



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA DOPRAVNÍ

Martin Jankovič

**MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT PRO ANALÝZU
JÍZDNÍ A NÁRAZOVÉ DYNAMIKY**

Bakalářská práce

2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K622 Ústav soudního znalectví v dopravě

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Martin Jankovič

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

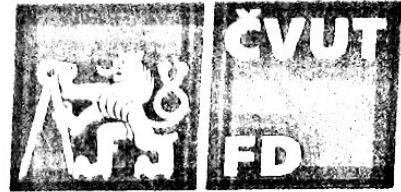
Název tématu (česky): **Měření a zpracování dat pro analýzu jízdní a nárazové dynamiky**

Název tématu (anglicky): **Measurement and Processing of Data for Analysis of Driving and Impact Dynamics**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Úvod do měření nárazové a jízdní dynamiky
- Charakteristika měřících zařízení
- Srovnání měřících zařízení
- Přípravy a průběhu experimentu s měřící technikou
- Zpracování datového výstupu
- Popis výsledku
- Závěr a zhodnocení



Rozsah grafických prací: určí vedoucí práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: ŠACHL, Jindřich. Analýza nehod v silničním provozu. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 144 s.
VLK, František. Dynamika motorových vozidel /. vyd. 2. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s.
FIRST, Jiří. Zkoušení automobilů a motocyklů : příručka

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Luboš Nouzovský
Ing. Michal Frydrýn, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce:

1. října 2017

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

27. srpna 2018

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu soudního znalectví v dopravě

prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Martin Jankovič
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 1. října 2017

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Luboši Nouzovskému za odborné vedení, trpělivost, ochotu a přátelskou atmosféru při konzultaci a tvorbě této práce. Dále pak celému Ústavu soudního znalectví v dopravě FD ČVUT za kvalitní zázemí a možnosti podílení se na projektech vedoucí k získání inspirace a vědomostí pro vytvoření této práce. Další mé díky patří Jaroslavu Pinkasovi za poskytnutí příležitosti pro měření jízdní dynamiky. A zejména také děkuji rodině za psychickou i materiální podporu, bez které bych se při svém studiu jen těžko obešel.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č.1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/2000 Sb., o autorském právu, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Ostravě dne 27.8.2018

.....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT PRO ANALÝZU JÍZDNÍ A NÁRAZOVÉ DYNAMIKY

Bakalářská práce

2018

Martin Jankovič

ABSTRAKT:

Předmětem této bakalářské práce je v její teoretické části seznámení s problematikou jízdní a nárazové dynamiky, vysvětlení aplikace senzorů a měřicích zařízení pro jízdní a nárazovou dynamiku, zpracování přehledu možných charakteristik těchto zařízení, dále pak analýza a srovnání jednotlivých senzorů, dle jejich funkce, provedení či praktické aplikace. Praktická část této práce se pak zabývá průběhem, přípravami a vyhodnocením dvou samostatných zkoušek z oblasti jízdní a nárazové dynamiky, které byly v rámci této práce provedeny.

KLÍČOVÁ SLOVA: Jízdní dynamika, nárazová dynamika, měření dat, zpracování dat, senzor, signál.

ABSTRACT:

This bachelor's thesis deals with getting to know the problematics of driving and impact dynamics, explaining the use of sensors and measurement devices used for measuring driving and impact dynamics, summing up an overview of possible characteristics of those devices, analysis and comparison of each sensor according to its function, realization or application. The practical part of this thesis describes processes, preparations and evaluation of two discrete driving and impact dynamics tests, which were performed within writing this work.

KEY WORDS: driving dynamics, impact dynamics, data measurement, data processing, sensor, signal

Obsah

1. Úvod	9
2. Úvod do jízdní a nárazové dynamiky vozidel.....	11
2.1. Definice základních pojmů.....	11
2.1.1. Mechanika	11
2.1.2. Kinematika	11
2.1.3. Dynamika.....	11
2.2. Narazová dynamika vozidel.....	11
2.2.1. Euro NCAP	12
2.2.1.1. Historie Euro NCAP.....	12
2.2.1.2. Systém hodnocení Euro NCAP.....	14
2.2.1.3. Druhy nárazových zkoušek Euro NCAP	15
2.2.1.4. Instrumentace pro nárazové zkoušky Euro NCAP	19
2.2.1.5. Kritéria výpočtu zranění na základě nárazových zkoušek Euro NCAP	23
2.3. Jízdní dynamika vozidel	26
2.3.1. Rychlostní zkoušky	26
2.3.1.1. Veličiny a jednotky používané při rychlostních zkouškách	26
2.3.1.2. Zařízení při měření rychlosti:	26
2.3.1.3. Metody měření jednotlivých druhů rychlostních zkoušek	28
2.3.1.4. Kritéria hodnocení maximální rychlost	28
2.3.2. Zkoušky zrychlení	28
2.3.2.1. Veličiny a jednotky používané při zkouškách zrychlení.....	29
2.3.2.2. Zařízení pro měření zrychlení	29
2.3.2.3. Metody měření	29
2.3.3. Zkoušky jízdních odporů:	29
2.3.4. Zkoušky stability.....	30
2.3.4.1. Zařízení pro měření zkoušek stability	30
3. Klasifikace a charakteristika měřicích zařízení	32
3.1. Senzor.....	32
3.2. Klasifikace senzorů.....	33
3.3. Charakteristika senzorů.....	34
3.3.1. Přenosová funkce	34
3.3.2. Vstupní rozsah.....	36
3.3.3. Výstupní rozsah	36
3.3.4. Přesnost.....	36

3.3.5. Hystereze.....	37
3.3.6 Nelinearita.....	37
3.3.7. Saturace	39
3.3.8. Opakovatelnost.....	39
3.3.9. Dead Band.....	40
3.3.10. Rozlišení.....	41
3.3.11. Výstupní impedance.....	41
3.3.12. Excitace	42
4. Srovnání typů měřících zařízení.....	43
4.1. Akcelerometry	43
4.1.1 Obecný princip činnosti.....	44
4.1.2. Piezoelektrické akcelerometry.....	45
4.1.2.1 Typy piezoelektrický akcelerometrů.....	47
4.1.3. Piezorezistivní akcelerometry.....	49
4.1.4. Kapacitní akcelerometry.....	50
4.1.5. Tepelné akcelerometry.....	50
4.2. Tenzometry	51
4.2.1. Kapacitní tenzometry	51
4.2.2. Rezonanční tenzometry	53
4.2.3. Tenzometry s metastabilními magnetickými slitinami	54
4.2.4. Odporové tenzometry.....	56
4.3. Odporové senzory polohy.....	57
4.3.1. Polohové potenciometry.....	57
4.3.2. Úhlové potenciometry	58
4.3.3. Lankové / tahové senzory polohy.....	59
4.4 Gyroskopy	59
4.5. Otáčkoměry	60
5. Příprava a průběh měření	62
5.1. Nárazová zkouška.....	62
5.1.1 Cíl měření	62
5.1.2. Použitá zařízení	62
5.1.2.1. Datová ústředna Krypton.....	62
5.1.2.2. Akcelerometry	63
5.1.2.3. Pásový siloměr	64
5.1.2.4. Lankový potenciometr	65
5.1.2.5. Trigger.....	65
5.1.2.6. Figurína	65

5.1.2.7. Crash PC.....	66
5.1.3. Přípravy měření	66
5.1.4. Průběh měření	68
5.2. Brzdná zkouška návěsu	69
5.2.1. Cíl měření	69
5.2.1.1. Cíl měření práce kooperačního partnera Jaroslava Pinkase	69
5.2.1.2. Cíl měření této práce	69
5.2.2. Použitá měřicí zařízení.....	70
5.2.1.1. Sdružený snímač Xsens MTi-G	70
5.2.1.2. Rychloměr DEWETRON.....	71
5.2.1.3. Čítač National Instruments	72
5.2.1.4. Infračervený bezdotykový teploměr s možností připojení kontaktní sondy	72
5.2.1.5. Analogový tlakoměr	72
5.2.3. Vozidla použitá při měření.....	73
5.2.2.1. Měřicí tahač Iveco	73
5.2.2.2. Měřený návěs ANNABURGER HTS 22G.14	73
5.2.4. Měřicí místo	74
5.2.5. Příprava měřicí techniky.....	74
5.2.5 Průběh měření	75
6. Zpracování datového výstupu	76
6.1. Grafické zpracování datového výstupu nárazová zkoušky	76
6.1.1. Výsledný průběh zrychlení těžiště karoserie automobilu	77
6.1.2. Výsledný průběh zrychlení hlavy figuríny dítěte.....	78
6.1.3. Výsledný průběh zrychlení hrudníku figuríny dítěte	79
6.1.4. Výsledný průběh změny polohy hlavy figuríny dítěte	80
6.1.5. Výsledný průběh síly působící v bezpečnostním pásu figuríny dítěte	81
7. Popis výsledku měření	82
7.1. Popis výpočtu hodnot kritérií nárazové zkoušky	82
7.1.1. Maximální hodnota výsledného zrychlení hlavy.....	82
7.1.2. Průměrná hodnota výsledného zrychlení hlavy	82
7.1.3. Maximální hodnota výsledného zrychlení karoserie	82
7.1.4. Průměrná hodnota výsledného zrychlení karoserie	82
7.1.5. Maximální hodnota výsledného zrychlení hrudi	82
7.1.6. Průměrná hodnota výsledného zrychlení hrudi.....	83
7.1.7. HIC (Head Injury Criterion).....	83
7.1.8. Impact severity index	83
7.1.9. Kritérium 3ms pomocí funkce Xms.....	84

7.1.10. Kritérium 3m pomocí funkce X_g	84
7.2. Popis výstupu a výsledek měření brzdných zkoušek	85
7.2.1. Měření CZP 30.....	86
7.2.2. Měření BZ 30	87
7.2.3. Měření BZ 60-2.....	88
7.2.4. Měření BV 60.....	89
7.2.5. Měření CZP 60.....	90
7.3. Zhodnocení výstupu měření brzdné zkoušky návěsu	91
8. Závěr	92
Seznam obrázků.....	95
Seznam tabulek.....	97
Seznam grafů	98

Seznam použitých zkratk

ABS	Anti-lock Brake Systém
EHK OSN	Evropská hospodářská komise Spojených národů
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
GPS	Global positioning systém
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
SNRA	Švédská státní správa silnic
FIA	Mezinárodní automobilová federace
FSO	Full-scale output
ČVUT FD	České vysoké učení technické Fakulta dopravní

1. Úvod

Měřicí technologie jsou nezbytnou součástí testování dynamiky vozidel a jiných strojů, protože bez jejich existence by nebylo možné objektivně a přesně posuzovat a srovnávat jednotlivé zkoušky. Tato práce se zabývá paralelně dvěma odvětvími měření dynamiky, a to měřicími technologiemi a analýzou dat z nich získaných pro zkoušky pasivní bezpečnosti tedy dynamiky nárazové, rovněž tak se tato práce však soustředí i na měřicí technologie využívající se pro měření zkoušek jízdní dynamiky.

První část této práce se zabývá vůbec smyslem zkoušek, jak nárazových, tak jízdních. Rozděluje příslušné zkoušky do skupin dle jejich průběhu a významu, který u jednotlivých zkoušek vysvětluje. U zkoušek pasivní bezpečnosti se úzce zaobírá hlavně předpisy, parametry, druhy zkoušek a jejich průběhy u společnosti EuroNCAP, která veřejně zpřístupňuje protokoly k jednotlivým zkouškám, čímž umožňuje přístup i široké veřejnosti k nahlédnutí do toho, jakým způsobem je přesně vozidlo testováno, jaká je instrumentace vozidla měřicí technikou pro konkrétní zkoušky, jaké jsou využívány vzorce pro výpočet kritérií a jaké jsou mezní hodnoty kritérií pro jednotlivé stupně bezpečnosti.

V pasáži věnující se dynamice jízdní je pro ilustraci významu měřicích technologií v tomto odvětví uveden zlomek ze zkoušek jízdní dynamiky, kterým vyráběné vozidlo po procesu výroby prochází. Zejména jsou zde zmíněny zkoušky, které úzce souvisejí s měřením zrychlení, rychlosti a polohy (obecně kinematiky), protože právě zařízeními vhodnými pro jejich měření disponuje domovský ústav autora, tedy Ústav soudního znaleství v dopravě FD ČVUT v Praze. Přínosem této kapitoly se tedy stává zejména objasnění významu měřicích technologií pro automotive engineering, ba i pro jinou inženýrskou praxi.

Další dvě části se dají považovat za jádro rešerše této práce. První z nich se věnuje klasifikaci a zejména taky charakteristice měřicích zařízení. Snaží se přiblížit základní vlastnosti signálu senzorů využívajících se nejen pro dynamická měření. Vysvětluje důvod vzniku a dopad na výsledek měření jednotlivých charakteristik signálu senzoru. Osvětluje jejich význam pro znalost uživatele, který se v technických specifikacích a kalibračních protokolech může dozvědět o právě konkrétní charakteristice daného senzoru.

V další části jádra této rešerše jsou uvedeny konkrétní typy senzorů, jsou rozděleny dle jejich funkce, konstrukčního provedení či principu na základě kterého pracují. Každý z těchto aspektů rozdělení je pak u jednotlivých typů rozebrán a vysvětlen. U některých zařízení jsou také uvedeny matematicko – fyzikální vzorce, které pomáhají definovat princip daného senzoru. U typů senzorů s různými možnostmi konstrukce a principu fungování jsou zmíněny výhody a nevýhody jednotlivých modifikací jejich provedení.

Následně práce přechází v praktickou část, která se skládá z popisu příprav a průběhu dvou experimentů. První z nich se týká nárazové zkoušky vozidla, která proběhla ve spolupráci se Škoda auto a.s. a druhá brzdné zkoušky návěsu sloužícího pro zemědělské účely. U každé ze zkoušek bylo aplikováno vhodné měřicí zařízení.

S naměřenými daty nárazové zkoušky proběhlo později jejich vyhodnocení, jehož výstup je v grafické podobě v této kapitole vyobrazen společně s vypočítanými kritérii a metodami jejich výpočtu. Podobným způsobem je zde obsaženo i vyhodnocení brzdné zkoušky s uvedenými nezajímavějšími grafickými výstupy a metodami získání klíčových hodnot vyhodnocení.

Tato práce tedy provádí od osvětlení smyslu měřících technologií pro dynamiku vozidel, přes jejich charakteristiku, typy a vlastnosti jednotlivých senzorů a jejich signálů až po praktickou aplikaci při reálném měření dvou samostatných zkoušek, které byly společně s nabytím teoretických znalostí ze světa měřicí techniky cílem této práce.

2. Úvod do jízdní a nárazové dynamiky vozidel

2.1. Definice základních pojmů

Tato podkapitola upřesní několik základních pojmů.

2.1.1. Mechanika

Mechanika je základním a nejstarším odvětvím fyziky a zabývá se mechanickým pohybem. Lze ji rozdělit na dvě složky, a to kinematiku a dynamiku. [1]

2.1.2. Kinematika

Kinematika je jednou ze dvou odnoží mechaniky a zabývá se popisem pohybu těles či hmotných bodů. Mezi její základní veličiny patří dráha, rychlost a zrychlení. [1]

2.1.3. Dynamika

Dynamika je druhou větví mechaniky a věnuje se zkoumání příčin pohybu těles a hmotných bodů, tedy studuje síly na ně působící. Základní veličinou, kterou je dynamika charakterizována je síla. Působení sil na tělesa hmotné body popisují tzv. Newtonovy zákony. [1]

Tato práce bude zejména vztažena k dynamice studující nárazy vozidel, tedy k nárazové dynamice a také k dynamice samotné jízdy vozidel, tedy dynamice jízdní. [1]

2.2. Nárazová dynamika vozidel

Nárazová dynamika vozidel se v praxi analyzuje na základě nárazových zkoušek, které jsou hojněji označovány jako crash testy. Jedná se o způsob destruktivního testování, které probíhá s cílem zajištění bezpečnostních norem konstrukce v oblasti odolnosti proti nárazu, či za účelem pouhého hodnocení vlivu nárazu na zranění jeho posádky nebo jiných účastníků nehody (např. chodce či cyklisty). Hodnocení se může vztahovat jak na míru bezpečnosti samotného vozidla při nárazu, tak na míru vlivu překážky na destrukci vozidla při nárazu v případě její role v havárii.

Kontrolu zajištění bezpečnostních norem provádí v rámci homologačních zkoušek u výrobců automobilů certifikované zkušebny jako například TÜV SÜD Czech s.r.o. či Dekra a.s. Samotní výrobci automobilu rovněž provozují v rámci vývoje bezpečnosti ve vlastních zkušebnách testy nárazové dynamiky vozidel. Motivací jim k tomu jsou například spotřebitelské testy nezávislých

společností, které se na základě analýzy vycházející ze samostatných crash-testů, jenž tyto společnosti ve svých vlastních zkušebnách provádějí, snaží ohodnotit a porovnat pasivní bezpečnost vozidel, tedy rozsah vlivu nárazu při nehodě, který se automobilový výrobce svým vývojem snaží minimalizovat. Mezi nejpopulárnější takové společnosti patří v Evropě např. společnost Euro NCAP (European New Car Assessment Programme). V USA pak např. NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) nebo také IIHS (Insurance Institute for Highway Safety). Výsledky a protokoly pro provádění jejich testů jsou na rozdíl od testů homologačních veřejně přístupné a z tohoto důvodu jsou postupy jejich experimentů a systém jejich hodnocení nastíněny v další kapitole. [2], [3], [4]

2.2.1. Euro NCAP

2.2.1.1. Historie Euro NCAP

Od sedmdesátých let řada evropských vlád pracovala prostřednictvím Evropského výboru pro experimentální vozidla (EEVC) na posuzování různých aspektů sekundární bezpečnosti automobilů. Počátkem devadesátých let tento výzkum začal rozvíjet celoplošné nárazové zkoušky na ochranu osob ve vozidlech před čelním a bočním nárazem a zkušební postupy pro posouzení ochrany chodců před srážkou automobilem. [5]

V roce 1994 byly návrhy na přijetí konceptů zkoušek EEVC v evropských právních předpisech silně odmítány automobilovým průmyslem. V červnu 1994 britské ministerstvo dopravy zvážilo vytvoření NCAP ve Velké Británii, které by se později mohlo rozšířit po celé Evropě. Program by byl komplexnější a založený na zkušebních metodách vypracovaných EEVC. [5]

V červenci 1995 se v Evropské komisi setkali zástupci zájemců o rozšíření programu, aby diskutovali o dalších postupech. [5]

V listopadu 1996 se zapojily první organizace do testovacího programu pro bezpečnost vozidel, Švédská státní správa silnic (SNRA), Mezinárodní automobilová federace (FIA) a Mezinárodní testování. Výsledkem je vytvoření Euro NCAP. Zahajovací schůzka se konala v prosinci 1996. Program byl od začátku ambiciózní, komplexní a bylo rozhodnuto zajistit možnost testování na vědecké úrovni. V první fázi testů bylo vybráno sedm vozů typu supermini a výrobci byli požádáni o informace ohledně těchto vozidlech. Pro srovnávací testy musely být zkoušky provedeny na vyšší úrovni, než je nezbytné pro právní předpisy. [5]

V únoru 1997 byly na tiskové konferenci prezentovány první výsledky, jednalo se o hodnocení ochrany dospělých cestujících a ochrany chodců. Zveřejnění těchto prvních výsledků způsobilo značný zájem médií, který byl vyvolán silou negativních reakcí výrobců automobilů. V té chvíli začali automobiloví výrobci silně kritizovat Euro NCAP, jeho testy a hodnocení.

Jedním z mnoha tvrzení bylo, že kritéria hodnocení byla natolik přísná, že žádné auto nemůže dosáhnout čtyř hvězd pro ochranu cestujících. [5]

V červenci 1997 byly zveřejněny výsledky z druhé fáze testů a Euro NCAP s potěšením oznámilo, že Volvo S40 se stalo prvním 4-hvězdičkovým vozem pro ochranu cestujících. Počet získaných hvězd se s příchodem nových modelů, které byly v rámci druhé fáze testovány se oproti první fázi díky vývoje automobilových výrobců obecně zvýšil. [5]

V roce 1999 se operační kontrola Euro NCAP přesunula z Velké Británie do sekretariátu se sídlem v Bruselu. [5]

Za další milník lze považovat rok 2001, kdy se vůz Renault Laguna stala prvním vozem, které získalo 5 hvězdiček pro ochranu cestujících. (obrázek č.1). Od roku 2001 vzrostly normy tak, aby bylo dosaženo tohoto hodnocení častěji a výrobci stále více vnímají pět hvězdiček v ochraně dospělých cestujících jako cíl pro všechny své nové modely. [5]

V roce 2017 oslavil Euro NCAP své dvacáté výročí. Od roku 1997 zachránil statisticky více než 78 000 životů, vydal více než 630 bezpečnostních hodnocení, otestoval zhruba 1800 vozů a vynaložil více než 160 milionů eur na bezpečnost automobilů. [5]

První testy zveřejněné v roce 1997 odhalily bezpečnostní selhání v nejprodávanejších rodinných vozidlech a vynutily zásadní přehodnocení způsobu, jakým byla vozidla navrhována tak, aby zabraňovala nehodám. Po dvaceti letech, 9 z 10 vozů prodávaných na evropském trhu má rating Euro NCAP a automobilový průmysl aktivně podporuje vývoj nových požadavků pro nejvyšší hodnocení bezpečnosti. [5]



Obr. [1] Renault Laguna při čelním nárazu v roce 2001

2.2.1.2. Systém hodnocení Euro NCAP

Euro NCAP vytvořil pětihvězdičkový systém hodnocení bezpečnosti, který pomáhá podnikům, spotřebitelům a jejich rodinám snáze porovnávat vozidla a umožňuje jim identifikovat nejbezpečnější volbu. [6]

Bezpečnostní hodnocení vychází ze série testů vozidel, jež byly navrženy a provedeny společností Euro NCAP. Tyto testy představují zjednodušeným způsobem důležité scénáře reálných dopravních nehod, které by mohly vést k poškození nebo usmrcení cestujících ve vozidle nebo jiných účastníků silničního provozu. [6]

Počet hvězd vyjadřuje, jak dobře vozidlo uspělo v testech Euro NCAP, ale rovněž tak je tento parametr odvozen z nabídky bezpečnostního vybavení, které výrobce nabízí na jednotlivých trzích. Takže vysoký počet hvězd ukazuje nejen skutečnost, že výsledek testu byl dobrý, ale také fakt, že bezpečnostní zařízení na testovaném modelu jsou snadno dostupné všem spotřebitelům v Evropě. Hvězdičkové hodnocení přesahuje zákonné požadavky, a ne všechny nové vozy se musí podrobit zkouškám Euro NCAP. Automobil, který těsně splňuje minimální požadavky pro homologaci, by neměl mít nárok na žádné hvězdy. Neplatí, že automobil, který má špatné hodnocení, je nutně nebezpečný, ale značí to, že není tak bezpečný jako automobily mu v testu konkurující. [6]

Pětihvězdičkový systém hodnocení bezpečnosti se neustále vyvíjí, protože starší technologie dozrávají a k dispozici jsou stále nové inovace. To znamená, že testy jsou pravidelně aktualizovány, do systému jsou přidávány nové testy a upravovány úrovně hvězd. Z tohoto důvodu je ročník testu nezbytný pro jeho správný výklad testu. Nejaktuálnější hodnocení je vždy nejvíce směrodatné. [6]

Nejnovější hodnocení je vždy nejrelevantnější a porovnávání výsledků z různých let je možné pouze v případě, že aktualizace schématu hodnocení jsou minimální. Nedávno začlenění nové technologie pro zamezení nárazu výrazně změnilo význam hvězd. [6]

Od roku 2016 mají některé automobily dvojí hodnocení. Jedno hodnocení je vztahováno na vozidlo vybavené pouze bezpečnostním zařízením, které je standardem pro každou variantu modelové řady v rámci EU. Toto hodnocení ukazuje minimální úroveň bezpečnosti, která se dá očekávat od jakéhokoli vozu prodávaného kdekoli v Evropské unii. Všechny vozy posuzované Euro NCAP mají toto základní bezpečnostní hodnocení. [6]

Druhé hodnocení je založeno na vozidle s dodatečným "bezpečnostním balíčkem", které může být nabízeno jako doplňková možnost pro spotřebitele. Dodatečné bezpečnostní vybavení obsažené v bezpečnostním balení zvýší bezpečnostní hodnocení vozu, a proto druhá hvězdičková kvalifikace demonstruje bezpečnostní úroveň, kterou může vozidlo dosáhnout,

pokud je toto dodatečné vybavení jeho součástí. Ne každé vozidlo má toto druhé hodnocení, ale pokud je k dispozici, pomáhá spotřebitelům snadno pochopit výhodu dodatečného vybavení vyjádřeného ve speciálních hvězdách. [6]

Níže jsou uvedeny charakteristiky jednotlivých hvězdičkových ohodnocení:

- 5 hvězdiček: Celkově dobrý výkon při ochraně před nárazem. Je dobře vybavena robustní technologií vyhýbání se nárazům.
- 4 hvězdičky: Celkově dobrý výkon při ochraně před nárazem; může být k dispozici další technologie vyhýbání se nárazům.
- 3 hvězdičky: Průměrná až dobrá ochrana cestujících, ale chybí technologie vyhýbání se nárazům.
- 2 hvězdičky: Nominální ochrana před nárazem, ale chybějící technologie vyhýbání se nárazům.
- 1 hvězdička: Mezní ochrana před nárazem. [6]

2.2.1.3. Druhy nárazových zkoušek Euro NCAP

Euro NCAP provádí řadu nárazových zkoušek, jak pro ochranu dospělých cestujících, tak pro ochranu dětí na zadních sedadlech či ochranu chodců. V této kapitole jsou rozvedeny 3 základní testy pro ochranu dospělých cestujících, jejich smysl, průběh a instrumentace. [7]

Čelní náraz do deformovatelné překážky se 40 % překrytím

Čelní nárazy mají oproti jiným typům nehod na svědomí větší podíl na počtu úmrtí a vážných zranění. Charakteristické jsou pro ně čelní kolize mezi dvěma protijedoucími vozidly se středně vysokými rychlostmi. Při většině těchto kolizí se střetá při nárazu pouze část konstrukce přední části obou vozidel, tedy dvě kolidující vozidla jsou od sebe odsazena. [7]

Během testu se testovací vozidlo pohybuje rychlostí 64 km/h a při nárazu se ze 40 % překrývá s deformovatelnou bariérou, která demonstruje blížící se protijedoucí vozidlo. Zkouška simuluje srážku dvou vozidel stejné hmotnosti, při totožné rychlosti 50 km/h. Dvě testovací figuríny představují muže a jsou na předních sedadlech a figuríny dětské jsou umístěny v dětských zádržných systémech na sedadlech zadních. [7]

Výsledek tohoto testu závisí zejména na konstrukci vozidla. Nedokonalé provedení konstrukce může vystavit posádku vozidla většímu nebezpečí. Nárazové síly musí být nasměrovány na části vozidla, kde může být energie efektivně a bezpečně absorbována. Přední deformační zóna by měla být při nárazu zkroucena tak, aby prostor cestujících byl ohrožen a přetvarován

co nejméně. Dalším aspektem pro zabránění vážných zranění či úmrtí je také omezení zpětného pohybu volantů a pedálů. [7]



Obr. [2] Znárodnění čelního nárazu do deformovatelné překážky s překrytím 40%

Čelní náraz do nedeformovatelné překážky se 100 % překrytím

V posledních letech je všeobecná snaha konstrukce vozidel zpevňovat. Tento trend pomohl snížit poranění dolních končetin a hlavy, protože prostor pro cestující je méně náchylný na zkroucení. Vyšší konstrukční tuhost však také znamená vyšší zpomalení při havárii, které je třeba řešit zádržnými systémy předních a zadních sedadel. Tato zpomalení mohou vést k vážným poraněním hrudníku zranitelných pasažérů (menších nebo starších osob). [7]

Euro NCAP zkouší vozy proti pevné bariéře s plným překrytím při zkušební rychlosti 50 km/h. Mužská figurína čelního nárazu sedí na předním sedadle řidiče a na zadním sedadle za spolujezdcem. [7]

Tato zkouška má vysoké nároky na zádržné systémy v předních a zadních sedadlech. Přísné limity jsou kladeny na zpomalení hrudníku a na míru deformace hrudníku, což zase motivuje výrobce, aby se vyvíjeli zádržné systém sofistikovanější. Tato zkouška doplňuje test nárazu do deformovatelné překážky s překrytím z důvodu nalezení rovnováhy mezi zadržovacím systémem, který je dostatečně tuhý, aby zadržel mužskou figurínu při zkoušce v rychlosti nárazu 64 km/h, a který je zároveň dostatečně poddajný, aby nedošlo k poškození vysokých zpomalovacích sil u menší ženské figuríny. [7]



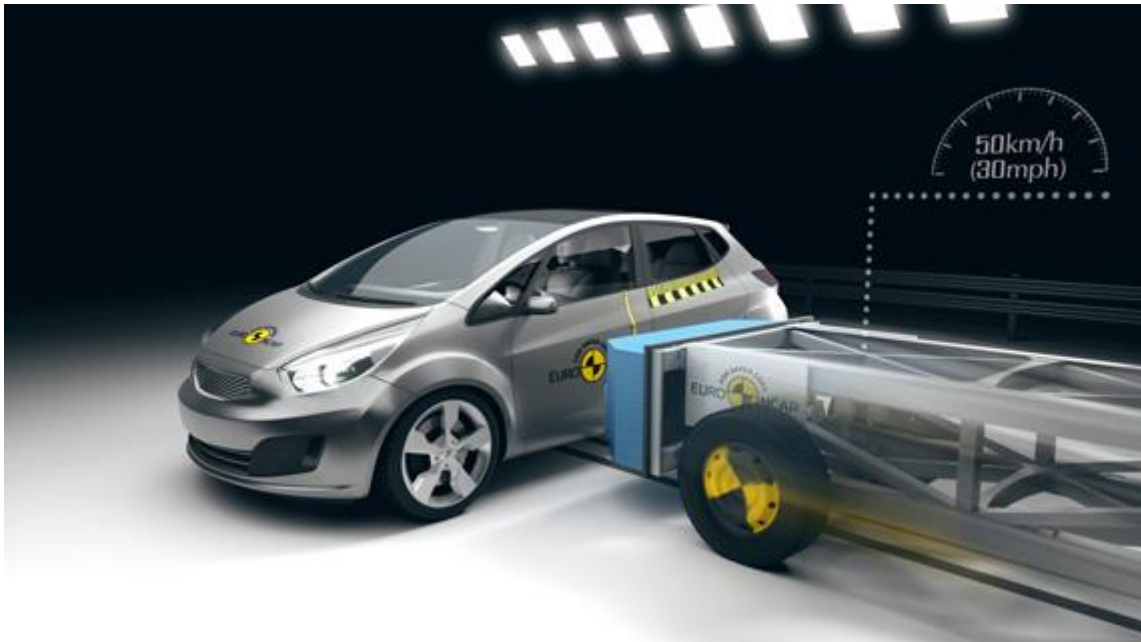
Obr. [3] Znárodnění řelního nárazu do nedeformovatelné překážky s překrytím 100 %.

Boční náraz při rychlosti 50 km/h

Boční nárazy představují druhou nejčastější příčinu úmrtí a vážných zranění. Ve srovnání s řelním nárazem je uvnitř interiéru boční řásti vozidla velmi málo hmoty, která by dokázala absorbovat energii z tohoto řuvodu jsou řěžká poranění hlavy a hrudníku velmi řastými následky tohoto typu nehod. [7]

Při zkoušce Euro NCAP je použit vozík s namontovanou deformovatelnou bariérou, který je poháněn rychlostí 50 km/h směrem na bok testovaného vozidla pod úhlem 90 stupňů. Na sedadle řidiče je umístěna mužská figurína a figuríny řeřské jsou pak umístěny na zadních sedadlech v řeřských zádržných systémech. [7]

Zkouškou se Euro NCAP snaží vydobýt dostatečnou ochranu kritických oblastí lidského řeřa. Toto úsilí vedlo k posílení konstrukcí vozidel kolem B sloupku (mezi dveřmi), nebo také k montáži záclonových airbagů do automobilů, ale také ke vzniku méně řzetelných konstrukcí absorbujících energii v sedadlech a dveřních panelech. Načasování a nasazení airbagů musí být při jejich instalaci velmi pečlivě kontrolováno, aby bylo zajiřtěno, že poskytují co největří ochranu. [7]



Obr. [4] Znárodnění boční nárazu vozíku s deformovatelnou bariérou do zkoušeného vozidla.



Obr. [5] Příklad nárazové zkoušky pro ochranu chodců, konkrétně průběh testu úrazu hlavy chodce při střetu s vozidlem jedoucím rychlostí 40 km/h.

2.2.1.4. Instrumentace pro nárazové zkoušky Euro NCAP

Aby mohla být provedena následná analýza deformací při crash testu a bylo možné vyvodit zranění nárazem způsobená používá se řada měřících zařízení, která se umísťují do těla testovacích figurín a do konstrukce vozidel. Mezi tyto senzory patří akcelerometry, snímače sil, momentů, vychýlení a dislokace kloubů. Pro jednotlivé typy testů se používají různá uskupení a rozmístění těchto senzorů. Pro několik základních testů jsou instrumentace uvedeny v následujících tabulkách. [8], [9], [10]

Tabulka [1] Instrumentace figuríny pro čelní náraz s překrytím 40%

Umístění	Veličina		Minimální amplituda
Hlava	Zrychlení $A_x A_y A_z$		250g
Krk	Síly	$F_x F_y$	9kN
		F_z	14kN
	Momenty $M_x M_y M_z$		290Nm
Hrud'	Zrychlení $A_x A_y A_z$		150g
	Vychýlení D_{chest}		100mm
Pánev	Zrychlení $A_x A_y A_z$		150g
Bederní páteř	Síly $F_x F_y$		
	Momenty M_y		
Stehenní kost (levá, pravá)	Síly F_z		20kN
Koleno (levé, pravé)	Dislokace D_{knee}		19mm
Horní holenní kost	Síly $F_x F_z$		12kN
	Momenty $M_x M_y$		400Nm
Spodní holenní kost	Síly $F_x F_z (F_y)$		12kN
	Momenty $M_x M_y$		400Nm

Tabulka [2] Instrumentace vozidla pro čelní náraz s překrytím 40 %

Umístění	Veličina	Minimální amplituda
Levý B-sloupek	Zrychlení A_x	150g
Pravý B-sloupek	Zrychlení A_x	150g
Bezpečnostní pás v oblasti ramen figuríny řidiče	Síla $F_{diagonal}$	16kN
Bezpečnostní pás v oblasti ramen figuríny spolujezdce	Síla $F_{diagonal}$	16kN
Bezpečnostní pás v oblasti ramen figuríny Q10	Síla $F_{diagonal}$	16kN
Bezpečnostní pás v oblasti ramen figuríny Q6	Síla $F_{diagonal}$	16kN

Tabulka [3] Instrumentace figuríny pro čelní náraz s překrytím 100 %

Umístění	Veličina		Minimální amplituda
Hlava	Zrychlení $A_x A_y A_z$		250g
Krk	Síly	$F_x F_y$	9kN
		F_z	14kN
	Momenty $M_x M_y M_z$		290Nm
Hrud'	Zrychlení $A_x A_y A_z$		150g
	Vychýlení D_{chest}		100mm
Pánev	Zrychlení $A_x A_y A_z$		150g
Kyčelní kost (levá, pravá)	Síly F_x		9kN
	Momenty M_y		220Nm
Bederní páteř	Síly $F_x F_y$		
	Momenty M_y		
Stehenní kost (levá, pravá)	Síly F_z		20kN
Koleno (levé, pravé)	Dislokace D_{knee}		19mm
Horní holenní kost	Síly $F_x F_z$		12kN
	Momenty $M_x M_y$		400Nm
Spodní holenní kost	Síly $F_x F_z (F_y)$		12kN
	Momenty $M_x M_y$		400Nm

Tabulka [4] Instrumentace vozidla pro čelní náraz s překrytím 100 %

Umístění	Veličina	Minimální amplituda
Levý B-sloupek	Zrychlení A_x	150g
Pravý B-sloupek	Zrychlení A_x	150g
Bezpečnostní pás v oblasti ramen figuríny řidiče	Síla F_{diagonal}	16kN
Bezpečnostní pás v oblasti ramen figuríny na zadním sedadle	Síla F_{diagonal}	16kN

Tabulka [5] Instrumentace figuríny pro boční náraz

Umístění	Veličina	Minimální amplituda
Hlava	Zrychlení $A_x A_y A_z$	250g
Horní část krku	Síly $F_x F_y F_z$	5kN
	Momenty $M_x M_y M_z$	300Nm
Ramenní kloub	Dislokace a rotace	100mm
Rameno - žebro	Dislokace a rotace	100mm
Hrud' - Horní žebro	Dislokace a rotace	100mm
Hrud' - Prostřední žebro	Dislokace a rotace	100mm
Hrud' - Spodní žebro	Dislokace a rotace	100mm
Teplota hrudi		30°C
Břicho – horní žebro	Dislokace a rotace	100mm
Břicho – spodní žebro	Dislokace a rotace	100mm
Hrudní obratel T12	Zrychlení $A_x A_y A_z$	200g
Pánev	Zrychlení $A_x A_y A_z$	200g
Pánev – pubická kost	Síla	5kN
Krček stehenní kosti	Síly $F_x F_y F_z$	5kN

Tabulka [6] Instrumentace vozidla pro boční náraz

Umístění	Veličina	Minimální amplituda
B-sloupek	Zrychlení A_y	150g

Tabulka [7] Instrumentace vozíku pro boční náraz

Umístění	Veličina	Minimální amplituda
Těžiště vozíku	Zrychlení A_x	150g

2.2.1.5. Kritéria výpočtu zranění na základě nárazových zkoušek Euro NCAP

Tato kapitola pro ilustraci významu měření uvádí kritéria zdravotní újmy v rámci hodnocení Euro NCAP a u vybraných nejvýznamnějších kritérií i jejich výpočty.

Obvykle se měření pro všechny figuríny v čelních zkouškách ukončí v okamžiku, kdy senzor zrychlení hlavy překročí hodnotu 0 po minimální hodnotě zrychlení. Je však na zkušebním orgánu, aby potvrdil a určil skutečný konec fáze střetu. [11]

Kritéria pro zranění hlavy

- Výsledné zrychlení hlavy

Výsledné zrychlení hlavy se vypočte podle následujícího vzorce:

$$A_r = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

A_x Filtrovaný signál zrychlení hlavy v ose x

A_y Filtrovaný signál zrychlení hlavy v ose y

A_z Filtrovaný signál zrychlení hlavy v ose z [11]

- HIC₁₅ – kritérium pro zranění hlavy

Hodnota HIC₁₅ se vypočte podle následujícího vzorce:

$$\text{HIC}_{15} = (t_2 - t_1) \left(\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} A_R dt \right)^{2,5}$$

A_R Výsledné zrychlení hlavy [11]

- Doba kontaktu hlavy s hlavovou opěrkou

Doba kontaktu hlavy se vypočítá následujícím vzorcem:

$$T_{HRC} = T_{HRC,end} - T_{HRC,start}$$

T_{HRC} Čas od prvního kontaktu hlavy s hlavovou opěrkou po čase T=0

T_{HRC} Čas ztráty kontaktu [11]

Kritéria pro zranění krku

-Ohybový moment při natažení krku

$$M_{OCy} = M_y - F_x \cdot d$$

M_y Filtrovaný signál ohybového momentu

F_x Filtrovaná signál smykové síly

d Konstanta rovna hodnotě 0,01778 m [11]

- NIC – kritérium pro zranění krku

$$NIC = 0,2 \cdot A_{rel} + v_{rel}^2$$

$$A_{rel} = T1 - A_{x,head}$$

$$v_{rel} = \int A_{rel}$$

$T1$ Průměrná hodnota akcelerace

$A_{x,head}$ Filtrovaný signál A_x hlavy figuríny [11]

- Další kritéria

Nkm kritérium [11]

Kritéria zranění hrudníku

- VC - Kritérium viskozity

$$VC = sf \cdot V(t) \times C(t)$$

$$sf = 1,3$$

$$V(t) = \frac{8(D_{chest}(t+1) - D_{chest}(t-1)) - (D_{chest}(t+2) - D_{chest}(t-2))}{12\Delta t}$$

$$C(t) = \frac{D_{chest}(t)}{D_{constant}}$$

$D_{chest}(t)$ Filtrovaný signál výchylky hrudníku z původní polohy

Δt Rozdíl času

$$D_{constant} = 0,229 [11]$$

- Další kritéria

Výchylka od původní polohy hrudníky, Modifikátor síly působící v bezpečnostních pásech, Boční posunutí žeber v oblasti hrudníku. [11]

Kritéria zranění v oblasti břicha

- Boční posunutí žebra v oblasti břicha

$$Dy_{abdomen} = \max(D_y(t) - D_y(0))$$

$$D_y(t) = R(t) \cdot \sin(\Phi(t))$$

$R(t)$ Filtrovaný signál výchylky od původní polohy senzoru břicha

$\Phi(t)$ Filtrovaný signál rotace senzoru břicha

$D_y(0)$ Původní poloha břicha v čase $t=0$ [11]

- Další kritéria

Výsledné zrychlení v oblasti břicha, Kritérium viskozity [11]

Kritéria zranění dolních končetin

- Kritérium zranění holenní kosti

$$TI(t) = \left| \frac{M_R(t)}{(M_R)_C} \right| + \left| \frac{F_z(t)}{(F_z)_C} \right|$$

$$M_R(t) = \sqrt{M_x(t)^2 + M_y(t)^2}$$

M_x Filtrovaný signál ohybového momentu v ose x

F_z Filtrovaný signál síly působící na holenní kost v ose z

$$(M_R)_C = 225Nm$$

$$(F_z)_C = 35,9kN [11]$$

- Další kritéria

Síla při nárazu pánevní kosti, Vychýlení kolenního kloubu, Síla při nárazu stehenní kosti [11]

2.3. Jízdní dynamika vozidel

Tato druhá úvodní kapitola pojednává o zkouškách jízdní dynamiky vozidel zabývajících se zejména měřením veličin spjatých s experimentem této práce, jedná se primárně o veličiny rychlost a zrychlení. Snaží se objasnit smysl jejich měření pro inženýrskou praxi. Popisuje a rozděluje jednotlivé zkoušky dle jejich funkce a parametrů, zmiňuje zařízení pro jednotlivé typy zkoušek, jejich metody a kritéria.

2.3.1. Rychlostní zkoušky

Rychlost je jednou z nejvýznamnějších veličin dynamiky vozidla. Tento parametr z hlediska legislativy lze v kontextu s výkonem vozidla definovat jako rychlost, která je vozidlu udílána hnací silou motoru. Nejedná se tedy o rychlost, která je ovlivňována například větrem či jinými faktory.

2.3.1.1. Veličiny a jednotky používané při rychlostních zkouškách

- Rychlost v $[\text{km}\cdot\text{h}^{-1}]$, $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
- Délka (dráha) úseku L [m]
- Čas t [s]
- Síla F [N]
- Tíha G [N]

2.3.1.2. Zařízení při měření rychlosti:

Měřicí místo

Pro měření rychlosti se používá jak přímé, tak kruhové trati. Kritéria, která musí zkušební trať splňovat jsou zpevněný povrch s přijatelnou adhezí, podélný sklon max. 0,5 %, příčný sklon max. 3 % a odstředivá síla na vozidlo působící by neměla přesahovat 20 % tíhy vozidla. Pokud se jedná o přímou trať, je nutné, aby dosahovala délky, při které je reálné, aby rychlost vozidla byla po určitou dobu konstantní. Dále musí zaručovat, aby odchylka měření dosahovala max. 1 %. obvykle trať měří 100 až 1000 m a délka stabilizačního úseku je minimálně rovna 500 m. Kruhová trať má zpravidla délku 2000 m. Trať může být kombinací přímých úseků a oblouků s poloměrem nejméně 200 m. Působení odstředivé síly je minimalizováno příčným sklonem trati. Aby bylo možné směrodatně srovnat výsledek z přímé i kruhové trati používá se tzv. korekční součinitel, který dorovnáva výsledky z obou tratí. V případě, že rozdíl výsledků nepřesahuje 5 % může být kruhová trať považována za způsobilou k měření.

Měřič času

Toto zařízení je schopné měřit s přesností 1 %. Čím delší je měřená trať, tím nižší jsou nároky na přesnost časového měření. Nejčastěji jsou v praxi používány mechanické či elektronické stopky.

Spouštěcí zařízení

Jako spouštěcí zařízení se používá opticko-elektrická brána, jejíž vstupní impuls je způsoben změnou napětí v obvodu při protnutí světelného paprsku automobilem. Toto zařízení je umístěno jak na začátku trati, kde měřič času spouští, tak na jejím konci, kde měřič času naopak vypíná.

GPS

Poloha testovaného vozidla je zaměřována pomocí GPS, pracující s přesností až 10^{-3} km/h.

Vlečné kolo

Stěžejním je pro měření rychlosti vlečné kolo, které bývá k testovanému vozidlu připevněno kloubovým hřídelem. Pro toto kolo je specifická jeho nízká hmotnost a úzký poloměr pneumatiky, který je s otáčkami téměř neměnný. Tento poloměr dosahuje zpravidla takové délky, aby byla během jedné otáčky kola překonána vzdálenost jednoho metru. Rychlost vozidla je pak tedy dána vztahem:

$$v = \frac{n}{t} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

kde n značí počet otáček a t čas [s].

Pro správný průběh zkoušky musí být zajištěno, aby vlečné kolo neodsakovalo od vozovky, či nekmitalo v závleku. U vozidel s nižší hmotností a výkonem je třeba kontrolovat, zda nedochází při měření k příliš velkému ovlivňování údajů o rychlosti vlivem jízdních odporů vlečného kola nebo i celého vozidla.

Otáčkoměry

Nezbytnou součástí celého měření jsou otáčkoměry, které slouží k detekci otáček a jejich převodu na hodnotu aktuální rychlosti. Tyto zařízení jsou však podrobněji rozebrány v kapitole 4.4 této práce.

2.3.1.3. Metody měření jednotlivých druhů rychlostních zkoušek

Maximální rychlost – je nejvyšší rychlost, které je vozidlo schopno dosáhnout na rovině při rovnoměrném pohybu. Ke zkoušce se používají trati zmíněné v předchozí kapitole. Atmosférická tlak musí odpovídat hodnotě minimálně $H_t = 910$ mbar, teplota T_t by měla přesahovat hodnotu 278 K. Rychlost větru měřená 1 m nad vozovkou může dosahovat max. $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vozidlo projede trať při zařazení nejvyššího rychlostního stupně za plné přípusti paliva. Zkouška se opakuje nejméně třikrát v každém směru, tedy vozidlo absolvuje celkem 6 měření. Pokud je rozdíl extrémů těchto hodnot vyšší než 3 %, je nutno zkoušku opakovat za jiných podmínek. Výsledkem zkoušky je pak maximální rychlost vypočtena pomocí vztahu:

$$V = \frac{L \cdot 3,6}{t}$$

kde V značí rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$], L délku trati [m] a t čas [s] získaný jako střední hodnotu ze 6ti měření.

Minimální rychlost – jedná se o nejnižší rychlost, kterou se vozidlo při rovnoměrném pohybu na rovině pohybuje při zařazení daného rychlostního stupně a plynulém chodu motoru. Podmínka plynulého chodu motoru je splněna, pokud kolísání otáček nepřekročí $\pm 10 \%$. Tato hodnota však nespadá pod konkrétní legislativu, ale měří se z důvodu stanovení výchozí rychlosti pro měření akcelerace.

2.3.1.4. Kritéria hodnocení maximální rychlost

Kritérium deklaráce výrobce: Toto kritérium je splněno, pokud naměřená hodnota maximální rychlosti při zkoušce dosahuje hodnoty deklarované výrobcem vozidla. Tolerance splnění tohoto kritéria je 2 až 5% dle kategorie vozidla.

Kritérium kategorizace vozidel: Vozidla kategorie L_{1e} , L_{2e} a L_{6e} jsou dle tohoto kritéria vyhovující, pokud $v_{\max} \leq 45 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

2.3.2. Zkoušky zrychlení

Zrychlení neboli akcelerace je parametr, který charakterizuje schopnost automobilu zvýšit svou rychlost za jednotku času. Stejně jako u rychlosti je zrychlením jako parametrem myšleno to zrychlení, které je vozidlu uděleno hnací silou motoru. Důvody pro zjišťování zrychlení mohou být různé, mezi ty nejčastější však patří např.: kompatibilita v plynulosti dopravy, vstupní hodnota pro výpočet sil, parametr pro simulaci dynamiky, hodnocení vlastností motorů a převodů. [12]

2.3.2.1. Veličiny a jednotky používané při zkouškách zrychlení

- Zrychlení a [$m \cdot s^{-2}$]
- Zpomalení d [$m \cdot s^{-2}$]
- Čas t [s]
- Dráha l [m]
- Rychlost v [$m \cdot s^{-1}$]

2.3.2.2. Zařízení pro měření zrychlení

Pro měření zrychlení se používají buďto shodná zařízení jako při měření zkoušek rychlost anebo lze použít zařízení využívající setrvačnosti a Newtonových zákonů. Jedná se především o akcelerometry, tyto zařízení jsou však detailněji popsány v další kapitole. Při rozhodování o tom, jaké použít pro měření zrychlení zařízení, je stěžejní uvědomělost, zda je třeba pro analýzu dostačující znalost pouze střední hodnoty této veličiny, či je nutné znát její průběh s okamžitými hodnotami. V případě, že si postačíme s průměrnou hodnotou, budeme pracovat s veličinou diskrétní k čemuž poslouží i jednodušší zařízení. V případě, že požadujeme sledovat veličinu podrobněji, měli bychom ji měřit jakou spojitou k čemuž poslouží právě zařízení jako jsou již výše zmíněné akcelerometry. [12]

2.3.2.3. Metody měření

Zrychlení z klidu na určitou rychlost. Při této zkoušce se měří čas potřebný k dosažení určité rychlosti. U méně přesných měření je rychlost sledována pomocí tachometru a čas je měřen stopkami. V případech, kdy je vyžadována přesnost vyšší bývá využito záznamových zařízení, která buďto měří průběh zrychlení přímo pomocí akcelerometrů nebo snímají rychlost otáčkoměry a derivací funkce jejího průběhu lze dojít k funkci průběhu akcelerace.

Zrychlení v klidu na určitou vzdálenost: Zkouška probíhá tak, že se vozidlo rozjíždí na rovném úseku z nulové rychlosti a měří se čas, který vozidlo potřebuje k projetí dané trati s délkou obvykle 1000 m. Podmínky zkoušky a použitá technika jsou shodné jako u měření zrychlení z klidu na určitou rychlost. [12]

2.3.3. Zkoušky jízdních odporů:

V praxi zkušebnictví jsou jízdní odpory sledovány takto:

- Odpor valení: parametr týkající se pneumatik, je vůči ostatním odporům zjišťován samostatně jejich výrobcí a platí vždy právě pro určitou rychlost dle vztahu:

$$R_R = m \cdot g \cdot n \cdot f \quad [N]$$

kde m [kg] je hmotnost vozidla, g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] je gravitační zrychlení, n počet kol a f součinitel odporu valení pro určitou rychlost a huštění [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]

- Odpor vzduchu: rovněž je vůči ostatním odporům zjišťován samostatně a to v aerodynamickém tunelu
- Odpor stoupání: vypočítává se pomocí matematického aparátu
- Odpor setrvačnosti: je úzce spjat s parametrem zrychlení a není samostatně zkoušen
- Celková jízdní odpor: jedná se o parametr, která ovlivňuje spotřebu paliva a je ověřován na základě dojezdové zkoušky po které je vypočítán dle vztahu:

$$R_{\text{výsledné}} = (M + M_v) \cdot \frac{2\Delta v}{\Delta t} \cdot \frac{1}{3,6} \quad [N]$$

kde M je hmotnost vozidla a M_v je ekvivalent setrvačné hmotnosti kol a součástí vozidla. [12]

2.3.4. Zkoušky stability

Pro objasnění je lepší vysvětlit pojem opačný, tedy *nestabilitu*. Nestabilitu lze chápat jako dobu při níž je znesnadněna nebo úplně znemožněna kontrola nad vozidlem. Na vznik takové situace může mít vliv sám řidič, vozidlo, vozovka, anebo prostředí. Jedná se o situaci pro bezpečnost jízdy nepřipustnou. Snahou konstruktéra tedy je, aby k takovým situacím nedocházelo, čemuž jsou podrobeny zkoušky, které se snaží odhalit možné případy nestability a na základě toho je pak případné závady odstranit. [12]

2.3.4.1. Zařízení pro měření zkoušek stability

Měřicí místo

Měřicím místem jsou buďto přímé, kruhové nebo kombinované úseky dráhy s definovanou délkou a šířkou anebo také komplexní zařízení pro výzkum stability jako jsou jízdní simulátory, dynamické nakloněné roviny, či válcové zkušebny. [12]

Sdružené zařízení pro zkoušku stability

Jedná se o stabilizovanou plošinu s funkcí gyroskopického zařízení, které je schopné měřit nejen zrychlení, ale i úhel klonění, klopení a stáčení. Pracuje na principu Coriolisovy síly, tedy vychází z odporu rotujícího setrvačníku proti vychýlení osy, což je podrobněji rozvedeno v kapitole 4.4. [12]

Zařízení pro měření zrychlení

Zpravidla se používají akcelerometry s amplitudou zrychlení 10 g a frekvencí 180 Hz. [12]

Další zařízení

Mezi zbytek nezbytných zařízení pro tyto zkoušky patří tenzometrické a momentové volanty, které snímají momenty dvojice sil působící na řídicí kolo.

Dále zařízení měřící úhel sklonu jednostopého vozidla pomocí pomocného kola na sklopném rameni a teleskopu s pružinou, tlumičem kmitů a snímačem.

Pro zjištění prokluzu kol se využívají otáčkoměry, které fungují na principu změny napětí v závislosti na otáčkách dynama.

U speciálních typů zkoušek se aplikuje zařízení pro simulaci bočního větru, které soustavou ventilátorů v řadě umístěných vyvine boční tlak na vozidlo.

V neposlední řadě se používají také již v přechozích kapitolách rozebraná zařízení pro měření rychlosti. [12]

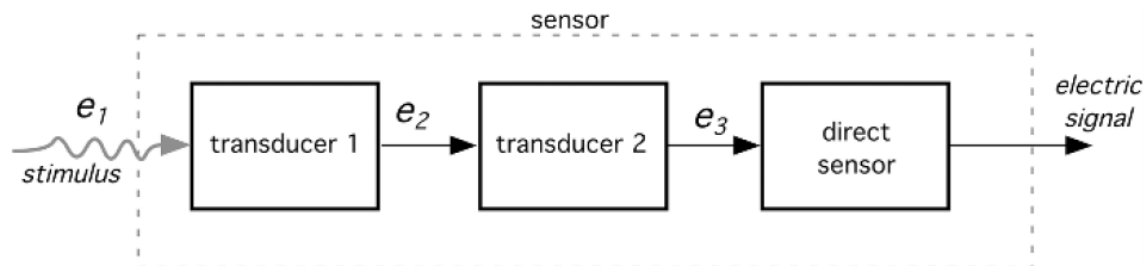
3. Klasifikace a charakteristika měřicích zařízení

3.1. Senzor

Senzor je zařízení, které přijímá stimul a reaguje elektrickým signálem. Podnětem je množství, vlastnost nebo stav, který je snímán a přeměněn na elektrický signál. Účelem snímače je reagovat na nějaký druh vstupní fyzikální vlastnosti (podnět) a propojit se s elektromagnetickými signály, které jsou kompatibilní s elektronickými obvody. Můžeme říci, že snímač je překladačem obecně neelektrické hodnoty do elektrické hodnoty. Když říkáme "elektrický", myslíme signál, který může být směrován, zesílen a modifikován elektronickými zařízeními. Výstupní signál snímače může být ve formě napětí, proudu nebo náboje. Mohou být dále popsány z hlediska amplitudy, frekvence, fáze nebo digitálního kódu. Tato sada charakteristik se nazývá výstupní signály. Proto se vyskytují vstupní vlastnosti (v každém případě) a elektrické výstupní vlastnosti. [14], [15]

Každý snímač lze považovat za měnič energie. Bez ohledu na to, co je snaha měřit, vždy se jedná o přenos energie z objektu měření na snímač. Přenos energie může být jak s pozitivním znaménkem, tak s negativní, to znamená, že energie může kolísat buď od objektu ke snímači, nebo od snímače k objektu. Zvláštním případem je, když je energie nulová, a také obsahuje informace o existenci tohoto konkrétního případu. Například snímač termočláňkového infračerveného záření vytvoří kladné napětí, když je objekt teplejší než snímač (infračervený proud je na senzoru) nebo napětí je negativní, když je objekt chladnější než snímač (infračervené proudění ze snímače k objektu). Pokud je snímač i předmět na stejné teplotě, je tok nula a výstupní napětí je nulové. Toto znamená, že teploty jsou stejné. [14]

Existují obecně dva typy snímačů: přímé a komplexní. Přímý senzor přeměňuje podnět přímo na elektrický signál nebo modifikuje elektrický signál pomocí vhodného fyzikálního účinku, zatímco komplexní snímač navíc potřebuje jeden nebo více snímačů energie, než může být použit přímý snímač pro generování elektrického výstupu. [14]



Obr. [6] Schéma komplexního senzoru

3.2. Klasifikace senzorů

Veškeré senzory lze rozdělit na dva druhy: pasivní a aktivní. Pasivní snímač nepotřebuje žádný dodatečný zdroj energie a přímo generuje elektrický signál v odezvě na okamžité napětí, protože intenzita energie se změnila na výstupní signál. Příklady jsou termočlánek, fotodioda a piezoelektrický snímač. Většina pasivních snímačů jsou přímými snímači, jak jsme je definovali dříve. Aktivní senzory vyžadují externí výkon při operaci, která je spojena s excitačním signálem. Tento signál je modifikován snímačem a produkuje výstupní signál. Aktivní senzory se někdy nazývají parametrické, protože jejich vlastnosti se mění v reakci na vnější efekt a tyto vlastnosti mohou být následně přeměněny na elektrické signály. Lze konstatovat, že parametrický snímač moduluje budicí signál a že modulace nese informace o naměřené hodnotě. Tyto změny (představované v ohmech) se přímo týkají teploty prostřednictvím známé funkce. Příkladem aktivního snímače je odporový tenzometr, v němž se elektrický odpor týká napětí. Pro měření odporu snímače musí být připojen elektrický proud z externího napájecího zdroje. [14], [15], [18]

V závislosti na zvolené referenci mohou být senzory klasifikovány na absolutní a relativní. Absolutní senzor detekuje podnět ve vztahu k absolutnímu fyzickému měřítku, které je nezávislé na měřicích podmínkách, zatímco relativní snímač vytváří signalizaci, která informuje o tom, že se jedná o zvláštní stav. Příkladem absolutního snímače je termistor: odpor citlivý na teplotu. Jeho elektrický odpor se přímo vztahuje na absolutní teplotu na stupnici Kelvin. Dalším velmi populárním snímačem teploty je termočlánek, jedná se naopak o relativní snímač. Vytváří elektrické napětí, které je funkcí teplotního gradientu přes dráty termočlánu. Výstupní signál termočlánu tedy nemůže být spojen s žádnou konkrétní teplotou bez odkazu na známou základní závislost. [14], [18]

3.3. Charakteristika senzorů

3.3.1. Přenosová funkce

Výstupní stimulační vztah je charakterizován takzvanou přenosovou funkcí. Tato funkce vytváří závislost mezi elektrickým signálem S produkovaným snímačem a stimulem s : $S = f(s)$. Přenosová funkce může být jednoduchou lineární závislostí, anebo také závislostí nelineární (např. Logaritmická, exponenciální nebo výkonová funkce). Ve většině případů je vztah jednorozměrný (tj. Výstup versus jeden vstupní stimul). [14]

Lineární funkce je reprezentován rovnicí:

$$S = a + bs$$

Logaritmická funkce je reprezentován rovnicí:

$$S = a + b \ln s$$

Exponenciální funkce je reprezentována rovnicí

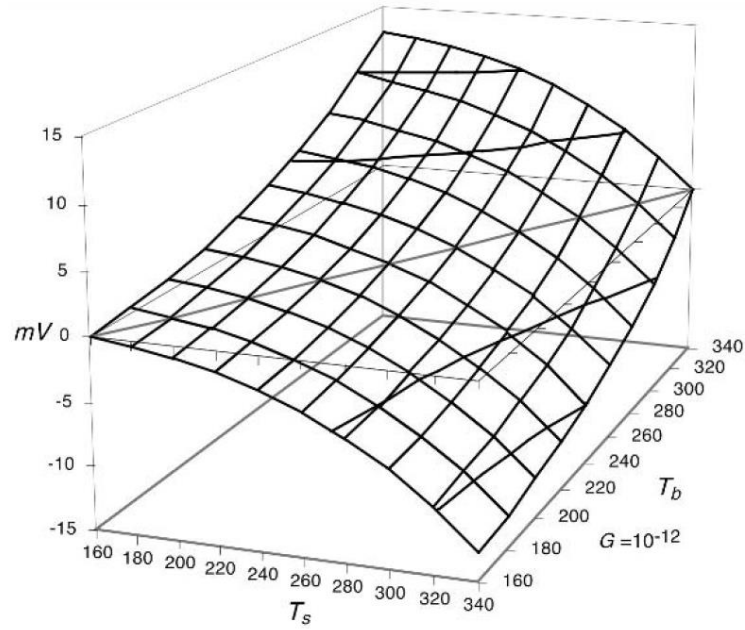
$$S = ae^{ks}$$

kde a je průsečík s osou (tj. výstupní signál při nulovém vstupním signálu) a b je sklon, který se někdy nazývá citlivost a k je konstanta. S je jednou z charakteristik výstupního elektrického signálu používaného zařízeními pro sběr dat jako výstupu snímače. Může to být amplituda, frekvence nebo fáze, v závislosti na vlastnostech snímače. [14]

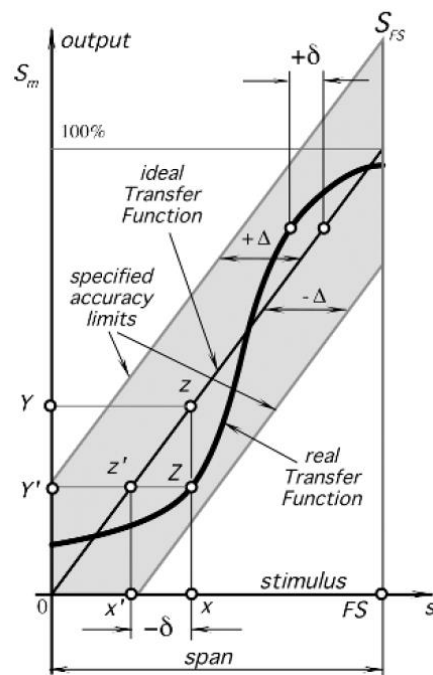
Snímač může mít takovou přenosovou funkci, že žádná z výše uvedených aproximací nefunguje dostatečně dobře. V tomto případě se často používá aproximace polynomu vyššího řádu. [14]

V případě většího rozsahu může být nelineární přenosová funkce modelována několika přímkami. Tento případ se nazývá parciální aproximace. [15]

Přenosová funkce může mít také více než jeden rozměr, když je výstup snímače ovlivněn větším počtem impulzů. [14], [15]



Obr. [7] Příklad vícerozměrové přenosové funkce, konkrétně senzoru snímajícího infračervené záření



Obr. [8] Vztah ideální a přenosové funkce společně s limity přesnosti.

3.3.2. Vstupní rozsah

Dynamické rozpětí podnětů, které mohou být konvertovány snímačem, se nazývá vstupní rozsah nebo také tzv. full scale input. Představuje nejvyšší možnou vstupní hodnotu, která může být použita pro snímač, aniž by došlo k nepřijatelně velké nepřesnosti. [14], [15]

3.3.3. Výstupní rozsah

Výstupní rozsah, neboli full-scale output (FSO) je algebraický rozdíl mezi elektrickými výstupními signály měřenými maximálním vstupním podnětem a aplikovaným nejnižším podnětem vstupu. Výstupní rozsah musí zahrnovat všechny odchylky od ideální funkce přenosu. [14]

3.3.4. Přesnost

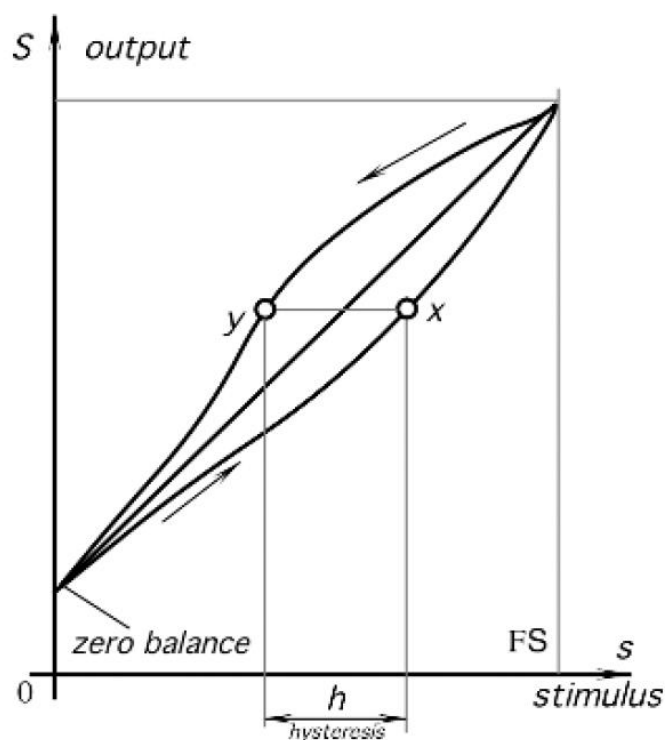
Přesnost lze považovat za jednu z nejdůležitějších vlastností senzoru, ve skutečnosti se však z matematického hlediska jedná spíše o jeho nepřesnost. Nepřesnost je měřena jako nejvyšší odchylka hodnoty prezentované snímačem na výstupu od ideální nebo skutečné hodnoty na vstupu. Odchylka může být popsána jako rozdíl mezi skutečnou hodnotou na vstupu a hodnotou výstupního napětí. Například snímač lineárního posunutí by měl v ideálním případě generovat 1 mV na 1 mm posunutí; tzn. jeho přenosová funkce je lineární se sklonem (citlivostí) $b = 1 \text{ mV} / \text{mm}$. Při experimentu však posunutí $s = 10 \text{ mm}$ vedlo k výstupu $S = 10,5 \text{ mV}$. Převod tohoto čísla do hodnoty posunutí pomocí přenosové funkce ($1 / b = 1 \text{ mm} / \text{mV}$) jsme se vypočítali, že posunutí $s_x = S / b = 10,5 \text{ mm}$ a to značí, že $s_x - s = 0,5 \text{ mm}$, tedy je o 0,5 mm větší než skutečná hodnota. Těchto 0,5 mm, lze považovat za chybu měření. Proto v rozsahu 10 mm je absolutní nepřesnost snímače 0,5 mm, či v relativním označení $(0,5 \text{ mm} / 10 \text{ mm}) \times 100 \% = 5 \%$. Pokud tento pokus opakujeme a máme stále chybu 0,5 mm, můžeme říci, že snímač má systematickou nepřesnost 0,5 mm v rozmezí 10 mm. Vždy je však přítomná i náhodná složka chybovosti, ta může být reprezentována jako průměrná nebo střední hodnota více chyb. V reálném světě každý snímač pracuje s určitou nedokonalostí. Reálná funkce přenosu bývá tlustá čára, která nemůže být ani lineární, ani monotonická. Skutečná funkce se zřídka kdy shoduje s ideálem. Kvůli materiálovým odchylkám, pracovním postupům, konstrukčním chybám, výrobním tolerancím a dalším omezením může existovat řada reálných přenosových funkcí, i když se jedná o snímače testované za stejných podmínek. Všechny průběhy reálných přenosových funkcí však musí spadat do mezí stanovené přesnosti. [14]

3.3.5. Hystereze

Hystereze je maximální rozdíl ve výstupu při jakékoliv hodnotě měřeného rozsahu, kdy hodnota je měřena nejdříve při zvyšování a poté při snižování měřené veličiny. Je vyjádřena v procentech horní hranice měřicího rozsahu. [14], [15]

Hysterezní chyba je dána vztahem:

$$H_e = \frac{\Delta H}{\text{plný rozsah}}$$



Obr. [9] Příklad možné hystereze pozorované na výstupu senzoru.

3.3.6 Nelinearita

Nelinearita neboli nelineární chyba je určena pro snímače, jejichž přenosová funkce může být aproximována přímkou. Nelinearita je maximální odchylka (L) reálné přenosové funkce od aproximované přímky. Pokud je provedena více než jedna kalibrace, tak by měla být určena nejhorší možná linearita, která vznikla během všech

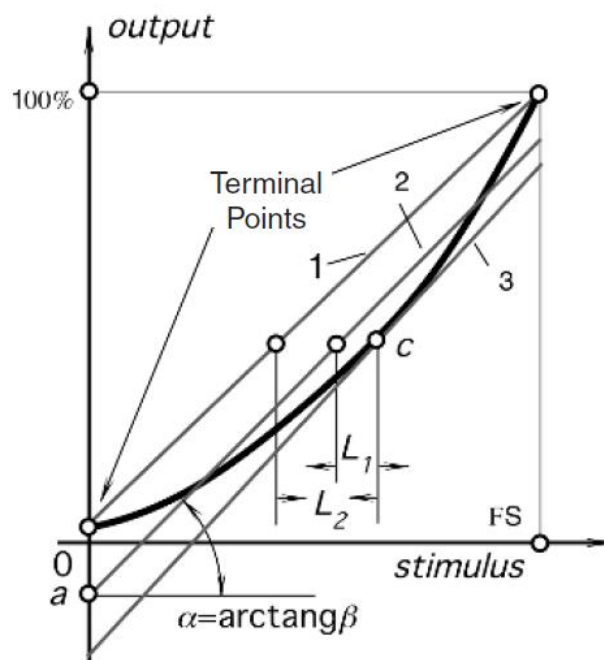
provedených kalibrací. Obvykle bývá zadána v procentech rozpětí nebo v měřené hodnotě (např. v kPa nebo °C). Existuje několik způsobů, jak specifikovat nelinearitu v závislosti na tom, jak je křivka překládána na přenosovou funkci. Jedním ze způsobů je použití koncových bodů tzn. výstupních hodnot při nejmenších a nejvyšších vstupních hodnotách a nakreslit přímkou spojující tyto dva body. V blízkosti koncových bodů je totiž chyba nelinearity nejmenší a v místech mezi body je naopak nejvyšší. Dalším způsobem, jak definovat aproximační přímkou, je použít metodu nejmenších čtverců. To lze provést měřením n počtu výstupních hodnot S na vstupních hodnotách s přednostně v celém rozsahu. [14], [15]

Pro lineární regresi se tedy použijí následující vzorce:

$$a = \frac{\sum S \sum s^2 - \sum s \sum s S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2}$$

$$b = \frac{n \sum s S - \sum s \sum S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2}$$

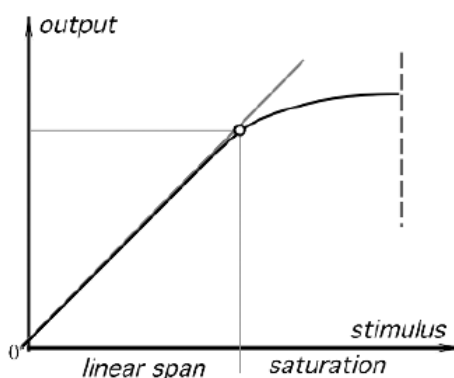
kde a je posun a b sklon.



Obr. [10] Příklad lineární aproximace nelineární přenosové funkce.

3.3.7. Saturace

Každý snímač má své provozní limity. I když je považováno za lineární nebude v některých oblastech vstupních podnětů jeho výstupní signál reagovat, tak jak by bylo při lineární závislosti očekáváno. Vstup tedy neprodukuje v těchto úsecích požadovaný výstup. V tomto případě snímač vykazuje tzv. span-end nelinearitu či saturaci. [14]



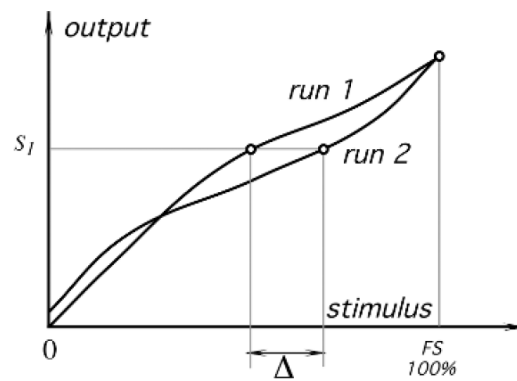
Obr. [11] Saturace při vyšších hodnotách na vstupu senzoru.

3.3.8. Opakovatelnost

Chyba opakovatelnosti (reprodukovatelnosti) je způsobena neschopností snímače generovat stejné hodnoty na výstupu za stejných podmínek na vstupu. Jedná se tedy o odchylku mezi daty, které byly naměřeny v krátkém časovém období, přičemž jejich vstupní podnět zůstal nepozměněn, stejně tak jako vnější rušivé vlivy působící na snímač. Matematicky lze vyjádřit, jako maximální rozdíl mezi odečty výstupů stanovenými dvěma kalibračními cykly. Obvykle se uvádí v procentech z maximální hodnoty na vstupu. [14], [15]

$$\delta = \frac{\Delta}{FS} \times 100\%$$

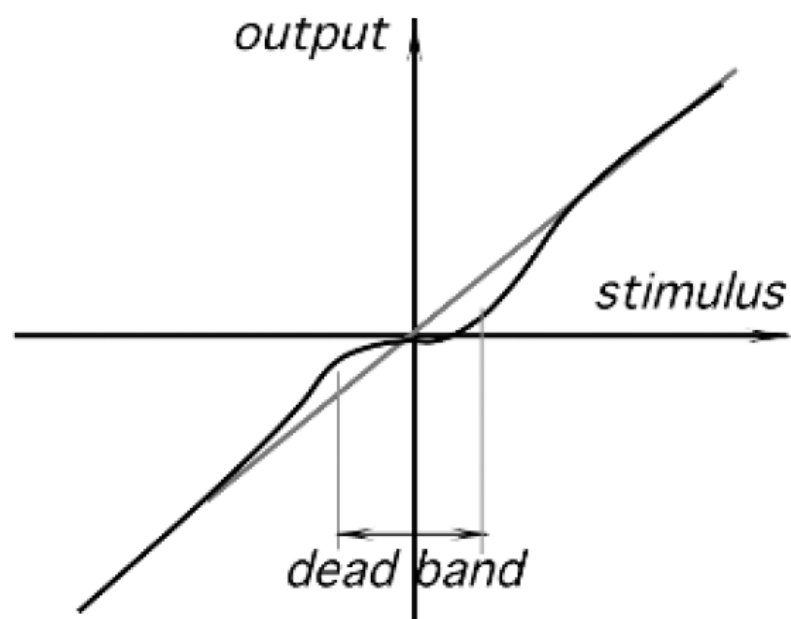
Možnými zdroji této odchylky mohou být tepelný šum, nahromadění náboje, materiálová plasticita a tak dále.



Obr. [12] Chyba opakovatelnosti hodnot

3.3.9. Dead Band

Dead band, neboli mrtvé pásmo je specifická oblast vstupních hodnot, kterou není schopen snímač zpracovávat a korektně převádět na výstupní signál. V rozsahu těchto hodnot je typické, že signál na výstupu stagnuje v blízkosti určité hodnoty, často nulové. [14]



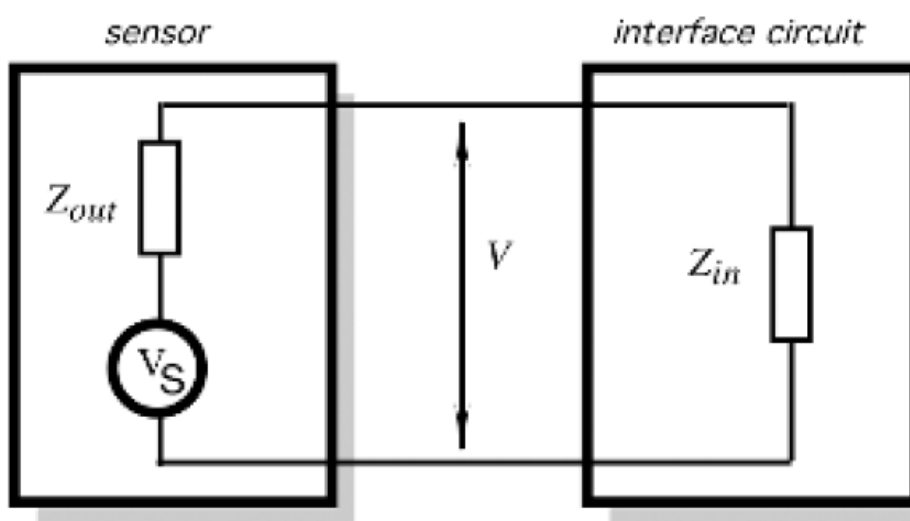
Obr. [13] Dead band, neboli mrtvé pásmo v nulové oblasti

3.3.10. Rozlišení

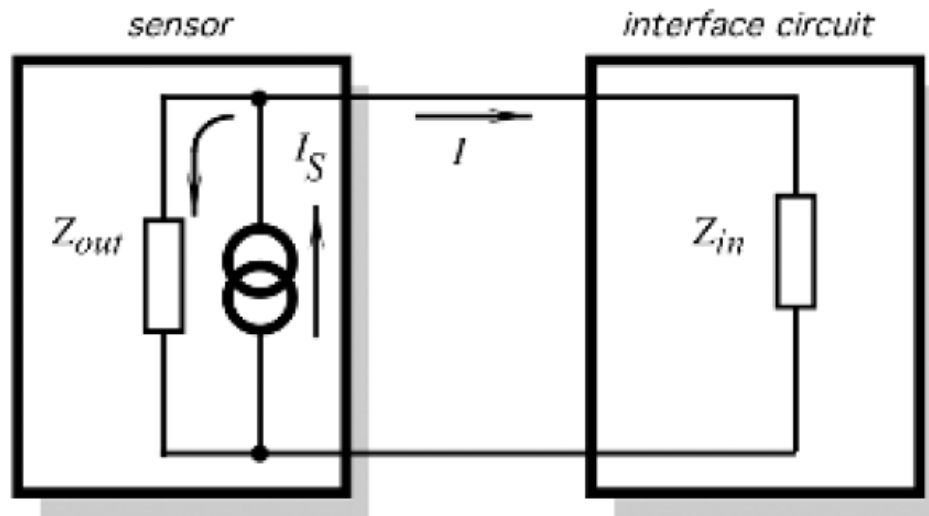
Rozlišení definuje nejmenší přírůstek vstupní hodnoty, který lze na výstupu snímače zaznamenat. V momentě, kdy vstupní hodnoty začnou plynule nabývat velikosti překračující rozsah snímače, výstupní signály některých senzorů nebudou dokonale hladké, a to ani v podmínkách bez jakéhokoliv většího šumu. Na výstupním signálu je možná změna hodnoty pouze při překročení určitého rozdílu na stupnici vstupních hodnot. Mimo to je signál převáděn do digitálního formátu, přičemž je rozdělen do malých kroků a každému kroku je přiděleno patřičné číslo. Velikost vstupní odchylky, která vede k výstupu nejmenšího kroku je chápána jako rozlišení. Například u lankového potenciometru, který má maximální rozsah 30 cm při každé změně hodnoty na vstupu větší než 1 mm dojde k identifikaci a záznamu této změny i na výstupu snímače. Naopak v případě menší změny než 1 mm nedojde k jejímu rozeznání snímačem, tato změna bude tedy zanedbaná a neprojeví se ve výstupním signálu, ačkoliv k této změně reálně došlo. Velikost rozlišení může být také vyjádřena v procentech plného rozsahu snímače. [14]

3.3.11. Výstupní impedance

Impedance je fyzikální veličina, která charakterizuje zdánlivý odpor součástky elektrického obvodu a fázový posuv napětí při průchodu střídavého elektrického proudu součástkou. Pro co nejpřesnější a nezkrácený průběh výstupního signálu je potřeba co nejvyšší výstupní impedance obvodu, a naopak pro vstupní obvod je nejideálnější impedance nízká. Proto je třeba znát, zda je typ zapojení paralelní či sériový se zdrojem vstupního signálu. [14]



Obr. [14] Paralelní zapojení se zdrojem vstupního signálu.



Obr. [15] Sériové zapojení se zdrojem vstupního signálu.

3.3.12. Excitace

Excitace charakterizuje elektrický signál potřebný pro aktivní provoz snímače, bývá určena jako rozsah napětí či proudu a může být různá za proměnných vnějších podmínek při kterých senzor pracuje. Rozdíly v excitaci mohou mít vliv na přenosovou funkci snímače a způsobit tak jeho chybný výstup. Jako příklad lze uvést termistor, který má na vzduchu rozsah hodnot proudu $50 \mu\text{A}$, zatímco ve vodě $200 \mu\text{A}$

4. Srovnání typů měřicích zařízení

4.1. Akcelerometry

Akcelerometrem se rozumí elektromechanická aparatura, jejímž hlavním účelem je měření zrychlení, tedy akcelerace konkrétního tělesa vzhledem k jinému určitému tělesu. V praxi to bývá nejčastěji měření zrychlení dopravního prostředku vzhledem k zemskému povrchu. Odlišujeme tak dva typy měření, a to dynamické a statické. Za dynamické zrychlení se považuje to, jenž vzniká změnou rychlosti pohybujícího se senzoru vzhledem k zemskému povrchu a statické zrychlení můžeme chápat jako to, které je způsobeno vlivem zemské gravitace. Akcelerometr nám dává informace o aktuálním zrychlení v jedné a více osách v jednotlivých časech podle nastavené frekvence. Akcelerometry mohou také posloužit díky integraci zrychlení podle času k zjištění rychlosti tělesa a dále díky integraci rychlosti podle času k určení uražené vzdálenosti, také mohou být obohaceny o gyroskopický senzor, který jim umožňuje detekci změny úhlu náklonu měřením zemské gravitace, v neposlední řadě mohou také měřit vibracemechanismů. [13], [14], [18]

Dnešní akcelerometry jsou výsledkem letitého vývoje, který lze považovat za poměrně rychlý. Dříve se akcelerometry potýkaly s problémem, který spočíval v jejich hmotnosti a velikosti, která zatěžovala měřený objekt a tím nepříznivě ovlivňovala výsledky měření. Dnes jsou však už akcelerometry subtilního provedení, a to díky integrovaným čipům s elektrickými obvody umístěnými v konstrukci těchto snímačů. [13]

Využití akcelerometrů v dnešní době tkví zejména v automobilovém průmyslu pro měření zrychlení při vývoji řídicích jednotek airbagů, systému jízdní stability (ESP apod.) a také např. ladění jízdních vlastností. Naměřená data o zrychlení nám charakterizují chování vozidla při jízdě a jejich analýza může vést k odhalení nedokonalosti výroby, či pouze k ověření žádoucích průběhů při určitém testování vozidla či jeho subsystému. Velmi významné jsou také pro rozvoj pasivní bezpečnosti, kde jsou jedním z hlavních zdrojů dat o průběhu nárazu z hlediska ochrany posádky před prudkou změnou rychlosti vlivem setrvačné síly při nárazu působící. Na základě hodnot získaných z akcelerometrů pasivní bezpečnosti se dle norem pomocí vhodného matematického aparátu posuzují kritéria zranění při konkrétní rychlosti v konkrétním vozidle. Mimo to jsou senzory zrychlení hojně používané ve strojírenství u mnohých zařízení pro měření vibrací a otřesů. V běžném životě se lze s akcelerometry setkat prakticky denně, například v moderních mobilních telefonech či fotoaparátech, kde detekují změnu působení gravitačního zrychlení vzhledem k osám zařízení a výstupem je pak například vhodné natočení displeje. [13], [18]



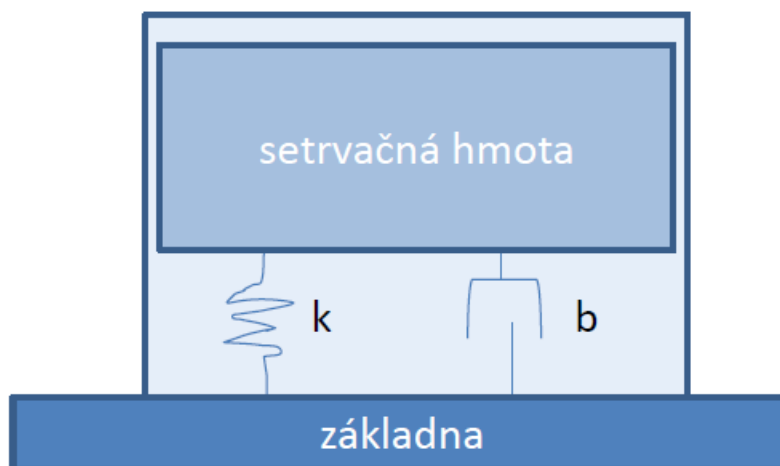
Obr. [16] Akcelerometr značky Kistler, hojně používané při nárazových zkouškách

4.1.1 Obecný princip činnosti

Základní podstata fungování akcelerometru je založena druhém Newtonově zákonu setrvačnosti, tedy setrvačné síle, která působí na konstrukci snímače. Ta se obecně skládá ze základny, což je součást pevně spojená se měřeným objektem. Další složkou je setrvačná neboli seismická hmota, která je pružně uložena vůči základně a vyhodnocuje se její výchylka, která se mění právě vlivem změny rychlosti, tedy zrychlením soustavy. Setrvačná hmota m vlivem zrychlení $a(t)$ způsobuje sílu $F(t) = m \cdot a(t)$, velikost této síly je identifikována vhodným čidlem, které sílu převádí na elektrický signál, jenž dále posílán do datové ústředny snímače. Elektrický signál $u(t)$ je obvykle napěťový a lze vyjádřit jako $u(t) = S \cdot F(t) = Sma(t)$. Konstantu $S \equiv S_u / pC \cdot m^{-1} \cdot s^2$ nazýváme napěťovou citlivostí senzoru. [13]

Akcelerometr snímající zrychlení pouze v jednom směru se nazývá jednoosý a v naprosté většině se využívá při měření ve směru dominantních kmitů. Tyto senzory využívají rozdílu citlivostí v různých směrech, nejvyšší S_{max} ve směru hlavním a nejnižší S_{min} ve směru kolmém na směr hlavní. [13]

Při grafickém znázornění citlivostí směrů pod různými úhly γ dojde k vykreslení křivky podobné kružnici. Průměr kružnice je v souladu s hlavní osou citlivosti a tečna kružnice je kolmá k průměru v místě akcelerometru. Je tedy možné říci, že citlivost v určitém směru akcelerometru lze vyjádřit vztahem $S(\gamma) \approx S_{max} \cos \gamma$. Toto je však dosažitelné pouze v ideálních, dokonalých podmínkách, u reálných akcelerometrů je ovšem $S(\pi/2) = S_{min} \neq 0$, S_{min} se v tomto případě nazývá příčná citlivost akcelerometru, díky ní dochází ke zkreslení signálu ve směrech jiných, než je směr hlavní. Proto je výrobcům kladena důkladná péče na utlumení příčné citlivosti S_{min} , ovšem přesto se u standardních snímačů s piezoelektrickým čidlem poměr S_{min} / S_{max} pohybuje okolo 1 až 5%. [13]



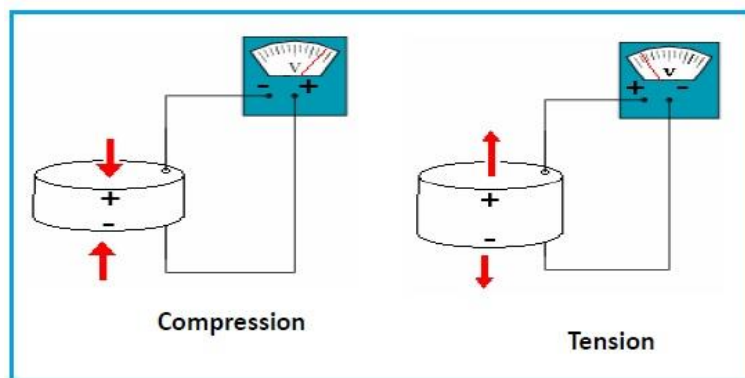
Obr. [17] Schéma základního principu konstrukce akcelerometru

4.1.2. Piezoelektrické akcelerometry

Piezoelektrické akcelerometry jsou tak, jak již název napovídá založeny na piezoelektrickém efektu. Piezoelektrický efekt je schopnost určitých materiálů (středově nesouměrných krystalů) generovat elektrický náboj v odezvě na určité mechanické napětí. Slovo piezoelektrické je odvozeno z řeckého piezeinu, což znamená stlačit nebo tisknout. [14], [13]

Jednou z jedinečných vlastností piezoelektrického efektu je to, že je reverzibilní, což znamená, že materiály vykazující přímý piezoelektrický efekt (generování elektrické energie při namáhání) také vykazují konverzní piezoelektrický efekt (generování napětí při použití elektrického pole). [17], [18]

Když je piezoelektrický materiál vystaven mechanickému namáhání, dochází k posunu kladných a záporných nábojových center v materiálu, což vede k vnějšímu elektrickému poli. Při jevu opačném vnější elektrické pole táhne nebo stlačí piezoelektrický materiál. [18]

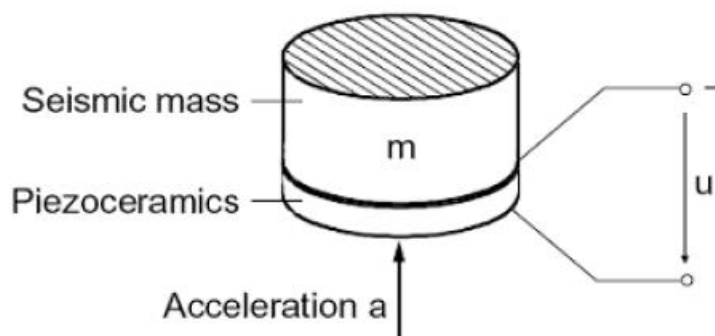


Obr. [18] Vyobrazení principu piezoelektrického jevu

Piezoelektrické akcelerometry jsou konstruovány tak, že v nich v důsledku zrychlení dochází k mechanickému namáhání krystalu, který je vložen mezi základnu a seismickou hmotu, jejíž setrvačná síla toto namáhání způsobuje. Tímto se na výstupu senzoru generuje náboj q , který je přímo úměrný působící setrvačné síle a vzhledem k tomu, že seismická hmotu má konstantní hmotnost je tedy tento signál přímo úměrný zrychlení snímače. Lze tedy jednoduše říci, že využívají přímou přeměnu mechanické energie na energii elektrickou v krystalickém materiálu složeném z elektrických dipólů. Akcelerometry tohoto typu disponují jednoduchou konstrukcí, a to přináší také snadné napojení na vyhodnocovací obvod. Tyto snímače pracují obecně s širokým spektrem frekvencí od 2 Hz až do 5 kHz, disponují vysokou linearitou a širokým rozsahem provozních teplot až do 120 °C. Nejčastěji používanými krystaly jsou krystaly keramické (např. titančitan barnatý, titanát zirkoničitanu olovnatého (PZT) a olovnatý metaniobit, lze se však hojně setkat i s krystaly křemennými, tak je tomu zejména u miniaturních snímačů. Ovšem vzhledem k tomu, že křemík nemá piezoelektrické vlastnosti, bývá na křemíkové součásti vyroben tenký filtr titanátu olova. Elektrické napětí vyprodukované krystalem je však nutné zesílit a proto je konstrukce snímače obvykle obohacena konvertorem, který je zabudován do stejného krytu jako krystal. [14], [17],

Jako výhody těchto typu snímače lze považovat široký dynamický rozsah a pevná robustní konstrukce, relativně velká spolehlivost, dlouhodobá stabilita, odolnost vůči rušivým vlivům, jako může být například deformace části konstrukce. [16], [17], [18]

Nejpodstatnější nevýhodou je fakt, že nemohou být tyto senzory použity pro měření konstantního zrychlení tudíž nejsou vhodné například pro měření jízdní dynamiky. Mimo to podléhají také velké teplotní závislosti piezoelektrického materiálu, to lze však vyvážit vhodným uspořádáním konstrukce. [16], [17], [18]



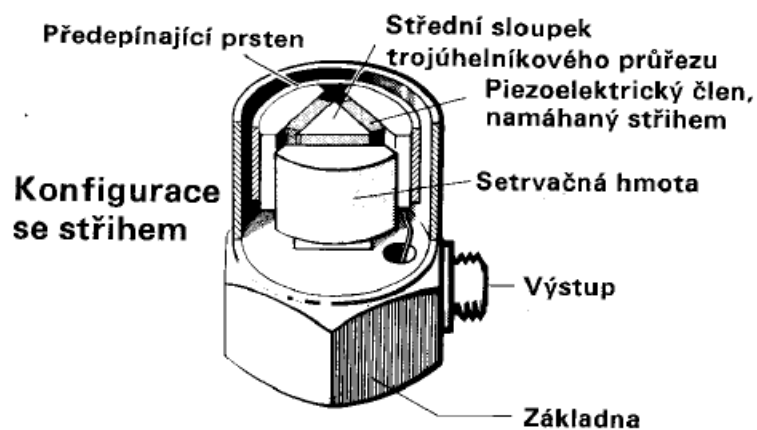
Obr. [19] Základní struktura piezoelektrického akcelerometru.

4.1.2.1 Typy piezoelektrický akcelerometrů

Dle druhu deformace vůči ose při piezoelektrickém jevu, lze piezoelektrické akcelerometry rozdělit do tří skupin: stříhový, kompresní podélný/příčný a ohybový.

Stříhový mód

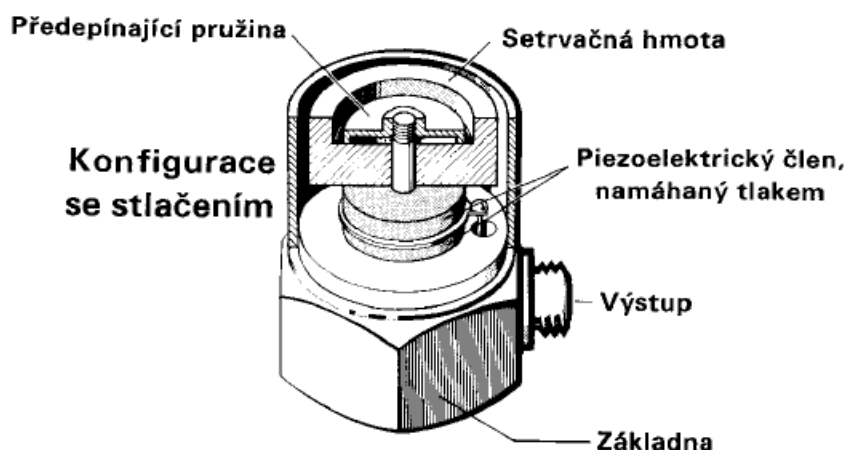
V tomto případě je snímací krystal vložen mezi centrální nosník a seismickou hmotu. V momentě, kdy začne působit setrvačná síla, dojde ke vzniku smykového napětí působícího na snímací krystal. Za výhodu této konstrukce lze považovat vyloučení teplotních přechodů a ohybů základny. [17], [18]



Obr. [20] Konstrukce piezoelektrického akcelerometru se stříhovým módem.

Kompresní mód

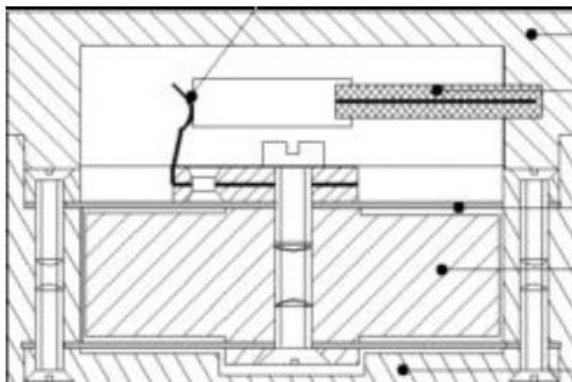
Jde o nejčastěji používanou konstrukci a to zejména díky jednoduchosti provedení, vysoké tuhosti a odolnosti. Nejhojněji se lze setkat s tzv. vzpřímenou strukturou. V této konstrukci je krystal umístěn těsněji mezi seismickou hmotou a základnu, ve chvíli, kdy dojde ke zrychlení soustavy a začne se evokovat setrvačná síla, seismická hmota stlačuje nebo povoluje krystal a tím zvyšuje nebo snižuje množství působící síly, které je elektrický výstup snímače úměrný. Mimo jiné toto provedení disponuje vysokou frekvencí, širokopásmovým výstupem a relativně přesnou frekvenční odezvou. Bývá preferován hlavně kvůli jeho robustní struktuře díky čemuž vydrží i vysoké krátkodobé přetížení. Využívá podobně jako smykový zejména pro měření otřesů, vibrací, ale také pohybu. Na rozdíl od stříhového akcelerometru je však mnohem více citlivý na změnu teploty a ohyb pouzdra, což může být hlavním důvodem jeho neupotřebení pro jiné specifická měření. [17], [18]



Obr. [21] Konstrukce piezoelektrického akcelerometru s kompresním módem.

Ohybový mód

Zde je krystal namáhan ohybovou deformací a má tvar nosníku takový, že podporuje vznik napětí při působení zrychlení. Jeho provedení může uživatele zaujmout zejména nízkým profilem, malou hmotností, teplotní stabilitou, nízkou cenou či velmi vysokou citlivostí (až 100 V/g). Výhodný je proto pro nízkofrekvenční aplikace, a proto je nejčastěji využíván pro měření seismické aktivity. Není však vhodný pro prostředí vystavované velkým nárazům a vibracím. [18]



Obr. [22] Schéma piezoelektrického akcelerometru v ohybovém módu.

4.1.3. Piezorezistivní akcelerometry

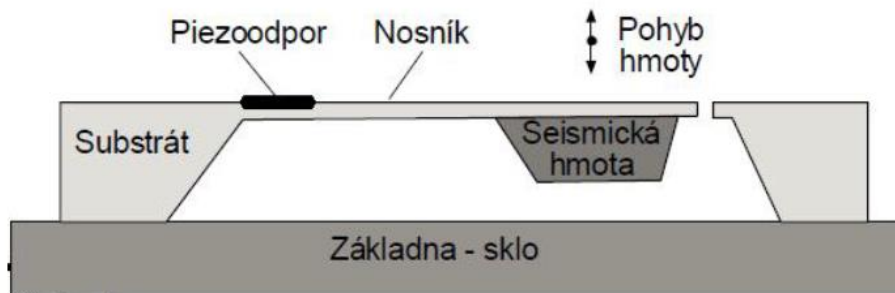
Piezorezistivní akcelerometry fungují na základě piezorezistivního jevu. Jsou schopny zaznamenat zrychlení pomocí změny odporu, kterou v nich evokuje namáhání piezokrystalu vlivem působení setrvačné síly. [14], [18]

Jako snímací prvky jsou v piezorezistivních akcelerometrech použity tenzometry, které jsou schopné detekovat napětí v pružinách. Tyto zařízení umí zaznamenat zrychlení v širokém frekvenčním rozsahu až 13 kHz. Při zdařilé konstrukci mohou při měření překročit zrychlení až 10 000 g. Jejich dynamický rozsah je však přirozeně poněkud užší, řádově ± 1000 g a s chybou menší než 1%. Tyto specifické vlastnosti mohou být pro mnohé aplikace stěžejní. [14]

Piezorezistivní akcelerometry vykazují několik charakteristických konstrukčních vlastností. Nejdůležitější z těchto vlastností je, že citlivá osa leží v rovině křemíkové destičky, na rozdíl od mnoho jiných konstrukcí, kde je osa k této rovině kolmá. [14]

Mechanická celistvost a spolehlivost senzoru jsou zajištěny výrobou všech jeho součástí pouze z jediného druhu křemíkového krystalu. Když působí zrychlení podél citlivé osy, otáčí se inerciální hmota kolem závěsu. Měřidla na obou stranách tohoto závěsu umožňují otáčením hmoty vytvořit tlakové napětí na jednom měřidle a tah na druhé. Protože měřidla jsou velmi krátké, tak dokonce i malé posuny dokáží způsobit velké změny odporu. Pro vyrovnání nulovou rovnováhy piezoresistivního můstku, existuje pět odporů umístěných na stejném krystalu. [14], [19]

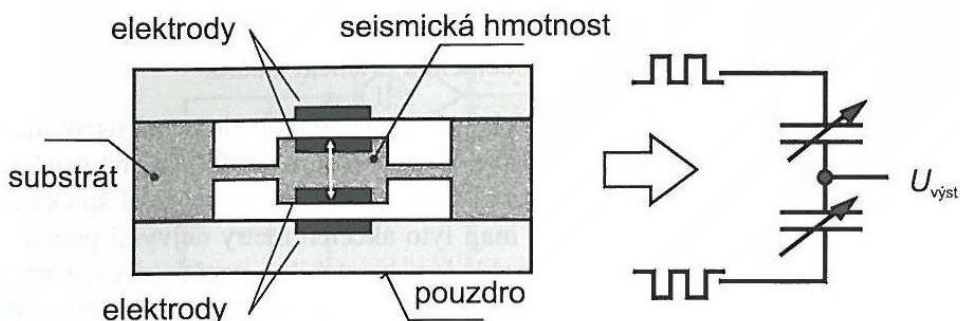
Mezi výhody tohoto typu senzoru patří nepochybně jednoduchost konstrukce a vyhodnocovacího obvodu, malá náročnost na prostor, možnost měření konstantního zrychlení a v neposlední řadě také nízká pořizovací cena. [16]



Obr. [23] Schéma konstrukce piezorezistivního akcelerometru.

4.1.4. Kapacitní akcelerometry

Základ tohoto akcelerometru tvoří pouzdro, ve kterém kmitá seismická hmota. Fyzikální princip kapacitního akcelerometru je založen na změně vzdálenosti elektrod kondenzátoru. Snímač je tedy vybaven elektrodami, které vlivem pohybu akcelerometru změni setrvačností svou polohu a tím i vzdálenost od vzduchového kondenzátoru, čímž dochází k tomu, že se mění kapacita kondenzátoru jeho kapacita. Zjednodušeně se tedy využívá nelineární závislosti kapacity C na vzdálenosti d elektrod kondenzátoru v důsledku působení setrvačné síly. Kapacitní akcelerometry vynikají svou citlivostí a velkou přesností, nevýhodou je pak vysoký teplotní a časový drift a vznik elektrostatické síly, která má zapříčiňuje chybu měření. [14], [16], [18]

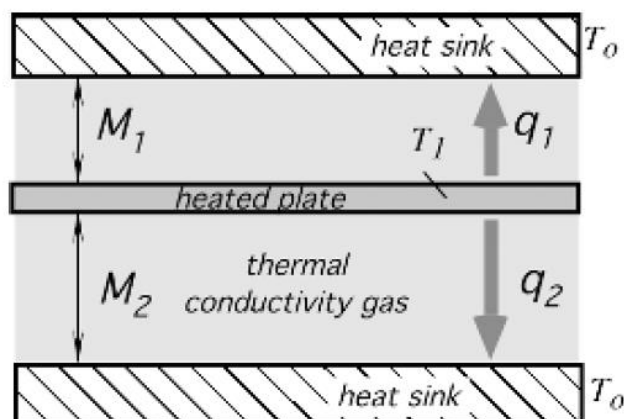


Obr. [24] Schéma konstrukce kapacitního akcelerometru.

4.1.5. Tepelné akcelerometry

Tato technologie využívá k měření akcelerace základní fyzikální vztahy pro přenos tepla. Tepelný akcelerometr je stejně jako každý jiný tvořen z části seismickou hmotou, která je zavěšena tenkou konzolou umístěnou v blízkosti chladiče nebo mezi dvěma chladiči. Seismická hmota společně s chladičem je vyráběna technologií mikromotoru a prostor mezi těmito dvěma komponenty je naplněn vodivým plynem. Hmota se ohřívá na určitou stanovenou teplotu T_1 . Při nulové akceleraci vzniká mezi hmotou a chladičem tepelná rovnováha. Tepelné senzory obsažené v akcelerometru měří rozložení teploty v závislosti na vzdálenosti

od tepelného tělíska. Množství tepla q_1 a q_2 vedené do chadiče plynem z hmoty je funkce vzdálenosti M_1 a M_2 [14],



Obr. [25] Schéma konstrukce tepelného akcelerometru.

4.2. Tenzometry

Tenzometry využívají ve své podstatě zejména Hookova zákona, tedy faktu, že deformace materiálu je přímo úměrná jeho mechanickému napětí, což je v těchto senzorech převedeno na elektrický signál pomocí různých konstrukčních řešení. Tato kapitola je věnována nejobecněji používaným konstrukcím a typům těchto senzorů. [13], [15]

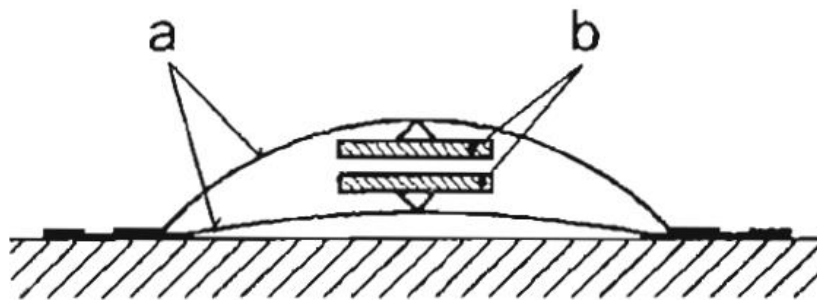
4.2.1. Kapacitní tenzometry

Tento konstrukční typ senzorů je tvořen dvojicí oblouků připomínající části dvou nesoustředných kružnic ležících však na jedné vertikální ose. Oblouky jsou vyrobeny ze speciální slitiny a každý z nich je patkami přivařen k měřenému objektu. Ten oblouk, jenž je přivařen k měřenému objektu tak, že každý z jeho jednotlivých bodů je od měřeného objektu ve větší vzdálenosti než bod ležící na průsečíku oblouku a přímky vedoucí ze středu oblouku a protínající onen vzdálenější bod, lze považovat za oblouk vnější, druhý z oblouků pak za oblouk vnitřní. Na vnějším oblouku je na spodní straně (blíže středu oblouku) umístěna keramická destička s kovovou vrstvou, která je tvořena elektrodami kapacitního senzoru. Tatož destička je rovněž umístěna i na vnitřním oblouku, ovšem na straně horní. Mezi elektrodami těchto dvou destiček je vzduchová mezera, která se při prodlužování měřeného objektu mění, tím se ovlivňuje kapacita kondenzátoru elektrodami tvořeného. Díky tomuto principu, lze pak v praktických aplikacích detekovat míru deformační síly na měřený objekt působící. Výhodou tohoto typu senzorů je nastavitelnost citlivosti pomocí geometrie oblouku. Velká nevýhoda však tkví v nepřesnosti způsobené teplotní roztažností oblouků. [15]

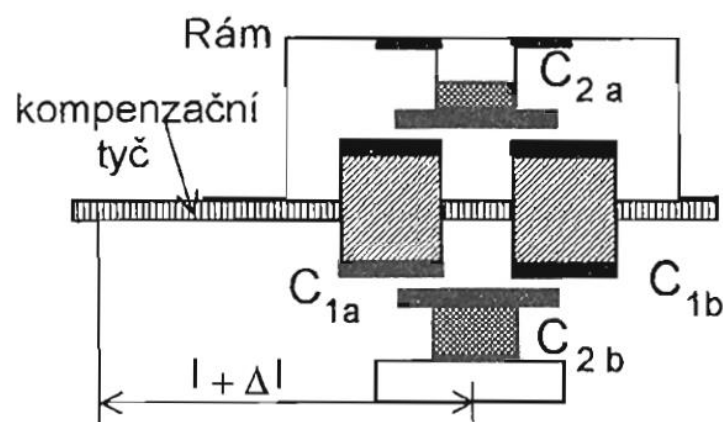
Tento problém je vyřešen např. konstrukcí s diferenciálním koaxiálním senzorem, kde jsou

elektrody upevněny na nosníku ve tvaru písmene L. Tato možnost je znázorněna na obrázku 27. Konstrukce je obohacena o prstencové elektrody C1A a C1B a vnější prstencové elektrody C2a a C2b, díky nimž se převádí deformace měřeného objektu. Horní vnější segment prstencových elektrod, tedy C2a je spojen s měřeným objektem pružným rámem a je přivařen ke kompenzační tyči. Spodní segment vnějších prstencových elektrod je propojen s druhým bodem kompenzační tyče přes izolační vložku. Aby bylo dosaženo neovlivnitelnosti senzoru teplotní roztažností, musí materiál, z kterého je vyrobena kompenzační tyč být vyroben z materiálu, jenž má stejný koeficient teplotní dilatace jako měřený objekt. [15]

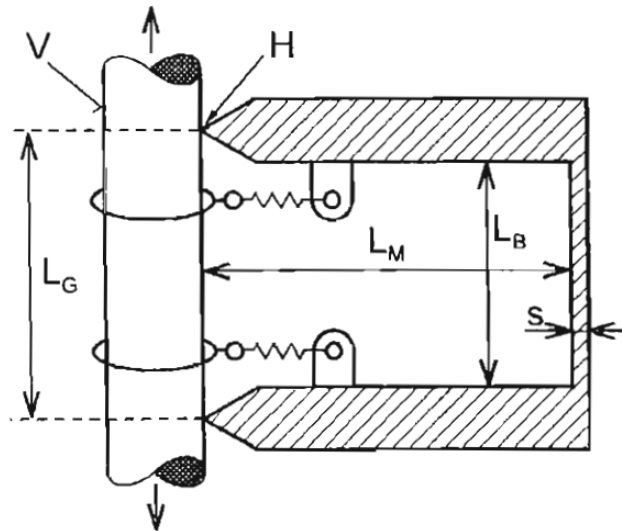
V neposlední řadě je třeba zmínit kapacitní tenzometry fungující na principu extenzometru. Jejich provedení je znázorněno na obrázku 28. Mezi břity extenzometru se nachází plošinka s nalepenými odporovými tenzometry, ve chvíli, kdy dojde k deformaci měřeného objektu, začne zároveň docházet také k deformaci oné plošinky, čímž se na ní změní odpor a dojde k detekci deformace. [15]



Obr. [26] Schéma obloukového kapacitního tenzometru.



Obr. [27] Schéma diferenciálního koaxiálního kapacitního tenzometru.



Obr. [28] Schéma tenzometru založeného na principu extenzometru.

4.2.2. Rezonanční tenzometry

Jedná se o tzv. strunové tenzometry, jejichž struny o délce l a hmotnosti m mají určitou frekvenci f_0 , která je závislá na síle F strunu napínající ve směru její osy. Tuto závislost lze popsat vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}}$$

Vztah lze rozšířit o zavedení hustoty materiálu struny ρ , průřezu struny S , Youngův modul pružnosti E , mechanické napětí σ a relativní deformaci ε . Tedy:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{l \cdot S}$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \varepsilon \cdot E$$

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\varepsilon E}{\rho}}$$

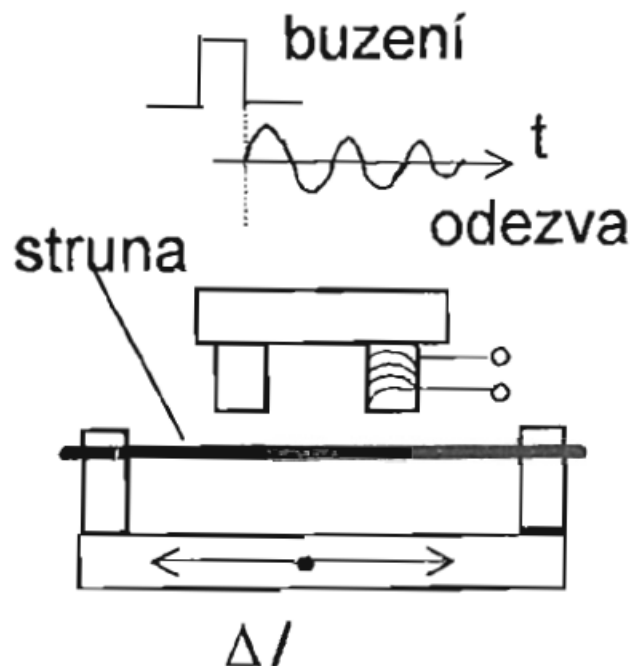
Měřicí obvod tenzometru je vybaven dvěma cívkami s feromagnetickými jádry. Jedna z cívek je cívkou budící, ta vyvolává proudový impuls, který zmagnetizuje a přitáhne strunu, což

s určitým tlumením strunu rozkmitá a začne se v ní indukovat napětí s průběhem, který lze vyjádřit rovnicí:

$$u(t) = Ue^{-bt} \sin(2\pi f_d t)$$

$$2\pi f_d = \sqrt{(2\pi f_0)^2 - b^2}$$

V případě, že začne na strunu působit napínající síla F a pozmění se frekvence kmitání struny f_0 , dojde ke změně napětí na snímací cívce a dojde k jeho přenesení na cívku budící. Dojde tak ke vzniku elektromagnetického oscilátoru, který bude kmitat na rezonanční frekvenci podmíněné měřeným mechanickým napětím. [15]



Obr. [29] Schéma strunového tenzometru

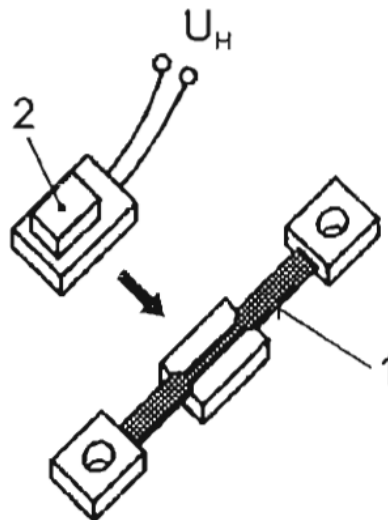
4.2.3. Tenzometry s metastabilními magnetickými slitinami

Snímače tohoto druhu fungují díky vlastnostem speciální slitiny oceli a existenci Hallova efektu. Ona jedinečná vlastnost těchto kovů tkví v jejich reakci na mechanické napětí, s ním totiž začínají měnit svou krystalickou strukturu na kubickou a stávají se tímto feromagnetickými. Feromagnetické změny jsou identifikovány pomocí dvou součástí umístěných v zúžené střední části pásku, kde jsou účinky mechanického napětí nejvyšší.

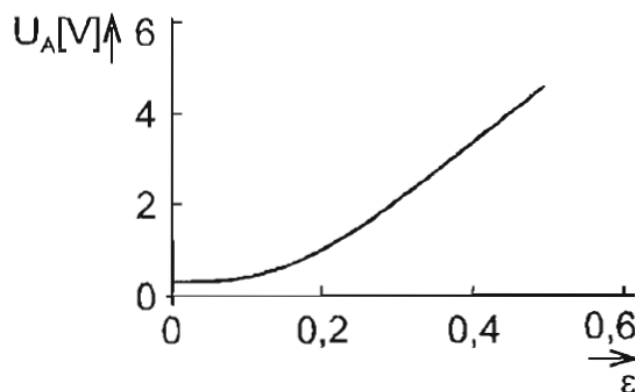
Jedná se o permanentní magnet, jakožto zdroj magnetického pole, a Hallovu sondu, která slouží jako snímač zvýšení magnetického pole vybuzeného nově vzniklým feromagnetickým kovem, jenž zvyšuje v sondě elektrické napětí. [15]

Výhodou je fakt, že výstupní napětí Hallovy sondy je řádu jednotek V a to umožňuje pohodlné zpracování dat zařízením pro jejich sběr. Přenosová funkce lze měnit vzdáleností mezi upevňovacími body. [15]

Nevýhoda těchto senzorů spočívá však v nevratnosti transformace krystalické struktury a proto je lze použít obvykle pouze k jednorázové detekci mechanického napětí, která může být v praxi zajímavá například během monitorování mechanického napětí při konstrukci mostů a jiných staveb. [15]



Obr. [30] Schéma tenzometru s metastabilní magnetickou slitinou



Obr. [31] Přenosová funkce tenzometru s metastabilní magnetickou slitinou.

4.2.4. Odporové tenzometry

Ovlivnění odporu vodiče R lze dosáhnout dle následujícího vzorce:

$$R = \frac{l}{S} \rho$$

změnou délky vodiče, plochy jeho průřezu, či jeho rezistivity. Pokud tedy na vodič působí deformační síla způsobuje jeho mechanické namáhání, lze očekávat zvýšení či snížení velikosti jeho odporu. Důležitým poznatkem je však fakt, že oním namáháním délky l vodiče s plochou průřezu S tahovou silou způsobujeme nejen geometrické deformace, ale také mikrostrukturální změny materiálu, čímž lze změnit i hodnotu jeho rezistivity ρ . [15]

Pokud navážeme na výchozí vzorec výpočtem totálního diferenciálu dR a jeho úpravou pro konečné relativní změny odporu $\Delta R/R$ dostáváme:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Změna plochy průřezu ΔS je dle zákonů teorie pružnosti závislá na délkové deformaci, takže platí:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\mu \frac{\Delta l}{l} + \left(\mu \frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \dots = -2\mu \frac{\Delta l}{l}$$

Kde μ je konstanta, stanovena Poissonem jako poměr relativní deformace způsobené tahovou silou v ose a odpovídající příčné deformaci ε . První dva členy vztahu pro $\Delta R/R$ odpovídají geometrickým změnám vodiče, člen $\Delta \rho/\rho$ je důsledek mikrostrukturálních změn materiálu. [15]

Na základě uvedených vztahů platí:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\mu + \pi_e E$$

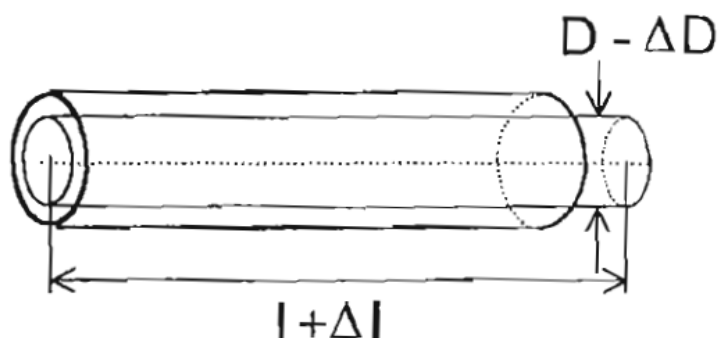
kde π_e piezorezistentní činitel a E je Youngův modul pružnosti.

Obecně je závislost relativní změny odporu na relativní deformaci $\Delta/l = \varepsilon$ vyjádřena polynomem:

$$\frac{\Delta R}{R_{0,0}} = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 + C_3 \varepsilon^3 \dots$$

kde $R_{0,0}$ je hodnota odporu senzoru při nulové deformaci a počáteční teplotě a C_1, C_2, C_3, \dots jsou konstanty.

Měřenou (vstupní) veličinou senzoru je tedy relativní deformace ε a výstupní veličinou je $\Delta R/R$.



Obr. [32] Schéma odporového tenzometru



Obr. [33] Rozdělení odporových tenzometrů

4.3. Odporové senzory polohy

4.3.1. Polohové potenciometry

Polohové potenciometry jsou odporové zařízení s lineárním nebo rotačním pohyblivým kontaktem (jezdcem), jehož poloha je ovlivněna polohou (pohybem) měřeného objektu. Odpor rezistivního materiálu (vinutí umístěného na izolovaném jádru) mezi počátkem navíjení a jezdcem je úměrný poloze jezdce, tedy poloze měřeného objektu. Potenciometr může pracovat jako proměnný odpor (reostat) nebo jako odporový dělič napětí. Aplikace děliče napětí (potenciometrický) - režim, při kterém je napětí mezi jezdcem a počátkem navíjení (výstupní napětí U_2) nabízí zpravidla více výhod. [16]

Při měření za použití reostatu s odporem R_2 mezi jezdcem v poloze x a svorkou odporového vinutí, lze x vypočítat z jednoduchá rovnice:

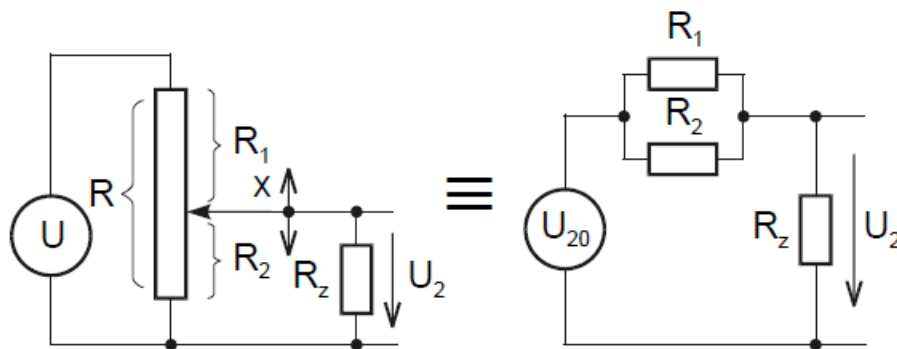
$$\frac{x}{x_0} = \frac{R_2}{R}$$

kde $R = R_1 + R_2$ je celkový odpor vinutí s délkou x_0 .

Princip funkce v potenciometrickém režimu je uveden na obrázku 34 a jeho výstupní napětí U_2 je dáno vztahem:

$$U_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{20}$$

Napětí U_2 je tedy úměrné odporu R_2 a ten je úměrný poloze x jezdcem.

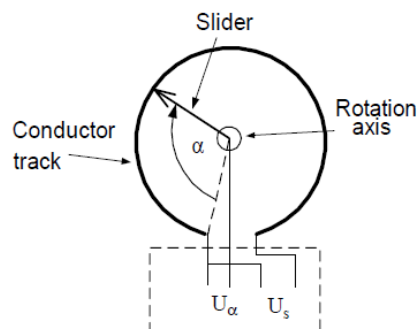


Obr. [34] Schéma obvodu odporového senzoru polohy s pohyblivým jezdcem

4.3.2. Úhlové potenciometry

Rotační potenciometr je snímač pro měření úhlové polohy objektu. Podobně jako u lineárního potenciometru je výstupní napětí U_α měřené na posuvníku (obrázek 7.2) úměrné jeho poloze. Rozsah potenciometrů je přibližně 10° až 3000° u víceotáčkových potenciometrů (helipotů).

[16]



Obr. [35] Princip úhlového potenciometru.

4.3.3. Lankové / tahové senzory polohy

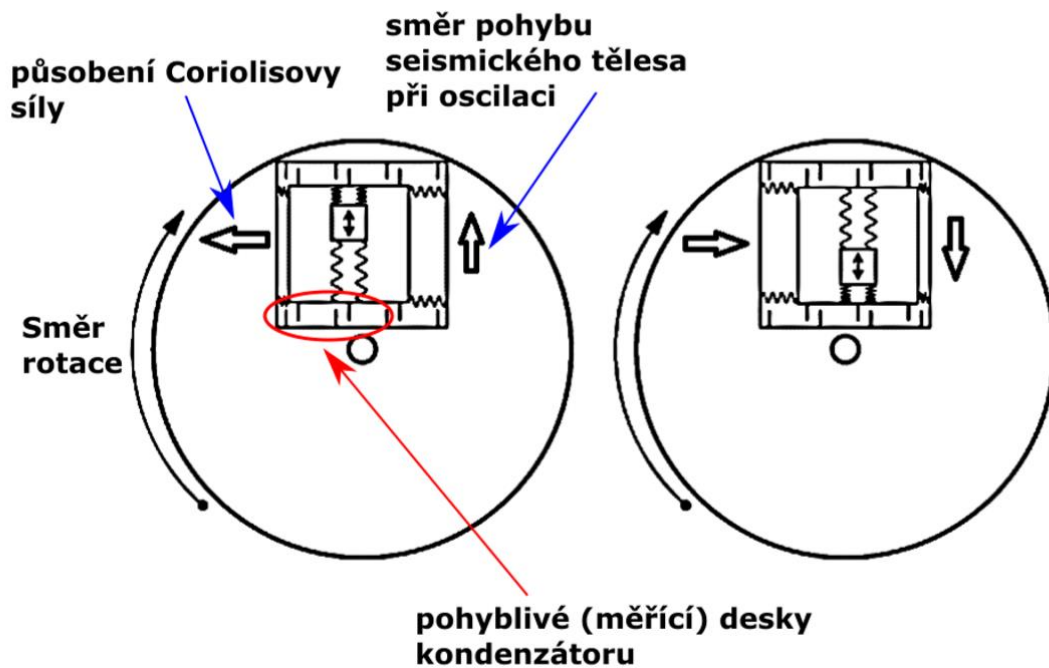
V tahových senzorech dochází k transformaci translačního pohybu na úhlový, což se provádí navíjením kabelu vyrobeného z kovu nebo nylonu na pružinovém pohonu kovového bubnu. Druhý konec kabelu je upevněn na pohybujiícím se měřeném objektu, zatímco snímač zůstane v pevné poloze. Úhlová deformace se pak měří pomocí úhlového potenciometru. Rozsah měření těchto snímačů je od 0-50 mm do 0-50 m. [16]



Obr. [36] Příklad lankových senzorů.

4.4 Gyroskopy

Gyroskopy jsou zařízení, které mají schopnost zaznamenávat orientaci objektu v prostoru a v praxi tak často mohou sloužit k například k měření průběhu klopení, klonění a stáčení určitého objektu. Jejich fungování je postaveno na detekci Coriolisovy síly. V principu jde o konstrukci, která koná stále stejně opakující se pohyb, má přitom určitou hmotnost a pomocí pružin je nainstalovaná v rámu. Ve chvíli, kdy se začne vykonávat pohyb při kterém dojde k tomu, že se gyroskop bude pohybovat kolmo na osu otáčení, začne na pohybujiící se konstrukci působit ona Coriolisova síla. Dle fyzikálního vztahu je známo, že velikost této síly je úměrná úhlové rychlosti otáčení. V důsledku toho dojde k pružné deformaci pružin, konkrétně k její kompresi a díky tom dojde k posunutí měřicích destiček, což je v moderních MEMS gyroskopech zaznamenáno snímačem fungujícím na principu deskového kondenzátoru. Vhodnou přenosovou funkcí je pak tento vstupní signál převeden na námi potřebnou veličinu. [14], [18]



Obr. [37] Princip gyroskopu

4.5. Otáčkoměry

V minulosti byly nejčastěji používány otáčkoměry, jejichž ukazatel využíval magnetické pole permanentního magnetu. Dnešní modernější otáčkoměry pracují díky funkční závislosti napětí na otáčkách (tachodynamy, tachogenerátory) či na principu měření četnosti impulsů (impulsní otáčkoměry). Otáčkoměry se upevňují zpravidla na některé z kol vozidla, měří, tak otáčky tohoto kola a díky znalosti poloměru kola dokáží vypočítat rychlost, kterou se zkoumané vozidlo pohybuje. Od reálné rychlosti se však může rychlost změřená otáčkoměry lišit o chybu, která je obvykle zapříčiněna prokluzem či změnou dynamického poloměru kola. [12]

V případě tachodynamy či tachogenerátoru je rychlost vozidla dána vztahem:

$$v = \frac{2\pi \cdot r_{dyn} \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot r_{dyn} \cdot u}{60 \cdot K} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad , \text{kde}$$

K – Konstanta U/n (např $K = 0,06 \text{ V} \cdot \text{min}^{-1}$)

n – Otáčky kola nebo tachodynamy [$1 \cdot \text{min}^{-1}$]

r_{dyn} – Dynamický poloměr kola [m]

u – Napětí [V]

V případě impulsního přístroje platí následující vztah:

$$v = \frac{i \cdot 2\pi \cdot r_{dyn}}{t} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad , \text{ kde}$$

i – počet impulsů na jednu otáčku

T – čas [s]

5. Příprava a průběh měření

5.1. Nárazová zkouška

Dne 7. 6. 2018 se uskutečnila ve zkušebně pasivní bezpečnosti Škoda auto a.s. v katastru obce Úhelnice zkouška dle předpisu společnosti Euro NCAP vozidla Octavia 3 Combi výrobce Škoda auto a.s. Konkrétně se jednalo o zkoušku čelního nárazu do deformovatelné bariéry s překrytím 40 % v rychlosti 64 km/h a proběhla za účasti zaměstnanců Škoda auto a.s., zaměstnanců a studentů Fakulty dopravní ČVUT v Praze a zaměstnanců společnosti TÜV SÜD Czech, s.r.o.

5.1.1 Cíl měření

Cílem předmětné nárazové zkoušky bylo pro FD ČVUT získání dat popisujících průběh veličin působících na vozidlo a figurínu uvnitř vozidla v průběhu nárazu vozidla do pevné překážky, pro jejich následnou analýzu. Cílem Škoda auto a.s. bylo rovněž změřit obdobné veličiny působící při nárazu, avšak s využitím profesionálního zařízení a figurín Škoda auto a.s., toto měření však není předmětem této práce.

5.1.2. Použitá zařízení

5.1.2.1. Datová ústředna Krypton

Jako datová ústředna bylo použito zařízení vyrobené společností Dewesoft typu 6xSTG a 3xSTG sloužící ke sběru dat ze senzorů s touto ústřednou spárovaných. [22]

Technická specifikace

- Výrobní číslo: D05AB373BE, D05AB373B2
- Počet analogových vstupů: 6, 3
- Rozlišení: 24 bit
- Vzorkovací frekvence: 20 kS/s pro každý kanál
- Nastavitelný vstupní rozsah: ± 10 V / ± 100 mV / ± 1 V / ± 10 mV
- Vstupní přesnost: $\pm 0,02$ % vstupního rozsahu
- Vstupní impedance: 10 M Ω
- Rozměry: 212x38.1x54.7mm
- Hmotnost: 700g [22]



Obr. [38] Datová ústředna Krypton 3xSTG

5.1.2.2. Akcelerometry

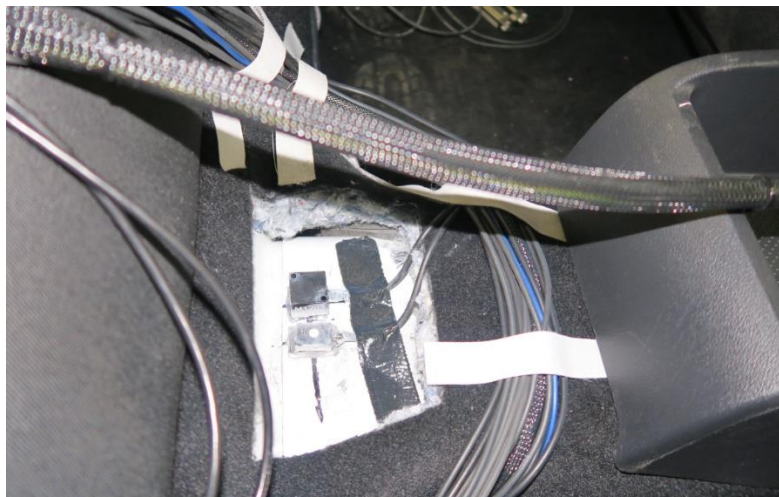
V těžišti vozidla a v hlavě a hrudníku figuríny byly umístěny tříosé akcelerometry výrobní značky KISTLER, konkrétně typy 1203-1000-10-072 (hlava+hrudník) a M1203A00-1000 (karoserie) sloužící k záznamu průběhu zrychlení.

Technická specifikace typu 1203-1000-10-072

- Výrobní číslo: A067738 (hrudník), A067737 (hlava)
- Rozsah měření: ± 1000 g
- Rozsah frekvence: 20 Hz až 1500 Hz
- Citlivost při 100 Hz: 0,14 mV/g
- Datum kalibrace: 13. duben 2010

Technická specifikace typu M1203A00-1000

- Výrobní číslo: A218408
- Měřicí rozsah: ± 1000 g
- Rozsah frekvence: 20 Hz až 2994 Hz
- Citlivost při 80 Hz: 0,014 mV/g
- Datum kalibrace: 7. duben 2014



Obr. [39] Umístění akcelerometru v těžišti vozidla.

5.1.2.3. Pásový siloměr

Průběh síla působící na bezpečnostním pásu figuríny během nárazové zkoušky byl měřen pásovým siloměrem typu EL20-S458-25KN-/A2.

- Výrobní číslo: W090F1
- Měřicí rozsah: ± 25 kN
- Chyba linearity: $\pm 3\%$ rozsahu
- Chyba opakovatelnosti: $\pm 0,2\%$ rozsahu
- Citlivost: 27,974 mV / rozsah
- Datum kalibrace: 5. května 2010



Obr. [40] Umístění pásového siloměru

5.1.2.4. Lankový potenciometr

K měření změny polohy hlavy figuríny byl použit lankový potenciometr typu WPS-750-MK30-P10 vyrobený společností Micro-Epsilon.

Technická specifikace

- Výrobní číslo: 1733
- Měřicí rozsah: 750 mm
- Citlivost: 1,2779 mV/V/mm
- Odchylka měření: 0,10 % rozsahu
- Napájecí napětí: 10,2 V
- Datum kalibrace: 4. května. 2017



Obr. [41] Umístění lankového potenciometru.

5.1.2.5. Trigger

K zjištění přesného času nárazu byl použit trigger tvaru pásky, který byl umístěn na přední nárazník automobilu a ve chvíli nárazu byl stlačen, což způsobilo změnu napětí v obvodu, a to bylo zaznamenáno datovou ústřednou Krypton STG.

5.1.2.6. Figurína

Při nárazové zkoušce byla týmem FD ČVUT použita figurína šestiletého dítěte sloužící pro studentské účely vyrobená z materiálu Lukopren. Tato figurína byla umístěna do dětské autosedačky na zadním sedadle za místem spolujezdce.



Obr. [42] Usazení dětské figuríny.

5.1.2.7. Crash PC

Datová ústředna byla napojena na speciálně odolný PC vyvinutý na Ústavu soudního znalectví v dopravě FD ČVUT v Praze za účelem použití při měření extrémních zkoušek tohoto typu.

5.1.3. Přípravy měření

Přibližně jeden kalendářní týden před předemtnou nárazovou zkouškou byla týmem ČVUT navštívena výše zmíněná zkušebna. Proběhlo seznámení s měřeným vozidlem za účelem rozmyšlení provedení jeho instrumentace.

Do prostoru kufru byla šroubovým spojem připevněna ke karoserii vozidla kovová konstrukce, do které byla umístěna datová ústředna Krypton STG společně se s baterií pro napájení a odolným počítačem vhodným pro účely crash testu.

Poté došlo k usazení figuríny na patřičné místo do dětské autosedačky. Figurína byla osazena patřičnými akcelerometry, tak jak je uvedeno v předchozích kapitolách. Tyto akcelerometry byly přivedeny kabely do datové ústředny skrze úzký prostor mezer mezi zadními sedačkami. Stejným způsobem byl s datovou ústřednou propojen i akcelerometr, který byl umístěn do přibližného těžiště vozidla na středového tunelu. Akcelerometry umístěné ve figuríně byly upevněny šroubovým spojem, akcelerometr umístěný v těžišti voskem.

Pásový siloměr byl šroubovým spojem připevněn k bezpečnostnímu pásu figuríny a obdobným způsobem jako akcelerometry spárován s datovou ústřednou.

K upevnění lankového potenciometru byla využita kovová příhradová konstrukce v prostoru kufru vozidla sloužící primárně k účelům měření zaměstnanců Škoda auto. Na jednu z tyčí této

konstrukce byl plastovou stahovací páskou vhodně přivázán předmětný potenciometr. Lanko potenciometru bylo rozvinuto nad zadními sedačky směrem k hlavě figuríny, ke které byl také přilepen kovový konec lanka potenciometru, obdobným způsobem jako u předchozích zařízení.

V neposlední řadě byl také do datové ústředny přiveden trigger nacházející se na předním nárazníku testovaného vozidla. Tento trigger byl spárován i s datovou ústřednou zaměstnanců společnosti Škoda auto, a tak posloužil zároveň oběma měřicím týmům.

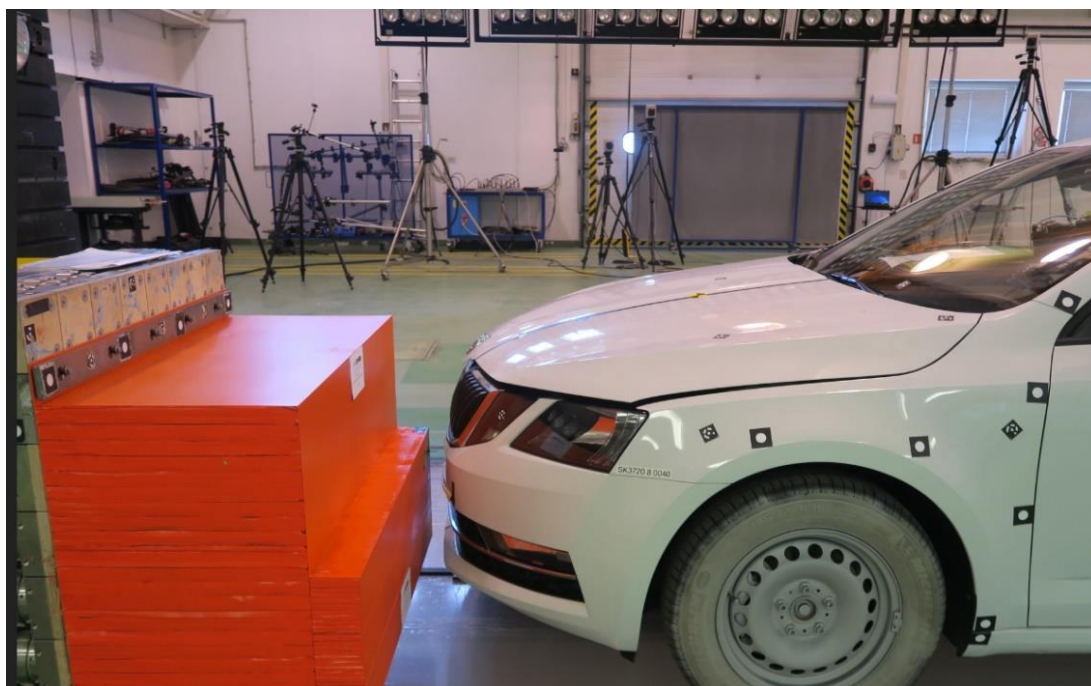
Na závěr byly v podpůrném softwaru pro ovládání datové ústředny Dewesoft nastaveny všechny parametry měření, tzn. citlivost, očekávané napětí na vstupu, jednotky, rozsah a také vhodný elektrický obvod aplikovaný pro měření. Proběhla kontrola, zda všechny kanály datové ústředny fungují dle očekávání a instrumentace byla ukončena.



Obr. [43] Pohled na vozidlo před zkouškou

5.1.4. Průběh měření

V den zkoušky byla týmem ČVUT FD pod vedením Ing. Luboše Nouzovského znova ověřena funkčnost měřicí techniky, jež proběhla úspěšně. Poté bylo těsně před testem přes vzdálenou plochu prostřednictvím crash PC zahájeno měření. Veškeré osazenstvo se z bezpečnostních důvodů přesunulo na pozorovací můstek, odkud bylo i autorem následující dění sledováno. Zaměstnancem Škoda auto bylo spuštěno tažné zařízení, které rozpohybovalo automobil do potřebné rychlosti, při které došlo k nárazu. Ten proběhl v pořádku dle požadovaných legislativních norem a předpisů, a tak mohly oba týmy odebrat data a odstrojit vozidlo od měřicí techniky.



Obr. [44] Vozidlo těsně před nárazem do deformovatelné bariéry.



Obr. [45] Stav vozidla po nárazu

5.2. Brzdná zkouška návěsu

Dne 18.6. ve spolupráci ČVUT FD, společnosti Dekra CZ a.s. a společnosti STROM Praha a.s. proběhla zkouška typu 0 dle nařízení Evropské unie 167/2013 s vozidlem kategorie R3.

5.2.1. Cíl měření

5.2.1.1. Cíl měření práce kooperačního partnera Jaroslava Pinkase

V rámci nové legislativy není nutné, aby vozidla s konstrukční rychlostí do 60 km/h byla vybavena systémem ABS, a proto bylo provedeno porovnání brždění s tímto systémem a bez tohoto systému. Bylo také provedeno odstupňované brždění s různým tlakem na ovládací větví brzdného systému a různým zatížením přípojného vozidla.

5.2.1.2. Cíl měření této práce

Cílem měření autora této práce je poskytnutí datového záznamu ohledně průběhu dynamických veličin během předmětné brzdné zkoušky pro kooperačního partnera Jaroslava Pinkase.

5.2.2. Použitá měřicí zařízení

5.2.1.1. Sdružený snímač Xsens MTi-G

Pro účely měření této zkoušky bylo zvoleno zařízení Xsens MTi-G-28A53G35 ve vlastnictví Ústavu soudního znalectví v dopravě Fakulty dopravní ČVUT v Praze. Toto zařízení je produktem Holandské společnosti Xsens Technologies B.V. a slouží primárně k měření akcelerace, úhlové rychlosti a určování polohy pomocí souřadnic GPS. Je schopno však měřit i další veličiny, jako tlak, teplotu či různé veličiny magnetického pole, to však při předmětném měření nebylo využito. [23]

Technická specifikace zařízení

- Výrobní číslo: 00501403 (návěs), 00501494 (tahač)
- Rozměry: 58x58x33 mm
- Hmotnost: 68 g
- Rozsah pracovní teploty: -20 až 60 °C
- 5 komponentů: kapacitní akcelerometr, snímač úhlové rychlosti, přijímač GPS, magnetometr, teploměr, barometr
- Rozsah snímače zrychlení: $\pm 50g$
- Přesnost snímače zrychlení: 0,2% rozsahu
- Rozsah snímače úhlové rychlosti: $\pm 30^\circ/s$
- Přesnost snímače úhlové rychlosti: 0,1% rozsahu
- Datum kalibrace: 19. ledna 2010 (0050140), 17. května 2010 (00501494)
- Doplnující komponenty: 2x datový kabel USB, PC pro ovládaní nastavení a ukládání dat měření



Obr. [46] Sdružený snímač Xsens Mti-G

Měřené veličiny

Veškeré naměřené veličiny tímto zařízením byly měřeny s frekvencí 100 Hz a jednalo se o veličiny následující:

- Čas [s]
- Zrychlení [g]
- Rychlost [m/s]
- Klonění [°]
- Klopení [°]
- Stáčení [°]
- Zeměpisná délka, šířka a výška [°]

5.2.1.2. Rychloměr DEWETRON

K měření rychlosti na tahači byl využit rychloměr typu DEWE-VGPS-HSC vyrobené společností DEWETRON ve vlastnictví společnosti Dekra a.s., toto zařízení vypočítává rychlost na základě aktuální polohy pomocí souřadnic GPS.

Technická specifikace zařízení

- Výrobní číslo: D042D65DE9 - CZE
- Rozměry: 130 x 89 x 43 mm
- Hmotnost: 410 g

- Rozsah pracovní teploty: 0 °C až 60 °C
- Rozsah měření rychlosti: 0,1 km/H až 500 km/H
- Přesnost: 0,1 km/h, tedy 0,05 % rozsahu
- Rozlišení: 0,01 km/h
- Použitá frekvence: 100 Hz
- Datum kalibrace: 29.3. 2018

5.2.1.3. Čítač National Instruments

Jako datová ústředna byl využit čítač typu PCI-6251 vyrobené společností National Instruments ve vlastnictví společnosti Dekra a.s.

- Výrobní číslo: 138F5DB
- Počet analogových vstupů: 16
- Vzorkovací frekvence: 1,25 MS/s pro 1-channel a 1 MS/s pro multichannel
- Rozlišení: 16 bit
- Časové rozlišení: 50 ns
- Časová přesnost: 50 ppm vzorkovací frekvence
- Využitý vstupní rozsah: ± 10 V

5.2.1.4. Infračervený bezdotykový teploměr s možností připojení kontaktní sondy

Toto zařízení typu 568 IR vyrobené společností Fluke ve vlastnictví společnosti Dekra a.s. bylo v rámci předmětné brzdové zkoušky využito k ověření teploty brzd na měřeném návěsu.

Technická specifikace zařízení:

- Výrobní číslo: 95490147
- Rozsah: -40°C až 800°C
- Rozlišení: 0,1°C
- Datum kalibrace: 30. března 2017

5.2.1.5. Analogový tlakoměr

Využití tohoto zařízení typu Wabco vyrobené společností Tectis spočívalo v ověřování tlaku v potrubí brzného systému.

Technická specifikace zařízení

- Výrobní číslo: 903201
- Rozsah: 0 až 1600 kPa

- Rozlišení: 0,01% rozsahu
- datum kalibrace: 29. listopad 2016

5.2.3. Vozidla použitá při měření

5.2.2.1. Měřicí tahač Iveco

Speciálně upravené vozidlo typu STRALIS ACTIVE SPACE AS440S40 kategorie N3 vtovární značky IVECO ve vlastnictví společnosti Dekra a.s. bylo využito jako vozidlo tažné. Díky měřicímu zařízení a systému uloženému ve vozidle je možné ovládat brzdový systém taženého vozidla, a tak je tedy možné provádět zkoušku typu 0 podle bodu b) kdy je brzdový účinek taženého vozidla vypočítaný dle poměrného zpomalení taženého vozidla, přičemž brzděným vozidlem je pouze a jen vozidlo tažené.

Technická specifikace vozidla

- Výrobní číslo: WJMM1VSK004291012
- Rozměry: 6256 x 2500 x 3925 mm
- Provozní / nejvyšší technická přípustná / povolená hmotnost: 7530 / 19 000 / 18 000 kg
- Největší technicky přípustná / povolená hmotnost soupravy: 44 000 / 42 000 kg
- Maximální konstrukční rychlost: 85 km/h s omezovačem
- Pneumatiky: HANKOOK AH22 315/70 R22.5 156/150M
- Výbava: Brzdy – provozní, parkovací, nouzová, odlehčovací, ABS, spojovací zařízení

5.2.2.2. Měřený návěs ANNABURGER HTS 22G.14

Návěs tovární značky ANNABURGER typu HTS 22G.14, jehož měření bylo předmětem experimentu byl zapůjčen od společnosti AGROSSYN sídlící v obci Klíčany. Tento univerzální sklopný tandemový návěs kategorie R3b je vybaven systémem ABS.

Technická specifikace vozidla

- Výrobní číslo: WADT22G14GA008002
- Rozměry: 8950 x 2550 x 3720 mm
- Provozní / nejvyšší technicky přípustná / povolená hmotnost: 6 580 / 22 000 / 20 000 kg
- Maximální konstrukční rychlost: 60 km/h
- Pneumatiky: MICHELIN CARGOXBIB 600/55 R26,5 165D / 3,0 kPa

- Výbava: Kombi korba o objemu 28,3 / 40,5 m³, Hydropneumatické odpružené nápravy ADR, odpružení voje, dvouokruhové vzduchové brzdy, ABS, elektřina 12 / 24 V, výměnné spojovací zařízení K80 / oko 50 mm / oko 40 mm



Obr. [47] Tahač Iveco s návěsem Annaburger

5.2.4. Měřicí místo

Jako měřicí místo byl zvolen přímý úsek dráhy na neveřejném civilním letišti v katastru obce Vodochody ve Středočeském kraji. Souřadnice GPS: 50° 12' 56" N, 014° 24' 44" E.

5.2.5. Příprava měřicí techniky

Připraveny byly 2 zařízení Xsens Mti-G, každé z nich umístěné na jinou část soupravy, aby posléze bylo možné vybrat pro další analýzu data ze zařízení podléhající nižšímu šumu. Zařízení s označením 00501403 bylo umístěno na téměř vodorovnou rovinu táhla návěsu. Zařízení s označením 00501494 bylo umístěno na taktéž téměř vodorovnou rovinu plošiny na konci návěsu. K připevnění byl použit lepený spoj, konkrétně oboustranná lepicí páska, která je pro tento typ měření dostačující, v případě potřeby přesnějšího měření je však třeba použít šroubový spoj či silný permanentní magnet. Po zapojení zařízení do PC byl v programu MT Manager zvolen režim *automotive* nejvíce vyhovující typu předmětné zkoušky. Vyrovnání obou

zařízení do absolutní vodorovné polohy zajištěno pomocí matematického algoritmu funkce *heading reset*. Dále byla na plošinu manipulačního zábradlí nacházejícího se nad táhlem přívěsu upevněna rovněž oboustrannou lepící páskou anténa GPS, která byla napojena do zařízení umístěného na táhle přívěsu. Do druhého zařízení umístěného na tahači byla zapojena anténa GPS, která byla stejným způsobem jako předchozí připevněna na horní zadní hranu tahače. PC byl umístěn jako ústředna do kabiny tahače a dvěma USB kabely o délce 10 m paralelně připojen k oběma zařízením Mti-G.

5.2.5 Průběh měření

Začátek měření byl přibližně v 9:00 a proběhlo celkem 31 brzdných zkoušek z různých rychlostí vždy do úplného zastavení soupravy. První bylo měřeno brždění návěsu, který byl naplněn 12 tunami písku, postupně z rychlostí 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h a 60 km/h, přičemž každá z rychlostí byla měřena dvakrát. Dále proběhla řada měření při stejných rychlostech a se stejným počtem opakování, ovšem bez zatížení návěsu pískem. Poté bylo měřeno brždění rovněž s prázdným návěsem, ovšem s plným výkonem, v rychlostech stejných jako v měřeních předchozích vyjma však rychlosti 10 km/h a bez opakování z důvodu časové tísně. Na závěr proběhlo měření bez použití systému ABS při rychlostech 30 km/h a 60 km/h. Počasí během měření lze považovat za přijatelné, nedošlo ke srážkám, příliš vysokým teplotám ani silnému větru či jiným jevům negativně ovlivňujícím přesnost či možnost měření.

6. Zpracování datového výstupu

Data z obou měření byla graficky zpracována v programu Diadem společnosti National Instruments.

6.1. Grafické zpracování datového výstupu nárazová zkouška

Ve výše zmíněném programu byly postupně zpracovány data ze všech měřicích zařízení při nárazové zkoušce aplikovaných. Tedy tří akcelerometrů, tenzometru a potenciometru. Čas $t=0$ s je vždy časem nárazu.

6.1.1. Výsledný průběh zrychlení těžiště karoserie automobilu

Jde o výslednici průběhu zrychlení v jednotkách g v čase všech tří os akcelerometru v oblasti přibližného těžiště automobilu. [24]

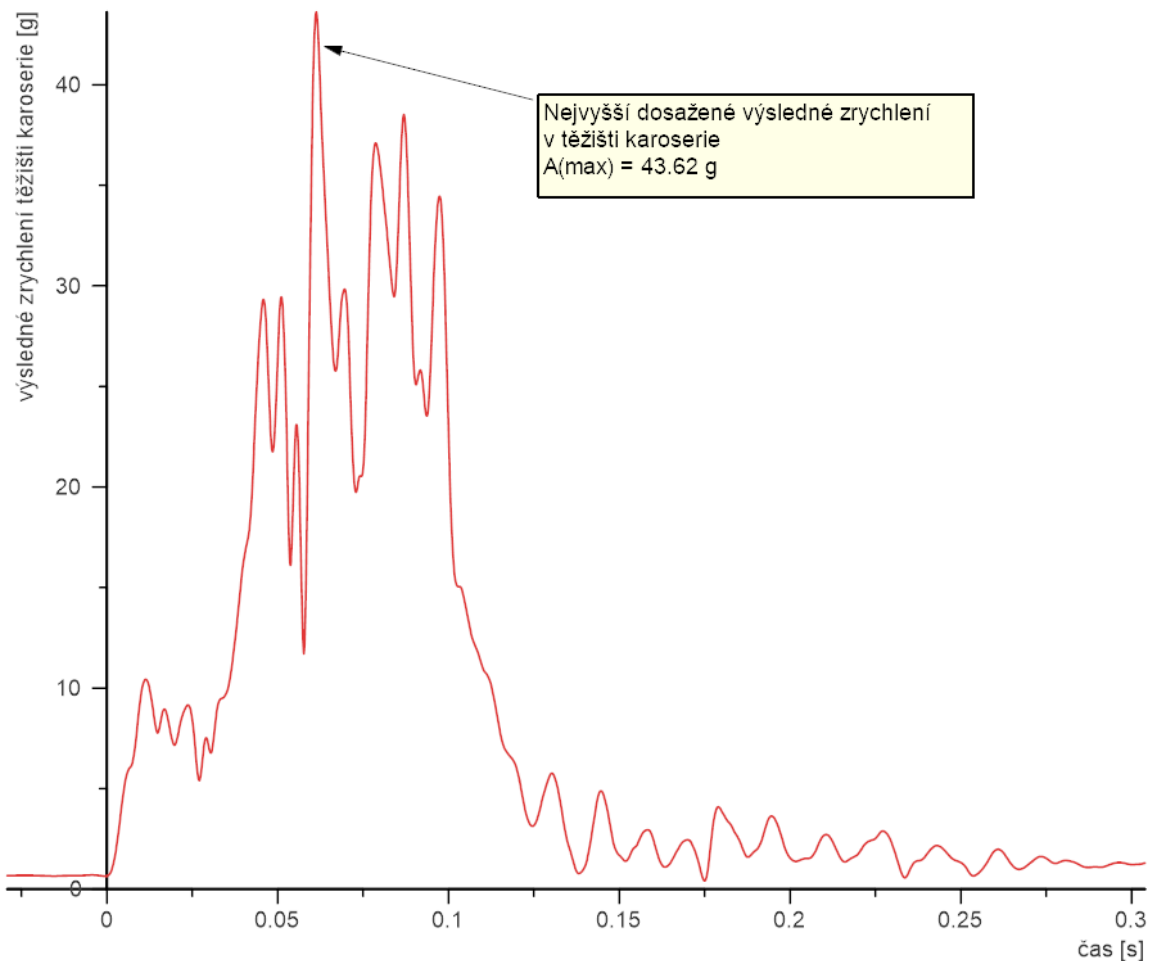
Výslednice je graficky znázorněna na obrázku níže a byla vypočtena dle následujícího vzorce:

$$A_k = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

A_x Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose x

A_y Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose y

A_z Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose z [24]



Graf [1] Průběh zrychlení karoserie

6.1.2. Výsledný průběh zrychlení hlavy figuríny dítěte

Jde o výslednici průběhu zrychlení v jednotkách g v čase všech tří os akcelerometru v oblasti hlavy figuríny, která byla pasažérem na zadním sedadle zkoušeného automobilu.

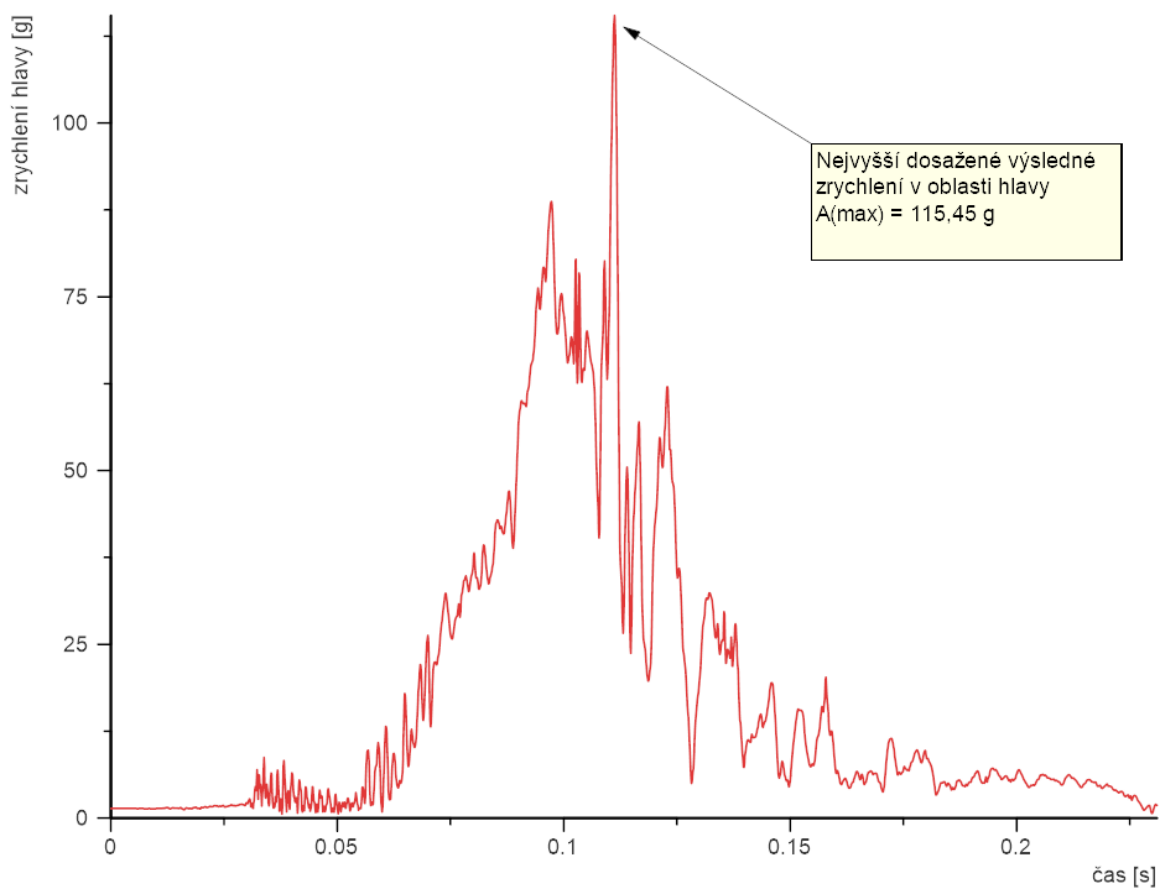
Výslednice je graficky znázorněna na obrázku níže a byla vypočtena dle následujícího vzorce:

$$A_r = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

A_x Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose x

A_y Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose y

A_z Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose z [24]



Graf [2] Průběh zrychlení hlavy figuríny

6.1.3. Výsledný průběh zrychlení hrudníku figuríny dítěte

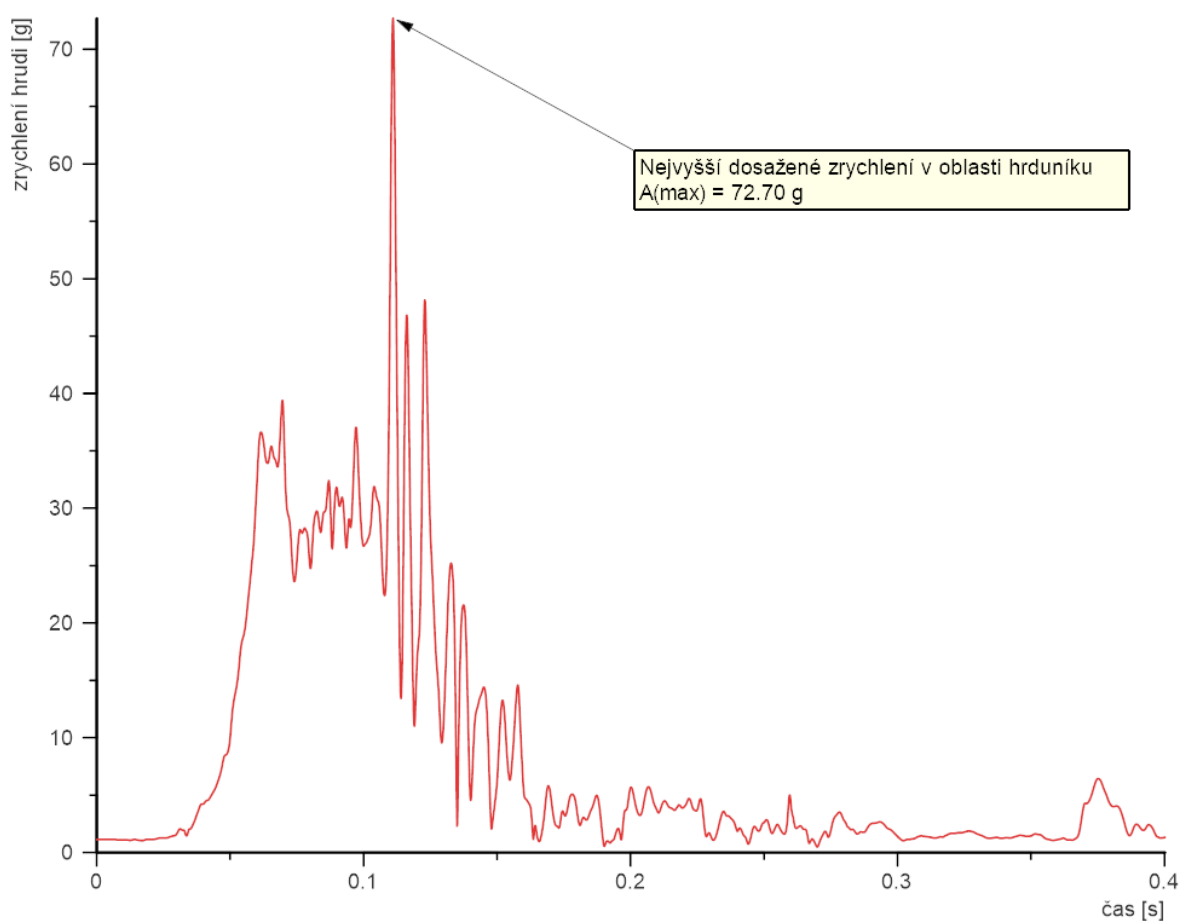
Jde o výslednici průběhu zrychlení v jednotkách g v čase všech tří os akcelerometru v oblasti hrudníku figuríny, která byla pasažérem na zadním sedadle zkoušeného automobilu. Výslednice je graficky znázorněna na obrázku níže a byla vypočtena dle následujícího vzorce:

$$A_r = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

A_x Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose x

A_y Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose y

A_z Filtrovaná hodnota zrychlení hlavy v ose z [24]



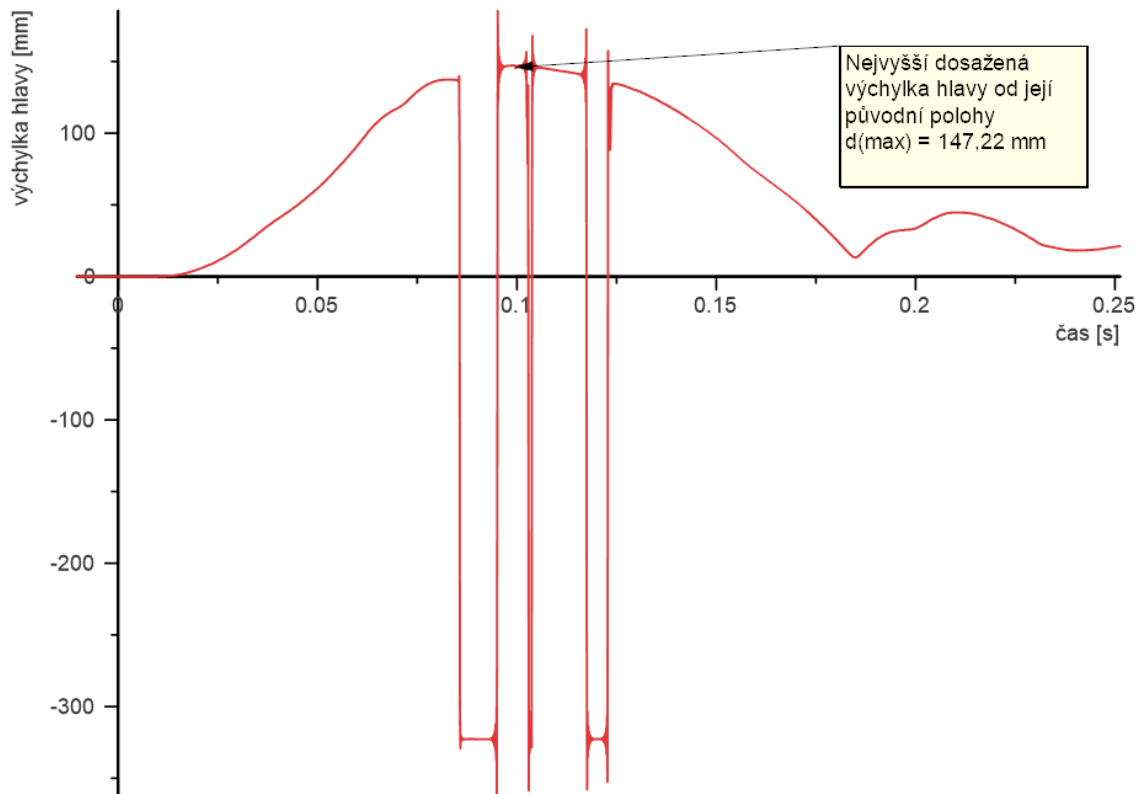
Graf [3] Průběh zrychlení hrudníku figuríny

6.1.4. Výsledný průběh změny polohy hlavy figuríny dítěte

Na následujícím obrázku je graficky znázorněn průběh změny polohy hlavy dítěte v čase, změřené potenciometrem umístěným za hlavou dětské figuríny, která byla pasažérem na zadním sedadle zkoušeného automobilu.

Během měření však došlo k nežádoucímu a chybnému odklonění průběhu naměřených hodnot od průběhu hodnot skutečných. Jedná se celkem o tři časové úseky měření a to konkrétně mezi časy $t_1 = 0,085$ s a $t_2 = 0,094$ s, dále $t_3 = 0,103$ s a $t_4 = 0,104$ s, dále $t_5 = 0,117$ s a $t_6 = 0,123$ s. Tato chyba byla zřejmě způsobena nedostatečnou odolností snímače vůči extrémnímu zrychlení, ke kterému při zkoušce došlo.

Maximální dosažená hodnota výchylky hlavy od její původní polohy je rovna $d_{\max} = 147,22$ mm.

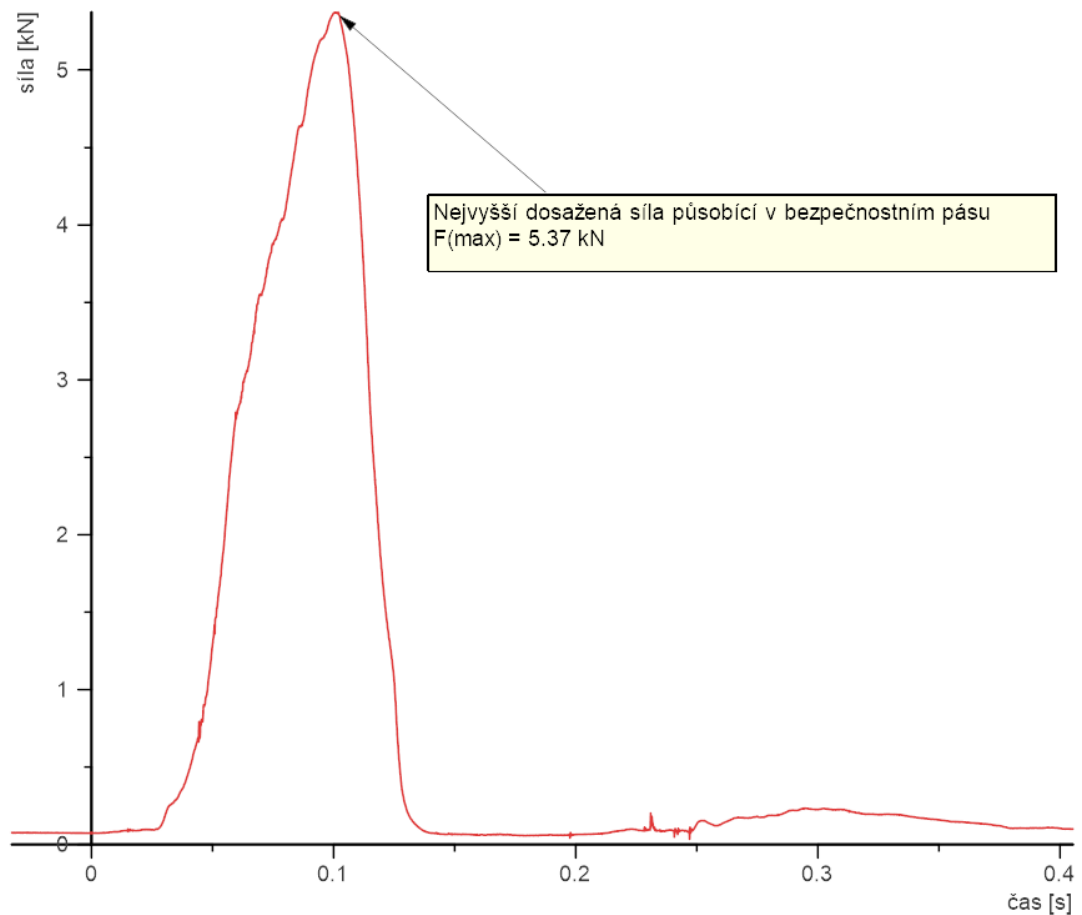


Graf [4] Průběh změny polohy figuríny

6.1.5. Výsledný průběh síly působící v bezpečnostním pásu figuríny dítěte

Na následujícím obrázku je graficky znázorněn průběh sil v čase naměřených tenzometrem umístěným na bezpečnostním pásu dětské figuríny, která byla pasažérem na zadním sedadle zkoušeného automobilu.

Maximální dosažená hodnota $F_{\max} = 5,37$ kN.



Graf [5] Průběh síly působící v bezpečnostním pásu

7. Popis výsledku měření

7.1. Popis výpočtu hodnot kritérií nárazové zkoušky

Na základě analýzy dat naměřených při předemném crash testu byla pomocí programu Diadem společnosti National Instruments vypočtena následující kritéria biomechanických poranění.

7.1.1. Maximální hodnota výsledného zrychlení hlavy

Maximální hodnota výsledného zrychlení hlavy figuríny je nejvyšší hodnota výsledného zrychlení (respektive zpomalení) hlavy figuríny v jednotkách g , které bylo dosaženo během nárazové zkoušky. Dle naměřených dat o průběhu výsledného zrychlení se jedná o hodnotu $A_{h-max} = 115,45 g$ a to v čase $t = 0,111 s$ bezprostředně po nárazu.

7.1.2. Průměrná hodnota výsledného zrychlení hlavy

Průměrná hodnota výsledného zrychlení hlavy figuríny mezi okamžikem nárazu a okamžikem dosažení konstantního průběhu zrychlení $0 g$ byla spočtena pomocí funkce *mean value* a je rovna $A_{k-prumer} = 11,52 g$.

7.1.3. Maximální hodnota výsledného zrychlení karoserie

Maximální hodnota výsledného zrychlení karoserie je nejvyšší hodnota výsledného zrychlení (respektive zpomalení) karoserie v jednotkách g , které bylo dosaženo během nárazové zkoušky. Dle naměřených dat o průběhu výsledného zrychlení se jedná o hodnotu $A_{h-max} = 43,62 g$ a to v čase $t = 0,0613 s$ bezprostředně po nárazu.

7.1.4. Průměrná hodnota výsledného zrychlení karoserie

Průměrná hodnota výsledného zrychlení karoserie mezi okamžikem nárazu a okamžikem dosažení konstantního průběhu zrychlení $0 g$ byla spočtena pomocí funkce *mean value* a je rovna $A_{k-prumer} = 8,53 g$.

7.1.5. Maximální hodnota výsledného zrychlení hrudi

Maximální hodnota výsledného zrychlení hrudi figuríny je nejvyšší hodnota výsledného zrychlení (respektive zpomalení) hlavy figuríny v jednotkách g , které bylo dosaženo během nárazové zkoušky. Dle naměřených dat o průběhu výsledného zrychlení se jedná o hodnotu $A_{h-max} = 72,70 g$ a to v čase $t = 0,111 s$ bezprostředně po nárazu.

7.1.6. Průměrná hodnota výsledného zrychlení hrudi

Průměrná hodnota výsledného zrychlení hrudi figuríny mezi okamžikem nárazu a okamžikem dosažení konstantního průběhu zrychlení 0 g byla spočtena pomocí funkce *mean value* a je rovna $A_{k\text{-prumer}} = 8,48 \text{ g}$.

7.1.7. HIC (Head Injury Criterion)

Jedná se o nejčastěji používané kritérium pro posouzení poranění hlavy při testech vozidel. Vstupem jsou zrychlení měřená akcelerometry v těžišti hlavy figuríny v jednotkách g, algoritmem výpočtu je upravený integrál z výsledného zrychlení v určitém časovém intervalu. Výsledná hodnota HIC by neměla překročit hranici 1000. Tato hodnota vznikla historickým vývojem výzkumu poranění hlavy z hlediska působících zrychlení.

V této práci byla vypočtena pomocí následujícího vzorce:

$$HIC_{15} = (t_2 - t_1) \left(\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} A_R dt \right)^{2,5}$$

A_R Funkce výsledného zrychlení hlavy

t_1, t_2 Hraniční hodnoty intervalu [24]

Výsledná hodnota byla rovna $HIC_{15} = 666, 58$, přičemž se jednalo se o interval mezi $t_1 = 96,80 \text{ ms}$ a $t_2 = 11,80 \text{ ms}$ bezprostředně po nárazu.

Dle normy SAE J1727 - Calculation Guidelines for impact testing nebyla překročena hraniční hodnota $HIC_{15} = 1000$. [20]

7.1.8. Impact severity index

Impact Severity je index, který posuzuje závažnost nárazu vzhledem k zádržnému systému zkoušeného vozidla základě výsledků různých parametrů. Síla zásahu je rozdělena na 3 úrovně, od A do C, podle rostoucí závažnosti následků dopadu na uživatele.

V programu Diadem bylo toto kritérium vypočteno dle následujícího vzorce:

$$ASI = \left[\left(\frac{\hat{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\hat{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\hat{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right], \text{ kde}$$

$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ jsou příslušné prahové hodnoty zrychlení v jednotlivých osách z akcelerometru umístěného v přibližném těžišti karoserie vozidla.

$\ddot{a}_x, \ddot{a}_y, \ddot{a}_z$ jsou nejvyšší průměrná zrychlení v jednotlivých osách trvající 50 ms z akcelerometru umístěného v přibližném těžišti karoserie vozidla. [24]

Výsledná hodnota je rovna **ASI = 1,12**, což odpovídá úrovni prudkosti B dle následující tabulky [20]

Tabulka [8] Úrovně prudkosti nárazu

úrovně prudkosti nárazu			
úroveň	maximální dovolené hodnoty		
A	ASI ≤ 1,0	a	THIV ≤ 33 km/h
B	1,0 < ASI ≤ 1,4		
C	1,4 < ASI ≤ 1,9		

7.1.9. Kritérium 3ms pomocí funkce Xms

Hodnota Xms je nejvyšší amplituda měřeného signálu, který trvá x milisekund. Tato hodnota je určena buď jako jeden vrchol nebo jako více vrcholů. Při kumulativním výpočtu se sčítají oddělená období měřicího signálu, dokud se nedosáhne x-té milisekundy. [24]

Hodnota Xms může být vypočítána s jedním vrcholem nebo s několika vrcholy. [24]

Ve zvláštním případě, lze mít celkovou dobu i větší než daných x milisekund a to z toho důvodu, že časový úsek musí dosahovat alespoň x-té milisekundy, čehož lze však docílit až za lokálním minimem grafu a musí se tedy brát v potaz i celá druhá konkávní část grafu, tedy 4,5 sekundy. [24]

Při analýze předmětné nárazové zkoušky byla nejdříve vypočtena hodnota Xms pro hlavu figuríny zahrnující pouze jeden vrchol a časový interval byl zvolen 3 ms, jak je u běžných nárazových zkoušek zvykem. Výsledná hodnota je **Xms = 75,37 g** a interval byl mezi **t₁ = 95,05 ms** a **t₂ = 98,05 ms** bezprostředně po nárazu.

Dále byla vypočtena i hodnota Xms pro hlavu figuríny zahrnující všechny vrcholy při stejně zvoleném intervalu 3 ms. Tato hodnota je rovna **Xms = 81,13 g** a interval byl výpočtovým algoritmem rozšířen na **15,40 ms**, přičemž byl mezi **t₁ = 96,40 ms** a **t₂ = 111,80 ms** bezprostředně po nárazu.

7.1.10. Kritérium 3m pomocí funkce Xg

Pomocí této funkce bylo vypočteno kritérium 3ms pro poranění hrudníku. Toto kritérium říká, že kumulativní zrychlení větší než 60 g naměřené při zkoušce v oblasti hrudníku nesmí mít delší dobu trvání než 3 ms. [20]

Při analýze dat bylo zjištěno, že tato mezní hranici nebyla při zkoušce dosažena. Celkové zrychlení 60 g působilo na oblast hrudníku figuríny pouhých **1,54 ms** a to v intervalu **110, 23 ms** až **111,77 ms** bezprostředně po nárazu.

7.2. Popis výstupu a výsledek měření brzdných zkoušek

V této kapitole je uveden grafický výstup s výsledky měření vybraných brzdných zkoušek, konkrétně se jedná o brzdění z rychlosti 60 km/h při zátěži návěsu 12ti tunami písku s ABS (BZ60-2) a bez ABS (BV60) a také při plném výkonu brzd s prázdným návěsem (CZP60). Dále byly zvoleny průběhy brzdění z rychlosti 30 km/h a to při zátěži 12ti tunami písku (BV30) a bez této zátěže (CZP30). Všechny uvedené grafické výstupu jsou použity z akcelerometru umístěného na táhle návěsu Annaburger.

Vyhodnoceny a zpracovány však byly i všechny ostatní zkoušky a společně se zkouškami uvedenými byly použity ve studii Ústavu dopravních prostředků FD ČVUT v Praze pro analýzu týkající se komplexně brzdného systému zkoušeného návěsu.

Průběh akcelerace byl vždy vyhlazen pomocí funkce *Smooth* v programu Diadem společnosti National Instruments.

Parametr šířky při vyhlazení byl vždy nastaven na hodnotu 15ti bodů. Časem 0 s je v grafech vždy počátek náběhu brzdného účinku.

Pomocí funkce *Arithmetic mean* byly vypočteny průměrné hodnoty akcelerace u každého měření v době mezi začátkem a koncem brzdění.

Z údajů o průběžné zeměpisné délce a šířce při brzdné zkoušce byla pro každé měření vypočtena velikost brzdné dráhy dle následujících vztahů. [21]

$$a = \sin^2(\Delta \varphi / 2) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2(\Delta \lambda / 2)$$

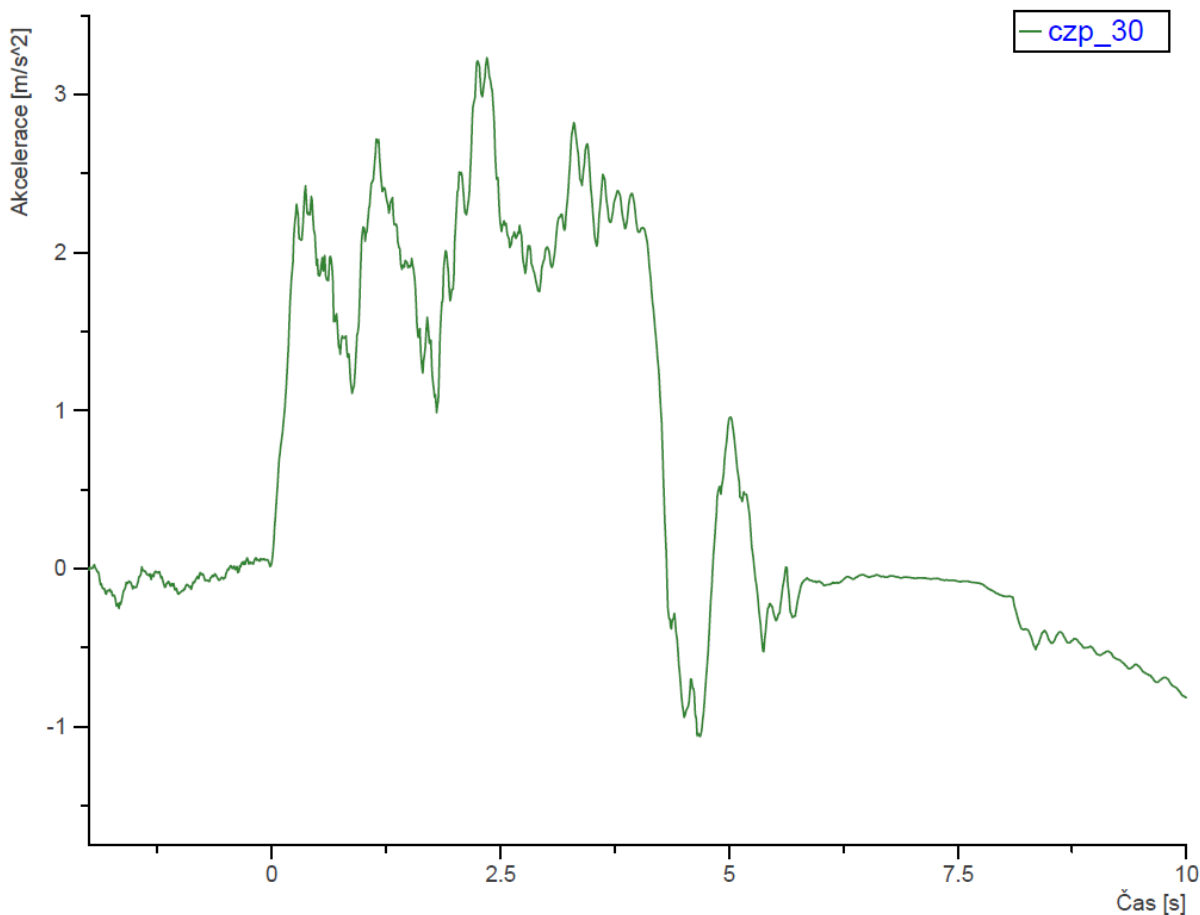
$$c = 2 \cdot \tan^{-1}(\sqrt{a} \cdot \sqrt{(1-a)})$$

$$d = R \cdot c$$

7.2.1. Měření CZP 30

Jedná se o brzdou zkoušku nezatíženého návěsu z rychlosti 30 km/h do úplného zastavení soupravy při plném výkonu brzd a zapnutém systému ABS.

Průběh akcelerace



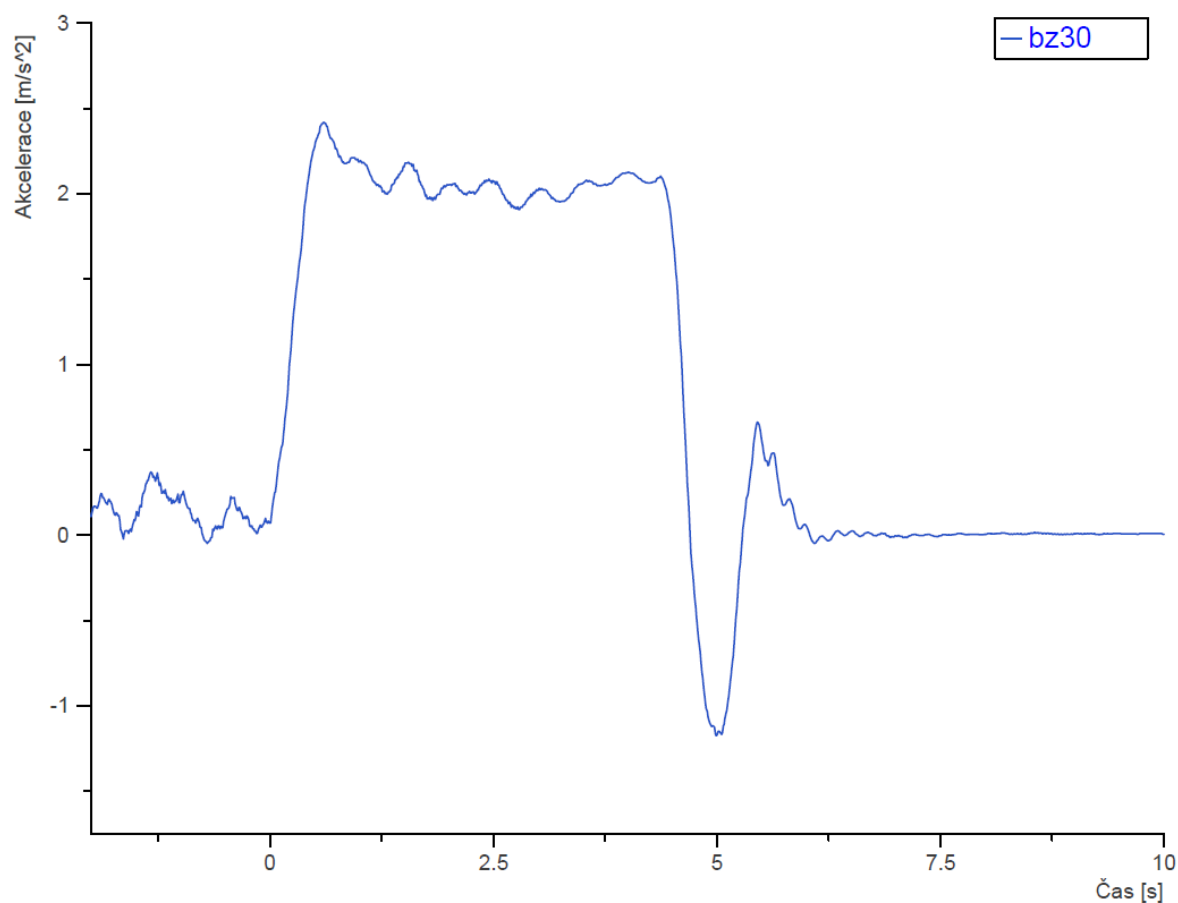
Graf [6] Průběh zrychlení při zkoušce CZP 30

- **Doba náběhu brzdného účinku:** 0,56 s
- **Průměrná hodnota akcelerace při brzdění:** 2,12 m/s^2
- **Brzdná dráha:** 21,76 m

7.2.2. Měření BZ 30

Jedná se o brzdou zkoušku zatíženého návěsu 12ti tunami písku z rychlosti 30 km/h do úplného zastavení soupravy při zapnutém systému ABS.

Průběh akcelerace



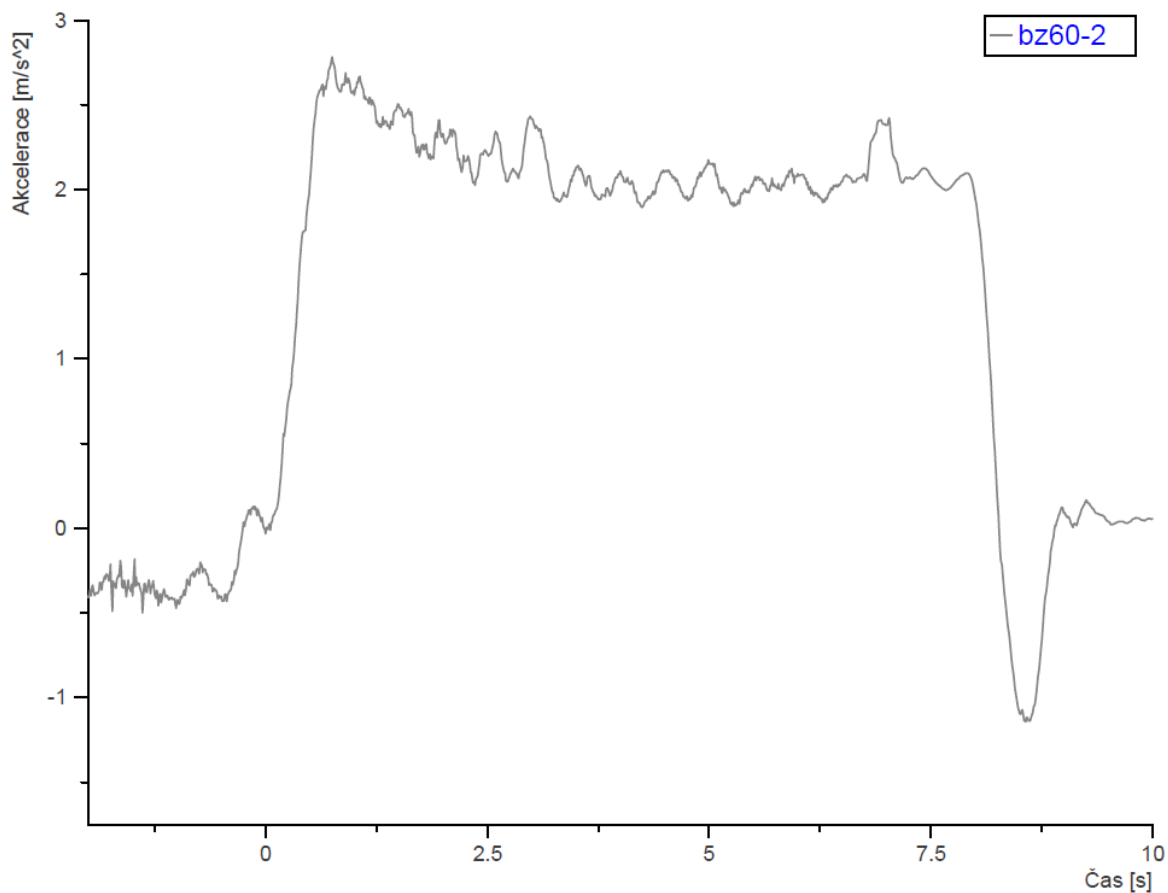
Graf [7] Průběh zrychlení při zkoušce BZ 30

- **Doba náběhu brzdného účinku:** 0,63 s
- **Průměrná hodnota akcelerace při brzdění:** 2,06 m/s^2
- **Brzdná dráha:** 22,15 m

7.2.3. Měření BZ 60-2

Jedná se o brzdou zkoušku zatíženého návěsu 12ti tunami písku z rychlosti 60 km/h do úplného zastavení soupravy při zapnutém systému ABS.

Průběh akcelerace



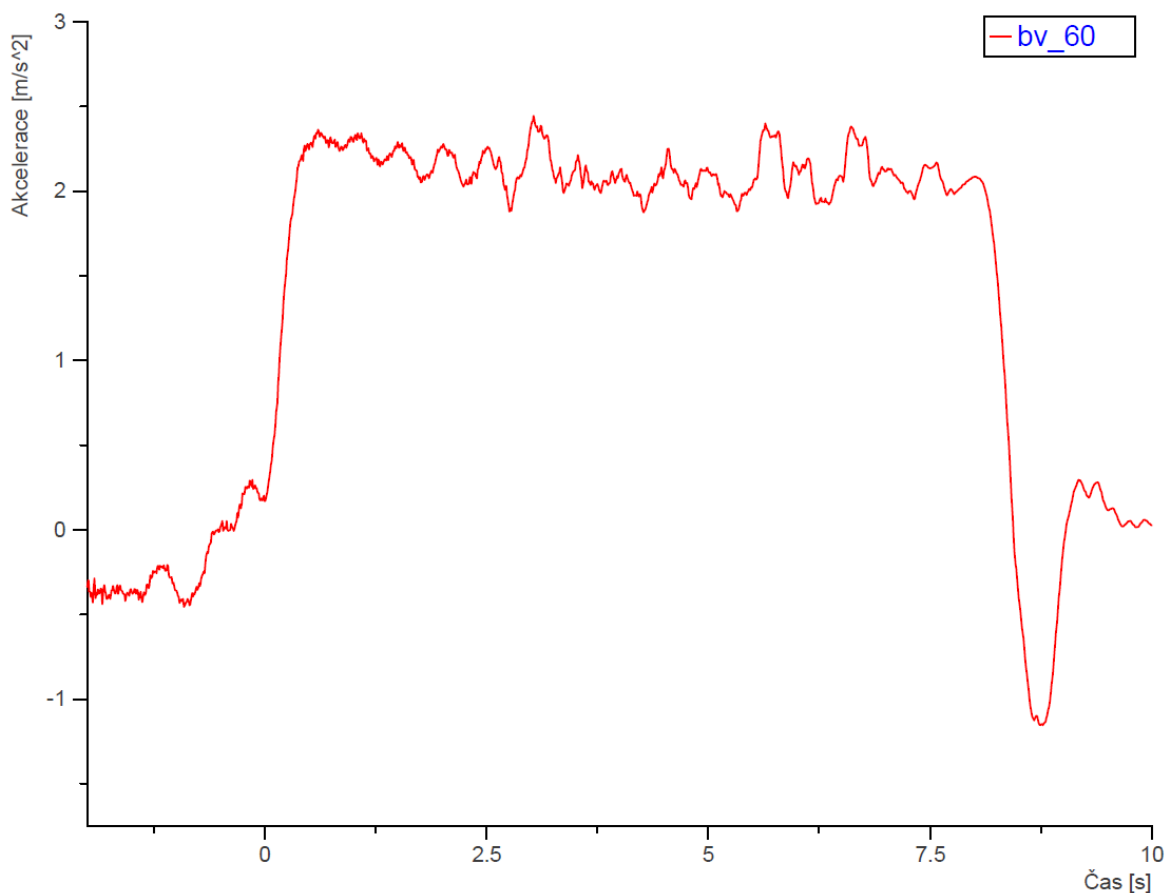
Graf [8] Průběh zrychlení při zkoušce BZ 60-2

- **Doba náběhu brzdného účinku:** 0,75 s
- **Průměrná hodnota akcelerace při brzdění:** 2,11 m/s^2
- **Brzdná dráha:** 95,21 m

7.2.4. Měření BV 60

Jedná se o brzdou zkoušku zatíženého návěsu 12 tunami písku z rychlosti 60 km/h do úplného zastavení soupravy při vypnutém systému ABS.

Průběh akcelerace



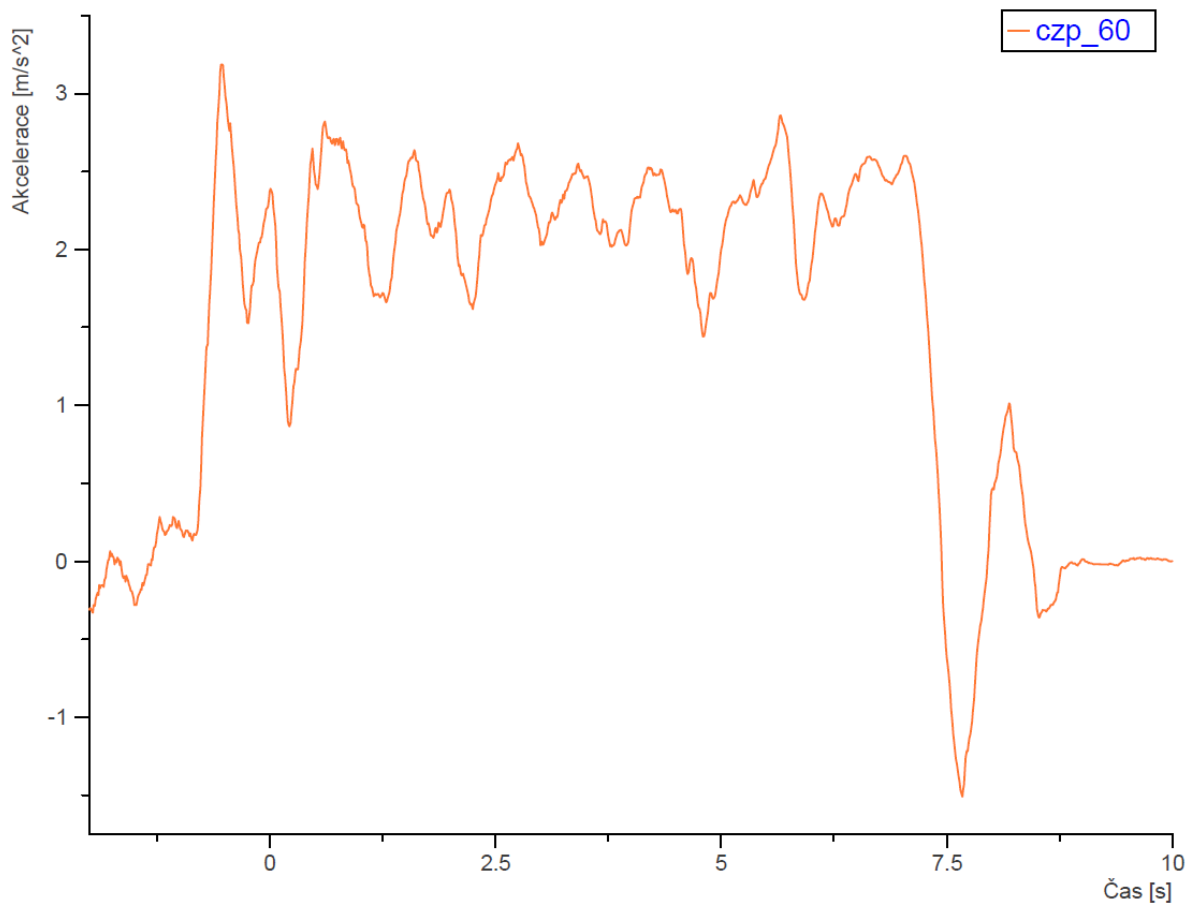
Graf [9] Průběh zrychlení při zkoušce BV 60

- **Doba náběhu brzdného účinku:** 0,59 s
- **Průměrná hodnota akcelerace při brzdění:** 2,23 m/s^2
- **Brzdná dráha:** 99,62 m

7.2.5. Měření CZP 60

Jedná se o brzdou zkoušku nezatíženého návěsu z rychlosti 60 km/h do úplného zastavení soupravy při plném výkonu brzd a zapnutém systému ABS.

Průběh akcelerace



Graf [10] Průběh zrychlení při zkoušce CZP 60

- **Doba náběhu brzdného účinku:** 0,41 s
- **Průměrná hodnota akcelerace při brzdění:** 2,17 m/s^2
- **Brzdná dráha:** 85,31 m

7.3. Zhodnocení výstupu měření brzdné zkoušky návěsu

Z grafického výstupu měřicího zařízení ve formě spojitě funkce průběhu zrychlení v čase šlo relativně spolehlivě vyvodit několik aspektů jednotlivých brzdění. V první řadě bylo možné z tvaru křivky poměrně přesně vyvodit časovou délku náběhu brzdného účinku, pro který byl charakteristický snadno identifikovatelný lineární úsek grafu. Pomocí funkce *Curve cursor* byly v programu NI Diadem zaměřeny počátky a konce tohoto úseku, a tak bylo možné se odklonit od skutečného počátku a konce náběhu jen maximálně v řádech setin sekundy.

Velkou nevýhodou bylo nevyužití brzdového triggeru pro získání údaje o přesném času kontaktu řidiče s brzdovým pedálem. Při znalosti této informace by bylo možné odvodit také časovou délku náběhu brzd. Avšak z důvodu technické náročnosti a nepravděpodobnosti triggeru spolehlivě zareagovat při každém z 31 měření, což způsobuje nutnost časové kontroly a záznamu případné nepřesnosti při každém měření, nebyl trigger použit.

Při srovnání grafického výstupu brzdění při zatížení nápravy 12ti tunami písku a brzdění při prázdném objemu návěsu lze vyzorovat významný rozdíl v průběhu zrychlení během brzdného účinku. Obecně při brzdění s nezatíženým návěsem docházelo k mnohem většímu kmitání soupravy, což způsobilo průběh prudkých změn v hodnotách zrychlení, zatímco průběh zrychlení během brzdění zatížené soupravy byl mnohem více ustálený a kmitání soupravy tudíž nebylo tak významné. Průměrná hodnota zrychlení se však nikterak významně neliší.

Dále je třeba zmínit, že bohužel nedošlo k naměření průběhu zrychlení při poměrně významné zkoušce CZP 40 a BV 30 a to z důvodu blíže nespecifikovatelného selhání měřicího zařízení.

8. Závěr

Cílem této práce, jak je již v úvodu zmíněné, bylo zejména zpracování teoretických poznatků o měřicích technologiích a analytických postupech aplikovaných při zkouškách jízdní a nárazové dynamiky. V průběhu získávání a zpracovávání těchto informací došlo zejména k významnému rozšíření mých vědomostí týkajících se této problematiky.

Praktická část této práce spočívala v názorné aplikaci měřicích technologií a metod při reálných zkouškách jízdní a nárazové dynamiky. Při zpětném pohledu lze říci, že touto částí jsem byl obohacen zejména o znalosti ohledně pracovních postupů při vykonávání nárazových a jízdních zkoušek a výrazně jsem si rozšířil obzory např. ohledně chodu zkušebny včetně veškerého vybavení a infrastruktury.

Nabytím těchto cenných zkušeností a znalostí jsem motivován se této problematice věnovat i nadále, zejména ve své diplomové práci. V té bych chtěl co nejvíce zanalyzovat vlastnosti, možnosti a použití již však konkrétních senzorů. Věnovat se podrobněji a prakticky charakteristice těchto senzorů a jejich signálu a vykonat řadu zkoušek jimiž bych onu charakteristiku analyzoval a prakticky ověřoval. Rád bych tak docílil ještě vyššího praktického přehledu ohledně práce s měřicí technikou a dokázal tak měřit s absolutní přesností a minimální chybovostí bez komplikací a závad a tímto se přiblížit k profesionálním standardům vývoje automobilového, železničního, či jiného průmyslového odvětví využívajícího dynamická měření.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Z. Malá, D. Nováková a T. Vítů. *Fyzika I*. Ed. Praha: ČVUT. Sv. 188 s. Praha: ČVUT, 2009.
- [2] TÜV SÜD Czech S.r.o.. tuv-sud.cz. *Automobilový průmysl*. [online]. Dostupné z: <https://www.tuv-sud.cz/cz-cz/odvetvi/automobilovy-prumysl/>
- [3] Euro NCAP. euroncap.com. *Safety campaigns*. [online]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/safety-campaigns/>
- [4] IIHS. iihs.org.. *About us*. [online]. ©1996-2018, Insurance Institute for Highway Safety, Highway Loss Data Institute. Dostupné z: <https://m.iihs.org/mobile/aboutus>
- [5] Euro NCAP. [Euroncap.com](http://euroncap.com). *About Euro NCAP. Timeline* [online]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/timeline/>
- [6] Euro NCAP. [Euroncap.com](http://euroncap.com). *About Euro NCAP. How to read the stars* [online]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/how-to-read-the-stars/>
- [7] Euro NCAP. [Euroncap.com](http://euroncap.com). *The ratings explained*. [online]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/>
- [8] Euro NCAP. [Euroncap.com](http://euroncap.com). *Offset Deformable Barrier Frontal Impact Test Protocol v7.1.2..* [PDF]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/32286/euro-ncap-frontal-odb-test-protocol-v712.pdf>
- [9] Euro NCAP. [Euroncap.com](http://euroncap.com). *Full Width Frontal Impact Test Protocol v1.0.4..* [PDF]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/32285/euro-ncap-frontal-fw-test-protocol-v104.pdf>
- [10] Euro NCAP. [Euroncap.com](http://euroncap.com). *Side Impact Mobile Deformable Barrier Test Protocol v7.1.3..* [PDF]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/32291/euro-ncap-side-protocol-ae-mdb-v713.pdf>
- [11] Euro NCAP. [Euroncap.com](http://euroncap.com).. *TB021 - Data acquisition and Injury Calculation v2.1.* [PDF]. © 2018 Euro NCAP. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/32293/tb-021-data-acquisition-and-injury-calculation-v21.pdf>
- [12] Jiří First a kol.. *Zkoušení Automobilů a motocyklů*. Ed. Praha: ČVUT. Praha: ČVUT, 2008.
- [13] Miláček, S.. *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. Ed. Praha: ČVUT. Praha: ČVUT 2001.
- [14] Fraden Jacob. *Handbook od modern senzors: physics, designs, and applications 3rd ed..* © 2004, 1996 Springer-Verlag New York, Inc.. New York: 2003.

- [15] Stanislav Daďo, Marcel Kreidl. *Senzory a měřicí obvody*. Ed. Praha: ČVUT. Praha: ČVUT 1996.
- [16] Pavel Řipka, Alois Típek. *Modern Sensors Handbook*. © ISTE Ltd, London UK: 2007.
- [17] *Bruel, Kjaer*. Nauerum, Dánsko. *Měření chvění*. Praha: 1984
- [18] Alžběta Lenková. Přednáška: *Dynamická měření v dopravě experimentální měření, záznam a zpracování signálů*. [PDF]. ČVUT FD: Praha: 2016.
- [19] Suminto, J.T. A simple, High performance piezoresistive accelerometer. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. *Digest of Technical Papers*. IEEE, New York: 1991.
- [20] Calculation Guidelines for Impact Testing. *Norma SAE J1727*. 2015.
- [21] Richard Čapek. *Planetární geografie*. Karolinum. Praha: 1962.
- [22] Dewesoft. Krypton Manual V.1.1.1.
- [23] Xsens. MTi and MTx User Manual and Technical Documentation.
- [24] Measured data processing vehicle safety workgroup. D.Cichos, M. Otto, TÜV Rheinland, S. Zolsch, National Instruments, S. Clausnitzer, D. Vetter, IAT, G. Pfeiffer, Porsche, Task Force. *Crash Analysis Criteria Description*. © 1995-2017 Workgroup Data Processing Vehicle Safety. Bergisch Gladbach, Germany: 2017.

Seznam obrázků

Obr. [1] Renault Laguna při čelním nárazu v roce 2001 (Euroncap.com,2001)	13
Obr. [2] Znárodnění čelního nárazu do deformovatelné překážky s překrytím 40% (Euroncap.com, 2018)	16
Obr. [3] Znárodnění čelního nárazu do nedeformovatelné překážky s překrytím 100 % (Euroncap.com, 2018).	17
Obr. [4] Znárodnění bočního nárazu vozíku s deformovatelnou bariérou do zkoušeného vozidla. (Euroncap.com, 2018)	18
Obr. [5] Příklad nárazové zkoušky pro ochranu chodců, konkrétně průběh testu úrazu hlavy chodce při střetu s vozidlem jedoucím rychlostí 40 km/h. (Euroncap.com, 2018).....	18
Obr. [6] Schéma komplexního senzoru (Fraden Jacob, 2003)	33
Obr. [7] Příklad vícerozměrové přenosové funkce, konkrétně senzoru snímajícího infračervené záření (Fraden Jacob, 2003)	35
Obr. [8] Vztah ideální a přenosové funkce společně s limity přesnosti. (Fraden Jacob, 2003)	35
Obr. [9] Příklad možné hystereze pozorované na výstupu senzoru. (Fraden Jacob, 2003) ..	37
Obr. [10] Příklad lineární aproximace nelineární přenosové funkce. (Fraden Jacob, 2003) ..	38
Obr. [11] Saturace při vyšších hodnotách na vstupu senzoru. (Fraden Jacob, 2003)	39
Obr. [12] Chyba opakovatelnosti hodnot (Fraden Jacob, 2003).....	40
Obr. [13] Dead band, neboli mrtvé pásmo v nulové oblasti (Fraden Jacob, 2003).....	40
Obr. [14] Paralelní zapojení se zdrojem vstupního signálu. (Fraden Jacob, 2003)	41
Obr. [15] Sériové zapojení se zdrojem vstupního signálu. (Fraden Jacob, 2003)	42
Obr. [16] Akcelerometr značky Kistler, hojně používané při nárazových zkouškách (Kistler, 2015)	44
Obr. [17] Schéma základního principu konstrukce akcelerometru (Lenková, 2016).....	45
Obr. [18] Vyobrazení principu piezoelektrického jevu (rfwireless-world.com).....	46
Obr. [19] Základní struktura piezoelektrického akcelerometru. (Homel.vsb.cz)	47
Obr. [21] Konstrukce piezoelektrického akcelerometru s kompresním módem. (Bruel, Kjaer, 1984)	48
Obr. [22] Schéma piezoelektrického akcelerometru v ohybovém módu (Bruel, Kjaer, 1984).	49
Obr. [23] Schéma konstrukce piezorezistivního akcelerometru. (micro.feld.cvut.cz).....	50
Obr. [24] Schéma konstrukce kapacitního akcelerometru. (automatizace.cz).....	50
Obr. [25] Schéma konstrukce tepelného akcelerometru (Fraden Jacob, 2003).	51
Obr. [26] Schéma obloukového kapacitního tenzometru.(Dado, Kreidl, 1996)	52

Obr. [27] Schéma diferenciálního koaxiálního kapacitního tenzometru. (Daďo, Kreidl, 1996)	52
Obr. [28] Schéma tenzometru založeného na principu extenzometru. (Daďo, Kreidl, 1996).	53
Obr. [29] Schéma strunového tenzometru (Daďo, Kreidl, 1996)	54
Obr. [30] Schéma tenzometru s metastabilní magnetickou slitinou (Daďo, Kreidl, 1996)	55
Obr. [31] Přenosová funkce tenzometru s metastabilní magnetickou slitinou (Daďo, Kreidl, 1996).	55
Obr. [32] Schéma odporového tenzometru (Daďo, Kreidl, 1996)	57
Obr. [33] Rozdělení odporových tenzometrů (Daďo, Kreidl, 1996)	57
Obr. [34] Schéma obvodu odporového senzoru polohy s pohyblivým jezdcem (Řípka, Típek, 2007)	58
Obr. [35] Princip úhlového potenciometru. (Řípka, Típek, 2007)	58
Obr. [36] Příklad lankových senzorů. (Řípka, Típek, 2007)	59
Obr. [37] Princip gyroskopu (urel.feec.vutbr.cz)	60
Obr. [38] Datová ústředna Krypton 3xSTG (Dewesoft.com)	63
Obr. [39] Umístění akcelerometru v těžišti vozidla. (Jankovič, 2018)	64
Obr. [40] Umístění pásového siloměru (Jankovič, 2018)	64
Obr. [41] Umístění lankového potenciometru. (Jankovič, 2018)	65
Obr. [42] Usazení dětské figuríny. (Jankovič, 2018)	66
Obr. [43] Pohled na vozidlo před zkouškou (Jankovič, 2018)	67
Obr. [44] Vozidlo těsně před nárazem do deformovatelné bariéry. (Jankovič, 2018)	68
Obr. [45] Stav vozidla po nárazu (Jankovič, 2018)	69
Obr. [46] Sdružený snímač Xsens Mti-G (xsens.com)	71
Obr. [47] Tahač Iveco s návěsem Annaburger (Mík, 2018)	74

Seznam tabulek

Tabulka [1] Instrumentace figuríny pro čelní náraz s překrytím 40%	19
Tabulka [2] Instrumentace vozidla pro čelní náraz s překrytím 40 %	20
Tabulka [3] Instrumentace figuríny pro čelní náraz s překrytím 100 %	21
Tabulka [4] Instrumentace vozidla pro čelní náraz s překrytím 100 %	21
Tabulka [5] Instrumentace figuríny pro boční náraz.....	22
Tabulka [6] Instrumentace vozidla pro boční náraz	22
Tabulka [7] Instrumentace vozíku pro boční náraz.....	22
Tabulka [8] Úrovně prudkosti nárazu	84

Seznam grafů

Graf [1] Průběh zrychlení karoserie.....	77
Graf [2] Průběh zrychlení hlavy figuríny	78
Graf [3] Průběh zrychlení hrudníku figuríny	79
Graf [4] Průběh změny polohy figuríny	80
Graf [5] Průběh síly působící v bezpečnostním pásu	81
Graf [6] Průběh zrychlení při zkoušce CZP 30	86
Graf [7] Průběh zrychlení při zkoušce BZ 30	87
Graf [8] Průběh zrychlení při zkoušce BZ 60-2.....	88
Graf [9] Průběh zrychlení při zkoušce BV 60.....	89
Graf [10] Průběh zrychlení při zkoušce CZP 60	90