

# Laboratorní soustava aktivního tlumení

## Laboratory Plant Active Suspension

Lukáš Náčinák

---

Bakalářská práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš Náčinák**  
Osobní číslo: **A20551**  
Studijní program: **B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci**  
Specializace: **Průmyslová automatizace**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Laboratorní soustava aktivního tlumení**  
Téma práce anglicky: **A Laboratory-Scale Active Suppression System**

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši zabývající se systémem aktivního tlumení a možnostmi jeho praktického použití.
2. Uvedte přehled základních typů statických a dynamických charakteristik.
3. Podrobně popište laboratorní soustavu aktivního tlumení (Active Suspension) od firmy Quanser, která je dostupná v laboratoři reálných modelů FAI UTB ve Zlíně.
4. Detailně změřte statické a dynamické charakteristiky soustavy aktivního tlumení.
5. Na základě měření vytvořte lineární a případně i nelineární model soustavy aktivního tlumení.
6. Navrhňte zadání laboratorní úlohy zabývající se laboratorní soustavou „Active Suspension“, které bude cíleno na studenty bakalářského stupně.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.
2. BOBÁL, Vladimír. *Digital self-tuning controllers: algorithms, implementation and applications*. London: Springer, c2005, xvi, 317 s. Advanced textbooks in control and signal processing. ISBN 1-85233-980-2.
3. NAVRÁTIL, Pavel. *Automatizace: vybrané statě*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 289 s. ISBN 978-80-7318-935-8. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/18581>
4. APKARIAN, Jacob, ABDOSALAMI, Amin. Laboratory guide Active Suspension Experiment for MATLAB /Simulink Users In: *Qanser* [online]. [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://quanserinc.box.com/shared/static/65tv2urk3h0w4a7maoh550e9ucmamuj2.zip>
5. WEICHAO, Sun, Gao HUIJUN a Shi PENG. *Advanced Control for Vehicle Active Suspension Systems*. 1. Springer Nature Switzerland, 2020. ISBN 978-3-030-15785-2.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Chalupa, Ph.D.**  
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **16. prosince 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2023**

**doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.**  
děkan



**prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 12. prosince 2022

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnaní případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 17.05.2023

Lukáš Náčinák, v.r.

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca sa zaoberá systémom aktívneho tlmenia a je reprezentovaná laboratórnou sústavou. V teoretickej časti je popísané aktívne tlmenie s jeho rozdelením a funkciami, základné rozdelenie statických a dynamických charakteristík, ktoré slúžia na popis správania systémov alebo zariadení v závislosti na vstupnom signáli a popis laboratórnej sústavy aktívneho tlmenia. Praktická časť je venovaná statickým a dynamickým charakteristikám, ktoré sú merané na laboratórnej sústave, lineárnym modelom vytvorených na základe meraní, veľkosti trenia, ktoré predstavuje minimálny akčný zásah, pri ktorom sa sústava pohne a návrhu zadania laboratórnej úlohy, ktorá je cielená pre študentov bakalárskeho štúdia odboru priemyselnej automatizácie. Súčasťou práce je spomínané zadanie a jeho vzorový protokol.

**Kľúčové slová:** Aktívne tlmenie, laboratórna sústava, statická charakteristika, dynamická charakteristika

## **ABSTRACT**

This Bachelor thesis deals with an active suspension system and is represented by a laboratory system. The theoretical part describes active suspension with its distribution and functions, the primary distribution of static and dynamic characteristics used to describe the behavior of systems or devices depending on the input signal, and a description of the laboratory active suspension system. The practical part is devoted to the static and dynamic characteristics that are measured on the laboratory system. The linear models created based on the measurements, the magnitude of the friction that represents the minimum action at which the system moves and the design of the laboratory assignment, which is targeted for students of the Bachelor degree of Industrial Automation program. The assignment above and its sample protocol are part of the thesis.

**Keywords:** Active suspension, laboratory system, static characteristic, dynamic characteristic

Na tomto mieste by som chcel poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce pánovi Ing. Petru Chalupovi, Ph.D., nielen za jeho odbornú pomoc a cenné rady, ale aj za čas, ktorý mi venoval v priebehu riešenia mojej bakalárskej práce.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia bakalárskej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>I TEORETICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>8</b>
<b>1 SYSTÉM AKTÍVNEHO TLMENIA</b> .....	<b>9</b>
1.1 ROZDELENIE SYSTÉMU AKTÍVNEHO TLMENIA.....	10
1.1.1 Aktívne tmenie .....	10
1.1.2 Polo aktívne tmenie.....	10
1.1.3 Plne aktívne tmenie .....	11
1.1.4 Hydraulické alebo pneumatické aktívne tmenie .....	12
1.1.5 Elektromagnetické aktívne tmenie .....	13
1.1.6 EDFC aktívne tmenie (Tein).....	14
1.2 FUNKCIE SYSTÉMU AKTÍVNEHO TLMENIA.....	15
1.2.1 Ovládanie jazdy.....	15
1.2.2 Regulácia výšky .....	16
1.2.3 Ovládanie priečneho nakláňania .....	16
1.2.4 Kontrola náklonu.....	16
1.2.5 Kontrola stúpania .....	16
1.2.6 Držanie na ceste .....	17
<b>2 STATICKÁ A DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA</b> .....	<b>18</b>
2.1 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA .....	18
2.1.1 Lineárny systém .....	18
2.1.2 Nelineárny systém .....	18
2.2 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA .....	19
2.2.1 Tvary dynamickej charakteristiky.....	19
2.2.2 Prechodová funkcia a charakteristika.....	20
2.2.3 Impulzná funkcia a charakteristika .....	21
2.2.4 Frekvenčná funkcia a charakteristika.....	21
<b>3 LABORATÓRNA SÚSTAVA ACTIVE SUSPENSION</b> .....	<b>23</b>
3.1 SYSTÉMOVÉ ŠPECIFIKÁCIE.....	25
<b>II PRAKTICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>27</b>
<b>4 STATICKE A DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY</b> .....	<b>28</b>
4.1 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA SYSTÉMU .....	28
4.1.1 Meranie aplikované na plošine a motore Road .....	28
4.1.2 Meranie aplikované na plošine a motore Vehicle .....	33
4.2 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA SYSTÉMU.....	36
4.2.1 Meranie aplikované na plošine a motore Road .....	37
4.2.2 Meranie aplikované na plošine a motore Vehicle .....	39
<b>5 LINEÁRNY A NELINEÁRNY MODEL SÚSTAVY</b> .....	<b>41</b>
5.1 LINEÁRNY MODEL .....	41

5.1.1	Identifikácia aplikovaná na plošine a motore Road .....	41
5.1.2	Identifikácia aplikovaná na plošine a motore Vehicle .....	43
5.2	NELINEÁRNY MODEL .....	45
5.2.1	Nelineárny model motora Road .....	45
5.2.2	Nelineárny model motora Vehicle .....	46
<b>6</b>	<b>ZADANIE LABORATÓRNEJ ÚLOHY.....</b>	<b>47</b>
6.1	ZADANIE .....	47
	<b>ZÁVER .....</b>	<b>49</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>53</b>
	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>54</b>
	<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>55</b>
	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>56</b>



## ÚVOD

Aktívne tlmenie je pokročilá technológia, ktorá zaujme každého milovníka komfortu. Jeho princíp zahŕňa použitie senzorov na zaznamenávanie vibrácií a nežiadúcich pohybov, spracovanie týchto dát a generovanie odpovedajúcich signálov na riadenie tlmiča. To umožňuje rýchle a presné prispôsobenie tlmenia automobilu v reálnom čase podľa konkrétnej situácie a požiadaviek. Avšak okrem automobilov môžeme aktívne tlmenie nájsť aj v leteectve, stavebníctve, elektronike, domácnosti a ďalších. V týchto oblastiach sa používa na minimalizáciu vibrácií, zlepšenie stability, zvýšenie komfortu, ochranu a zlepšenie celkovej výkonnosti systému.

V súčasnej dobe nie sú všetky autá vybavené aktívnym tlmením. Aj keď aktívne tlmenie je pokročilá technológia, ktorá sa používa v niektorých moderných a luxusných vozidlách, nie je štandardnou výbavou každého automobilu. Je často prítomné vo vozidlách vyššej triedy alebo špičkových modeloch rôznych značiek. Môže sa to líšiť podľa výrobcu a modelu vozidla. Niektoré automobilové značky môžu ponúkať aktívne tlmenie ako súčasť určitých výbavových balíkov alebo možnosť ako doplnkovú výbavu, ktorú si môžete zvoliť pri konfigurácii vozidla. Jeho výhodou je, že umožňuje jazdcom nastaviť preferovaný režim tlmenia, či už ide o športový, komfortný alebo ekonomický režim. To poskytuje väčšiu prispôbitelnosť a komfort jazdy pre jednotlivých vodičov.

Aktuálny trh nám ponúka veľké množstvo odvetví, kde sa dá aktívne tlmenie aplikovať. V tejto bakalárskej práci sa zoznámime s aktívnym tlmením aplikovaným na aute, respektíve s laboratórnou sústavou aktívneho tlmenia vyrobenou spoločnosťou Quanser, ktorá je v súčasnosti svetovým lídrom v oblasti navrhovania a výroby prepracovaných produktov, ktoré zmenili spôsob, akým pedagógovia vyučujú teóriu, aplikáciu a implementáciu riadenia, robotiky a mechatroniky.

V teoretickej časti práce je opísaný systém aktívneho tlmenia s jeho rozdelením a funkciami. Ďalej sú opísané základné typy statických a dynamických charakteristík systému a na konci teoretickej časti je opísaná laboratórna sústava aktívneho tlmenia, ktorá je hlavnou témou tejto bakalárskej práce.

Praktická časť práce pozostáva zo statických a dynamických charakteristík systému, z ktorých sa následne vytvoril lineárny a nelineárny model a na koniec sa na sústave navrhli úlohy, ktoré sú cieľené na študentov bakalárskeho stupňa.

## **I. TEORETICKÁ ČASŤ**

## 1 SYSTÉM AKTÍVNEHO TLMENIA

Tlmiace zložky vozidla (tlmič) izolujú karosériu od rušivých vplyvov vozovky, čím sa udržuje správna kontrola polohy karosérie vozidla, a to nám zabezpečuje pohodlnú jazdu. Systémy tlmenia sa za posledných sto rokov vyvinuli na veľmi vysokú úroveň. Zložité kinematické konfigurácie sa navrhli tak, aby bola dosiahnutá rovnováha medzi zložitými funkciami, ktoré má tlmenie plniť. Väčšina pasívnych systémov tlmenia využíva pružiny v kombinácii s hydraulickým alebo pneumatickým tlmičom. Všeobecne je známe, že pasívne tlmenie má obmedzený výkon, pretože jeho komponenty dokážu iba uchovávať alebo rozptyľovať energiu. To znamená, že nedokážu naplniť požiadavky pre pohodlie a ovládateľnosť v premenlivých podmienkach, ktoré sa môžu vyskytnúť na ceste. Myšlienka pridania aktívnych prvkov sa zaviedla s cieľom zlepšenia ovládateľnosti vozidla a jeho jazdného komfortu. Koncepcia aktívneho tlmenia bola predložená v 50. rokoch 20. storočia. [1]

Aktívne tlmenie sa za posledných niekoľko desaťročí výrazne zlepšilo v oblasti výskumu dynamiky vozidiel, pretože sa porovnávalo s veľa inými tmeniami, s cieľom zlepšenia systému. Tento systém sa v súčasnosti zavádza v oblastiach ako sú osobné automobily, nákladné vozidlá, dopravné autobusy, vojenské vozidlá a iné typy, ktoré zahŕňajú terénne vozidlá. Ide vlastne o zabránenie alebo eliminovanie nakláňania karosérie vozidla. Týmto zavedením dokážeme výrazne zvyšovať rýchlosť v zákrutách, zvyšovať alebo znižovať jazdnú výšku vozidla a celkovo poskytnúť výrazne lepší jazdný komfort. [2]

Hlavnou požiadavkou na tlmenie vozidla je umožniť vozidlu v pohybe udržať všetky kolesá v primeranom kontakte s povrchom vozovky. Ďalšou alebo sekundárnou požiadavkou je minimalizácia účinkov nárazov a vibrácií na samotné vozidlo a jeho komponenty. Aktívne tlmenie je typ tlmenia, pri ktorom sa na riadenie pohybu kolies vozidla vzhľadom na podvozok používa palubný systém. Čiže prakticky eliminuje odchýlky v náklone od mnohých jazdných situácií ako sú zrýchľovanie, zatáčanie a brzdenie. V súčasnosti sa každá výrobná spoločnosť sústreďuje na implementáciu aktívneho tlmenia pri nízkych nákladoch, pretože na trhu sa nachádza veľa náhradných dielov (aftermarket), ktoré umožňujú implementáciu aktívneho tlmenia za nižšiu cenu. Súčasným trendom v automobilovom priemysle je prechod na plne elektrické vozidlá. Účinnosť elektrického pohonu je najlepšia, keď je plne implementovaná a zabudovaná do kolesa. Z toho vyplýva, že potreba aktívneho tlmenia sa zvyšuje a je potrebné ho integrovať do automobilov. Niektoré z týchto systémov nemôžu úplne vyriešiť problémy s výkyvmi automobilov, pretože tieto systémy tlmenia sú

veľmi nákladné. Výrobcovia automobilov súťažia medzi sebou v oblasti komfortných jazdných vlastností a poskytovania najlepšej stability pri brzdení a zatáčaní. Pri pasívnom tlmení sa poskytuje len uvedená vlastnosť alebo neposkytuje maximálnu úroveň ovládateľnosti a komfortu jazdy. Preto výskumníci navrhli a našli mnoho systémov aktívneho tlmenia z teoretického a experimentálneho hľadiska. [2]

## 1.1 Rozdelenie systému aktívneho tlmenia

Systém aktívneho tlmenia môžeme rozdeliť na systém aktívneho tlmenia, polo aktívneho tlmenia, plne aktívneho tlmenia, hydraulického, pneumatického, elektromagnetického aktívneho tlmenia a EDFC aktívne tlmenie. [2]

### 1.1.1 Aktívne tlmenie

Aktívne tlmenie môžeme poznať aj pod názvom dokonalé tlmenie. Je to tlmenie využívajúce palubný počítač na riadenie vertikálneho a horizontálneho pohybu karosérie vozidla vzhľadom na podvozok a kolesá vozidla. Využíva hydraulické alebo pneumatické akčné členy na zdvíhanie a spúšťanie rámu každého jednotlivého kolesa v závislosti od podmienok na ceste. Plne aktívne systémy tlmenia sú založené na činnosti akčných členov. Princíp používaný v aktívnom odpružení sa nazýva teória skyhook. Hovorí sa v nej o tom, že ideálne tlmenie by umožnilo vozidlu udržiavať akúsi stabilnú polohu, ktorá predstavuje pomyselný hák na oblohe a nie je ovplyvnené podmienkami na ceste. Táto teória nie je prakticky možná, ale je možné ju využiť pri návrhu systému tlmenia.

Aktívne tlmenie sa delí na dve časti:

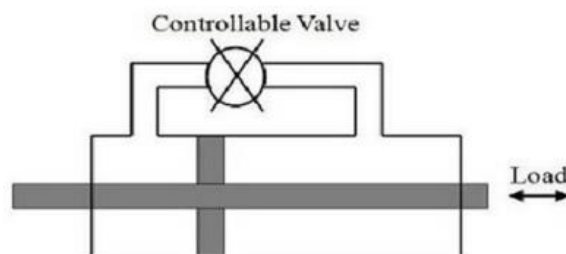
1. Plne aktívne tlmenia
2. Adaptívne alebo polo aktívne tlmenie

Tieto tlmenia sa tiež rozdeľujú na rôzne typy podľa spôsobu aktivácie tlmenia. Adaptívne tlmenie mení iba tvrdosť tlmičov podľa meniaceho sa stavu vozovky, ale aktívne tlmenie využíva akčné členy, ktoré sú ovládané hydraulicky, pneumaticky alebo elektromagneticky. Pri elektromagneticky ovládaných akčných členoch sa nezávisle na každom kolese zdvíha alebo spúšťa podvozok. [2]

### 1.1.2 Polo aktívne tlmenie

Polo aktívne tlmenie upravuje a modifikuje tlmenie v reálnom čase na základe podmienok na ceste a dynamiky vozidla. Polo aktívne tlmenie využíva rôzne typy rozptyľovačov a má

časovú odozvu kratšiu ako aktívne tlmenie o pár milisekúnd. Tlmenie využíva aj variabilnú zložku tlmičov v odpružení automobilu. Je podobné pasívnemu systému tlmenia s jedným rozdielom, a to, že má premenlivý koeficient tlmenia, ale stále pevnú konštantu tlmenia a tiež zaostáva v aktívnych zdrojoch sily. Dá sa prepínať elektronicky alebo diaľkovo, aby sa systém pritvrdil alebo zmäkčil a aby sa koeficient tlmenia menil priebežne alebo prerušovane. Keď je tlmenie tuhé, tak sa zvyšuje schopnosť vozidla prechádzať zákrutami, brzdiť, zrýchľovať a znižovať nízko-frekvenčnú odozvu voči zotrvačným silám, ktorými sú sklon a natočenie. Zabraňuje tiež rezonanciám kolies a rozkmitaniu karosérie. Tu sa používa dvojrúrovňový viskózný tlmič a koeficient tlmenia možno meniť zmenou priemeru otvoru v uložení piestového valca. [2]



Obr. 1 Viskózný tlmič [2]

Na tomto obrázku je viskózný tlmič vybavený nastavením piestového valca s regulačným ventilom otvoru pre riadenie prietoku oleja. Na strane zaťaženia sú umiestnené kolesá vozidla. Priemer otvoru umožňuje reguláciu prietoku oleja v zostave piestového valca. Tento systém sa môže ovládať ručne alebo pomocou akčných členov. Hlavnou súčasťou tohto systému je regulačný ventil. Tento polo aktívny systém umožňuje len eliminovať vertikálne pohyby kolies tvorené povrchom vozovky. Keď sa piest začne pohybovať vo valci, tak kvapalina začne prúdiť cez otvor. Keď je otvor väčší, poskytuje menší rozptylový odpor, a keď je otvor menší, tak poskytuje zvýšený rozptylový odpor. [2]

### 1.1.3 Plne aktívne tlmenie

Plne aktívne tlmenie funguje na báze akčných členov. Tieto typy systémov sú schopné lepšie odolávať axiálnym silám, ktoré vznikajú v dôsledku nepredvídateľných zmien na vstupe na cestu, spôsobených nárazmi a pružinami v kombinácii s hnacími silami. Tento systém sa môže riadiť prostredníctvom rôznych typov regulátorov na základe konštrukcie. Ak je aktívne tlmenie vybavené správnymi metódami riadenia, môže viesť k najlepšiemu jazdnému komfortu vozidla a stabilite ovládania na ceste, a tým k celkovému zlepšeniu konštrukcie tlmenia. [2]

Plne aktívne tlmenie sa klasifikuje na:

1. Hydraulické alebo pneumatické
2. Elektromagnetické

#### **1.1.4 Hydraulické alebo pneumatické aktívne tlmenie**

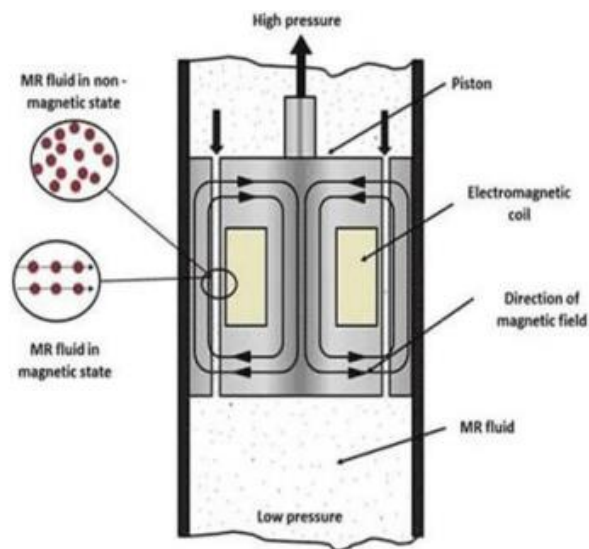
Systémy aktívneho tlmenia s hydraulickými alebo pneumatickými pohonmi sú riadené prostredníctvom elektrických pohonov. Pri hydraulickom alebo pneumatickom aktívnom tlmení sú akčné členy riadené alebo pracujú prostredníctvom elektrických pohonov a energia potrebná na prácu akčných členov je dodávaná z batérového zdroja alebo z bežného spaľovacieho motora. Vzhľadom na jednoduchosť, vysokú intenzitu sily, spoľahlivosť, technológiu a dostupnosť dielov sa viac používa hydraulický systém. BMW a Audi nedávno vyvinuli nové hydraulické tlmenia. BMW vyvinulo systém regulácie proti prevráteniu vozidla namontovaním hydraulického rotačného akčného člena na zadnú časť nápravy proti prevráteniu vozidla. AUDI vyvinulo plne hydraulické aktívne tlmenie nazývané dynamické riadenie jazdy, kde eliminuje nakláňanie vozidla. Boli vyvinuté aj ďalšie rôzne typy hydraulického aktívneho tlmenia výrobcami ako sú napríklad Lotus a Nissan. [2]

Aktívne tlmenie od výrobcu Lotus opisuje systém piestového valca s pružinou, ktorý využíva priame prepojenie dvojčinného valca a regulačného ventilu s vysokou odozvou. Tento systém umožňuje rýchlu odozvu a absorbovanie vibračných vstupov s vysokou reguláciou. Systém pozostáva z niekoľkých komponentov vrátane snímača zdvihu, ktorý zaznamenáva zdvihy pri vertikálnom pohybe kolesa vozidla, akcelerometra na meranie zrýchlenia telesa a gyroskopu pre meranie rotácie. Taktiež obsahuje snímač zaťaženia, ktorý je umiestnený na vrchole tlmiča na meranie zaťaženia preberaného vozidlom. Regulačný ventil reguluje prietok oleja podľa koeficientu tlmenia potrebného pre vozidlo v rôznych podmienkach na ceste. Celkový systém je optimalizovaný pre rýchlu odozvu a vysokú reguláciu, aby poskytoval pohodlnú a stabilnú jazdu. [2]

Aktívne tlmenie od výrobcu Nissan opisuje systém vyznačujúci sa veľkou spotrebou energie, najmä na nerovnom povrchu vozovky. Systém má odpružený piest, ktorý reaguje na zmeny spätného tlaku, aby riadil otváranie ventilu. Na pieste sa nachádza drážka, ktorá umožňuje prietok oleja. V porovnaní s Lotusom ide o pokročilé odpruženie, ktoré umožňuje efektívnejšie a pohodlnejšie riadenie vozidla. [2]

### 1.1.5 Elektromagnetické aktívne tlmenie

Elektromagnetické aktívne tlmenie je moderný systém tlmenia vozidla, ktorý sa skladá z dvoch častí: tlmenej hmoty (karosérie vozidla) a netlmenej hmoty (kolesa). Tento systém využíva elektromagnetické akčné členy, ktoré sú riadené elektronickými systémami a slúžia na tlmenie nárazov pri jazde po ceste. Elektromagnetické tlmenie je kombináciou elektromagnetu a hydraulického pohonu. Oproti tradičnému hydraulickému tlmeniu má elektromagnetické tlmenie lepšie riadené sily, ktoré dokážu rýchlejšie absorbovať nárazy a minimalizovať pohyby sklonu a nakláňania, čím zlepšujú pohodlie a bezpečnosť jazdy. Elektromagnetické tlmenie má tiež výrazne lepšiu účinnosť akčného člena a dynamické správanie, čo vedie k lepšiemu tlmeniu vozidla. Aktívne tlmenie elektromagnetického typu zabezpečuje ochranu proti nakláňaniu a zvyšuje stabilitu vozidla. Na druhej strane, elektromagnetické tlmenie je drahšie a zväčšuje objem a zaťaženie vozidla, čo môže byť jeho nevýhodou. Celkovo však elektromagnetické aktívne tlmenie predstavuje výrazný krok vpred v oblasti technológií tlmenia a má potenciál zlepšiť zážitok z jazdy pre cestujúcich. [2]



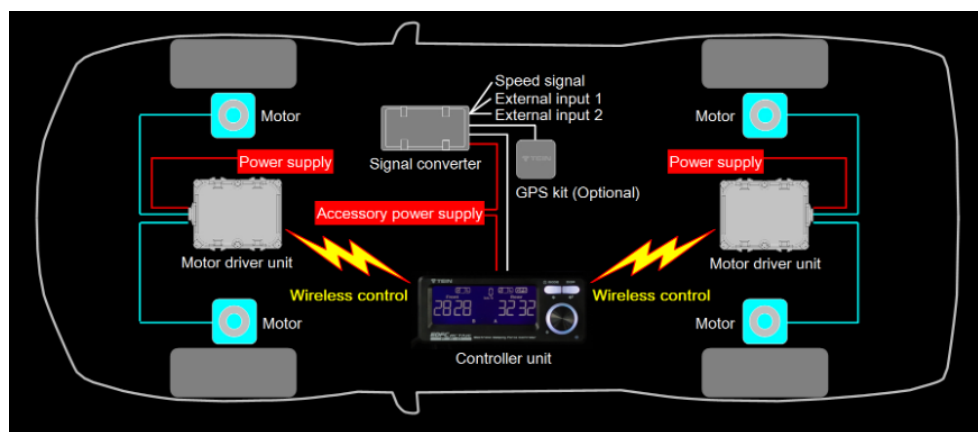
Obr. 2 Elektromagnetické tlmenie znázornené v reze [2]

Na tomto obrázku vidíme piestový valec naplnený magnetoreologickou kvapalinou (MR), ktorý sa používa na aktívne tlmenie v automobile. Piest vo vnútri valca má elektromagnetickú cievku, ktorá mení hustotu MR kvapaliny vo valci, a tým mení koeficient tlmenia. Celý systém je pripojený k elektronickému riadiacemu systému (ECU), ktorý prijíma signály zo snímačov zdvihu, akcelerometra a ďalších senzorov, a na základe týchto

signálov ECU reguluje elektromagnetickú cievku. Keď sa elektromagnetická cievka zmagnetizuje, vytvorí magnetické pole, ktoré magnetizuje MR vo valci. Keď sa MR magnetizuje, zvyšuje sa jej zdanlivá viskozita a stáva sa vysokoelastickou pevnou látkou. To znamená, že keď sa zvyšuje jej viskozita, tak sa zvyšuje aj tlmenie. Naopak, keď sa magnetická sila zníži, MR sa odmagnetizuje a viskozita sa zníži, čím sa znižuje aj tlmenie. V pieste vo vnútri valca sa nachádzajú drážky, ktoré slúžia na prúdenie MR. Prúdenie tejto kvapaliny sa zvyšuje alebo znižuje tiež podľa úrovne magnetizácie. Takto celý systém funguje a umožňuje aktívne tlmenie v automobile. Elektromagnetické tlmenie je v porovnaní s inými typmi tlmení jednoduchšie a poskytuje lepšie vlastnosti aktívneho tlmenia. Celý systém je riadený ECU, ktorý na základe signálov zo senzorov reguluje elektromagnetickú cievku a mení koeficient tlmenia podľa stavu vozovky a ďalších faktorov.

### 1.1.6 EDFC aktívne tlmenie (Tein)

EDFC (Electronic damping force controller) je skratka pre elektronický regulátor tlmiacej sily, čo je systém odpruženia vyvinutý spoločnosťou Tein. Tento systém umožňuje vodičovi prispôbiť tlmiacu silu svojho vozidla pomocou krokových motorov namontovaných na každom tlmiči. G-senzor zabudovaný v systéme umožňuje automatické nastavenie tlmiacej sily na základe zrýchlenia vozidla. Existujú dva režimy automatického nastavenia, ktoré vodičovi umožňujú prispôbiť tlmenie v závislosti od rôznych podmienok jazdy. [3]



Obr. 3 EDFC systémové rozloženie [3]

Riadiace jednotky motorov v prednej a zadnej časti vozidla, ako aj všetky ostatné riadiace jednotky sú pripojené bezdrôtovo, aby sa znížila náročnosť na kabeláž. Riadiaca jednotka obsahuje všetky potrebné snímače, vrátane optického snímača na meranie jasú vnútri vozidla a GPS systému pre meranie rýchlosti. Napájací kábel je jediný kábel, ktorý sa musí pripojiť



na tento systém, čo uľahčuje inštaláciu systému a umožňuje zostavenie rozšírenej verzie. Ovládač je súčasťou systému a môže byť ľahko nainštalovaný na akomkoľvek mieste, bez nutnosti použitia veľkého množstva káblov. Celkovo je EDFC systém odpruženia, ktorý vodičom umožňuje prispôbiť nastavenie tlmiacej sily svojho vozidla podľa svojich preferencií a podmienok jazdy. [3]



Obr. 4 Komponenty odpruženia EDFC [3]

## 1.2 Funkcie systému aktívneho tlmenia

Použitím aktívneho tlmenia sa zvyšuje výkonnosť celého systému. To je dôsledkom toho, že tento systém ovplyvňuje funkcie, ktorými sú ovládanie jazdy, regulácie výšky, nakláňania, predklonu (pri brzdení), stúpania (záklon) a celkové držanie na ceste. [4]

### 1.2.1 Ovládanie jazdy

Možnosti zlepšenia jazdných vlastností vozidla sú rôzne. Jedným z týchto spôsobov je využitie aktívneho odpruženia, ktoré dokáže upravovať jazdné vlastnosti vozidla v reálnom čase. Systém dokáže riadiť pohyby náklonu a odskoku karosérie vozidla, aby zlepšil jazdný komfort, stabilitu a bezpečnosť. Vlastnosti odpruženia, ktoré zlepšujú jazdné vlastnosti, môžu však zhoršiť výkon v iných režimoch, čo si vyžaduje kompromisy v konštrukcii vozidla. Preto je dôležité nájsť optimálnu kombináciu vlastností odpruženia, ktoré zlepšia jazdné vlastnosti bez toho, aby zhoršili iné. Aktívne odpruženie umožňuje riadiť jazdné vlastnosti počas celého jazdného cyklu a pre rôzne podmienky na ceste. To môže byť výhodné najmä pre náročné vozidlá, ako sú športové autá alebo vozidlá určené pre terénne jazdy. Tento systém umožňuje upravovať jazdné vlastnosti na základe momentálnych podmienok a požiadaviek, čím dosiahne vyšší jazdný komfort a bezpečnosť. [4]

### 1.2.2 Regulácia výšky

Regulácia výšky vozidla umožňuje udržiavať konštantnú výšku napriek zmenám zaťaženia alebo aerodynamických síl, čím sa zabezpečí maximálny zdvih pri prekonávaní nerovností a eliminujú sa zmeny v ovládateľnosti. Ovládanie výšky môže byť vhodné aj na výmenu pneumatík a zabezpečenie voľného priestoru pre reťaze na pneumatiky. Výhodou ovládania výšky je tiež možnosť zmeniť polohu náklonu vozidla pre úpravu aerodynamického vztlaku alebo znížiť vozidlo pre zníženie odporu pri vysokých rýchlostiach. [4]

### 1.2.3 Ovládanie priečneho nakláňania

Ovládanie nakláňania vozidla je dôležité pre bezpečné a stabilné zatáčanie. Existuje niekoľko spôsobov, ako túto kontrolu dosiahnuť, ako je zvýšenie tlmenia alebo pôsobenie síl proti nakláňaniu v zavesení vozidla. Rýchlosť vozidla, uhol riadenia a rýchlosť riadenia sa môžu snímať pomocou senzorov, aby sa určilo, kedy je vhodné aktivovať kontrolu nakláňania. S použitím aktívnych komponentov, ako sú motory, je možné úplne eliminovať nakláňanie v zákrutách, čím sa eliminuje účinok nedotáčavosti alebo pretáčavosti spôsobený nakláňaním vozidla. Okrem toho je možné selektívne nastaviť momenty nakláňania na prednej alebo zadnej náprave, aby sa zmenil sklon nedotáčavosti. Tieto metódy závisia od konkrétneho vozidla a použitia. [4]

### 1.2.4 Kontrola náklonu

Kontrola náklonu (predného sklonu) vozidla počas brzdenia môže byť zlepšená zvýšením tlmenia alebo pôsobením síl proti náklonu v odpružení. Regulácia sa môže aktivovať pomocou brzdového svetla, brzdného tlaku alebo pozdĺžneho zrýchlenia. Použitie regulácie náklonu v aktívnom odpružení znižuje potrebu navrhovať zložitú geometriu proti náklonu do spojov odpruženia. [4]

### 1.2.5 Kontrola stúpania

Pri kontrole stúpania a náklonu dozadu počas zrýchľovania vozidla je možné použiť rôzne spôsoby zlepšenia stability a ovládateľnosti. Zvýšenie tlmenia a pôsobenie síl proti stúpaniu v odpružení počas zrýchľovania pomáha minimalizovať náklon vozidla dozadu a zlepšiť jeho stabilitu. Regulácia stúpania môže byť aktivovaná polohou škrtiacej klapky, voľbou prevodového stupňa alebo pozdĺžnym zrýchlením. V prípade aktívneho odpruženia môže byť regulácia stúpania výhodná tým, že umožňuje prekonať stúpanie alebo zdvih na nepoháňaných kolesách a minimalizuje náklon vozidla dozadu, čo zlepšuje jeho jazdné

vlastnosti a bezpečnosť. Použitie týchto techník môže byť dôležité pri návrhu geometrie proti stúpaniu do závesov hnacích kolies a pri zlepšovaní výkonu vozidla a jeho schopnosti prekonať stúpanie. [4]

### 1.2.6 Držanie na ceste

Aktívne odpruženie môže zlepšiť držanie na ceste, minimalizovať dynamické zmeny zaťaženia kolies a znížiť poškodenie vozovky spôsobené motorovými vozidlami, najmä nákladnými vozidlami. Týmto spôsobom sa môže zlepšiť výkon vozidla v zákrutách a celkové jazdné vlastnosti. Okrem toho, aktívne odpruženie môže pomôcť riešiť problémy s nerovnosťami vozovky, ktoré môžu spôsobiť straty trakcie a destabilizáciu vozidla. Systém aktívneho odpruženia môže prispôbiť tuhosť pruženia a tlmičov na základe podmienok jazdy, čo zlepšuje stabilitu a kontrolu vozidla. [4]

## 2 STATICKÁ A DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA

Statické a dynamické charakteristiky systému slúžia k analýze a popisu jeho správania a vlastností. Spomínané charakteristiky sú vzájomne prepojené a spoločne prispievajú k celkovému pochopeniu systému. Analýza oboch charakteristík je dôležitá pri návrhu, modelovaní a optimalizácii systémov v rôznych oblastiach, ako je inžinierstvo, riadenie, elektrotechnika a podobne. [5]

### 2.1 Statická charakteristika

Statická charakteristika systému je vlastnosť, ktorá opisuje jeho odozvu na konštantné vstupy. Je to vzťah medzi vstupom a výstupom systému, kedy vstup zostáva nemenný po určitú dobu. Statická charakteristika poskytuje informácie o tom, ako systém transformuje a spracováva vstupné signály. Táto charakteristika môže byť vyjadrená pomocou tabuliek, grafov alebo matematických funkcií. Poskytuje informácie o lineárnych alebo nelineárnych vlastnostiach systému, ako je nasýtenie, nestabilita, presnosť, citlivosť na zmeny a podobne. Statické charakteristiky sú všeobecne ľahko merateľné a analyzovateľné. [5]

#### 2.1.1 Lineárny systém

Lineárny systém statickej charakteristiky je matematický model, ktorý opisuje vzťah medzi vstupným signálom a výstupným signálom v lineárnom systéme. Lineárnosť systému znamená, že ak vstupný signál je zosilnený alebo zmenený určitým spôsobom, výstupný signál sa získa prostredníctvom lineárnej kombinácie vstupných hodnôt. To znamená, že ak vynásobíme vstupný signál konštantou, výstupný signál sa zvýši v rovnakom pomere. Taktiež, ak sčítame dva vstupné signály, výstupný signál bude rovný súčtu výstupov z týchto signálov. Je dôležité si uvedomiť, že lineárne systémy majú statickú charakteristiku iba pre jednotlivé vstupy. Pri viacrozmerných vstupoch sa môžu prejaviť rôzne lineárne kombinácie a ich charakteristika môže byť komplexnejšia. Lineárny systém by mal mať vlastnosti, ktorými sú napríklad lineárna superpozícia, homogenita, stabilita, aditívnosť a ďalšie. [5]

#### 2.1.2 Nelineárny systém

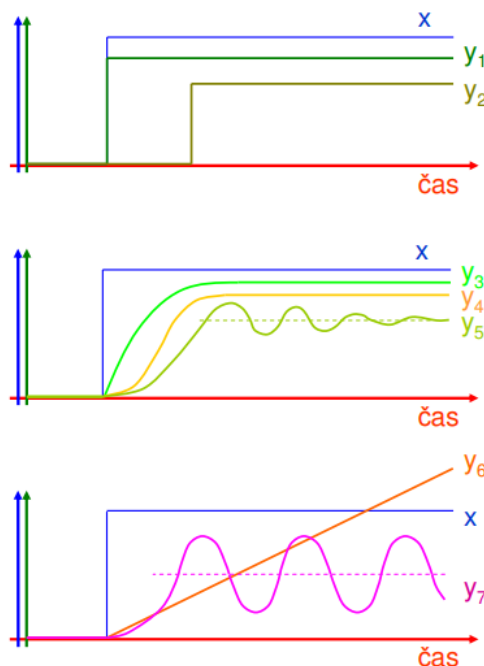
Nelineárny systém je matematický model, v ktorom neplatí princíp lineárnej superpozície. To znamená, že vstupné signály nie sú zosilnené alebo zmenené v lineárnej kombinácii a výstupný signál nie je súčtom výstupov zodpovedajúcich jednotlivým vstupným signálom. V prípade nelineárneho systému môže byť vzťah medzi vstupom a výstupom komplexný a

závisí od konkrétného systému. Môže sa jednať o nelineárne funkcie, ako sú mocniny, exponenciálne funkcie, trigonometrické funkcie, logaritmy a ďalšie. V prípade takéhoto systému môžu byť prítomné rôzne javy, ako je nasýtenie, hysteréza, rozsahový efekt a ďalšie. Tieto javy sú dôsledkom nelinearity a môžu mať významný vplyv na chovanie systému. Analýza a návrh nelineárnych systémov statickej charakteristiky sú zložité úlohy, pretože vyžadujú špeciálne metódy a techniky. Nelineárne systémy sa často vyskytujú v reálnych systémoch, ako sú elektronické obvody, elektrické motory, biologické systémy, ekonomické modely a ďalšie. Ich analýza a pochopenie sú dôležité pre správne fungovanie a riadenie týchto systémov. [5]

## 2.2 Dynamická charakteristika

Dynamická charakteristika systému popisuje jeho správanie a odozvu na časovo premenné vstupy. Zatiaľ čo statická charakteristika sa zameriava na odozvu systému na konštantné vstupy, dynamická charakteristika skúma, ako systém reaguje na zmeny vstupov v priebehu času. Čiže ide o reakciu sústavy na skokovú zmenu vstupnej veličiny. Pomocou tejto charakteristiky vieme ľahko identifikovať, o aký druh sústavy sa jedná a posúdiť jeho stabilitu, tým pádom dokážeme rozhodnúť o spôsobe riadenia. Pri analýze systému sa často používajú prechodové, impulzné, frekvenčné charakteristiky a mnoho ďalších. [5]

### 2.2.1 Tvary dynamickej charakteristiky



Obr. 5 Základné tvary dynamickej charakteristiky [6]

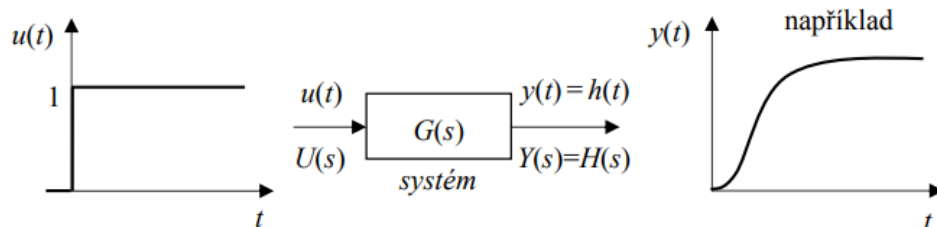
Vysvetlenie sústav:

- $y_1$  – bez závislosti na čase
- $y_2$  – s dopravným oneskorením
- $y_3$  – so zotrvačnosťou
- $y_4$  – so zotrvačnosťou vyššieho rádu
- $y_5$  – sústava vyššieho rádu (kmitavá tlmená)
- $y_6$  – trvalo rastúca (integračná)
- $y_7$  – kmitavá netlmená

### 2.2.2 Prechodová funkcia a charakteristika

Prechodová charakteristika je grafické znázornenie správania sa systému alebo prvku v závislosti od nejakého parametra. Je to graf, ktorý ukazuje zmeny výstupného signálu v priebehu času alebo v závislosti od iného relevantného parametra. Táto charakteristika sa zameriava na vizuálnu reprezentáciu priebehu systému a poskytuje informácie o rýchlosti ustálenia, osciláciách, prechodných javoch a stabilnom stave systému.

Prechodová funkcia je matematický výraz, ktorý opisuje vzťah medzi vstupom a výstupom v systéme. Čiže je to odozva systému na vstupný signál  $u(t)$  v tvare jednotkového skoku pri nulových počiatočných podmienkach. Je to konkrétna matematická formulácia, ktorá môže byť vyjadrená napríklad pomocou diferenciálnych rovníc, impulznej odozvy alebo Laplaceovej transformácie. Táto funkcia popisuje dynamiku systému a jeho schopnosť reagovať na zmeny vstupu. [5]



Obr. 6 Odozva systému na jednotkový (Heavisideov) skok [5]

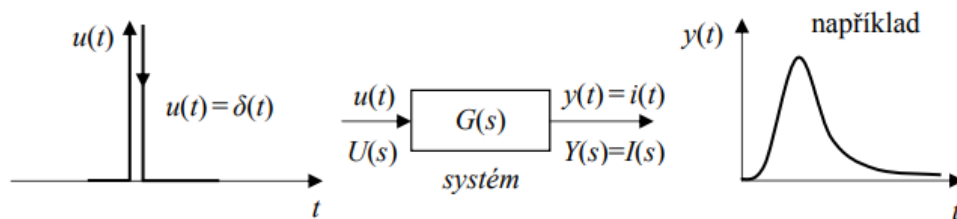
Laplaceov obraz jednotkového skoku, čiže vstupného signálu  $u(t)$  je  $U(s)=1/s$ , potom Laplaceov obraz výstupnej funkcie  $y(t)$ , respektíve  $h(t)$ , takže  $H(s)$  je rovný [5]:

$$Y(s) = G(s) U(s) = G(s) \frac{1}{s} = \frac{G(s)}{s} \equiv H(s) \Rightarrow h(t) = L^{-1}\{H(s)\} \quad (1)$$

### 2.2.3 Impulzná funkcia a charakteristika

Impulzná charakteristika je odozva systému na impulzný vstupný signál. Je to grafické znázornenie správania sa systému v reakcii na impulzný vstup. Táto charakteristika ukazuje, ako systém reaguje na impulz, ako sa mení výstupný signál v čase a aké hodnoty dosahuje.

Impulzná funkcia je matematická funkcia, ktorá opisuje impulzný vstupný signál. V prípade diskretných systémov je to často jednotkový impulz (Kroneckerov impulz) alebo Diracov impulz, ktorý je definovaný ako nekonečne krátky impulz s konštantnou amplitúdou. Táto funkcia je teda konkrétna matematická formulácia impulzného vstupu do systému. [5]



Obr. 7 Odozva systému na jednotkový impulz [5]

Laplaceov obraz jednotkového impulzu, čiže vstupného signálu  $u(t)$  je  $U(s)=1$ , potom Laplaceov obraz výstupnej funkcie  $y(t)$ , respektíve  $i(t)$ , takže  $I(s)$  je rovný [5]:

$$Y(s) = G(s) U(s) = G(s) \cdot 1 = G(s) \equiv I(s) \Rightarrow i(t) = L^{-1}\{I(s)\} \quad (2)$$

### 2.2.4 Frekvenčná funkcia a charakteristika

Frekvenčná charakteristika je grafické znázornenie správania sa systému v závislosti od frekvencie. Je to graf, ktorý ukazuje, ako sa mení amplitúda alebo fáza výstupného signálu systému v závislosti na frekvencii vstupného signálu. Táto charakteristika poskytuje informácie o tom, ako systém modifikuje rôzne frekvencie vstupu.

Frekvenčná funkcia je matematická funkcia, ktorá opisuje vzťah medzi vstupnou a výstupnou amplitúdou alebo fázou systému v závislosti od frekvencie. Vyjadruje, ako systém reaguje na rôzne frekvencie vstupných signálov. Táto funkcia sa často vyjadruje pomocou komplexného tvaru a je definovaná pre rôzne frekvencie vstupu. [5]

Frekvenčný prenos :

$$G(j\omega) = G(s) \Big|_{s=j\omega} = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (3)$$

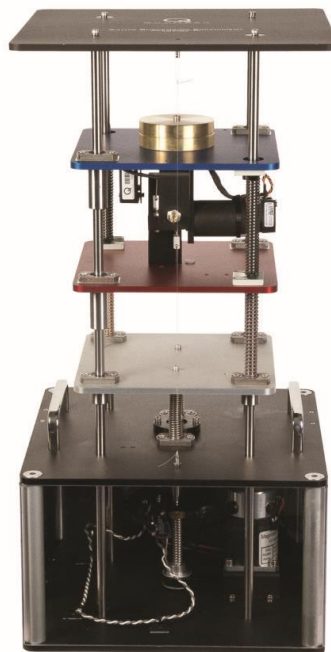
kde  $Y(j\omega)$ ,  $U(j\omega)$  sú takzvané Fourierové obrazy vstupných a výstupných signálov,  $A(\omega)$  je amplitúda (zosilnenie) a  $\varphi(\omega)$  je fázový posun. [5]



### 3 LABORATÓRNA SÚSTAVA ACTIVE SUSPENSION

Laboratórna sústava aktívneho tlmenia značky Quanser je navrhnutá najmodernejšou technológiou a používa sa na experimentovanie s aktívnym tlmením.

Spoločnosť Quanser sa zberá vzdelávaním a výskumom v oblasti návrhu a implementácie riadenia v reálnom čase. Ich špecializácia je zameraná na laboratórne riadenia, ktoré sú nápomocné univerzitám pri budovaní zručností relevantnými pre priemysel. Majú špičkové pracovné stanice určené na základné, stredne pokročilé a pokročilé riadenia pre študentov elektrotechnických, mechatronických, robotických, leteckých, stavebníckych, a rôznych iných inžinierskych odborov. [7]



Obr. 8 Laboratórna sústava aktívneho tlmenia [8]

Sústava pozostáva z troch hmôt, ktoré sa pohybujú po hriadeľoch z nehrdzavejúcej ocele pomocou lineárnych ložísk a sú podopreté súpravou pružín. Hmoty sústavy sú rozdelené na spodnú (striebornú), strednú (červenú) a hornú (modrú) dosku. Spodná doska, ktorá simuluje cestu, je poháňaná výkonným ventilovým jednosmerným motorom Magmotor s výkonom 70 W, ktorý je pripojený k olovenej skrutke a káblovému prenosovému systému. Stredná doska predstavuje pneumatiku vozidla a je umiestnená medzi spodnou a hornou plošinou a oddelená pružinami zhora a zdola. Horná plošina predstavuje karosériu vozidla podopretú nad zavesením kolies a je pripojená ku kvalitnému bezkomutátorovému jednosmernému

motoru Micromo s výkonom 226 W pomocou malého navijaku, to znamená, že dokonalo dokáže napodobniť systém aktívneho tlmenia, ktorý vo výsledku dynamicky kompenzuje možné nerovnosti na ceste. Plošiny sú snímané troma snímačmi, ktoré majú vysoké rozlíšenie. [9]

Sústava ďalej obsahuje sadu pružín, ktoré sa dajú nastavovať podľa tuhosti, akcelerometer slúžiaci na meranie zrýchlenia hornej plošiny, mechanizmus s remeňovým pohonom na možné simulovanie povrchu vozovky a ochranný obvod s koncovými spínačmi, ktoré slúžia na ochranu pred poškodením sústavy. [8]

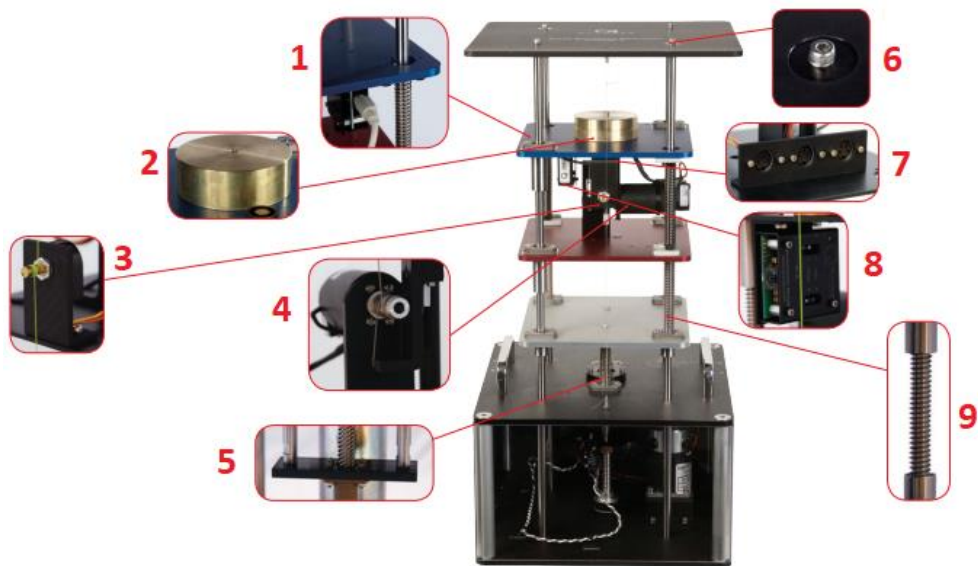
Táto sústava je navrhnutá tak aby sa dala používať na analýzu systému tlmičov a pružín pri vyššej hmotnosti, na priemyselné požiadavky, ktorými môžu byť napríklad komfort a ovládateľnosť, inak povedané manipulácia na ceste. Ďalej je možné zisťovanie stavového priestoru systému, nájdenie modelu prenosovej funkcie, návrh riadenia so spätnou väzbou pomocou LQR a mnoho ďalších. Analyzovanie komfortu jazdy súvisí s tým ako vnímajú cestujúci pohyb karosérie vozidla, môže byť meraný akcelerometrom, ktorý je namontovaný na hornej doske (modrá doska) alebo snímačom, ktorý predstavuje priame meranie polohy. Pri relatívnom posune prebiehajúcim medzi vozidlom a pneumatikou môžeme analyzovať chod tlmičov, ktorý je obmedzený v rámci povoleného rozsahu pohybu a meria sa pomocou snímača zavesenia nachádzajúcim sa na navijaku. Pomocou všetkých senzorov, ktoré obsahuje sústava je možné merať kontaktné sily medzi povrchom vozovky a pneumatikami vozidla a závisí od deformácie pneumatík, čiže jedná sa o manipuláciu vozidla. [8]

Pre prácu sa využívajú programy Matlab/Simulink a LabVIEW.

Matlab/Simulink je návrhové prostredie, ktoré dokáže simulačne a modelovo pracovať s dynamickými a vstavanými systémami a vlastní ho spoločnosť MathWorks. V skratke sa jedná o nástroj, v ktorom sa dajú tvoriť grafické blokové diagramy s možnosťou využitia rôznych blokových knižníc. [10]

LabVIEW je taktiež grafické programovacie prostredie, ktoré sa využíva na automatizované výskumy a testovacie systémy a vlastní ho spoločnosť National Instruments. [11]

### 3.1 Systémové špecifikácie



Obr. 9 Popis jednotlivých súčastí sústavy [7]

1. Plošiny rozdelené podľa farieb – modrá (karoséria vozidla), červená (pneumatika), strieborná (cesta)
2. Odstrániteľné závažie
3. Snímač, ktorý má vysoké rozlíšenie a slúži na meranie polohy
4. Spoľahlivý a presný motor tlmenia
5. Odolný olovený skrutkový mechanizmus
6. Ľahko odnímateľné skrutky pre nastavovanie tuhosti
7. Možnosť rýchleho pripojenia
8. Akcelerometer
9. Pružina s nastaviteľnou tuhosťou

Sústava má rozmery šírka x dĺžka x výška a to 30.5 cm x 30.5 cm x 61 cm s celkovou hmotnosťou 15 kg. Rozsahy pohybu jednotlivých dosiek sú  $\pm 22$  mm (cesta),  $\pm 19$  mm (pneumatika),  $\pm 25.4$  mm (karoséria vozidla) sú merané inkrementálnymi senzormi a ich rozlíšenia meraní pozície sú 0.002mm/inkrement (cesta), 0.005 mm/inkrement (pneumatika), 0.009mm/inkrement (karoséria vozidla). Tuhosť sústavy je možné nastaviť od 0,4 do 2 N/mm. Budiaca frekvencia sústavy je až do 15 Hz a rezonančná frekvencia je

konfigurovatelná v rozsahu od 2 do 6 Hz. Senzitivita akcelerometra sa pohybuje v hodnotách 9.81 m/Vs<sup>2</sup>. [7]

Sústava obsahuje 2 vstupy, ktorými sú motor Micromo a motor Magmotor a 4 výstupy, ktoré predstavujú polohu cesty (strieborná doska), polohu pneumatiky (červená doska), polohu vozidla (modrá doska) a zrýchlenie vozidla. [7]

Pre prácu je dodaný manuál spolu s demom už ukázkovo funkčnej schémy, ktorá sa dá spustiť v programoch Matlab alebo LabVIEW. Na zber údajov zo sústavy môžeme využiť rôzne vybavenie ako je Quanser QPID/QPIDe doska, Q8-USB alebo NI CompactRIO s dvoma modulmi Quanser Q1-cRIO. [7]

Riadiaca doska QPID má rozsiahlu podporu vstupov a výstupov, preto sa dá ku doske pripojiť veľa rôznych zariadení s analógovými a digitálnymi snímačmi. [12]

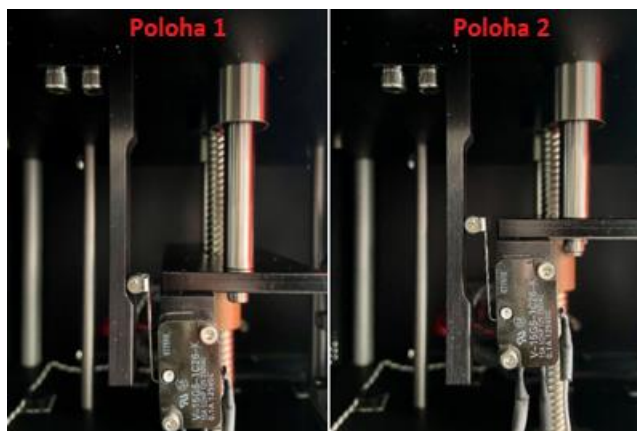
Prenosné a cenovo dostupné zariadenie na meranie v reálnom čase je Quanser Q8-USB, ktoré je jednoduché vstupno/výstupné osemkanálové zariadenie používané na zber údajov prostredníctvom rozhrania USB. Dokáže rýchlo pracovať s prenosom dát a vďaka širokej škále vstupov a výstupov môžeme pripojiť a ovládať zariadenia vybavené analógovými a digitálnymi snímačmi. [13]

Modul Q1-cRIO je modul série C a bol navrhnutý pre vzdelávanie v oblasti riadenia a umožňuje jednoduché prepojenie so zariadeniami od firmy Quanser. Má jeden analógový vstup, jeden analógový výstup a dve konfigurovateľné vstupné rozhrania pre jednosmerný snímač. Je to jednoduché a efektívne pripojenie pre program LabVIEW. [14]

## **II. PRAKTICKÁ ČASŤ**

## 4 STATICKÉ A DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY

Ručne nastavované počiatkové polohy plošinou Road pri nasledujúcich meraniach:



Obr. 10 Ručné nastavenie počiatkového bodu

### 4.1 Dynamická charakteristika systému

Dynamická charakteristika tohto systému popisuje jeho správanie sa v čase, najmä v reakcii na rôzne vstupné podnety, ktorými v tomto prípade sú skokové zmeny napätia privádzané na vstup pomocou bloku v programovom prostredí Matlab/Simulink s názvom repeating sequence stair. Po poznaní dynamickej charakteristiky systému sme schopní umožniť testovanie a vývoj rôznych scenárov riadenia a zlepšovanie výkonu systému v simulovaných podmienkach. Tento proces môže pomôcť zlepšiť návrh a účinnosť systému a zároveň znížiť náklady na vývoj a testovanie prototypov v reálnom svete.

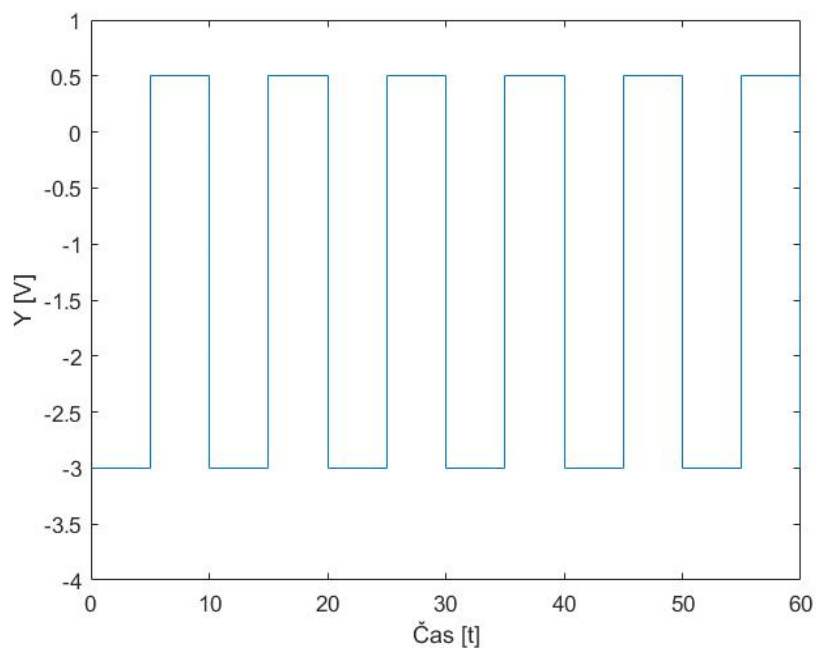
#### 4.1.1 Meranie aplikované na plošine a motore Road

Pri meraní dynamických charakteristík na motore a plošine Road sa zvolilo 6 rôznych meraní, ktoré zahŕňajú skokové hodnoty od najnižších až po najvyššie možné a vstupné napätia v programovom prostredí Matlab/Simulink sa zvolili takto:

Č.m.	Vector of output values [V]		$\Delta U$ [V]
1	-0,5	0,5	1
2	-1	0,5	1,5
3	-1,5	0,5	2
4	-2	0,5	2,5
5	-2,5	0,5	3
6	-3	0,5	3,5

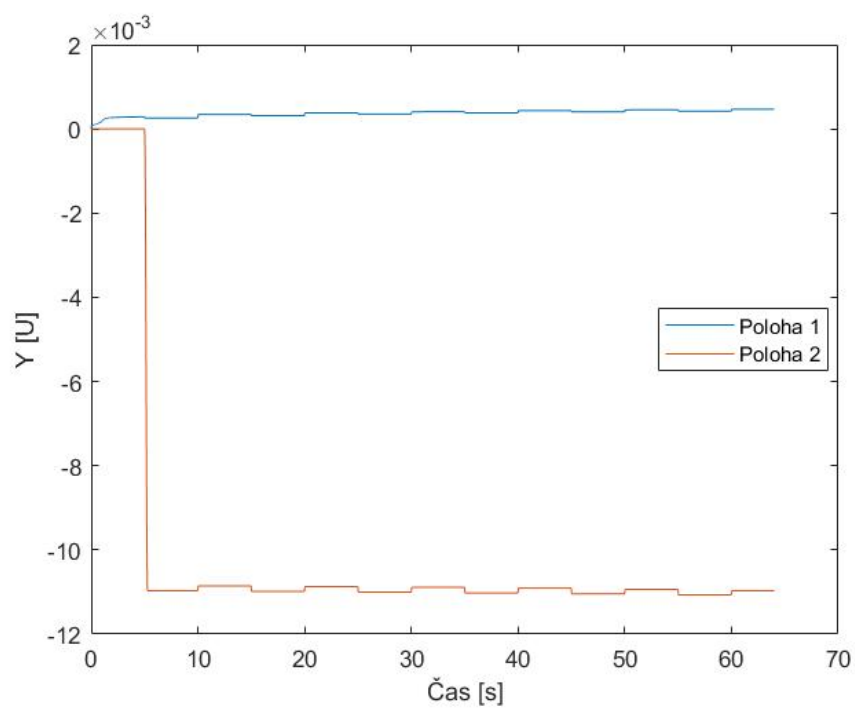
Tab. 1 Vstupné napätie motora Road

Pri týchto vstupných napätiach, ktoré boli použité na vstup motora Road sa nechal systém spustený 64 sekúnd a z nameraných dát plošiny Road sa vytvorili grafy. Systém vykonal každých 5 sekúnd skokovú zmenu, čo bolo dostačujúce, pretože systém sa vždy ustálil na určitej hodnote. V grafoch dynamických charakteristík sú zobrazené vždy 2 merania pre určité vstupné napätie, modrou farbou je vyznačené meranie s počiatkom pri spodnom koncovom doraze, čiže poloha 1 (Obr. 10) a oranžovou farbou je vyznačené meranie s počiatkom v strede medzi horným a spodným koncovým dorazom, čiže poloha 2 (Obr. 10). Na motor Vehicle sa priviedla konštanta, čiže hodnota 0.

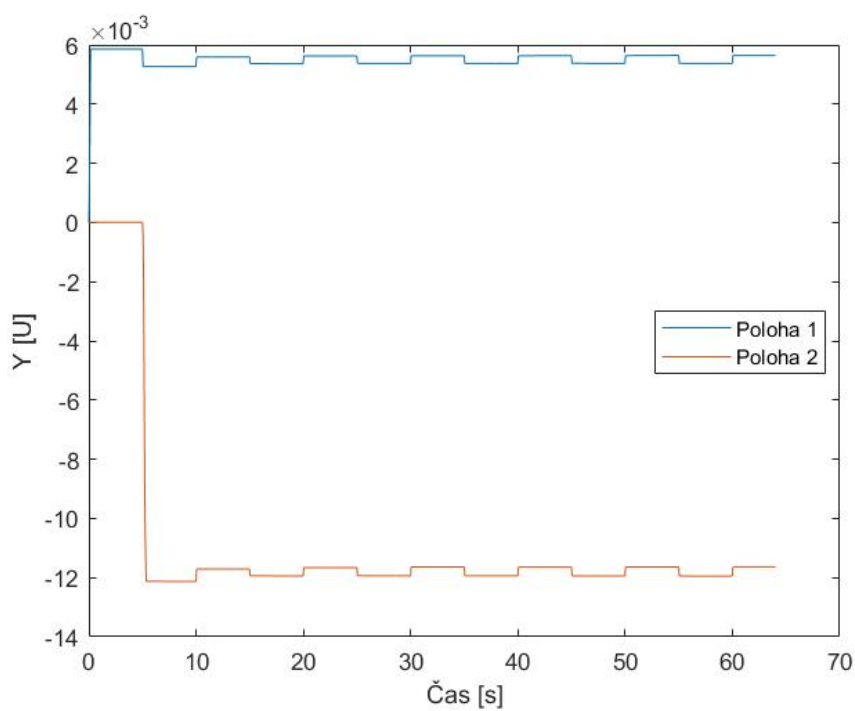


Obr. 11 Graf príkladného vstupného skokového napätia

Príkladné vstupné napätie merania číslo 6 (Obr. 17), kde sa napätie skokovo menilo o 3,5 V. Takýmto vstupným signálom sú vyhotovené všetky merania, s tým rozdielom, že sa menilo vstupné skokové napätie podľa tabuľky 1 (Tab. 1).

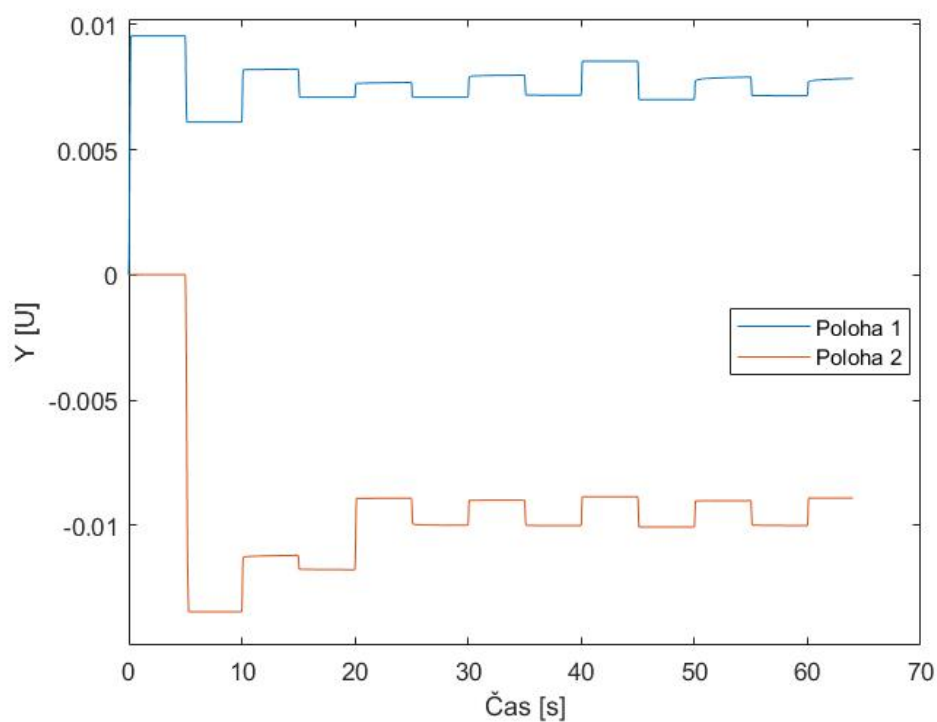


Obr. 12 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 1 V

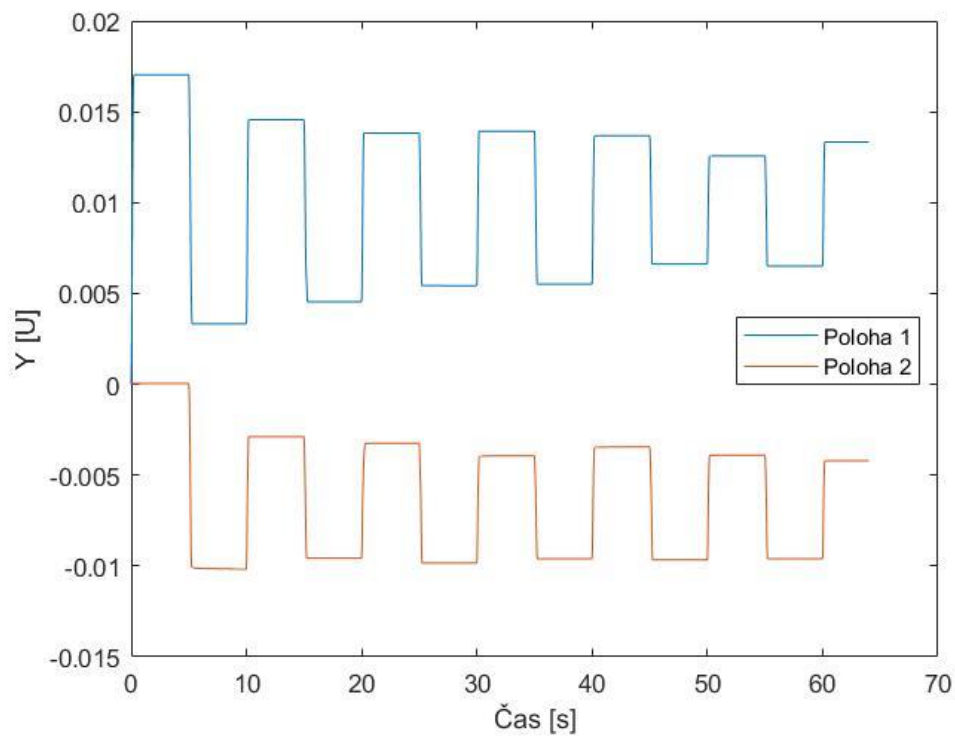


Obr. 13 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 1,5 V

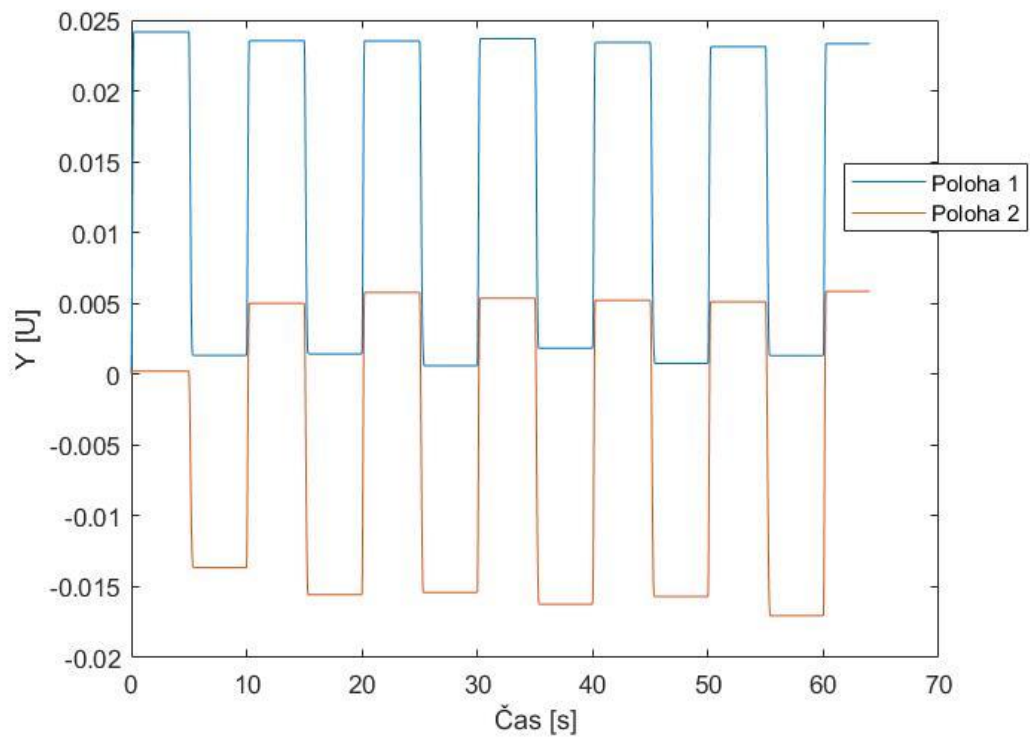




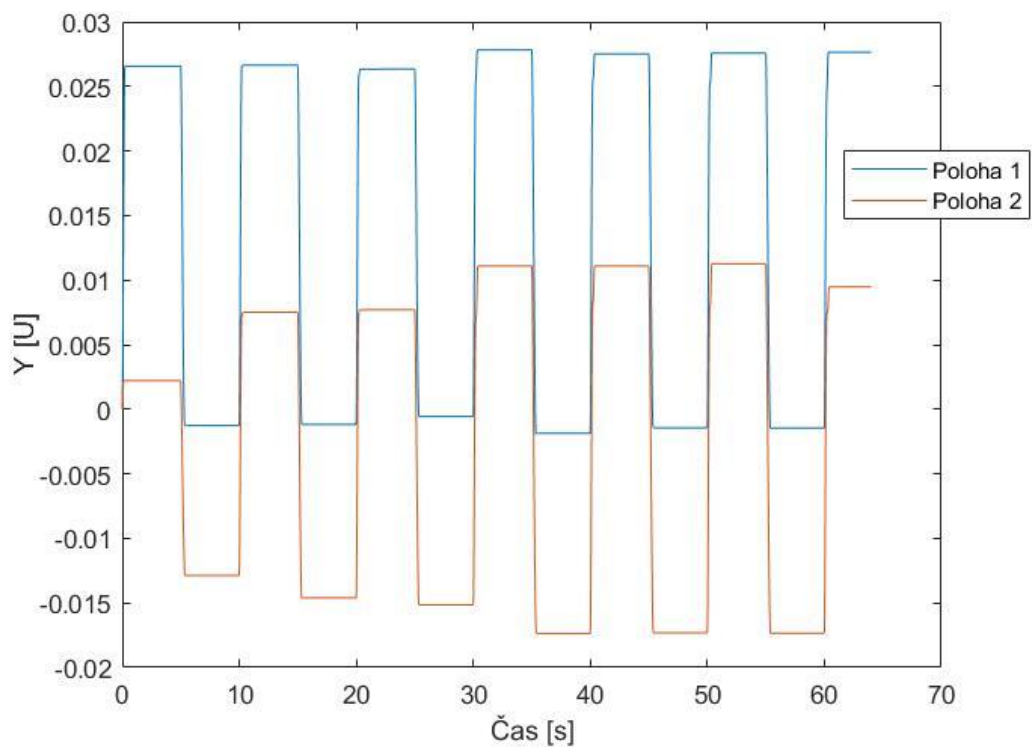
Obr. 14 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 2 V



Obr. 15 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 2,5 V



Obr. 16 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 3 V



Obr. 17 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 3,5 V

Z meraní na motore a plošine Road je vidieť, že systém sa pri malých vstupných napätíach (Obr. 12) hýbe minimálne, to platí od skokového vstupného napätia meniaceho sa o 1 V až

po 2 V (Obr. 14). Pri vyšších vstupných napätíach sa systém začína dostávať do pohybu (Obr. 15), ktorý je dobre pozorovateľný. Pri stredných až vyšších vstupných napätíach sa systém chová najlepšie (Obr. 16) a pri vyšších vstupných skokových napätíach meniacich sa o viac ako 3,5 V sa systém dostane na doraz a zastaví sa.

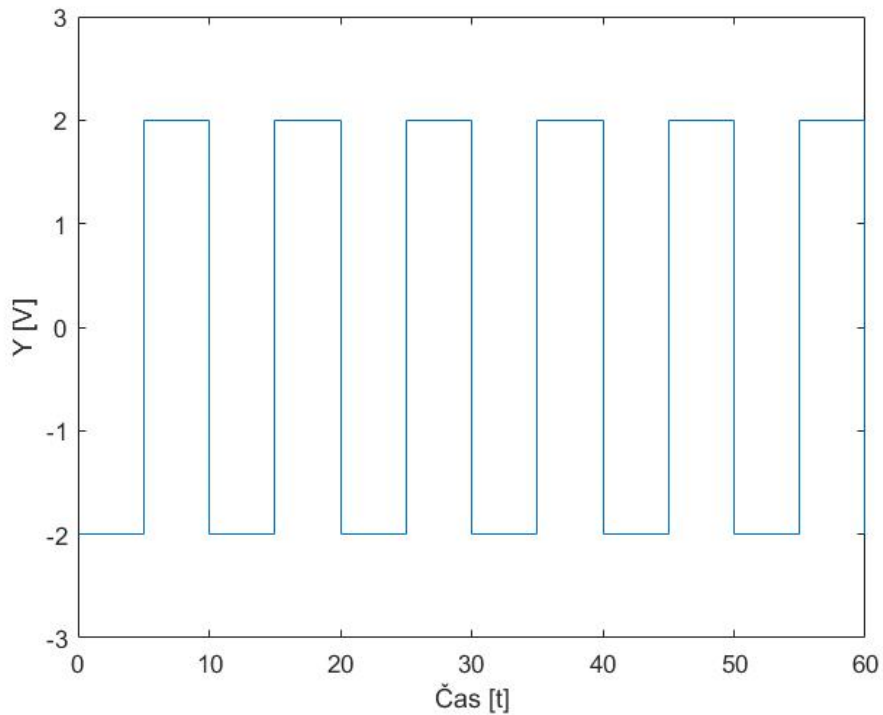
#### 4.1.2 Meranie aplikované na plošine a motore Vehicle

Pri meraní dynamických charakteristík na motore a plošine Vehicle sa zvolili 4 rôzne merania, ktoré zahŕňajú skokové hodnoty od najnižších až po najvyššie možné a vstupné napätia v programovom prostredí Matlab/Simulink sa zvolili takto:

Č.m.	Vector of output values [V]		$\Delta U$ [V]
1	-0,5	0,5	1
2	-1	1	2
3	-1,5	1,5	3
4	-2	2	4

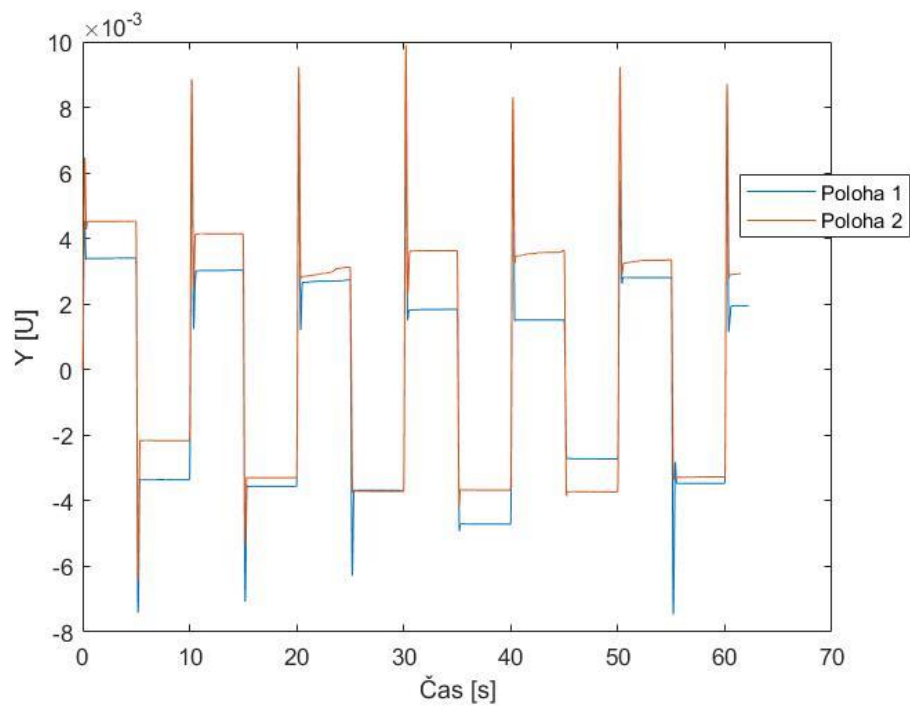
Tab. 2 Vstupné napätie motora Vehicle

Pri tomto meraní sa na motor Road zaviedlo ako vstupné napätie konštanta, čiže hodnota 0 a pri týchto vstupných napätíach sa taktiež nechal systém spustený 64 sekúnd a z nameraných dát plošiny Vehicle sa vytvorili grafy. Rovnako systém vykonal skokovú zmenu každých 5 sekúnd. Zobrazovanie grafov pri tomto meraní je rovnaké ako pri meraní na plošine a motore Road.

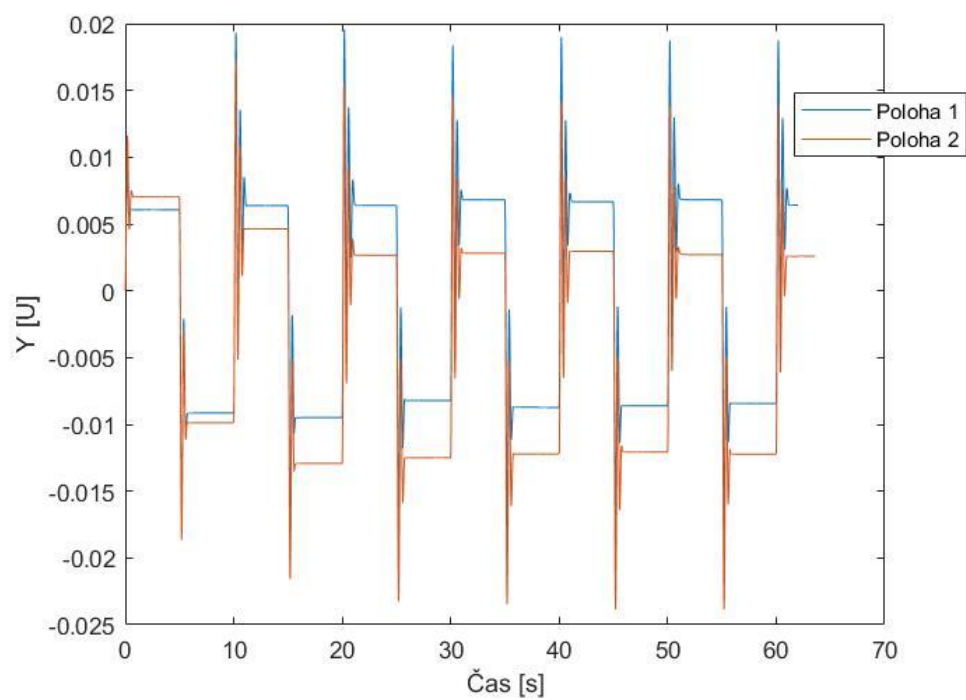


Obr. 18 Graf príkladného vstupného skokového napätia

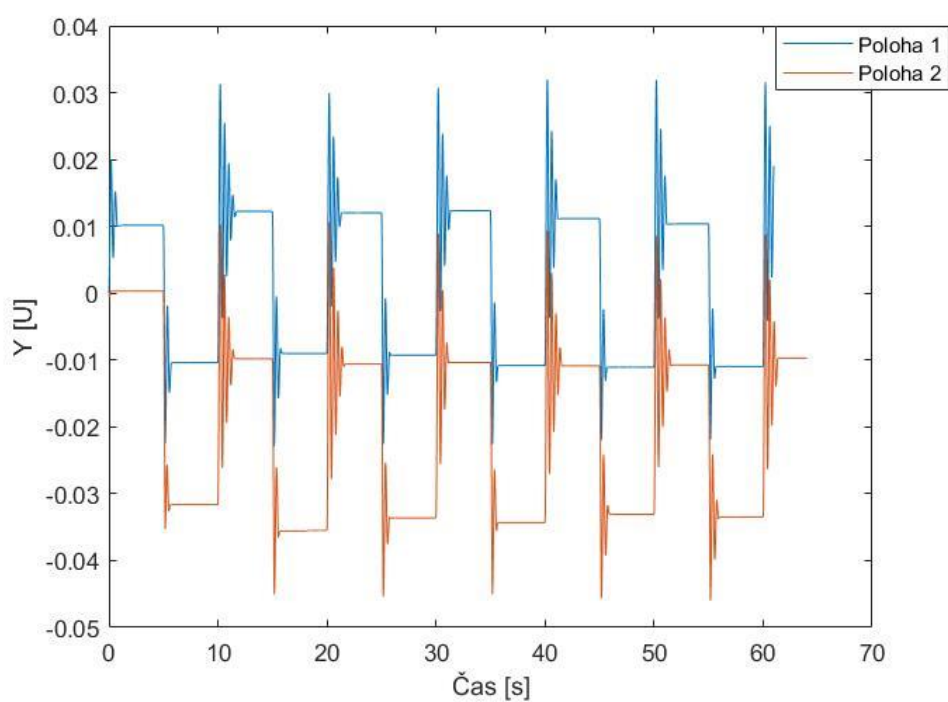
Príkladné vstupné napätie merania číslo 4 (Obr. 22), kde sa napätie skokovo menilo o 4 V. Takýmto vstupným signálom sú vyhotovené všetky merania, s tým rozdielom, že sa menilo vstupné skokové napätie podľa tabuľky 2 (Tab. 2).



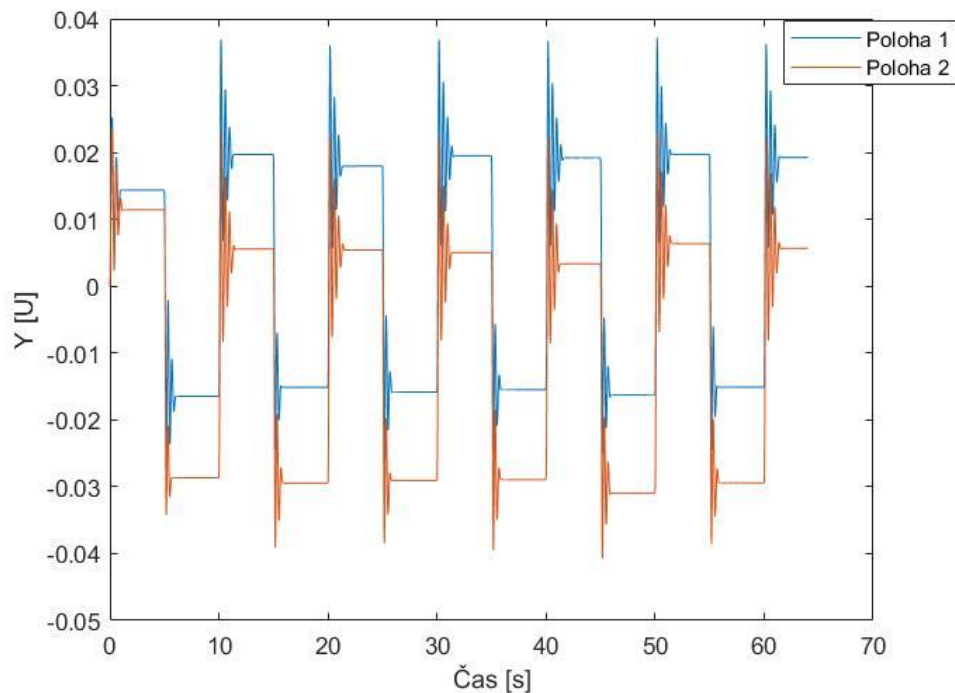
Obr. 19 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 1 V



Obr. 20 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 2 V



Obr. 21 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 3 V



Obr. 22 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 4 V

Z meraní na motore a plošine Vehicle môžeme vidieť skoro rovnaké výsledky ako pri meraniach na motore a plošine Road, čiže pri nízkom vstupnom napätí sa systém hýbe minimálne (Obr. 19) a pri vyšších vstupných napätiach (Obr. 20, Obr. 21, Obr. 22) sa systém hýbe pozorovateľne a pri vstupných skokových napätiach meniacich sa o viac ako 4 V sa systém dostane na doraz a zastaví sa.

## 4.2 Statická charakteristika systému

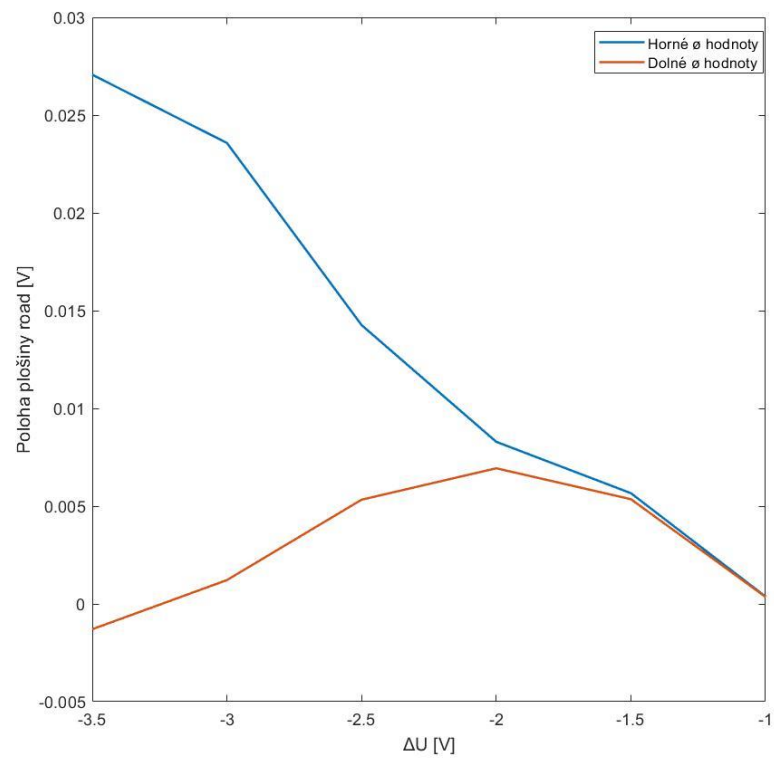
Statické charakteristiky systému vyjadrujú závislosť medzi vstupným a výstupným signálom v ustálenom stave. Vstupný signál je privádzané napätie na motor Road/Vehicle (Cesta/Vozidlo) zo vstupného bloku použitého v programe Matlab/Simulink, ktorým je blok repeating sequence stair, ktorý generuje opakujúce sa sekvencie s definovanou dĺžkou a amplitúdou a výstupný signál je poloha plošiny Road/Vehicle. Plošinou a motorom Road sa myslí najspodnejšia plošina sústavy, ktorá má striebornú farbu a je pripojená na ventilový jednosmerný Magmotor. Rovnako plošinou a motorom Vehicle sa myslí najvrchnejšia plošina sústavy, ktorá má modrú farbu a je pripojená na bezkomutátorový jednosmerný motor Micromo. Zo získaných statických charakteristík systému sa dá napríklad navrhnuť optimálna pracovná oblasť pre riadenie.

#### 4.2.1 Meranie aplikované na plošine a motore Road

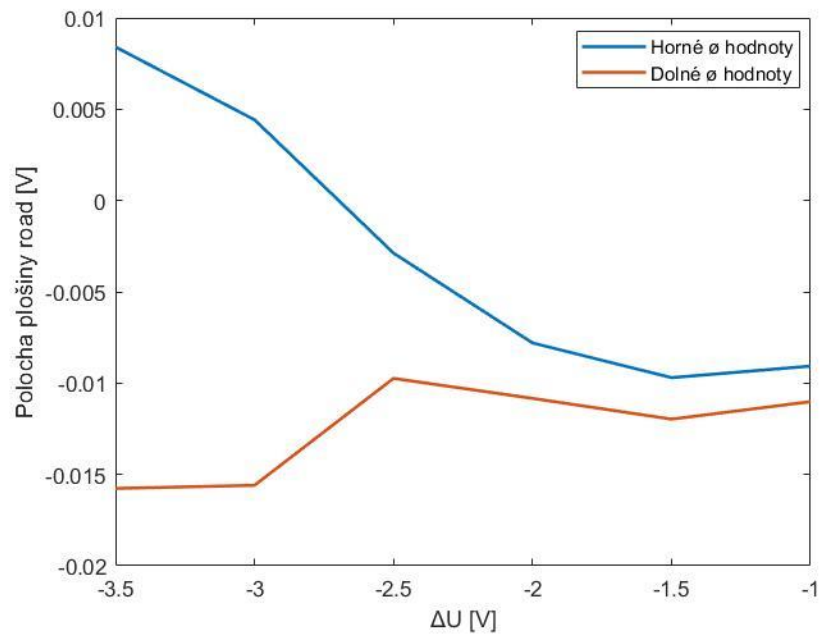
Pri meraní statických charakteristík sa počiatočná pozícia plošiny Road nastavovala ručne do dvoch začiatočných pozícií, a to čo najbližšie ku spodnému dorazu, čiže poloha 1 (Obr. 10) a na stred medzi horný a spodný doraz, čiže poloha 2 (Obr. 10). Následne na motor Road boli privádzané obdĺžnikové vstupné signály a model sa nechal spustený 60 sekúnd. Pri motore Road sa meranie aplikovalo 6-krát a vždy sa vstupné hodnoty zvyšovali, a to od najnižších pohybov systému až po najvyššie, čiže pokiaľ to systém dovolil a nevyskočil z dorazu. Toto platilo aj pri meraní na motore Vehicle, ale vstupným signálom na motor Road bola použitá konštanta čiže hodnota 0. Jediným rozdielom bolo, že sa meranie aplikovalo 4-krát.

Po následnom nameraní potrebných dát na oboch motoroch a plošinách sa zvolil taký postup, pri ktorom sa zobrali z každého merania (merania v 4.1.1) najvyššie a najnižšie ustálené hodnoty a vytvorili sa z nich priemerné hodnoty, z ktorých sa následne v programovom prostredí Matlab vytvorili grafy zobrazujúce statické charakteristiky systému.

Grafy na obrázku (Obr. 23 a Obr. 24) znázorňujú statickú charakteristiku motora a plošiny Road (najspodnejšia plošina aj s motorom), pričom prvý graf znázorňuje počiatočnú polohu 1 (Obr. 10), a druhý graf znázorňuje počiatočnú polohu 2 (Obr. 10). Používal sa iba motor plošiny Road, ktorý predstavuje hodnoty od malých skokov plošiny až po veľké skoky plošiny a v grafoch sú zobrazené priemerné najvyššie (modrá) a najnižšie (oranžová) ustálené hodnoty systému.



Obr. 23 Graf statickej charakteristiky Road v polohe 1



Obr. 24 Graf statickej charakteristiky Road v polohe 2

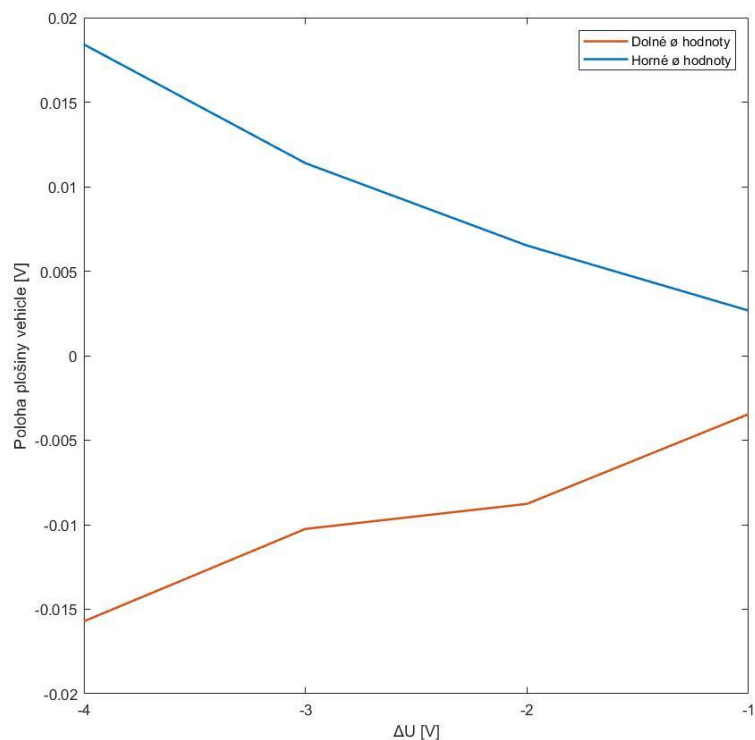


Z grafov (Obr. 23 a Obr. 24) nameraných statických charakteristík v polohe 1 a 2 (Obr. 10) je vidieť, že systém sa správa nelineárne. Je to spôsobené tým, že spodné  $\sigma$  hodnoty (oranžová) predstavujú hodnotu vstupu  $u=0.5$  V a systém sa v týchto hodnotách nechoval konštantne. Vlastná statická charakteristika systému na motore a plošine Road je zobrazená v grafoch modrou čiarou (Obr. 23 a Obr. 24).

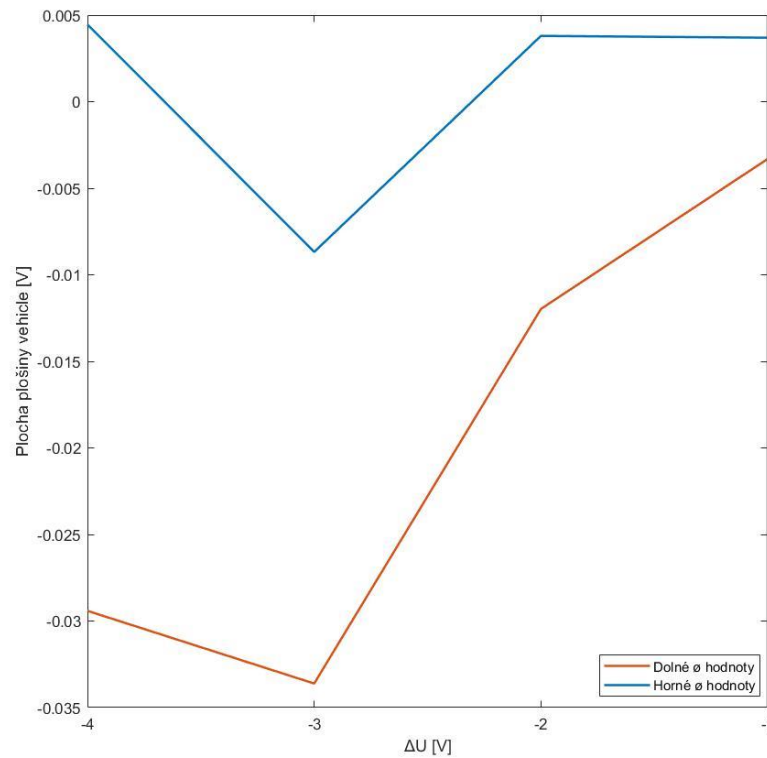
#### 4.2.2 Meranie aplikované na plošine a motore Vehicle

Pri statickej charakteristike na motore a plošine Vehicle (najvrchnejšia plošina aj s motorom) bol postup rovnaký (merania v 4.1.2) s tým rozdielom, že boli aplikované 4 merania pretože vyššie hodnoty spôsobovali výskok systému z dovoleného rozsahu (systém vyskočil nad doraz) a na motor Road bol zavedený ako vstupný signál konštanta.

Grafy na obrázkoch (Obr. 25), (Obr. 26) predstavujú statické charakteristiky motora a plošiny Vehicle a taktiež ich začiatkové hodnoty, ktoré sa nastavili spodnou plošinou boli v prvom grafe (Obr. 25) v polohe 1 (Obr. 10) a v druhom grafe (Obr. 26) v polohe 2 (Obr. 10). Meranie bolo vykonané úplne rovnako ako na motore a plošine Road.



Obr. 25 Graf statickej charakteristiky Vehicle v polohe 1



Obr. 26 Graf statickej charakteristiky Vehicle v polohe 2

Z grafov (Obr. 25 a Obr. 26) nameraných statických charakteristík v polohe 1 a 2 (Obr. 10) je taktiež ako pri nameraných statických charakteristikách na motore a plošine Road vidieť, že systém sa správa nelineárne, ale to iba v prípade nastavenia polohy spodnej plošiny do polohy 2 (Obr. 10). Pri nastavení spodnej plošiny do polohy 1 (Obr. 10) je vidieť, že systém sa správa skoro lineárne, čiže pri týchto statických charakteristikách ovplyvňuje výsledok počiatočná pozícia systému. Vlastná statická charakteristika systému na motore a plošine Vehicle je zobrazená v grafoch modrou čiarou (Obr. 25 a Obr. 26).

## 5 LINEÁRNÝ A NELINEÁRNÝ MODEL SÚSTAVY

### 5.1 Lineárny model

Na tvorbu lineárneho modelu sa použila funkcia `fminsearch` v programe Matlab, ktorá slúži na identifikáciu modelu pomocou metódy najmenších štvorcov. Táto metóda sa používa k odhadu parametrov lineárneho modelu na základe meraní.

V programe Matlab sa vytvorila funkcia, ktorá spúšťala identifikáciu systému na základe nameraných dát. Následne sa identifikoval systém 2krát pre spodný a horný skok

```
function [J, S]=krit(par, u, t, y)
k=par(1);
T=par(2);
ksi=par(3);
S = tf(k,[T*T 2*T*ksi 1]);
%T2=par(4);
%S = tf(k,conv([T*T 2*T*ksi 1],[T2 1]));
ys = lsim(S, u, t);
J= sum((y-ys).^2);
|
plot(t, [ys y])
pause(0.05)
```

Obr. 27 Funkcia vytvorená na identifikáciu systému

Táto funkcia dokáže podľa nastavenia identifikovať systém druhého a tretieho rádu.

#### 5.1.1 Identifikácia aplikovaná na plošine a motore Road

Pri meraní motora a plošiny Road sa zvolila identifikácia systému druhého rádu a vytvárala sa z merania číslo 6 (Obr. 17 v polohe 2). Identifikácia sa vytvárala zo spodného skoku systému v čase 45 až 46 sekúnd (pracovný bod) a z horného skoku systému v čase 50 až 51 sekúnd (pracovný bod). Kvôli správne fungovaniu identifikácie sa systém vždy položil do nuly (hodnoty začínali v 0).

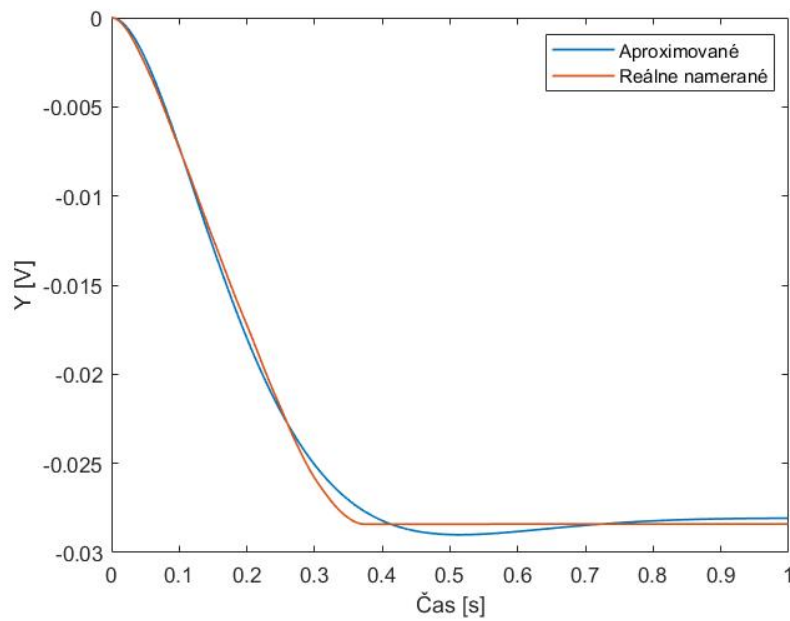
##### Model identifikácie v čase 45 až 46 sekúnd:

$$G_1(s) = \frac{k}{T^2s^2 + 2T\xi s + 1} = \frac{-0,00803}{0,01219s^2 + 0,1632s + 1} \quad (4)$$

Jeho kvadratické kritérium:

$$J = 1,9148 \cdot 10^{-4}$$

Jeho grafické vyhodnotenie:



Obr. 28 Identifikácia druhého rádu v čase 45 až 46 sekúnd

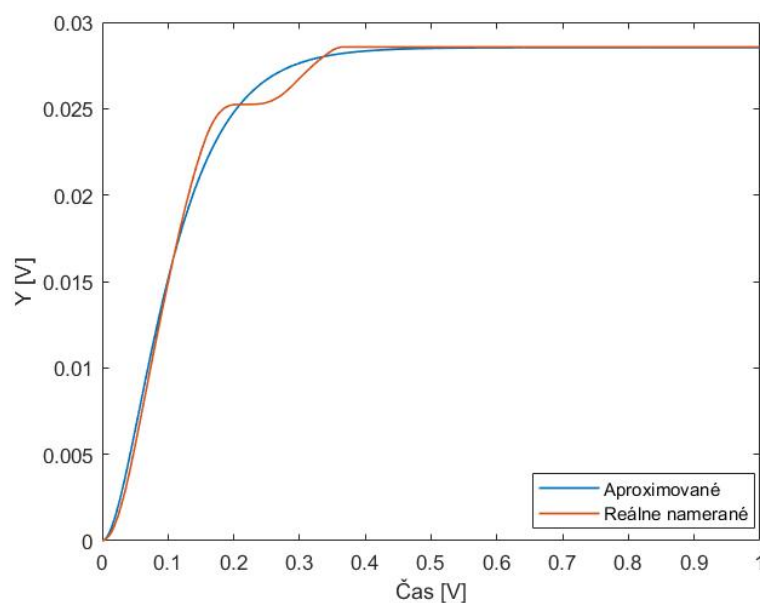
**Model identifikácie v čase 50 až 51 sekúnd:**

$$G_2(s) = \frac{k}{T^2s^2 + 2T\xi s + 1} = \frac{-0,008153}{0,003147s^2 + 0,1128s + 1} \quad (5)$$

Jeho kvadratické kritérium:

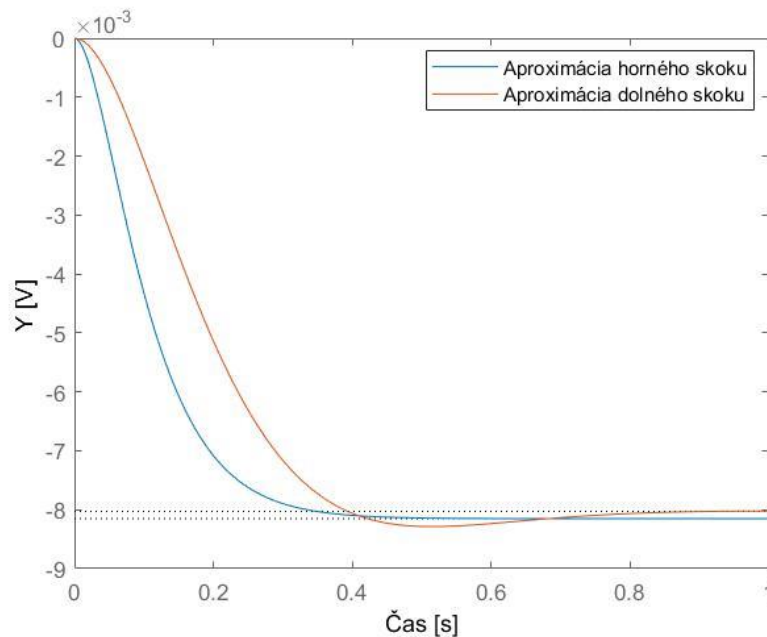
$$J = 2,6795 \cdot 10^{-4}$$

Jeho grafické vyhodnotenie:



Obr. 29 Identifikácia druhého rádu v čase 50 až 51 sekúnd

Výsledná identifikácia merania číslo 6 motora a plošiny Road (Obr. 17 v polohe 2):



Obr. 30 Výsledná identifikácia druhého rádu

Z výsledných identifikácií druhého rádu je vidieť, že presnejšie sa ju podarilo určiť podľa kvadratického kritéria pri spodnom skoku, čiže v čase 45 až 46 sekúnd. Z výsledných identifikácií sa ďalej dá vypočítať napríklad PID regulátor.

### 5.1.2 Identifikácia aplikovaná na plošine a motore Vehicle

Pri meraní motora a plošiny Vehicle sa zvolila identifikácia systému tretieho rádu, kvôli lepším výsledkom a vytvárala sa z merania číslo 4 (Obr. 22 v polohe 2). Identifikácia sa vytvárala zo spodného skoku systému v čase 45 až 47 sekúnd (pracovný bod) a z horného skoku systému v čase 50 až 52 sekúnd (pracovný bod). Kvôli správne fungovaniu identifikácie sa systém vždy položil do nuly.

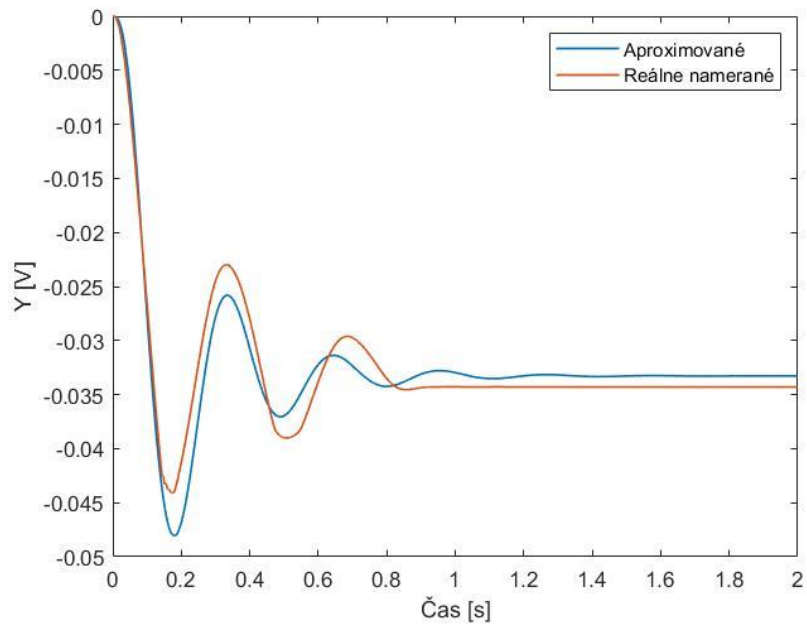
#### Model identifikácie v čase 45 až 47 sekúnd:

$$G_3(s) = \frac{k}{As^3 + Bs^2 + Cs + 1} = \frac{-0,008319}{5,593 \cdot 10^{-5}s^3 + 0,002815s^2 + 0,04456s + 1} \quad (6)$$

Jeho kvadratické kritérium:

$$J = 0,0073$$

Jeho grafické vyhodnotenie:



Obr. 31 Identifikácia tretieho rádu v čase 45 až 47 sekúnd

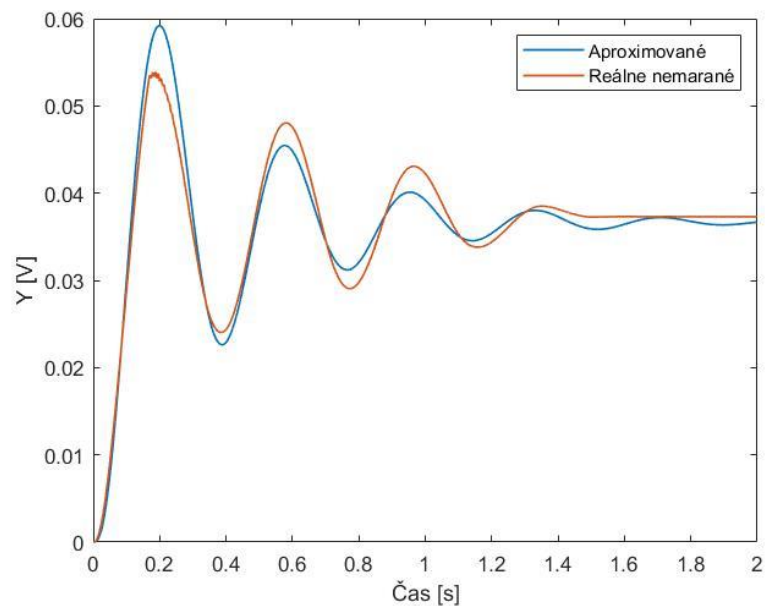
**Model identifikácie v čase 50 až 52 sekúnd:**

$$G_4(s) = \frac{k}{As^3 + Bs^2 + Cs + 1} = \frac{-0,009171}{3,777 \cdot 10^{-5}s^3 + 0,003711s^2 + 0,02832s + 1} \quad (7)$$

Jeho kvadratické kritérium:

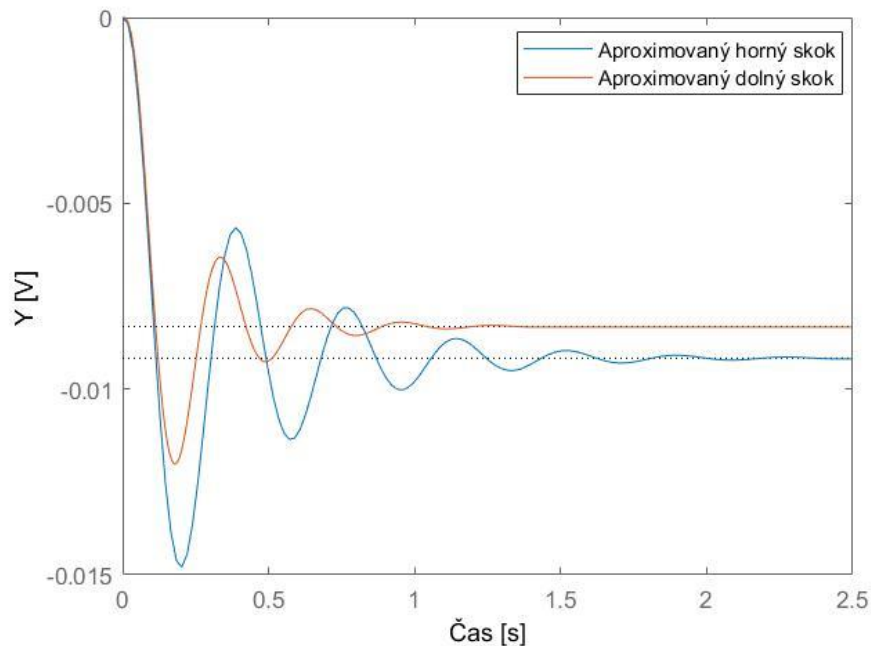
$$J = 0,0073$$

Jeho grafické vyhodnotenie:



Obr. 32 Identifikácia tretieho rádu v čase 50 až 52 sekúnd

Výsledná identifikácia merania číslo motora a plošiny Vehicle (Obr. 22 v polohe 2):



Obr. 33 Výsledná identifikácia tretieho rádu

Z výsledných identifikácií tretieho rádu je vidieť, že podľa kvadratického kritéria sa identifikácie v spodných a horných skokových hodnotách zhodujú. Z výsledných identifikácií sa dá taktiež vypočítať napríklad PID regulátor.

## 5.2 Nelineárny model

Na tvorbu nelineárneho modelu sa vytvorilo meranie, ktoré zisťovalo akúsi veľkosť trenia, čiže minimálny akčný zásah, pri ktorom sa sústava pohne.

### 5.2.1 Nelineárny model motora Road

Pri tomto meraní sa v programe Matlab na vstup motora, ktorý hýbe s plošinou predstavujúcou cestu priviedol signál v zmysle rampy. Táto rampa sa nastavila na 0,1 V, čiže rampa sa zväčšovala o 0.1 jednotky na jednotkovú zmenu na osi x. Pri meraní boli použité dve začiatkové pozície a to poloha 1 a poloha 2 (Obr. 10). Následne sa rampa v polohe 1 (Obr. 10) spúšťala smerom nahor (5krát), pri spúšťaní rampy smerom nadol sa merania nerobili z dôvodu okamžitého vyskočenia sústavy z dorazu. Pri polohe 2 (Obr. 10) bol postup rovnaký, čiže rampa sa spúšťala smerom nahor (5krát) a potom smerom nadol (5krát). Z výsledných meraní sa vyhotovili priemerné hodnoty minimálneho akčného zásahu, pri ktorom sa sústava pohla.

**Nelineárny model pre polohu 1:**

$$u > 8 \cdot 10^{-4} \text{ V} \Rightarrow u_1 = u - 8 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

$$u < 0 \text{ V} \Rightarrow u_1 = u - 0 \text{ V}$$

$$0 \text{ V} \leq u \leq 8 \cdot 10^{-4} \text{ V} \Rightarrow u_1 = 0 \text{ V}$$

Pri polohe 1 (Obr. 10) je minimálny akčný zásah, kedy sa sústava pohne do kladných hodnôt  $8 \cdot 10^{-4} \text{ V}$  a minimálny akčný zásah, kedy sa sústava pohne do záporných hodnôt je  $0 \text{ V}$ , pretože poloha 1 je pri dolnom doraze a sústava pri pohybe vyskočí hneď z dorazu. Hodnoty  $u$  predstavujú minimálny akčný zásah a hodnoty  $u_1$  predstavujú akčný zásah sústavy.

**Nelineárny model pre polohu 2:**

$$u > 8 \cdot 10^{-4} \text{ V} \Rightarrow u_1 = u - 8 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

$$u < -9,2 \cdot 10^{-5} \text{ V} \Rightarrow u_1 = u - (-9,2 \cdot 10^{-5}) \text{ V}$$

$$-9,2 \cdot 10^{-5} \text{ V} \leq u \leq 8 \cdot 10^{-4} \text{ V} \Rightarrow u_1 = 0 \text{ V}$$

Pri polohe 2 (Obr. 10) je minimálny akčný zásah, kedy sa sústava pohne do kladných hodnôt  $8 \cdot 10^{-4} \text{ V}$  a minimálny akčný zásah kedy sa sústava pohne do záporných hodnôt je  $-9,2 \cdot 10^{-5} \text{ V}$ . Hodnoty  $u$  predstavujú minimálny akčný zásah a hodnoty  $u_1$  predstavujú akčný zásah sústavy.

**5.2.2 Nelineárny model motora Vehicle**

Pri tomto meraní sa v programe Matlab na vstup motora, ktorý hýbe s plošinou predstavujúcou vozidlo priviedla taktiež rovnaká rampa (5.2.1). Pri plošine predstavujúcej vozidlo sa poloha nenastavovala, pretože jeho poloha sa dá nastaviť iba pozíciou plošiny predstavujúcej cestu a tá bola pri každom meraní rovnaká. Následne sa rampa spúšťala smerom nahor (5krát) a potom smerom nadol (5krát). Z výsledných meraní sa vyhotovili priemerné hodnoty minimálneho akčného zásahu, pri ktorom sa sústava pohla.

**Nelineárny model:**

$$u > 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ V} \Rightarrow u_1 = u - 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

$$u < -9,8 \cdot 10^{-5} \text{ V} \Rightarrow u_1 = u - (-9,8 \cdot 10^{-5}) \text{ V}$$

$$-9,8 \cdot 10^{-5} \text{ V} \leq u \leq 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ V} \Rightarrow u_1 = 0 \text{ V}$$

Minimálny akčný zásah, kedy sa sústava pohne do kladných hodnôt je  $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ V}$  a minimálny akčný zásah kedy sa sústava pohne do záporných hodnôt je  $-9,8 \cdot 10^{-5} \text{ V}$ . Hodnoty  $u$  predstavujú minimálny akčný zásah a hodnoty  $u_1$  predstavujú akčný zásah sústavy.



## 6 ZADANIE LABORATÓRNEJ ÚLOHY

Navrhlo sa zadanie laboratórnej úlohy zaoberajúcej sa laboratórnou sústavou „Active Suspension“ ktorá je cieleňá na študentov bakalárskeho stupňa a nachádza sa v učebni na Fakulte aplikovanej informatiky – UTB Zlín.

Konkrétne sa jedná o predmet AP4LR - Laboratórium reálnych modelov, cieľom tohto predmetu je získanie základných praktických zručností v oblasti riadenia procesov.

Toto zadanie obsahuje 7 úloh, ktoré má študent vypracovať a vytvoriť z nich protokol.

Navrhnuté úlohy sú prispôsobené znalostiam študentov a poskytujú popisy aj s potrebným oboznámením sa so sústavou.

Navrhnuté úlohy v českom a slovenskom jazyku spolu so vzorovým protokolom sú obsahom priloženého CD. Na priloženom CD sa nachádza kompletné znenie zadania.

### 6.1 Zadanie

#### Úloha 1: Meranie statickej charakteristiky systému Active Suspension pre plošinu Road

Výsledkom tejto úlohy má byť nameranie statickej charakteristiky pre motor a plošinu Road.

Pri meraní nastavíme ručne spodnú hmotu ku spodného dorazu (viz Obr. 4) a po dokončení merania sa táto pozícia musí vždy nastaviť ručne. Do vstupného bloku nastavíme postupne hodnoty odpovedajúce pomalému chodu motora až po rýchli chod motora (Príliš vysoké hodnoty môžu spôsobiť vyskočenie sústavy z dorazu viz Obr. 3). Meranie opakujeme 5 krát.

#### Úloha 2: Identifikácia systému

Vykonajte identifikáciu sústavy vo zvolenom pracovnom bode pre spodný motor a hladinu Road.

Druhého rádu:

$$G_2(s) = \frac{k_2}{T_2^2 s^2 + 2T_2 \xi_2 s + 1}$$

Vyhodnoťte identifikáciu pomocou kvadratického kritéria a graficky.

#### Úloha 3: Návrh PID regulácie

Na základe predchádzajúceho merania navrhните PID regulátor.

#### **Úloha 4: Meranie statickej charakteristiky systému Active Suspension pre plošinu Vehicle**

Pri meraní nastavíme ručne spodnú hmotu na stred medzi dorazy (viz Obr. 5) a postupujeme rovnako ako pri úlohe 2.

#### **Úloha 5: Identifikácia systému**

Vykonajte identifikáciu sústavy vo zvolenom pracovnom bode pre horný motor a hladinu Vehicle Body.

Druhého rádu: 
$$G_2(s) = \frac{k_2}{T_2^2 s^2 + 2T_2 \xi_2 s + 1}$$

Vyhodnoťte identifikáciu pomocou kvadratického kritéria a graficky.

#### **Úloha 6: Návrh PID regulácie**

Na základe predchádzajúceho merania navrhните PID regulátor.

#### **Úloha 7: Regulácia spodnej hladiny „Road“ sústavy a pozície hornej hladiny „Vehicle Body“ v globálnych súradniciach**

Pre reguláciu spodnej hladiny Road sa zvolí riadiaci signál spodného motora ako akčný zásah. Regulácia hornej hladiny Vehicle bude vo výsledku regulácia pozície dosky voči telu sústavy.

## ZÁVER

Hlavnou úlohou tejto práce bolo uviesť systém aktívneho tlmenia a jeho laboratórnu sústavu, na ktorej sa vypracovávali merania statických a dynamických charakteristík a vytvárali sa lineárne a nelineárne modely. Následne sa navrhovali úlohy pre študentov bakalárskeho stupňa.

V teoretickej časti sa uviedol popis aktívneho tlmenia s jeho rozdelením, funkciami a použitím. Ďalej sa uviedli základné typy statických a dynamických charakteristík a popis sústavy aktívneho tlmenia, na ktorej sa vykonávali potrebné merania.

Praktická časť sa zaoberá meraniami aplikovanými na laboratórnej sústave aktívneho tlmenia navrhnutou spoločnosťou Quanser. Prvá časť sa zaoberá nameraním statických a dynamických charakteristík na plošine a motore Road a plošine a motore Vehicle, čiže na spodnej časti sústavy, ktorá predstavuje cestu a na hornej časti sústavy, ktorá predstavuje vozidlo. Pri dynamických charakteristikách sa merali v programovom prostredí Matlab/Simulink prechodové charakteristiky plošiny a motora Road, ktoré predstavujú pohyb sústavy od minimálnych vstupných skokových napätí až po maximálne vstupné skokové napätia, pri ktorých bol na vstup privádzaný obdĺžnikový signál (Obr. 12) – (Obr. 17). Z týchto meraní je vidieť, že najlepšie sa systém správa pri stredných až vyšších vstupných skokových napätiach (Obr. 16). Pri prechodových charakteristikách plošiny a motora Vehicle (Obr. 19) – (Obr. 22) boli merania vyhotovené rovnako ako pri plošine a motore Road a výsledkom je, že systém tiež pracuje najlepšie pri stredných až vyšších vstupných skokových napätiach (Obr. 21, Obr. 22). Obe hladiny Road a Vehicle nepracujú zle pri nízkych vstupných skokových napätiach ale ich pohyb z pozorovacieho hľadiska bol minimálny. Z prechodových charakteristík sa vytvorili statické charakteristiky v polohe 1 a v polohe 2 (Obr. 10). Pri plošine a motore Road je vidieť, že sa systém správa nelineárne (Obr. 23, Obr. 24) a pri plošine a motore Vehicle je vidieť, že správanie systému je ovplyvnené začiatočnou polohou, kde pri polohe 1 sa systém správa lineárne (Obr. 25) a pri polohe 2 sa správa nelineárne (Obr. 26).

Druhá časť sa zaoberá lineárnym a nelineárnym modelom, kde lineárny model bol vytvorený pomocou funkcie `fminsearch` v programovom prostredí Matlab a nelineárny model predstavuje minimálny akčný zásah, pri ktorom sa sústava pohla. Z výsledkov lineárneho modelu sa dá ďalej vypočítať vhodný PID regulátor na reguláciu sústavy a z nelineárneho modelu vieme určiť vhodný akčný zásah pre prácu na sústave.

Posledná časť sa zaoberá návrhom zadania laboratórnej úlohy zaoberajúcej sa laboratórnou sústavou „Active Suspension“, ktoré je cielené na študentov bakalárskeho stupňa. Konkrétne sa jedná o predmet AP4LR - Laboratórium reálnych modelov, kde je cieľom získanie praktických zručností v oblasti riadenia procesov. Toto zadanie obsahuje 7 úloh, ktoré má študent vypracovať a vyhotoviť z nich protokol. Úlohy sa navrhli tak, že sú prispôbené znalostiam študentov a poskytujú potrebný popis aj s oboznámením sa so sústavou. Zadanie je vypracované v slovenskom a českom jazyku a obsahuje vypracovaný vzorový protokol v slovenskom jazyku. Zadania spolu so vzorovým protokolom sú dostupné na priloženom CD.

**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY**

- [1], SHUCAI, Li. *Advanced Transportation*. Trans Tech Publications, 2011. ISBN 978-3-03785-244-6.
- [2], International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). *OVERVIEW OF ACTIVE SUSPENSION SYSTEM IN AUTOMOBILES* [online]. India, 2014-, Júl 2021, 2021(08) [cit. 2023-05-08]. ISSN 2395-0072. Dostupné z: <https://www.irjet.net/archives/V8/i7/IRJET-V8I7814.pdf>
- [3], Tein. TEIN. *TEIN For Your Driving Pleasure* [online]. USA: TEIN, 2023 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: [https://www.tein.com/products/edfc\\_active\\_pro.html](https://www.tein.com/products/edfc_active_pro.html)
- [4], THOMAS D., Gillespie, Taheri SAIED, Sandu CORINA a Duprey BENJAMIN L. *Fundamentals of Vehicle Dynamics (Revised Edition)*. 2021-12-20. SAE International, 2021. ISBN 978-1-4686-0176-3.
- [5], NAVRÁTIL, Pavel. *Automatizace: vybrané statě* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011 [cit. 2023-05-16]. ISBN 978-80-7318-935-8. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/18581>
- [6], Soustavy - dynamicke - charakteristika. *Dynamická charakteristika* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <http://skola.hellebrand.cz/text1011/au/soustavy-dynchar.pdf>
- [7], Quanser. *Quanser Innovate-Educate* [online]. Canada: Quanser, 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/>
- [8], Quanser. ACTIVE SUSPENSION. *Quanser* [online]. Canada: Quanser, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/active-suspension/>
- [9], Quanser. ACTIVE SUSPENSION. *Quanser* [online]. Canada: Quanser, 2023 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/active-suspension/#overview>
- [10], Tutorials Point. Matlab/Simulink. *Tutorialspoint* [online]. India: Tutorials Point, 2023 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: [https://www.tutorialspoint.com/matlab/matlab\\_simulink.htm#](https://www.tutorialspoint.com/matlab/matlab_simulink.htm#)
- [11], National Instruments. LabVIEW. *National Instruments* [online]. Austin: National Instruments, 2023 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview.html>

[12], Quanser. Quanser QPID. *QUARC Data Acquisition Card Support: Quanser QPID* [online]. Quanser, 2023 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://docs.quanser.com/quarc/documentation/qpid.html>

[13], Quanser. Q8-USB Data Acquisition Device. *Quanser Innovate-Educate* [online]. Canada: Quanser, 2023 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/q8-usb-data-acquisition-device/>

[14], Quanser. Q1-cRIO Module. *Quanser Innovate-Educate* [online]. Canada: Quanser, 2023 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.quanser.com/products/q1-crio-module/>

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK****Zoznam symbolov**

$A(\omega)$	Modul frekvenčného prenosu
$G(j\omega)$	Frekvenčný prenos
$G(s)$	Obrazový Laplaceov prenos
$G$	Prenosová funkcia
$H(s)$	Laplaceov obraz (spojitej) prechodovej funkcie
$h(t)$	Prechodová funkcia
$I(s)$	Laplaceov obraz (spojitej) impulznej funkcie
$i(t)$	Impulzná funkcia
$J$	Kvadratické kritérium
$j$	Imaginárna jednotka ( $j = \sqrt{-1}$ )
$t$	Čas (spojitý)
$Y$	Výstupná veličina
$\Delta U$	Vstupná veličina
$\varphi(\omega)$	Fáza frekvenčného prenosu
$\omega$	Uhlový kmitočet

**Zoznam skratiek**

ECU	Electronic control unit (Elektronicky riadiaci systém)
EDFC	Electronic damping force controller (Elektronický regulátor tlmiacej sily)
MR	Magnetoreologická kvapalina
PID	Proporcionálno Integračno Derivačný regulátor
USB	Universal Serial Bus

**ZOZNAM OBRÁZKOV**

Obr. 1 Viskózný tlmič [2] .....	11
Obr. 2 Elektromagnetické tlmenie znázornené v reze [2] .....	13
Obr. 3 EDFC systémové rozloženie [3] .....	14
Obr. 4 Komponenty odpruženia EDFC [3] .....	15
Obr. 5 Základné tvary dynamickej charakteristiky [6] .....	19
Obr. 6 Odozva systému na jednotkový (Heavisideov) skok [5] .....	20
Obr. 7 Odozva systému na jednotkový impulz [5] .....	21
Obr. 8 Laboratórna sústava aktívneho tlmenia [8] .....	23
Obr. 9 Popis jednotlivých súčastí sústavy [7] .....	25
Obr. 10 Ručné nastavenie počiatočného bodu .....	28
Obr. 11 Graf príkladného vstupného skokového napätia .....	29
Obr. 12 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 1 V .....	30
Obr. 13 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 1,5 V .....	30
Obr. 14 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 2 V .....	31
Obr. 15 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 2,5 V .....	31
Obr. 16 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 3 V .....	32
Obr. 17 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 3,5 V .....	32
Obr. 18 Graf príkladného vstupného skokového napätia .....	34
Obr. 19 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 1 V .....	34
Obr. 20 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 2 V .....	35
Obr. 21 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 3 V .....	35
Obr. 22 Graf merania so skokom vstupného napätia meniaceho sa o 4 V .....	36
Obr. 23 Graf statickej charakteristiky Road v polohe 1 .....	38
Obr. 24 Graf statickej charakteristiky Road v polohe 2 .....	38
Obr. 25 Graf statickej charakteristiky Vehicle v polohe 1 .....	39
Obr. 26 Graf statickej charakteristiky Vehicle v polohe 2 .....	40
Obr. 27 Funkcia vytvorená na identifikáciu systému .....	41
Obr. 28 Identifikácia druhého rádu v čase 45 až 46 sekúnd .....	42
Obr. 29 Identifikácia druhého rádu v čase 50 až 51 sekúnd .....	42
Obr. 30 Výsledná identifikácia druhého rádu .....	43
Obr. 31 Identifikácia tretieho rádu v čase 45 až 47 sekúnd .....	44
Obr. 32 Identifikácia tretieho rádu v čase 50 až 52 sekúnd .....	44
Obr. 33 Výsledná identifikácia tretieho rádu .....	45



## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Vstupné napätie motora Road.....	28
Tab. 2 Vstupné napätie motora Vehicle.....	33

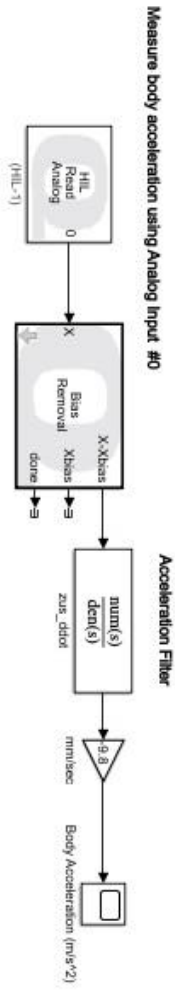
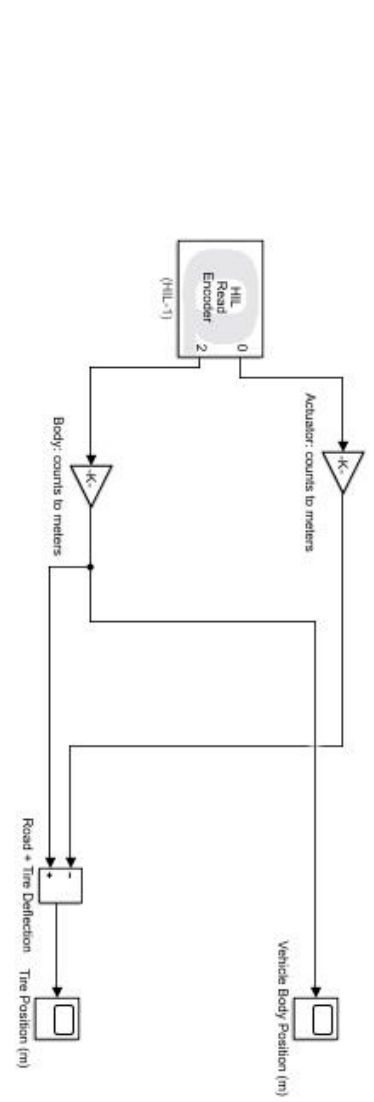
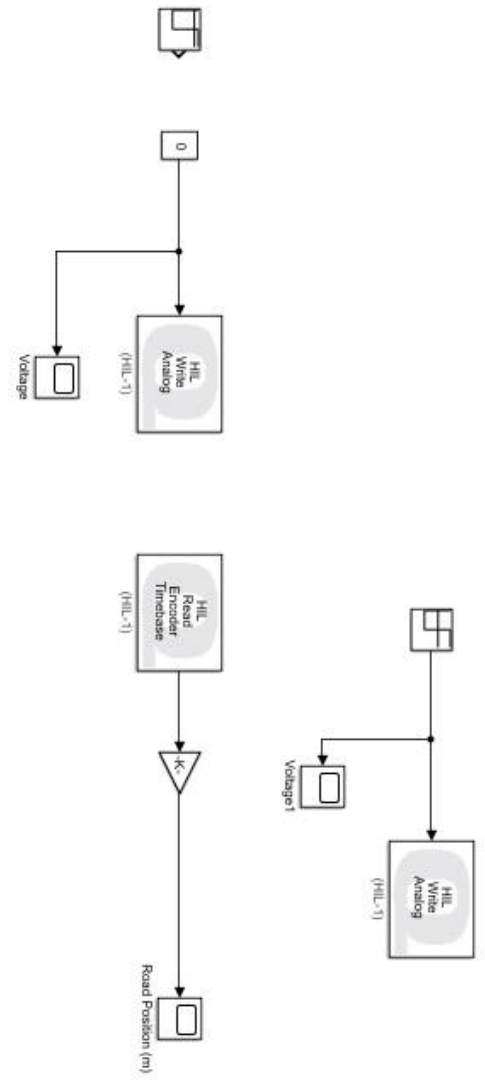
## ZOZNAM PRÍLOH

P I: Schéma zapojenia laboratórnej sústavy v programe Matlab/Simulink

P II: Schéma zapojenia určená pre navrhnuté zadanie v programe Matlab/Simulink

P III: CD s bakalárskou prácou, dvomi zadaniami, vypracovaným protokolom

# PRÍLOHA P I: SCHÉMA ZAPOJENIA LABORATÓRNEJ SÚSTAVY



# PRÍLOHA P II: SCHÉMA ZAPOJENIA URČENÁ PRE NAVRHNUTÉ ZADANIE

