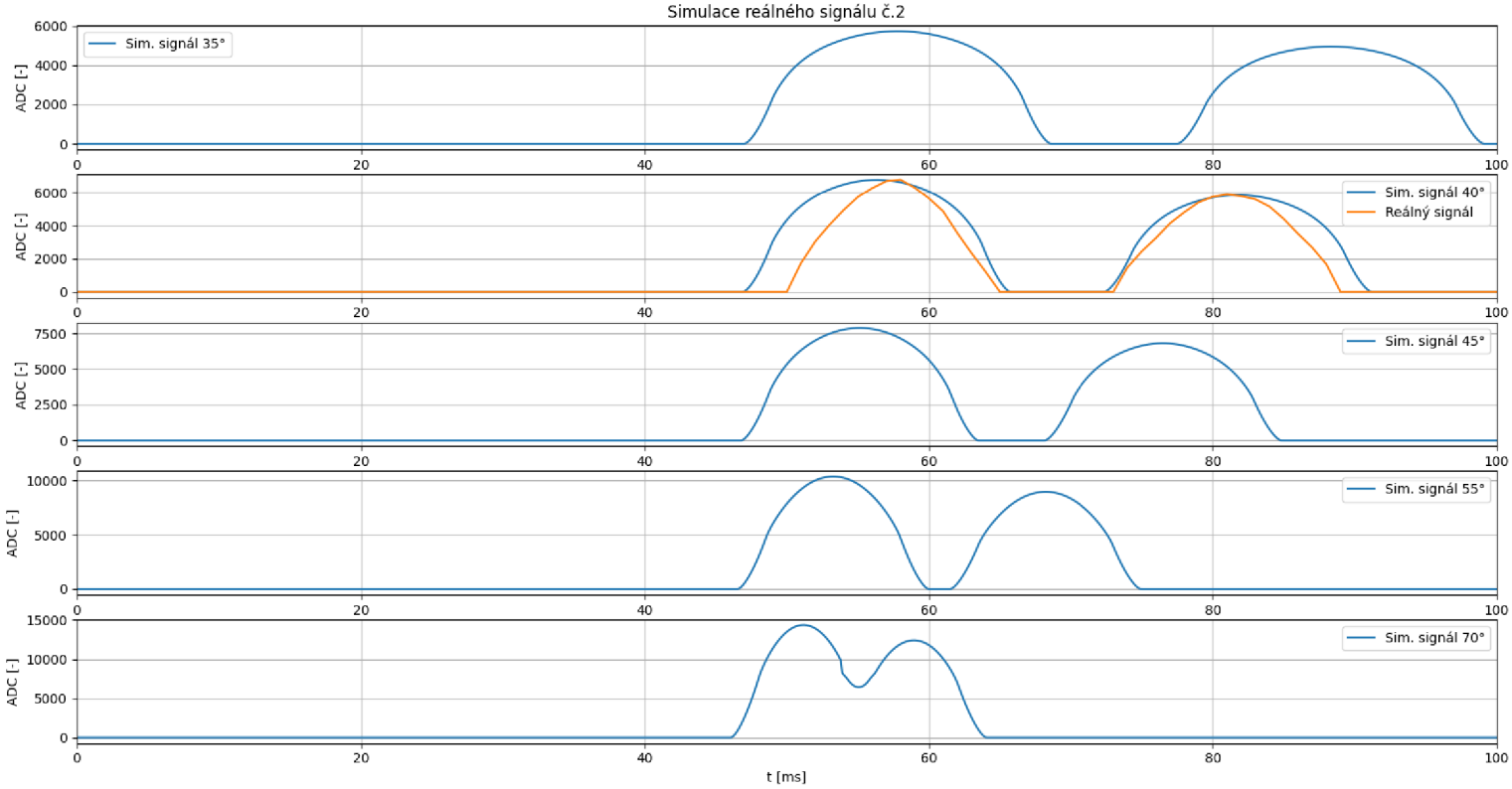
C Grafy simulace pneumatik - 8,5 bar **79**

D Obsah elektronické přílohy **84**

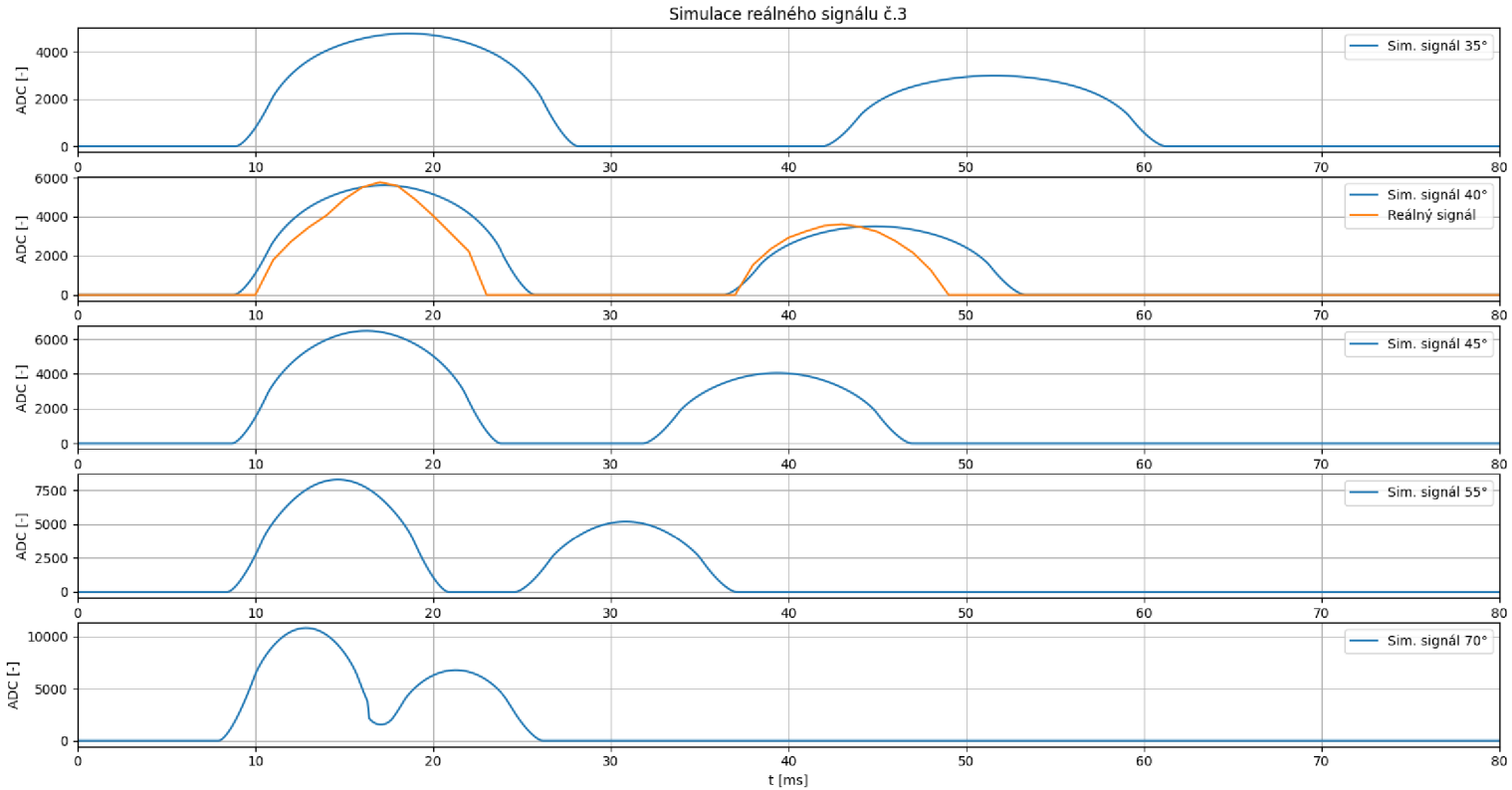
A Grafy simulace s porovnáním s reálnými daty



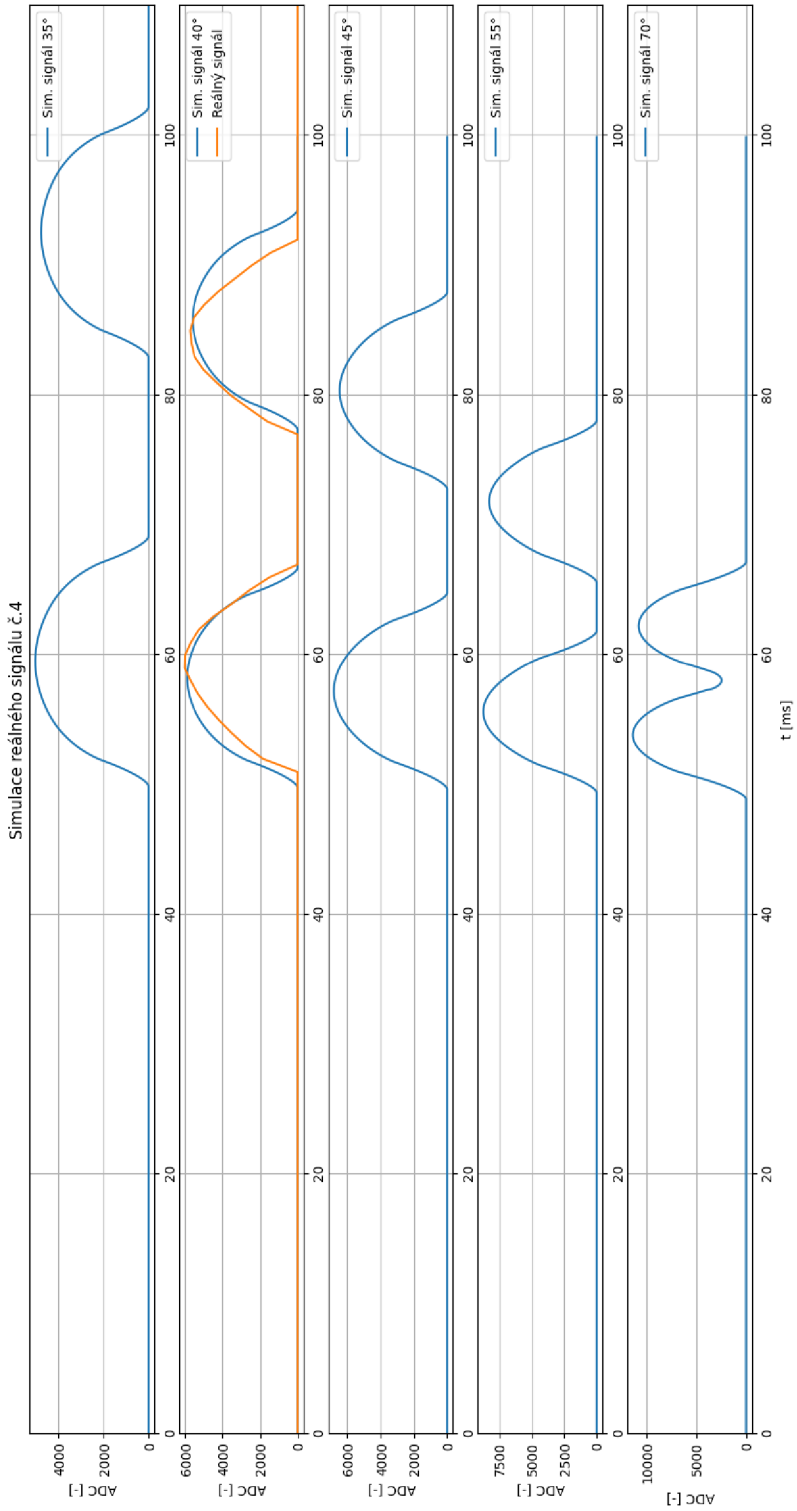
Obr. A.1: Simulace reálného signálu č.1



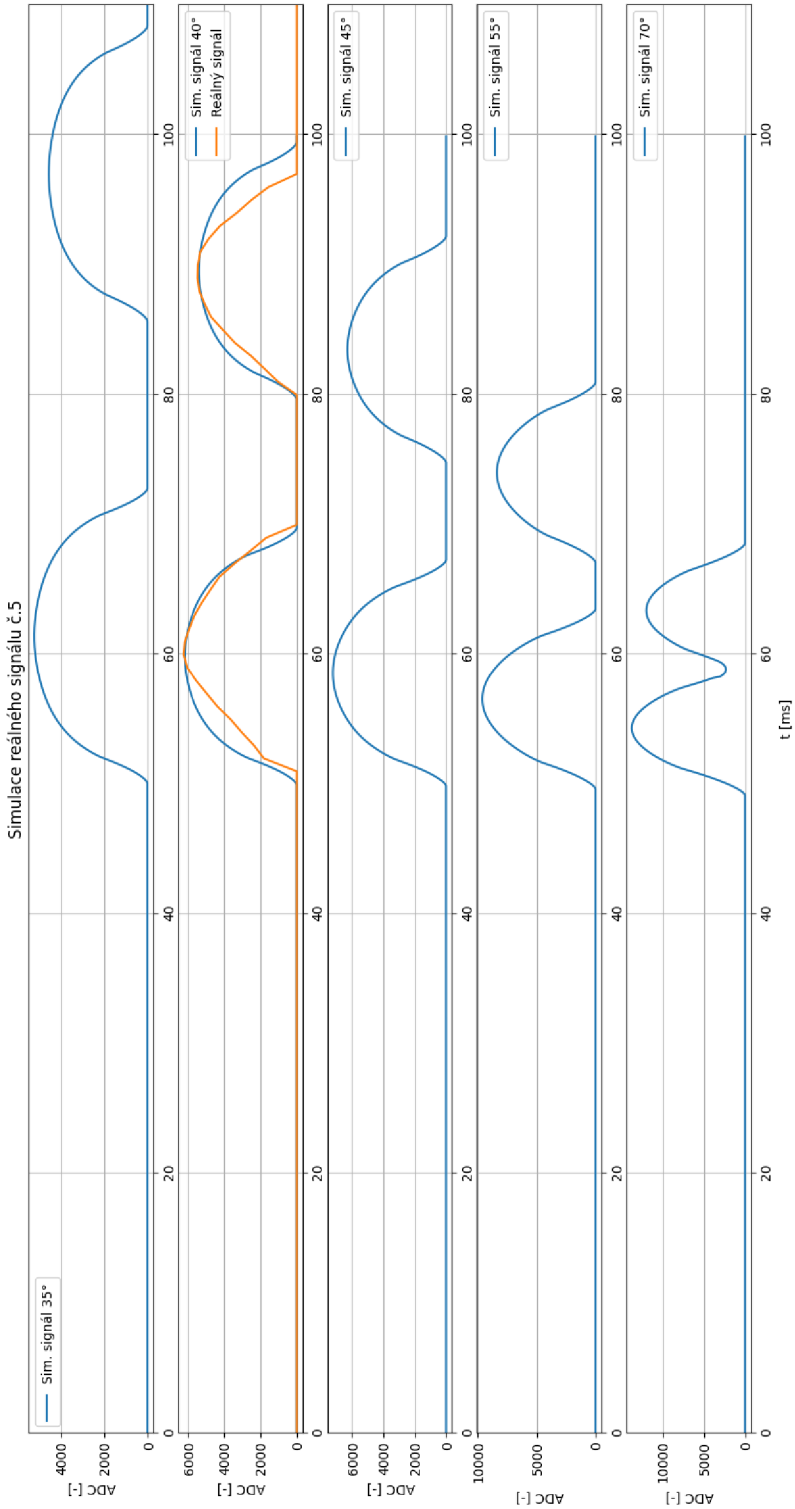
Obr. A.2: Simulace reálného signálu č.2



Obr. A.3: Simulace reálného signálu č.3

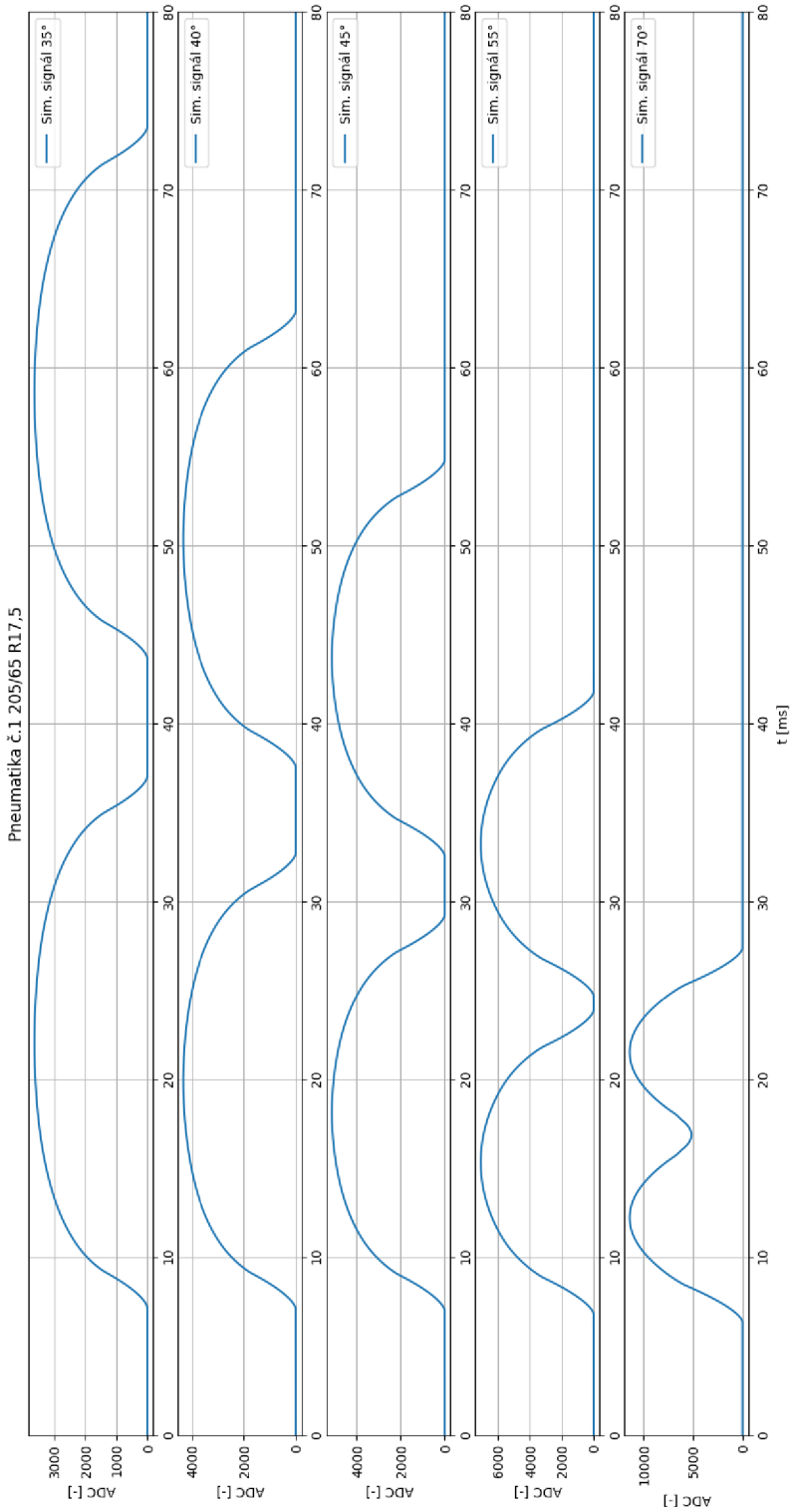


Obr. A.4: Simulace reálného signálu č.4

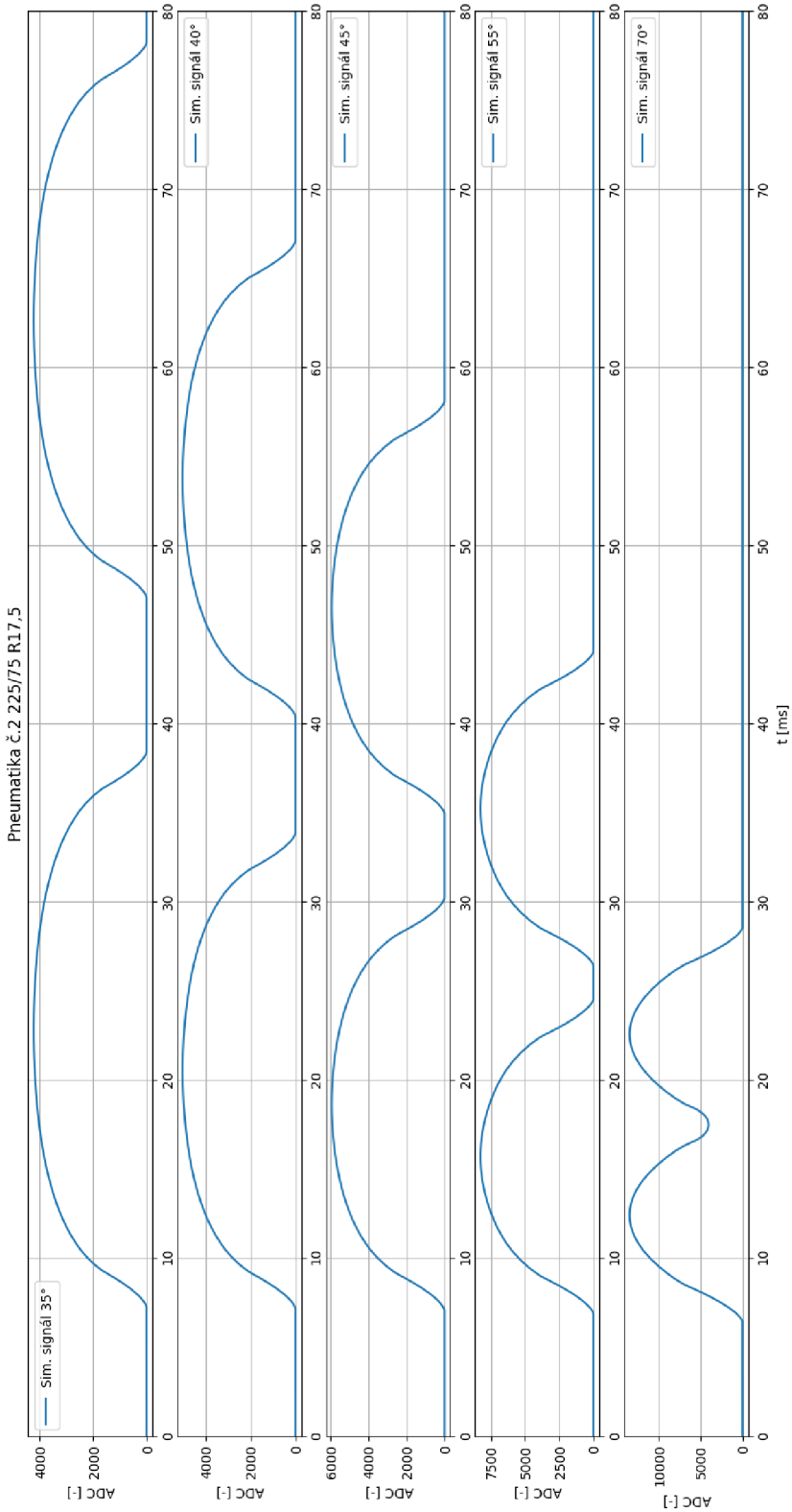


Obr. A.5: Simulace reálného signálu č.5

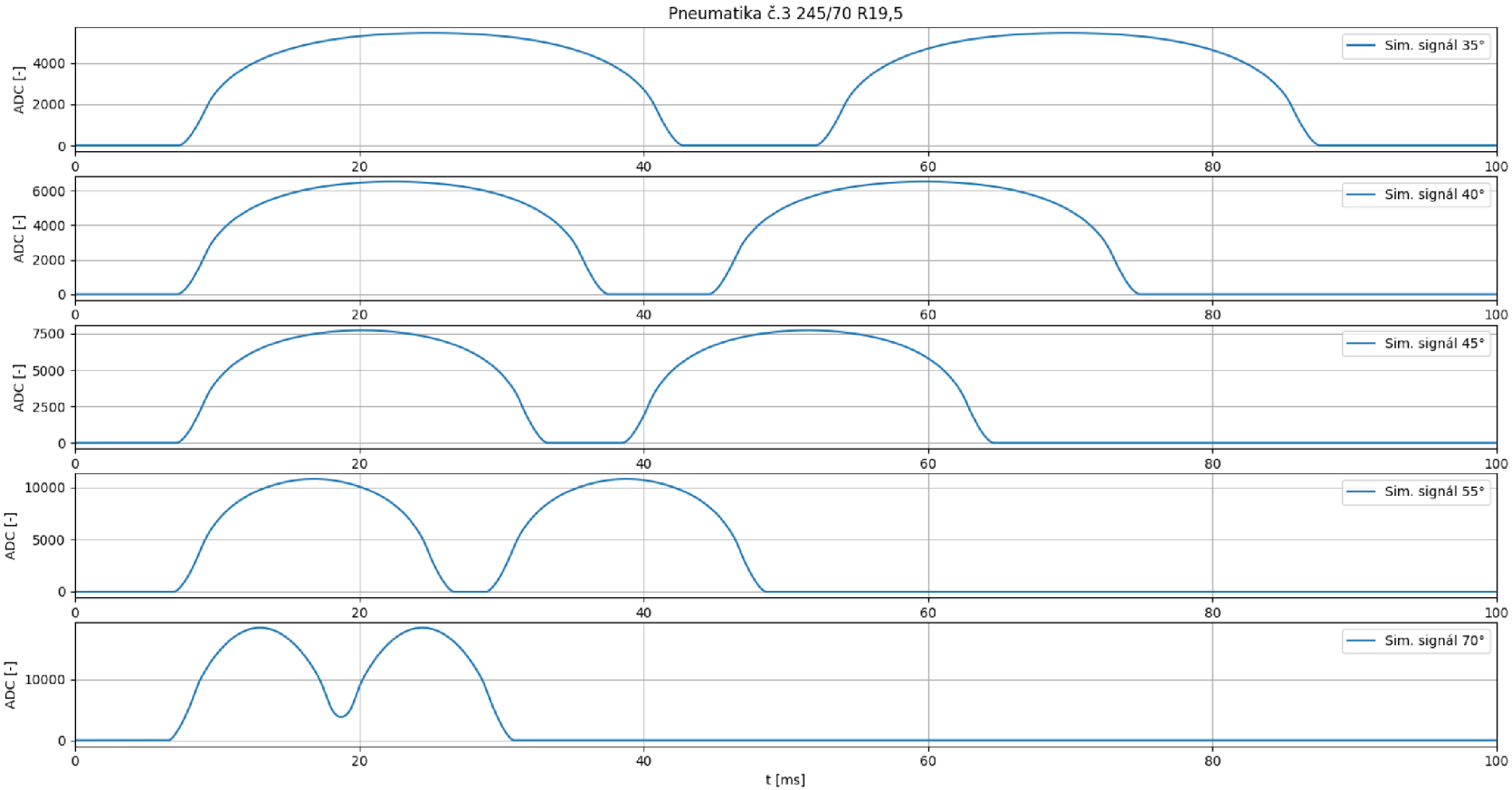
B Grafy simulace pneumatik - 5 bar



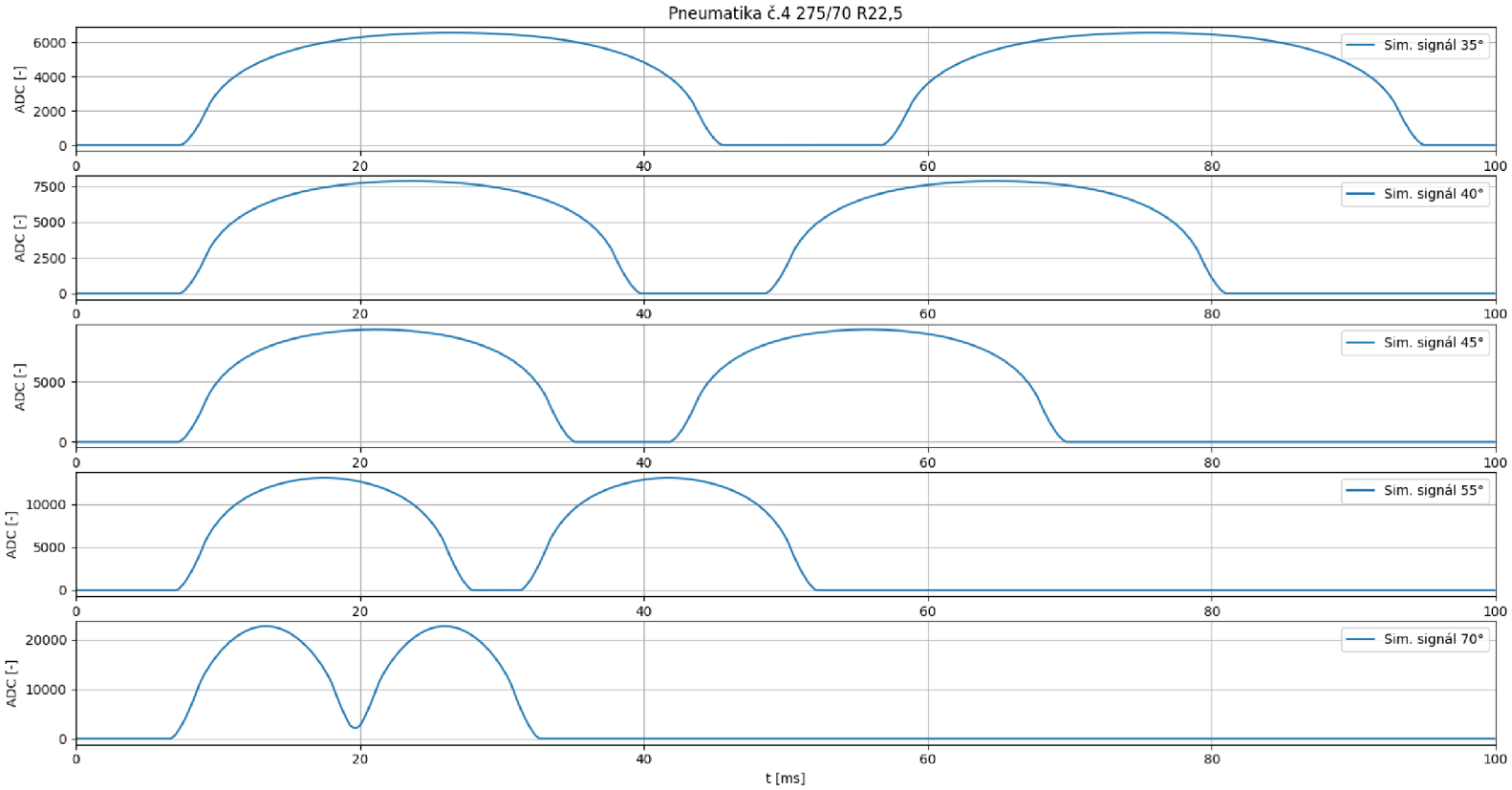
Obr. B.1: Pneumatika č.1



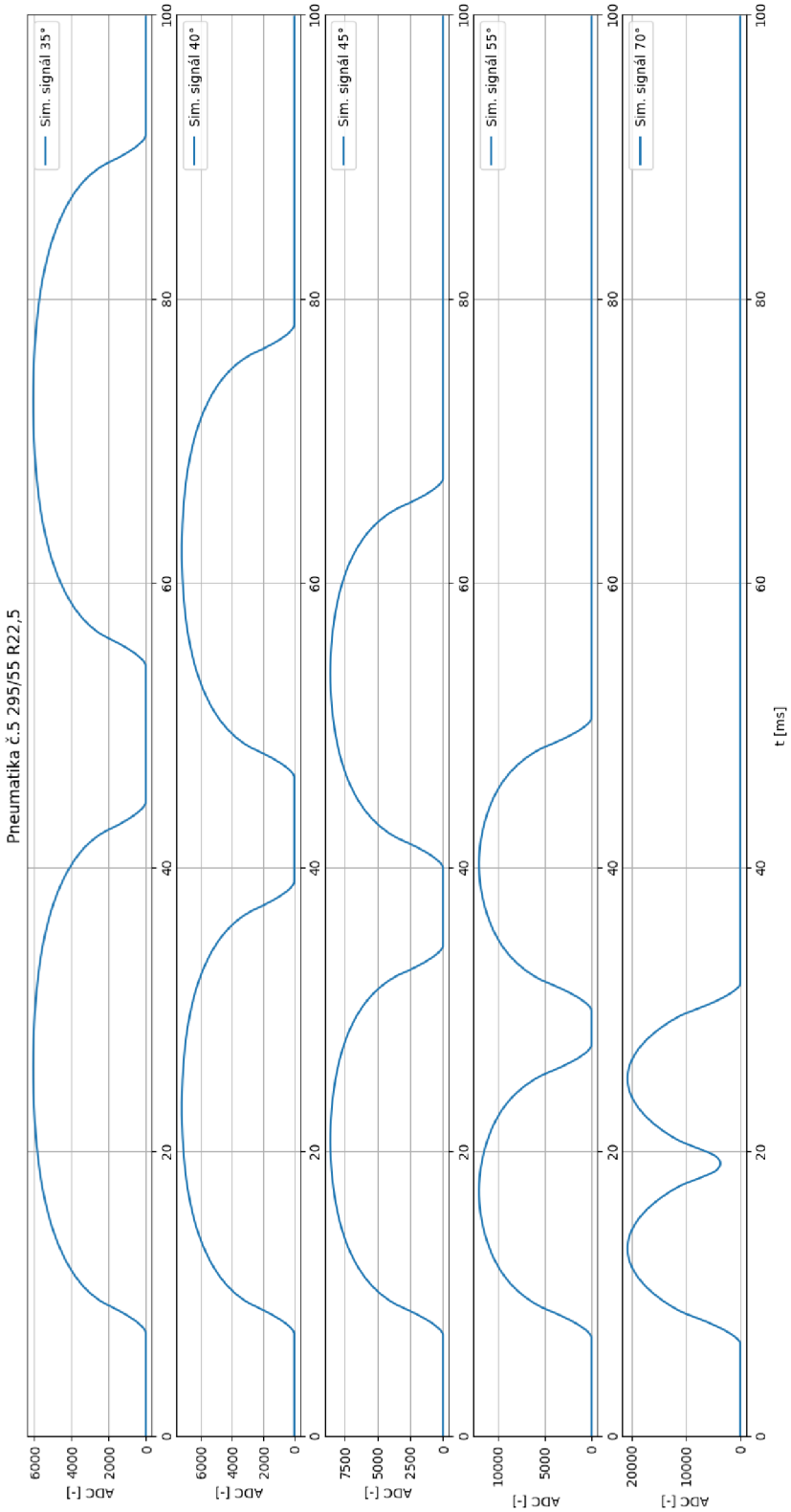
Obr. B.2: Pneumatika č.2



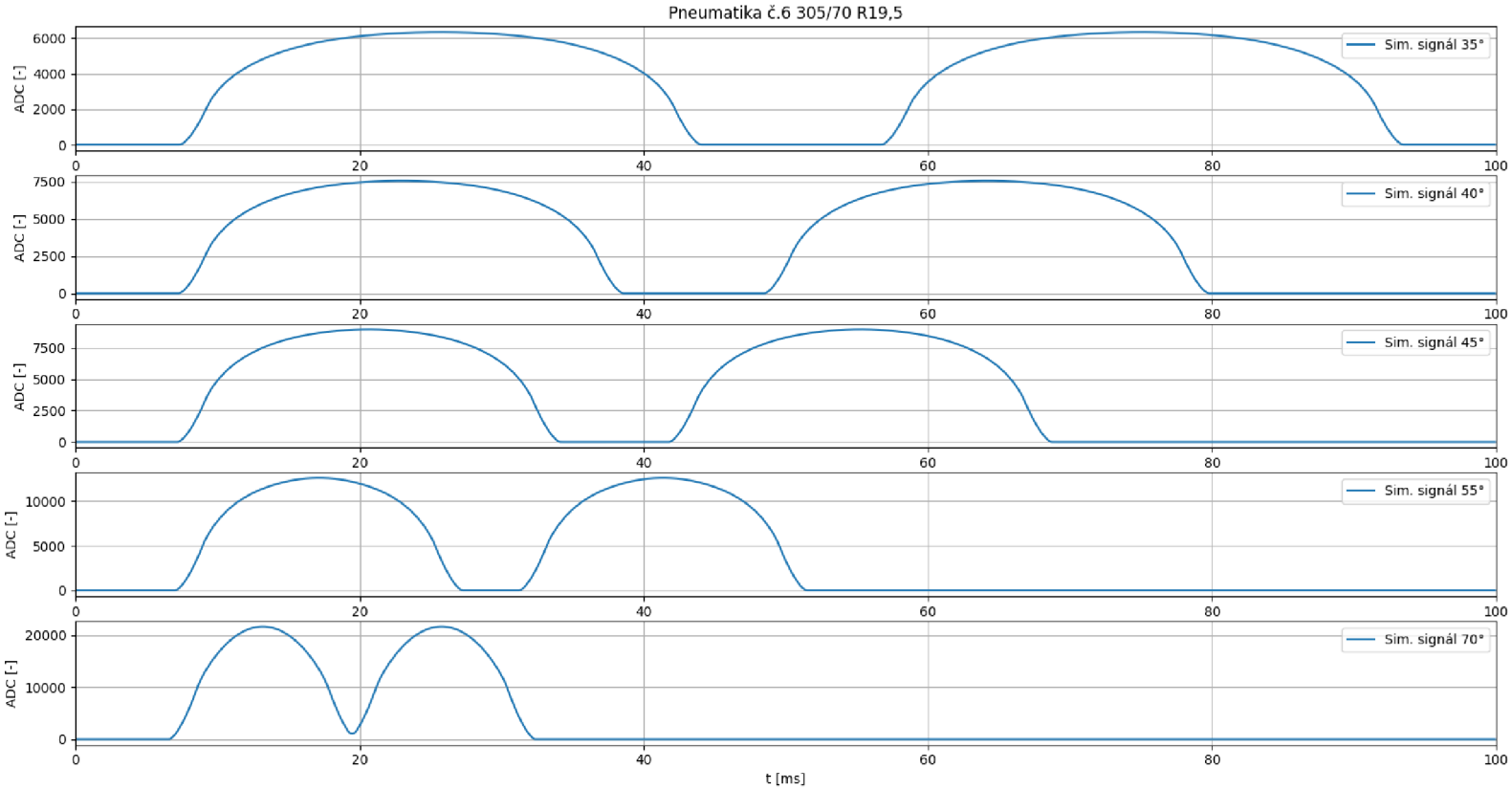
Obr. B.3: Pneumatika č.3



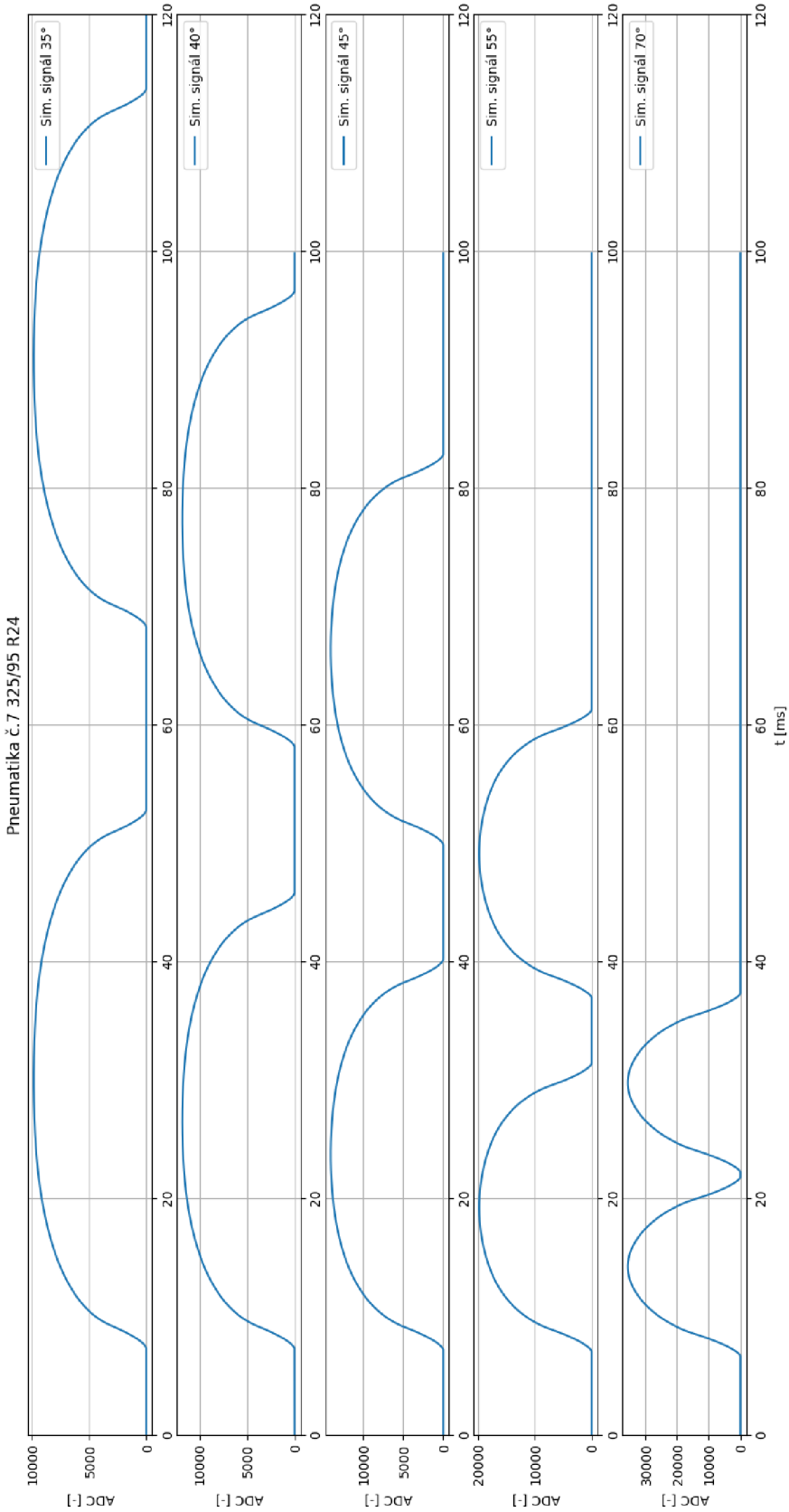
Obr. B.4: Pneumatika č.4



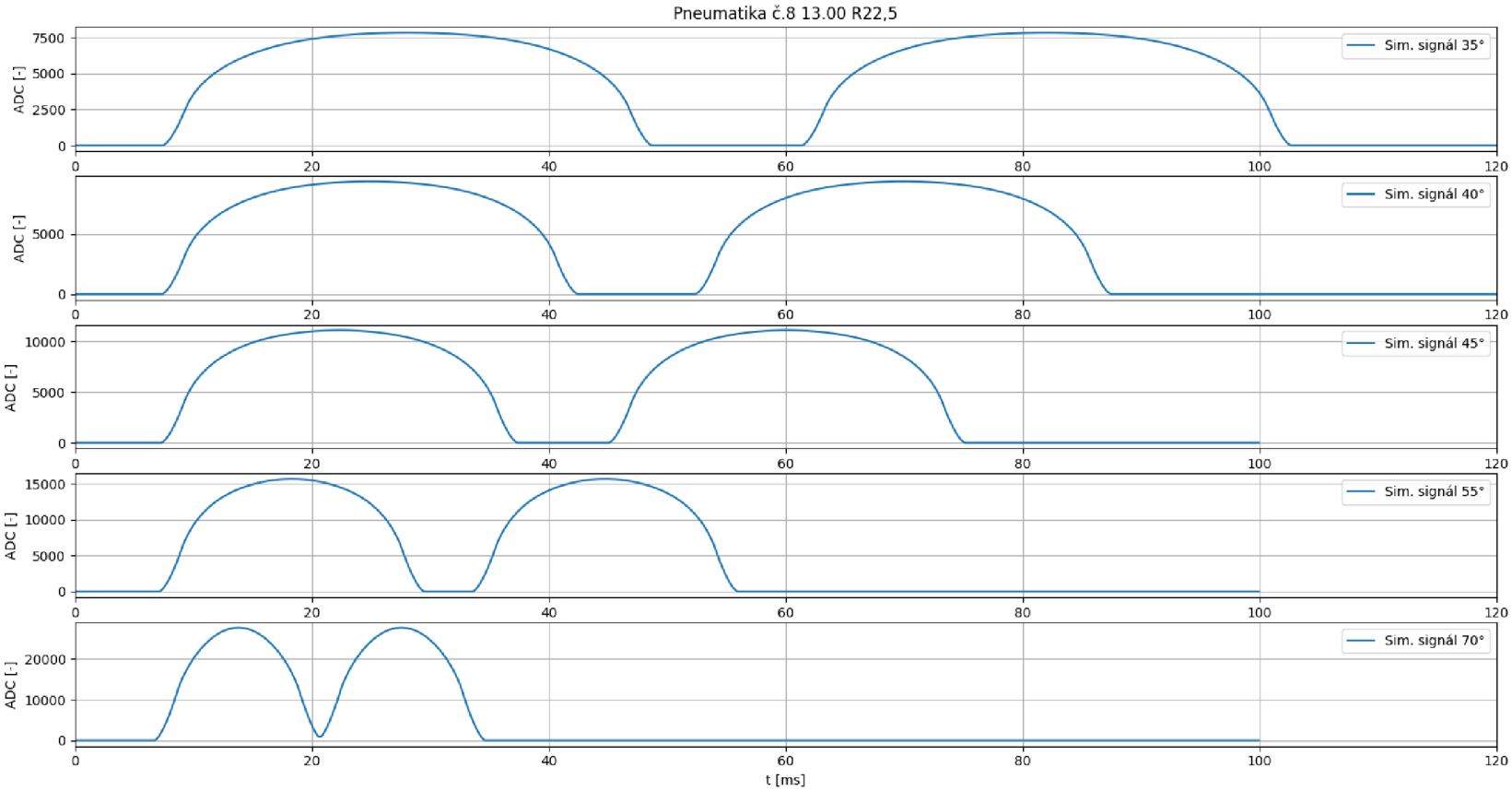
Obr. B.5: Pneumatika č.5



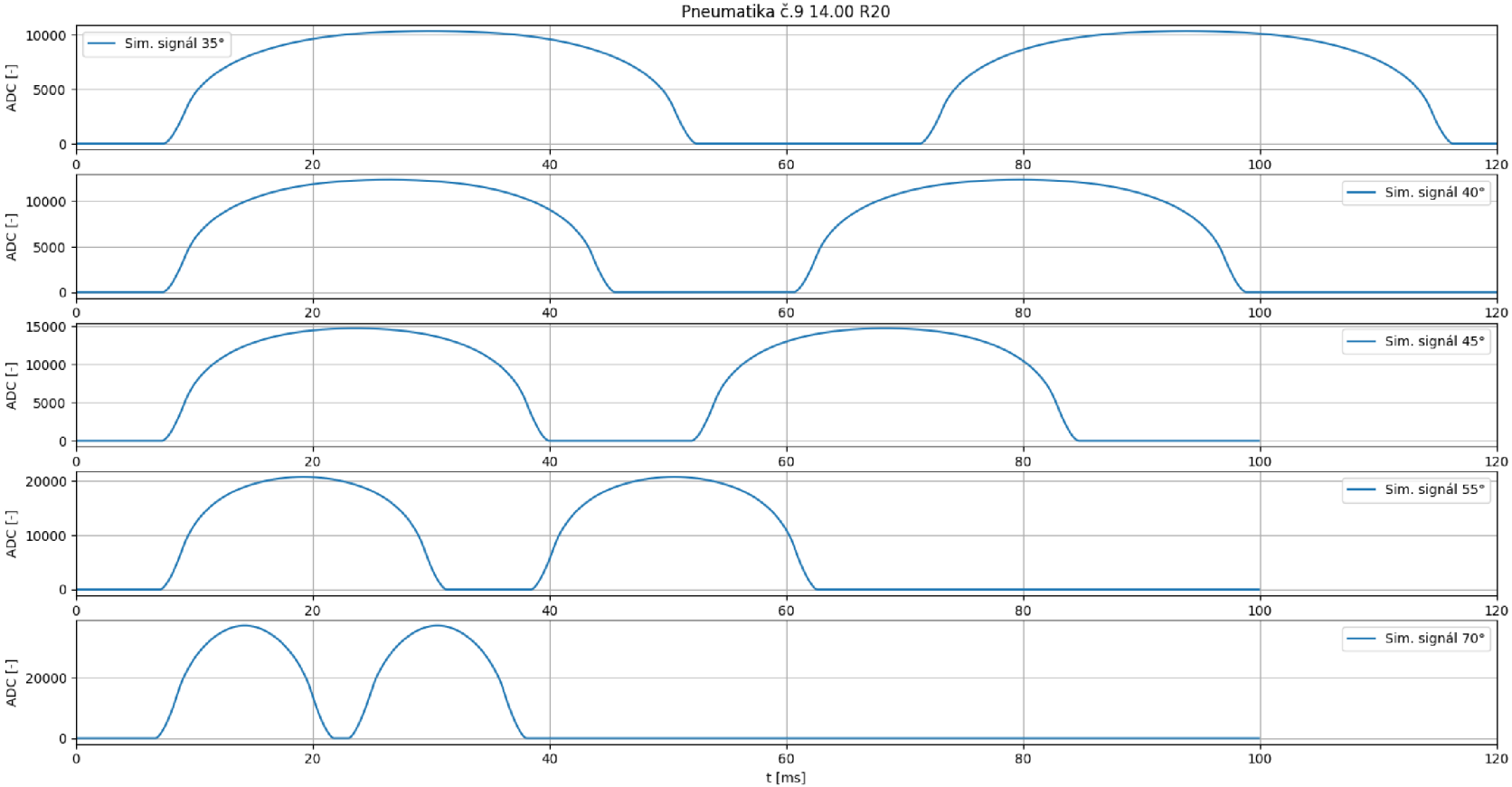
Obr. B.6: Pneumatika č.6



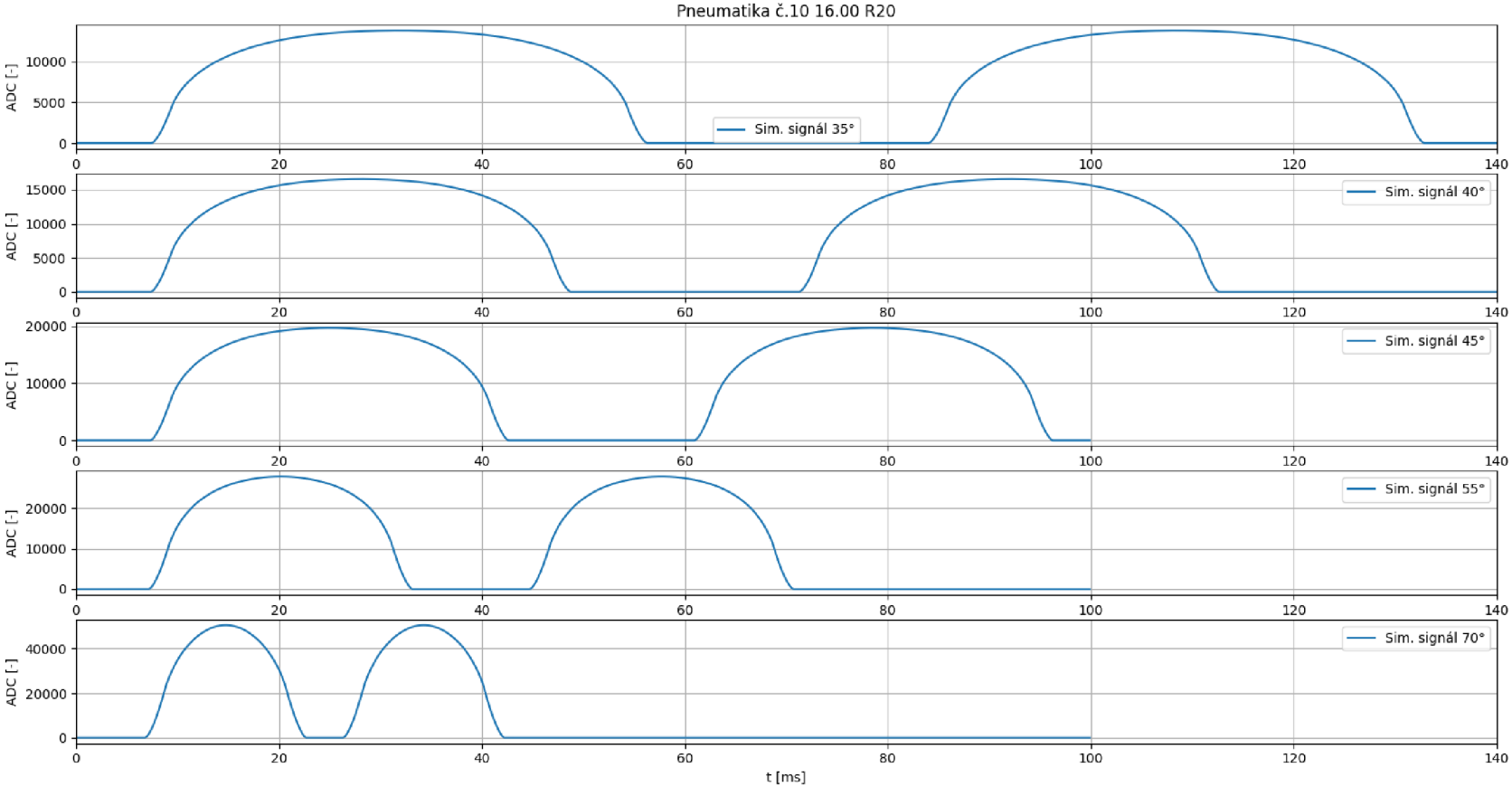
Obr. B.7: Pneumatika č.7



Obr. B.8: Pneumatika č.8

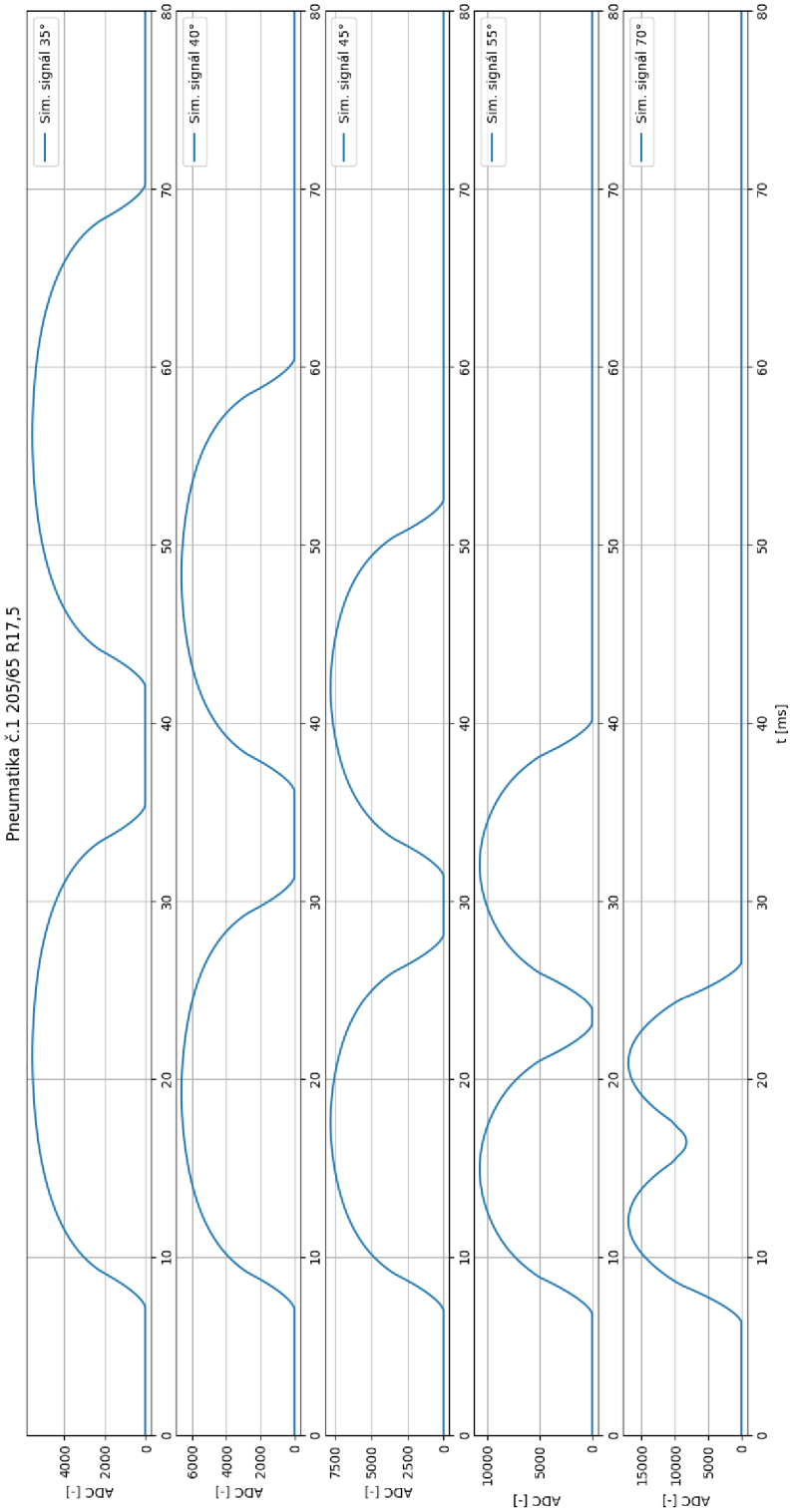


Obr. B.9: Pneumatika č.9

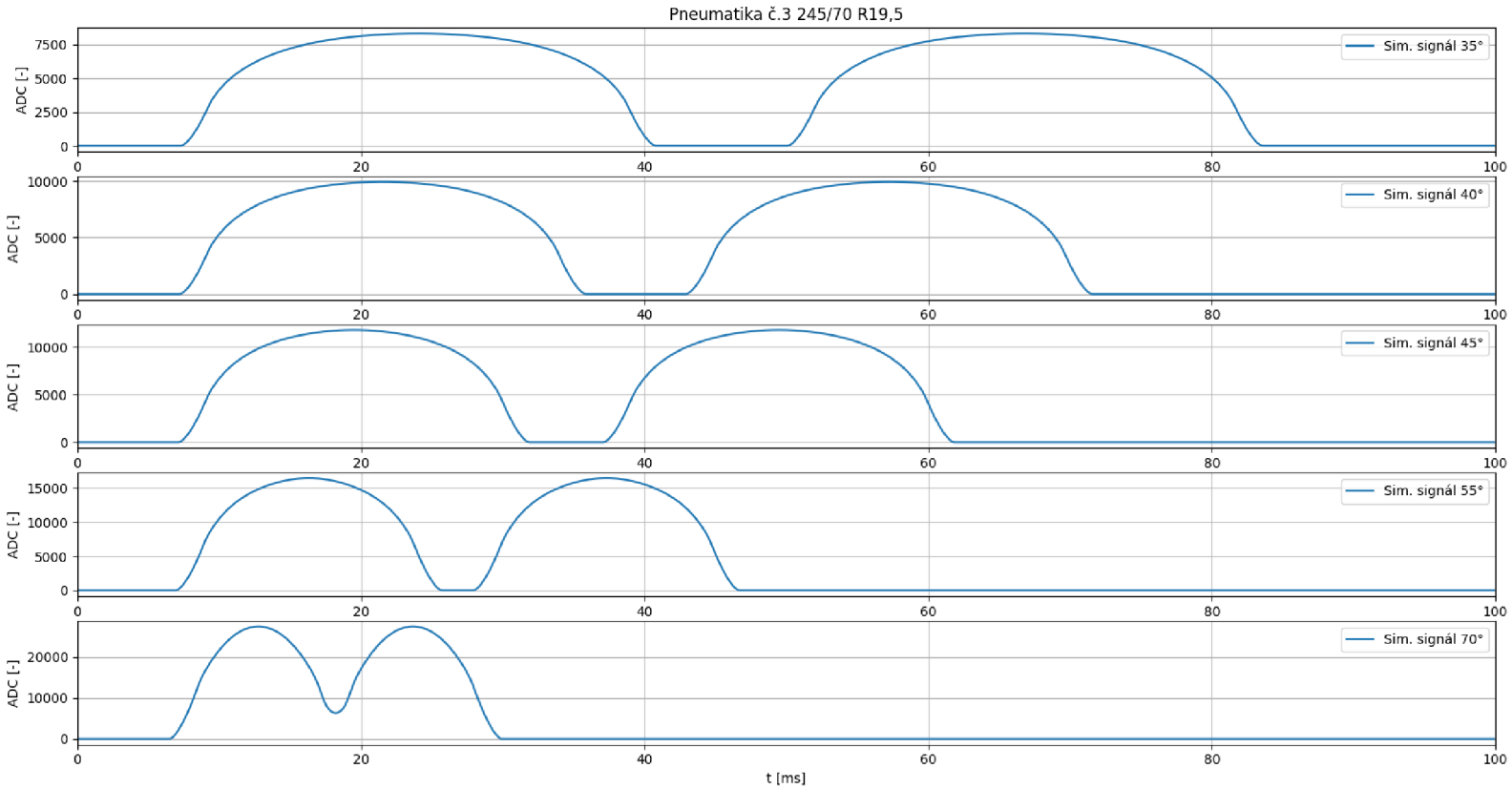


Obr. B.10: Pneumatika č.10

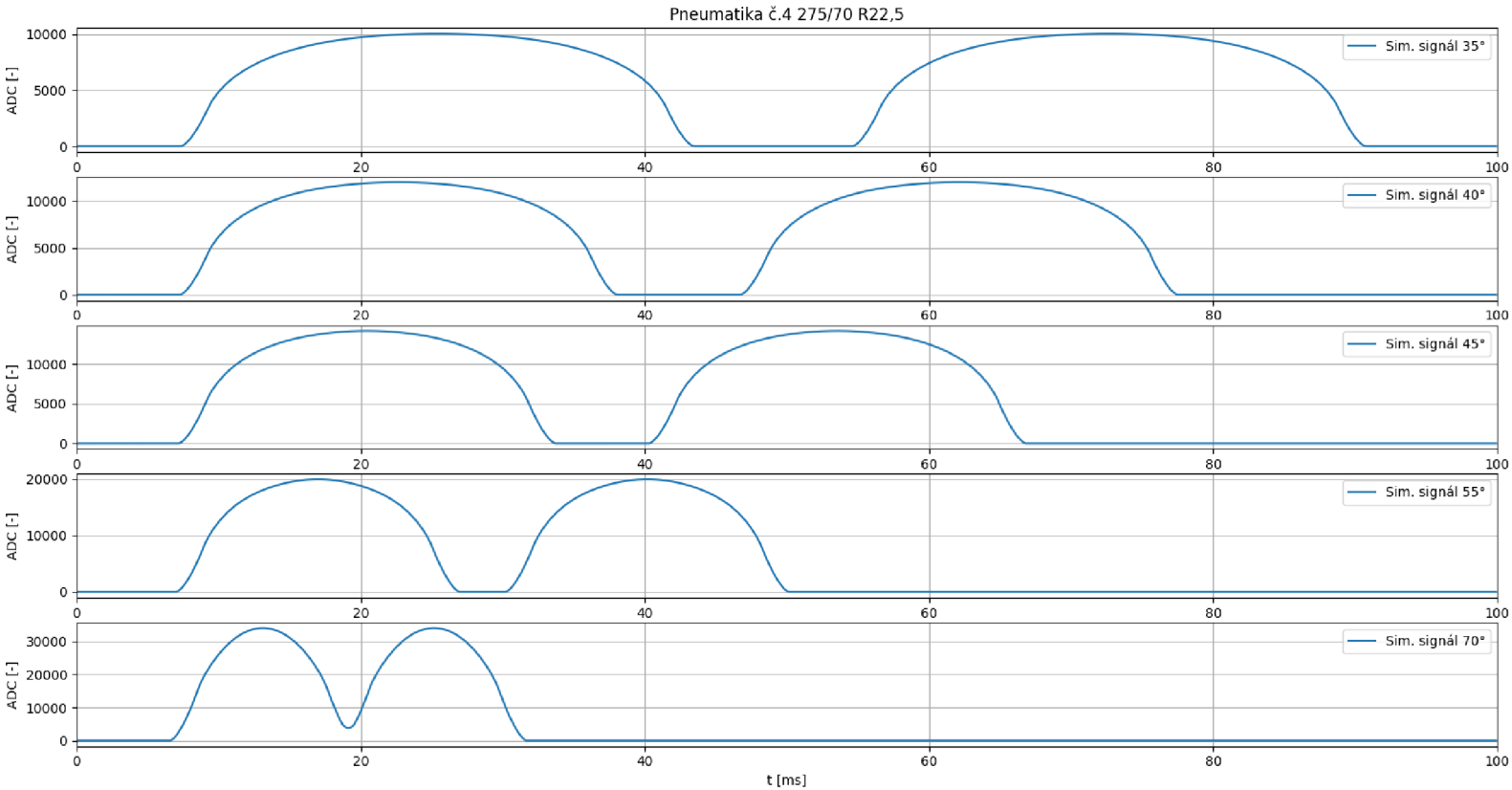
C Grafy simulace pneumatik - 8,5 bar



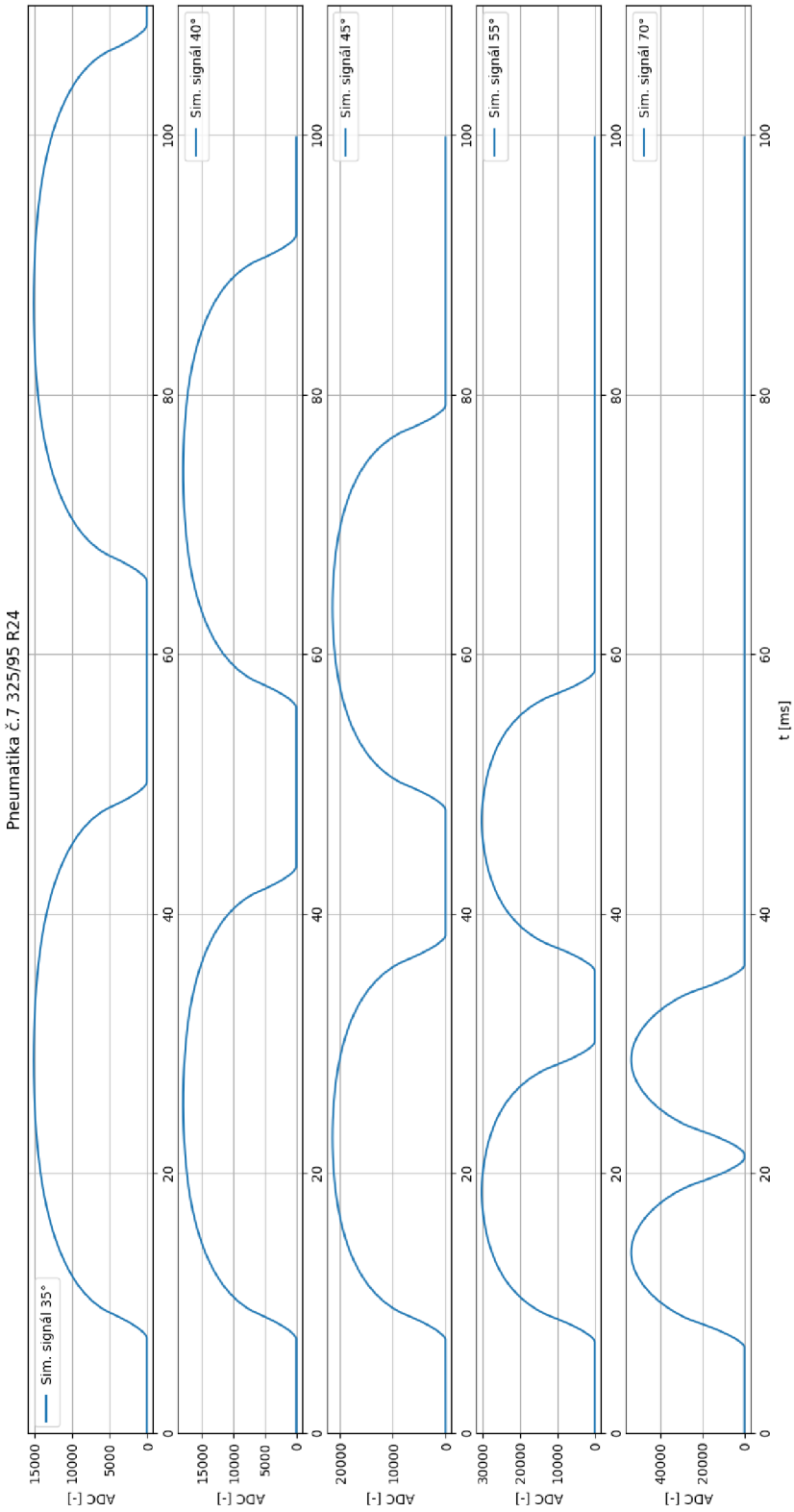
Obr. C.1: Pneumatika č.1



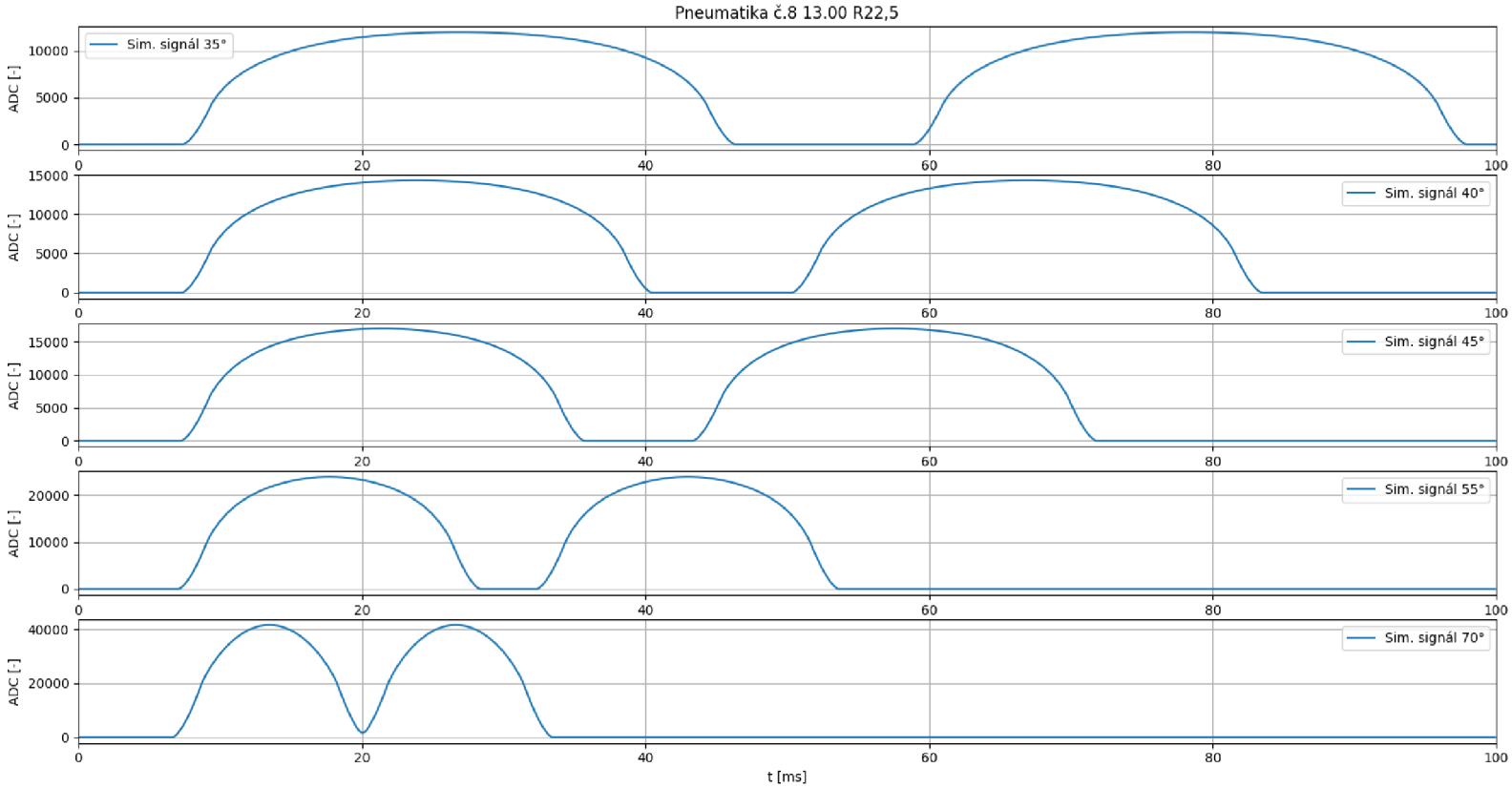
Obr. C.2: Pneumatika č.3



Obr. C.3: Pneumatika č.4



Obr. C.4: Pneumatika č.7



Obr. C.5: Pneumatika č.8

D Obsah elektronické přílohy

```
/ ..................................... Kořenový adresář přiloženého CD
├── Zdrojove_soubory ..................... Zdrojové soubory Python
│   ├── Detekce_dvojmontaze ............... SW detekce
│   │   └── main.py
│   └── Simulace ........................... SW simulace
│       ├── main.py
│       ├── vypocet.py
│       └── grafy.py
├── Overeni_stopy.xlsx ..... Naměřené hodnoty pro ověření výpočtu stopy
├── signals.csv ............................ Reálná naměřená data
└── DP_Miculka_Martin ...... Elektronická verze diplomové práce
```