

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

EVIDENČNÉ ČÍSLO: FCHPT-123283-61099

**NÁVRH PARAMETROV PID REGULÁTOROV METÓDOU
SIMC (SKOGESTAD IMC)**

BAKALÁRSKA PRÁCA

2017

Matúš Furka

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-123283-61099

**NÁVRH PARAMETROV PID REGULÁTOROV METÓDOU
SIMC (SKOGESTAD IMC)**

BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

Študijný odbor: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Fakulta chemickej a potravinárskej technológie, STU

Vedúci záverečnej práce/školiťel: Ing. Anna Vasičkaninová, PhD.

Bratislava, 2017

Matúš Furka



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Autor práce:	Matúš Furka
Študijný program:	automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Študijné odbory:	5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo
Evidenčné číslo:	FCHPT-123283-61099
ID študenta:	61099
Vedúci práce:	Ing. Anna Vasičkaninová, PhD.
Názov práce:	Návrh parametrov PID regulátorov metódou SIMC (Skogestad IMC)
Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje:	slovenský jazyk
Špecifikácia zadania:	Projekt je zameraný na oboznámenie sa s metódou SIMC (SIMple Control, Skogestad IMC) a návrh parametrov regulátorov uvedenou metódou pre rôzne typy riadených sústav. Úlohy: Opis metódy SIMC. Návrh parametrov regulátorov metódou SIMC a ich simulačné overenie. Tvorba GUI v Matlabe pre návrh parametrov regulátorov metódou SIMC. Použitie metódy SIMC pri návrhu parametrov regulátorov pre riadenie vybraného laboratórneho procesu. Vytvorenie návodu na laboratórne cvičenie pre predmet Integrované riadenie v procesnom priemysle vo forme prezentácie a videa pre použitie metódy SIMC pri návrhu parametrov regulátorov pre riadenie vybraného laboratórneho procesu. Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov.
Rozsah práce:	40
Literatúra:	■ SKOGESTAD, S. -- POSTLETHWAITE, I. <i>Multivariable Feedback Control: Analysis and Design</i>. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 574 s. ISBN 0-470-01168-8. ■ VÍTEČKOVÁ, M. -- VÍTEČEK, A. <i>Vybrané metody seřizování regulátorů</i>. Ostrava, Česká republika: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2011. 230 s. ISBN 978-80-248-2503-8.
Dátum zadania:	13. 02. 2017
Dátum odovzdania:	14. 05. 2017

Matúš Furka
študent

Pod'akovanie

Dovoľujem si poďakovať vedúcej mojej záverečnej práce, Ing. Anne Vasičkaninovej, PhD. za trpezlivosť, ochotu a v neposlednom rade za pomoc a rady pri písaní záverečnej práce.

Abstrakt

Cieľom bakalárskej práce je oboznámiť sa s metódou SIMC pre návrh parametrov PID regulátora, simulačne overiť navrhnuté regulátory pre riadenie rôznych typov sústav, vytvoriť grafické používateľské rozhranie (Graphical User Interface - GUI) v prostredí Matlab a vytvoriť videonávod na použitie metódy SIMC pri návrhu parametrov PID (PI) regulátora pri riadení laboratórneho procesu. Metóda SIMC je vhodná pre riadenie sústav, ktoré sú opísané rôznymi typmi náhradných modelov. Autor Sigurd Skogestad vysvetľuje názov SIMC ako SIMple Control alebo Skogestad IMC, pričom IMC (Internal Model Control) je známa metóda, vychádzajúca z regulácie s vnútorným modelom. Metóda je výpočtovo jednoduchá, poskytuje prijateľnú kvalitu a robustnosť regulácie, čo bolo simulačne overené vo vytvorenom GUI pri riadení rôznych typov sústav a aj pri riadení laboratórneho procesu – DC motora.

Kľúčové slová: PID regulátor; metóda SIMC; GUI; DC motor

Abstract

The aim of the bachelor thesis is to familiarize with the SIMC method for design of the PID controller parameters, to create a GUI in Matlab environment and to create a video tutorial for the use of the SIMC method for design of the PID controller parameters in the control of the laboratory process. The SIMC method is suitable for systems control, which are described by different types of models. Author Sigurd Skogestad explains the name SIMC as SIMple Control or Skogestad IMC, where IMC is well-known Internal Model Control IMC-PID controller tuning method. SIMC method is computationally simple and easy to memorize, works well on a wide range of processes, providing acceptable quality and robustness of control. This method was verified in the control of different types of systems and in the control of the laboratory DC motor.

Keywords: PID controller; SIMC method; GUI, DC motor

Obsah

Zoznam obrázkov	12
Zoznam skratiek	13
Úvod.....	14
1 Uzavretý regulačný obvod.....	16
1.1 Ukazovatele kvality riadenia v časovej oblasti	17
2 PID regulátory	19
3 Metóda SIMC	22
4 Tvorba GUI v prostredí Matlab	25
4.1 Simulačné overenie programu	27
5 Riadenie laboratórneho procesu	32
6 Tvorba videonávodu	34
7 Záver.....	35
Zoznam použitej literatúry	36
Prílohy.....	37

Zoznam obrázkov

Obr. 1	Detailná bloková schéma URO.....	16
Obr. 2	Zjednodušená bloková schéma URO.....	16
Obr. 3	Detailná bloková schéma URO pomocou prenosových funkcií.....	17
Obr. 4	Zjednodušená bloková schéma URO pomocou prenosových funkcií.....	17
Obr. 5	Typická reakcia URO na skokovú zmenu žiadanej veličiny.....	18
Obr. 6	Výber typu GUI	25
Obr. 7	Pracovné okno	25
Obr. 8	Editor.....	26
Obr. 9	Okno pre výpočet parametrov regulátora podľa výberu typu náhradného modelu riadeného procesu	26
Obr. 10	Simulinková schéma URO pre riadenie vybraných typov sústav.....	27
Obr. 11	Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{5}{3s+1}e^{-0.8s}$ a $T_w = 0,5$	28
Obr. 12	Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{5}{3s+1}e^{-0.8s}$ a $T_w = 3$	28
Obr. 13	Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{1}{(6s+1)(5s+1)}e^{-4s}$ a $T_w = 2,6$	29
Obr. 14	Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{1}{(6s+1)(5s+1)}e^{-4s}$ a $T_w = 65$	30
Obr. 15	Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{2}{s}e^{-0.6s}$ a $T_w = 0,35$	30
Obr. 16	Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{2}{s}e^{-0.6s}$ a $T_w = 1$	31
Obr. 17	DC motor.....	32
Obr. 18	Identifikácia laboratórneho procesu.....	32
Obr. 19	Overenie návrhu parametrov PI regulátora pre reálny laboratórny proces.....	33
Obr. 20	aTubeCatcher.....	34

Zoznam skratiek

URO	uzavretý regulačný obvod
GUI	graphical user interface (grafické používateľské rozhranie)
PID	proporcionálno-integračno-derivačný
TRO	trvalá regulačná odchýlka

Úvod

Také cieľavedomé pôsobenie na proces, ktorým chceme dosiahnuť, aby sa hodnota veličiny na výstupe zo systému zhodovala s hodnotou požadovanou užívateľom, respektíve aby sa nachádzala v požadovanom intervale, sa nazýva *riadenie procesu*. Pôsobenie na proces sa realizuje prostredníctvom zmeny vstupnej veličiny, ktorá sa nazýva *akčná veličina*. Ak vznikne odchýlka medzi hodnotou veličiny na výstupe a užívateľom požadovanou hodnotou, treba prostredníctvom akčnej veličiny zabezpečiť jej zmenšenie alebo odstránenie. Pre zistenie hodnoty veličiny na výstupe je potrebné mať umiestnený na konci systému vhodný merací prístroj (napríklad pri výmenníku tepla je na konci umiestnený teplomer pre meranie konečnej teploty). Zmenu akčnej veličiny môže realizovať aj človek. Vtedy hovoríme o *ručnom riadení procesu*. Človek však nie je vždy schopný vykonávať zmenu akčnej veličiny kvalitne. Úloha zmeny akčnej veličiny sa dá realizovať na základe vyhodnotenia odchýlky medzi reálnou a požadovanou hodnotou prostredníctvom technického zariadenia automaticky. Hovoríme o *automatickom riadení procesu* [1].

Úlohu človeka pri automatickom riadení procesu preberá riadiaci člen, ktorý vykonáva v podstate to isté čo človek, ale na rozdiel od človeka riadi exaktne, podľa určeného *zákona riadenia*. Riadiaci člen pri riadení procesu využije informáciu o hodnote výstupnej a žiadanej veličiny na nastavenie akčného člena. Rozdiel medzi hodnotou žiadanej veličiny a veličiny na výstupe sa nazýva *odchýlka riadenia* alebo *regulačná odchýlka*. Je zrejmé, že riadením treba zabezpečiť, aby odchýlka riadenia bola čo najmenšia. Úlohou je určiť zákon riadenia tak, aby sa regulačná odchýlka odstránila, respektíve sa zmenšila optimálnym spôsobom podľa určitých kritérií. Zákon riadenia určuje štruktúru riadiaceho člena, ako aj jeho vlastnosti v rámci danej štruktúry. Jednou z možností návrhu tohto člena je navrhnúť ho tak, aby menil hodnotu akčnej veličiny úmerne k odchýlke riadenia. Odchýlenie sa konečnej hodnoty veličiny od žiadanej spôsobí vznik nenulovej odchýlky riadenia a regulátor zmení hodnotu akčnej veličiny úmerne – proporcionálne k tejto odchýlke. Takýto regulátor sa nazýva proporcionálny. Ak hodnota veličiny v systéme stúpne nad žiadanú veličinu, regulátor akčnú veličinu zmenší a naopak. Ide teda o *zápornú spätnú väzbu*. Odmeranie výstupnej veličiny procesu poskytuje riadiacemu členu informáciu o procese. Táto informácia sa prostredníctvom riadiaceho člena dostane späť na vstup procesu. Opísaný spôsob riadenia sa nazýva *spätnoväzbové riadenie* [1].

Pri riadení procesov sa používajú regulátory, pretože sa očakáva, že proces si nebude vyžadovať ručné zásahy obsluhy a stálu pozornosť. Najčastejšie používané regulátory v priemysle sú proporcionálno-integračno-derivačné (PID) regulátory. V literatúre ľahko nájdeme údaj, že viac

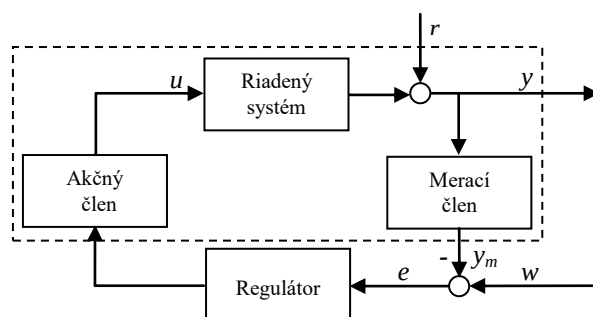
ako 90 %, dokonca možno až 95 % regulačných algoritmov je typu PID. Regulátor PID je jednoduchý, jeho parametre sa dajú pomerne ľahko vypočítať a k dispozícii je veľké množstvo metód na výpočet jeho parametrov. Problémy v priemysle, a s tým spojené finančné straty vo výrobe, obvyčajne súvisia s nesprávnym návrhom parametrov regulátorov a s ich nevhodným vyladením [2]. Je teda dôležité správne, resp. optimálne nastavenie hodnôt parametrov regulátorov. Také nastavenie závisí na miere poznatkov o regulovanom procese. Pre správnu činnosť URO je potrebné aj vhodne zvoliť a umiestniť snímače a akčné členy.

Pre správne použitie PID regulátora je dôležitý výpočet takých koeficientov regulátora, ktoré zabezpečia čo najvyššiu kvalitu a stabilitu riadenia a URO bude spĺňať zadané požiadavky.

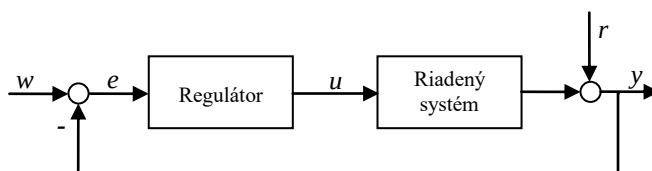
Výrobcovia regulátorov prinášajú na trh rôzne produkty, ktoré sú vybavené dômyselnými funkciami. Významné vylepšovanie vlastností PID regulátora umožnilo zvýšenie výkonu mikropočítačov. Regulátory sa dopĺňajú o ďalšie funkcie ako je filtrácia vstupných signálov, dopredná väzba, automatické nastavovanie parametrov a diagnostika, prepínanie parametrov regulátora, beznázorové prepínanie režimov [2].

1 Uzavretý regulačný obvod

Uzavretý regulačný obvod URO je súbor technických prostriedkov, ktoré zabezpečujú aby vybraný proces pracoval podľa požiadaviek v automatickom režime [1]. Samotný obvod tvorí proces, ktorý riadime a jednotlivé prístrojové prvky zabezpečujúce toto riadenie. Abstrakciou URO je jeho bloková schéma, znázornená na obr. 1. Skladá sa zo štyroch základných častí, ktorými sú regulátor, akčný člen, merací člen a riadený systém. Pôsobia tam signály w – žiadaná veličina, e – regulačná odchýlka, u – akčná veličina, r – porucha, y – riadená (výstupná) veličina a y_m – meraná výstupná veličina [1].



Obr. 1 Detailná bloková schéma URO [1]

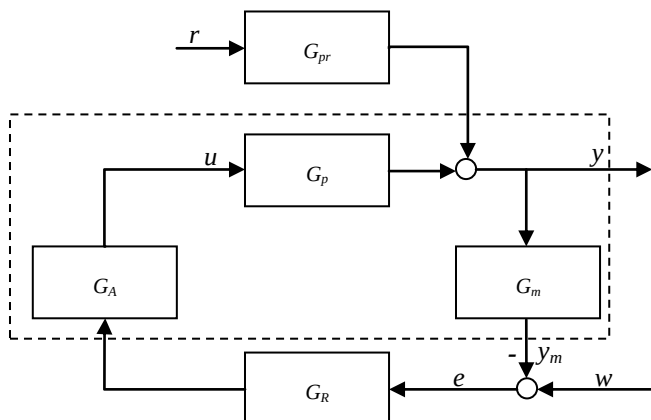


Obr. 2 Zjednodušená bloková schéma URO [1]

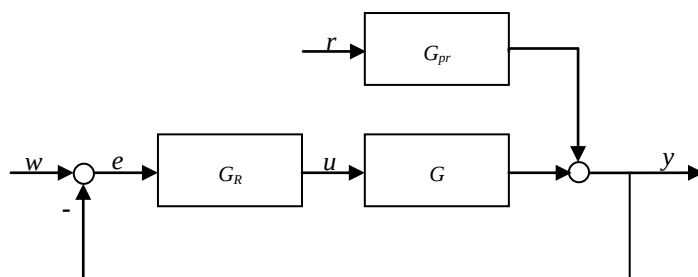
Kvôli zjednodušeniu skúmania spätnoväzbových obvodov riadenia sa bloková schéma často zjednodušuje. V takejto zjednodušenej schéme sú len dva bloky (obr. 2). Prvý blok reprezentuje riadiaci člen a druhý blok riadený proces. Každý blok detailnej schémy musí byť zahrnutý v jednom z týchto blokov. Najčastejšie sa riadiacim členom myslí len tá časť spätnoväzbového obvodu, ktorá realizuje zákon riadenia, teda regulátor. Pri zjednodušení schémy sa teda merací a akčný člen zaraďujú k riadenému procesu [1].

Každé zo zariadení URO reprezentuje dynamický systém, ktorý možno opísať diferenciálnou rovnicou alebo prenosom. Takže blokové scémy z obr.1 môžeme prekresliť pomocou obr. 3.

Vplyv poruchy na riadený proces je opísaný diferenciálnou rovnicou zodpovedajúcou prenosovej funkcii $G_{pr}(s)$. Ďalšie prenosy sú $G_R(s)$ – prenos regulátora, $G_P(s)$ – prenos riadeného systému, $G_A(s)$ – prenos akčného člena a $G_m(s)$ – prenos meracieho člena [1].



Obr. 3 Detailná bloková schéma URO pomocou prenosových funkcií [1]



Obr. 4 Zjednodušená bloková schéma URO pomocou prenosových funkcií [1]

1.1 Ukazovatele kvality riadenia v časovej oblasti

Jednou z hlavných úloh uzavretého regulačného obvodu je zabezpečiť, aby riadená veličina sledovala čo najpresnejšie žiadanú veličinu. Vzhľadom k tejto požiadavke sa požívajú rozličné kritériá.

V časovej oblasti je definovaných niekoľko ukazovateľov kvality [1]. Sú to napríklad:

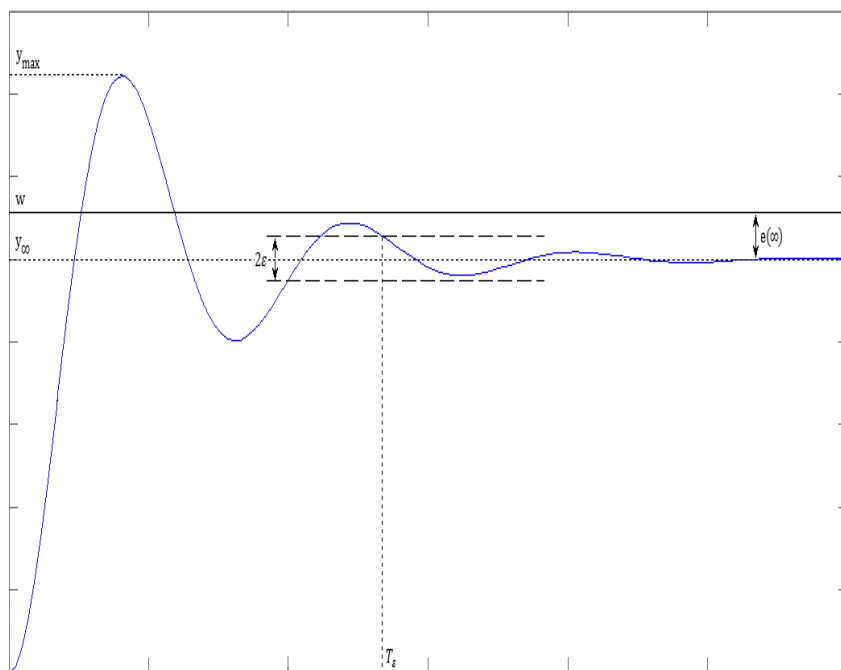
- Maximálne preregulovanie δ_{max} – udáva sa v percentách. Predstavuje normovanú veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty. Matematicky ho vieme vyjadriť vzťahom

$$\delta_{max} = \frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} 100 \quad (1)$$

Pre aperiodické deje bez preregulovania platí $\delta_{max} = 0$. Vo väčšine prípadov je odporúčaná hodnota preregulovania menšia ako 25%.

- Čas regulácie T_{ε} - je definovaný ako čas, po ktorom trvalá regulačná odchýlka nie je väčšia ako požadovaná hodnota. Zvyčajne sa hodnota maximálnej povolenej regulačnej odchýlky ε udáva v percentách. Definuje šírku pásma 2ε so stredom v novej ustálenej hodnote výstupu. Po dosiahnutí T_{ε} sa výstup vždy nachádza v tomto pásme. Úlohou regulácie je dosiahnuť čo najmenšiu hodnotu T_{ε} .
- Trvalá regulačná odchýlka (TRO) $e(\infty)$ - je definovaná ako rozdiel medzi žiadanou veličinou w a riadeným výstupom v novom ustálenom stave. Má nenulovú hodnotu v prípade použitia regulátora bez integračnej zložky [1].

Vyššie spomenuté ukazovatele kvality riadenia sú znázornené na obr. 5.



Obr. 5 Typická reakcia URO na skokovú zmenu žiadanej veličiny [1]

2 PID regulátory

PID regulátor je zariadenie, ktoré sa stará, aby daný systém automaticky pracoval a fungoval v požadovanom rozsahu hodnôt. Riadeným systémom môže byť napríklad motor, elektromotor, vykurovanie, klimatizácia, chemický reaktor, zásobník kvapaliny, výmenník tepla, destilačná kolóna, atď. Jeho vlastnosti vyjadruje súčet vlastností jednoduchých regulátorov P, I a D. Tomu zodpovedá jeho rovnica [3]:

$$y(t) = Z_R \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

Proporcionálny regulátor:

Matematickým vyjadrením myšlienky proporcionality je zákon riadenia

$$u(t) = Z_R e(t). \quad (3)$$

Regulátor pracujúci na základe tohto zákona sa nazýva proporcionálny (P regulátor). Z_R je zosilnenie regulátora. Regulátor môže pracovať proporcionálne iba v určitom rozsahu vstupných hodnôt, nakoľko akčná veličina môže byť vždy iba v rozsahu medzi $u_{\min}$ a $u_{\max}$. Proporcionálnosť regulátora môže byť charakterizovaná buď zosilnením Z_R , alebo pásmom, kedy je regulátor lineárny – tzv. *pásmo proporcionality* P_p . Vzťah medzi nimi je

$$u_{\max} - u_{\min} = Z_R P_p \quad (4)$$

Použitie proporcionálneho regulátora má výhodu, nakoľko riadená veličina v ustálenom stave nekmitá. Avšak P regulátor nedokáže úplne odstrániť trvalú regulačnú odchýlku [1].

Integračný regulátor:

Pre odstránenie trvalej regulačnej odchýlky je potrebné zaviesť integrátor – akčný zásah sa bude meniť dovtedy, kým nebude regulačná odchýlka nulová. Matematicky sa dá táto požiadavka zapísať zákonom riadenia v tvare

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

kde T_I sa nazýva integračná konštanta a určuje rýchlosť zmeny akčného zásahu v prípade jednotkovej regulačnej odchýlky. Čím bude T_I menšia, tým sa budú generovať väčšie zmeny riadenia. Tento regulátor sa nazýva integračný [1].

Derivačný regulátor:

Takýto regulátor zlepšuje stabilitu uzavretého regulačného obvodu. Dôvod zavedenia D zložky spočíva v tom, že účinok proporcionálnej a integračnej zložky na riadený proces nie je okamžitý. Prejaví sa až po určitom čase. Avšak D regulátor, ktorý je opísaný zákonom riadenia

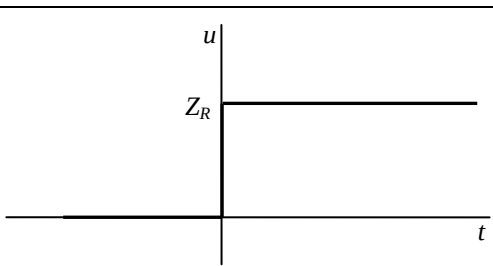
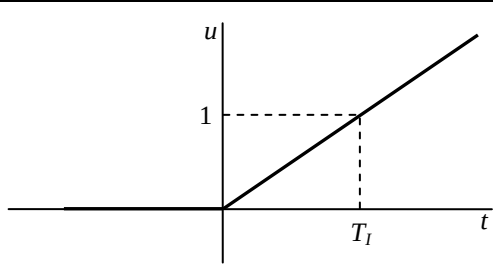
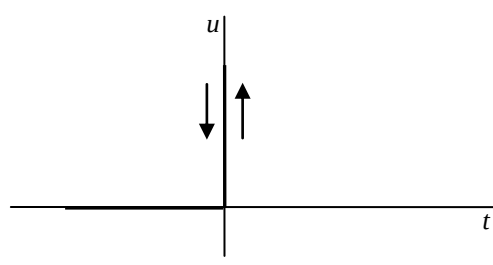
$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

kde T_D je derivačná konštanta, predpovedá vývoj regulačnej odchýlky. Toto tvrdenie sa dá ukázať na základe rozvoja $e(t + T_D)$ do Taylorovho radu, kde platí

$$e(t + T_D) \approx e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Ideálny D regulátor je citlivý na prítomnosť šumu v riadenej veličine, nakoľko derivácia nepresného signálu môže viesť k veľkým a častým zmenám amplitúdy riadenia. Avšak ideálny derivačný člen nie je realizovateľný, nakoľko stupeň čitateľa jeho prenosu je väčší ako stupeň menovateľa [1].

Tab. 1 Prenosové funkcie a prechodové charakteristiky regulátorov [1]

Regulátor	Prenosová funkcia	Prechodová charakteristika
P	Z_R	
I	$\frac{1}{T_I s}$	
D	$T_D s$	

Veľkosť každej zložky je možné samostatne nastavovať, to znamená P – pásmo proporcionality, T_I – integračnú časovú konštantu a T_D – derivačnú časovú konštantu. Pre kvantitatívne vyjadrenie platí:

- zväčšenie vplyvu proporčionalnej zložky dosiahneme zväčšením zosilnenia, alebo zúžením pásma proporcionality,
- zväčšenie vplyvu integračnej zložky dosiahneme zmenšením integračnej časovej konštanty,
- zväčšenie vplyvu derivačnej zložky dosiahneme zmenšením derivačnej časovej konštanty. Zväčšením derivačnej zložky zlepšíme stabilitu regulačného obvodu, kým integračná zložka nám stabilitu zhorší [3].

Regulátor vznikne paralelným spojením členov P , I a člena D . Uvedený združený regulátor pracuje bez trvalej regulačnej odchýlky a možno ho hodnotiť ako najdokonalejší spojitý regulátor. Prenosová funkcia regulátora [3]

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) . \quad (8)$$

3 Metóda SIMC

Metóda SIMC patrí medzi jednoduché, ale účinné metódy návrhu regulátorov [4]. Takto navrhnuté regulátory zabezpečujú dostatočnú kvalitu a robustnosť regulácie, aj keď sa pri návrhu vychádza zo zjednodušených náhradných modelov regulovaných sústav.

Pre návrh regulátoru sa používa vzťah pre priamu syntézu, ktorý vychádza zo všeobecnej metódy inverzie dynamiky

$$G_R(s) = \frac{1}{G_S(s)} \frac{G_{wy}^*}{1 - G_{wy}^*}, \quad (9)$$

$$G_{wy}^* = \frac{Y(s)}{W(s)}, \quad (10)$$

kde $G_R(s)$ je prenos regulátora, $G_S(s)$ - prenos regulovanej sústavy, G_{wy}^* - požadovaný prenos riadenia regulačného obvodu, $W(s)$ - obraz žiadanej veličiny a $Y(s)$ - obraz regulovanej veličiny.

Postup pre návrh parametrov regulátora pre systém 2. rádu s prenosom

$$G_S(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-Ds}, \quad T_1 \geq T_2, \quad (11)$$

kde k je zosilnenie regulovanej sústavy, T_1 a T_2 - časové konštanty, D - dopravné oneskorenie.

Požadovaný prenos riadenia regulačného obvodu je v tvare

$$G_{wy}^* = \frac{1}{T_ws+1} e^{-Ds}, \quad (12)$$

kde T_w je časová konštanta uzavretého regulačného obvodu.

Po dosadení (11) a (12) do rovnice (9) dostávame

$$G_R(s) = \frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{k} \frac{1}{T_ws+1 - e^{-Ds}}, \quad (13)$$

Pre aproximáciu dopravného oneskorenia

$$e^{-Ds} \approx 1 - Ds, \quad (14)$$

dostávame zo vzťahu (13) prenos regulátora PID s interakciou v tvare rovnice (15)

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) (1 + T_D s), \quad (15)$$

Pri porovnaní koeficientov s koeficientmi regulátora podľa vzťahu (2)

$$Z_R = \frac{T_1}{k(T_w+D)}, \quad T_I = T_1, \quad T_D = T_2 \quad (16)$$

Voľbou časovej konštanty URO T_w ovplyvňujeme rýchlosť odozvy systému, ale zároveň aj požiadavky na akčnú veličinu. Typy riadenia [5]:

- agresívne $0,1T_1 < T_w < 0,8D$ (17)

- stredné $T_1 < T_w < D$ (18)

- konzervatívne $10 T_1 < T_w < 80 D$ (19)

Čím agresívnejšie bude riadenie, tým rýchlejšia bude odozva systému, ale zároveň budú kladené vyššie nároky na akčnú veličinu.

Tab. 2 Hodnoty nastaviteľných parametrov regulátora pre metódu SIMC s radiacim parametrom T_w [4]

Regulovaná sústava		Regulátor				Poznámka
		Typ	Z_R^*	T_I^*	T_D^*	
1	ke^{-Ds}	I	-	$k(T_w + D)$	-	-
2	$\frac{k}{T_1s + 1}e^{-Ds}$	PI	$\frac{T_1}{k(T_w + D)}$	T_1	-	$T_1 \leq 4(T_w + D)$
3			$\frac{T_1}{k(T_w + D)}$	$4(T_w + D)$	-	$T_1 > 4(T_w + D)$
4	$\frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}e^{-Ds}$ $T_1 \geq T_2$	PID _i	$\frac{T_1}{k(T_w + D)}$	T_1	T_2	$T_1 \leq 4(T_w + D)$
5			$\frac{T_1}{k(T_w + D)}$	$4(T_w + D)$	T_2	$T_1 > 4(T_w + D)$
6		PID	$\frac{T_1 + T_2}{k(T_w + D)}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$	$T_1 \leq 4(T_w + D)$
7			$\frac{T_1[T_2 + 4(T_w + D)]}{4k(T_w + D)^2}$	$T_2 + 4(T_w + D)$	$\frac{4T_2(T_w + D)}{T_2 + 4(T_w + D)}$	$T_1 > 4(T_w + D)$
8	$\frac{k}{s}e^{-Ds}$	PI	$\frac{1}{k(T_w + D)}$	$4(T_w + D)$	-	-
9	$\frac{k}{s^2(T_2s + 1)}e^{-Ds}$	PID _i	$\frac{1}{k(T_w + D)}$	$4(T_w + D)$	T_2	-
10		PID	$\frac{T_2 + 4(T_w + D)}{4k(T_w + D)^2}$	$T_2 + 4(T_w + D)$	$\frac{4T_2(T_w + D)}{T_2 + 4(T_w + D)}$	-
11	$\frac{k}{s^2}e^{-Ds}$	PID _i	$\frac{1}{4k(T_w + D)^2}$	$4(T_w + D)$	$4(T_w + D)$	-
12		PID	$\frac{1}{2k(T_w + D)^2}$	$8(T_w + D)$	$2(T_w + D)$	-

Regulátor, ktorého parametre sú navrhnuté podľa vzťahov (15) a (16), dáva veľmi kvalitnú a rýchlu odozvu na zmenu žiadanej veličiny $w(t)$, ale v prípade, ak

$$T_1 \gg D \quad (20)$$

veľmi pomalú odozvu na zmenu poruchovej veličiny $r(t)$, pôsobiacu na vstupe do regulovanej sústavy (obr.2). Z tohto dôvodu Skogestad algoritmus modifikuje [6], a to voľbou integračnej časovej konštanty T_I podľa vzťahu

$$T_I = \min[T_1, 4(T_w + D)] \quad (21)$$

Po uvažovaní (21) dostávame vzťahy pre hodnoty nastaviteľných parametrov pre metódu SIMC, (riadky 4 a 5 v tab. 2). Výsledné hodnoty nastaviteľných parametrov regulátora sú označené hviezdičkou.

Vzťahy pre hodnoty nastaviteľných parametrov regulátora PID bez interakcie s prenosom

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) \quad (22)$$

sa získajú výpočtom podľa vzťahov (9) a (12), (riadky 6 a 7 v tab. 2).

Podobným spôsobom pre regulovanú sústavu s prenosom

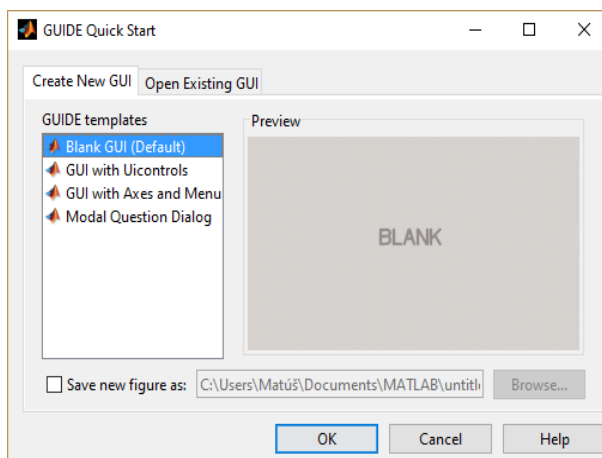
$$G_S(s) = \frac{k}{T_1 s + 1} e^{-Ds} \quad (23)$$

a pre prenos riadenia (12) dostávame riadky 2 a 3 v tab. 2 [4].

4 Tvorba GUI v prostredí Matlab

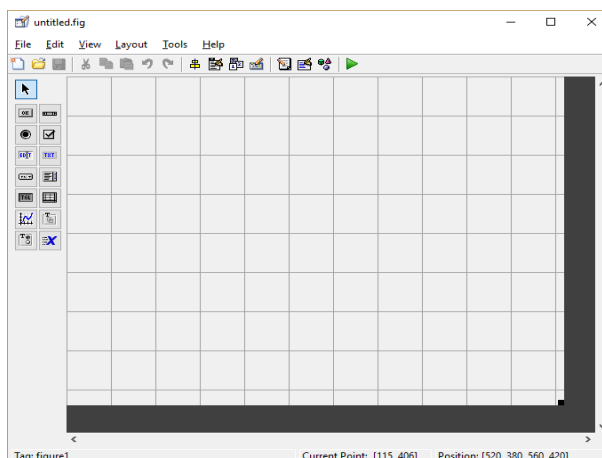
Matlab patrí k bežne používaným programom medzi študentmi a je to univerzálny nástroj v oblasti vedy a techniky na univerzitách.

Grafické používateľské prostredie v Matlabe sa vytvára pomocou nástroja, ktorý sa volá sprievodca (*guide* - GUI Development Environment). Pracovné okno pre tvorbu grafického prostredia sa otvorí zápisom „guide“ do príkazového riadku Matlabu.



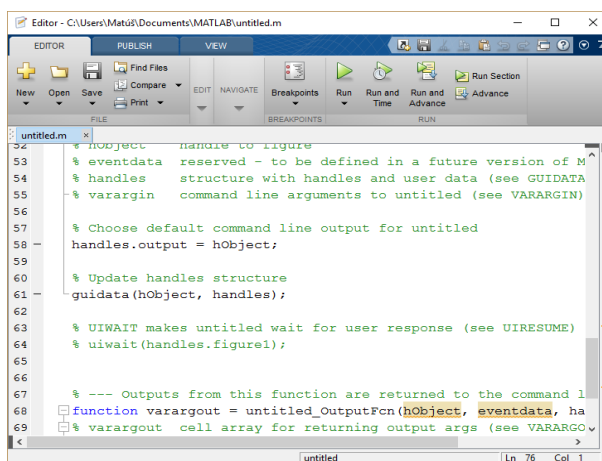
Obr. 6 Výber typu GUI

Na výber je niekoľko možností. Ak vyberieme prvú možnosť, po potvrdení výberu sa otvorí pracovné okno (obr. 7).



Obr. 7 Pracovné okno

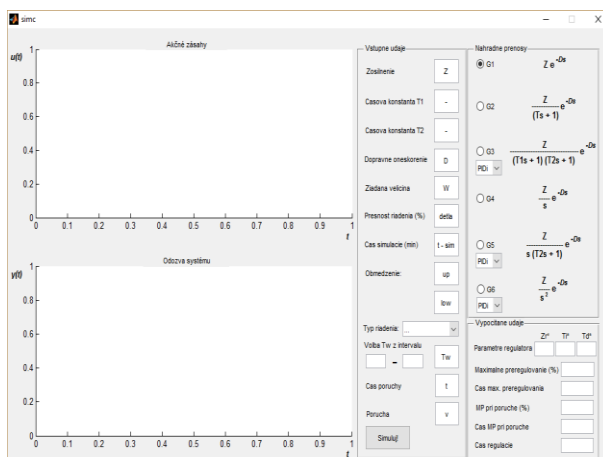
V pracovnom okne sa vľavo nachádza lišta s prvkami, z ktorých si užívateľ vyberá potrebné prvky. Po pridaní prvkov sa na hornej lište objaví možnosť „uložiť“. Po potvrdení uloženia programu sa automaticky otvorí tzv. editor, do ktorého užívateľ zadáva kód programu.



Obr. 8 Editor

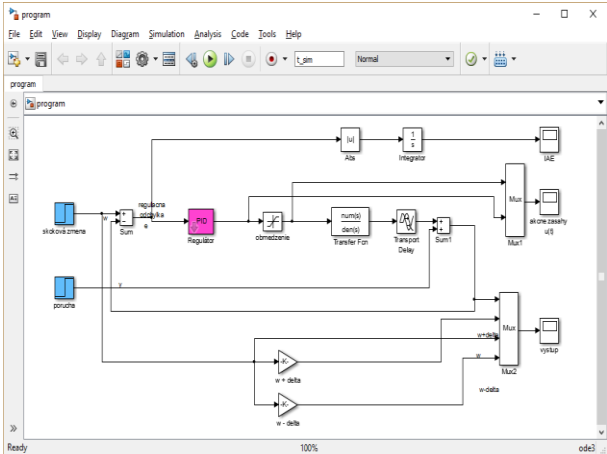
V editore je pre každý prvok vytvorená sekcia, kam užívateľ píše kód, ktorý pri aktivácii daného prvku vykoná požadovanú akciu. Kód pre každý prvok sa píše do funkcie *Callback*. Po následnom uložení a spustení pomocou tlačidla „Run“ na vrchnej lište editora sa spustí samotný program.

V našom prípade bolo potrebné vytvoriť program pre grafické prostredie, v ktorom si užívateľ vyberie jeden zo šiestich náhradných prenosov, zadá parametre riadeného systému a zvolí typ riadenia. Výsledkom sú vypočítané parametre regulátora a vykreslený priebeh riadenia. Okno je znázornené na obr. 9.



Obr. 9 Okno pre výpočet parametrov regulátora podľa výberu typu náhradného modelu riadeného procesu

Údaje potrebné pre vykreslenie odozvy systému sú načítané zo schémy, ktorá je znázornená na obr. 10.



Obr. 10 Simulinková schéma URO pre riadenie vybraných typov sústav

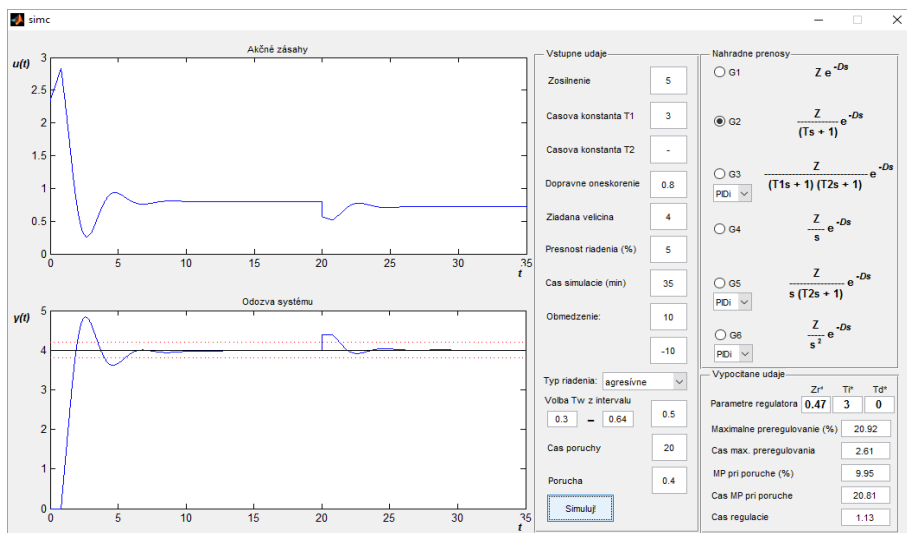
Vytvorená schéma pracuje s premennými uloženými v pracovnom okne Matlabu, tzv. *Workspace*, preto potrebujeme príkazom poslať údaje z programom vytvorenej s-funkcie do pracovného priestoru. Použili sme príkaz *assignin(...)*. Ak máme všetky potrebné premenné v pracovnom priestore, príkazom *sim(názov_simulinkovej_schémy')* spustíme simuláciu schémy na pozadí. Získané údaje zo simulácie vykreslíme funkciou *plot(...)* do grafických okien programu.

4.1 Simulačné overenie programu

Program bol overený pri návrhu parametrov regulátora pre niektoré náhradné modely. Prvý prenos je prenos systému 1. rádu s dopravným oneskorením, ktorý patrí k často používaným náhradným modelom

$$G_S(s) = \frac{5}{3s+1} e^{-0.8s} \quad (24)$$

teda zosilnenie je $k = 5$, časová konštanta $T = 3$, dopravné oneskorenie $D = 0,8$, hodnota žiadanej veličiny bola 4, požadovaná presnosť riadenia bola 5% zo žiadanej hodnoty, celkový čas simulácie bol 35 sekúnd a predpokladali sme poruchu v čase 20 s hodnotou 0,4. Bol zvolený agresívny typ riadenia, teda $T_w = 0,5$. Výsledný priebeh simulácie riadenia je znázornený na obr. 11.



Obr. 11 Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{5}{3s+1} e^{-0.8s}$ a $T_w = 0,5$

Vypočítané parametre regulátora:

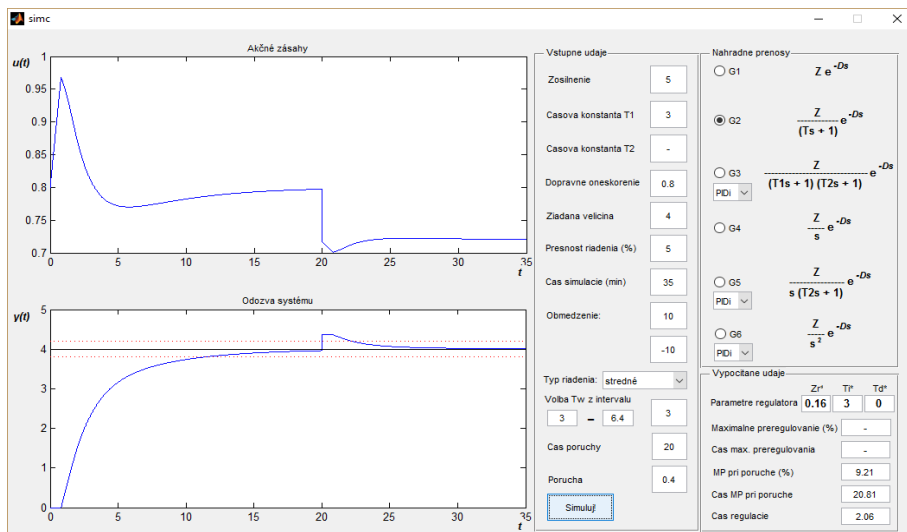
$$Z_R = 0,47$$

$$T_I = 3$$

$$T_D = 0$$

Súčasťou navrhnutého GUI je aj výpočet času dosiahnutia maximálnej hodnoty výstupu a maximálneho preregulovania pri úlohe sledovania, aj pri úlohe regulácie.

Pre voľbu parametra $T_w = 3$ je výsledok simulácie znázornený na obr. 12.



Obr. 12 Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{5}{3s+1} e^{-0.8s}$ a $T_w = 3$

Vypočítané parametre regulátora sú:

$$Z_R = 0,16$$

$$T_I = 3$$

$$T_D = 0$$

Metóda SIMC bola použitá pri návrhu parametrov PID regulátora pre riadenie procesu opísaného prenosom 2. rádu:

$$G_S(s) = \frac{1}{(6s+1)(5s+1)} e^{-4s}, \quad (25)$$

zosilnenie $k = 1$, časové konštanty majú hodnoty $T_1 = 6$ a $T_2 = 5$, dopravné oneskorenie $D = 4$. Zvolený je agresívny typ riadenia a hodnota $T_w = 2,6$. Hodnota žiadanej veličiny bola 5 a požadovaná presnosť riadenia bola 5% zo žiadanej hodnoty. Poruchu v tomto prípade neuvažujeme, teda pre čas a hodnotu poruchy v programe zadáme nulu. Čas simulácie je 80 sekúnd.

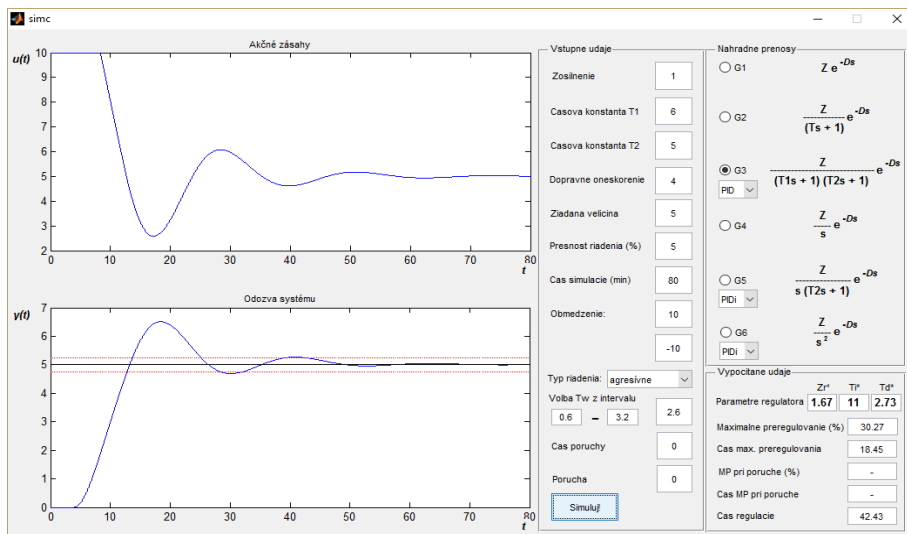
Vypočítané parametre regulátora sú:

$$Z_R = 1,67$$

$$T_I = 11$$

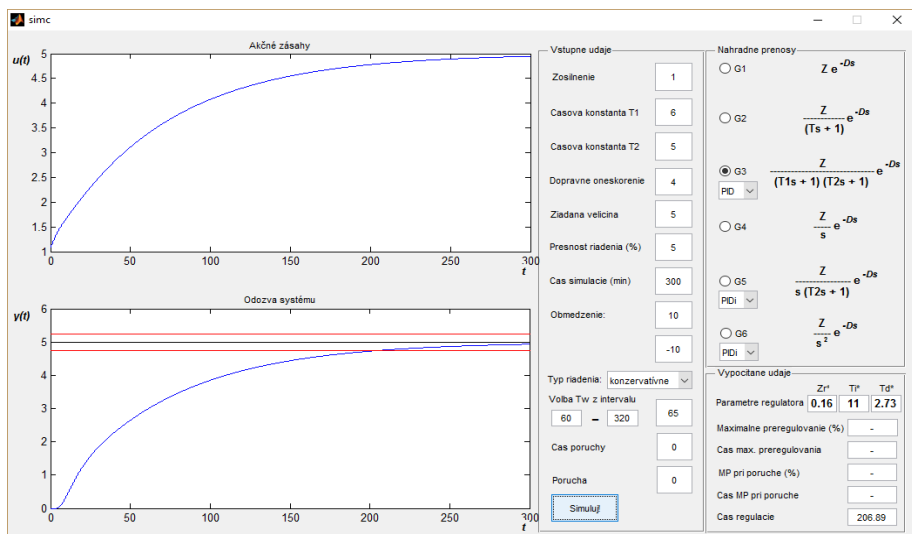
$$T_D = 2,73$$

Maximálne preregulovanie má hodnotu 30,27 % a je v čase 18,45 sekundy. Čas regulácie je 42,43 sekundy. Pribeh simulácie je zobrazený na obr. 13.



Obr. 13 Simulačné overenie programu pre model s prenosom $\frac{1}{(6s+1)(5s+1)} e^{-4s}$ a $T_w = 2,6$

Pre porovnanie sme pre tento prenos zvolili aj konzervatívny typ riadenia, $T_w = 65$. V tomto prípade bolo nutné zvýšiť čas simulácie na 300 sekúnd. Pribeh simulácie je zobrazený na obr. 14.



Obr. 14 Simulačné overenie programu pre pre model s prenosom $\frac{1}{(6s+1)(5s+1)}e^{-4s}$ a $T_w = 65$

Parametre regulátora sú:

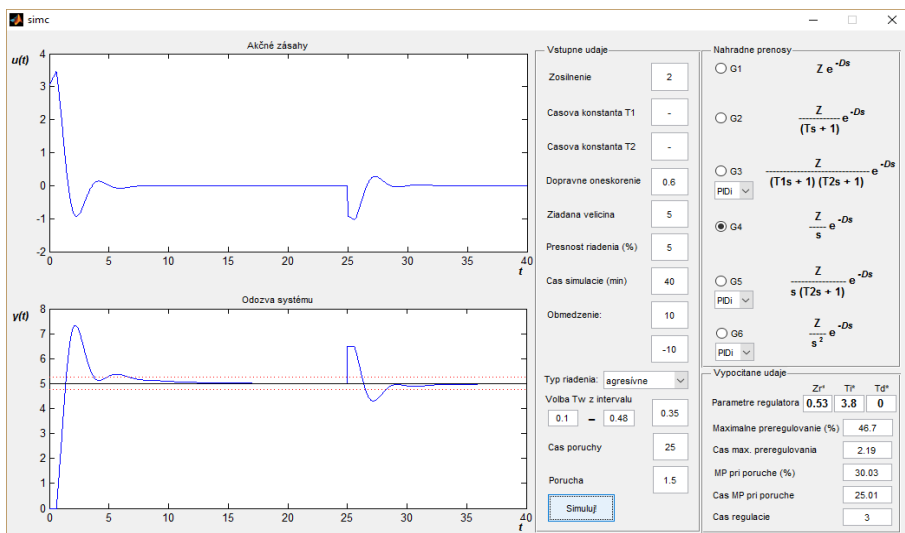
$$Z_R = 0,16$$

$$T_I = 11$$

$$T_D = 2,73$$

Simulačne bol tiež overený návrh parametrov regulátora pre riadenie systému s integračnou činnosťou s prenosom:

$$G_S(s) = \frac{2}{s}e^{-0.6s} \quad (26)$$



Obr. 15 Simulačné overenie programu pre pre model s prenosom $\frac{2}{s}e^{-0.6s}$ a $T_w = 0,35$

Zosilnenie $k = 2$, dopravné oneskorenie $D = 0,6$, žiadaná veličina $w = 5$, presnosť riadenia bola určená ako 5% zo žiadanej veličiny a čas simulácie bol 40 sekúnd. Predpokladali sme poruchu v čase 25 sekúnd s hodnotou 1,5. Zvolený bol agresívny typ riadenia a $T_w = 0,35$. Simulačné overenie je zobrazené na obr. 15.

Parametre regulátora sú:

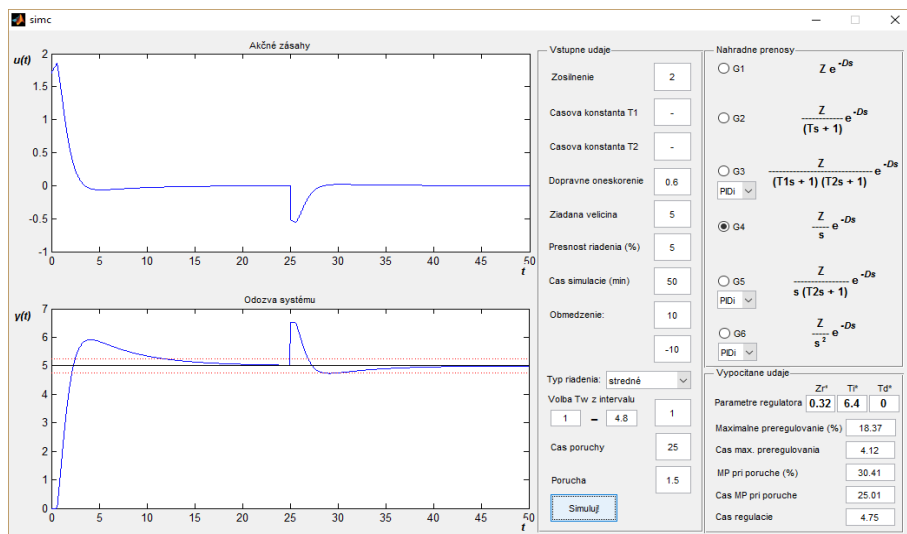
$$Z_R = 0,53$$

$$T_I = 3,8$$

$$T_D = 0$$

Maximálne preregulovanie hneď po začiatku riadenia predstavovalo hodnotu 46,7 % a bolo v čase 2,19 sekundy. V čase 25,01 sekundy sa vyskytla porucha s maximálnym preregulovaním 30,03 %. Čas regulácie bol 3 sekundy.

Pre daný prenos bol zvolený aj stredný typ riadenia, $T_w = 1$. Čas regulácie bol zvýšený na 50 sekúnd. Pribeh simulácie je znázornený na obr. 16.



Obr. 16 Simulačné overenie programu pre pre model s prenosom $\frac{2}{s}e^{-0.6s}$ a $T_w = 1$

Parametre regulátora sú:

$$Z_R = 0,32$$

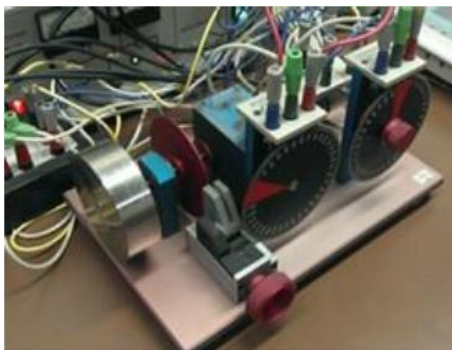
$$T_I = 6,4$$

$$T_D = 0$$

Po začiatku riadenia v čase 4,12 sekundy dosiahlo maximálne preregulovanie hodnotu 18,37%. Porucha sa prejavila v čase 25,01 sekundy s preregulovaním 30,41%. Čas regulácie bol 4,75 sekundy.

5 Riadenie laboratórneho procesu

Riadeným laborátnym procesom bol DC motor vo vzdialenom laboratóriu WebLab-Deusto.



Obr. 17 DC motor

Pre návrh parametrov regulátora je potrebné identifikovať prenos DC motora. Vstupná veličina je napätie motora a volí sa v rozsahu 0-10 V. Výstupnou veličinou sú otáčky motora. Meranie otáčok motora pri zmene napätia vidíme na obr. 18.



Obr. 18 Identifikácia laboratórneho procesu

Náhradný prenos pre DC motor je vypočítaný z priemerných hodnôt zo 4 nameraných odoziev pre zosilnenie k a časovú konštantu T , dopravné oneskorenie je malé. Náhradný prenos má tvar

$$G_S(s) = \frac{270}{10s+1} e^{-0.1s} \quad (27)$$

Nakoľko neplatí $T_1 < 8D$ a dopravné oneskorenie predpokladáme malé, v takom prípade odporúča Skogestad voliť $T_w = D$. V uvedenom prípade teda platí, že $T_w = 0,1$.

Navrhnuté parametre regulátora potom sú:

$$Z_R = 0,19$$

$$T_1 = 0,8$$

$$T_D = 0$$



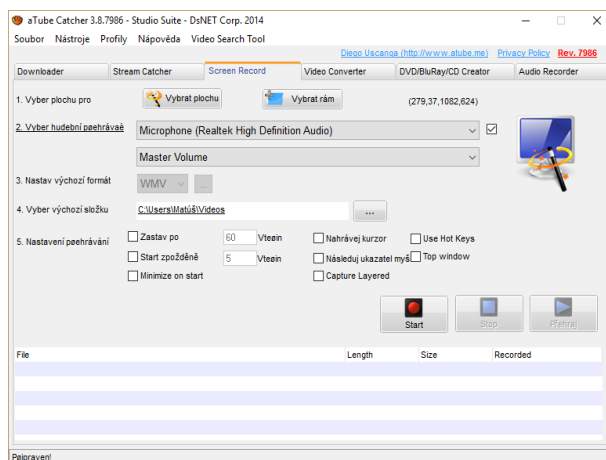
Obr. 19 Overenie návrhu parametrov PI regulátora pre reálny laboratórny proces

Priebeh riadenia reálneho procesu je znázornený na obr. 19. Z tohto priebehu je zrejmé, že pre tento systém je takto navrhnutý regulátor správny. To znamená, že hodnota výstupnej veličiny (počet otáčok motora) sa pohybovala v nami požadovanom intervale (v blízkom okolí hodnoty žiadanej veličiny).

Metóda SIMC poskytuje dobré výsledky aj pri použití pomerne hrubej aproximácie prenosov regulovaných sústav. Je to výpočtovo nenáročná metóda a jej jednoduchosť dáva dobré predpoklady pre využitie v praxi, ako bolo ukázané i na riadení DC motora.

6 Tvorba videonávodu

Pre správne použitie vytvoreného programu sme vytvorili krátky videonávod. Na tvorbu videonávodu sme použili program *aTubecatcher*. Pracovné okno programu je znázornené na obr. 20.



Obr. 20 *aTubeCatcher*

Práca s programom je veľmi jednoduchá, nakoľko je prístupná verzia aj v českom jazyku. Program je prístupný na internete na stránke <https://www.slunecnice.cz/sw/atube-catcher/> a má viacero možností využitia. Je možné vytvárať audiozáznamy, videozáznamy ako aj konvertovať videá. Pri videozázname program priamo nahráva to, čo sa odohráva na ploche počítača. Dôležité je označiť oblasť na ploche, ktorú chceme nahrávať. Kliknutím na ikonu *Start* spustíme nahrávanie pracovnej plochy. Pre ukončenie klikneme na ikonu *Stop* a v spodnej časti programu sa zobrazí vytvorený videozáznam, s ktorým môžeme ďalej pracovať.

Pokiaľ máme hotový videozáznam, je dôležité ho spracovať a uviesť do výslednej podoby. Programov na prácu a úpravu videí je mnoho. My sme použili *Windows moviemaker*. Program je jednoduchý a nenáročný na obsluhu.

7 Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo oboznámiť sa s metódou SIMC návrhu regulátorov, vytvoriť grafické prostredie pre návrh parametrov regulátorov pre zadaný typ riadenej sústavy a nakoniec vytvoriť videonávod na správne použitie metódy SIMC pre návrh parametrov PID (PI) pre riadenie laboratórneho DC motora. Pri vytváraní programu sme sa oboznámili s možnosťou tvorby grafického prostredia v Matlabe, v ktorom sme získali potrebnú zručnosť na vyriešenie našej úlohy. Bolo vytvorené grafické prostredie pre výpočet parametrov regulátorov pre 6 typov riadených sústav. V práci je uvedené simulačné overenie návrhu regulátorov pre systém 1. a 2. rádu s dopravným oneskorením a systém s integračnou činnosťou. Systém prvého rádu s dopravným oneskorením je často používaným náhradným modelom. Takýto náhradný model bol použitý aj na návrh parametrov PI regulátorov pre riadenie DC motora vo vzdialenom laboratóriu, kde sa dá pripojiť cez stránku ÚIAM.

Simulačné overenie a riadenie vzdialeného laboratórneho procesu potvrdzuje vhodnosť metódy SIMC pre návrh parametrov PID regulátorov. Metóda je výpočtovo jednoduchá, jej výhodou, aj nevýhodou je voliteľný parameter T_w , ktorým sa ovplyvňuje kvalita navrhnutých regulátorov. Pri návrhu nie je nutné poznať úplne presne model riadeného procesu.

Cieľom práce bolo osvojiť si poznatky o metóde SIMC, vytvoriť GUI pre výpočet parametrov regulátora, simulačne a riadením laboratórneho procesu overiť možnosť využitia uvedenej metódy a vytvoriť videonávod a prezentáciu pre použitie metódy SIMC pri návrhu parametrov regulátora pre riadenie laboratórneho procesu. Tieto ciele boli splnené.

Navrhnuté grafické prostredie je možné rozšíriť o výpočet niektorých ďalších ukazovateľov kvality.

Zoznam použitej literatúry

- [1] BAKOŠOVÁ, M. – FIKAR, M.: Riadenie procesov, Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2008.
- [2] SCHLEGEL, M.: Průmyslové PID regulátory: Tutorial, REX Controls [online] 04.03.2009, č. 29, [cit. 2017-05-10]. Dostupný z: http://matlab.fei.tuke.sk/raui/doc/PIDTutor_CZ.pdf
- [3] KOPRDA, Š.: Simulácia PID regulátora v programovom prostredí Matlab, Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre, Nitra, 2014.
- [4] VÍTEČKOVÁ, M.: Jednoduché seřízení regulátorů metodou SIMC, AT&P journal, 2006.
- [5] ARBOGAST, J. – COOPER, D. J. – RICE, R. C.: Model – Based Tuning Methods fo PID Controllers, 1995, [cit. 2017-05-10].
Dostupný z: http://www.bin95.com/PID_Controller_Desing.htm.
- [6] SKOGESTAD, S.: Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, Modeling, Identification and Control, 2(2), 85-120, 2004.

Prílohy

Príloha A: Vytvorené GUI - príloha v elektronickej podobe.

Príloha B: Videonávod - príloha v elektronickej podobe

Príloha C: Prezentácia - príloha v elektronickej podobe

.