

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

## ŘÍDICÍ SYSTÉM JEVIŠTNÍ DIVADELNÍ TECHNIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DAMIÁN MELO

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

# **ŘÍDICÍ SYSTÉM JEVIŠTNÍ DIVADELNÍ TECHNIKY**

THEATRE STAGE TECHNOLOGY CONTROL SYSTEM

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. DAMIÁN MELO**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**prof. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK**

BRNO 2013

## **Abstrakt**

Tématem této diplomové práce je řízení jevištních zařízení. V práci jsou rozebrány základní typy řízení, metody pro popis a identifikaci systémů a vlastnosti regulátorů. Práce obsahuje popis používaných jevištních zařízení a návrh vhodného řídicího systému. V rámci práce byl implementován osový regulátor a jeho činnost byla otestována na reálném zařízení.

## **Abstract**

The topic of the diploma thesis is control of theatre stage devices. The basic types of control, methods for description and identification of systems and properties of regulators are discussed. Project includes description of theatre technology and proposal for an appropriate control system. Also, a axis controller was implemented and tested on a real stage device.

## **Klíčová slova**

jeviště, divadlo, řídicí systém, PID, regulace, osový regulátor

## **Keywords**

stage, theater, control system, PID, regulation, axis controller

## **Citace**

Damián Melo: Řídicí systém jevištní divadelní techniky, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

# Řídicí systém jevištní divadelní techniky

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Dr. Ing. Pavla Zemčíka.

.....  
Damián Melo  
21. května 2013

## Poděkování

Rád by som sa poďakoval vedúcemu svojej práce profesorovi Pavlovi Zemčíkovi a zamestnancom firmy ELSEREMO Stage Technology Ing. Pavlovi Župkovi a Ing. Tomášovi Lancovi za cenné rady a pomoc pri vytváraní a testovaní mojej práce.

© Damián Melo, 2013.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Javisková technika</b>	<b>3</b>
2.1	Scénická mechanika . . . . .	3
2.2	Riadenie javiskovej techniky . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Identifikácia a popis systému</b>	<b>9</b>
3.1	Identifikácia systému . . . . .	9
3.2	Popis systému . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Riadenie a regulácia</b>	<b>16</b>
4.1	Regulátor . . . . .	18
4.2	Servomechanizmus . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Analýza a návrh riešenia</b>	<b>23</b>
5.1	Návrh riešenia . . . . .	24
5.2	Zvolená implementácia a testovanie . . . . .	25
5.3	Požadované parametre riešenia . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Implementácia</b>	<b>30</b>
6.1	Generátor pohybu . . . . .	31
6.2	Úprava zadania . . . . .	39
6.3	Prepojenie so zariadením . . . . .	40
<b>7</b>	<b>Testovanie</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>Záver</b>	<b>48</b>

# Kapitola 1

## Úvod

V súčasnosti si už skoro nevieme náš život predstaviť bez rôznych elektronických zariadení, ľahčujúcich nám každodenné problémy. Používame ich bežne v domácnosti, v práci aj na verejnosti. Avšak málokto si pri pozeraní divadelného predstavenia alebo počúvaní opery uvedomí, koľko úsilia a technického vybavenia je potrebné na jeho prevedenie.

Javisková technológia prešla dlhým vývojom od ručných, až po elektricky či hydraulicky ovládané zariadenia. Na jej riadenie a pohyb sa kladú vysoké požiadavky na presnosť a hlavne bezpečnosť, nakoľko charakter divadelného prostredia neumožňuje hercom používať ochranné prvky a pomôcky. Vedenie divadiel požaduje jednoduchý a spoľahlivý systém riadenia celého divadla, ktorý by pri minimálnom počte obsluhujúcich technikov dokázal pokryť všetky nároky na prevádzku divadelnej techniky. Preto je snaha upraviť existujúce systémy riadenia podľa požiadaviek divadelného prostredia, alebo vytvoriť nový špecializovaný systém pre divadelnú technológiu.

Táto práca nadväzuje na moju bakalársku prácu, ktorej výstupom bol jednoduchý grafický simulátor divadelného javiska. Tému práce sa venujem aj mimo školy, spoluprácou s firmou ELSEMEMO Stage Technology. Cieľom práce je oboznámiť sa s problematikou riadenia a riadiacich systémov a vytvoriť návrh riadiaceho systému vhodného pre použitie v špecifických podmienkach javiskovej technológie. Výstupom práce je implementácia hlavnej časti riadiaceho systému – osového regulátoru a jeho otestovanie na reálnom zariadení divadelnej technológie.

Druhá kapitola práce obsahuje základný popis používanej javiskovej techniky pre lepšie pochopenie riešenej problematiky. Ďalej obsahuje rozbor dvoch základných princípov riadenia v súčasných divadlách. Správne riadenie nie je možné bez dobrej znalosti riadeného systému a dejov v ňom prebiehajúcich. Teoretické poznatky o identifikácii a popise systémov sú zhrnuté v tretej kapitole. Štvrtá kapitola popisuje teoretické princípy riadenia a regulácie a špeciálny prípad regulačného obvodu – servomechanizmus. Piata kapitola obsahuje návrh celkového systému riadenia a zvolenú platformu pre implementáciu osového regulátoru. Súčasťou kapitoly je aj popis bodového ťahu, na ktorom prebiehali záverečné testy regulátoru. Šiesta kapitola popisuje implementované riešenie a princípy použité na jeho správnu funkčnosť. Predposledná, siedma kapitola, obsahuje výsledky testov so skutočným zariadením. Posledná kapitola, Záver, zhodnocuje celkovú prácu, navrhuje možnosti jej pokračovania a vylepšenia.

## Kapitola 2

# Javisková technika

*Javiskovou technikou sa v rámci divadelnej prevádzky rozumie súbor technických prostriedkov, ktoré sa podieľajú na tvorbe, stavbe a zmenách divadelných scén[1].*

Javisková technika pozostáva z veľkého množstva zariadení potrebných na vytvorenie rozličných scén a ich jednoduchú prestavbu, zariadení na ozvučenie a osvetlenie hľadiska a javiska.

Podľa požiadaviek na technické vybavenie a funkčné možnosti tieto zariadenia delíme na:

- Scénickú mechaniku
- Scénické osvetlenie
- Elektroakustické ozvučenie

Z hľadiska riadenia je dôležitá hlavne scénická mechanika, preto sa scénickým osvetlením a elektroakustickým ozvučením nebudeme ďalej zaoberať. Nasledujúci popis scénickej mechaniky zahrnuje len základné a najpoužívanejšie typy zariadení. Tieto zariadenia sú hlavnými prvkami takmer každého divadla a výsledný riadiaci systém musí byť schopný riadenia veľkej väčšiny z nich. Podrobný prehľad zariadení aj s príkladmi ich použitia je možné nájsť v [2] a [3].

### 2.1 Scénická mechanika

Do scénickej mechaniky patria všetky pevné aj pohyblivé konštrukcie a zariadenia inštalované v divadelnom priestore [3].

Je možné vytvoriť takmer ľubovoľné prvky scénickej mechaniky podľa konkrétnych požiadaviek realizácie v danom divadle. Avšak základné a spoločné prvky môžeme nájsť skoro v každom väčšom divadle.

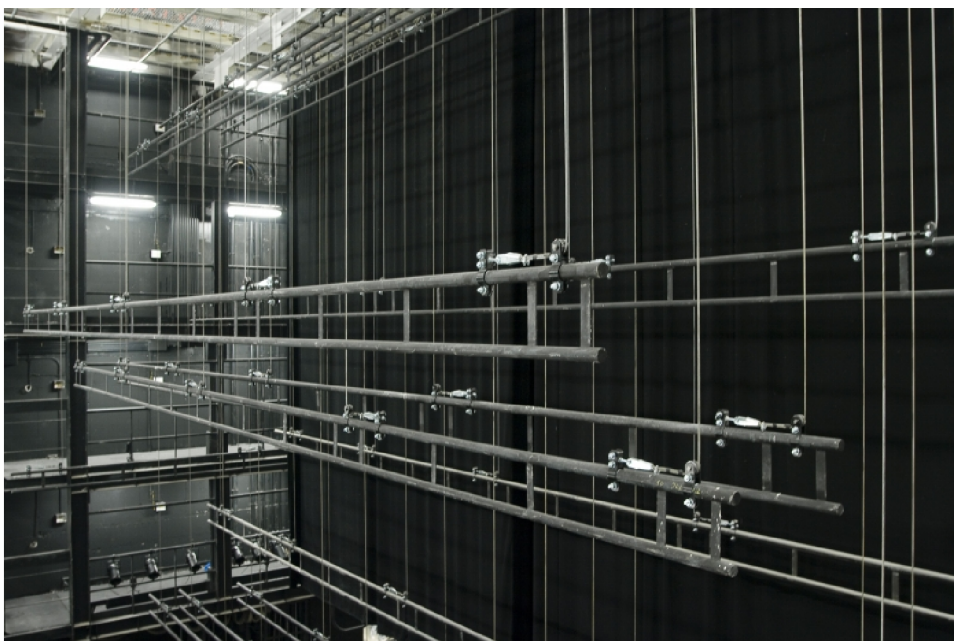
Scénická mechanika sa zvykne deliť do dvoch základných skupín, kde deliacou líniou je hracia plocha javiska [2]:

- Horná scénická mechanizácia
- Dolná scénická mechanizácia

## Horná scénická mechanizácia

Nachádza sa nad hracou plochou javiska. Základnými prvkami sú:

- Opona – slúži na zakrytie proscéniového otvoru javiska. Na javisku sa nachádza viacero rôznych typov opon s rôznymi funkciami:
  - požiarna opona – oddeľuje priestor javiska a hľadiska z dôvodu požiarnej bezpečnosti stavby. Nevyužíva sa počas predstavení, jej činnosť je čisto bezpečnostná a je predpisovaná bezpečnostnými normami.
  - akustická opona – oddeľuje priestory javiska a pomocných javísk z hľadiska akustického útlmu.
  - slávnostná opona – výtvarne riešená opona. Využíva sa pri zahájení alebo prestávke počas predstavenia.
  - hracia opona – opona využívaná počas celého predstavenia.
- Ťahy – Slúžia na realizáciu vertikálneho pohybu nad javiskom. Využívajú sa na zavesenie a následnú rýchlu výmenu dekorácií, častí kulís alebo osvetľovacích a iných prevádzkových zariadení. Delíme ich na bodové a prospektové ťahy.
  - Prospektový ťah je zakončený ťahovou tyčou. Jej dĺžka je rovnaká ako šírka hracej plochy. Slúži na zavesenie dekorácie alebo iného zariadenia (obrázok 2.1).
  - Bodový ťah je ukončený závesnou hruškou, na ktorú je možné zavesiť jednotlivé zariadenia prípadne samostatné časti kulís.



Obrázek 2.1: Prospektové ťahy nad javiskom

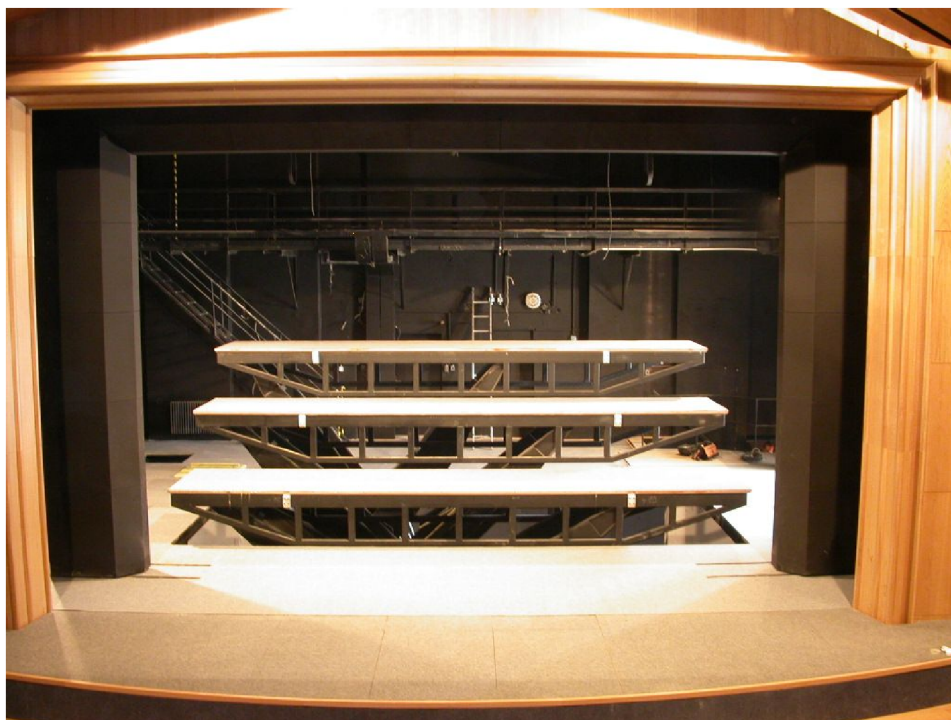
Zdroj: <http://www.elseremo-stage.com/cz/prospektovy-tah>



## Dolná scénická mechanizácia

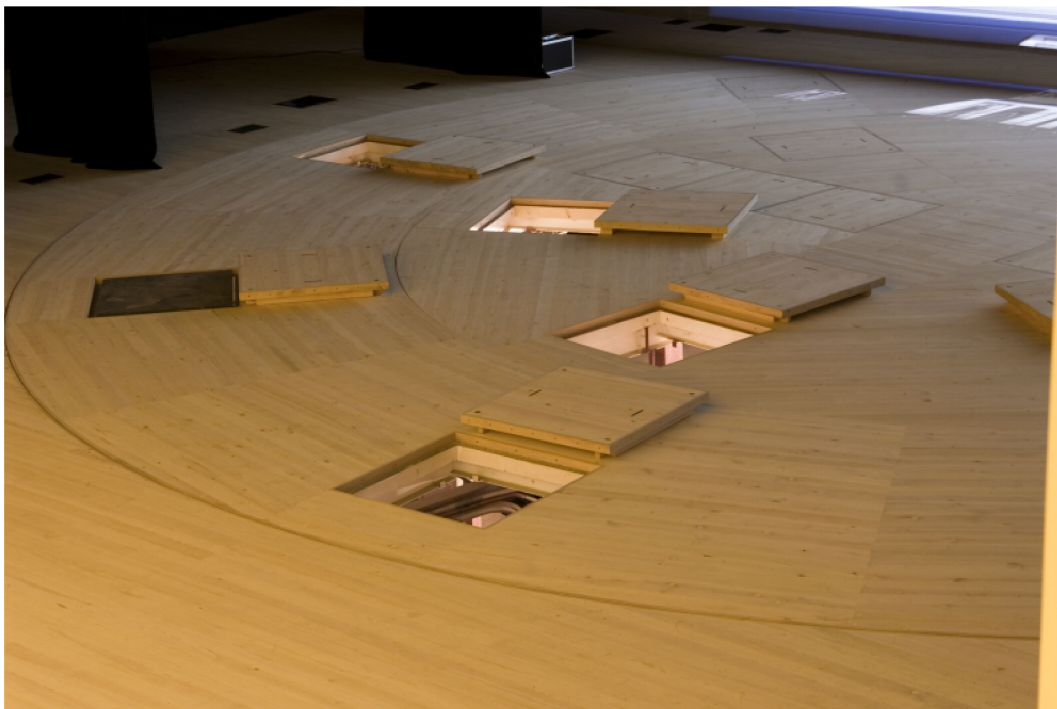
Tvorí hraciu plochu javiska. Základnými prvkami sú:

- Točňa – realizuje scénický otáčavý pohyb. Otáčanie slúži ako scénický efekt pri otvorenej opone, alebo na rýchlu prestavbu scény. Podľa prevedenia a funkčnosti existuje viacero typov, napr. tanierové, valcové, kazetové, skladacie. Jej súčasťou môžu byť aj iné zariadenia dolnej scénickej mechanizácie, ako stoly alebo prepady. Niektoré riešenia dokonca umožňujú zmeniť sklon otáčania a vytvoriť tak šikmú točňu (obrázok 2.3).
- Zdvíhací stôl – Časť hracej plochy javiska vykonávajúca zvislý scénický pohyb. Používa sa ako scénický efekt alebo pri prestavbe scény. Niektoré stoly umožňujú naklonením svojej hornej plochy vytvoriť reliéf javiskovej plochy. Podľa funkcie ich delíme na:
  - Stoly hracej plochy – ich nastavením do rôznych polôh sa vytvárajú scénografické aspekty predstavenia (obrázok 2.2)
  - Stoly orchestriska – slúžia na vytvorenie podlahy orchestriska a nastavenie jej výšky vzhľadom k hracej ploche. V hornej polohe sú súčasťou hracej plochy javiska, v spodných polohách umožňujú skryť orchester pod úroveň hracej plochy.
- Prepad – výťahové zariadenie umožňujúce spojenie podjaviskového priestoru s úrovňou hracej plochy. Používa sa na vytvorenie efektu objavenia sa osoby alebo menšieho predmetu na hracej ploche.



Obrázok 2.2: Javisťkové stoly

Zdroj: <http://www.elseremo.com/galerie.php>



Obrázek 2.3: Javisková točňa s otvormi pre prepady  
Zdroj: <http://www.elseremo-stage.com/cz/otocna-zarizeni/>

## 2.2 Riadenie javiskovej techniky

Predchádzajúca sekcia popisuje javiskovú techniku z jej priestorového umiestnenia a funkcie, na ktorú sa najčastejšie využíva. Z jej popisu je zrejmé, že jej hlavnou úlohou je zmenou svojej polohy, alebo zmenou polohy na nej umiestnených dekorácií, pretvoriť scénu javiska.

Na pohyb jednotlivých zariadení sú kladené veľké nároky na presnosť a bezpečnosť. V priestoroch javiska sa bežne pohybujú herci a je preto neprípustné, aby zariadenie svojim pohybom niekoho zranilo alebo usmrtilo.

Divadelné zariadenia môžeme podľa zdroja ich pohybu rozdeliť na manuálne a motorické. Manuálne zariadenia sú ovládané ručne, pôsobením obsluhy zariadenia. Patria sem napríklad ručné prospektové ťahy alebo menšie ručné opony. Motorické zariadenia (elektrické, pneumatické, hydraulické) môžu byť taktiež ovládané „ručne“, kde smer a rýchlosť ich pohybu ovláda divadelný technik ručným analógovým ovládaním. Takého ovládanie je však častejšie chápané ako servisné či záložné. Hlavný dôraz sa kladie na možnosť ovládať celé javisko (všetky motorické zariadenia) z jedného ovládacieho miesta – ovládacieho pultu.

Ovládací pult umožňuje obsluhu vybrať zariadenie alebo skupinu zariadení, ktoré chce v danej chvíli ovládať, a jednoduchými povelmi zmeniť polohu zariadení požadovaným spôsobom. Pult je zvyčajne predstavovaný dotykovým displejom s niekoľkými hardwarovými komponentmi (ovládacie páky, tlačidlo núdzového zastavenia, rôzne pomocné tlačidlá). Umožňuje obsluhu ovládanie jednotlivých zariadení, vytváranie skupín zariadení, ktoré sa majú pohybovať spoločne, preddefinovať pohyby zariadení v predstihu a následne tento pohyb vykonať.

Funkciou pultu je však iba vytvoriť „predpis“ aktuálneho pohybu, nie vykonanie samotného pohybu zariadení. Pult zastáva funkciu jednoduchého a prehľadného užívateľského rozhrania. Samotný pohyb zariadení podľa požiadaviek z pultu vykonávajú systémy riadenia.



Obrázek 2.4: Ovládací pult spoločnosti SBS

Zdroj:

<http://www.sbs-buehrentechnik.de/en/services/control-engineering/operating-system/>

## Systemy riadenia

V súčasnosti by sme mohli spôsoby riadenia u existujúcich divadiel podľa použitej technológie rozdeliť do dvoch hlavných skupín:

- riadenie pomocou PLC – programovateľných logických automatov,
- riadenie pomocou osových regulátorov.

Spôsob riadenia pomocou programovateľných logických automatov spočíva v obslužení všetkých zariadení na javisku pomocou jedného (prípadne niekoľkých) PLC. Ide o centralizovaný spôsob riadenia. Riadiace PLC zbiera údaje od všetkých pripojených zariadení. Spracováva dáta zo snímačov, hodnoty z frekvenčného meniča (u elektricky ovládaných zariadení) a funkciu bezpečnostných prvkov. Ide o centralizované riadenie, kde funkcia celého divadla závisí na jednom (prípadne na malom počte) hlavnom prvku. V prípade jeho nefunkčnosti sú nefunkčné všetky nim ovládané javiskové zariadenia. Príkladom môže byť firma Elseremo Stage Technology s ich systémom založeným na priemyselných počítačoch firmy Beckhoff.

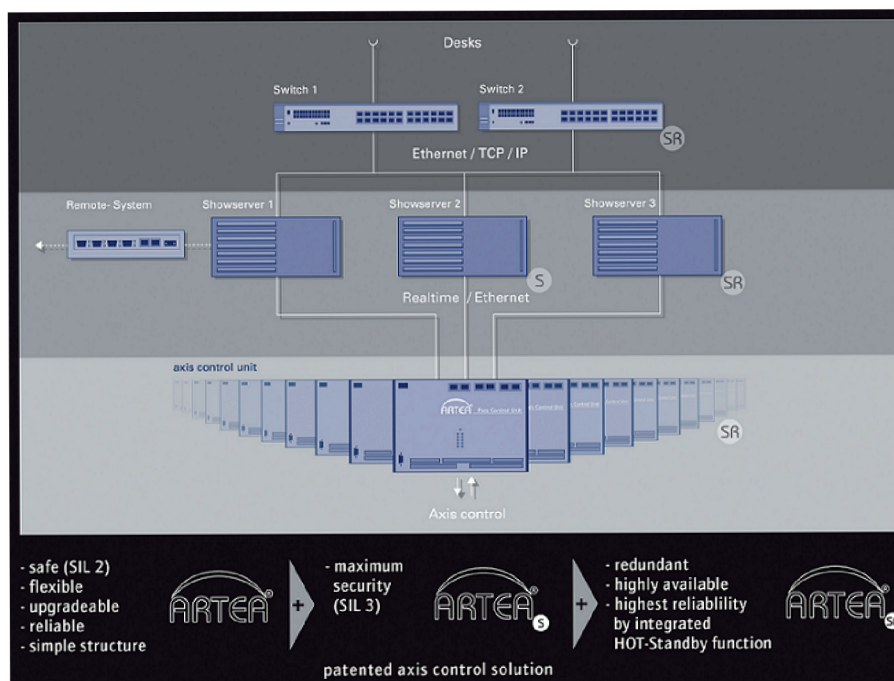
Naopak tomu, spôsob riadenia pomocou osových regulátorov je decentralizovaný. Každý regulátor riadi jedno konkrétne zariadenie. Získava informácie o jeho stave (údaje zo snímačov, frekvenčného meniča), kontroluje bezpečnostné prvky a riadi jeho pohyb. Výpadok

jedného osového regulátora nemá za následok nefunkčnosť celého systému. Znefunkční sa iba konkrétne zariadenie ním ovládané. Súčasťou decentralizovaného systému môže byť aj spoločný prvok spájajúci všetky zariadenia – server, ktorý však nemá riadiacu úlohu. Slúži ako prostredník medzi ovládacím pultom a osovými regulátormi. Príkladom môže byť riešenie používané firmou EAE znázornené na obrázku 2.6.



Obrázek 2.5: PLC od firmy Beckhoff

Zdroj: [http://www.beckhoff.fi/english.asp?industrial\\_pc/default.htm](http://www.beckhoff.fi/english.asp?industrial_pc/default.htm)



Obrázek 2.6: Decentralizovaný systém riadenia firmy EAE

Zdroj: <http://www.eae-coswig.de/sites/default/files/downloads/ARTEA-GB.pdf>

## Kapitola 3

# Identifikácia a popis systému

Pre správnu funkciu riadiaceho systému je potrebné poznať a popísať chovanie riadeného objektu, a na tomto základe vybrať a vytvoriť vhodný princíp jeho riadenia.

Nasledujúca kapitola zhŕňa a spája poznatky získané z [4],[5], [6] a [7] kde je možné nájsť ďalšie a podrobnejšie informácie.

Riadená sústava je v systémovej interpretácii zjednodušená, abstrahovaná (modelová) predstava o riadenom objekte a v ňom prebiehajúcich procesoch dôležitých pre riadenie [4].

Systém je obecné súbor prvkov, medzi ktorými existujú vzájomné väzby a ako celok má určité vzťahy k svojmu okoliu.

Každý systém je charakterizovaný dvoma základnými vlastnosťami [5]:

- Chovanie systému – vyjadruje jeho vzťahy k okoliu. Predstavuje závislosť medzi podnetmi z okolia na vstupy systému a príslušnými odozvami na jeho výstupoch.
- Štruktúra systému – vyjadruje vnútorné funkčne vzťahy systému. Popisuje spôsob usporiadania vzájomných väzieb medzi prvkami systému a aj ich chovanie.

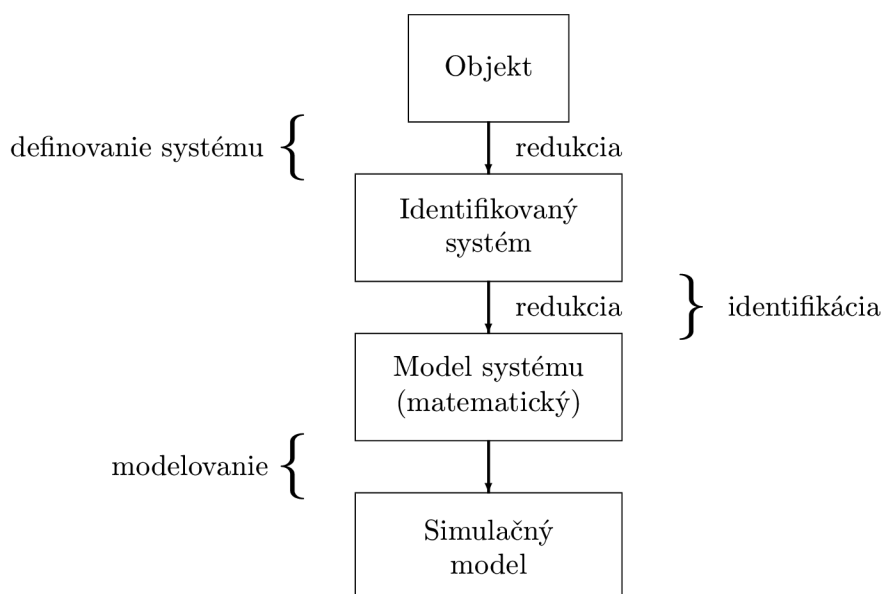
Obe vlastnosti sú vo veľmi úzkom vzťahu – určitej štruktúre odpovedá jednoznačne určené chovanie, určitému chovaniu odpovedá trieda štruktúr definovaná týmto chovaním. Ak dokážeme na zvolenom objekte definovať jeho časti a vzťahy medzi nimi, tak sme na danom objekte definovali systém.

### 3.1 Identifikácia systému

Pri návrhu riadenia technického zariadenia je nutné získať jeho model popisujúci väzby medzi príčinami a následkami, aby bolo vopred možné odhadnúť chovanie riadeného systému [6].

Model systému musí vystihovať podstatné väzby medzi príčinami a ich dôsledkami, ktoré sú významné z hľadiska požadovaného cieľa.

Pri tvorbe modelu najskôr definujeme identifikovaný systém. Vonkajšie príčiny odpovedajú vstupom systému, pozorované príznaky jeho výstupom, prípadne stavovým premenným. Pri definovaní dochádza k redukcii zložitosti. Do identifikovaného systému zahrnujeme iba skúmané súvislosti. Pri tvorbe matematického modelu dochádza k ďalšej redukcii – zanedbaním nevýznamných dejov a vstupov, použitím zjednodušujúcich aproximácií, atď. Poslednou etapou je vytvorenie simulačného modelu, ktorý umožní verifikáciu a simuláciu modelu pre rôzne stratégie riadenia. Grafické znázornenie etáp tvorby modelu identifikovaného systému je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Etapy definovania identifikovaného systému, identifikácie a modelovania

Pre hľadanie modelu systému existujú 2 základné prístupy k identifikácii:

- analytická identifikácia,
- experimentálna identifikácia.

### Analytická identifikácia

Analytická identifikácia hľadá matematický popis identifikovaného systému. Využíva fyzikálne, chemické, biologické, empirické, prípadne ekonomické zákony bez nutnosti vykonávať merania na reálnom zariadení. Analytické metódy identifikácie systému vyžadujú veľké teoretické a praktické znalosti, použitie rôznych zjednodušujúcich predpokladov a aproximácie zložitých vzťahov jednoduchšími. Analyticky získaný matematický model vyjadruje „vnútorný“ popis chovania skúmaného systému. Parametre modelu majú fyzikálny význam a model umožňuje náhľad do vnútorných väzieb systému. Postup analytickej identifikácie [6]:

1. určenie identifikovaného systému,
2. špecifikácia významných dejov, príčin a dôsledkov,
3. výber vstupných a výstupných veličín, pomocou ktorých je možné s určitou presnosťou popísať identifikovaný systém,
4. zjednodušenie matematických vzťahov pre získanie tzv. vnútorného popisu systému nasledovnými postupmi:
  - dekompozícia systému – rozdelenie na jednoduchšie subsystemy
  - zjednodušenie vlastností (ideálny plyn, ideálna kvapalina, homogenita, ...)
  - zanedbanie strát

- linearizácia
- zjednodušenie geometrie
- zanedbanie náhodných vplyvov

5. vytvorenie modelových rovníc.

## Experimentálna identifikácia

Výsledný matematický model je vytvorený na základe údajov získaných pri pozorovaní chovania identifikovaného systému počas experimentu. Predpokladá sa, že hodnoty vstupných a výstupných signálov sú merateľné. Model popisuje reláciu medzi vstupom a výstupom systému pre konkrétny prevádzkový stav. Ide o vonkajší popis systému a vnútorné väzby zostávajú skryté.

Experimentálne metódy identifikácie môžeme rozdeliť na [6]:

- Deterministické – presne poznáme vstupy aj výstupy systému a neuvažujeme vo výpočtoch žiadne náhodné vplyvy.
- Štatistické, pravdepodobnostné – uvažujeme procesy zaťažené náhodnými vplyvmi a neurčitostami.

## 3.2 Popis systému

V ďalšom texte sa obmedzíme na spojité lineárne systémy. Popis takýchto systémov (relácia medzi vstupom a výstupom systému) môže byť vyjadrený:

- diferenciálnou rovnicou,
- prenosom v Laplaceovej transformácii,
- impulznou charakteristikou,
- prechodovou charakteristikou,
- frekvenčným prenosom,
- frekvenčnou charakteristikou.
- pólmami a nulami prenosu systému.

### Diferenciálna rovnica

Chovanie spojitého systému s jednou vstupnou a výstupnou veličinou sa dá popísať diferenciálnou rovnicou s konštantnými súčiniteľmi v tvare:

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_0 u(t) \quad (3.1)$$

kde:

$a_i, b_j$  sú konštantné koeficienty,

$u(t)$  je vstupná veličina,

$y(t)$  je výstupná veličina systému.

Pre fyzikálnu realizovateľnosť systému musí platiť podmienka fyzikálnej realizovateľnosti:

- slabá ...  $n \geq m$ ,
- silná ...  $n > m$ .

Podmienka fyzikálnej realizovateľnosti je podmienkou kauzality. Ak by bol stupeň najväčšej derivácie vstupnej veličiny väčší alebo rovný stupňu derivácie výstupnej veličiny, vznikla by odozva na budiaci signál skôr ako samotný budiaci signál. To je u reálnych fyzikálnych systémov nemožné.

Pre riešenie diferenciálnej rovnice musíme poznať podmienky systému  $y(0)$ ,  $y'(0)$ , ...,  $y^{(n-1)}(0)$  a  $u(0)$ , ...,  $u^{(m-1)}(0)$  v počiatočných podmienkach a priebeh vstupnej veličiny  $u(t)$ .

## Prenos v Laplaceovej transformácii

Prenos systému je definovaný ako pomer Laplaceovho obrazu výstupnej veličiny k Laplaceovmu obrazu vstupnej veličiny pri nulových počiatočných podmienkach systému a hodnotách vstupného signálu  $u(0) = u'(0) = \dots = u^{(m-1)}(0) = 0$  [5].

Lineárnu diferenciálnu rovnicu môžeme transformovať pomocou Laplaceovej transformácie na tvar:

$$[a_n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0]Y(p) = [b_m p^m + \dots + b_1p + b_0]U(p) \quad (3.2)$$

Prenos systému má potom tvar:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_1p + a_0} \quad (3.3)$$

Opäť musí platiť podmienka fyzikálnej realizovateľnosti.

Polynómy z čitateľa a menovateľa môžeme vyjadriť v tvare súčinu koreňových činiteľov:

$$a_n p^n + \dots + a_1p + a_0 = a_n(p - p_1) \dots (p - p_n) \quad (3.4)$$

$$b_m p^m + \dots + b_1p + b_0 = b_m(p - n_1) \dots (p - n_m) \quad (3.5)$$

kde

$p_i, (i = 1, 2, \dots, n)$  sú korene menovateľa, nazývané póly. Póly systému môžu byť reálne aj komplexne združené.

$n_j, (j = 1, 2, \dots, m)$  sú korene čitateľa, nazývané nulové body. Taktiež môžu byť reálne alebo združené.

Prenos systému môžeme pomocou pólov a nulových bodov zapísať v tvare:

$$G(p) = \frac{b_m}{a_n} = \frac{(p - n_1) \dots (p - n_m)}{(p - p_1) \dots (p - p_n)} \quad (3.6)$$



## Impulzná charakteristika

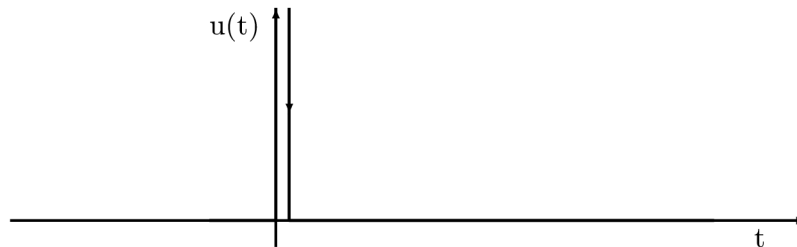
Impulzná funkcia  $g(t)$  je odozva na jednotkový impulz pri nulových počiatkových podmienkach systému. Impulzná charakteristika je grafickým znázornením tejto funkcie [5].

Jednotkový – Diracov impulz je ideálna funkcia, ktorá je fyzikálne nerealizovateľná. Je definovaná vzťahmi:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1; \delta(t) = 0, \text{ pre } t \neq 0 \quad (3.7)$$

Laplaceov obraz Diracovho impulzu sa rovná 1 a obraz impulznej funkcie sa rovná prenosu systému:

$$L\{g(t)\} = G(p)L\{\delta(t)\} = G(p) \quad (3.8)$$



Obrázek 3.2: Jednotkový impulz

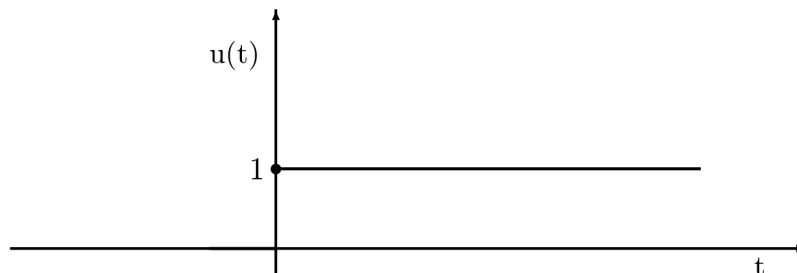
## Prechodová charakteristika

Prechodová funkcia  $h(t)$  je odozva na jednotkový skok pri nulových počiatkových podmienkach systému. Prechodová charakteristika je grafické znázornenie tejto funkcie [5].

Jednotkový – Heavisideov skok je definovaný vzťahom:

$$u(t) = \eta(t) = 1, \text{ pre } t \geq 0$$

$$u(t) = \eta(t) = 0, \text{ pre } t < 0$$



Obrázek 3.3: Jednotkový skok

## Frekvenčný prenos

Frekvenčný prenos  $G(j\omega)$  je definovaný ako pomer vektoru odozvy k vektoru harmonického signálu v ustálenom stave po odznení prechodového deja [5].

Vstupným signálom bude harmonická funkcia  $u(t)$  v tvare  $u(t) = u_0 \sin(\omega t)$  s konštantnou amplitúdou  $u_0$  a uhlovou frekvenciou  $\omega$ . Po dobe potrebnej k dozneniu prechodového deja, vzniknú na výstupe harmonické kmity  $y(t) = y_0 \sin(\omega t + \varphi)$  s rovnakou uhlovou frekvenciou, ale s inou amplitúdou  $y_0$  a s určitým fázovým posunutím  $\varphi = \omega t_0$ .

Harmonický vstupný signál a jeho odozvu môžeme po úprave Eulerovým vzťahom vyjadriť ako [5]:

$$u(t) = u_0 e^{j\omega t} \quad (3.9)$$

$$y(t) = y_0 e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (3.10)$$

Frekvenčný prenos je potom daný vzťahom:

$$G(j\omega) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{y_0 e^{j(\omega t + \varphi)}}{u_0 e^{j\omega t}} = \frac{y_0}{u_0} e^{j\varphi} \quad (3.11)$$

kde

$\frac{y_0}{u_0}$  je pomer amplitúd, nazývaný modul,

$\varphi$  je fázové posunutie, nazývané argument.

## Frekvenčná charakteristika

Frekvenčná charakteristika systému je grafické znázornenie frekvenčného prenosu.

Grafické zobrazenie frekvenčného prenosu  $G(j\omega)$  v komplexnej rovine sa nazýva **Nyquistova frekvenčná charakteristika**. Môže byť vyjadrená v komplexných súradniciach:

$$G(j\omega) = \operatorname{Re}G(j\omega) + j\operatorname{Im}G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (3.12)$$

alebo v polárnych súradniciach:

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j \arg G(j\omega)} = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (3.13)$$

kde:

$A(\omega) = |G(j\omega)| = \sqrt{[\operatorname{Re}G(j\omega)]^2 + [\operatorname{Im}G(j\omega)]^2}$  je modul, respektíve amplitúda frekvenčného prenosu,

$\varphi(\omega) = \arg G(j\omega) = \arctan \frac{\operatorname{Im}G(j\omega)}{\operatorname{Re}G(j\omega)}$  je argument, fáza frekvenčného prenosu.

Grafické znázornenie frekvenčného prenosu  $G(j\omega)$  v logaritmických súradniciach sa nazýva **Bodeho frekvenčná charakteristika**. Ide o závislosť  $\log |G(j\omega)|$  a  $\arg G(j\omega)$  na  $\log \omega$ .

Na základe 3.13 platí:

$$\ln |G(j\omega)| + j \arg G(j\omega) = \ln A(\omega) + j\varphi(\omega) \quad (3.14)$$

Bodeho frekvenčná charakteristika používa pre osu uhlovej frekvencie  $\omega$  dekadický logaritmus  $\log \omega$ . Pre zvislú osu amplitúdových charakteristík sa používa absolútna hodnota frekvenčného prenosu v  $dB$  [7]:

$$|G(j\omega)|_{dB} = 20 \log_{10} |G(j\omega)| \quad (3.15)$$

## Póly a nuly prenosu systému

Nuly aj póly prenosu môžu byť ako reálne, tak aj komplexne združené čísla. Reálne póly spôsobujú aperiodický charakter prechodových dejov, komplexne združené póly naopak zapríčiňujú kmitavú zložku prechodových dejov. Póly v počiatku vyjadrujú integračný charakter prechodového deja systému.

Nuly v počiatku predstavujú derivačný charakter. U pólov aj núl prenosu je rozhodujúce ich postavenie v komplexnej rovine vzhľadom k imaginárnej ose. V ľavej polrovine sú stabilné póly aj nuly (majú zápornú reálnu časť), v pravej polrovine sú nestabilné póly aj nuly (majú kladnú reálnu časť). Čím sú stabilné póly ďalej od imaginárnej osy, tým viac je prechodový dej tlmený. Póly v pravej polrovine vždy znamenajú nestabilný prechodový dej [5].

## Kapitola 4

# Riadenie a regulácia

*Riadenie je cielené pôsobenie na určitú vymedzenú časť reality – objekt tak, aby pochody a deje v ňom prebiehali podľa daných požiadaviek[4].*

Po systémoch riadenia v divadlách sa požaduje, aby boli do značnej miery automatické. Obsluha zadá parametre požadovaného pohybu, ktorý už vykoná riadiaci systém samostatne. Preto musia obsahovať funkcie automatického riadenia a regulácie. Prvá časť kapitoly vrátane blokových schém čerpá najmä z [7]. Druhá časť od sekcie 4.1 kombinuje teoretické poznatky z [5] a [8].

Ak ide o riadenie uskutočňované nejakým zariadením alebo systémom, hovoríme o **automatickom riadení**. Riadenie sa delí na ovládanie a reguláciu.

Riadenú sústavu, bez ohľadu na to, či ide o reguláciu alebo ovládanie, môžeme rozdeliť na dva subsystémy [7]:

### Riadiaci systém

Zariadenie generujúce riadiace signály. Svojimi vstupmi môže prijímať informácie potrebné na riadenie. Výstupmi pôsobí na vstup riadeného systému tak, aby dosiahol požadovaný cieľ.

### Riadený systém

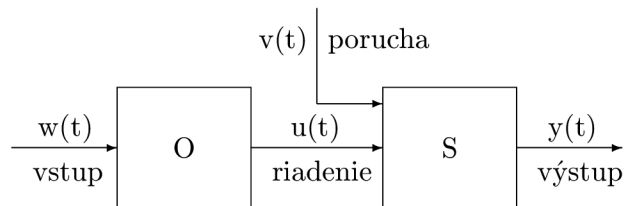
Zariadenie, fyzikálny objekt, proces, ktorý má byť riadený. Vstupom systému je  $r$ -rozmerný vektor riadenia  $u(t)$ , výstupom  $m$ -rozmerný vektor  $y(t)$ , stav systému reprezentuje  $n$ -rozmerný vektor  $x(t)$ .

### Automatické ovládanie

Ovládanie je riadenie bez spätnej kontroly. Riadený obvod neobsahuje spätnú väzbu s informáciou o skutočnej hodnote riadenej veličiny [7].

Systém ovládania sa skladá z ovládača  $O$  a riadeného systému  $S$ . Požadované chovanie riadeného systému vyjadruje vstup  $w(t)$ , skutočné chovanie systému výstup  $y(t)$ . Ovládač ovplyvňuje výstup riadeného systému pomocou riadiacej veličiny  $u(t)$ .

Takéto riadenie je málo presné, nakoľko pôsobením poruchovej veličiny  $v(t)$  môže dôjsť k veľkému rozdielu medzi žiadanou a skutočnou hodnotou výstupu riadeného systému. Bez spätnej väzby (znalosti vzniknutej chyby) nemôže ovládač svojim pôsobením proti vplyvu tejto poruchy pôsobiť.



Obrázek 4.1: Bloková schéma automatického ovládania [7]

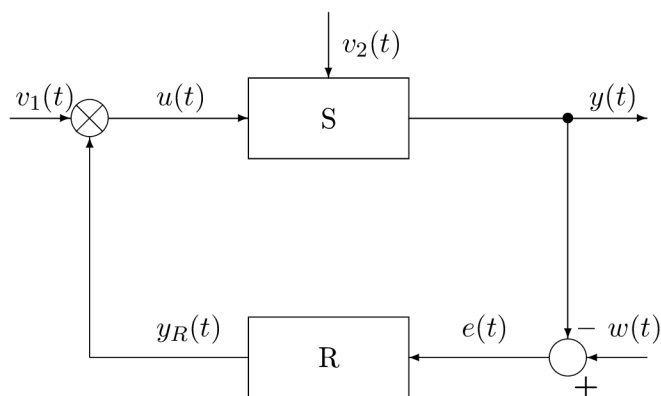
## Automatická regulácia

Regulácia je, naopak od ovládania, založená na využití spätnej väzby – informácie o skutočnej hodnote riadenej veličiny. Počas regulácie sa porovnávajú skutočné hodnoty výstupu s požadovanými hodnotami na vstupe. Podľa zistených odchýliek, ktoré sú aj mierou presnosti regulácie, sa zasahuje do regulovaného procesu tak, aby sa tieto odchýlky odstránili (udržiavali na čo najnižšej hodnote).

Na vstupe riadiaceho systému (regulátoru)  $R$  vzniká odchýlka  $e(t)$ , ako rozdiel medzi požadovaným chovaním  $w(t)$  riadeného systému  $S$  a jeho skutočným chovaním  $y(t)$ , čiže  $e(t) = w(t) - y(t)$ .

Regulátor túto odchýlku spracuje a na jej základe upraví hodnotu riadiacej veličiny  $u(t)$  vstupujúcej do riadeného systému. Zmena hodnoty  $u(t)$  spôsobí zmenu výstupu systému  $y(t)$  tak, aby bola odchýlka riadenia  $e(t)$  čo najmenšia.

Takto tvorená štruktúra regulácie umožňuje riadiť výstup  $y(t)$  na požadovanú hodnotu a zvyšuje odolnosť systému proti poruche  $v(t)$  [7].



Obrázek 4.2: Základná bloková schéma regulačného obvodu [7]

Podľa priebehu žiadanej hodnoty  $w(t)$  môžeme rozlišovať reguláciu na konštantnú hodnotu, vlečnú a programovú reguláciu [7].

- Regulácia na konštantnú hodnotu – žiadaná hodnota má konštantný priebeh, systém sa snaží túto hodnotu udržať.  $w(t) = konst.$
- Vlečná regulácia – tieto systémy sa označujú aj ako sledovacie. Priebeh žiadanej

hodnoty  $w(t)$  nie je vopred známy. Cieľom je, aby regulovaná veličina  $y(t)$  čo najpresnejšie „sledovala“ priebeh  $w(t)$ .

- Programová regulácia – je zvláštny prípad vlečnej regulácie. Priebeh žiadanej veličiny  $w(t)$  je vopred známy a daný časovým plánom – programom.

## 4.1 Regulátor

Regulátor je zariadenie v regulačnom obvode, ktoré uskutočňuje proces automatickej regulácie – riadiaci systém. Podstatou činnosti regulátoru – cieľom regulácie je vyhodnotenie regulačnej odchýlky

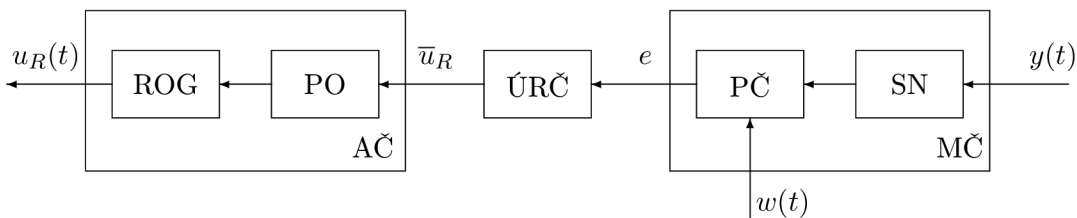
$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (4.1)$$

ako vstupného signálu, spracovanie tejto odchýlky podľa predpísaného riadiaceho zákona a vytvorenie výstupného signálu  $u(t)$  tak, aby bola regulačná odchýlka čo najmenšia [5].

Plnenie cieľa regulácie pozostáva z dvoch súčasne vykonávaných činností regulátora:

- sledovanie žiadanej veličiny  $w$  regulovanou veličinou  $y$ ,
- potlačenie vplyvov poruchových veličín na regulovanú veličinu.

Regulátor môžeme zobraziť ako blokovú schému na obrázku 4.3. Merací člen MČ zisťuje aktuálnu regulačnú odchýlku – skutočnú hodnotu riadenej veličiny získanú snímačom porovnáva pomocou porovnávacieho člena PČ so žiadanou hodnotou. Ústredný regulačný člen URČ spracuje vzniknutú odchýlku a na základe predpísaného matematického vzťahu upraví akčnú veličinu. Akčný člen AČ pozostáva z pohonu a regulačného orgánu. Regulačný orgán riadi prietok energie riadeným systémom. Pohon dodáva energiu regulačnému orgánu.



Obrázek 4.3: Bloková schéma regulátoru [5]

Ústredný regulačný člen sa v užšom slova zmysle označuje tiež ako regulátor. Takmer výlučne sa v súčasnosti skladá z takzvaného PID regulátoru a jeho variant. Nasledujúci prehľad popisuje práve tento typ regulátoru.

### PID regulátory

Skratka PID je odvodená od troch základných častí – zložiek regulátoru: proporcionálnej, integračnej a derivačnej. Činnosť ideálneho PID regulátoru môžeme popísať rovnicou [5]:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (4.2)$$

kde:

$r_0 e(t)$  je proporcionálna zložka regulátora,

$r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$  je integračná zložka regulátora,

$r_1 \frac{de(t)}{dt}$  je derivačná zložka regulátora.

Laplaceovou transformáciou za predpokladu nulových počiatkových podmienok môžeme vytvoriť prenos ideálneho PID regulátora

$$G_R(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{p} + r_1 p = r_0 \left( 1 + \frac{r_{-1}}{r_0} \frac{1}{p} + \frac{r_1}{r_0} p \right) = r_0 \left( 1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right) \quad (4.3)$$

kde:

$r_0$  je proporcionálna konštanta regulátora,

$r_{-1}$  je integračná konštanta regulátora,

$r_1$  je derivačná konštanta regulátora,

$T_I = \frac{r_0}{r_{-1}}$  je integračná časová konštanta regulátora,

$T_D = \frac{r_1}{r_0}$  je derivačná časová konštanta regulátora.

## Parametre regulátorov

V skutočných regulátoroch je možné vplyvy jednotlivých jeho zložiek nastavovať pomocou nastaviteľných parametrov [5].

**Pásmo proporcionality**  $pp$  vyjadruje v percentách, o akú hodnotu sa musí zmeniť vstupný signál regulátoru, aby sa akčný člen prestavil z jednej krajnej polohy do druhej (zmenil svoju polohu z 0% na 100%).

$$pp[\%] = \frac{1}{r_0} 100 \quad (4.4)$$

kde:

$r_0$  je zosilnenie regulátoru.

**Integračná časová konštanta**  $T_I$  je čas, ktorý by potreboval čisto integračný regulátor, aby prestavil akčný člen do polohy, ktorú dosiahne PI-regulátor v čase  $t = 0$  vďaka vplyvu svojej proporcionálnej zložky. Ako vstupný signál PI-regulátoru predpokladáme jednotkový skok.

**Derivačná časová konštanta**  $T_D$  je čas, ktorý by potreboval čisto proporcionálny regulátor, aby prestavil akčný člen do polohy, ktorú dosiahne PD-regulátor v čase  $t = 0$  vďaka vplyvu svojej derivačnej zložky. Ako vstupný signál PD-regulátoru predpokladáme jednotkovú rýchlosť.

Nastavením týchto parametrov je možné dosiahnuť požadované dynamické vlastnosti regulovanej sústavy. Ich nastavením sa snažíme dosiahnuť najmä stabilitu regulačného obvodu a presnosť regulačného deja.

Pri znalosti skutočného dynamického chovania riadenej sústavy a jej požadovaného chovania, je možné vypočítať parametre použitého regulátoru tak, aby svojou funkciou vytvoril

požadovanú dynamiku. Princíp takéhoto analytického nastavenie parametrov regulátoru je značne rozsiahli a nad rámec tejto práce. Jeho podrobný popis je možné nájsť v [8] alebo [5].

Ak nám nie je známy model riadenej sústavy, môžeme použiť empirické nastavenie regulačných parametrov. Najpoužívanejšou takouto metódou je metóda kritického zosilnenia – Ziegler-Nicholsova metóda. Hlavnou myšlienkou je priviesť regulátor do kritického stavu – na hranicu stability, len pri použití proporcionálnej zložky regulátora. Ostatné jeho zložky (integračná a derivačná) sú vyradené z činnosti. Postupným zvyšovaním proporcionálneho zosilnenia regulátoru  $r_0$  prinútime obvod kmitať s konštantnou amplitúdou. Proporcionálne zosilnenie, pri ktorom nastali netlmené kmity, nazývame kritickým zosilnením  $r_K$ . Períodu kmitov značíme ako  $T_K$ . Tieto dve získané hodnoty dosadíme do tabuľky 4.1 a vypočítame doporučené nastavenie regulátora.

	$r_K$	$T_I$	$T_D$
<b>P</b>	$0.5r_K$	-	-
<b>PI</b>	$0.45r_K$	$\frac{T_K}{1.2}$	-
<b>PD</b>	$0.4r_K$	-	$0.05T_K$
<b>PID</b>	$0.6r_K$	$0.05T_K$	$0.12T_K$

Tabuľka 4.1: Nastavenie PID regulátoru pomocou Ziegler-Nicholsovej metódy

## Charakteristika regulátorov

Nasledujúci prehľad popisu praktické vlastnosti rôznych typov regulátorov [5]:

**P-regulátor:** v uzavretom regulačnom obvode pracuje s trvalou regulačnou odchýlkou, ale má dobré stabilné vlastnosti.

**I-regulátor:** v uzavretom regulačnom obvode pracuje iba s prechodnou regulačnou odchýlkou. Regulačný obvod sa ustáli, keď sa regulačná odchýlka  $e(t) = 0$ . V integračnej sústave nevyhovie podmienkam stability.

**D-regulátor:** ako samostatný regulátor je nepoužiteľný. Nepozná hodnotu regulačnej odchýlky  $e(t)$ . Pozná iba hodnotu jej zmeny v čase.

**PI-regulátor:** v uzavretom regulačnom obvode odstraňuje trvalú regulačnú odchýlku samostatného P-regulátoru. Má lepšie stabilné vlastnosti ako I-regulátor. Na začiatku regulácie prevláda vplyv proporcionálnej zložky, s narastajúcim časom vplyv integračnej zložky.

**PD-regulátor:** zlepšuje stabilné vlastnosti obvodu v porovnaní s P-regulátorom. Je možné dosiahnuť menšiu regulačnú odchýlku. Na začiatku regulácie prevláda vplyv derivačnej zložky, s narastajúcim časom vplyv proporcionálnej zložky.

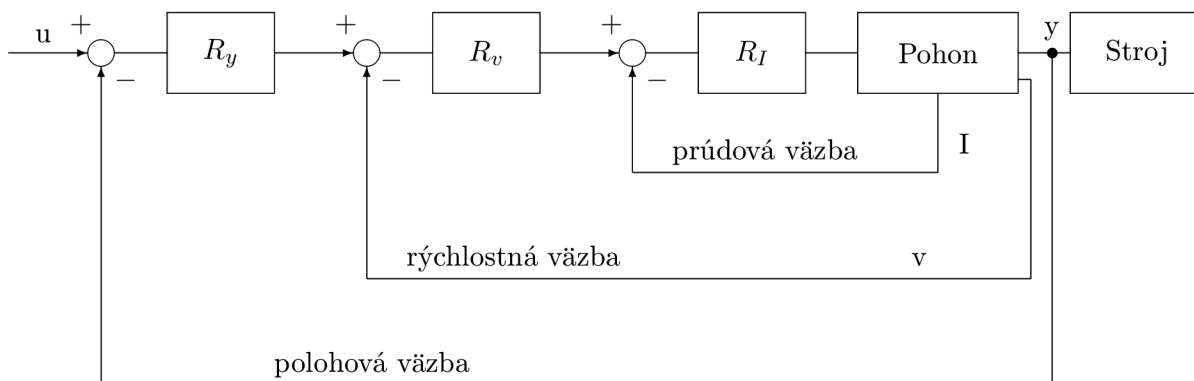
**PID-regulátor:** vplyvom I-zložky odstraňuje trvalú regulačnú odchýlku a vplyvom D-zložky zlepšuje stabilné vlastnosti regulačného obvodu. Na začiatku regulácie prevláda vplyv derivačnej zložky, s narastajúcim časom vplyv integračnej zložky.



## 4.2 Servomechanizmus

Servomechanizmus je riadený obvod, určený najčastejšie k riadeniu polohy a jej derivácií podľa času. Je to zvláštny typ regulácie, kde je regulovanou sústavou motor. Motor a regulátor tvoria jeden celok, nerozlišujeme regulovanú sústavu a regulátor [5].

Hlavným cieľom servomechanizmu je presne sledovať zadanú vstupnú veličinu veličinou výstupnou, tak aby ich rozdiel bol čo najmenší. Z tohto hľadiska ide o vlečnú reguláciu. Z popisu javiskovej technológie v kapitole 2 je zrejmé, že väčšina zariadení používa na svoju činnosť zmenu svojej polohy alebo polohy nejakej ich časti. Zariadenia javiskovej technológie môžeme teda považovať za servomechanizmy.



Obrázek 4.4: Bloková schéma polohového servomechanizmu

Moderné servomechanizmy obsahujú spravidla niekoľko spätných väzieb usporiadaných hierarchicky a pre rôzne fyzikálne veličiny. Hlavnú úlohu a najväčší vplyv na charakter činnosti celého regulačného obvodu má však iba vonkajšia spätná väzba, ktorá je nadradená všetkým ostatným väzbám. Podriadené väzby majú za úlohu iba skvalitniť činnosť vonkajšej slučky.

Princíp hierarchického usporiadania spätných väzieb znázorňuje obrázok 4.4. Hodnoty odchýlok vypočítaných na základe troch uvedených spätných väzieb sú vstupmi pre tri regulačné orgány: polohový regulátor  $R_y$ , rýchlostný regulátor  $R_v$  a prúdový (momentový) regulátor  $R_I$ .

Tvar prenosu rozpojenej regulačnej slučky  $G_o(p)$  môžeme vyjadriť v tvare:

$$G_o(p) = \frac{k (T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \dots}{p^q (T_1' p + 1)(T_2' p + 1) \dots} = \frac{k}{p^q} G(p) \quad (4.5)$$

kde  $k$  predstavuje celkové zosilnenie rozpojenej slučky a mocnina  $p^q$  rád astatizmu regulačného obvodu. Koeficient  $q$  určuje typ servomechanizmu [5]:

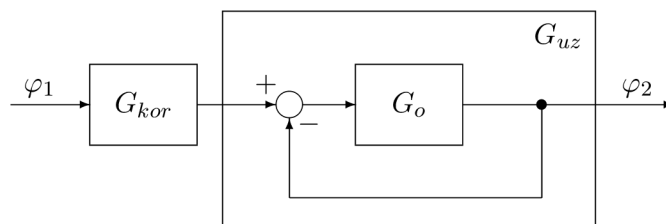
- pri  $q = 0$  ide o servomechanizmus nultého typu. Ten je schopný sledovať iba skok polohy a to s trvalou regulačnou odchýlkou v ustálenom stave. Zväčšovaním zosilnenia sa odchýlka znižuje. Skok rýchlosti alebo zrýchlenia nie je schopný sledovať, odchýlka v ustálenom stave rastie do nekonečna.
- pri  $q = 1$  ide o servomechanizmus prvého typu. Je schopný sledovať skok polohy bez odchýlky v ustálenom stave a skok rýchlosti s trvalou odchýlkou, závislou na veľkosti zosilnenia. Nie je schopný sledovať skok zrýchlenia.

- pri  $q = 2$  ide o servomechanizmus druhého typu. Sleduje skok polohy aj rýchlosti bez odchýlky v ustálenom stave. Skok zrýchlenia sleduje s trvalou regulačnou odchýlkou, závislou na zosilnení servomechanizmu.

## Korekcia servomechanizmu

Na zlepšenie vlastností servomechanizmu z hľadiska presnosti sa využívajú korekčné členy v sériovom zapojení. Použitie korekčného člena umožní zvýšiť typ servomechanizmu. Korekciou je nutné upraviť prenos rozpojenej slučky tak, aby charakteristická rovnica uzavretej slučky vyhovovala podmienkam stability a kvality regulácie.

Pri požiadavke čo najlepšieho (najpresnejšieho) sledovania vstupného signálu výstupom servomechanizmu, zavádzame na vstup servomechanizmu okrem vstupného signálu aj jeho derivácie.



Obrázok 4.5: Schéma korekcie servomechanizmu predkorekciou [5]

Obrázok 4.5 znázorňuje zapojenie korekčného člena. Na jeho základe platia vzťahy:

$$\frac{\phi_2(p)}{\phi_1(p)} = G_{kor}(p)G_{uz}(p) = G_{kor}(p) \frac{G_o(p)}{1 + G_o(p)} \quad (4.6)$$

Ďalej požadujeme, aby platilo:

$$\varphi_2(t) = \varphi_1(t) + \varphi_1'(t) + \varphi_1''(t) + \dots \quad (4.7)$$

Platí teda, že:

$$\frac{\phi_2(p)}{\phi_1(p)} = 1 + p + p^2 + \dots = G_{kor}(p)G_{uz}(p) \quad (4.8)$$

a korekčný člen má prenos:

$$G_{kor}(p) = (1 + p + p^2 + \dots) \frac{1}{G_{uz}(p)} \quad (4.9)$$

Použitie predkorekcie zlepší schopnosť presne sledovať zvrstvený signál, ale nezlepší ani nezhorší stabilitu celého servomechanizmu.

## Kapitola 5

# Analýza a návrh riešenia

Na základe poznatkov zhrnutých v predchádzajúcich kapitolách a po konzultáciách s odborníkmi z praxe v javiskovej technológii, považujem za ideálne riešenie riadenia javiskovej techniky decentralizovaný systém riadenia založený na samostatných osových regulátoroch.

Výhodou decentralizovaného riadiaceho systému je rozdelenie funkčnosti celého divadla do osových regulátorov, a tým nezávislosť jednotlivých zariadení. Pri poruche jedného osového regulátoru nedôjde k nefunkčnosti celej divadelnej techniky. V prípade poruchy jedného osového regulátoru obsluhujúceho napríklad prospektový ťah potrebný pre realizáciu konkrétneho predstavenia, je možné tento regulátor nahradiť iným z nepoužívaného prospektového ťahu, nakoľko pri väčšine predstavení sa nevyužívajú všetky dostupné zariadenia. Prípadne je možné mať v zálohe jeden osový regulátor pre prípad poruchy jedného z prospektových ťahov, a použiť ho na jeho rýchlu opravu. Nie je však možné, kvôli rôznym charakteristikám pohybu, použiť osový regulátor z jedného zariadenia na opravu typovo iného zariadenia.

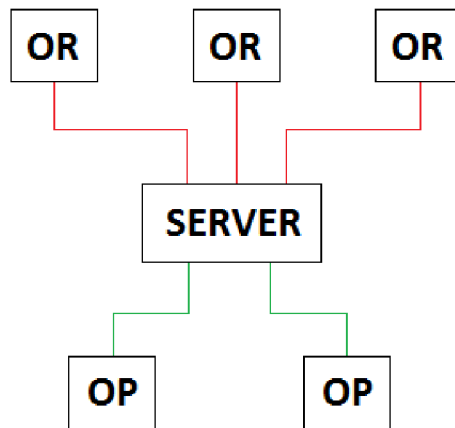
V centralizovanom riadiacom systéme sú pri výpadku hlavného riadiaceho počítača vyradené z činnosti všetky ním ovládané zariadenia. Ďalšia činnosť je možná až po oprave alebo výmene daného počítača.

Môže sa zdať, že použitie *v* osových regulátorov pre celé divadlo je podstatne drahšie ako použitie jedného prvku v podobe centrálného počítača. Avšak jeho činnosť vyžaduje použitie špeciálnych vstupno-výstupných modulov pri každom zariadení, schopných získavať údaje o zariadení a predávať mu riadiace pokyny. Osový regulátor obsahuje všetky potrebné komunikačné rozhrania, a preto nie sú potrebné ďalšie investície.

Základnú schému navrhovaného riadiaceho systému popisuje obrázok 5.1. Každé zariadenie v divadle bude ovládané a kontrolované samostatným osovým regulátorom OR. Všetky osové regulátory budú prijímať požiadavky a zasielať svoj aktuálny stav centrálnemu serveru. Ten umožňuje komunikáciu medzi ovládacími pultmi a osovými regulátormi. Server prijíma požiadavky na pohyb od pultov, skontroluje ich vykonateľnosť a pripraví jednotlivé zadania pre konkrétne zariadenia.

Centrálny prvok – server taktiež umožní jednoduchú kontrolu synchronnej jazdy viacerých zariadení. To je pohyb, pri ktorom sa niekoľko zariadení pohybuje vo vzájomnej väzbe (napríklad súčasný pohyb niekoľkých prospektových ťahov kvôli nadrozmernej kulise). V prípade poruchy alebo odchýlky niektorého zariadenia od požadovanej polohy nad rámec zadanej hranice, server okamžite a bezpečne zastaví celú skupinu.

Presunutie kontrolných bezpečnostných funkcií z ovládacích pultov do serveru umožní zmenu aktuálnych, prípadne použitie nových ovládacích pultov bez ohrozenia bezpečnosti celkového systému.



Obrázek 5.1: Schéma systému riadenia javiska – OP – ovládací pult, OR – osový regulátor.

## 5.1 Návrh riešenia

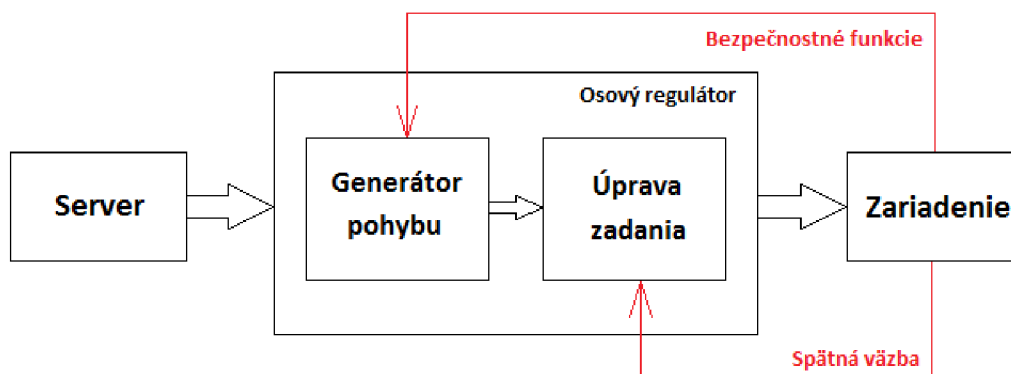
Ďalej sa moja práca zameriava hlavne na osový regulátor. Jednoduchý komunikačný protokol a ovládací pult bol vytvorený ako súčasť mojej bakalárskej práce a práce kolegu Lukáša Kobzu.

Cieľom práce je vytvoriť osový regulátor vo forme algoritmu bežiaceho na vhodnej hardwarovej platforme a riadiaceho reálne zariadenie javiskovej techniky a nadviazať tak na predchádzajúce práce.

### Osový regulátor

Jeho hlavnou činnosťou je získať informácie o požadovanom pohybe od serveru, tento pohyb vykonať a pravidelne vo vhodných časových okamžikoch informovať server o svojom aktuálnom stave.

Na pozadí musí neustále sledovať a vyhodnocovať všetky bezpečnostné prvky a funkcie zariadenia. Požadovaný pohyb smie vykonať, iba ak sú všetky tieto opatrenia splnené. V jednoduchosti môžeme vyjadriť činnosti a vnútornú štruktúru osového regulátoru podľa obrázku 5.2. Vidíme na ňom dva základné funkčné bloky: generátor pohybu a úpravu zadania.



Obrázek 5.2: Schéma osového regulátoru

**Generátor pohybu** počíta presný priebeh riadiacich veličín (zrýchlenia, rýchlosti, poloha) daného zariadenia tak, aby zariadenie zastavilo na požadovanom mieste čo najskôr, prípadne v presne určenom čase. Tento pohyb musí byť plynulý a presný, bez prudkých zmien rýchlosti alebo smeru pohybu. Takémuto pohybu odpovedá priebeh zrýchlenia a rýchlosti zobrazený na obrázku 5.3.

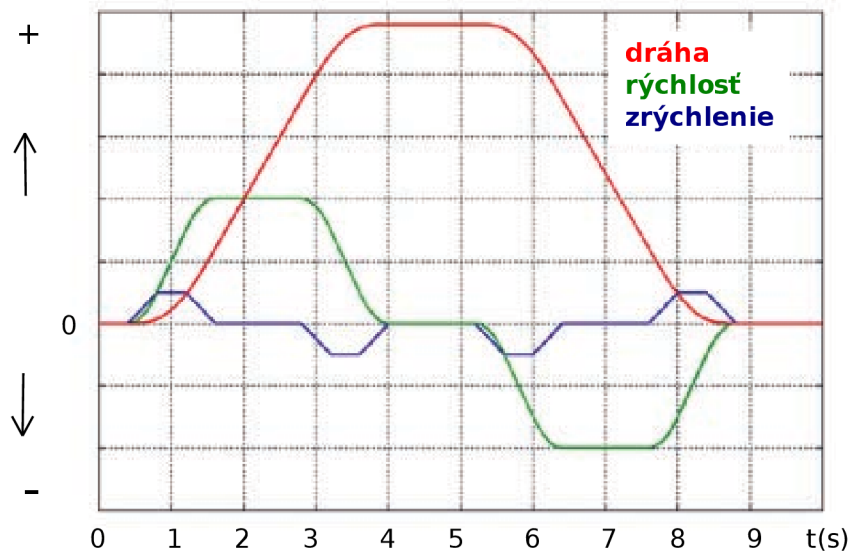
Vstupom pre generátor je zadaná poloha a cieľová rýchlosť zariadenia. Z grafu je zrejmé, že zrýchlenie sa mení lineárne až do jeho maximálnej hodnoty. Preto za ďalšie dôležité parametre zariadenia považujeme hodnotu maximálneho zrýchlenia a dobu, za ktorú ju zariadenie môže dosiahnuť. Tieto parametre sú rôzne pre jednotlivé zariadenia a určujú jeho dynamické možnosti. Vo veľkej miere záležia na konštrukcii a charaktere požadovaného pohybu zariadenia. Nemôžeme očakávať a požadovať rovnaké dynamické hodnoty pre niekoľko sto ton vážiacu točňu a perspektívny ťah určený na prepravu maximálne 300 kilogramového závažia.

Výstupom generátoru je ideálny priebeh riadiacich veličín, ktoré keby zariadenie presne dodržalo, dosiahlo by požadovanú polohu. Avšak pri reálnych zariadeniach nie je možné takýto priebeh zaručiť. Tým vzniká odchýlka reálnej polohy od polohy požadovanej.

Kompenzáciu vzniknutých odchýliek rieši blok **úpravy zadania**, kde pod zadaním rozumíme aktuálnu požadovanú rýchlosť zariadenia generovanú generátorom pohybu. Ak si predstavíme riadené zariadenie ako servomechanizmus podľa obrázku 4.4, predstavuje blok  $R_y$  algoritmus úpravy zadania a jeho výstup je požadovaná rýchlosť zariadenia po úprave. Vstupom tohto bloku je odchýlka reálnej polohy od aktuálne generovanej polohy. Blok musí mať aj informáciu o aktuálnej ideálnej rýchlosti z generátoru pohybu, ktorú na základe polohovej odchýlky upraví. Bloky  $R_v$  a  $R_I$  sú už súčasťou samotného zariadenia a ich prevedenie závisí na použitej pohonnej jednotke.

## 5.2 Zvolená implementácia a testovanie

Za platformu na implementáciu navrhovaného riešenia osového regulátoru som zvolil priemyselný počítač od firmy Beckhoff. Výber platformy bol ovplyvnený hlavne možnosťou otestovať funkčnosť navrhovaného riešenia na reálnom divadelnom zariadení – bodovom ťahu



Obrázek 5.3: Graf pohybu[1]

PH300A od spoločnosti ELSEREMO Stage Technology. Bodový ťah predstavuje komplikované elektricko-mechanické zariadenie, s komplikovanou vnútornou štruktúrou a množstvom vstupných a výstupných signálov. Vytvorenie programu obsluhujúceho všetky tieto rôzne rozhrania by bolo nad rámec tejto práce. Práve v tomto smere bolo využitie priemyselného PC od firmy Beckhoff, ktoré ťah využíva na svoju činnosť, a ich programovacieho rozhrania TwinCat výhodou. Ťah obsahuje priemyselný počítač CX1020 s množstvom vstupno-výstupných modulov, ktoré zabezpečujú komunikáciu s jeho hardwarovým vybavením. Úloha spustiteľná na tomto PC pozostáva z dvoch samostatných programov pre hardwarovú a softwarovú časť riešenia.

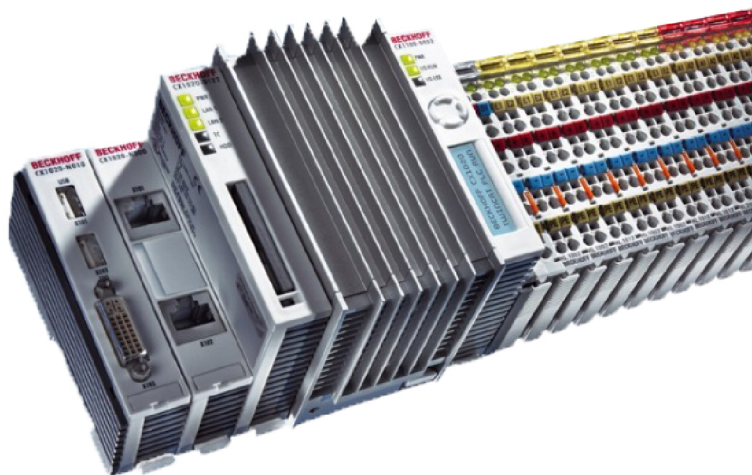
Prvým je program vytvorený pomocou nástroja System Manager. Ten predstavuje prostredníka medzi softwarovou vrstvou riadiaceho algoritmu a hardwarovými komponentami ťahu. Obsahuje zoznam všetkých vstupno-výstupných modulov pripojených k PC a umožňuje priradiť im softwarové premenné riadiaceho algoritmu. Tým je možné zmenou hodnoty v riadiacom programe okamžite nastaviť príslušný výstupný signál, alebo po zmene signálu vstupného sa táto zmena prejaví v korešpondujúcej premennej v programe.

Na tvorbu riadiaceho programu slúži nástroj PLC Control. Ten umožňuje tvorbu v niekoľkých programovacích jazykoch, textových aj grafických. Po pripojení programu pomocou System Manageru a jeho spustení dokonca umožňuje sledovanie bežiaceho výpočtu, jeho pozastavenie a krokovanie, ako aj zmenu použitých premenných.

Po dohode s firmou ELSEREMO Stage Technology bolo možné použiť už vytvorený program v System Manageri na správu hardwarového vybavenia bodového ťahu. To umožnilo zamerať sa na implementáciu osového regulátora v programe PLC Control a následne spojiť oba programy pomocou premenných dôležitých pre riadenie pohybu.

Programovacie prostredie TwinCat obsahuje ešte jeden program, ktorý značne uľahčil testovanie implementovaného riešenia. Ide o softwarový nástroj ScopeView, ktorý umožňuje vytvárať grafy reálneho priebehu softwarových premenných a vstupno-výstupných signálov. Tieto grafy boli použité na odladenie priebehu generátoru trajektórie a neskôr pri vyho-

dnocovaní testovania na bodovom ťahu.



Obrázok 5.4: Priemyselné PC CX1020 s pripojenými vstupno-výstupnými modulmi

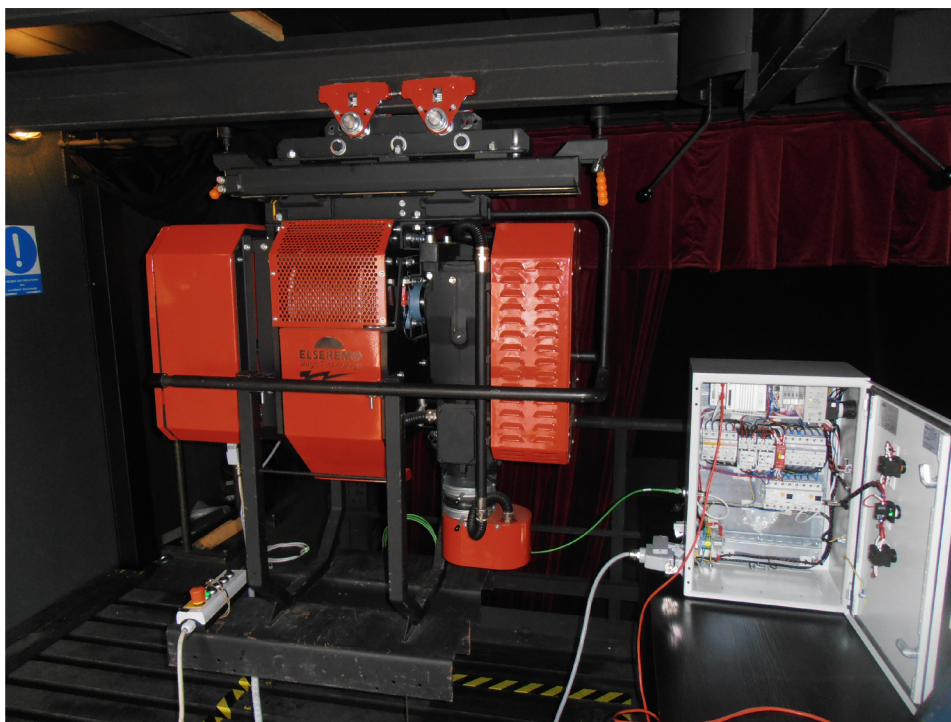
## Bodový ťah

Bodový ťah PH300A, na ktorom prebiehali testy implementovaného riešenia, je určený na vertikálny pohyb dekorácií a kúl s maximálnou hmotnosťou 300 kg. Maximálna rýchlosť pohybu je 1 meter za sekundu a celkový rozsah pohybu je 30 metrov. Daný typ je mobilný a je možné meniť jeho polohu pohybom celého zariadenia po vytvorených dráhach.

Obrázok 5.5 znázorňuje bodový ťah pripojený k hlavnému rozvádzaču a umiestnený na pojazdovej dráhe, obrázok 5.6 detail hlavného rozvádzača a rozvádzača umiestneného na konštrukcii ťahu. Ťah pozostáva z množstva komponentov, ktoré umožňujú jeho správnu funkciu a dodržanie bezpečnostných pravidiel. Pre jeho použitie na testovanie mnou vytvoreného riadiaceho algoritmu je potrebné ovládať minimálne tieto základné komponenty:

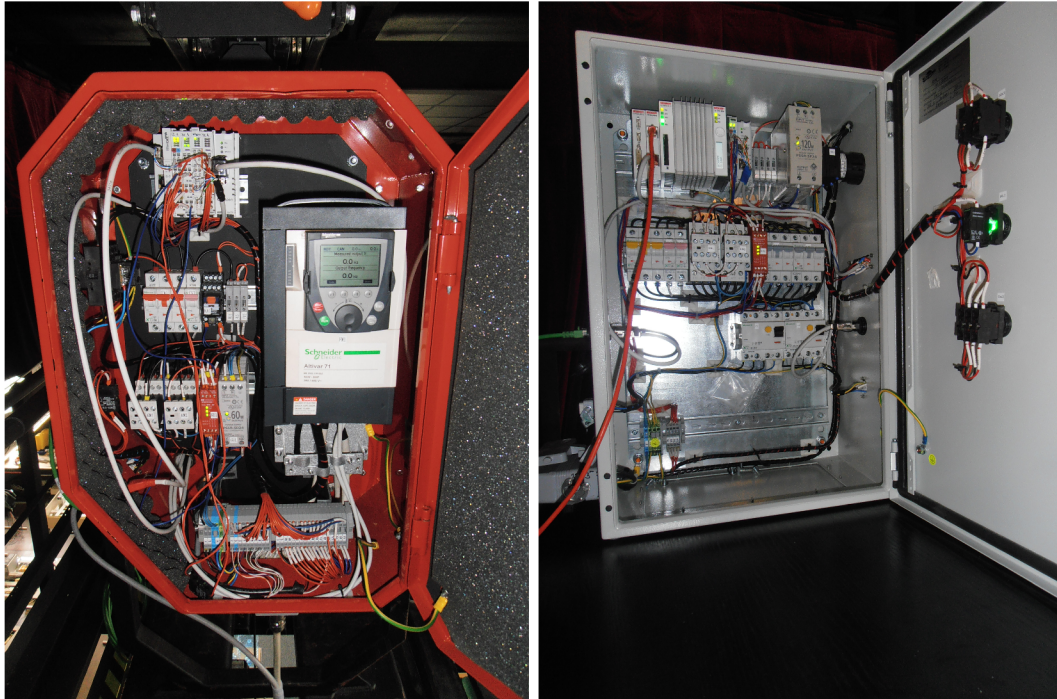
- Asynchrónny elektromotor – predstavuje pohonnú jednotku ťahu. Pomocou prevodovky je pevne spojený s lanovým bubnom. Rotačným pohybom bubnu na základe pohybu elektromotoru je navíjané alebo odvíjané oceľové lano, a tým vykonávaný pohyb zaveseného bremena.
- Brzda – bodový ťah je vybavený takzvanou dvojitou divadelnou brzdou. Tá pozostáva z dvoch nezávislých brzd, s ktorých musí byť každá schopná zastaviť ťah z plnej rýchlosti a s maximálnym zaťaženie. Brzda pracuje na elektromagnetickom princípe. Po pripojení napätia na zabudované elektromagnety je uvoľnený brzdný účinok. To zabráňuje nekontrolovanému pohybu zariadenia pri výpadku elektrickej energie.
- Snímač polohy – na určenie presnej polohy konca oceľového lana je zariadenie vybavené kombinovaným rotačným snímačom otáčok, pozostávajúci z nezávislého inkrementálneho a absolútneho snímača otáčok. Hodnota z absolútneho snímača polohy sa využíva v riadiacom algoritme osového regulátoru, hodnotu inkrementálneho snímača využíva meniť frekvencie.

- Menič frekvencie – napája a riadi rýchlosť elektromotoru podľa zadanej hodnoty. Z inkrementálneho snímaču polohy odvodzuje skutočnú rýchlosť pohybu a podľa toho upravuje riadiace zásahy. Jeho úlohou je taktiež ovládať brzdu zariadenia tak, aby pri zahájení pohybu nedošlo jej odbrzdením k prepadu bremena.



Obrázek 5.5: Bodový ťah PH300A





Obrázek 5.6: Detail rozvádzačov bodového ťahu

### 5.3 Požadované parametre riešenia

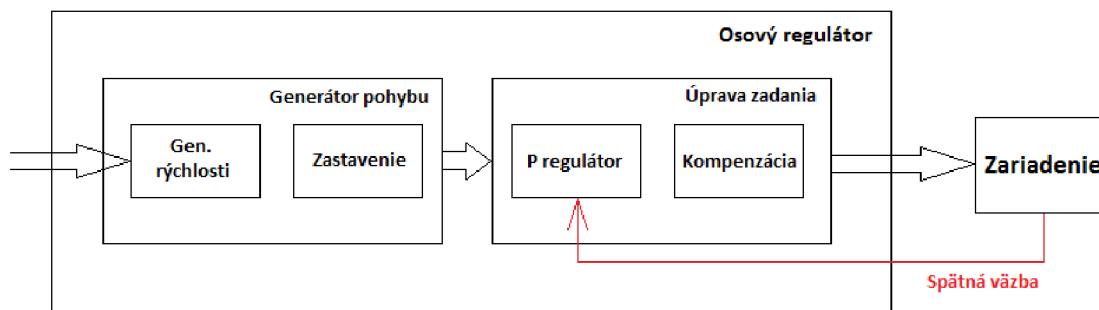
Vytvorené riešenie algoritmu osového regulátora by malo spĺňať nasledujúce kritéria:

- generovať priebeh pohybu podľa grafu 5.3,
- pomocou nástroja System Manager byť schopné ovládať dôležité časti bodového ťahu,
- uviesť bodový ťah do pohybu,
- pomocou bloku úpravy zadania udržať priemernú hodnotu odchýlky reálnej a požadovanej polohy počas pohybu ťahu pod hranicou  $1mm$ .

## Kapitola 6

# Implementácia

Cieľom implementácie je vytvoriť algoritmus osového regulátora podľa navrhovaného riešenia na obrázku 5.2, aby bolo pomocou neho možné ovládať skutočný bodový ťah. Hlavným bodom implementácie je vytvoriť generátor pohybu rátajúci požadovaný pohyb zariadenia. Samotný blok pozostáva z generátoru rýchlosti pohybu, ktorý sa snaží dosiahnuť zadanú rýchlosť pohybu, a blok zastavenia, ktorý pri dosiahnutí hraničnej polohy rozhodne o zastavení ťahu nezávisle na požadovanej rýchlosti pohybu. Výstupom generátoru je aktuálna požadovaná rýchlosť pohybu zariadenia. Táto rýchlosť vstupuje do bloku úpravy zadania, ktorý obsahuje P regulátor polohy a blok kompenzácie vlastností frekvenčného meniča. S jeho pomocou je požadovaná rýchlosť upravená tak, aby zariadenie čo najpresnejšie sledovalo požadovaný priebeh pohybu. Vnútorňú štruktúru implementovaného riešenia popisuje obrázok 6.1.



Obrázok 6.1: Detailná schéma osového regulátora

Kapitola je rozdelená do sekcií podľa etáp vývoja osového regulátora. V prvej etape bol vytvorený algoritmus generátoru pohybu. Následne bol vytvorený blok kompenzácie jeho zadania a celý program bol rozšírený o premenné potrebné na riadenie bodového ťahu. Algoritmus osového regulátora bol vytvorený v programovacom prostredí PLC Control. Hotový program bol pomocou programu System Manager na kontrolu vstupno-výstupných modulov spojený s potrebnými hardwarovými riadiacimi prvkami zariadenia.

## 6.1 Generátor pohybu

Generátor pohybu vypočítava priebeh riadiacich veličín  $j$ ,  $a$ ,  $v$ , a  $s$  tak, aby zariadenie zastavilo na požadovanej polohe. Ideálny priebeh týchto veličín je zobrazený na obrázku 5.3. Dôležitý fakt, ktorý umožňuje dosiahnuť takýto priebeh pohybu zariadenia, je definovaná maximálna možná hodnota derivácie zrýchlenia. Fyzikálne sa táto veličina označuje ako ryv (anglicky jerk) a určuje rýchlosť nárastu zrýchlenia:

$$j = a' \quad (6.1)$$

podobne pre ostatné riadiace veličiny platí:

$$a = v' = s'' \quad (6.2)$$

Generátor pohybu je implementovaný ako nekonečný cyklus, ktorý v pravidelnom časovom intervale  $T_K$  vypočíta nové hodnoty riadiacich veličín zariadenia. Ide teda o diskretnú aproximáciu vzťahov popísaných rovnicami 6.1 a 6.2, ktoré popisujú ideálny spojitý priebeh riadiacich veličín. Časový interval  $T_K$  je 0.01 sekundy. Je možné ho nastaviť na ľubovoľný časový úsek, ale je zrejme, že čím bude tento čas kratší, tým presnejší bude priebeh generovaných veličín. Integráciou rovníc 6.1 a 6.2 dostaneme vzťahy pre výpočet nových hodnôt riadiacich veličín:

$$a_n = a_a + j_n T_K \quad (6.3)$$

$$v_n = v_a + a_a T_K + \frac{1}{2} j_n T_K^2 \quad (6.4)$$

$$s_n = s_a + v_a T_K + \frac{1}{2} a_a T_K^2 + \frac{1}{6} j_n T_K^3 \quad (6.5)$$

kde hodnoty s indexom  $a$  predstavujú aktuálne hodnoty riadiacich veličín a hodnoty s indexom  $n$  nové hodnoty týchto veličín pre nasledujúci výpočtový cyklus. Nové hodnoty sú rátané ako prírastky hodnôt aktuálnych za zvolený časový okamžik  $T_K$ . Hodnota  $v_n$  predstavuje výstup generátoru pohybu a ideálne zadanie rýchlosti pre menič frekvencie.

Vstupom – zadaním pre generátor je požadovaná maximálna rýchlosť pohybu a cieľová poloha. Algoritmus pred začiatkom pohybu vyžaduje nastavenie dvoch cieľových polôh, a to pre možnú hornú a dolnú koncovú polohu (ľavú a pravú pri zariadeniach vykonávajúcich horizontálny pohyb). Skutočná cieľová poloha pre aktuálny pohyb sa vyberie až na základe zadanej rýchlosti, nakoľko túto rýchlosť ovplyvňuje obsluha zariadenia a môže sa behom pohybu meniť. Preto nie je možné pripraviť pohyb dopredu tak, aby aj pri aproximácii krokom  $T_K$  dosiahlo zariadenie presnú cieľovú polohu.

Generátor pohybu teda pracuje ako vlečný regulátor, ktorý sa snaží dosiahnuť a udržať zadanú rýchlosť. Túto rýchlosť udržiava až do okamžiku, kedy je nevyhnutné začať znižovať rýchlosť do úplného zastavenia, aby zariadenie pri dodržaní charakteristiky pohybu podľa grafu na obrázku 5.3 zastavilo čo najpresnejšie na požadovanej cieľovej polohe. Od tohto momentu (rozhodnutí o zastavení) generátor nereaguje na zadanie rýchlosti. Až po zastavení zariadenia je možné zadať nový pohyb opačným smerom, prípadne po zmene cieľovej polohy aj smerom rovnakým.

Generátor teda môžeme rozdeliť do dvoch funkčných blokov:

- **Generátor rýchlosti** – snaží sa dosiahnuť a udržať zadanú maximálnu rýchlosť pre daný pohyb
- **Rozhodnutie o zastavení** – je nadradený generátoru rýchlosti. Pri dosiahnutí medznej polohy automaticky zastaví zariadenie v cieľovej polohe.

## Generátor rýchlosti

Nasledujúce vzorce a grafy budú vždy predstavovať prípady, kedy je zadaná kladná rýchlosť pohybu – pohyb hore, respektíve doprava u horizontálnych zariadení. Vzťahy pre pohyb so zápornou rýchlosťou sú ekvivalentné s opačnými znamienkami.

Generátor zväčšuje hodnotu zrýchlenia v každom cykle o maximálnu hodnotu ryvu, podľa vzťahu 6.3. Algoritmus potom vypočíta nové hodnoty aj pre rýchlosť a polohu, podľa vzťahov 6.4 a 6.5. Hodnotu polohy blok generátoru rýchlosti už ďalej nepoužíva, jej hodnota je dôležitá až v bloku rozhodujúcom o zastavení zariadenia.

Zrýchlenie narastá lineárne až po svoju maximálnu hodnotu nastavenú pre konkrétne zariadenie. Po jej dosiahnutí sa už nemení a rýchlosť sa zvyšuje lineárne.

Kritickým bodom algoritmu je rozhodnutie o začatí znižovania zrýchlenia a tým ustálení rýchlosti na konštantnej hodnote – zadanej hodnote. Nezávisle na tom, či zariadenie dosiahlo maximálne zrýchlenie alebo nie, kontroluje algoritmus v každom výpočtovom cykle hodnotu rýchlosti, ktorú zariadenie dosiahne, ak by začalo zastavovať v nasledujúcom výpočtovom cykle. Teda zastavovalo z rýchlosti  $v_n$  so zrýchlením  $a_n$ . Hodnotu tejto rýchlosti porovná so zadanou požadovanou rýchlosťou. Ak je väčšia, je potrebné začať znižovať zrýchlenie už v aktuálnom cykle, inak zariadenie prekročí maximálnu požadovanú rýchlosť pohybu. Vzorec pre výpočet cieľovej rýchlosti nie je ťažké odvodiť a jeho tvar je:

$$v_c = v_n + \frac{a_n^2}{2j_{max}} \quad (6.6)$$

kde  $j_{max}$  predstavuje maximálnu možnú hodnotu ryvu.

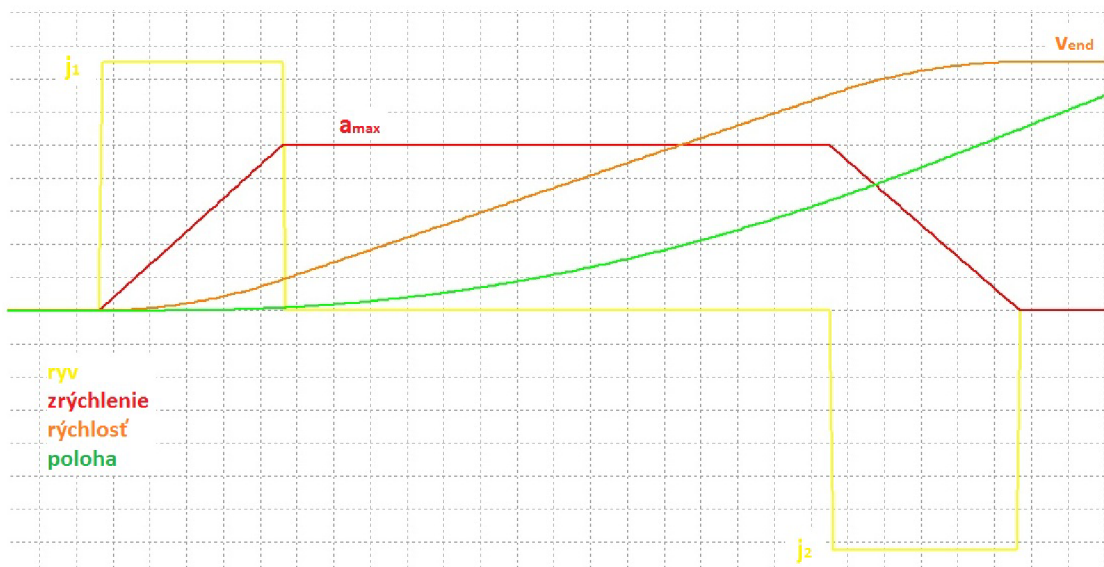
Po splnení podmienky prekročenia maximálnej rýchlosti v nasledujúcom kroku je rozhodnuté o automatickom znížení zrýchlenia na nulovú hodnotu. Avšak ani to nemusí zaručiť presné dosiahnutie požadovanej rýchlosti. Nakoľko algoritmus pracuje s určitým výpočtovým krokom  $T_K$ , je veľmi pravdepodobné, že ideálny časový okamžik obmedzenia zrýchlenia leží medzi aktuálnym a nasledujúcim krokom výpočtu. V tom prípade by zariadenie pri znižovaní zrýchlenia hodnotou maximálneho ryvu dosiahlo rýchlosť menšiu, ako je požadovaná.

Pre dosiahnutie presnej zadanej rýchlosti pohybu algoritmus upravuje hodnotu záporného ryvu, s ktorým je znižované zrýchlenie až na nulovú hodnotu. Vzorec pre novú hodnotu ryvu je odvodený zo vzorca 6.6 a má tvar:

$$j_n = \frac{a_a^2}{2(v_a - v_{end})} \quad (6.7)$$

kde  $v_{end}$  predstavuje požadovanú rýchlosť pohybu.

Nová hodnota ryvu sa použije pri opätovnom výpočte nového zrýchlenia, rýchlosti a polohy. Takouto úpravou zaručíme plynulé dosiahnutie rýchlosti so zachovaním dynamickej charakteristiky zariadenia.



Obrázek 6.2: Graf priebehu zrýchľovania s dosiahnutím maximálneho zrýchlenia

Graf 6.2 znázorňuje priebeh riadiacich veličín pri dosahovaní požadovanej rýchlosti. Na grafe je znázornený priebeh, kedy zariadenie pri zrýchľovaní dosiahne maximálne možné zrýchlenie. Pri menšej zadanej rýchlosti, môže nastať aj situácia, že zariadenie začne znižovať zrýchlenie ešte pred dosiahnutím jeho maximálnej hodnoty. V tomto prípade nasleduje hodnota záporného ryvu  $j_2$  ihneď za hodnotou  $j_1$ , bez nulovej hodnoty medzi nimi. Hodnota ryvu  $j_1$  sa rovná maximálnemu možnému ryvu zariadenia  $j_{max}$ , avšak hodnota  $j_2$  je väčšia ako maximálne možný záporný ryv  $-j_{max}$ , kôli dosiahnutiu presnej požadovanej rýchlosti (6.7).

## Rozhodnutie o zastavení

Ako už bolo napísané, algoritmus generátoru pohybu sleduje zadanie rýchlosti až do okamžiku, kedy je nevyhnutné znížiť rýchlosť na nulu a zastaviť. Toto rozhodnutie má na starosti samostatný blok, ktorého vstupmi sú hodnoty nových riadiacich veličín vypočítané v predchádzajúcom bloku. Blok na ich základe vykoná rozhodnutie, či je možné pokračovať v doterajšom pohybe, alebo je nevyhnutné ho ukončiť. Pri rozhodnutí o ukončení pohybu prepne celý generátor pohybu do stavu, ktorý zariadenie zastaví. Tento stav je možné opustiť až po úplnom zastavení zariadenia.

Podstatou algoritmu na rozhodnutie o zastavení je porovnanie cieľovej polohy s polohou, ktorú by zariadenie dosiahlo, ak by v nasledujúcom cykle generátoru začalo zastavovať s maximálnou hodnotou ryvu. Ak je vypočítaná hodnota väčšia ako zadaná cieľová poloha, je nevyhnutné ukončiť doterajší priebeh pohybu a začať fázu zastavenia už v aktuálnom cykle algoritmu. Získanie cieľovej polohy zariadenia je rozdelené do niekoľkých krokov.

Prvým krokom výpočtu je určenie takzvanej vrcholovej rýchlosti a polohy pre aktuálne hodnoty riadiacich veličín. Pri zadaní krátkeho pohybu, alebo pri zrýchľovaní tesne pred bodom rozhodnutia o zastavení môže nastať, že zariadenie musí začať zastavovať vo fáze dosahovania požadovanej rýchlosti. To znamená, že jeho zrýchlenie je nenulové a pri jeho

lineárnom znižovaní až do nulovej hodnoty zariadenie urazí určitú dráhu a jeho rýchlosť narastie. Situáciu popisuje graf 6.3, kde ešte po časovom okamžiku  $T_S$ , ktorý je hraničným bodom pre zastavenie, zariadenie zrýchľuje na maximálnu rýchlosť  $v_v$ . V tomto okamžiku dosiahne polohu  $s_v$ . Na výpočet vrcholových hodnôt je potrebné poznať dobu  $t_v$ , za ktorú klesne zrýchlenie na nulu. Tú vypočítame podľa vzorca:

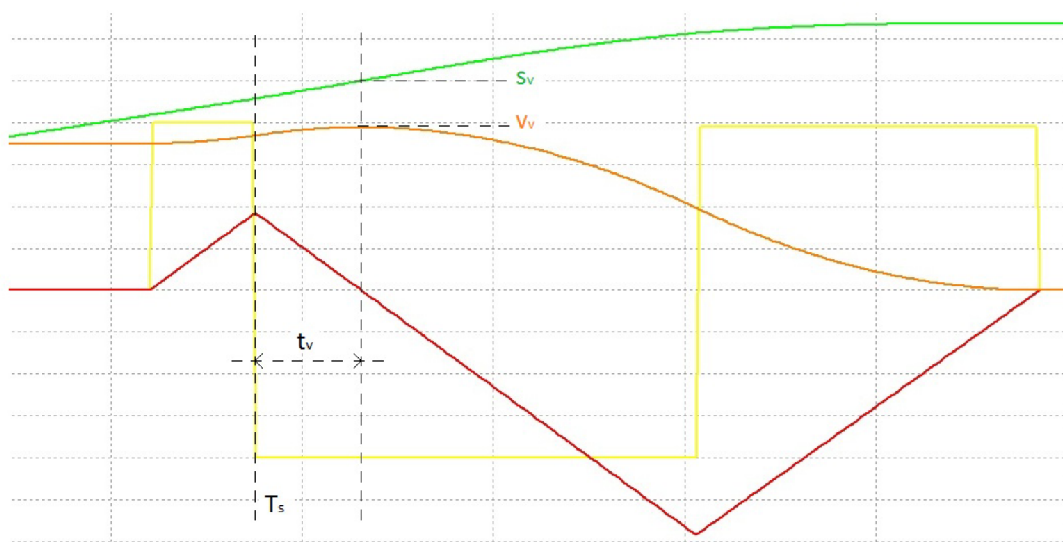
$$t_v = \frac{a_n}{\dot{j}_{max}} \quad (6.8)$$

S použitím tohto času je možné vypočítať aj hodnoty  $s_v$  a  $v_v$ .

$$v_v = v_n + \frac{1}{2}a_n t_v \quad (6.9)$$

$$s_v = s_n + v_v t_v - \frac{1}{6}j_{max} t_v^3 \quad (6.10)$$

V prípade, že zariadenie nebolo vo fáze zrýchľovania, ale udržiavalo konštantnú rýchlosť pri nulovom zrýchlení, čas  $t_v$  bude nulový, nakoľko  $a_n$  je nulové. Vďaka tomu v rovniciach 6.9 a 6.10 vypadnú členy obsahujúce  $t_v$  a ich výsledok bude  $v_n$ , respektíve  $s_n$ .



Obrázek 6.3: Graf dosiahnutia vrcholovej rýchlosti a polohy

Zo známej vrcholovej rýchlosti a polohy už nie je ťažké vypočítať, kde zariadenie zastaví, ak začne znižovať rýchlosť v nasledujúcom výpočtovom cykle. V tomto bode algoritmus opäť rozlišuje dve možnosti: zastavenie bez dosiahnutia maximálneho záporného zrýchlenia alebo zastavenie s jeho dosiahnutím.

Konkrétnu variantu je možné vybrať na základe hodnoty vrcholovej rýchlosti  $v_v$ . Ak je táto rýchlosť väčšia ako rýchlosť  $v_T$ , zariadenie dosiahne počas brzdenia maximálne zrýchlenie. Hodnotu  $v_T$  vypočítame ako:

$$v_T = \frac{a_m^2}{j_m} \quad (6.11)$$

kde  $a_m$  je maximálne povolené zrýchlenie pre dané zariadenie.

Pri zastavení bez dosiahnutia maximálneho zrýchlenia vypočítame výslednú dráhu ako súčin vrcholovej rýchlosti a času  $t_D$ , ktorý sa rovná polovici času do zastavenia  $t_Z$ .

$$s_D = v_v t_D \quad (6.12)$$

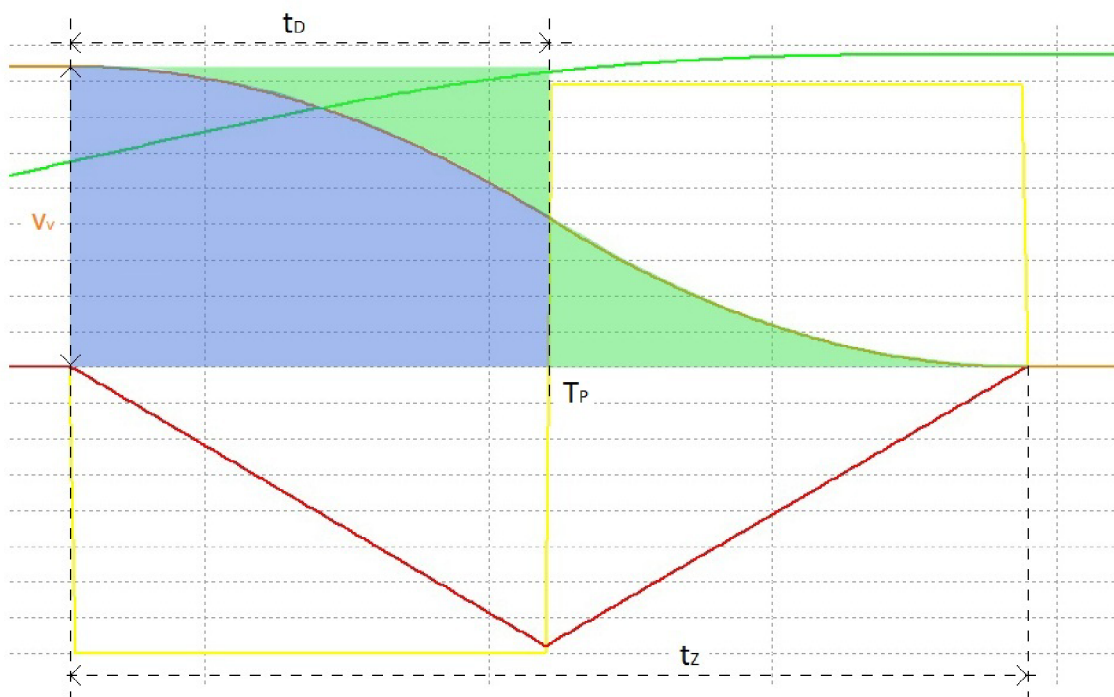
Platnosť vzťahu je dobre viditeľná na grafe 6.4, kde doplnením úseku rýchlosti po bode  $T_P$  k rýchlosti pred ním, vznikne obdĺžnik s hranami  $t_D$  a  $v_v$ , ktorého plocha predstavuje hľadanú dráhu. Hodnotu času  $t_D$  získame na základe vzťahov pre  $a_D$  a  $v_v$

$$v_v = a_D t_D \quad (6.13)$$

$$a_D = j_{max} t_D \quad (6.14)$$

Kombináciou a úpravou rovníc 6.13 a 6.14 dostaneme výsledný vzťah pre čas  $t_D$ :

$$t_D = \frac{t_Z}{2} = \sqrt{\frac{v_v}{j_{max}}} \quad (6.15)$$



Obrázek 6.4: Zastavenie bez dosiahnutia maximálneho zrýchlenia

Pri zastavení s dosiahnutím maximálneho zrýchlenia platí taktiež rovnica 6.12, ale výsledný čas  $t_D$  sa skladá z viacerých úsekov

$$t_D = \frac{t_Z}{2} = t_0 + \frac{t_1}{2} \quad (6.16)$$

kde  $t_0$  je čas do dosiahnutia maximálneho zrýchlenia a  $t_1$  doba, po ktorú zariadenie udržuje toto zrýchlenie. Platnosť vzťahu 6.12 pre túto variantu dokazuje graf 6.5, kde opäť doplnením plochy rýchlosti po časovom okamžiku  $T_K$  k ploche pred ním, vznikne obdĺžnik so stranami  $v_v$  a  $t_D$ .

Čas  $t_0$  vypočítame jednoducho ako podiel maximálneho zrýchlenia a ryvu

$$t_0 = \frac{a_{max}}{\dot{j}_{max}} \quad (6.17)$$

Za tento čas zariadenie spomalí o rýchlosť, ktorá sa rovná polovici rýchlosti  $v_T$  – 6.11. Takúto istú rýchlosť zariadenie stratí aj v poslednej fáze zastavovania, kedy záporné zrýchlenie klesá a blíži sa nule. Z toho vyplýva, že rýchlosť  $v_K$ , ktorú musí zariadenie stratiť pri konštantnej hodnote zrýchlenia sa rovná:

$$v_K = v_v - 2v_T \quad (6.18)$$

Potom pre čas  $t_1$  platí

$$t_1 = \frac{v_K}{a_{max}} \quad (6.19)$$

Spojením vzťahov 6.16, 6.17, 6.18, 6.20 a ich dosadením do rovnice 6.12 vznikne vzťah pre urazenú dráhu pri znižovaní rýchlosti s dosiahnutím maximálneho zrýchlenia:

$$s_D = v_v \left( \frac{a_{max}}{\dot{j}_{max}} + \frac{v_v - v_T}{2a_{max}} \right) \quad (6.20)$$

Výsledná cieľová poloha  $s_C$ , v ktorej zariadenie zastaví, ak by začalo zastavovať v nasledujúcom výpočtovom cykle programu, predstavuje súčet vrcholovej a dojazdovej polohy:

$$s_C = s_v + s_D \quad (6.21)$$

Ak je táto hodnota väčšia ako požadovaná cieľová poloha, pokračovaním v pohybe a brzdéním až v nasledujúcom kroku výpočtu, by zariadenie zastavilo za cieľovou polohou. Preto je nevyhnutné začať brzdiť už v aktuálnom cykle výpočtu.

Avšak tak ako pri dosiahnutí požadovanej rýchlosti, aj tu nastáva problém s diskretným časovým krokom  $T_K$ . Ideálny čas zastavenia môže ležať medzi aktuálnym a nasledujúcim krokom výpočtu. Zastavovaním začatým v tomto cykle by zariadenie taktiež nezastavilo v cieľovej polohe, ale pred ňou. Problém nesprávneho zastavenia rieši algoritmus aproximáciou jedného výpočtového cyklu na základe pomeru odchýliek od cieľovej polohy pri zastavení v aktuálnom a nasledujúcom cykle. Chybu zastavenia pre nasledujúci cyklus  $e_1$  vypočítame s pomocou vzťahu 6.21 ako:

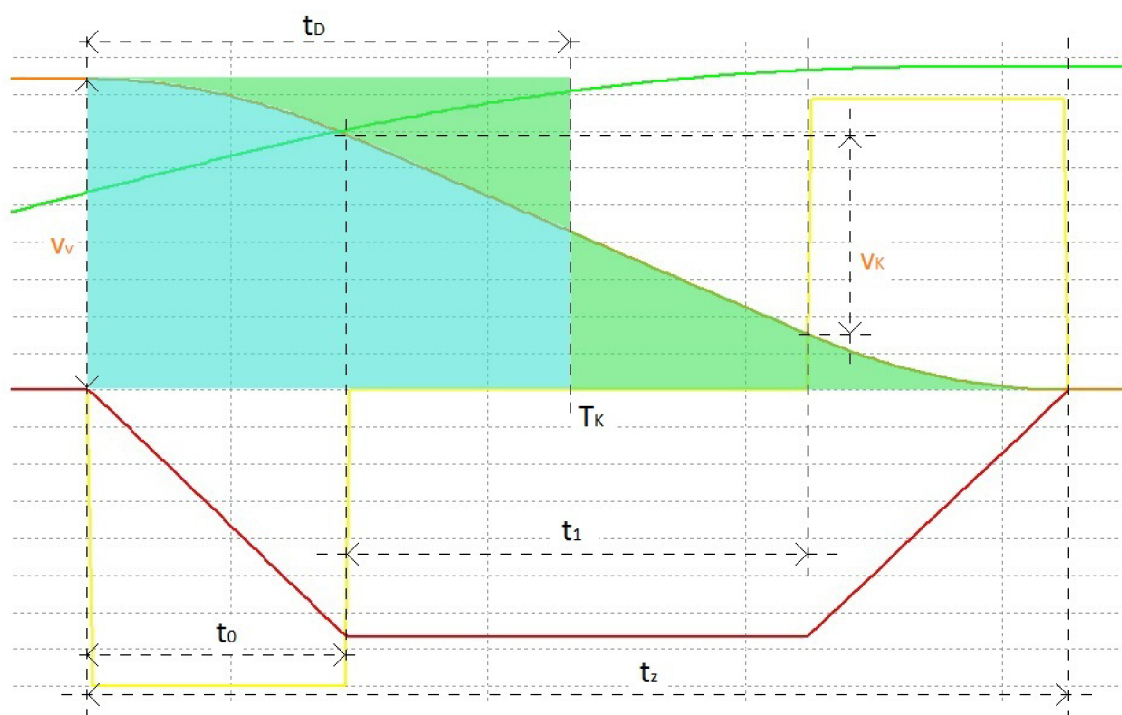
$$e_1 = s_{C1} - s_{end} \quad (6.22)$$

kde  $s_{C1}$  je poloha pri zastavení,  $s_{end}$  požadovaná cieľová poloha. Pre odchýlku  $e_2$  od požadovanej polohy od polohy zastavenia v aktuálnom kroku  $s_{C2}$  platí rovnaký vzťah ako pre  $s_{C1}$ , ale musia sa upraviť rovnice pre vrcholový čas, rýchlosť a polohu:

$$t_v = \frac{a_s}{\dot{j}_{max}} \quad (6.23)$$

$$v_v = v_s + \frac{1}{2} a_s t_v \quad (6.24)$$





Obrázek 6.5: Zastavenie s dosiahnutím maximálneho zrýchlenia

$$s_v = s_s + v_v t_v - \frac{1}{6} j_{max} t_v^3 \quad (6.25)$$

Nové hodnoty riadiacich veličín pre nasledujúci cyklus algoritmu sa aproximujú z dvoch priebehov pohybu, ako keby zariadenie pokračovalo po dobu  $t_1$  v nezmenenom pohybe, a následne po dobu  $t_2$  začalo so zastavovaním. Pre časy  $t_1$  a  $t_2$  platí, že  $t_1 + t_2 = T_K$  a:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{e_1}{e_2} \quad (6.26)$$

Pre prvú časť aproximovaného pohybu platí:

$$a_1 = a_s + j_n t_1 \quad (6.27)$$

$$v_1 = v_s + a_s t_1 + \frac{1}{2} j_n t_1^2 \quad (6.28)$$

$$s_1 = s_s + v_s t_1 + \frac{1}{2} a_s t_1^2 + \frac{1}{6} j_n t_1^3 \quad (6.29)$$

a pre druhú časť:

$$j_2 = j_n = -j_{max} \quad (6.30)$$

$$a_2 = a_n = a_1 + j_n t_2 \quad (6.31)$$

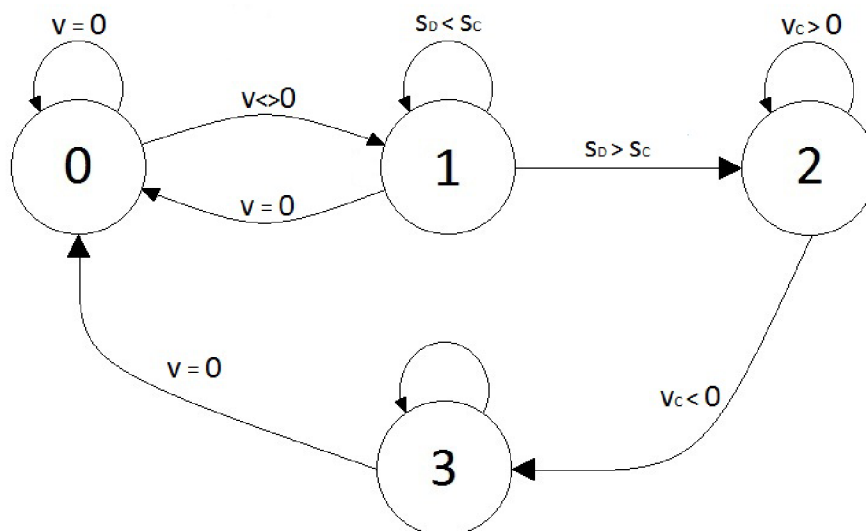
$$v_2 = v_n = v_1 + a_1 t_2 + \frac{1}{2} j_n t_2^2 \quad (6.32)$$

$$s_1 = s_n = s_1 + v_1 t_2 + \frac{1}{2} a_1 t_2^2 + \frac{1}{6} j_n t_2^3 \quad (6.33)$$

Hodnoty  $j_2$ ,  $a_2$ ,  $v_2$ ,  $s_2$  sa použijú ako nové riadiace veličiny pre nasledujúci krok výpočtu. Použitá aproximácia neodstráni úplne chybu diskrétného algoritmu, ale výrazne zlepši presnosť zastavenia.

Po rozhodnutí o zastavení zariadenie pokračuje v znižovaní rýchlosti s maximálnou hodnotou záporného ryvu. Priebeh zastavenia je ekvivalentný s priebehom zrýchľovania na požadovanú rýchlosť zariadenia v podsekcii Generátor rýchlosti podľa vzťahov 6.6 a 6.7. Záporné zrýchlenie narastá lineárne, pri dosiahnutí maximálnej hodnoty sa ustáli, až pokým nie je rozhodnuté o jeho znižovaní hodnotou nového ryvu tak, aby zariadenie zastavilo presne na nulovej rýchlosti. Po zastavení je algoritmus v počiatočnom stave pripravený prijať požiadavky na nový pohyb.

Obrázok 6.6 znázorňuje konečný automat vnútorných stavov algoritmu generátora pohybu. Stav 0 predstavuje počiatočný stav. Zariadenie je v pokoji a čaká na zadanie nového pohybu. Ak získa nové zadanie, ktoré je možné vykonať, zahájí pohyb a prejde do stavu 1. Ak je zadanie nesprávne, napríklad pohyb hore v maximálnej polohe zariadenia, stav sa nezmení a zariadenie čaká na nové zadanie. Stav 1 predstavuje generátor rýchlosti. Algoritmus sa snaží dosiahnuť, udržať a sledovať zmeny požadovanej rýchlosti. Ak sa táto rýchlosť zmení na nulovú, po jej dosiahnutí prejde algoritmus späť do stavu 0. Ak blok rozhodnutia o zastavení zistí, že je potrebné ukončiť pohyb, prejde zariadenie do stavu 2, v ktorom narastá záporné zrýchlenie a tým sa znižuje rýchlosť pohybu. Do stavu 3 sa zariadenie dostane v okamžiku, kedy je nutné znížiť záporné zrýchlenie a tým dosiahnuť zastavenie na nulovej rýchlosti. Po jej dosiahnutí prejde algoritmus do stavu 0 a je pripravený na ďalší pohyb.



Obrázok 6.6: Konečný automat riadiaceho algoritmu

## 6.2 Úprava zadania

Blok úpravy zadania obsahuje dve upravujúce metódy: P regulátor a kompenzáciu vlastností meniča frekvencie.

P regulátor slúži na odstránenie regulačnej odchýlky vzniknutej odklonom ideálneho pohybu od možností reálneho zariadenia, ako aj na odstánenie poruchových neznámych vplyvov.

Kompenzácia vlastností meniča frekvencie odstraňuje vplyv prechodových dejov meniča na zadanie rýchlosti. Aj keď je pre nás frekvenčný menič čierna skrinka dodávaná výrobcom, môžeme jeho činnosť vyjadriť určitým matematickým modelom a na základe tohto modelu upraviť zadanie rýchlosti pre dosiahnutie presnejšieho riadenia.

### P regulátor

Regulátor pracuje na klasickom princípe P regulátoru. K vypočítanej rýchlosti  $v_n$  pridá hodnotu závislú na hodnote aktuálnej odchýlky skutočnej a ideálnej polohy  $v_p$ .

$$v_p = K_p e \quad (6.34)$$

kde  $K_p$  je proporcionálna konštanta regulátoru a  $e = s_a - s_{real}$ .

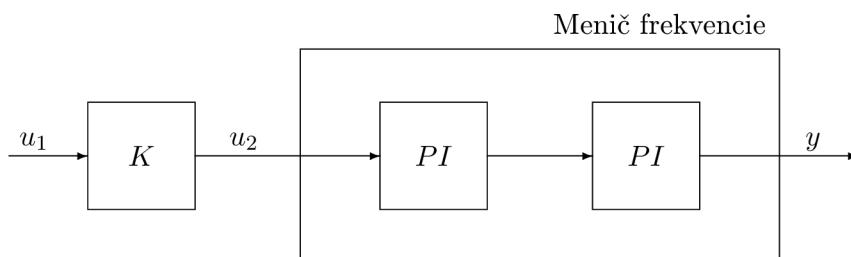
### Kompenzácia známych vlastností

Blok kompenzácie vo svojej podstate pracuje ako ovládací prvok. Snaží sa odstrániť nedostatky riadenej sústavy bez spätnej väzby na základe znalostí o jej chovaní.

Algoritmus kompenzácie obsahuje úpravu na odstránenie chýb vyvolaných prechodovou charakteristikou meniča frekvencie. Menič frekvencie obsahuje dva vnútorné regulačné obvody spojené v sérii. Oba sú vytvorené pomocou PI regulátora. Prvá regulačná slučka riadi priebeh zadanej rýchlosti, druhá priebeh prúdu napájajúceho elektromotor.

PI regulátor spôsobuje oneskorenie výstupného signálu oproti signálu vstupnému. Charakter tohto prenosu môžeme popísať vzťahom

$$G_p = \frac{1}{1 + pT} \quad (6.35)$$



Obrázek 6.7: Bloková schéma kompenzácie zadania

Problém kompenzácie zadania znázorňuje obrázok 6.7. Vstupom kompenzačného bloku je ideálna rýchlosť z generátoru pohybu, jeho výstupom upravená rýchlosť  $u_2$ . Rýchlosť  $u_2$

je zároveň vstupom pre menič frekvencie. Výstupom meniča je reálna rýchlosť zariadenia  $y$ . Na základe vzťahu 6.36 môžeme prenos frekvenčného meniča vyjadriť vzťahom:

$$y = u_2 \frac{1}{1 + pT_1} \frac{1}{1 + pT_2} \quad (6.36)$$

Zo vzťahu 6.36 môžeme vyjadriť:

$$u_2 = y(1 + pT_1)(1 + pT_2) = y(p_2T_1T_2 + p(T_1T_2) + 1) \quad (6.37)$$

Úlohou algoritmu je dosiahnuť, aby sa  $u_1 = y$ , keď platí  $u_2 = u_1K$ . S použitím vzťahu 6.37 dostaneme výslednú rovnicu pre prenos kompenzačného bloku K:

$$K = p^2T_1T_2 + p(T_1 + T_2) + 1 \quad (6.38)$$

Vzťah vyjadruje nutnosť pripočítať k ideálnej rýchlosti z generátoru pohybu, v rovnici 6.38 predstavovanou hodnotou 1, jej prvú a druhú deriváciu. Vypočítaný prenos odpovedá teoretickým poznatkom a vzorcu 4.9 zo sekcie 4.4. K zadaniu rýchlosti je teda potrebné na kompenzáciu vlastností meniča frekvencie pripočítať hodnotu závislú na aktuálnom zrýchlení a ryve zariadenia. Výsledné zadanie pre menič frekvencie  $V_{out}$  aj s použitím vzťahu 6.34 pre P regulátor teda definuje vzťah:

$$v_{out} = v_n + v_p + k_a a_n + k_j j_n \quad (6.39)$$

### 6.3 Prepojenie so zariadením

Algoritmus osového regulátora pozostáva z dvoch blokov uvedených v predchádzajúcich sekciách. Na jeho reálnu funkciu je však potrebné vytvoriť prepojenie medzi ním a skutočnými hodnotami premenných riadeného zariadenia. V 5.2 sú vymenované dôležité prvky zariadenia, z ktorých zariadenie získava dáta, alebo pomocou ktorých riadi svoj chod. Na ich správu činnosť a na použiteľnosť získaných údajov je potrebné zakomponovať do algoritmu nasledujúce opatrenia.

#### Prevod na RPM

Rýchlosť vypočítaná generátorom pohybu je v jednotkách  $mm s^{-1}$ . Avšak menič frekvencie riadiaci pohyb elektromotoru očakáva hodnotu rýchlosti zadanú v otáčkach za minútu (rpm). Preto je potrebné hodnotu výstupnej rýchlosti  $v$  upraviť pomocou vhodnej konštanty  $k_{out}$ . Na jej výpočet je potrebné poznať prevod medzi elektromotorom a lanovým bubnom a taktiež jeho priemer.

$$v = v_{out} k_{out} \quad (6.40)$$

$$k_{out} = \frac{60 k_{prevod}}{k_{priemer} \pi} \quad (6.41)$$

#### Smer pohybu

Menič frekvencie prijíma zadanie rýchlosti ako bezznamienkovú hodnotu. Smer pohybu je preto potrebné určiť pomocou riadiaceho slova meniča. Riadiace slovo má k jednotlivým bitom priradené rôzne parametre pohybu. Nastavením nultého bitu na hodnotu 1 vykoná menič pohyb vpred, nastavením prvého bitu pohyb vzad. Pri nastavení oboch bitov na hodnotu 0 sa nevykoná žiaden pohyb aj pri zadanej nenulovej rýchlosti.

## Reálna poloha

Na zistenie reálnej polohy obsahuje zariadenie absolútny rotačný snímač. Ten je osadený priamo na hriadeľ elektromotoru a počíta jeho otáčky. Jedna otáčka je rozdelená na 4096 pulzov. To znamená, že jedna otáčka vpred zvýši vnútorné počítadlo snímača o hodnotu 4096, otáčka vzad ho naopak o túto hodnotu zníži. Výstupom snímača je hodnota týchto pulzov. Na výpočet reálnej polohy podľa snímača je potrebné vedieť prírastok skutočnej dráhy  $k_s$  pri pootočení snímača o jeden pulz.

$$k_s = \frac{k_{priemer}\pi}{4096k_{prevod}} \quad (6.42)$$

Skutočná hodnota zariadenia  $s_{real}$  sa potom rovná

$$s_{real} = k_s s_p \quad (6.43)$$

kde  $s_p$  predstavuje počet pulzov od snímaču. Táto hodnota však nemusí korešpondovať s požadovanou hodnotou polohy. Napríklad v najnižšej možnej polohe 0mm môže snímač indikovať inú polohu. Odchýlka môže vzniknúť napríklad manuálnym pohybom zariadenia bez prívodu napätia do snímaču. Na odstránenie tejto odchýlky je k hodnote reálnej polohy zo snímaču pripočítaná korekcia  $k_{offset}$  daná odchýlkou od predpokladanej polohy.

$$s_{real} = k_{offset} + k_s s_p \quad (6.44)$$

## Odbrzdenie

Bodový ťah je vybavený bezpečnostnou brzdou, ktorá je v normálnom stave zopnutá a nedovolí zariadeniu žiaden pohyb. Na jej odbrzdenie slúžia elektromagnety, ktoré pripojením napätia spôsobia uvoľnenie brzdnych doštičiek. Povel pre odbrzdenie vydáva menič frekvencie ihneď ako dostane oprávnenú požiadavku na pohyb. Avšak účinok elektromagnetov sa neprejaví okamžite po vydaní povelu na odbrzdenie a brzdy pôsobia proti pohybu zariadenia. Preto je potrebné vydať povel na odbrzdenie skôr, ako začne generátor zvyšovať rýchlosť zariadenia. Pri prijatí požiadavky na pohyb je po určitú dobu  $t_c$  zadaná rýchlosť pre menič nulová, a až potom pokračuje zadanie v normálnom zrýchľovaní podľa generátoru pohybu. Zadanie nulovej rýchlosti spôsobí vydanie povelu pre odbrzdenie, avšak zariadenie sa nebude hýbať. Po uplynutí doby  $t_c$  potrebnej na úplné odbrzdenie je možné zahájiť požadovaný pohyb.

## Kapitola 7

# Testovanie

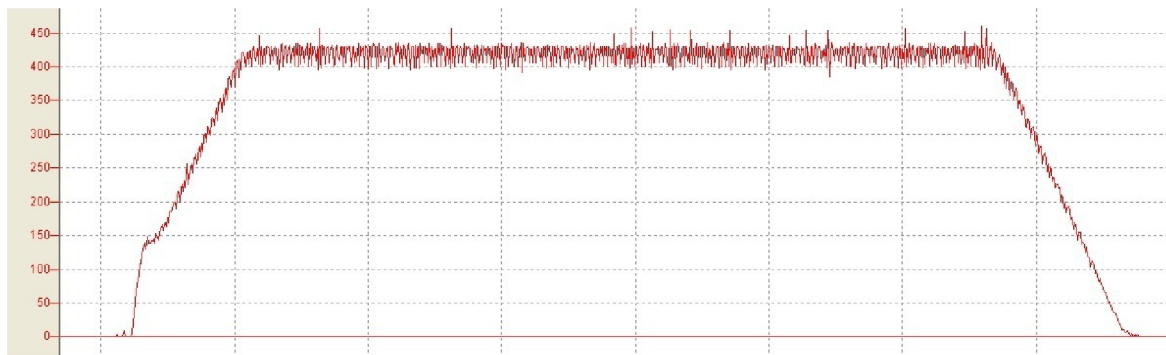
Testovanie vytvoreného algoritmu na bodovom ťahu firmy ELSEREMO Stage Technology. Ťah bol umiestnený v predvádzacej miestnosti spoločnosti, ktorá bohužiaľ svojou konštrukciou neumožnila testovať zariadenie so záťažou. Namerané hodnoty predstavujú pohyb nezafarženého zariadenia. Hodnoty boli spracované pomocou programu ScopeView, ktorý umožňuje vytvárať grafy priebehu sledovaných veličín. Priebehy niektorých veličín sú vo výslednom zobrazení proporcionálne upravené kvôli prehľadnosti grafov, avšak na celkový charakter skúmaných vzťahov to nemá vplyv.

### Nastavenie frekvenčného meniča

Prvým bodom testovania bolo overenie prechodovej charakteristiky zariadenia na skokovú zmenu rýchlosti. Parametrami ovplyvňujúcimi priebeh rýchlosti sú proporcionálna a integračná konštanta regulátora rýchlosti v meniči frekvencie.

Tieto parametre boli už pred začatím testovania riadiaceho algoritmu nastavené na hodnoty, ktoré zaručovali požadovaný priebeh rýchlosti. Menič si sám, na základe zadaných parametrov riadeného elektromotoru dokáže vypočítať odpovedajúce nastavenia.

Prechodová charakteristika zariadenia na skok rýchlosti je zobrazená na grafe 7.1. Charakteristika bola získaná ako derivácia priebehu polohy pomocou absolútneho snímača polohy. To spôsobilo jemne nelineárny priebeh. Aj napriek tomu je z grafu jasne zreteľná prechodová charakteristika, ktorá je dostatočná na správnu funkciu riadiaceho algoritmu. Skokový úsek na začiatku spôsobilo oneskorené rozopnutie brzd, nakoľko neboli ovládané v predstihu ako pri použití riadiaceho algoritmu.



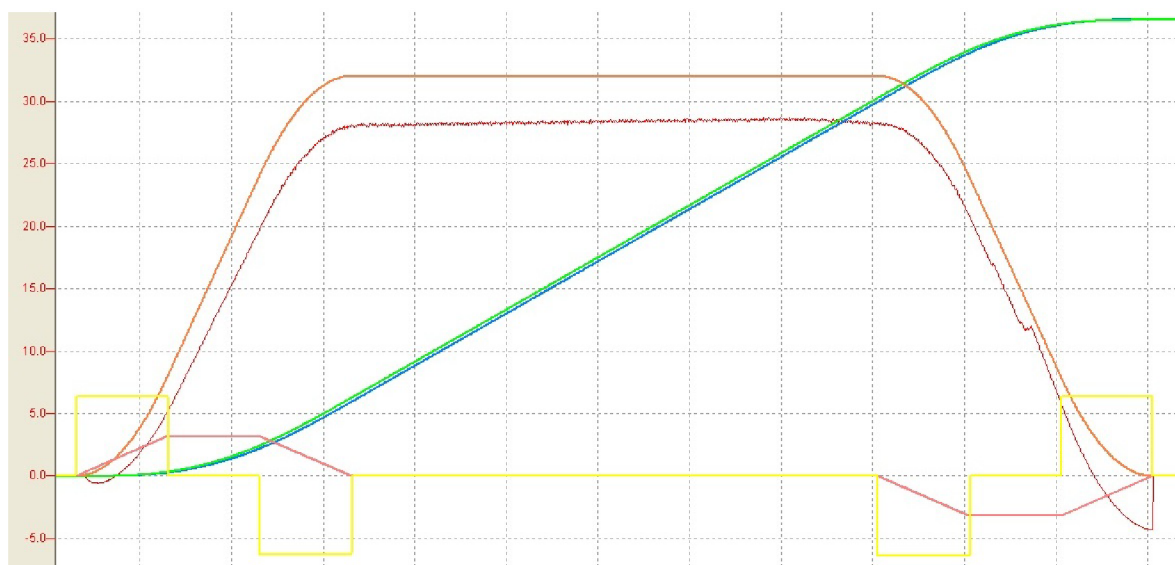
Obrázek 7.1: Odozva zariadenia na skok rýchlosti

## Ideálny priebeh

Graf 7.2 predstavuje priebeh odchýlky ideálnej polohy od polohy reálnej bez použitia kompenzačných algoritmov a regulátora. Z grafu je vidieť, že odchýlka polohy zariadenia sa pri konštantnej maximálnej rýchlosti ustálila na hodnote približne 27 mm. Veľkosť odchýlky sa mení pri zrýchľovaní a spomaľovaní. Pri zrýchlení odchýlka narastá na maximálnu hodnotu, ktorú si udržiava až do momentu zastavenia. Pri spomaľovaní sa odchýlka znižuje, až v momente zastavenia dosiahne zápornú hodnotu približne 5 mm.

Nárast hodnoty odchýlky pri zrýchľovaní spôsobuje práve použitie meniča frekvencie s jeho dvoma PI regulátormi na dosiahnutie požadovanej rýchlosti. Regulátory spôsobia nepatrné oneskorenie skutočnej rýchlosti oproti rýchlosti ideálnej, a tým aj nárast polohovej chyby. Pri spomaľovaní spôsobí oneskorená odozva skutočnej rýchlosti pokles polohovej odchýlky.

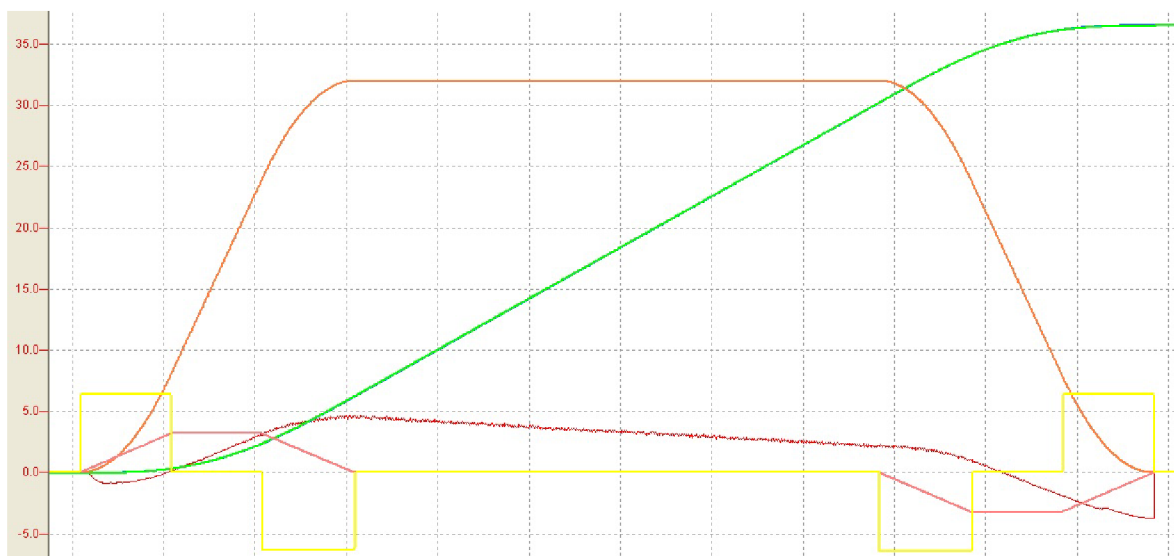
Polohová odchýlka v cieľovom stave je približne -5 mm, čo znamená, že zariadenie zastavilo za požadovanou polohou. Táto hodnota sa nejaví ako veľká, ale aj tak je v divadelnej praxi nedostačujúca. Súčasná zariadenia dosahujú odchýlku v rádoch desiatín milimetra. Maximálna hodnota odchýlky viac ako 25 mm je z hľadiska nutnosti synchronizácie niekoľkých zariadení absolútne neúnosná. Zariadenie by malo byť schopné udržať priebeh reálnej polohy s toleranciou maximálne 1 mm.



Obrázek 7.2: Riadenie pomocou ideálneho pohybu

## Kompenzácia vlastností meniča frekvencie

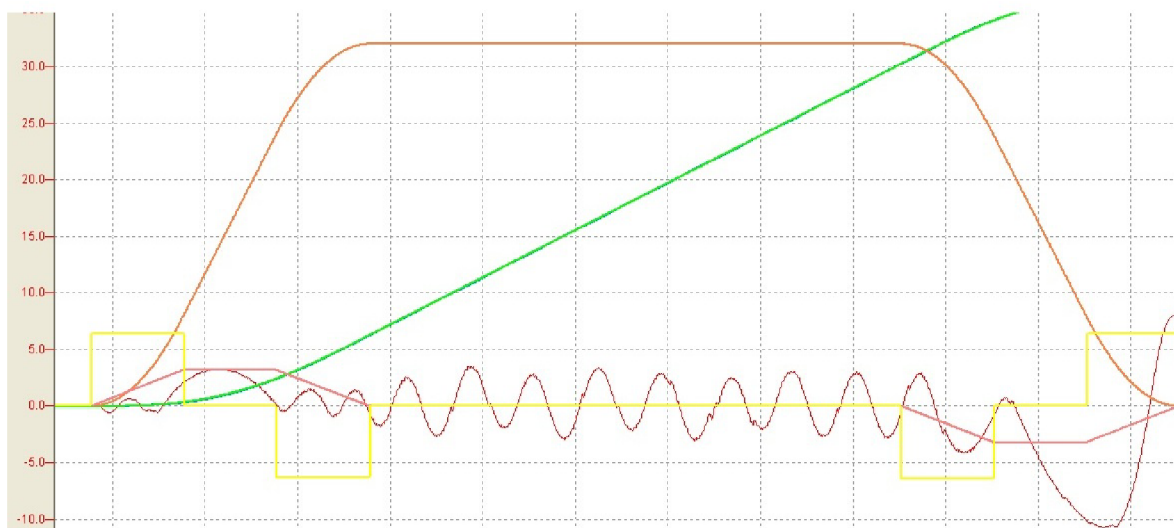
Kompenzácia vlastností meniča frekvencie odstraňuje odchýlky vzniknuté činnosťou vnútorných regulátorov meniča. Priebeh odchýlky reálnej a ideálnej polohy pri použití kompenzačného bloku bez použitia P regulátora znázorňuje graf 7.3. Použitím kompenzácie sa zredukoval nárast odchýlky pri zrýchľovaní zariadenia, a odchýlka pri ustálenej rýchlosti klesla na hodnotu približne 5 mm. To predstavuje zlepšenie regulácie na jednu pätinu pôvodnej hodnoty.



Obrázek 7.3: Riadenie s použitím kompenzácie vlastností meniča frekvencie

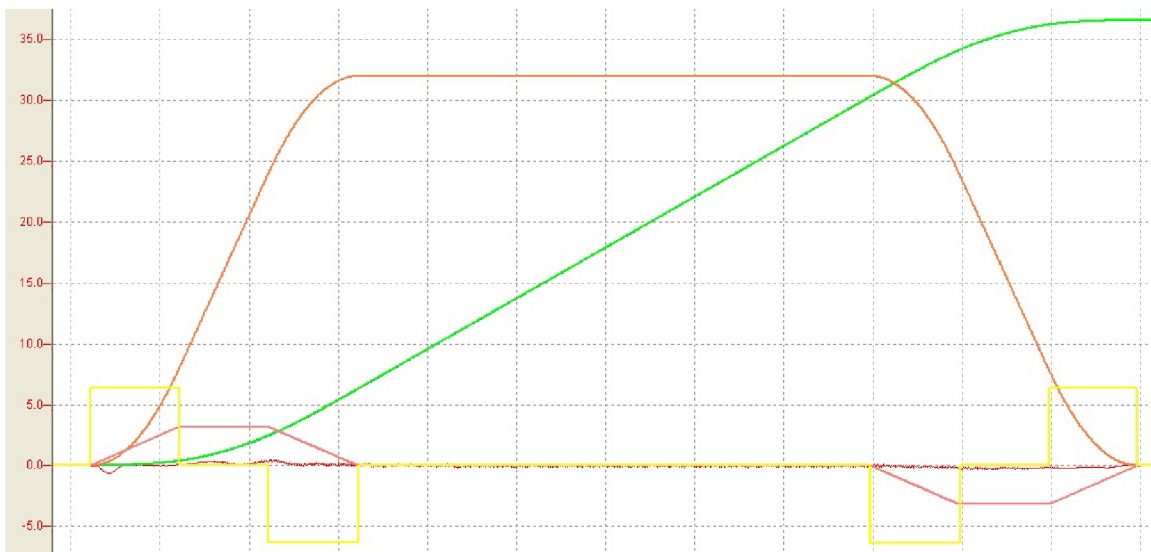
### P regulátor polohy

Posledným prvkom určeným na zníženie polohovej odchýlky je P regulátor. Na nastavenie regulátoru bola použitá empirická Ziegler-Nicholsova metóda podľa tabuľky 4.1. Pre jej použitie je potrebné poznať kritické zosilnenie regulátoru. Toto zosilnenie bolo experimentálne stanovené na hodnotu  $r_K = 50$ . Pri tejto hodnote začala sústava netlmené kmitať s periódou kmitov  $T_K = 0,35s$ . Priebeh odchýlky polohy pri tomto kritickom zosilnení zobrazuje 7.4.



Obrázek 7.4: Regulácia s použitím kritického zosilnenia





Obrázek 7.5: Riadenie s použitím kompenzácie a P regulátoru

Hodnota proporcionálneho zosilnenia regulátoru bola následne nastavená na hodnotu  $K_p = \frac{rK}{2}$ , čiže na 25. Pri použití proporcionálneho regulátoru s týmto zosilnením sa podarilo skutočne takmer úplne odstrániť odchýlku polohy aj pri zrýchľovaní a spomaľovaní, ako aj pri ustálenej rýchlosti. Pribeh tohto pohybu je na grafe 7.5.

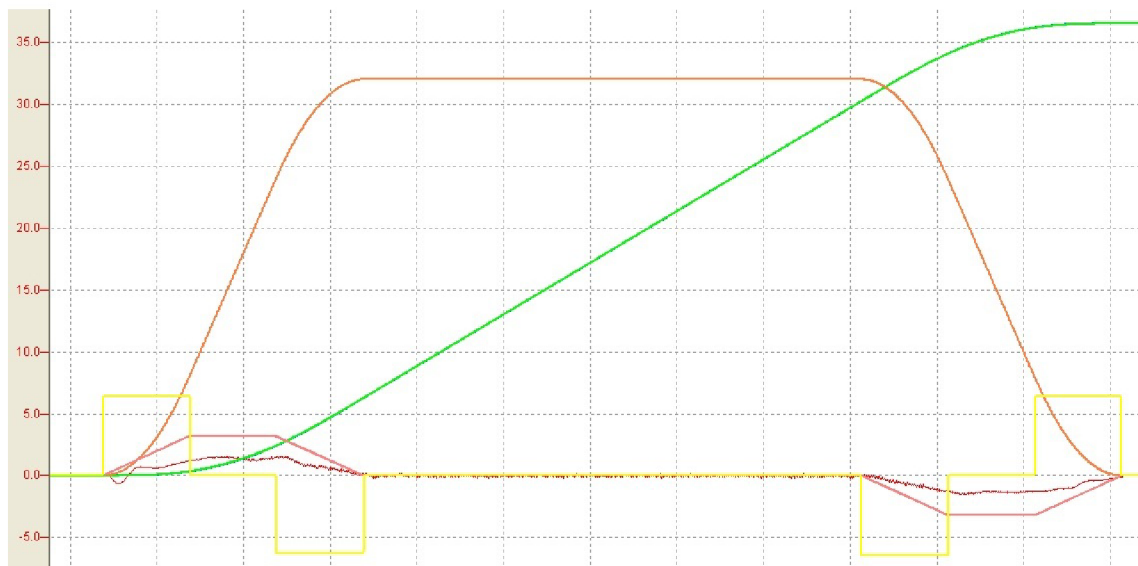
Z detailu grafu na obrázku 7.6 je vidieť, že maximálna hodnota odchýlky dosiahnutá pri začatí pohybu je približne 0,6 mm. Priemerná odchýlka sa potom pohybuje na úrovni 0,1 mm, čo je postačujúci výsledok riadenia divadelnej techniky.



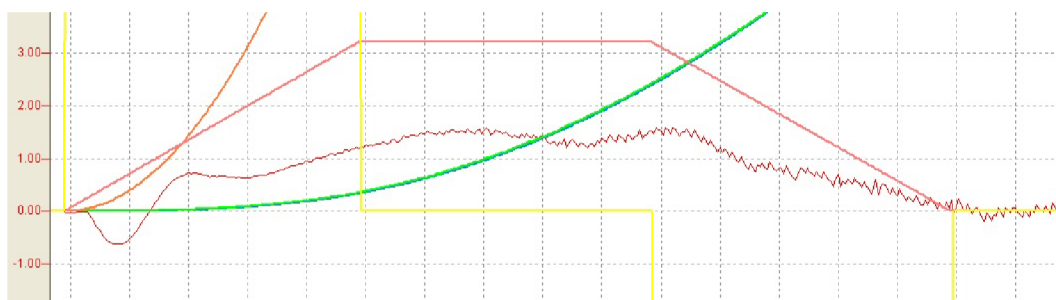
Obrázek 7.6: Detail odchýlky pri riadení s použitím kompenzácie a P regulátoru

## P regulátor bez kompenzácie

Graf 7.7 znázorňuje priebeh riadiacich veličín bez použitia kompenzácie hodnotou zrýchlenia a ryvu, ale s použitím P regulátora. P regulátor odstráni odchýlku pri ustálenej rýchlosti, ale bez použitia kompenzácie nie je schopný odstániť odchýlku pri zrýchľovaní. Túto odchýlku avšak zníži na výrazne menšiu hodnotu v porovnaní riadenia bez kompenzácie a regulácie.



Obrázek 7.7: Riadenie s použitím P regulátora



Obrázek 7.8: Detail riadenie s použitím iba P regulátora

## Zhodnotenie testov

	Priemerná odchýlka [mm]	Maximálna odchýlka [mm]
<b>Ideálny priebeh</b>	19	28
<b>Kompenzácia</b>	2.4	4.9
<b>P regulátor</b>	0.6	1.6
<b>P reg. a kompenzácia</b>	0.1	0.6

Tabulka 7.1: Výsledky presnosti jednotlivých meraní

Tabulka 7 popisuje výsledky dosiahnuté jednotlivými testovanými variantami. Z tabulky je zrejmé, že len samostatného P regulátoru alebo bloku kompenzácie nestačí na dosiahnutie požadovanej presnosti pohybu. Samotný P regulátor dokázal priemernú odchýlku znížiť o viac ako 90 percent a odchýlka počas stálej rýchlosti bola takmer nulová. Regulátor nebol schopný úplne odstáť odchýlku počas zrýchľovania a spomaľovania, aj keď obe taisto znížil. Blok kompenzácie bez použitia P regulátoru nedosahoval presnosť samotného P regulátoru. Počas ustálenej rýchlosti udržiaval trvalú odchýlku. Až zapojenie oboch blokov, P regulátoru a kompenzácie, umožnilo dosiahnuť požadovanú presnosť pohybu zariadenia.

## Kapitola 8

# Záver

Cieľom práce bolo oboznámiť sa s problematikou návrhu riadiacich systémov a na základe získaných poznatkov navrhnúť vhodné riešenie pre riadenie javiskovej technológie.

Po preštudovaní odbornej literatúry a konzultáciach vo firme zaoberajúcej sa divadelnou technikou bol vytvorený návrh celkového riešenia riadiaceho systému javiskovej techniky. Hlavným prvkom navrhovaného riešenia je osový regulátor pohybu, ktorého činnosť bola v rámci práce implementovaná. Cieľom jeho činnosti je vykonať pohyb zariadenia do zadanej cieľovej polohy so zachovaním požadovanej dynamiky pohybu a bez prekročenia maximálnej zadanej rýchlosti. Regulátor generuje presný priebeh rýchlosti pre ovládané zariadenie, ktorej hodnotu ešte upravuje na základe poznatkov o riadenej sústave a odchýlke od požadovanej aktuálnej polohy. Implementačnou platformou bol priemyselný počítač od firmy Beckhoff.

Funkčnosť vytvoreného riešenia bola experimentálne overená na reálnom divadelnom zariadení – bodovom ťahu od spoločnosti ELSEREMO Stage Technology. Výsledný algoritmus bol schopný sledovať požadovanú polohu zariadenia s presnosťou do  $1mm$ , kde priemerná odchýlka pohybu bola na úrovni  $0.1mm$ . Testy taktiež potvrdili nutnosť korekcie generovanej rýchlosti. Bez korekcie bola priemerná odchýlka skoro 20 krát väčšia, na úrovni  $20mm$ . Výslednými odchýlkami práca splnila vopred stanovený cieľ presnosti pohybu.

Pre budúce možné využitie osového regulátoru v praxi je potrebné vybrať novú hardwarovú platformu, ktorá umožní jeho relatívne lacné nasadenie vo väčšom počte. Taktiež bude potrebné implementovať funkčnosť centrálného servra a navrhnúť vhodný komunikačný protokol pre komunikáciu s ovládacími pultami. Pre použitie regulátoru na zariadeniach s iným typom pohonu, bude potrebné upraviť blok kompenzácie podľa charakteristiky daného pohonu.

# Literatura

- [1] Jaroslav Jančík. Moderní řídicí systémy jevištní techniky. *Automa*, 2009(3):56–60.
- [2] Pavel Bezděk, Jiří Novotný, Jan Pilát, Jiří Toušek, Jan Vaňo, and Rudolf Vlach. *Jevištní technologické zařízení – divadla*. Ministerstvo kultury ČSR, 1987.
- [3] Václav Müller. *Abeceda javiskovej techniky*. Osvetový ústav v Bratislave, 1975.
- [4] Bohumil Šulc and Miluše Vítečková. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Vzdavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03007-5.
- [5] Jaroslav Balátě. *Vybrané statě z automatického řízení*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2003. ISBN 80-7318-120-7.
- [6] Milan Hofreiter. *Identifikace systémů 1*. České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04228-1.
- [7] Kateřina Hyniová. *Řídicí technika*. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03368-6.
- [8] Pavel Zítek. *Automatické řízení pro bakaláře*. Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04377-6.