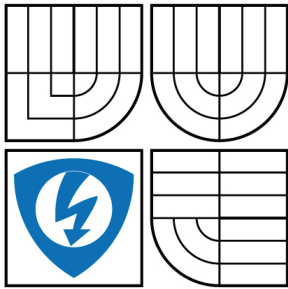


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ROBUSTNOST REGULÁTORŮ

ROBUST CONTROLLERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

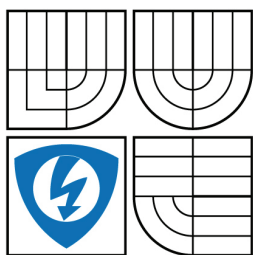
Bc. MICHAL DOBIAS

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. PETR PIVOŇKA, CSc.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Michal Dobias

ID: 83852

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Robustnost regulátorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Porovnejte robustnost diskretních PID regulátorů (metoda návrhu parametrů regulátoru ZN), adaptivních regulátorů (metoda ZN), optimálních a adaptivních optimálních regulátorů na vybraných přenosových funkcích. Ověřte vliv A/D a D/A převodníků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

PIVOŇKA, P.: Optimalizace regulátorů. VUT Brno, skriptum, 2005.

PIVOŇKA, P.: Číslicová řídicí technika, VUT Brno, skriptum, 2003

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá skúmaním pojmu robustnosť regulátorov. Jej cieľom je porovnať robustnosť diskretných PID regulátorov (Discrete Equivalent Continuous Controller, Discrete Impulse Area Invariant, Takahashi, Feed-Forward), adaptívnych diskretných PID regulátorov (Discrete Impulse Area Invariant, Takahashi, Feed-Forward), optimálnych (kvadratický optimálny) a adaptívnych optimálnych regulátorov (kvadratický optimálny) na zvolených prenosových funkciách a tiež má byť preverený vplyv A/D a D/A prevodníkov.

Na začiatku textu sú vytýčené ciele, ktoré majú byť dosiahnuté a je vysvetlený pojem robustnosť. Nasleduje popísanie a priblíženie jednotlivých vybraných druhov regulátorov a použitých identifikačných metód (pre adaptívne regulátory bola použitá rekurzívna metóda najmenších štvorcov). Je spravený rozbor vybranej prenosovej funkcie pomocou Kharitonovho teorému.

Ďalej nasleduje popis metód, ktorými sa bude overovať robustnosť vybraných regulátorov. Prvou z metód sú integrálne kritériá, konkrétne kritérium ITAE a kvadratické kritérium. Druhou metódou je vyšetrenie zásoby stability v module v komplexnej rovine. Za týmto nasleduje zobrazenie dosiahnutých výsledkov a komentár k nim. Získané výsledky sú graficky zobrazené a sú pomocou nich vzájomne porovnané jednotlivé typy regulátorov.

Všetky simulácie a dosiahnuté výsledky boli získané pomocou programu MATLAB – Simulink. V závere práce je celkové zhodnotenie.

Abstract

This thesis tries to research the term “robust controllers”. Its aim is to compare the robustness of discrete PID controllers (Discrete Equivalent Continuous Controller, Discrete Impulse Area Invariant, Takahashi, Feed-Forward), adaptive discrete PID controllers (Discrete Impulse Area Invariant, Takahashi, Feed-Forward), optimal controllers (quadratic optimal), and adaptive optimal controllers (quadratic optimal) on chosen transfer functions. Its aim is also to check the influence of A/D and D/A converters.

The aims to obtain are demarked at the beginning of the text and also there is an explanation of the term “robustness.” Later on there is a description and an approximation to each of the chosen kinds of controllers and the identification methods used in the thesis (for adaptive controllers the method of recursive least-squares was used). The Kharitonov's Theorem are made on the chosen transfer function.

Next there is a description of the methods with which the robustness of the controllers will be tested. The first method is the integral criteria, particular ITAE criterion and quadratic criterion. The second one is the analysis of the generalised circle criterion. Furthermore there are various displays of the results obtained and their corresponding comments. The results obtained are graphically displayed and by means of these schemes the particular types of controllers are compared.

All of the simulations and results obtained were acquired through the use of the program MATLAB- Simulink. In the end of the thesis there is an overall evaluation.

Klíčové slová: robustnosť regulátorov, neurčitost' a nejasnosť sústavy, integrálne kritéria, stabilita uzavretej regulačnej slučky, spätnoväzobná regulácia.

Key words: robust controllers, uncertain and unclarity of systém, integral criteria, stability of feedback control loop, feedback control.

DOBIAS, M. Robustnosť regulátorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 86 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Robustnost regulátorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **25. května 2009**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Petru Pivoňkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **25. května 2009**

.....

podpis autora

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| 1. ÚVOD | 14 |
| 2. ROBUSTNOSTĚ REGULÁTOROV | 15 |
| 3. PSD REGULÁTOR..... | 16 |
| 4. ŠTRUKTÚRA FEED-FORWARD | 20 |
| 5. TAKAHASHI REGULÁTOR..... | 21 |
| 6. OPTIMÁLNY REGULÁTOR | 22 |
| 6.1 LQ regulátor | 22 |
| 7. ADAPTÍVNY REGULÁTOR | 24 |
| 8. METÓDA NAJMENŠÍCH ŠTVORCOV | 26 |
| 9. KHARITONOV TEORÉM..... | 28 |
| 10. POROVNANIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIÍ..... | 30 |
| 10.1 Integrálne kritéria | 30 |
| 10.1.1 Kvadratické integrálne kritérium..... | 30 |
| 10.1.2 Integrálne kritérium ITAE..... | 30 |
| 10.2 Popis regulovaného deju | 31 |
| 10.3 Zásoba stability v module | 32 |
| 10.4 Výsledky simulácií..... | 33 |
| 11. ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV A ZÁVER..... | 79 |
| 11.1 Zhodnotenie výsledkov | 79 |
| 11.1.1 Vyhodnotenie výsledkov pre DECC, DIAI, FF, TAKA a LQ s periódou vzorkovania 0,1 s | 79 |
| 11.1.2 Vyhodnotenie výsledkov pre DECC, DIAI, FF, TAKA a LQ s periódou vzorkovania 1 s | 80 |
| 11.1.3 Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s periódou vzorkovania 0,1 s | 80 |
| 11.1.4 Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s..... | 81 |
| 11.1.5 Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s..... | 82 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 11.1.6 | Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s..... | 82 |
| 11.1.7 | Vyhodnotenie výsledkov vyšetrenia zásoby stability v module | 83 |
| 11.2 | Záver | 84 |
| 12. | ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY..... | 85 |
| 13. | ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK..... | 86 |

ZOZNAM OBRÁZKOV

| | | |
|---------------|---|----|
| Obrázok 3.1 | Regulačný obvod s diskretným regulátorom | 16 |
| Obrázok 3.2 | Náhrada vzorkovača a tvarovača dopravným oneskorením [3] | 17 |
| Obrázok 3.3 | Stavový diagram PSD regulátoru s filtráciou derivačnej zložky a antiwindupom (DECC) | 18 |
| Obrázok 4.1 | Štruktúra slučky Feed-Forward (FF) [1] | 20 |
| Obrázok 6.1 | Blokové schéma LQ regulátoru v základnom tvare | 23 |
| Obrázok 7.1 | Jednoduchý regulačný obvod bez pôsobenia porúch | 24 |
| Obrázok 7.2 | Jednoduchý regulačný obvod s adaptívnym rozšírením bez pôsobenia porúch | 24 |
| Obrázok 9.1 | Zobrazenie priebehu Kharitonových obdĺžnikov pre zadanú sústavu $F_S(s)$ | 29 |
| Obrázok 11.1 | Použitý regulačný obvod | 31 |
| Obrázok 10.2 | Zobrazenie princípu zásoby stability v module | 32 |
| Obrázok 10.3 | Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 34 |
| Obrázok 10.4 | Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 35 |
| Obrázok 10.5 | Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 35 |
| Obrázok 10.6 | Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 36 |
| Obrázok 10.7 | Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 37 |
| Obrázok 10.8 | Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 37 |
| Obrázok 10.9 | Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 38 |
| Obrázok 10.10 | Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 39 |
| Obrázok 10.11 | Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s | 39 |
| Obrázok 10.12 | Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s | 40 |

| | | |
|----------------------|---|----|
| <i>Obrázok 10.13</i> | <i>Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 41 |
| <i>Obrázok 10.14</i> | <i>Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 41 |
| <i>Obrázok 10.15</i> | <i>Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 42 |
| <i>Obrázok 10.16</i> | <i>Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 43 |
| <i>Obrázok 10.17</i> | <i>Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 43 |
| <i>Obrázok 10.18</i> | <i>Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 44 |
| <i>Obrázok 10.19</i> | <i>Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 45 |
| <i>Obrázok 10.20</i> | <i>Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s</i> | 45 |
| <i>Obrázok 10.21</i> | <i>Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 46 |
| <i>Obrázok 10.22</i> | <i>Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 47 |
| <i>Obrázok 10.23</i> | <i>Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 47 |
| <i>Obrázok 10.24</i> | <i>Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 48 |
| <i>Obrázok 10.25</i> | <i>Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 49 |
| <i>Obrázok 10.26</i> | <i>Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 49 |
| <i>Obrázok 10.27</i> | <i>Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 50 |
| <i>Obrázok 10.28</i> | <i>Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 51 |
| <i>Obrázok 10.29</i> | <i>Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 51 |
| <i>Obrázok 10.30</i> | <i>Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S1}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 52 |

| | |
|---|----|
| <i>Obrázok 10.31 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S1}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s</i> | 53 |
| <i>Obrázok 10.32 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom</i> | 54 |
| <i>Obrázok 10.33 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom</i> | 54 |
| <i>Obrázok 10.34 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 55 |
| <i>Obrázok 10.35 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s</i> | 56 |
| <i>Obrázok 10.36 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom</i> | 57 |
| <i>Obrázok 10.37 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom</i> | 57 |
| <i>Obrázok 10.38 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 58 |
| <i>Obrázok 10.39 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s</i> | 59 |
| <i>Obrázok 10.40 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom</i> | 60 |
| <i>Obrázok 10.41 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom</i> | 60 |
| <i>Obrázok 11.42 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S1}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 61 |
| <i>Obrázok 10.43 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S1}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s</i> | 62 |
| <i>Obrázok 10.44 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s 12-bitovým prevodníkom</i> | 63 |
| <i>Obrázok 10.45 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ 12-bitovým prevodníkom</i> | 63 |
| <i>Obrázok 10.46 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 64 |
| <i>Obrázok 10.47 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s</i> | 65 |
| <i>Obrázok 10.48 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ 12-bitovým prevodníkom</i> | 66 |

| | |
|---|----|
| <i>Obrázok 10.49 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ 12-bitovým prevodníkom</i> | 66 |
| <i>Obrázok 10.50 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 67 |
| <i>Obrázok 10.51 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s</i> | 68 |
| <i>Obrázok 10.52 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ 12-bitovým prevodníkom</i> | 69 |
| <i>Obrázok 10.53 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ 12-bitovým prevodníkom</i> | 69 |
| <i>Obrázok 10.54 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S1}(s)$ s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 70 |
| <i>Obrázok 10.55 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ 16-bitovým prevodníkom</i> | 71 |
| <i>Obrázok 10.56 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ 16-bitovým prevodníkom</i> | 71 |
| <i>Obrázok 10.57 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 72 |
| <i>Obrázok 10.58 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ 16-bitovým prevodníkom</i> | 73 |
| <i>Obrázok 10.59 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ 16-bitovým prevodníkom</i> | 73 |
| <i>Obrázok 10.60 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 74 |
| <i>Obrázok 10.61 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ 16-bitovým prevodníkom</i> | 75 |
| <i>Obrázok 10.62 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ 16-bitovým prevodníkom</i> | 75 |
| <i>Obrázok 10.63 Zobrazenie frekvenčnej charakteristiky v komplexnej rovine pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 76 |
| <i>Obrázok 10.64 Zobrazenie frekvenčnej charakteristiky v komplexnej rovine pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 77 |
| <i>Obrázok 10.65 Zobrazenie frekvenčnej charakteristiky v komplexnej rovine pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s</i> | 78 |

1. ÚVOD

V dnešnej dobe je pestrosť a množstvo úloh, v ktorých sú nasadené regulátory veľmi početné. V týchto úlohách sa môže jednať o jednoduché riadenie teploty v miestnosti až po sústavu niekoľkých regulátorov obsluhujúcich výrobnú linku. Jednou z požiadaviek na takýto regulátor môže byť práve robustnosť.

Zo zadania máme porovnať robustnosť vybraných druhov regulátorov na zvolených prenosových funkciách a tiež overiť vplyv A/D a D/A prevodníku. Pre upresnenie ďalšieho postupu bude prebiehať porovnanie robustnosti na základe výsledkov zvolených integrálnych kritérií a pomocou vyšetrenia zásoby stability v module.

Porovnanie pomocou integrálnych kritérií bude uskutočnené na základe definovaného regulačného procesu s jednou zmenou riadiacej veličiny a dvomi po sebe nasledujúcimi pôsobeniami porúch v rozdielnych miestach regulačného obvodu. Toto porovnanie bude rozdelené do niekoľkých častí.

Prvou časťou bude porovnanie diskrétnych PID regulátorov spolu s optimálnym regulátorom pre dve zvolené periódy vzorkovania (0,1 s a 1 s).

Druhou časťou porovnania pomocou integrálnych kritérií bude porovnanie adaptívnych PID, optimálnych a adaptívnych optimálnych regulátorov s periódou vzorkovania 0,1 s.

Tretia časť bude obsahovať opäť porovnanie adaptívnych PID, optimálnych a adaptívnych optimálnych regulátorov s periódou vzorkovania 0,1 s, ale s použitím A/D a D/A prevodníkov (8,12 a 16-bitových).

Porovnanie na základe vyšetrenia zásoby stability v module bude uskutočnené pre všetky vybrané regulátory.

V kapitole Zhodnotenie bude ku každej úlohe uvedený komentár k jednotlivým dosiahnutým výsledkom. Kapitola Záver bude obsahovať obecné hodnotenie dosiahnutých výsledkov a poznatkov.

Všetky zobrazené prechodové deje budú príslušne okomentované s prípadným doplnením.

2. ROBUSTNOSTĚ REGULÁTOROV

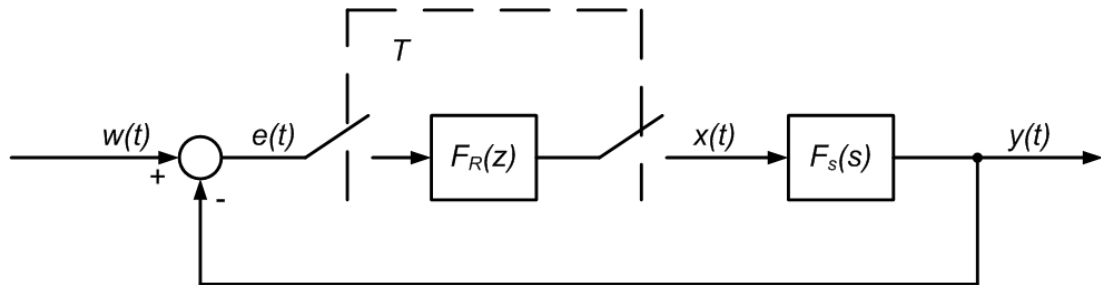
Slovník pojem robustnosť definuje ako sila, mohutnosť alebo „vlastnosť byť silný“, prípadne „kvalita byť odolný proti preťaženiu, nátlaku alebo zmenám v pracovnom postupe, procese; či náhodám alebo nepredvídaným okolnostiam“. Jedná sa o takú dynamiku regulačného obvodu, ktorá umožní regulátoru vykonávať činnosť podľa požiadaviek na vybranej sústave aj v prípade, že ide o sústavu, ktorá v priebehu času mení svoje vlastnosti.

Tiež by sa tento pojem dal vysvetliť ako necitlivosť voči poruchám v regulačnom obvode.

S robustnosťou sa spája pojem nejasnosť sústavy, a teda aj to akým spôsobom sa dokáže regulátor s týmto problémom vyrovnáť. Máme na mysli dynamiku, o ktorej sa pri návrhu regulátoru neuvažovalo prípadne nebola takáto dynamika známa alebo táto dynamika vznikla počas činnosti sústavy či už v krátkodobom alebo dlhodobom či trvalom ponímaní.

Keď teda uvažujeme nad vyššie spomínanými pojmami, nesmieme zabudnúť na výraz stabilita regulačnej slučky. Takže pojem robustnosť môže niesť v sebe informáciu o tom, do akej miery je regulátor schopný udržať regulačnú slučku v medziach stability v zmysle zmeny parametrov sústavy. Preto je dôležité, aby regulátor bol schopný s takýmito zmenami pracovať, keďže tieto zmeny nie sme schopný dostatočne presne určiť a predvídať počas návrhu regulátoru.

3. PSD REGULÁTOR



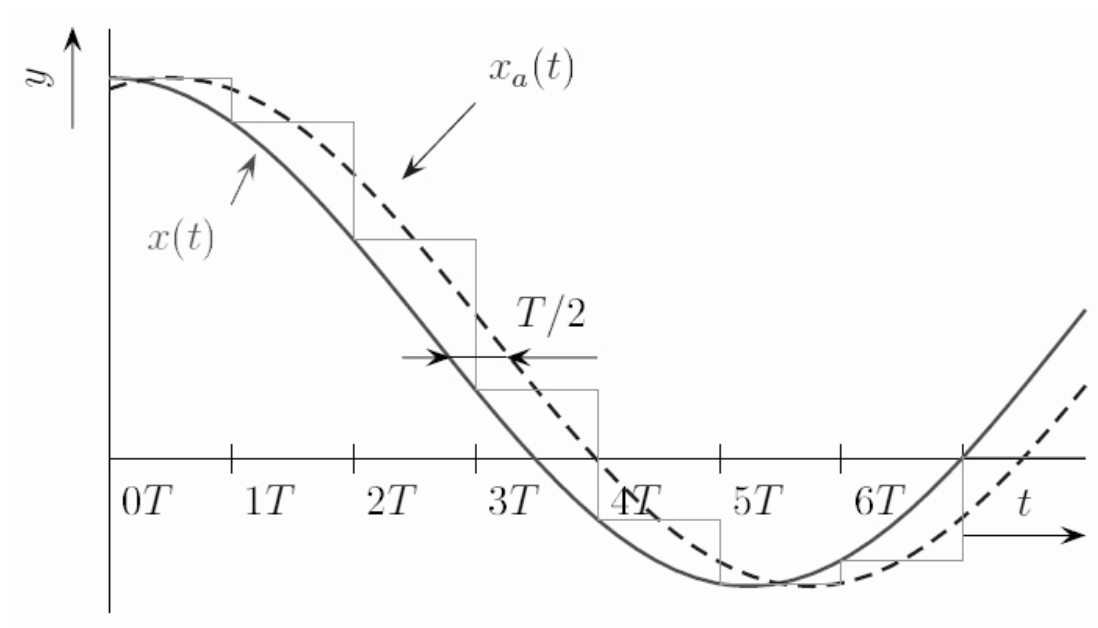
Obrázok 3.1 Regulačný obvod s diskretným regulátorom

Pre funkčnosť obvodu s diskretným regulátorom musíme doplniť jednoduchú regulačnú slučku o **vzorkovač** a **tvorovač**.

Vzorkovač (A/D prevodník) prevádza periodické meranie hodnoty danej veličiny (najčastejšie $e(t)$). Jej hodnotu odoberá v pravidelných intervaloch (perióda vzorkovania T_V) vo forme vzorkov a medzi dvoma odbermi ho hodnota tejto veličiny nezaujima.

Tvorovač (D/A prevodník) upravuje diskretný akčný zásah z regulátoru na prijateľný spojitý signál (aspoň po častiach) pre spojitú regulovanú sústavu. Väčšinou sa používa tvorovač nultého rádu.

Spôsob, ktorý umožňuje návrh diskretného PSD regulátoru, je použitie náhrady vzorkovača a tvorovača článkom s dopravným oneskorením. Tento spôsob je približný, ale vo veľkej väčšine prípadov prakticky postačujúci. Spojitý signál je vzorkovaný a po výpočte tvarovaný. Tým vznikne schodovitý priebeh. Ten je vyhladený veľkými časovými konštantami v riadenej sústave a výsledná odozva je približne rovná odozve na signál, ktorý je strednou hodnotou pravouhlých akčných impulzov. Tento signál $x_a(t)$ je oproti pôvodnému $x(t)$ posunutý o polovicu vzorkovacej periódy.



Obrázok 3.2 Náhrada vzorkovača a tvarovača dopravným oneskorením [3]

Ďalej postupujeme návrhom spojitého PID regulátoru pre sústavu s dopravným oneskorením $F_s(s)e^{\frac{T}{s}}$. Prenos PSD regulátoru je určený ako diskretný ekvivalent spojitého PID regulátoru.

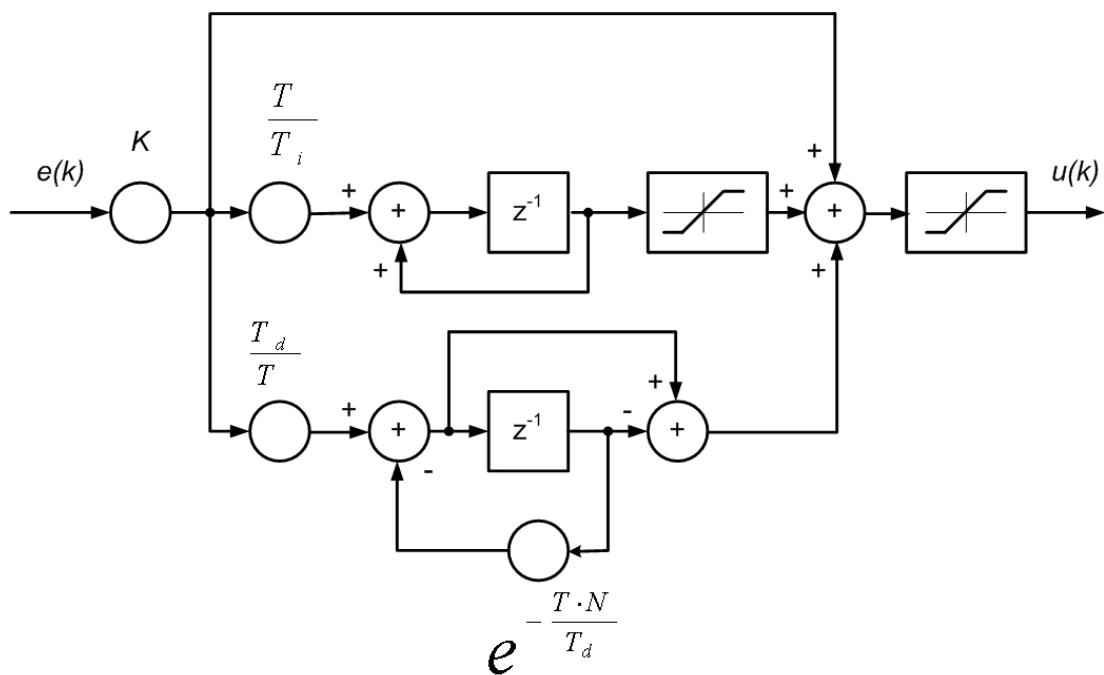
Pri realizácii PSD regulátoru je treba splniť niekoľko podmienok, ktoré umožnia korektné porovnanie jeho vlastností s PID regulátorom [4].

1. Splnenie vzorkovacieho teorému, ktorý hovorí aby vzorkovacia frekvencia bola aspoň dvakrát väčšia ako je najvyššia frekvencia v spektre vzorkovaného signálu.
2. Spojitým filtrom musia byť potlačené všetky frekvencie, ktoré sú vyššie ako je vzorkovacia frekvencia.
3. Perióda vzorkovania bola dostatočne krátka vzhľadom k časovým konštantám systému.
4. Derivačná zložka bola dostatočne vyfiltrovaná.

Prenos PSD regulátoru s filtráciou derivačnej zložky [2]

$$F_R = K \cdot \left[1 + \frac{T}{T_i} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} + \frac{T_D}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{TN}{T_D}} z^{-1}} \right] \quad (3.1)$$

Stavový diagram PSD regulátoru s filtráciou derivačnej zložky je



Obrázok 3.3 Stavový diagram PSD regulátoru s filtráciou derivačnej zložky a antiwindupom (DECC)

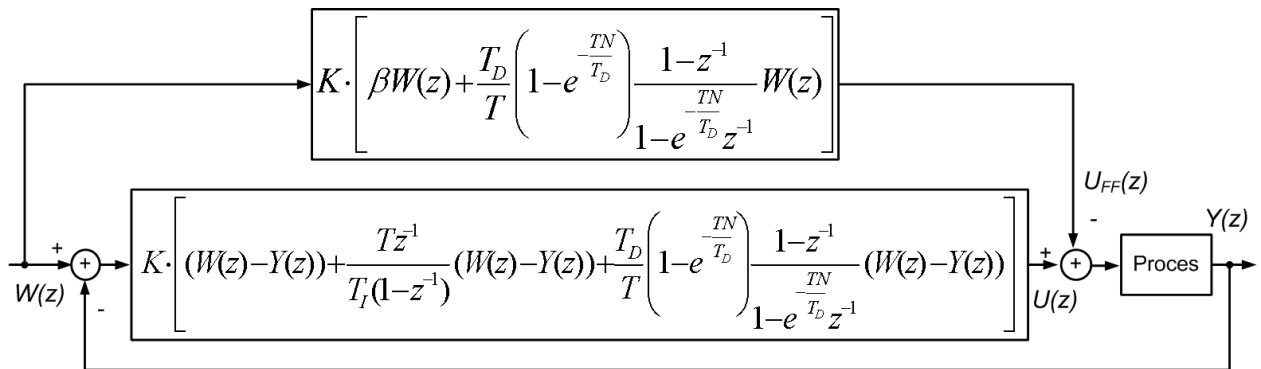
Ďalšou možnosťou je rozšírenie derivačnej (diferenčnej) časti regulátoru podľa [1], ktorej podstatou je nepremenná impulzná plocha (impulse area invariant – DIAI) splňujúca tieto požiadavky:

- Odozva má maximálnu hodnotu v kroku $k = 0$ a potom exponenciálne klesá.
- Celková plocha grafu odozvy je ekvivalentná s odozvou spojitej derivačnej zložky.

$$F_R = K \cdot \left[1 + \frac{T}{T_I} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} + \frac{T_D}{T} \left(1 - e^{-\frac{TN}{T_D}} \right) \frac{1 - z^{-1}}{1 - e^{-\frac{TN}{T_D}} z^{-1}} \right] \quad (3.2)$$

4. ŠTRUKTÚRA FEED-FORWARD

Funkcia a princíp štruktúry Feed-Forward (FF) vyplýva z *Obrázok 4.1*. Jeho myšlienkou je výpočet akčného zásahu $u(z) = U(z) - U_{FF}(z)$, kedy časť $U_{FF}(z)$ je počítaná iba z veľkosti riadiacej veličiny $W(z)$ a časť $U(z)$ je vypočítaná pomocou regulačnej odchýlky $e(z) = W(z) - Y(z)$. Vlastnosťou algoritmu Feed-Forward je, že pomocou parametru β a v podstate celej predradenej časti, môžeme obmedziť veľkosť vplyvu riadiacej veličiny na prekmit sústavy a tým ho vlastne obmedziť.



Obrázok 4.1 Štruktúra slučky Feed-Forward (FF) [1]

5. TAKAHASHI REGULÁTOR

Takahashi regulátor (TAKA) je popísaný nasledujúcou rovnicou podľa [2]:

$$u(k) = K_P \cdot [y(k-1) - y(k)] + K_I \cdot [w(k) - y(k)] + K_D \cdot [2 \cdot y(k-1) - y(k-2) - y(k)] + u(k-1) \quad (5.1)$$

Pre určenie jeho parametrov K_P , K_I a K_D platia nasledujúce vzťahy získané z kritických parametrov sústavy:

$$K_P = 0,6K_{KRIT} - \frac{K_I}{2} \quad ; \quad K_I = \frac{1,2K_{KRIT}T}{T_{KRIT}} \quad ; \quad K_D = \frac{3K_{KRIT}T_{KRIT}}{40T}$$

6. OPTIMÁLNÝ REGULÁTOR

Pojem optimální musíme chápat v zmysle optimální vztahom k niečomu, k nejakému definovanému kritériu alebo podmienke. Podstata optimálneho regulátoru spočíva v hľadani minima určitého vopred daného kritéria. Tento nájdený extrém (minimum) je potom vyjadrený ako optimálne riešenie daného problému a všetky ostatné riešenie sú buď rovnako dobré alebo horšie.[5]

6.1 LQ REGULÁTOR

Vo svojej základnej forme sa jedná o stavový regulátor, ktorý má proporcionálne spätné väzby od stavov regulovaného procesu. Písmeno L v skratke znamená použitie lineárneho modelu pre výpočet riadiacich zásahov a Q symbolizuje kvadratické kritérium podľa ktorého regulátor pracuje. Jeho vlastnosti sa nenastavujú priamou zmenou parametrov ako v prípade klasického PSD regulátoru, ale voľbou a konštantami optimalizovaného kritéria. LQ regulátor je teda vždy optimálny vzhľadom k zvolenému kritériu.[6]

Kvadratické kritérium je definované takto

$$J = \sum_{k=0}^N [x^T(k) \cdot Q \cdot x(k) + u^T(k) \cdot R \cdot u(k)] \quad (6.1)$$

kde matica R váži vynaloženú energiu a matica Q váži odchýlku stavu systému od nulových hodnôt.

Pre výpočet optimálneho akčného zásahu platí

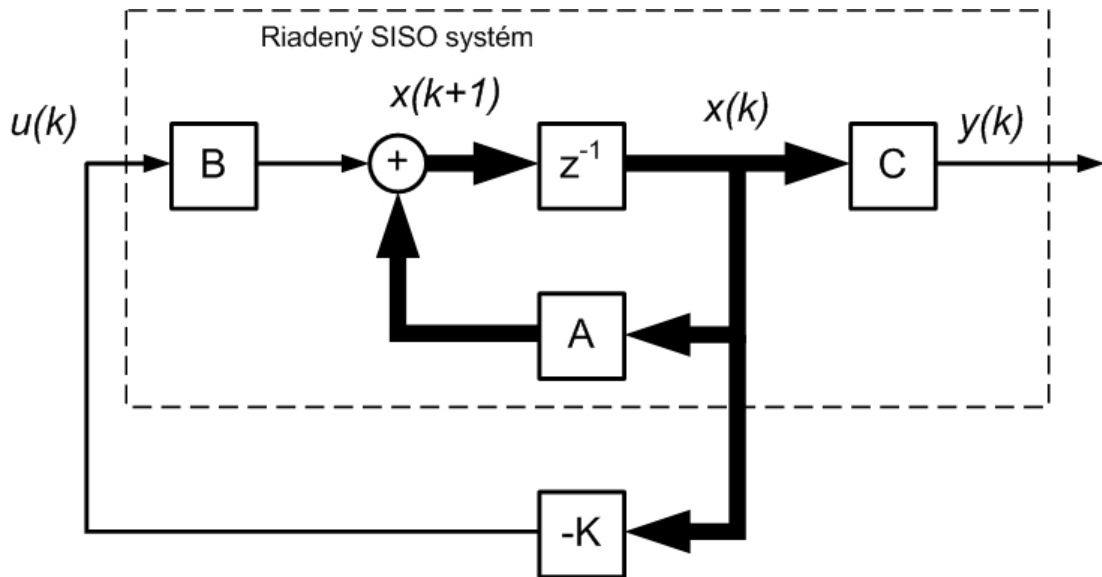
$$u(k) = -K \cdot x(k) \quad (6.2)$$

Kde K je definované takto

$$K = [R + B^T \cdot P \cdot B]^{-1} \cdot B^T \cdot P \cdot A \quad (6.3)$$

Matica P je riešením algebraickej Riccatiho rovnice

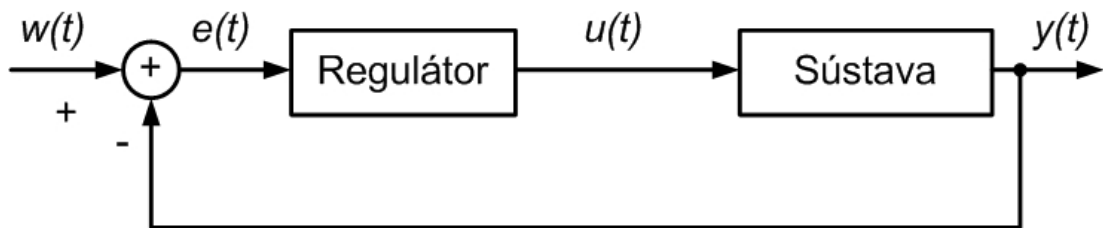
$$P = Q + K^T \cdot R \cdot K + (A - B \cdot K)^T \cdot P \cdot (A - B \cdot K) \quad (6.4)$$



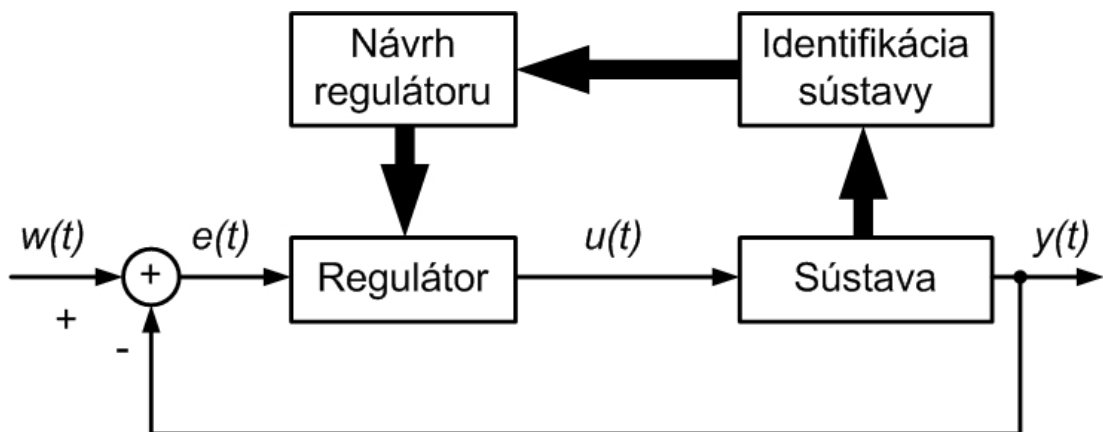
Obrázok 6.1 Blokové schéma LQ regulátoru v základnom tvare

7. ADAPTÍVNÝ REGULÁTOR

Podstata tohto regulátoru spočíva v tom, že rozširuje klasickú jednoduchú regulačnú slučku, ktorá je zobrazená na *Obrázok 7.1*, o proces identifikácie sústavy a proces návrhu regulátoru, ktorý môžeme vidieť na *Obrázok 7.2*.



Obrázok 7.1 Jednoduchý regulačný obvod bez pôsobenia porúch



Obrázok 7.2 Jednoduchý regulačný obvod s adaptívnym rozšírením bez pôsobenia porúch

Identifikáciu sústavy je možné uskutočniť niekoľkými identifikačnými postupmi. Jedným z nich je identifikácia niektorou z variant metódy najmenších štvorcov. Ďalším známym postupom je identifikácia pomocou neurónovej siete (Back-Propagation, Marquardt-Levenberg,...).

Samotný blok Identifikácia sústavy môže byť vyhotovený v dvoch prevedeniach:

- V prvom prípade sa jedná o jednorázovú identifikáciu, kedy na začiatku regulačného procesu prebehne rýchla identifikácia sústavy a následne návrh parametrov regulátoru, ktorý nastaví regulátor podľa danej metódy alebo kritéria.
- V druhom prípade je použitá priebežná identifikácia procesu, ktorá dodáva neustále nové informácie o sústave pre blok Návrh regulátoru, ktorý priebežne upravuje nastavenie parametrov samotného regulátoru. Tento postup je vhodný najmä pri regulovaní sústav s časovo premennými parametrami, pretože regulátor je schopný na tieto zmeny vhodne reagovať.

8. METÓDA NAJMENŠÍCH ŠTVORCOV

Ako model pre aplikáciu metódy najmenších štvorcov uvažujeme

$$F(z) = \frac{A(z)}{B(z)} = \frac{a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}{1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}} = \frac{Y(z)}{U(z)} \quad (8.1)$$

Následnou úpravou postupujem takto

$$Y(z)(1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}) = (a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n})U(z)$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$y(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \quad u(k-1) \dots u(k-n)] \times \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \varphi^T \cdot \theta \quad (8.2)$$

Rovnica 8.2 platí práve pre jeden výpočet výstupu $y(k)$ v k -tom kroku pre použitý model na základe predchádzajúcich meraní, kde vektor θ je vektor neznámych parametrov modelu sústavy a vektor φ vyjadruje predchádzajúce hodnoty vstupu a výstupu sústavy. Z predchádzajúceho vyplýva, že je možné tento postup opakovať, a teda bude platiť nasledujúci maticový zápis, v ktorom vznikne len posunutie indexu prvkov (napr. Pre model 1.rádu):

$$Y = \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad \Phi = \begin{bmatrix} -y(k-1) & u(k-1) \\ -y(k) & u(k) \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix}$$

Zjednodušený maticový zápis je teda

$$Y = \Phi \cdot \theta \quad (8.3)$$

Ďalej je možné rovnicu 8.3 upraviť nasledovným spôsobom

$$\Phi^T Y = \Phi^T \Phi \theta$$

$$\theta = (\Phi \Phi^T)^{-1} \Phi Y \quad (8.4)$$

V rovnici 8.4 získavame vzťah pre určenie neznámych parametrov a_1 a b_1 vektoru θ . $P = (\Phi\Phi^T)^{-1}$ a nazýva sa tiež kovariančnou maticou. Tento postup je možné použiť pre jednorázovú identifikáciu metódou najmenších štvorcov.

Pre rekurzívne použitie metódy najmenších štvorcov je dôležité si uvedomiť, že pre získanie ďalších hodnôt $y(k)$ musíme rozširovať maticu Φ pre výsledný požadovaný počet. Tento prístup by však mohol viesť k obrovskému rozmeru matice Φ . Z predchádzajúceho príkladu je vidieť že veľkosť matice Φ (resp. vektoru φ) nie je potreba rozširovať pokiaľ pre tvorbu modelu nepotrebujeme počítať viac ako výstup $y(k)$. [2]

Z tohto tvrdenia už môžeme ľahko vidieť nasledujúci postup pre rekurzívnu metódu najmenších štvorcov, ktorej podstata je v aktualizácii vektoru φ . Teda celý postup (pre model 3. rádu) je v princípe nasledovný:

```

while(1){
    získanie aktuálnych hodnôt u1 a y1
    u1 <<<
    y1 <<<
    algoritmus výpočyp parametrov modelu
     $\varphi = [u1; u2; u3; -y1; -y2; -y3]$ 
     $K = \frac{P\varphi}{1 + \varphi^T P \varphi}$ 
     $\theta = \theta + K(y1 - \varphi^T \theta)$ 
     $P = P - K\varphi^T P$ 
    aktualizácia vektoru  $\varphi$ 
    u3 = u2
    u2 = u1
    y3 = y2
    y2 = y1
}

```

9. KHARITONOV TEORÉM

Kharitonov teorém hovorí o robustnej stabilite intervalových polynómov.

$$p(s, q) = \sum_{i=0}^n [q_i^-, q_i^+] s^i \quad (9.1)$$

Intervalový polynóm n -tého rádu je Hurwitzovsky stabilný vtedy a iba vtedy, ak štvorica Kharitonových polynómov sú Hurwitzovsky stabilné[7].

$$\begin{aligned} K_1(s) &= q_0^- + q_1^- s + q_2^+ s^2 + q_3^+ s^3 + q_4^- s^4 + q_5^- s^5 + q_6^+ s^6 \dots \\ K_2(s) &= q_0^+ + q_1^+ s + q_2^- s^2 + q_3^- s^3 + q_4^+ s^4 + q_5^+ s^5 + q_6^- s^6 \dots \\ K_3(s) &= q_0^+ + q_1^- s + q_2^- s^2 + q_3^+ s^3 + q_4^+ s^4 + q_5^- s^5 + q_6^- s^6 \dots \\ K_4(s) &= q_0^- + q_1^+ s + q_2^+ s^2 + q_3^- s^3 + q_4^- s^4 + q_5^+ s^5 + q_6^- s^6 \dots \end{aligned} \quad (9.2)$$

Vyčíslením Kharitonových polynómov v niektorom bode frekvenčnej charakteristiky ($s = j\omega$) získame body vrcholov jedného obdĺžnika, ktorého strany sú rovnobežné s imaginárnou a reálnou osou komplexnej roviny. Vyčíslením pomocou takéhoto postupu pre niekoľko hodnôt ω získame charakteristiku zobrazenú na *Obrázok 9.1*.

Kharitonove polynómy sú stabilné podľa Mikhailovovho zobrazenia vtedy, keď obdĺžniky začínajú na kladnej reálnej ose a obiehajú proti smeru hodinových ručičiek po fázu $n\pi/2$ (kde n je stupeň polynómu) pri narastajúcej frekvencii ω . [8]

$$F_s(s) = \frac{2}{(10k(t)s+1)(s+1)^2}, \quad k \in \langle 0.5; 1.5 \rangle$$



Obrázok 9.1 Zobrazenie priebehu Kharitonových obdlžnikov pre zadanú sústavu $F_S(s)$

10. POROVNANIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIÍ

10.1 INTEGRÁLNE KRITÉRIA

Na zistenie kvality regulácie a porovnanie vlastností vyššie spomínaných regulátorov boli použité integrálne kritériá, ktoré číselne vyjadrujú veľkosť plochy ohraničenú funkciou regulačnej odchýlky.

10.1.1 Kvadratické integrálne kritérium

Jeho podstata je v tom, že vytvára kvadrát z plochy ohraničenej funkciou regulačnej odchýlky a preto pri integrácii nedochádza k sčítaniu kladnej a zápornej plochy. Je definované podľa vzťahu:

$$J_K = \int_0^{\infty} [e(t) - e(\infty)]^2 dt \quad (10.1)$$

V prípade nulovej ustálenej odchýlky: $J_K = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (10.2)$

Zo vzťahov je vidieť, že toto kritérium zvyhodňuje väčšie odchýlky a naopak menšie znevýhodňuje.

10.1.2 Integrálne kritérium ITAE

Je to váhové kritérium a váha odchýlky v ňom narastá lineárne s časom. Jeho analytické riešenie je veľmi náročné a preto sa k jeho určeniu často používa simulácia. Je definované podľa vzťahu:

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| \cdot t dt \quad (10.3)$$

V prípade nulovej ustálenej odchýlky: $J_{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| \cdot t dt \quad (10.4)$

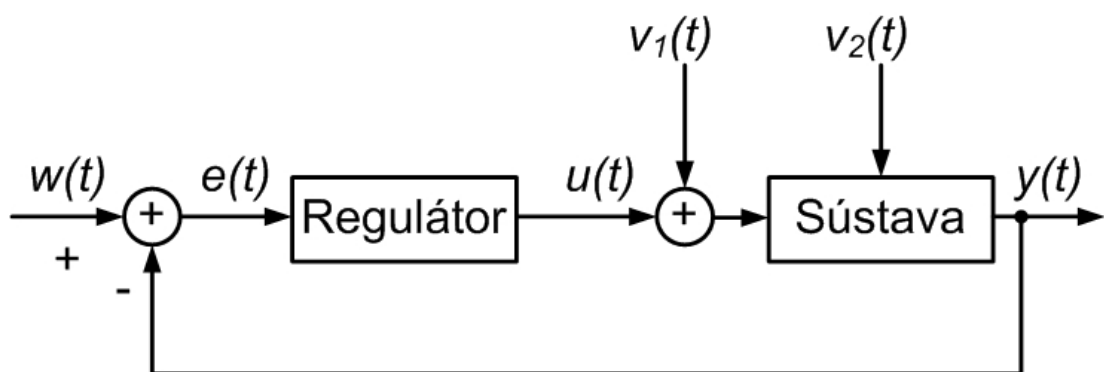
10.2 POPIS REGULOVANÉHO DEJU

Pre porovnanie všetkých regulátorov pomocou integrálnych kritérií bol navrhnutý regulačný proces, ktorý je popísaný takto:

1. $t = 0\text{ s}$ je riadiaca veličina $w(t)$ nastavená pri skokovej zmene z hodnoty nula na hodnotu jedna. Tento interval je označený ako $t_1 = 100\text{ s}$.
2. po uplynutí časového intervalu t_1 je na vstup sústavy privedená porucha $v_1(t)$ v tvare jednotkového skoku. Tento interval je označený ako $t_2 = 100\text{ s}$.
3. po skončení časového intervalu t_2 je priamo do sústavy privedená porucha $v_2(t)$ v tvare jednotkového skoku. Konkrétne je miesto pôsobenia poruchy medzi $F_{1s}(s) = \frac{2}{10k(t)s+1}$ a $F_{2s}(s) = \frac{1}{(s+1)^2}$.

Tento interval je označený ako $t_3 = 100\text{ s}$.

4. Po uplynutí časového intervalu t_3 je simulačný dej ukončený.

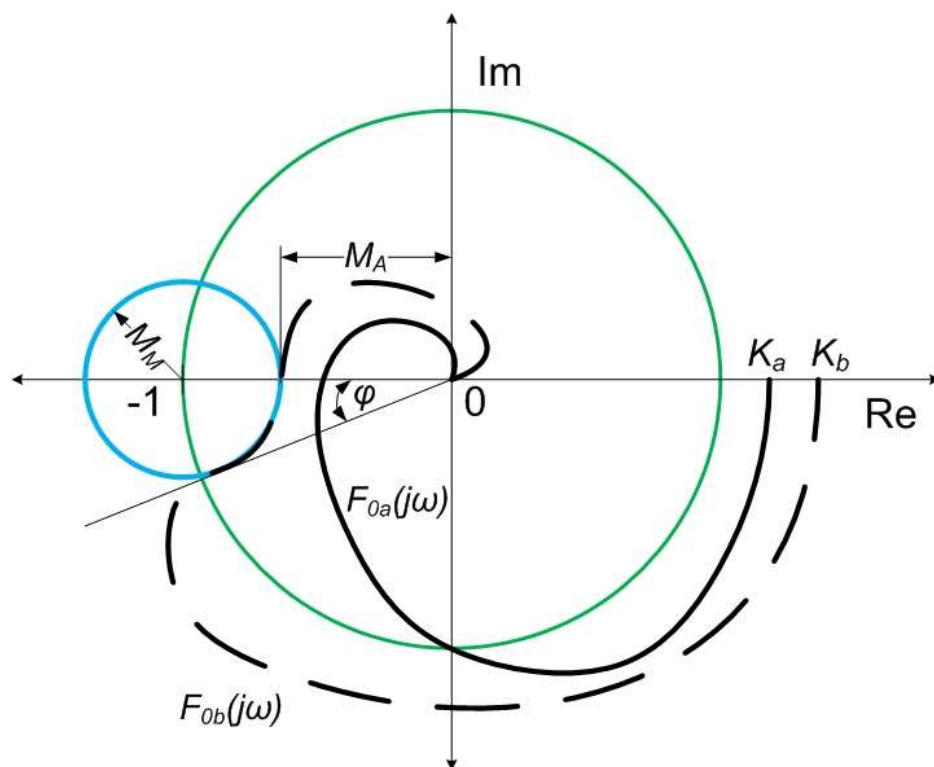


Obrázok 10.1 Použitý regulačný obvod

10.3 ZÁSoba STABILITY V MODULE

Jedným zo spôsobov porovnania robustnosti regulátorov je vyšetrenie zásoby stability v module daného otvoreného regulačného obvodu. Táto podmienka, ktorá sa stanovuje pre daný regulačný obvod hovorí o tom, že frekvenčná charakteristika otvoreného regulačného obvodu nesmie pretínať zvolenú kružnicu so stredom v bode $[-1, j0]$ a polomerom M_M . Môže sa jej maximálne dotýkať. Táto podmienka v sebe zahrnuje podmienku o zásobe stability v amplitúde (M_A) a tiež o zásobe stability vo fáze (φ), a pretože tieto podmienky platia súčasne, tak je vlastne podmienka zásoby stability v module prísnejšou podmienkou akou je osobitne zásoba stability v amplitúde alebo vo fáze.

Na *Obrázok 10.2* vidíme princíp vyjadrenia zásoby stability v module. Typická voľba je $M_M = 0,5$ (-6 dB), ktorá zaisťuje zásobu stability v amplitúde $M_A > 2$ a zásobu stability vo fáze $\varphi > 29^\circ$. Táto hodnota kritéria je použitá aj pre vyhodnotenie získaných výsledkov.



Obrázok 10.2 Zobrazenie princípu zásoby stability v module

10.4 VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

Prenos sústavy:
$$F_{S1}(s) = \frac{1}{(10s + 1) \cdot (s + 1) \cdot (s + 1)} \quad (10.5)$$

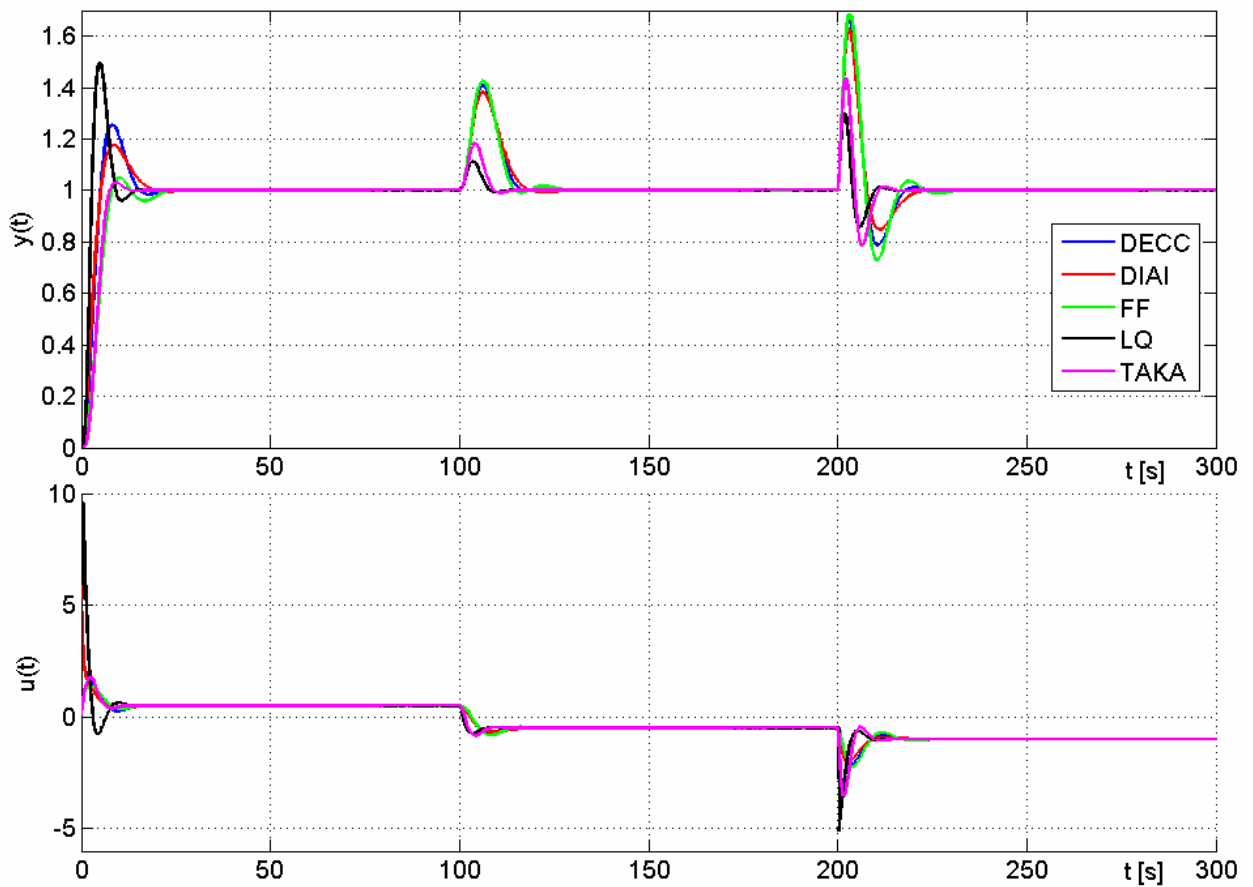
Tento prenos ($F_{S1}(s)$) reprezentuje základnú sústavu a jej príslušné vlastnosti.

Prenos sústavy:
$$F_{S2}(s) = \frac{1}{(5s + 1) \cdot (s + 1) \cdot (s + 1)} \quad (10.6)$$

Prenos $F_{S2}(s)$ znázorňuje zmenu (zmenšenie, zníženie) globálnej časovej konštanty oproti pôvodnému prenosu $F_{S1}(s)$.

Prenos sústavy:
$$F_{S3}(s) = \frac{1}{(15s + 1) \cdot (s + 1) \cdot (s + 1)} \quad (10.7)$$

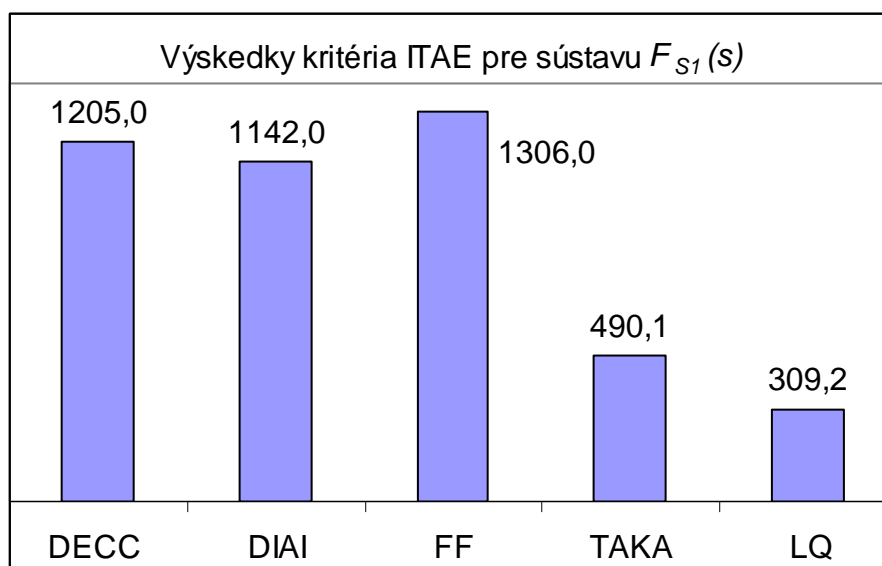
Prenos $F_{S3}(s)$ predstavuje zmenu (zväčšenie, nárast) globálnej časovej konštanty vzhľadom k pôvodnému prenosu $F_{S1}(s)$.



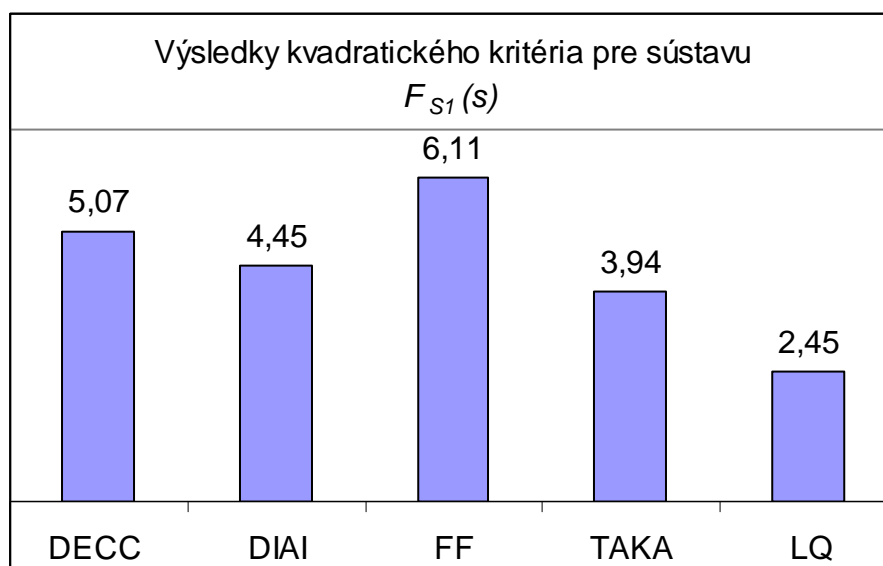
Obrázok 10.3 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.3 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S1}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu u ktorej sa neprejavili žiadne zmeny v parametroch. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Na priebehoch DECC a DIAI je možné pozorovať, že zmena riadiacej veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom menším ako 30 %. Pri pôsobení poruchy $v_1(t)$ riadená veličina $y(t)$ dosahuje prekmit viac ako 40%. Porucha $v_2(t)$ spôsobuje prekmit až viac ako 60%. Na priebehu FF a TAKA môžeme pozorovať, že skoková zmena veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom okolo 5 %. Porucha $v_1(t)$ spôsobuje u TAKA 20% a u FF 40% prekmit od ustáleného stavu veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ vyvoláva u TAKA 40% a u FF 60% prekmit od ustáleného stavu $y(t)$. U LQ je

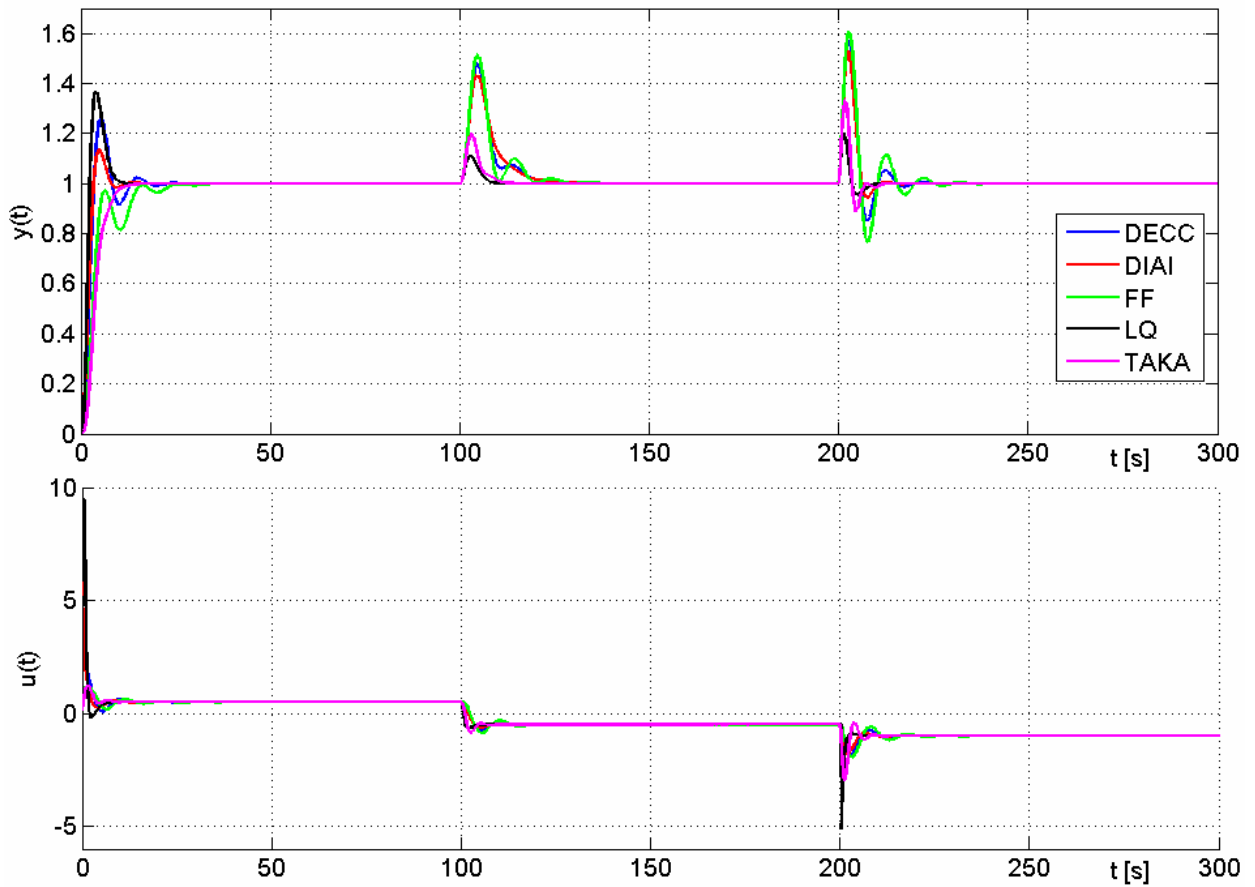
situácia opačná. Zmena veličiny $w(t)$ spôsobuje takmer 50% prekmit, naopak porucha $v_1(t)$ je vyregulovaná s približne 10% prekmitom a $v_2(t)$ s 30%. Na Obrázok 10.4 a Obrázok 10.5 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.4 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



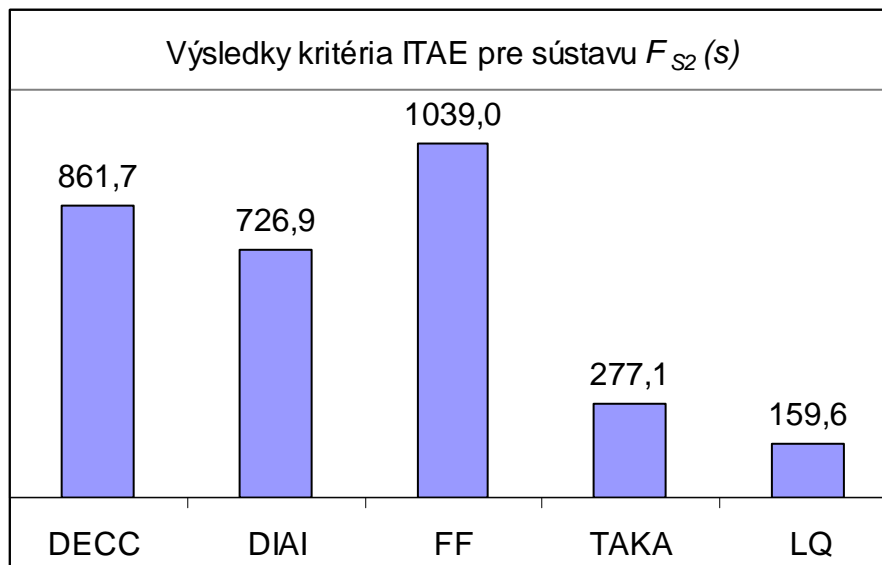
Obrázok 10.5 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



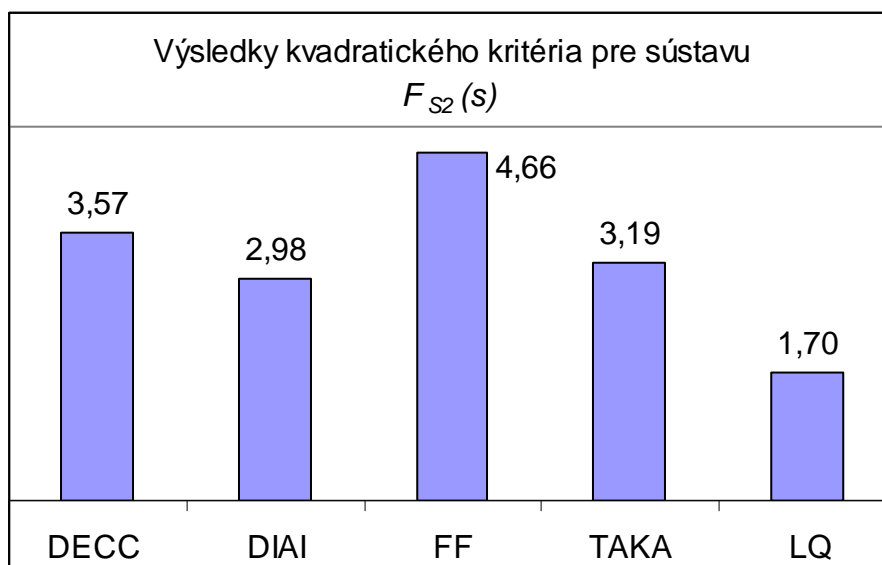
Obrázok 10.6 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.6 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S2}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Na priebehoch DECC a DIAI je možné pozorovať, že zmena riadiacej veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom menším ako 25 %. Pri pôsobení poruchy $v_1(t)$ riadená veličina $y(t)$ dosahuje prekmit blížiaci sa k 50 %. Porucha $v_2(t)$ spôsobuje prekmit až 60 %. Na priebehu TAKA môžeme pozorovať, že skoková zmena veličiny $w(t)$ je regulovaná bez prekmitu. Porucha $v_1(t)$ spôsobuje u TAKA 20% a u FF 50% prekmit od ustáleného stavu veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ vyvoláva u TAKA 30% prekmit. Porucha $v_2(t)$ u FF spôsobuje 60% prekmit a je vyregulovaná

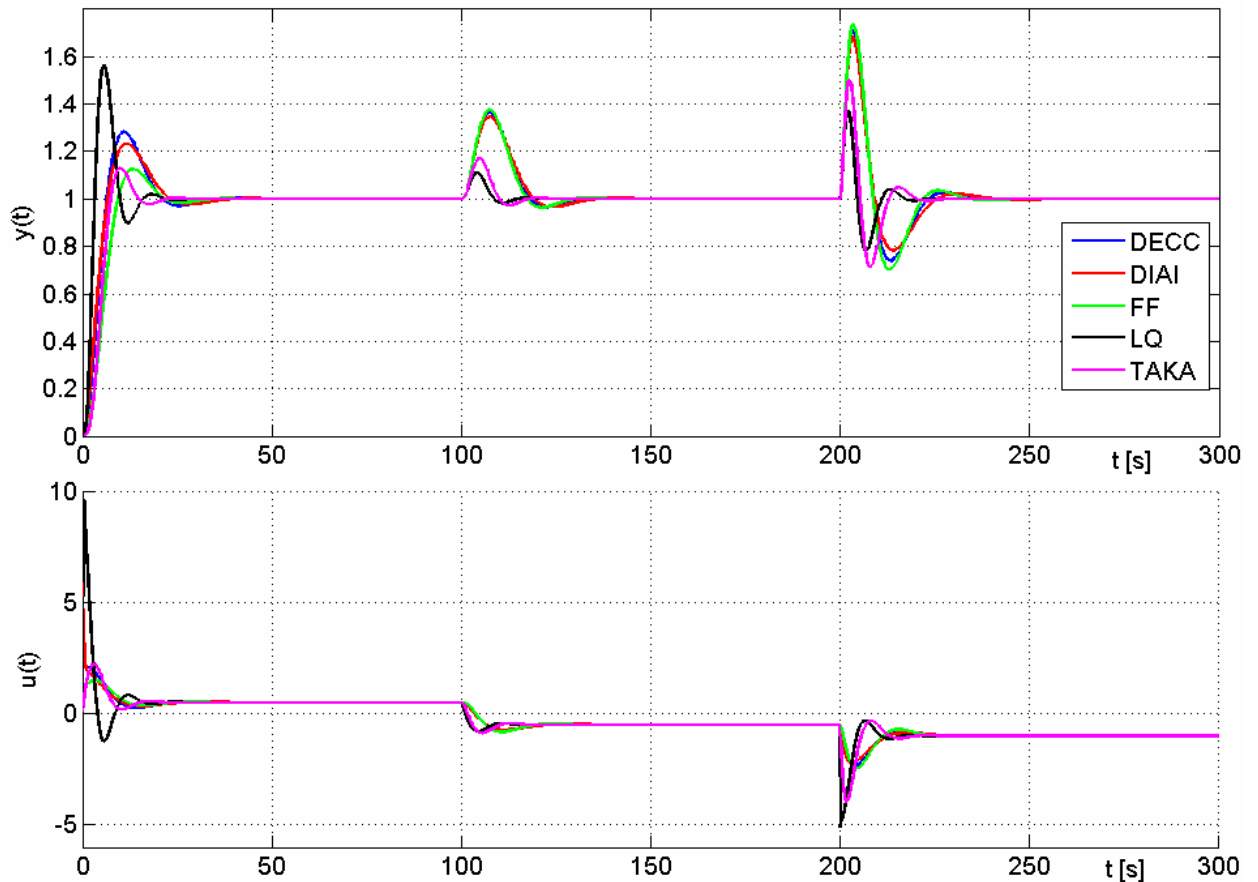
s veľmi kmitavým priebehom. U LQ je situácia opačná. Zmena veličiny $w(t)$ spôsobuje prekmit blížiaci sa k 40 %, naopak porucha $v_1(t)$ je vyregulovaná s približne 10% prekmitom a $v_2(t)$ s 20%. Na *Obrázok 10.7* a *Obrázok 10.8* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.7 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



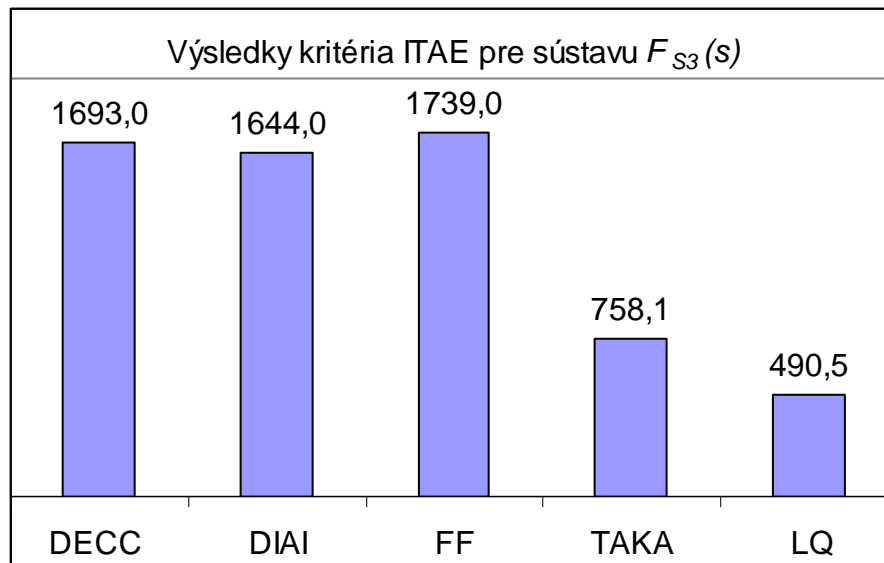
Obrázok 10.8 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



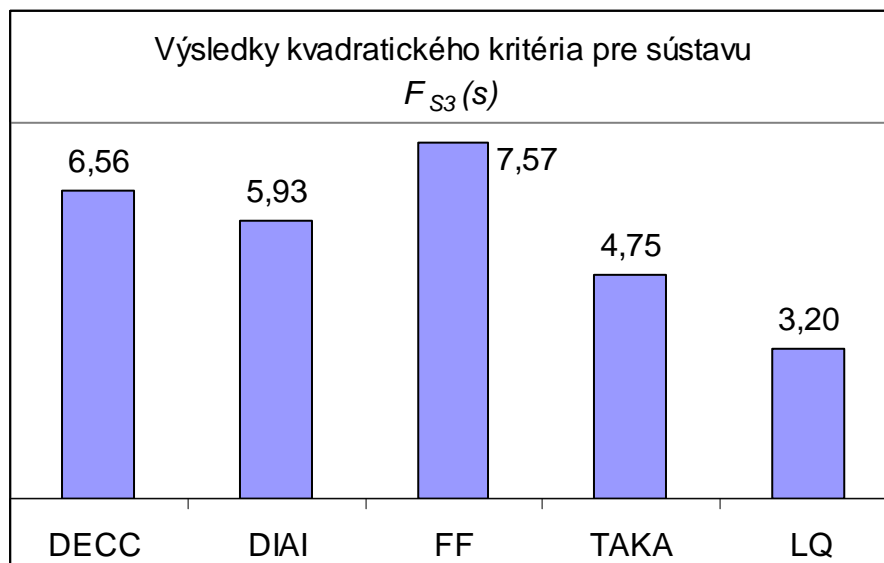
Obrázok 10.9 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.9 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S3}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Na priebehoch DECC a DIAI je možné pozorovať, že zmena riadiacej veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom menším ako 30 %. Pri pôsobení poruchy $v_1(t)$ riadená veličina $y(t)$ dosahuje prekmit blížiaci sa k 40 %. Porucha $v_2(t)$ spôsobuje prekmit blížiaci sa 70 %. Na priebehu TAKA a FF môžeme pozorovať, že skoková zmena veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom 12 %. Porucha $v_1(t)$ spôsobuje u TAKA menej ako 20% a u FF menej ako 40% prekmit od ustáleného stavu veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ vyvoláva u TAKA 50% prekmit. Porucha $v_2(t)$ u FF

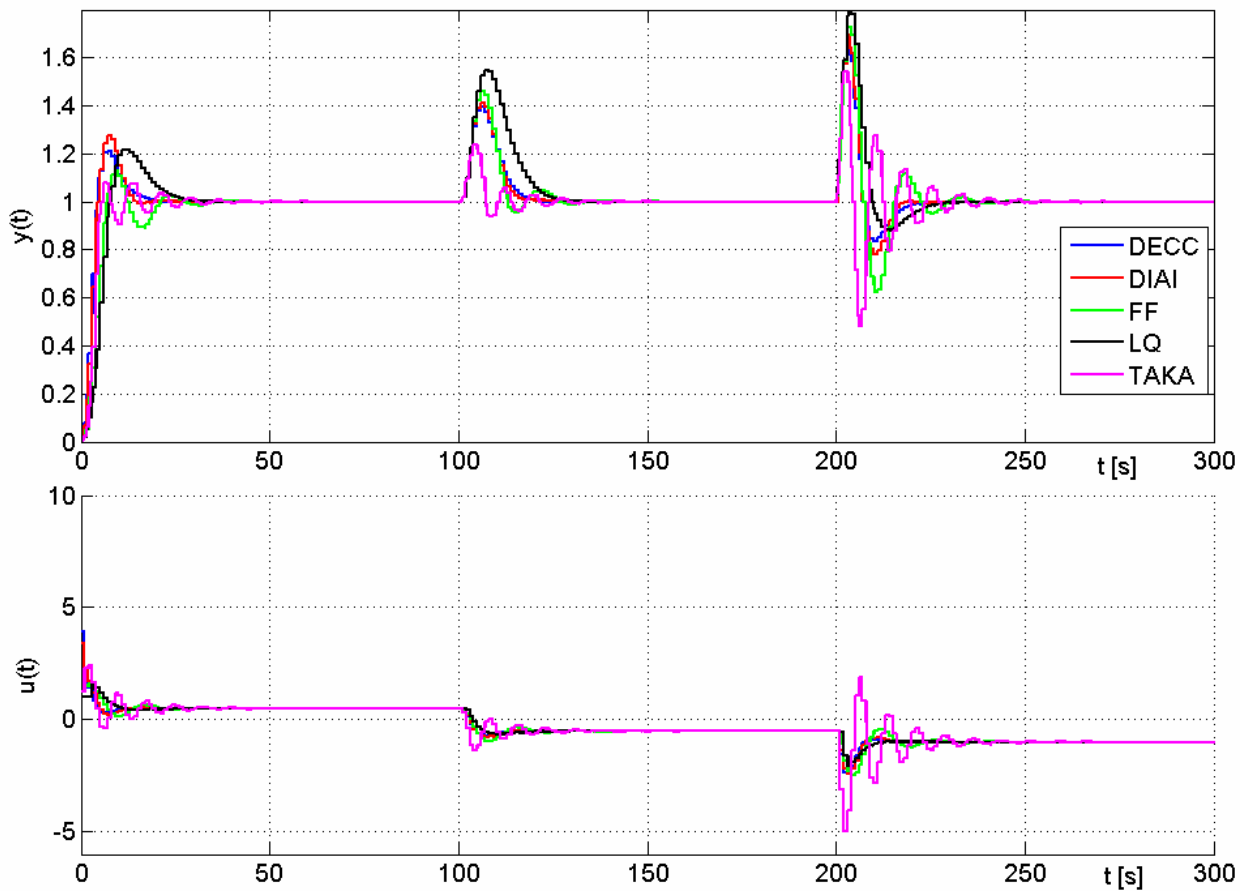
spôsobuje 70% prekmit. U LQ je situácia opačná. Zmena veličiny $w(t)$ spôsobuje prekmit blížiaci sa k 60 %, naopak porucha $v_1(t)$ je vyregulovaná s približne 10% a $v_2(t)$ so skoro 40% prekmitom. Na *Obrázok 10.10* a *Obrázok 10.11* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.10 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



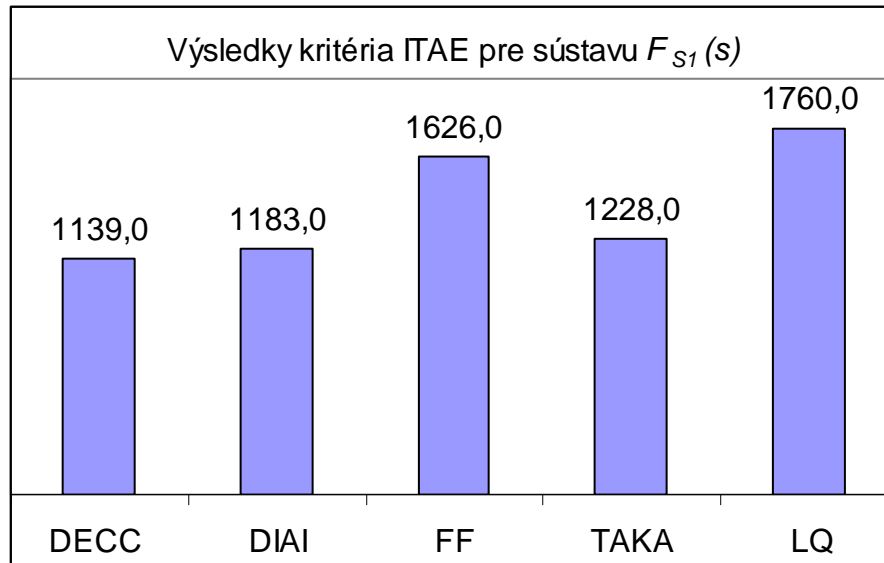
Obrázok 10.11 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



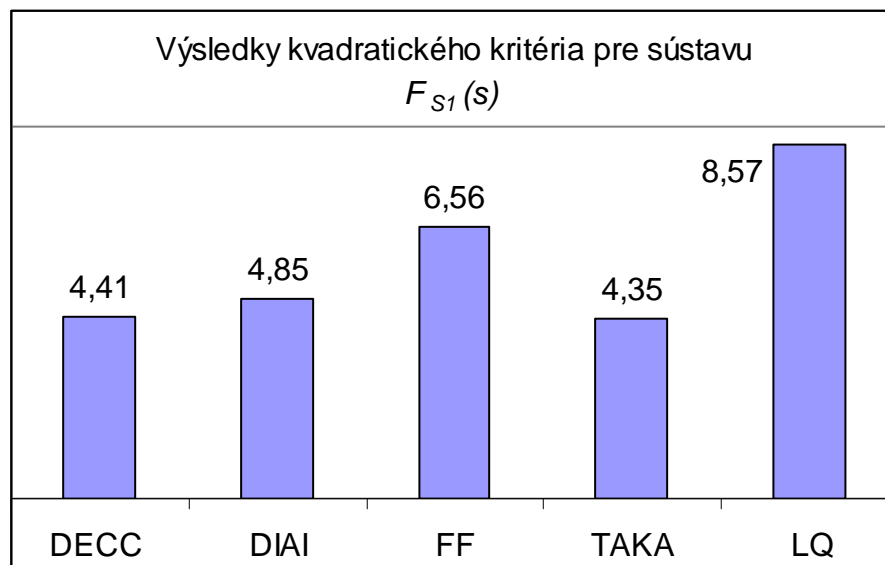
Obrázok 10.12 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s

Na Obrázok 10.12 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S1}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa neprejavili žiadne zmeny. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Na priebehoch DECC a DIAI je možné pozorovať, že zmena riadiacej veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom menším ako 30 %. Pri pôsobení poruchy $v_1(t)$ riadená veličina $y(t)$ dosahuje prekmit blížiaci sa k 40 %. Porucha $v_2(t)$ spôsobuje prekmit presahujúci 60 %. Na priebehu TAKA a FF môžeme pozorovať, že skoková zmena veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom približne 10 %. Porucha $v_1(t)$ spôsobuje u TAKA viac ako 20% a u FF viac ako 40% prekmit od ustáleného stavu veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ vyvoláva u TAKA 50% prekmit a je vyregulovaná s veľmi kmitavým priebehom. Porucha $v_2(t)$ u FF spôsobuje takmer 70% prekmit a jej

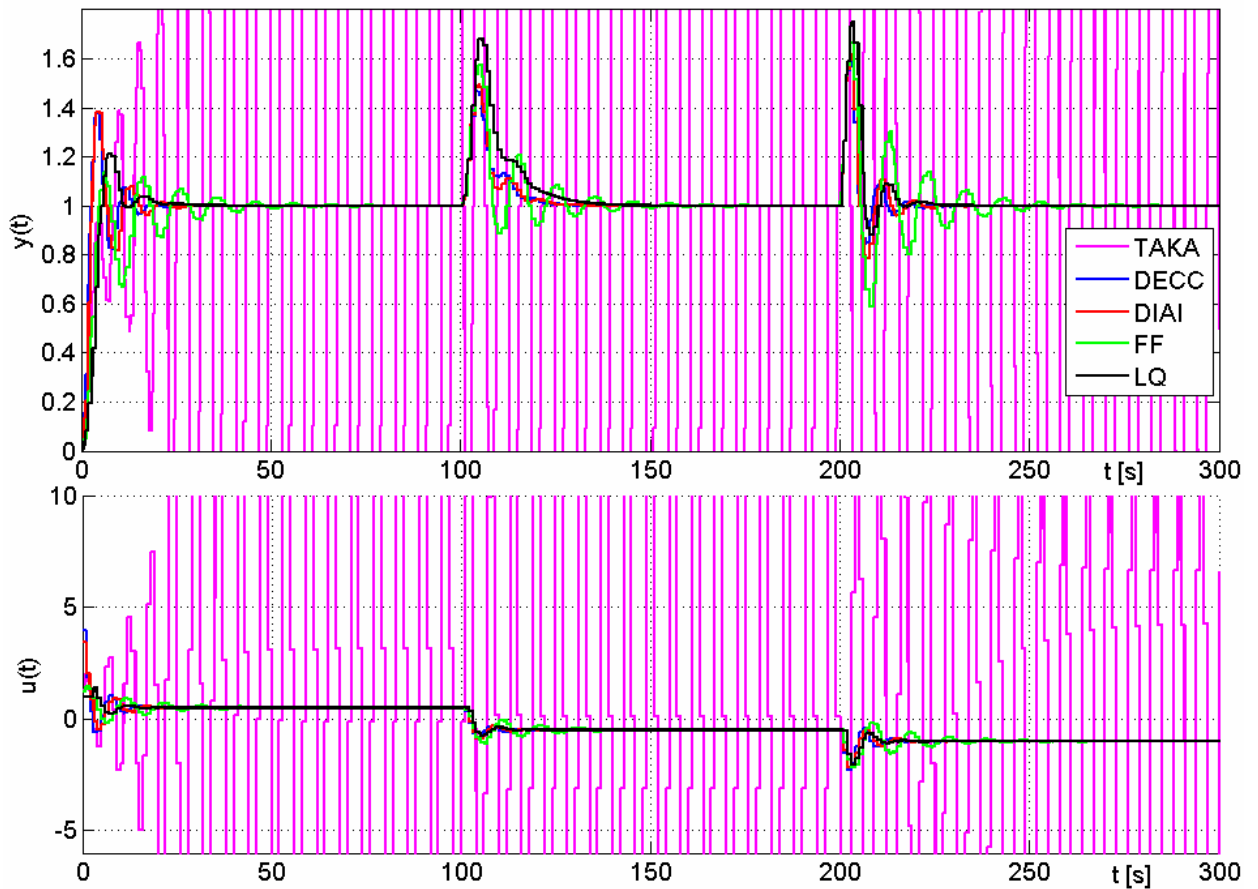
vyregulovanie má tiež veľmi kmitavý priebeh. U LQ zmena veličiny $w(t)$ spôsobuje prekmit približne 20 %, porucha $v_1(t)$ je vyregulovaná s 50% a $v_2(t)$ so 70% prekmitom. Na Obrázok 10.13 a Obrázok 10.14 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.13 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s



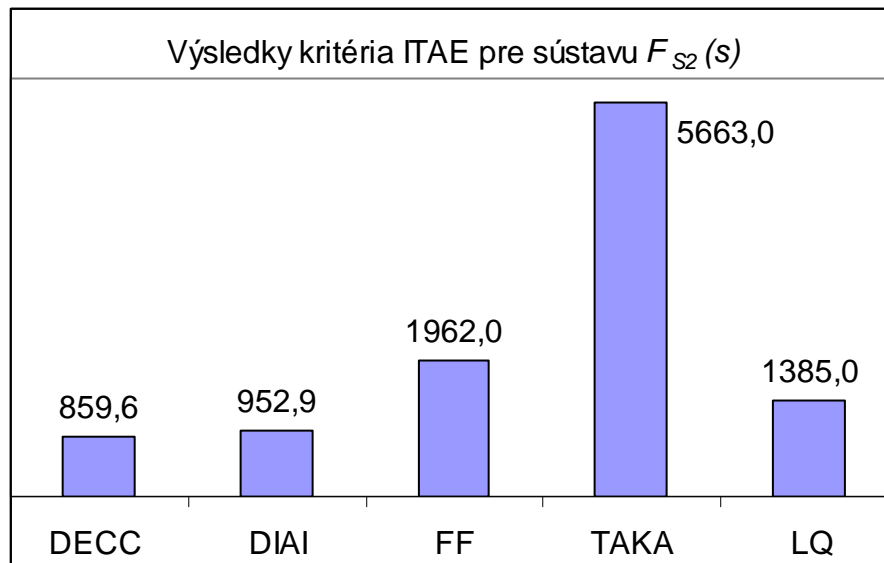
Obrázok 10.14 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s



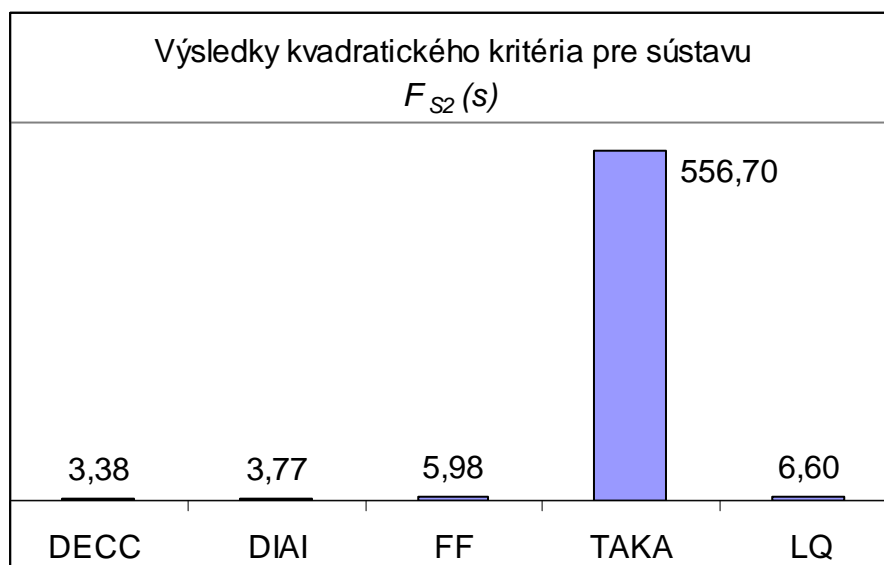
Obrázok 10.15 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 1s

Na Obrázok 10.15 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S2}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Na priebehoch DECC a DIAI je možné pozorovať, že zmena riadiacej veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom menším ako 40 %. Pri pôsobení poruchy $v_1(t)$ riadená veličina $y(t)$ dosahuje prekmit blížiaci sa k 50 %. Porucha $v_2(t)$ spôsobuje prekmit menej ako 60 %. Na priebehu TAKA vidíme, že pre tento prípad Takahashiho regulátor zlyhal. Priebehu riadenej veličiny $y(t)$ pre FF má vo všetkých okamžikoch kedy pôsobia zmeny s regulačnom obvode veľmi kmitavý priebeh. Skoková zmena $w(t)$ je regulovaná s prekmitom približne 10 %. Porucha $v_1(t)$ menej

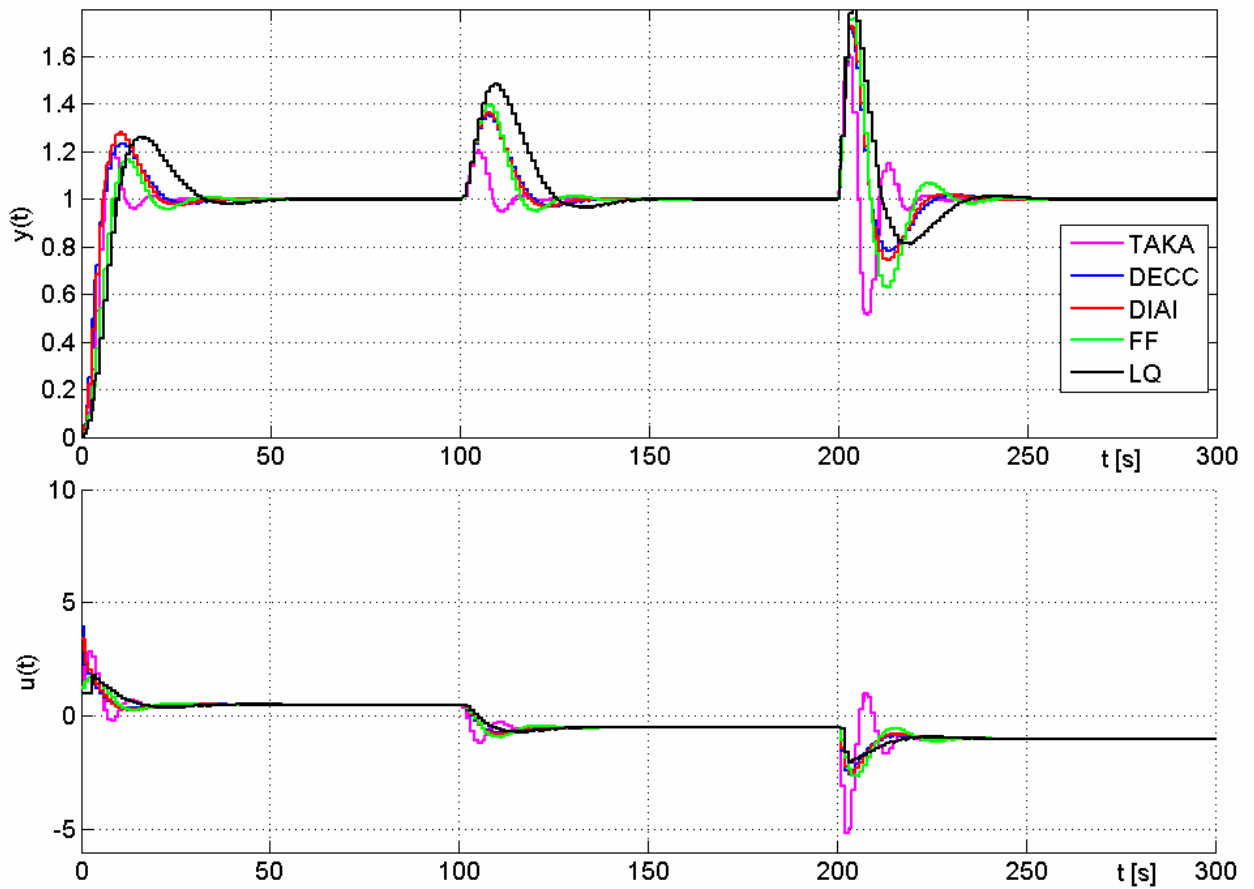
ako 60% a $v_2(t)$ spôsobuje 65% prekmit. U LQ zmena veličiny $w(t)$ spôsobuje prekmit približne 20 %, porucha $v_1(t)$ je vyregulovaná s viac 65% a $v_2(t)$ so 70% prekmitom. Na *Obrázok 10.16* a *Obrázok 10.17* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.16 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s



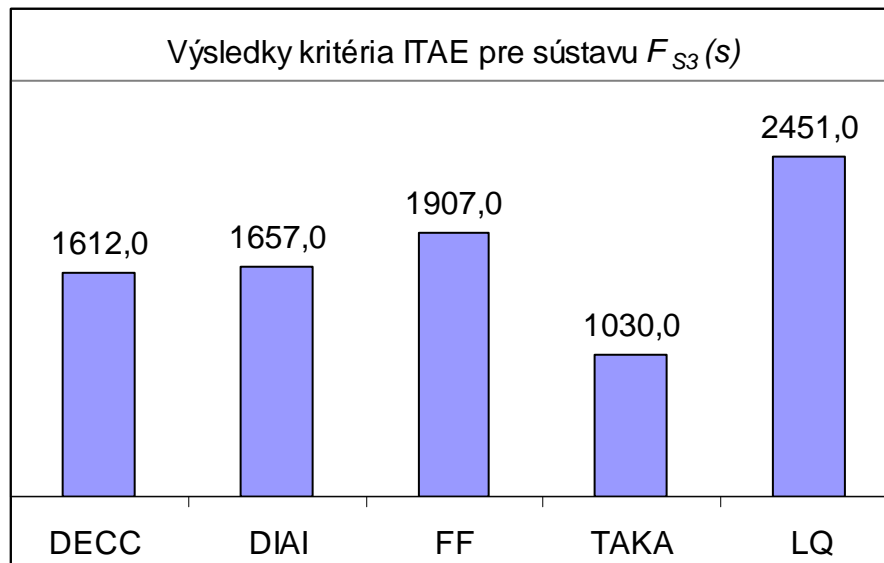
Obrázok 10.17 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s



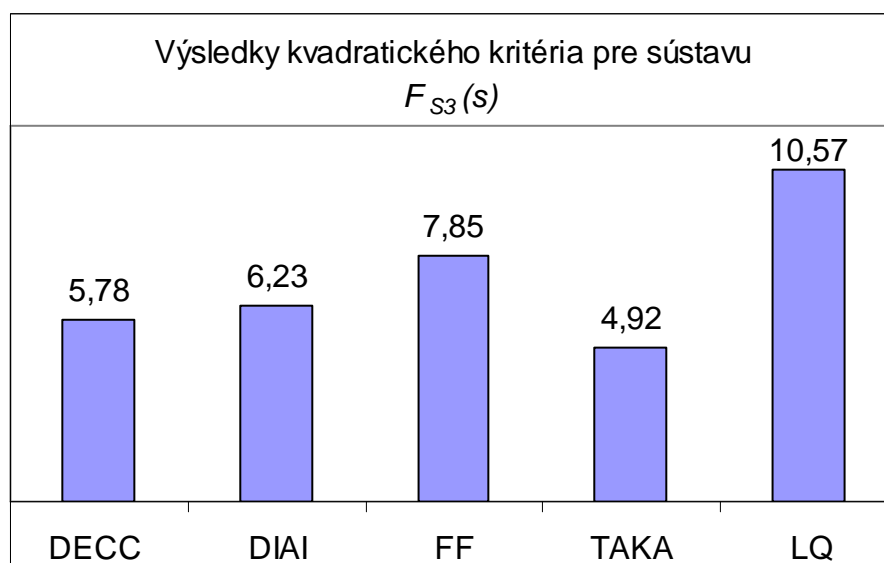
Obrázok 10.18 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 1s

Na Obrázok 10.18 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S3}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Na priebehoch DECC a DIAI je možné pozorovať, že zmena riadiacej veličiny $w(t)$ je regulovaná s prekmitom menším ako 30 %. Pri pôsobení poruchy $v_1(t)$ riadená veličina $y(t)$ dosahuje prekmit blížiaci sa k 40 %. Porucha $v_2(t)$ spôsobuje prekmit viac ako 70 %. Na priebehu TAKA a FF vidíme, že zmena $w(t)$ je vyregulovaná s prekmitom menej ako 20 %. Porucha $v_1(t)$ u TAKA spôsobila 20% a u FF 40% prekmit riadenej veličiny. Porucha $v_2(t)$ vyvolala veľkú odozvu u TAKA

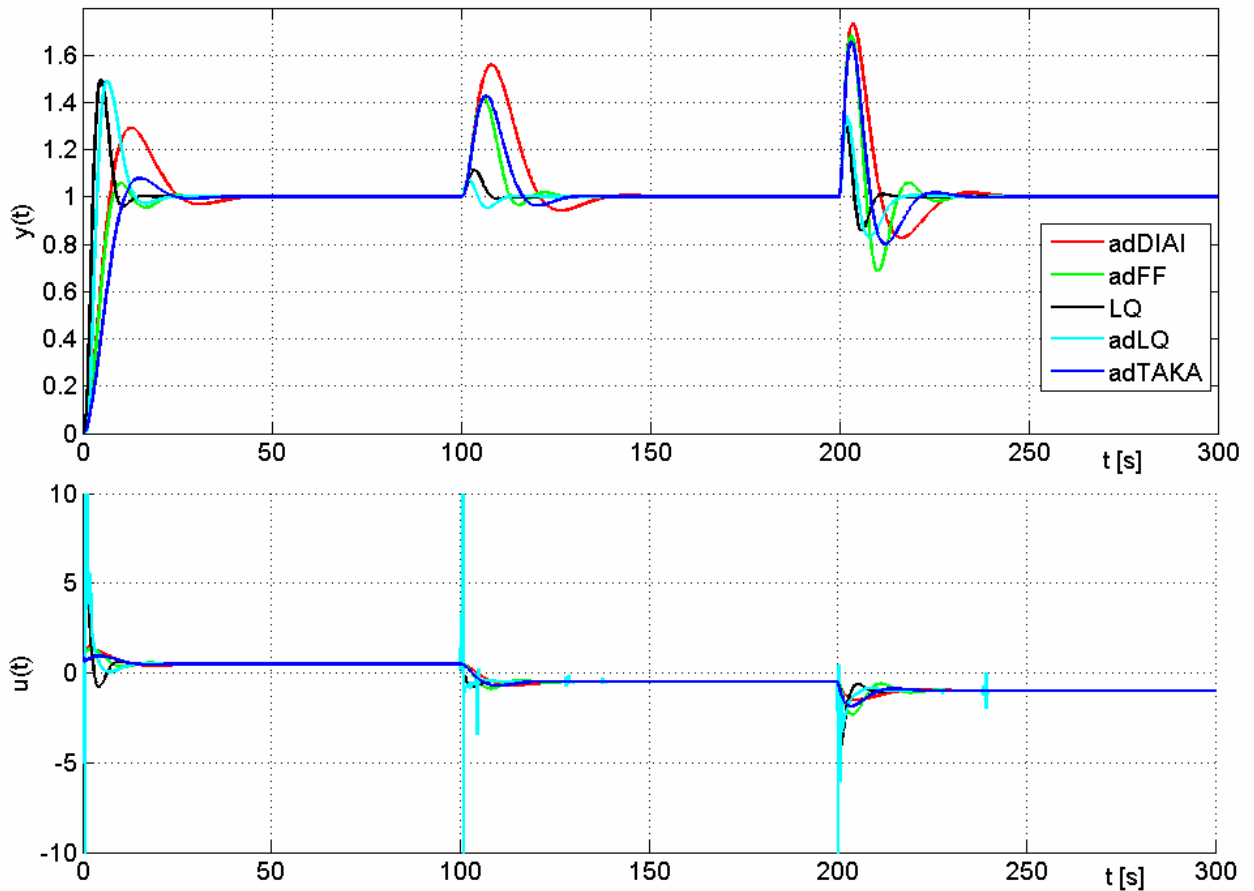
s prekritom 60 % a u FF s prekritom viac ako 70 %. U LQ zmena veličiny $w(t)$ spôsobuje prekrit menej ako 30 %, porucha $v_1(t)$ je vyregulovaná s 50% a $v_2(t)$ s takmer 80% prekritom. Na *Obrázok 10.19* a *Obrázok 10.20* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.19 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s



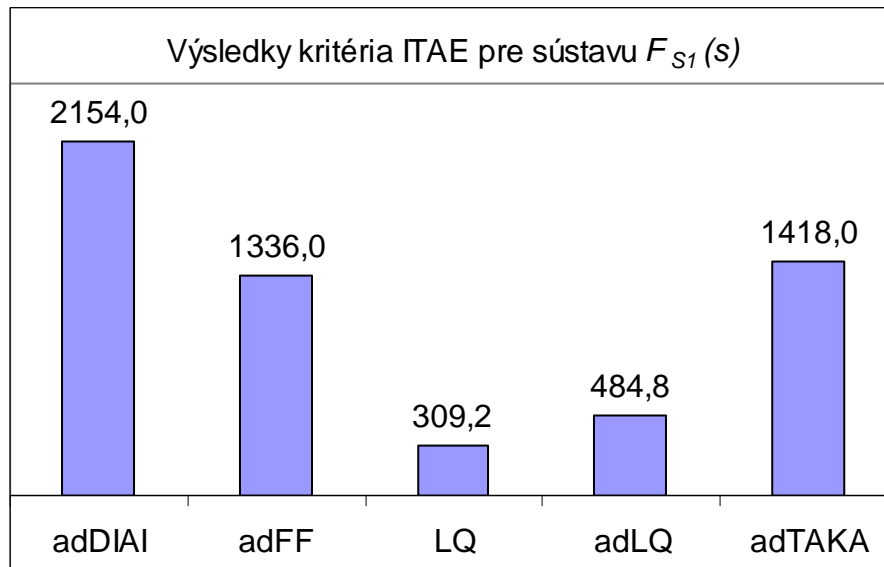
Obrázok 10.20 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 1 s



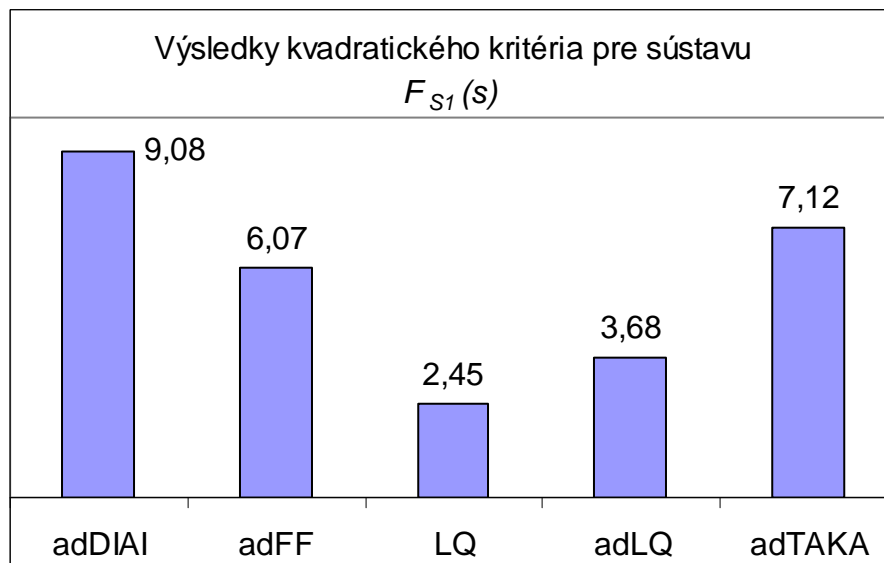
Obrázok 10.21 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.21 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S1}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa neprejavili zmeny. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Z priebehu adDIAI pozorujeme, že zmena $w(t)$ spôsobila prekmit riadenej veličiny o 30 %. Porucha $v_1(t)$ spôsobila takmer 60% prekmit a porucha $v_2(t)$ 70% prekmit. Pri adTAKA a adFF je zmena $w(t)$ vyregulovaná s približne 10% prekmitom. Porucha $v_1(t)$ vyvolala prekmit 40 % a $v_2(t)$ vyvolala prekmit takmer 70 %, ktorý bol u adFF vyregulovaný s kmitavejším priebehom ako u adTAKA. Na priebehoch LQ a adLQ môžeme pozorovať, že zmena riadiacej veličiny spôsobila prekmit blížiaci sa k 50 %.

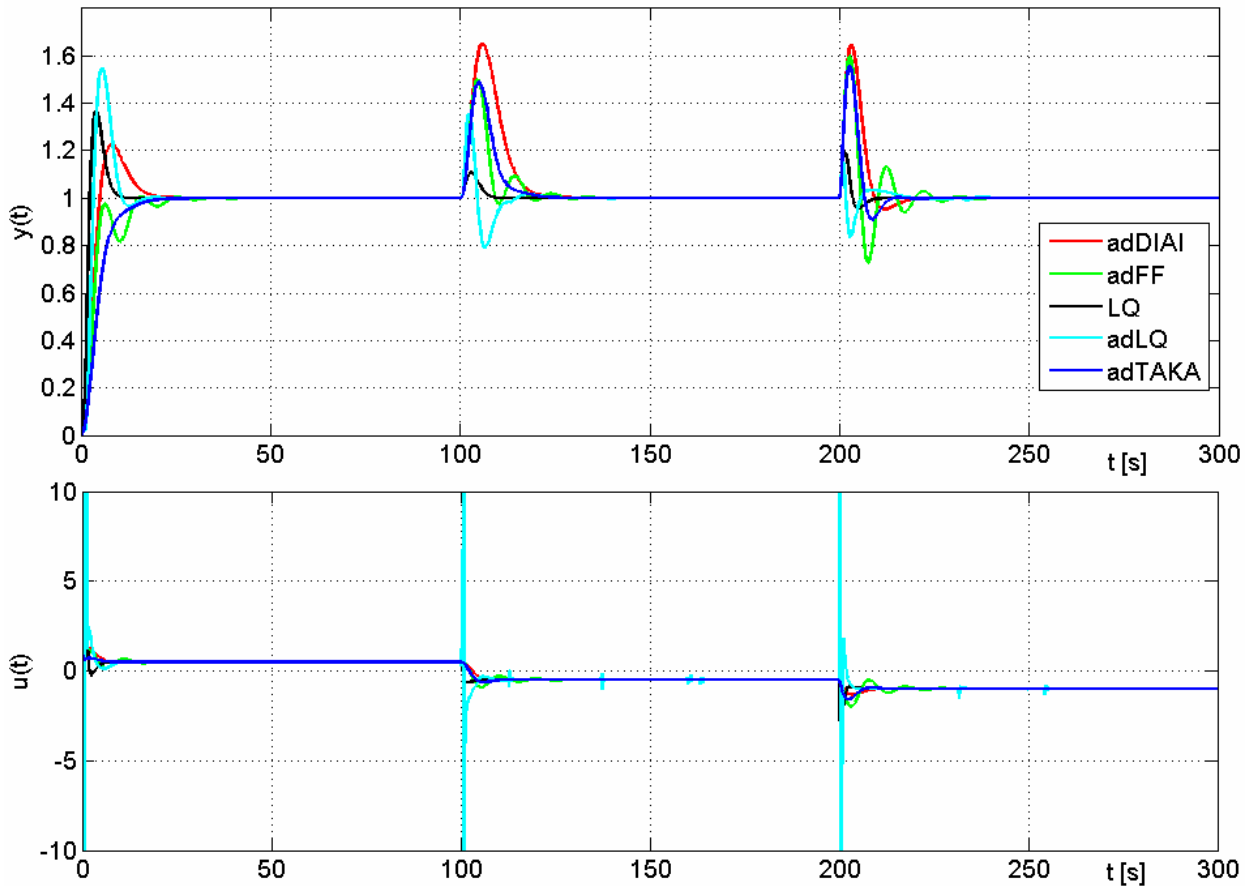
Na druhú stranu sú obidve poruchy vyregulované oproti predchádzajúcim priebehom s podstatne menším prekmitom a taktiež s kratšou dobou regulácie. Na *Obrázok 10.22* a *Obrázok 10.23* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.22 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



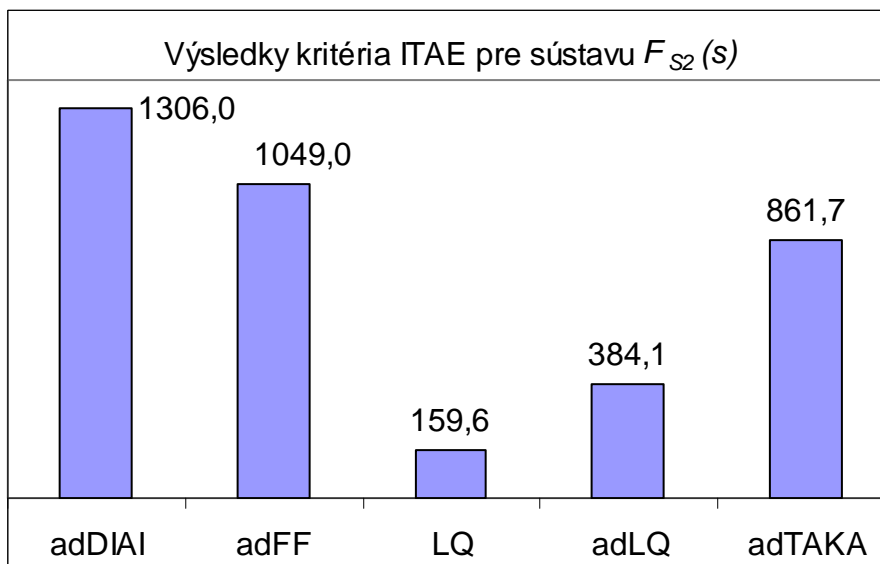
Obrázok 10.23 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



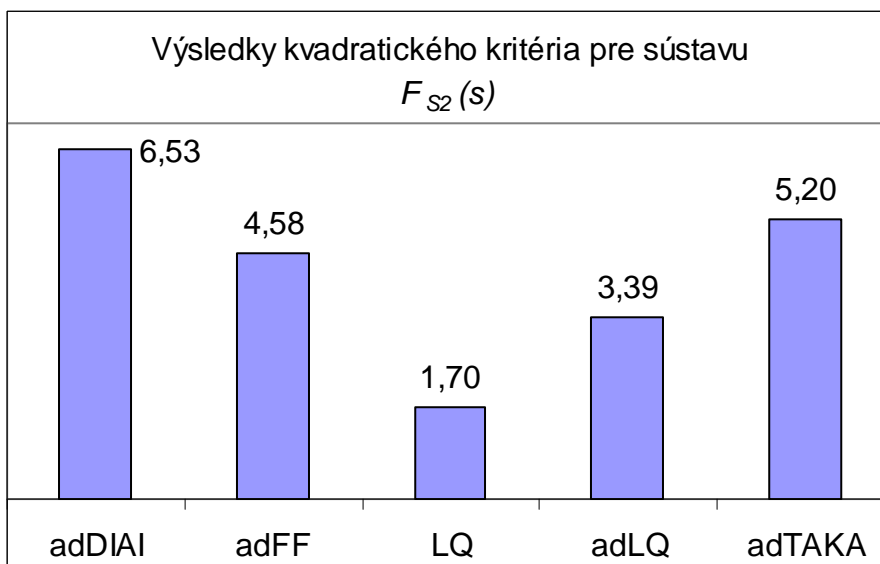
Obrázok 10.24 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.24 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S2}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Z priebehu adDIAI pozorujeme, že zmena $w(t)$ spôsobila prekmit riadenej veličiny o 20 %. Porucha $v_1(t)$ aj $v_2(t)$ spôsobili viac ako 60% prekmit. Pre adTAKA je zmena $w(t)$ vyregulovaná bez prekmitu. Porucha $v_1(t)$ aj $v_2(t)$ vyvolali u adTAKA aj adFF prekmit nad 60 %, ktorý bol u oboch prípadoch pre adFF vyregulovaný s kmitavejším priebehom ako u adTAKA. Na priebehu LQ vidíme, že zmena $w(t)$ spôsobila 35%, $v_1(t)$ 10% a $v_2(t)$ 20% prekmit. Poruchy boli v porovnaní s ostatnými priebehmi vyregulované veľmi rýchlo. Zmena $w(t)$ pre adLQ vyvolala viac ako 50% prekmit. Porucha $v_1(t)$ je vyregulovaná s prekmitom 35% a porucha

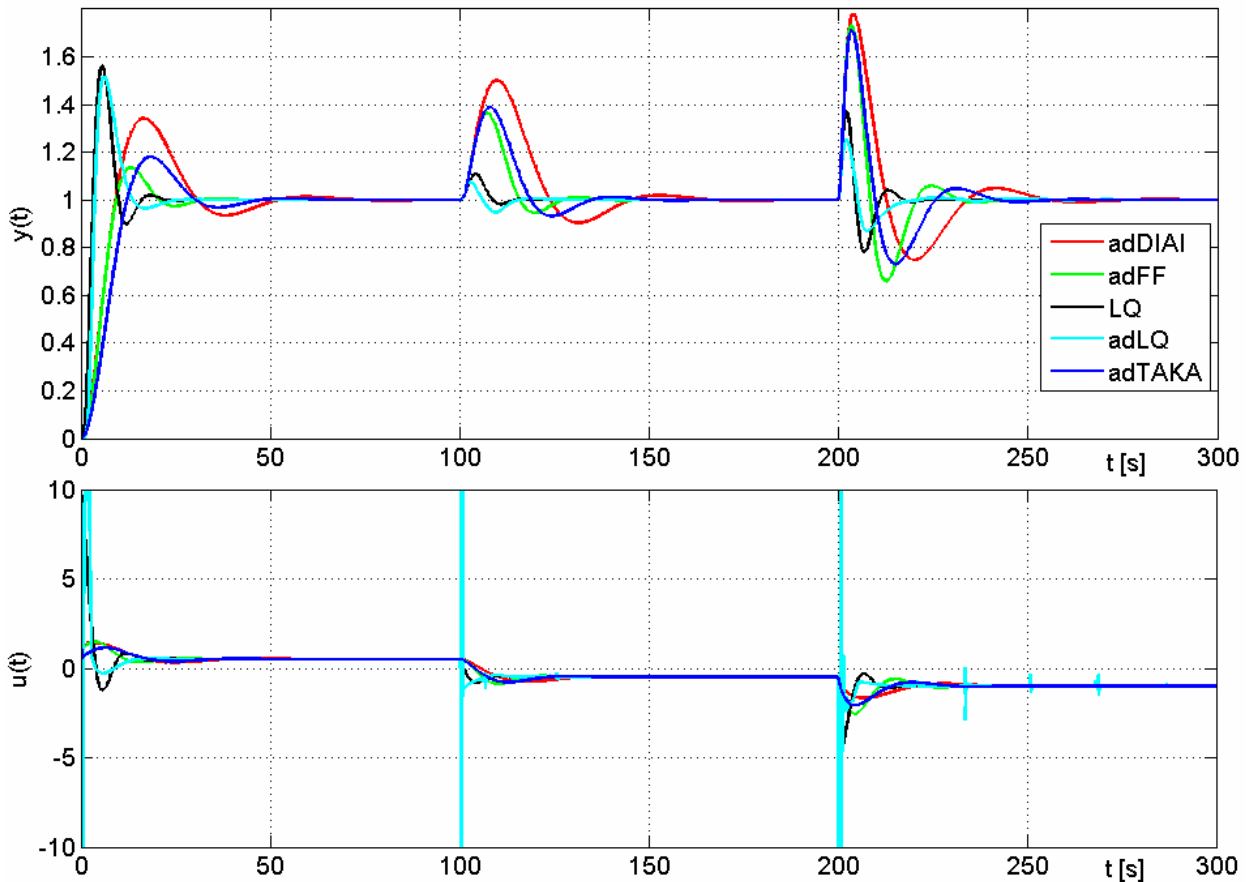
$v_2(t)$, rovnako ako pri LQ, ma prekmit 20 %. Na *Obrázok 10.25* a *Obrázok 10.26* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.25 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



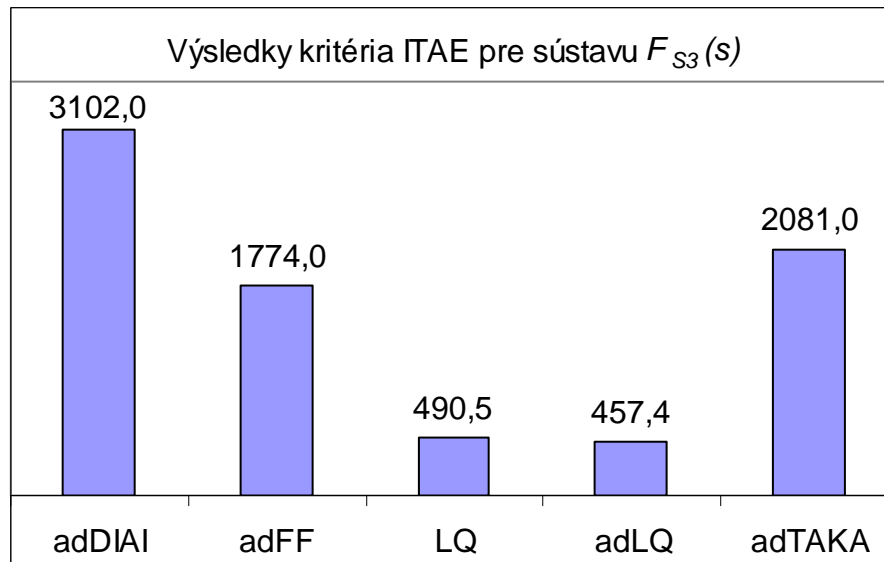
Obrázok 10.26 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



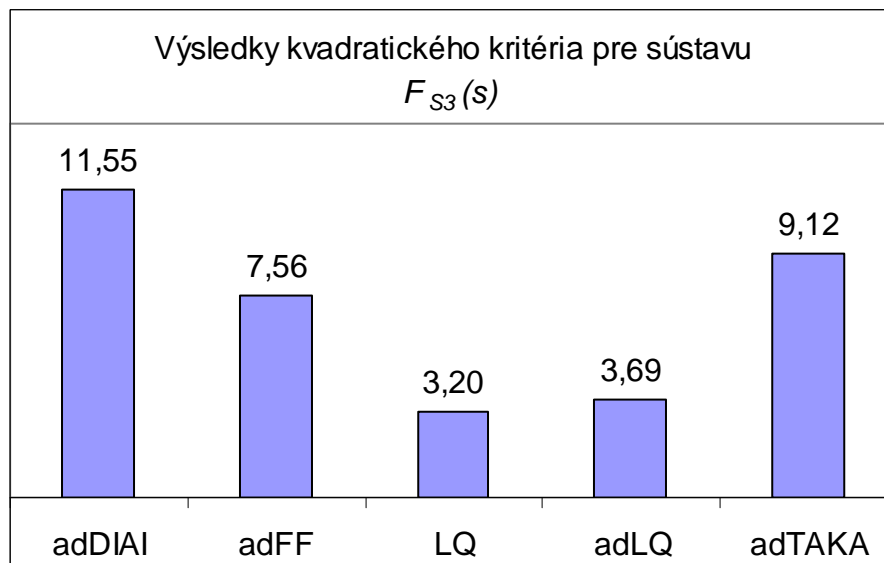
Obrázok 10.27 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.27 je zobrazený priebeh regulačného dejú pre prenosovú funkciu $F_{S3}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Z priebehu adDIAI pozorujeme, že zmena $w(t)$ spôsobila prekmit riadenej veličiny o viac ako 30 %. Porucha $v_1(t)$ spôsobila 50% a $v_2(t)$ takmer 80% prekmit. Tieto vplyvy boli v porovnaní s ostatnými priebehmi najdlhšie regulované. Pre adTAKA a adFF je zmena $w(t)$ vyregulovaná s menej ako 15% prekmitom. Porucha $v_1(t)$ vyvolala u adTAKA aj adFF približne 40% prekmit regulovanej veličiny. Porucha $v_2(t)$ spôsobila u adTAKA aj adFF prekmit nad 70 %. Na priebehu LQ aj adLQ vidíme, že zmena $w(t)$ spôsobila viac ako 50% prekmit. Porucha $v_1(t)$ bola pre obidva prípady vyregulovaná s 10% prekmitom. Pôsobenie $v_2(t)$ vyvolalo

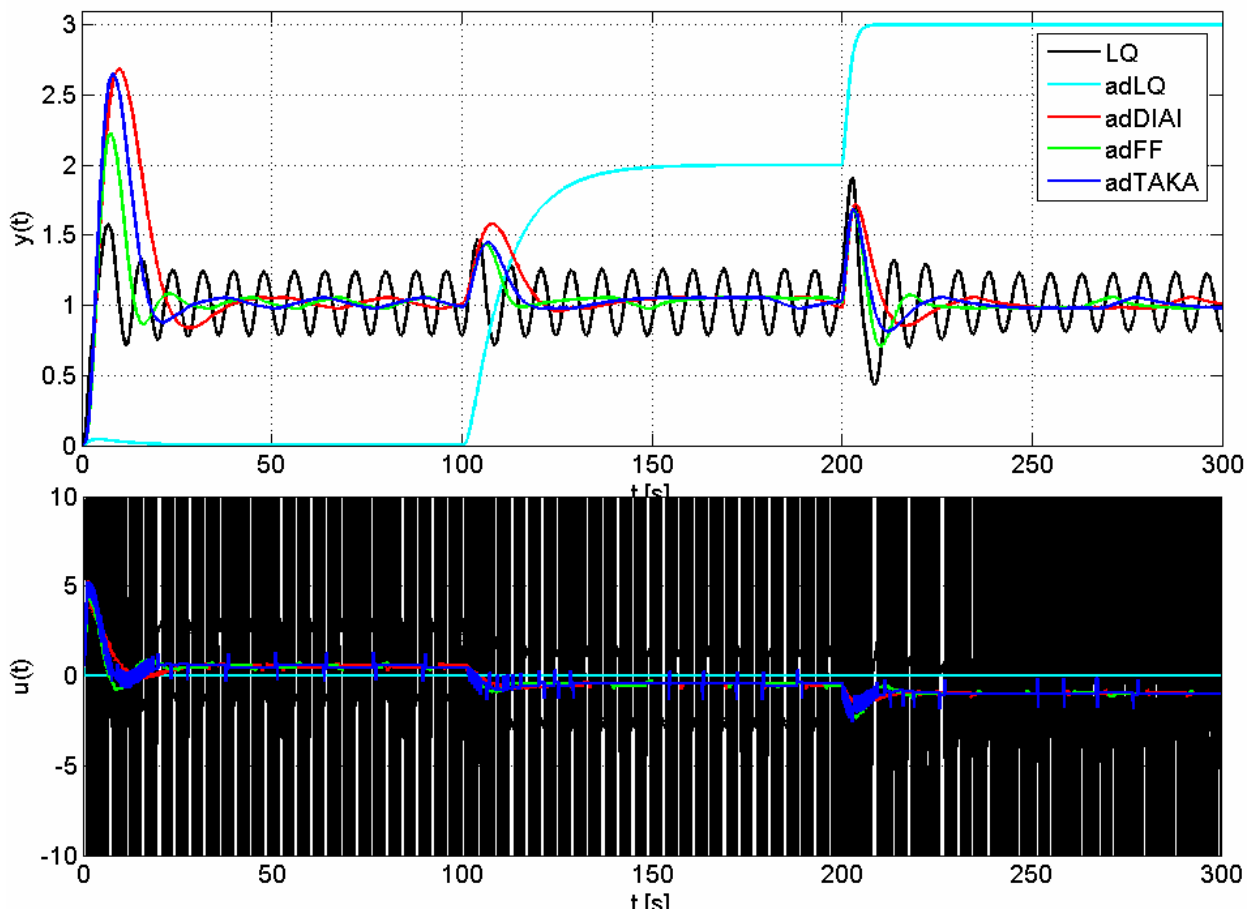
adLQ 25% a u LQ takmer 40% prekmit. Poruchy boli v porovnaní s ostatnými priebehmi vyregulované veľmi rýchlo. Na *Obrázok 10.28* a *Obrázok 10.29* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.28 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



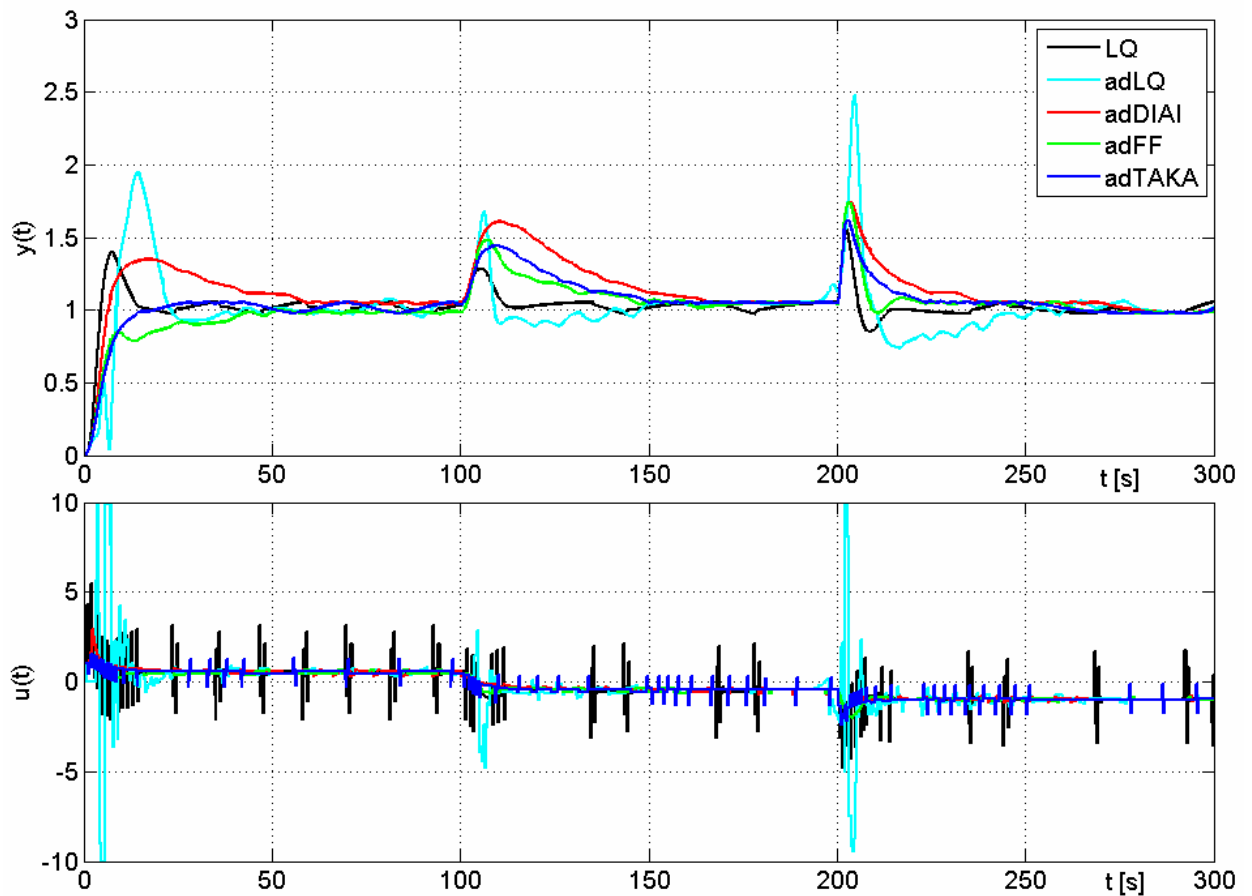
Obrázok 10.29 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s



Obrázok 10.30 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{SI}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.30 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{SI}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa neprejavili žiadne zmeny. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Z predchádzajúcich obrázkov môžeme obecné posúdiť, že zaradenie A/D a D/A prevodníku radikálne zhoršilo priebeh regulačného dejú pre všetky vybrané typy regulátorov. V tomto prípade najhoršie výsledky poskytuje adLQ a LQ.

Na Obrázok 10.31 sú zobrazené priebehy regulačného dejú pre zväčšenú periódou vzorkovania ako bolo v predchádzajúcom prípade, teda z 0,1 s na 0,33 s. Tu môžeme pozorovať, že priebehy adLQ a LQ sa radikálne zlepšili.

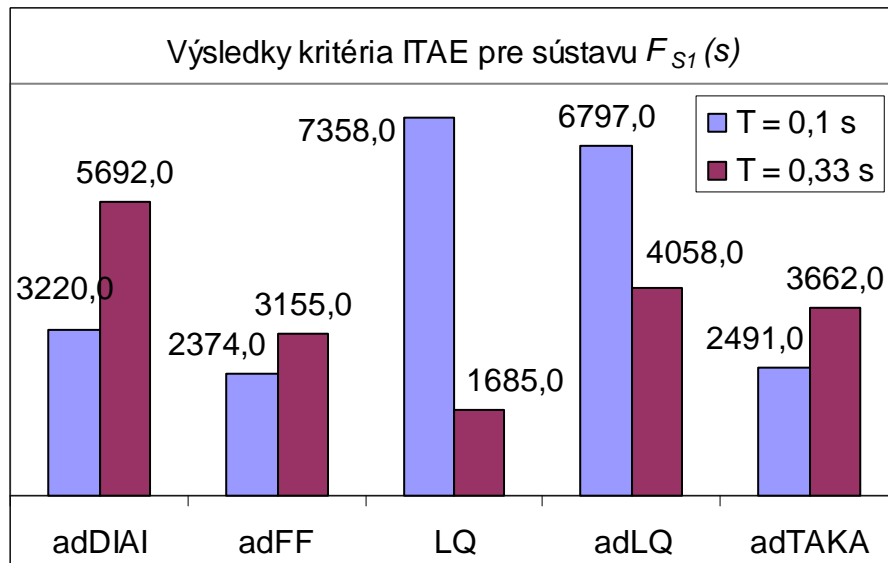


Obrázok 10.31 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{SI}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s

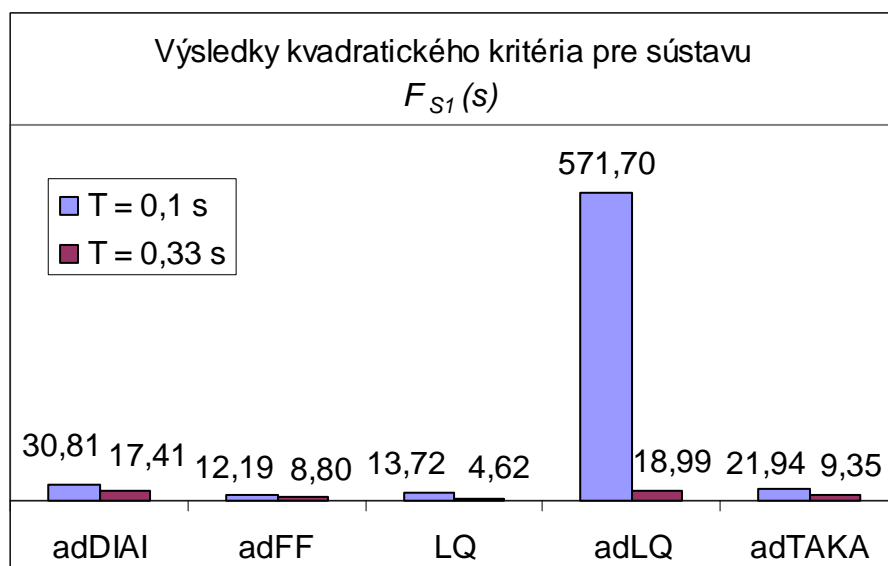
Na Obrázok 10.32 a Obrázok 10.33 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií na ktorých môžeme pozorovať vplyv zmeny vzorkovacej periódy.

Kritérium ITAE jednoznačne hovorí o tom, že v tomto prípade pre LQ a adLQ bolo zväčšenie vzorkovacej periódy prínosné. Pre ostatné malo toto opačný výsledok a môžeme vidieť zhoršenie po zväčšení periódy vzorkovania.

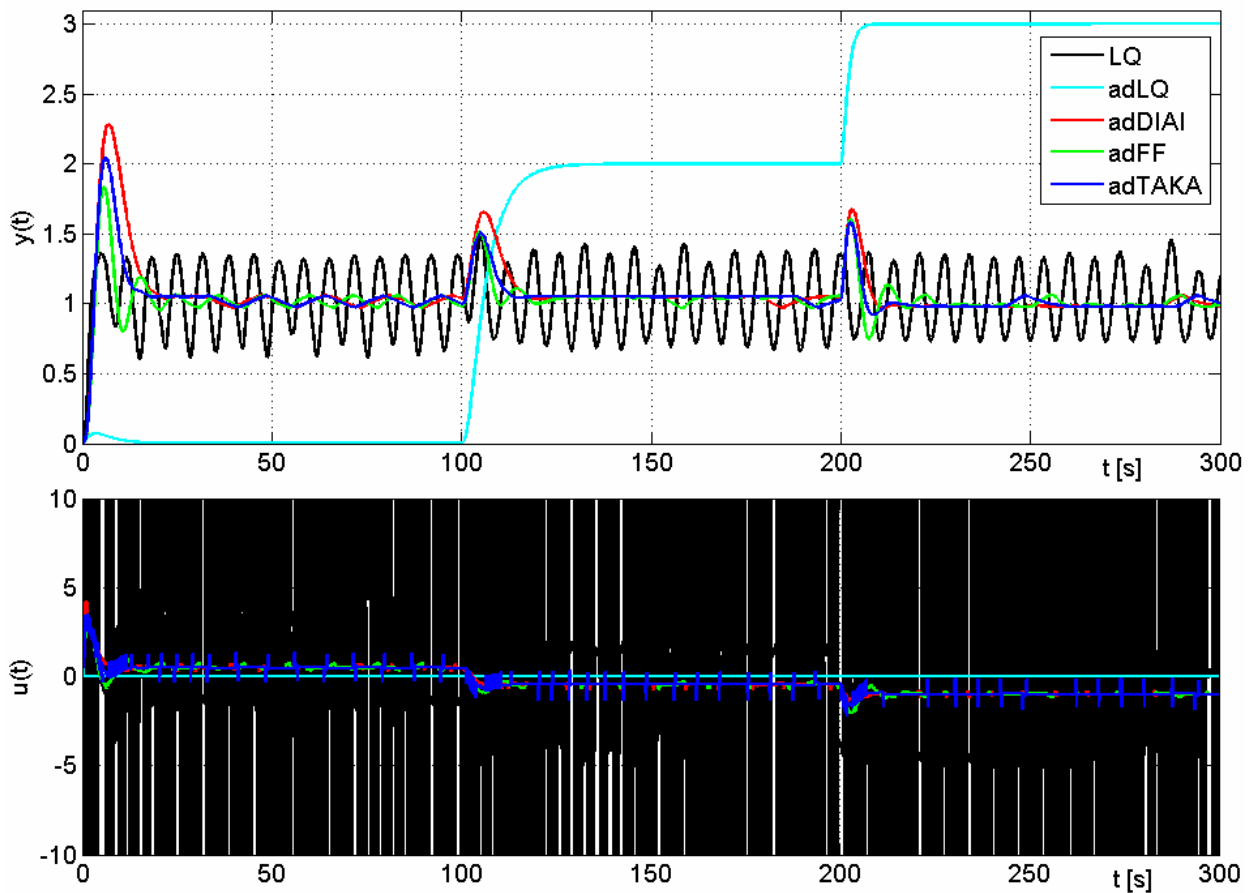
Kvadratické kritérium sa vyjadriilo, že zväčšenie periódy vzorkovania bolo prospešné pre všetky prípady.



Obrázok 10.32 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom



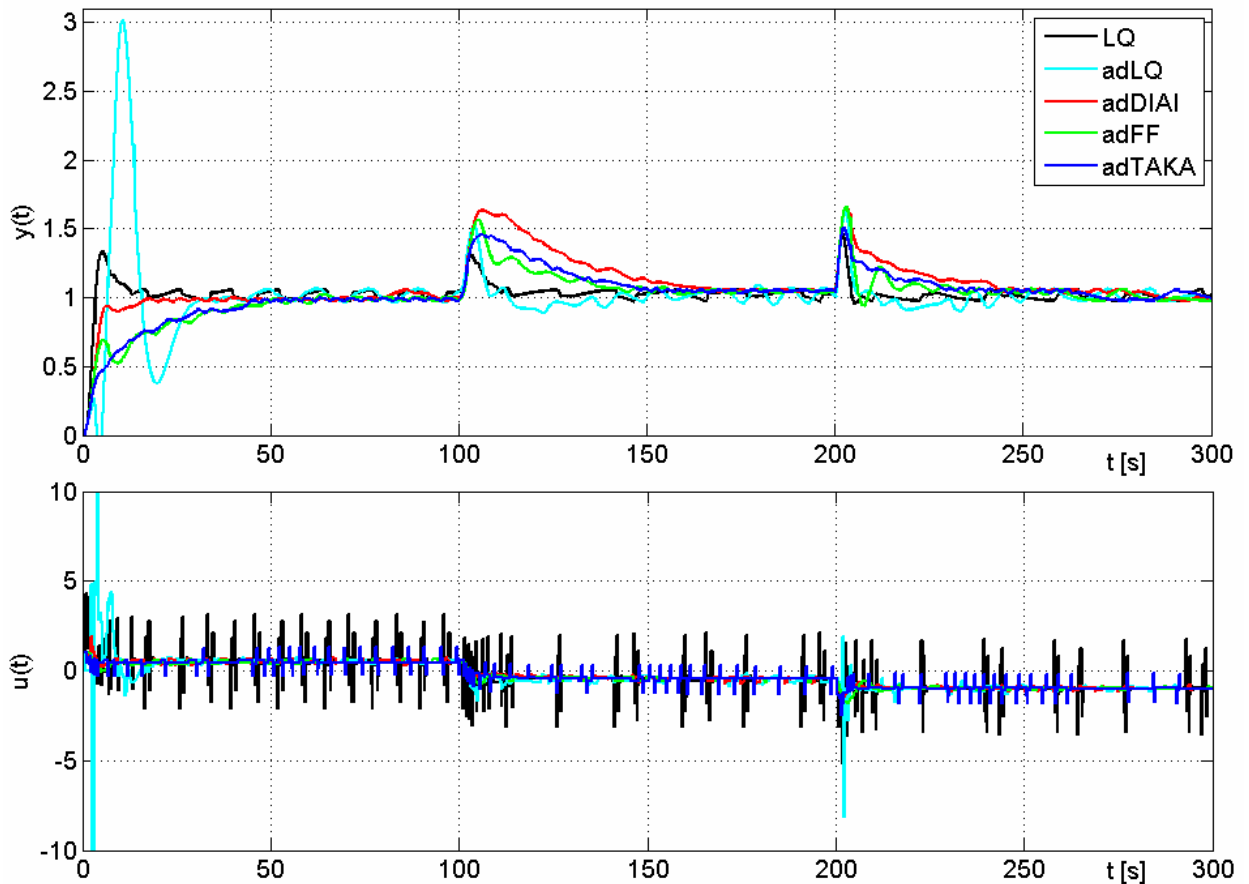
Obrázok 10.33 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom



Obrázok 10.34 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.34 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{S2}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Z predchádzajúcich obrázkov môžeme obecné posúdiť, že zaradenie A/D a D/A prevodníku radikálne zhoršilo priebeh regulačného deju pre všetky vybrané typy regulátorov. V tomto prípade najhoršie výsledky poskytuje adLQ a LQ.

Na Obrázok 10.35 sú zobrazené priebehy regulačného deju pre zväčšenú periódou vzorkovania, ako bolo v predchádzajúcom prípade, teda z 0,1 s na 0,33 s. Tu môžeme pozorovať, že priebehy adLQ a LQ sa radikálne zlepšili.

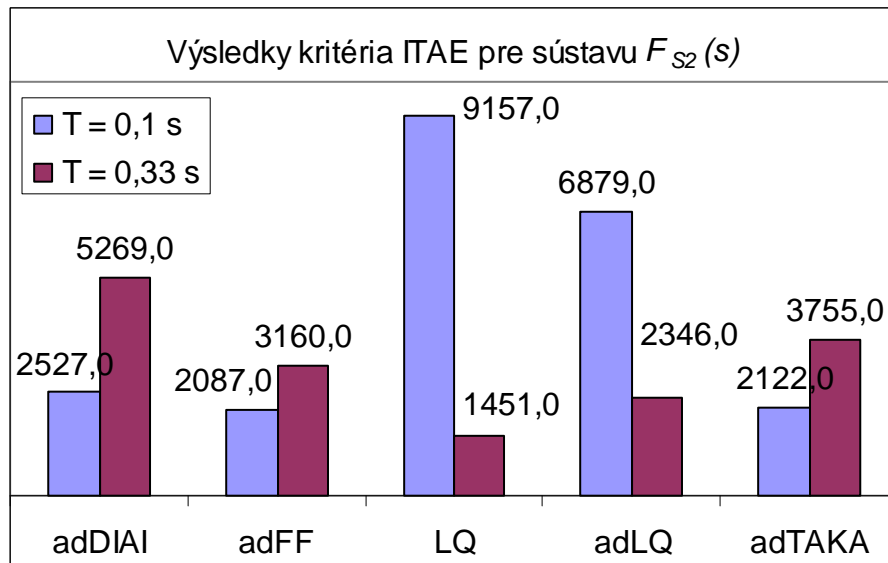


Obrázok 10.35 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s

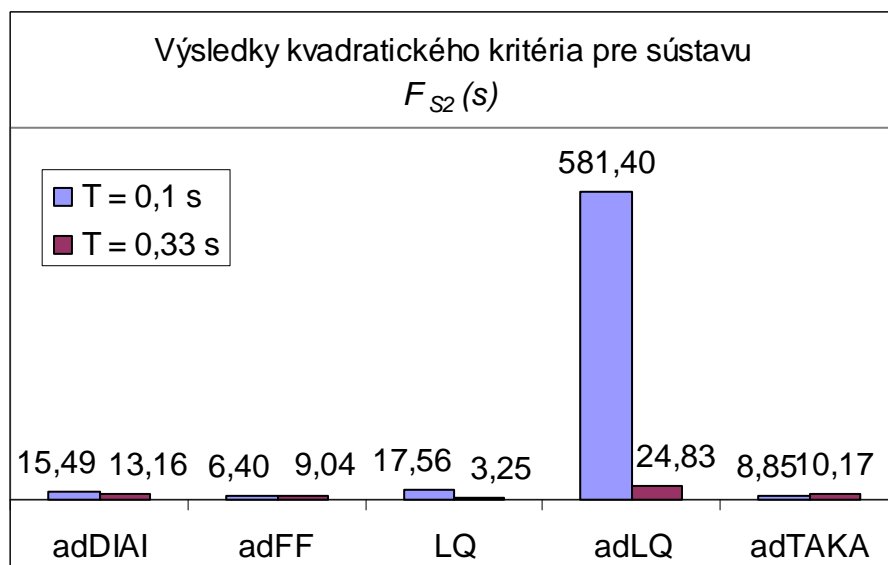
Na Obrázok 10.36 a Obrázok 10.37 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií, na ktorých môžeme pozorovať vplyv zmeny vzorkovacej periódy.

Kritérium ITAE jednoznačne hovorí o tom, že v tomto prípade pre LQ a adLQ bolo zväčšenie vzorkovacej periódy prínosné. Pre ostatné malo toto opačný výsledok a môžeme vidieť zhoršenie po zväčšení periódy vzorkovania.

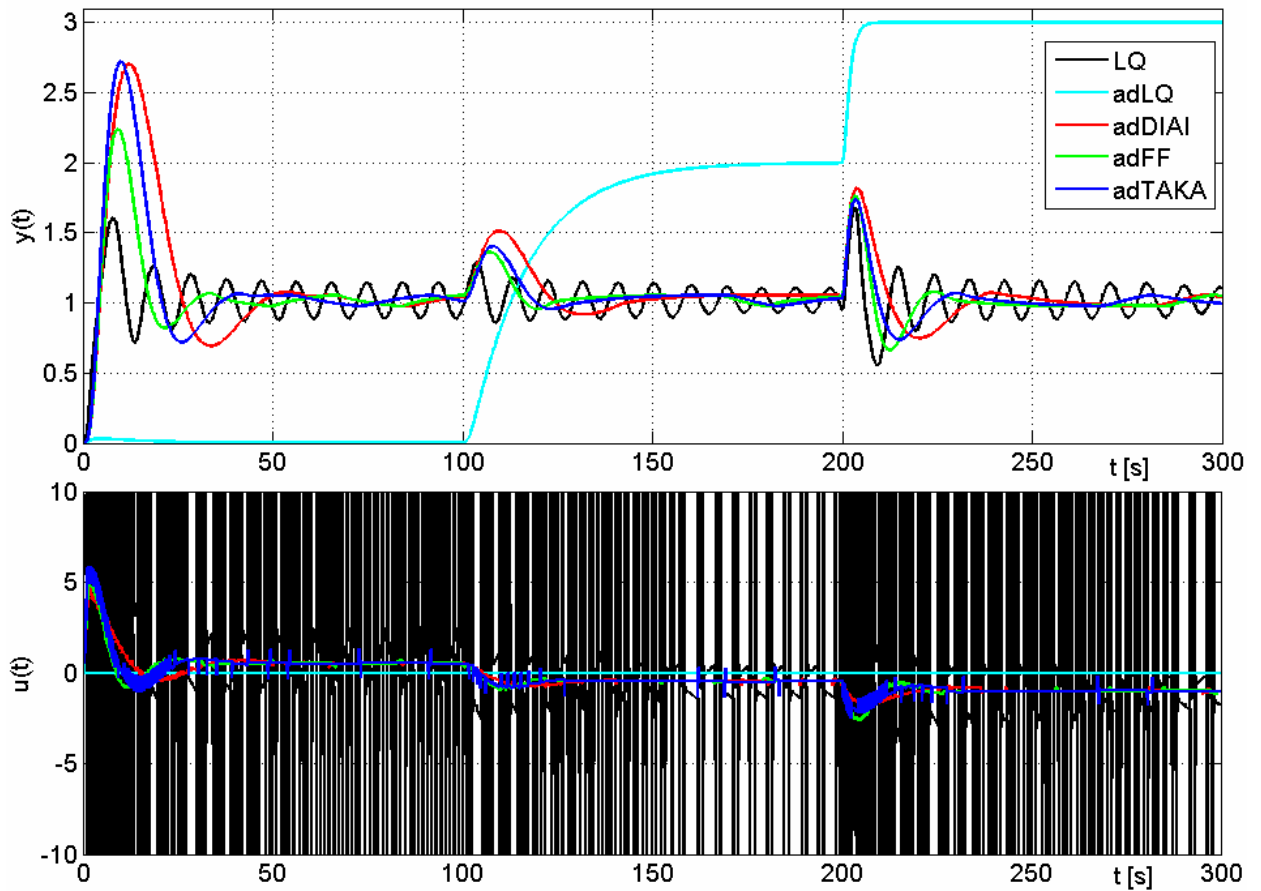
Kvadratické kritérium sa vyjadriilo, že zväčšenie periódy vzorkovania bolo prospešné pre všetky prípady.



Obrázok 10.36 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom



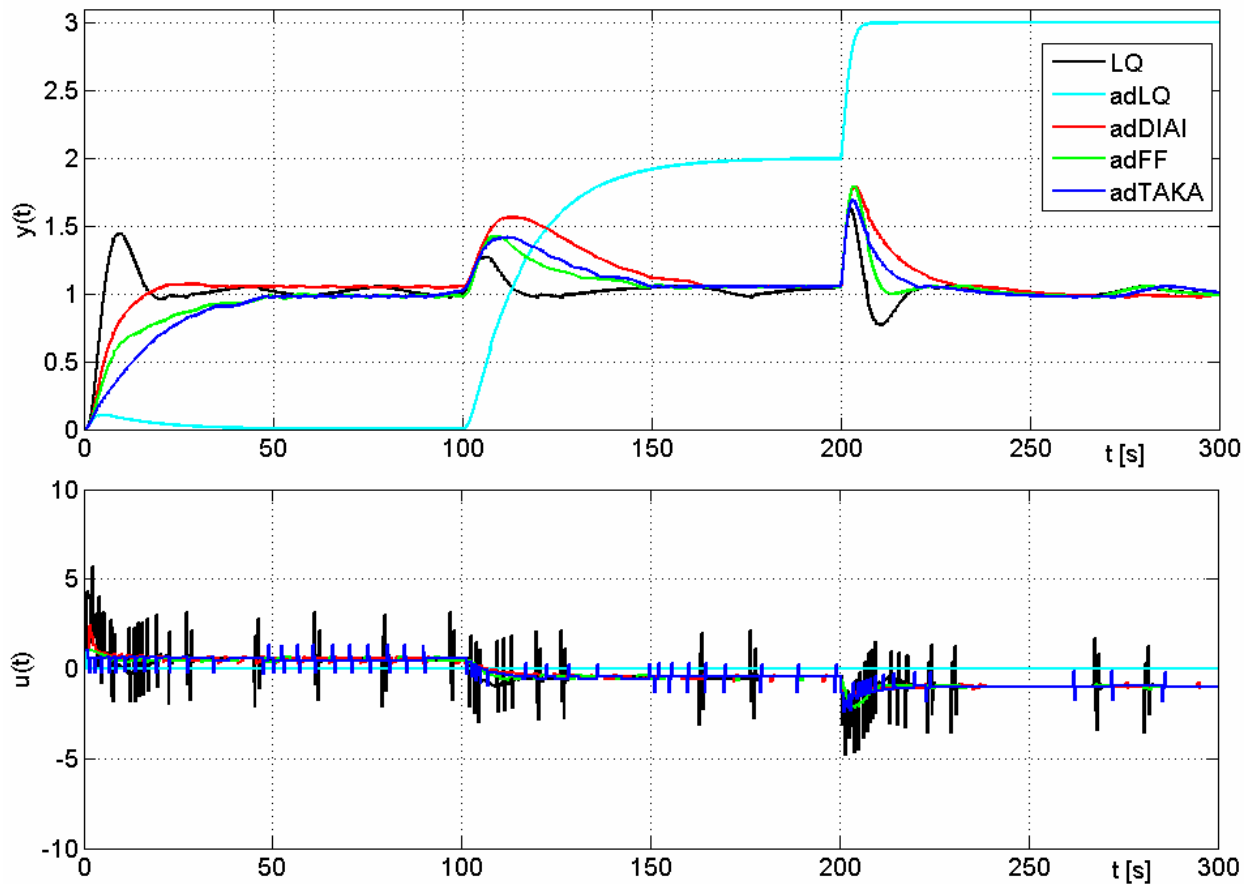
Obrázok 10.37 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom



Obrázok 10.38 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.38 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{S3}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Z predchádzajúcich obrázkov môžeme posúdiť, že zaradenie A/D a D/A prevodníku zhoršilo priebeh regulačného dejú pre všetky vybrané typy regulátorov. V tomto prípade najhoršie výsledky poskytuje adLQ a LQ.

Na Obrázok 10.39 sú zobrazené priebehy regulačného dejú pre zväčšenú periódou vzorkovania, ako bolo v predchádzajúcom prípade, teda z 0,1 s na 0,33 s. Tu môžeme pozorovať, že priebehy LQ sa radikálne zlepšil. Priebeh adLQ ostáva naďalej nevhodný.

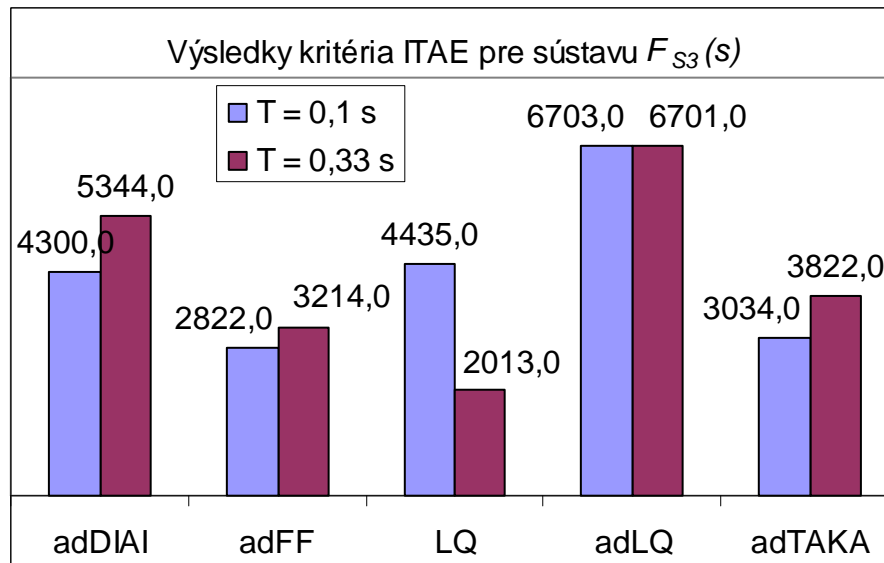


Obrázok 10.39 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s

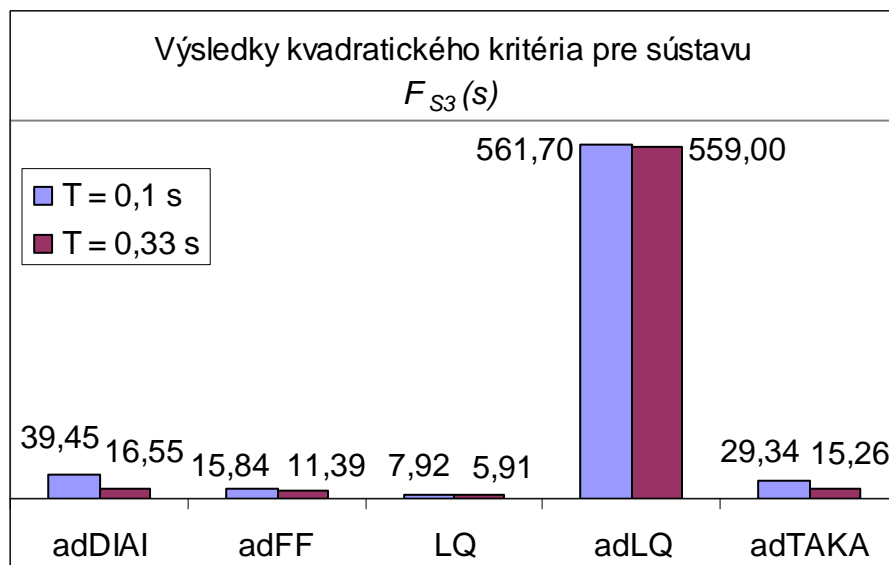
Na Obrázok 10.40 a Obrázok 10.41 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií na ktorých môžeme pozorovať vplyv zmeny vzorkovacej periódy.

Kritérium ITAE jednoznačne hovorí o tom, že v tomto prípade pre LQ bolo zväčšenie vzorkovacej periódy prínosné. Čo sa týka priebehu adLQ táto zmena nemala praktický význam. Pre ostatné priebehy mala táto zmena opačný výsledok a môžeme vidieť zhoršenie po zväčšení periódy vzorkovania.

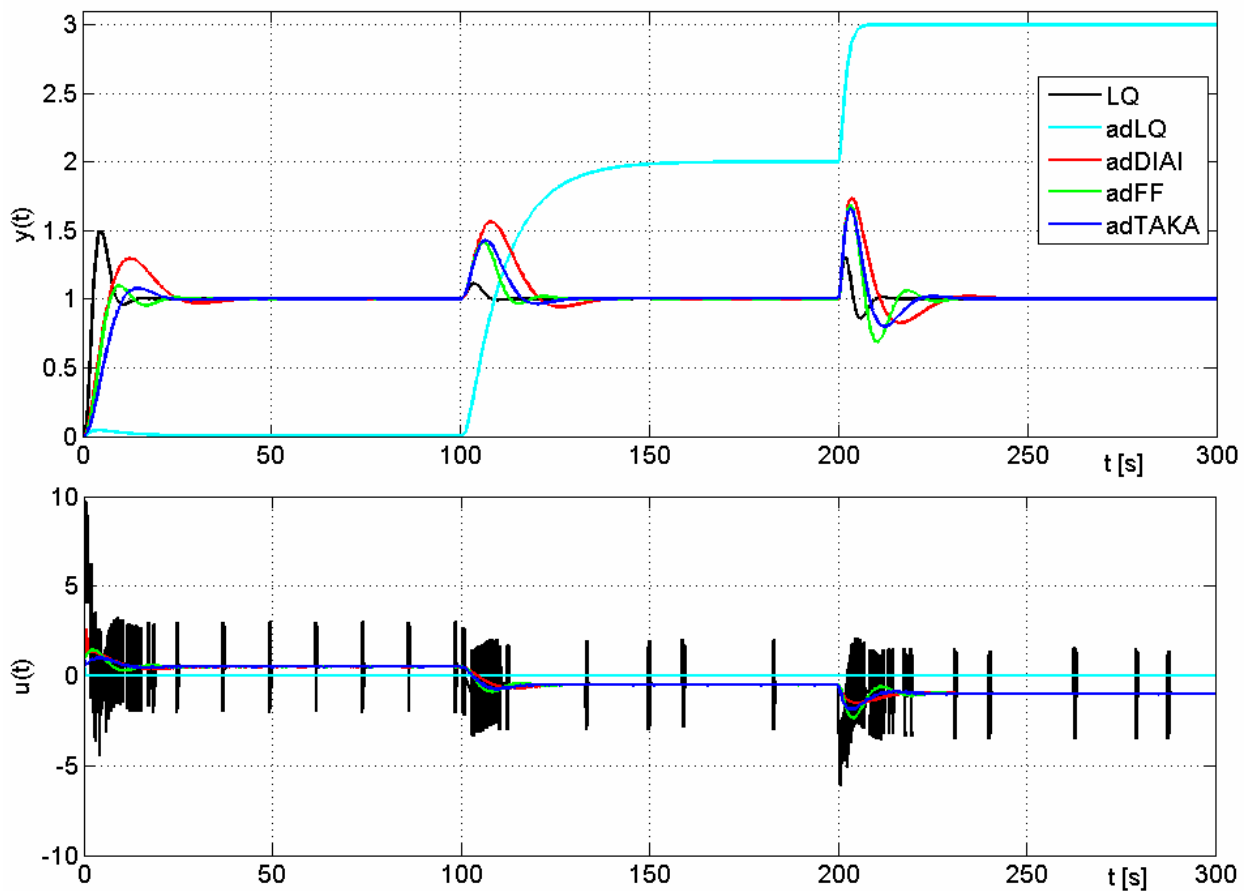
Kvadratické kritérium sa vyjadriilo, že zväčšenie periódy vzorkovania bolo prospešné pre všetky prípady okrem adLQ, kedy vznikla len zanedbateľne malá zmena výsledku kritéria.



Obrázok 10.40 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom



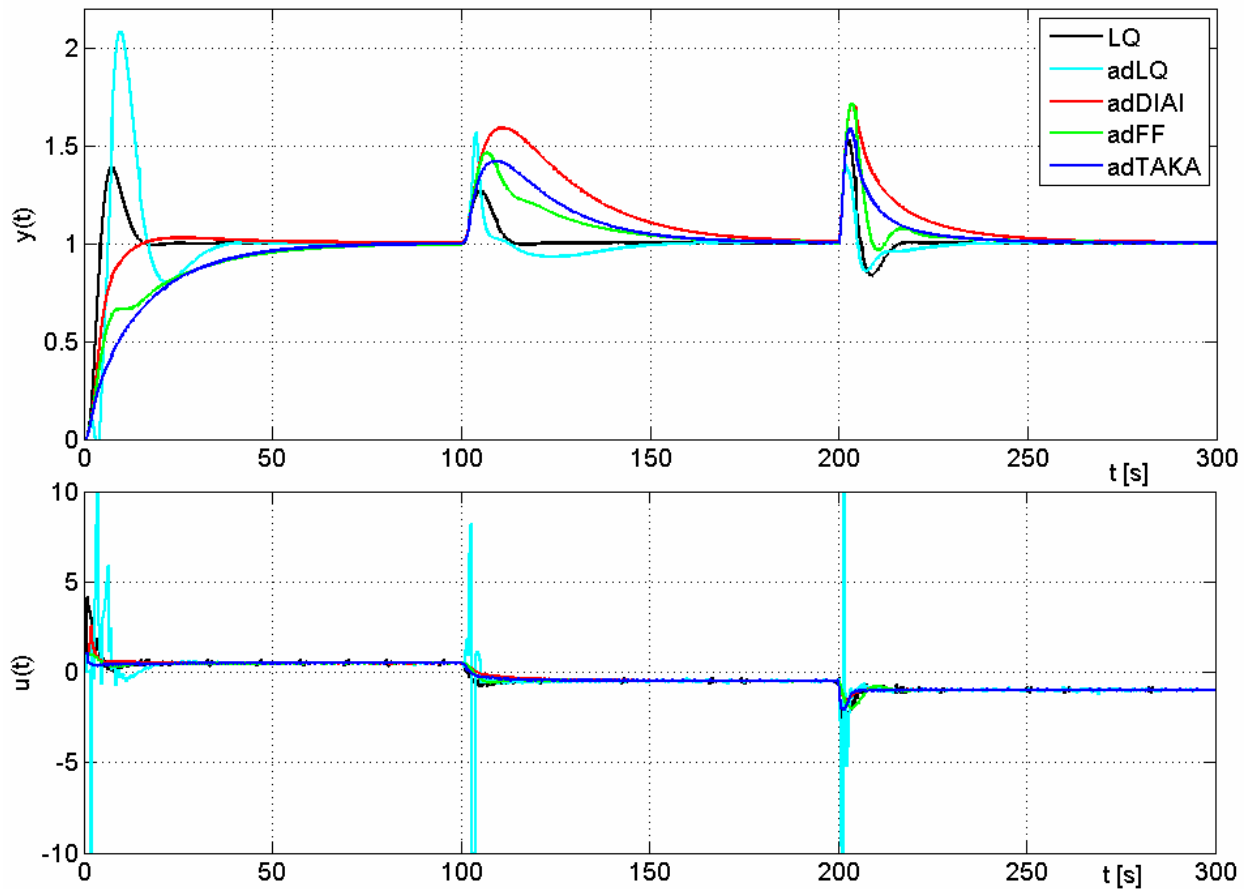
Obrázok 10.41 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ s 8-bitovým prevodníkom



Obrázok 10.42 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S1}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.42 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{S1}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa neprejavili žiadne zmeny. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Na týchto priebehoch už môžeme pozorovať výraznú zmenu oproti 8-bitovým prevodníkom. V tomto prípade zmena $w(t)$ spôsobila u LQ 50%, adDIAI 30% a u adFF a adTAKA 10% prekmit. Porucha $v_1(t)$ sa prejavila u adDIAI 60%, u adTAKA a adFF 40% a u LQ 10% prekmitom riadenej veličiny. Porucha $v_2(t)$ spôsobila u adDIAI 70%, u adTAKA a adFF 65% a u LQ približne 30% prekmitom.

Na Obrázok 10.43 vidíme, že predĺženie vzorkovacej periódy malo priaznivý vplyv na priebeh regulačného deju adLQ.

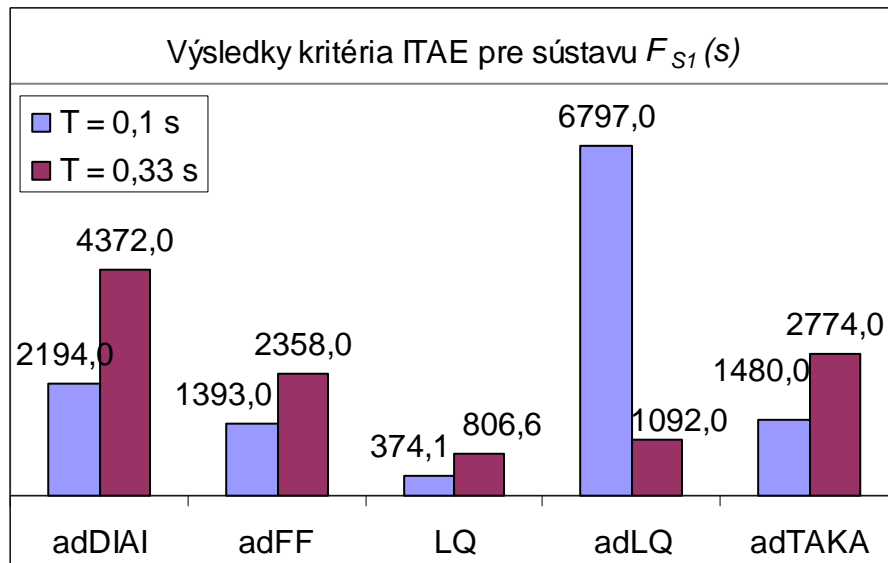


Obrázok 10.43 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{SI}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s

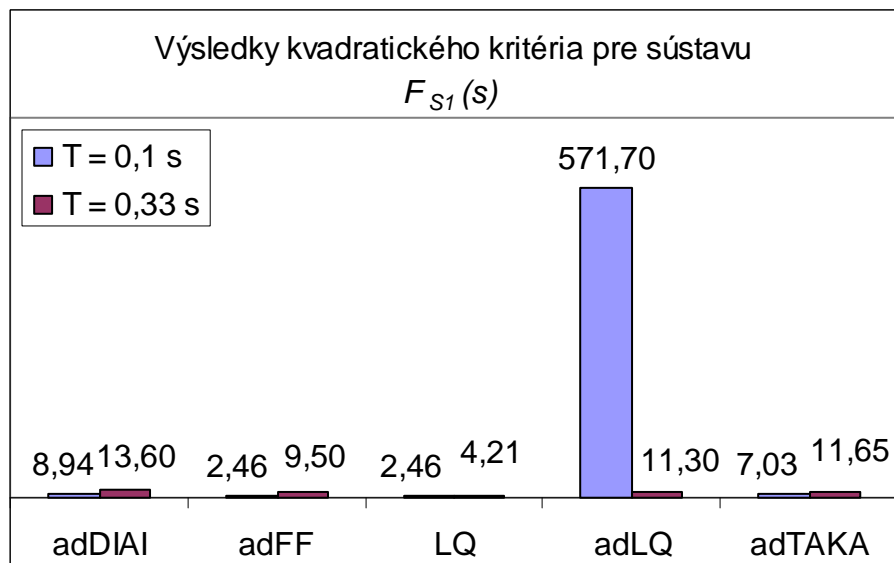
Na Obrázok 10.44 a Obrázok 10.45 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií, na ktorých môžeme pozorovať vplyv zmeny vzorkovacej periódy.

Kritérium ITAE jednoznačne hovorí o tom, že v tomto prípade bolo zväčšenie vzorkovacej periódy prínosné iba pre adLQ. Pre ostatné priebehy mala táto zmena opačný výsledok a môžeme vidieť zhoršenie po zväčšení periódy vzorkovania.

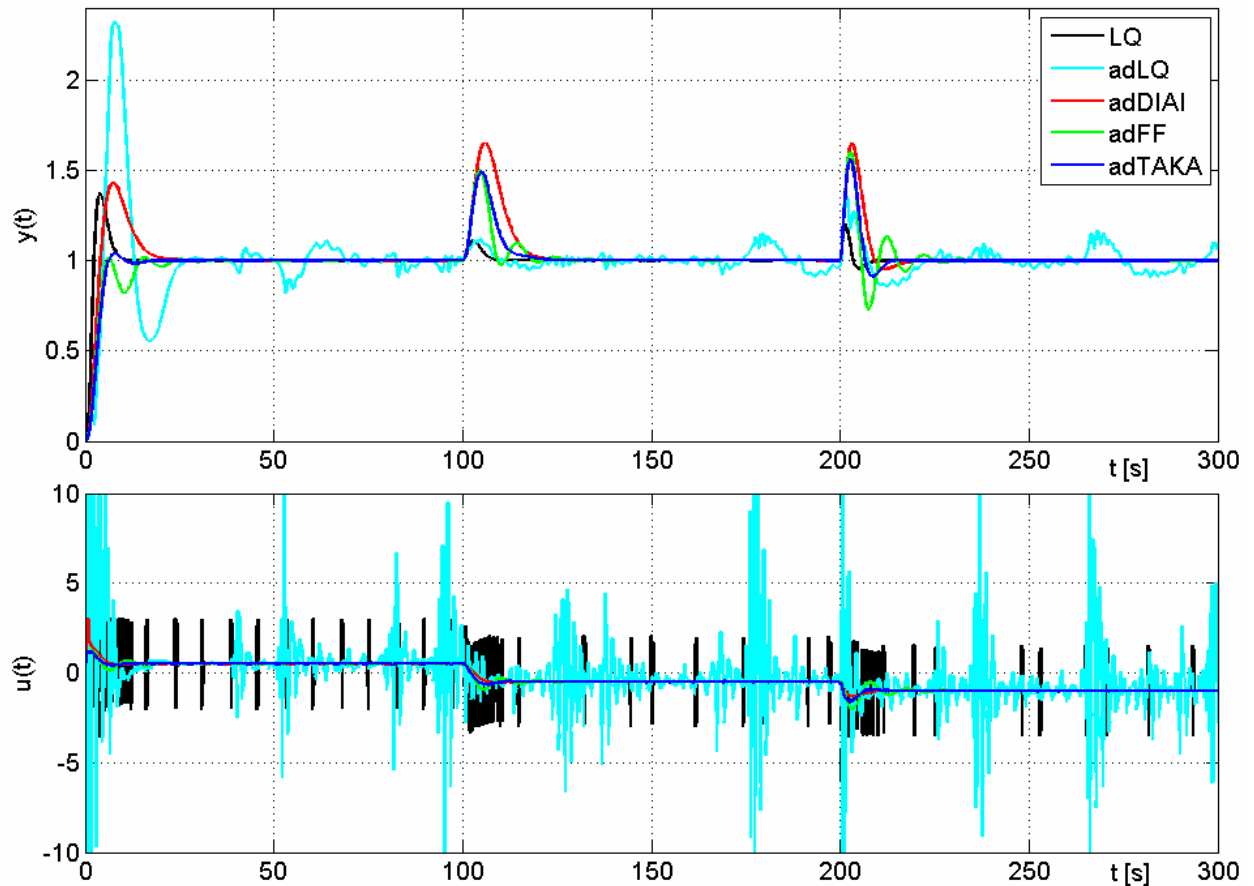
Kvadratické kritérium sa vyjadriilo, že zväčšenie periódy vzorkovania bolo prospešné pre adLQ. Pre ostatné priebehy malo negatívny vplyv.



Obrázok 10.44 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ s 12-bitovým prevodníkom



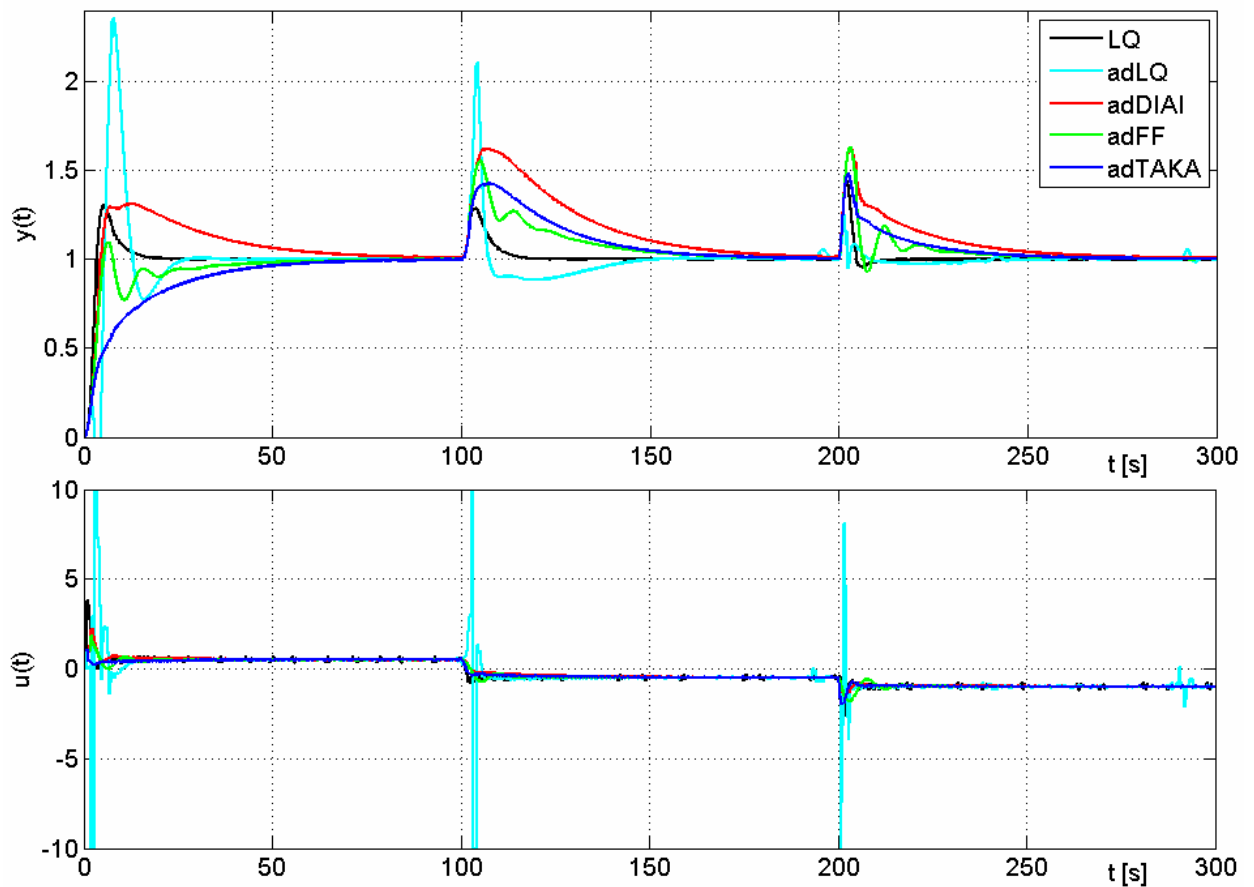
Obrázok 10.45 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ 12-bitovým prevodníkom



Obrázok 10.46 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.46 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{S2}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. V tomto prípade zmena $w(t)$ spôsobila u LQ 35%, adDIAI 40% a adTAKA 5% prekmit. Porucha $v_1(t)$ sa prejavila u adDIAI 60%, u adTAKA a adFF 40% a u LQ 10% prekmitom riadenej veličiny. Porucha $v_2(t)$ spôsobila u adDIAI 60%, u adTAKA a adFF 60% (adFF má v porovnaní s ostatnými priebehmi veľmi kmitavý priebeh vyregulovania poruchy $v_2(t)$) a u LQ približne 20% prekmit. Priebeh adLQ ešte nemá uspokojivý tvar.

Na Obrázok 10.47 vidíme, že predĺženie vzorkovacej periódy malo priaznivý vplyv na priebeh regulačného dejú adLQ.

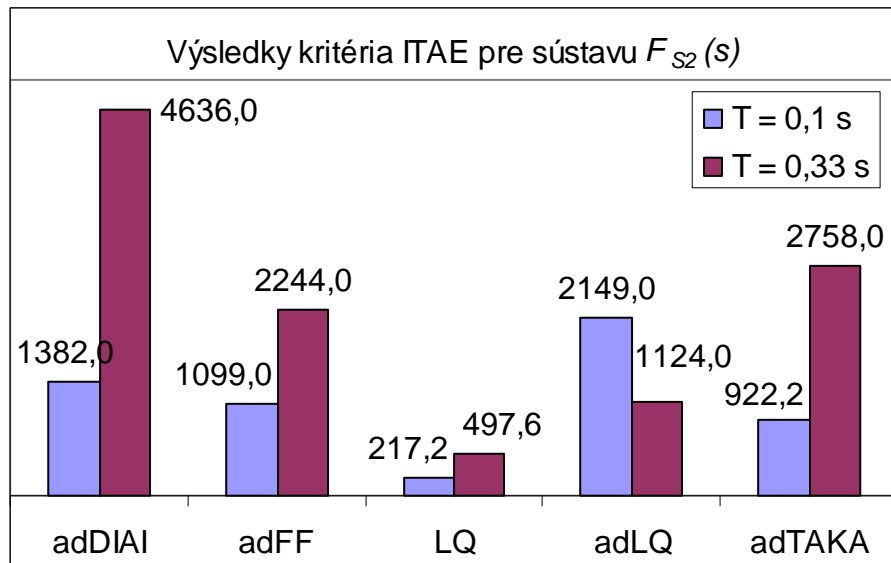


Obrázok 10.47 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s

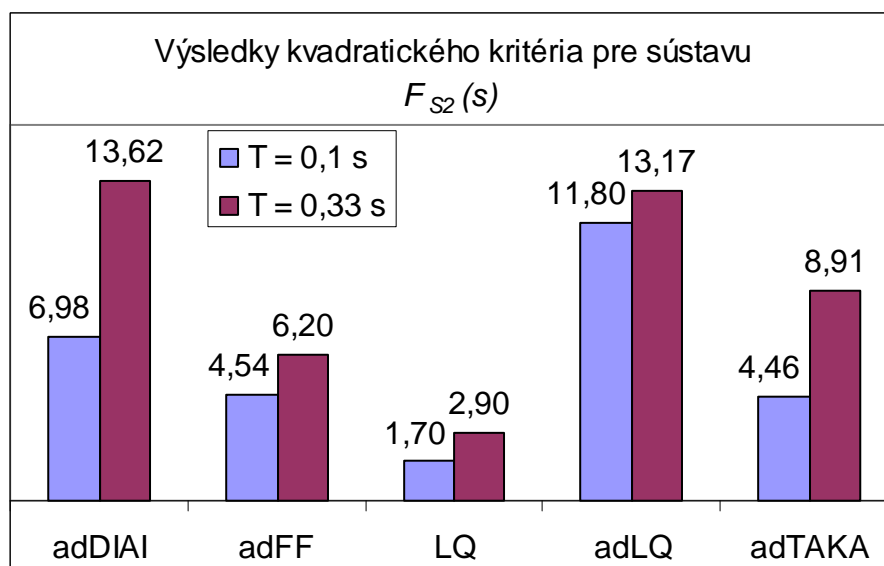
Na Obrázok 10.48 a Obrázok 10.49 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií, na ktorých môžeme pozorovať vplyv zmeny vzorkovacej periódy.

Kritérium ITAE jednoznačne hovorí o tom, že zväčšenie vzorkovacej periódy bolo prínosné iba pre adLQ. Pre ostatné priebehy mala táto zmena opačný výsledok a môžeme vidieť zhoršenie výsledkov po zväčšení periódy vzorkovania.

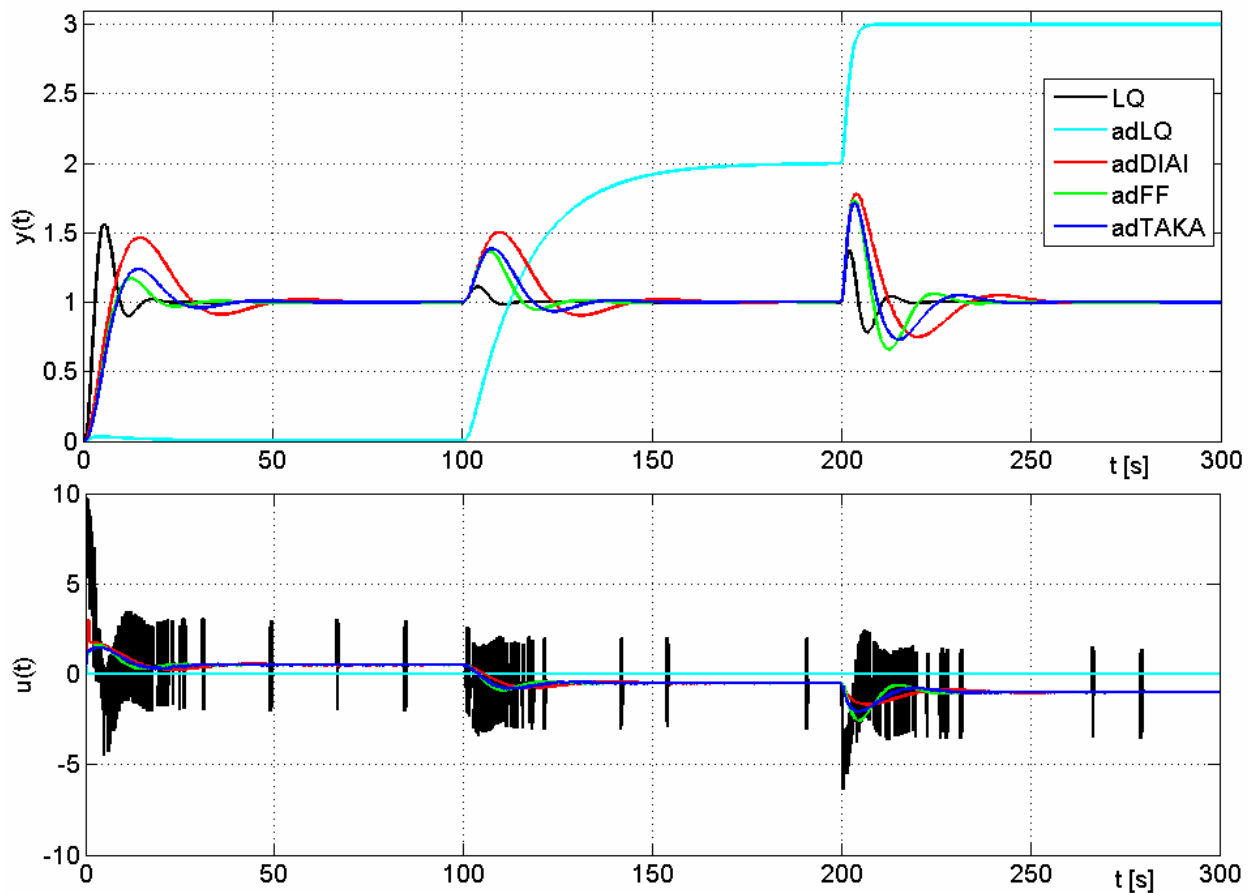
Kvadratické kritérium sa vyjadrilo, že zväčšenie periódy vzorkovania nebolo prospešné pre žiadny zo zobrazených priebehov.



Obrázok 10.48 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ 12-bitovým prevodníkom



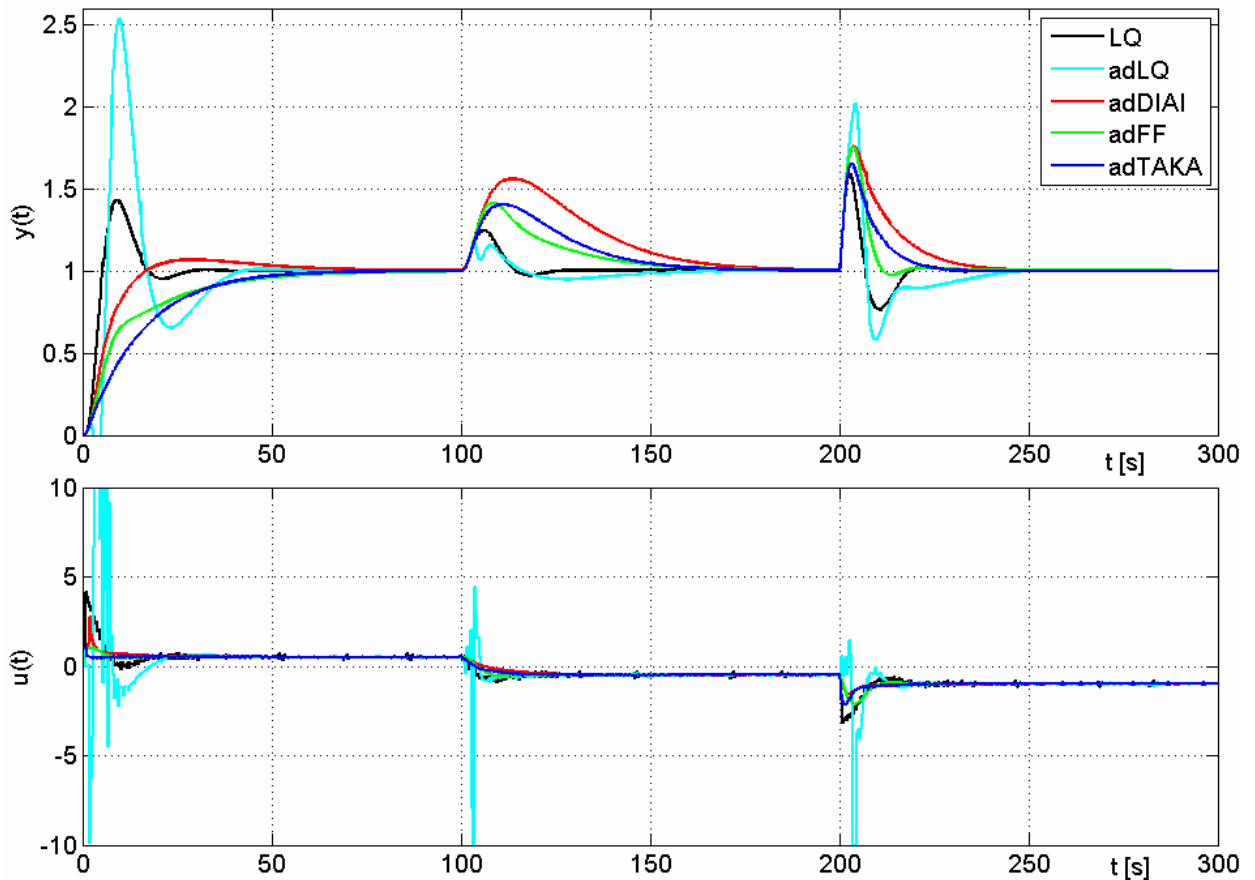
Obrázok 10.49 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ 12-bitovým prevodníkom



Obrázok 10.50 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.50 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{S3}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny v globálnej časovej konštante. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Zmena $w(t)$ spôsobila u LQ 55%, u adDIAI menej ako 50%, u adFF 20% a adTAKA 30% prekmit. Porucha $v_1(t)$ sa prejavila u adDIAI 50%, u adTAKA a adFF 40% a u LQ približne 10% prekmitom veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ spôsobila u adDIAI 70% (adDIAI má v porovnaní s ostatnými priebehmi najdlhšie vyregulovanie poruchy $v_2(t)$), u adTAKA a adFF 65% a u LQ približne 35% prekmit. Pre túto zmenu parametru sústavy adLQ opäť zlyháva.

Na Obrázok 10.51 vidíme, že predĺženie vzorkovacej periódy malo priaznivý vplyv na priebeh regulačného dejú adLQ.

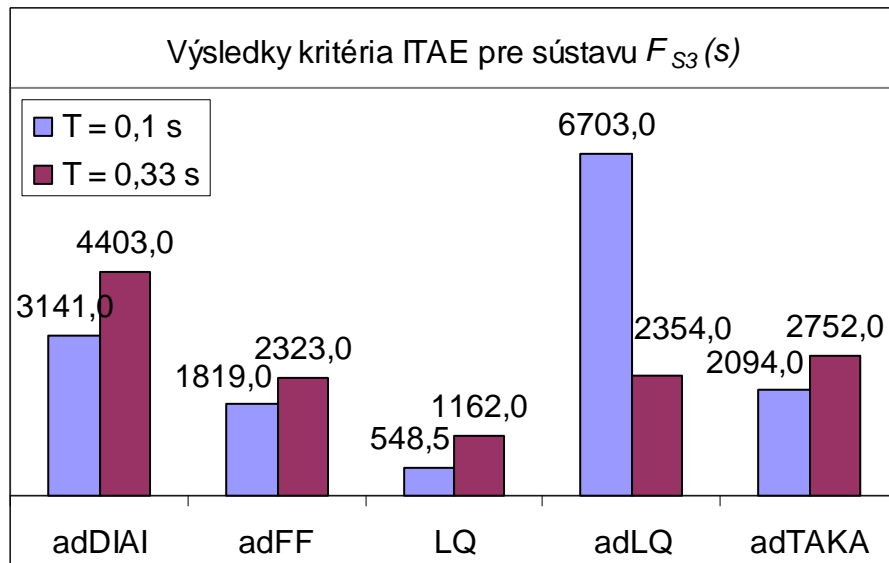


Obrázok 10.51 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,33 s

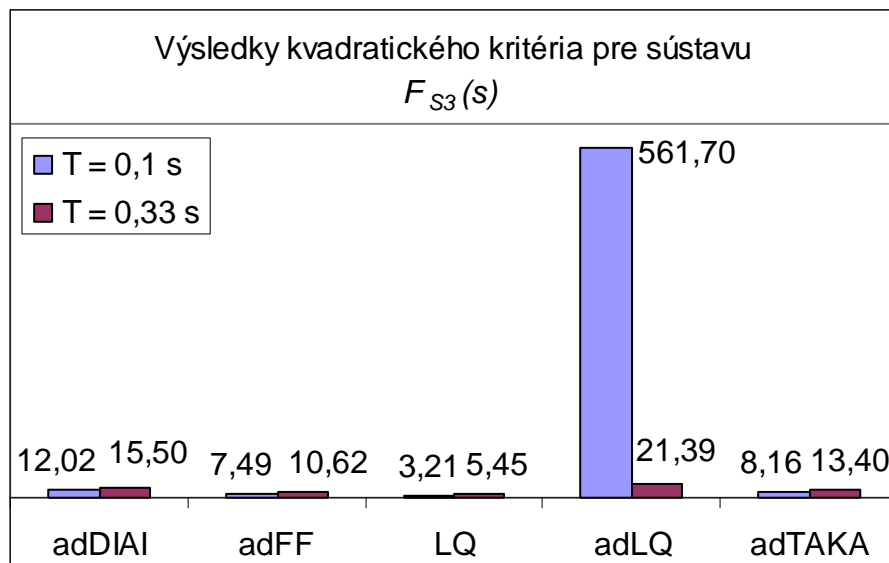
Na Obrázok 10.52 a Obrázok 10.53 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií na ktorých môžeme pozorovať vplyv zmeny vzorkovacej periódy.

Kritérium ITAE jednoznačne hovorí o tom, že zväčšenie vzorkovacej periódy bolo prínosné iba pre adLQ. Pre ostatné priebehy mala táto zmena opačný výsledok a môžeme vidieť zhoršenie výsledkov po zväčšení periódy vzorkovania.

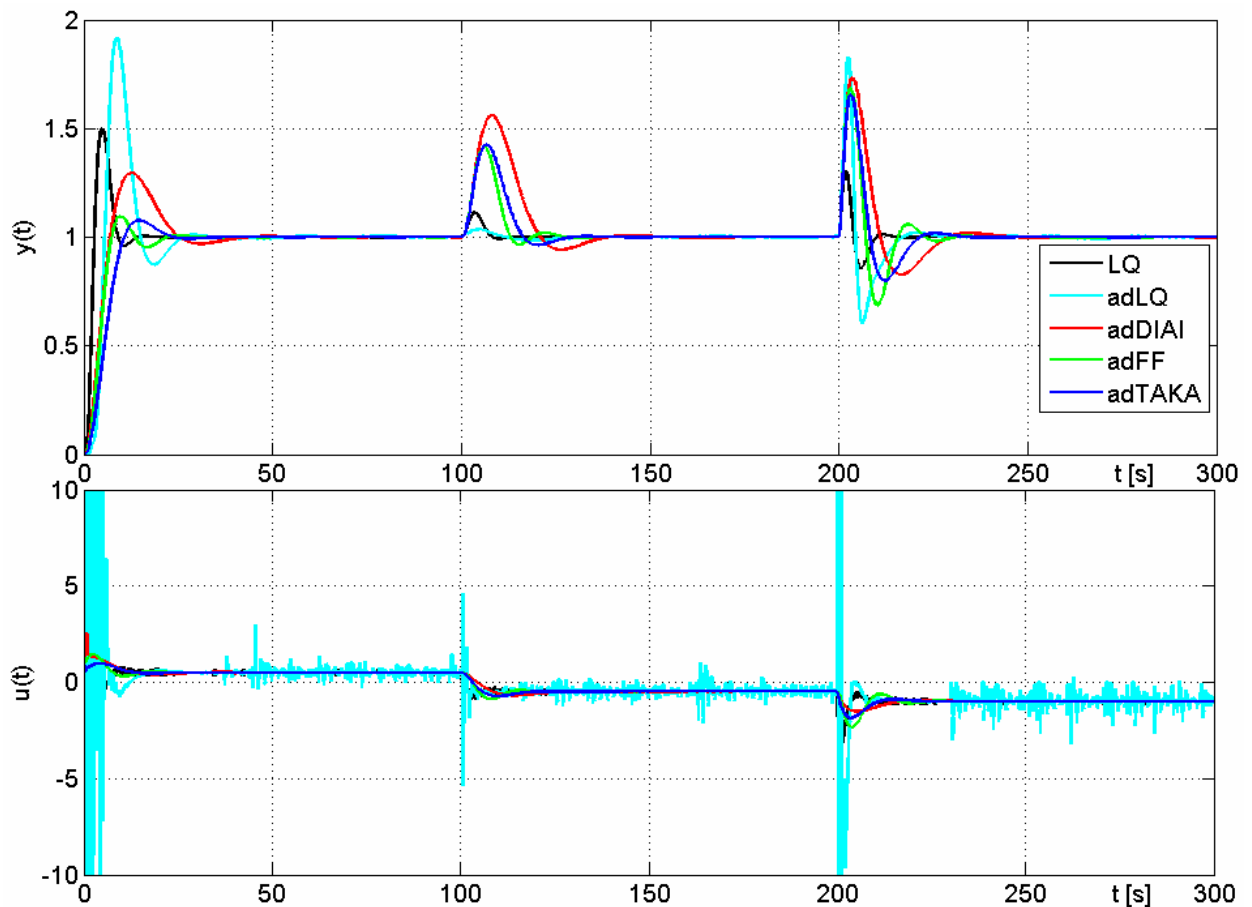
Kvadratické kritérium sa vyjadriilo, že zväčšenie periódy vzorkovania bolo prospešné len pre adLQ.



Obrázok 10.52 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ 12-bitovým prevodníkom



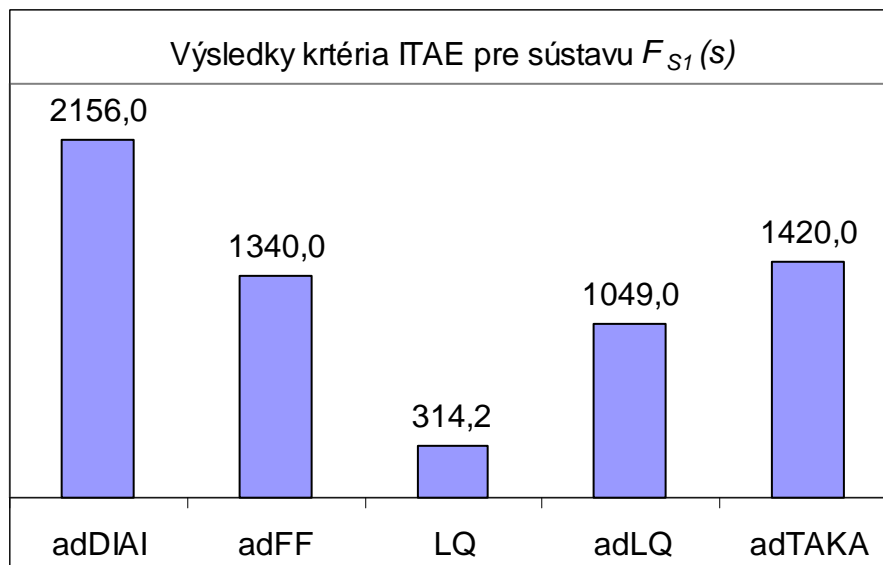
Obrázok 10.53 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ 12-bitovým prevodníkom



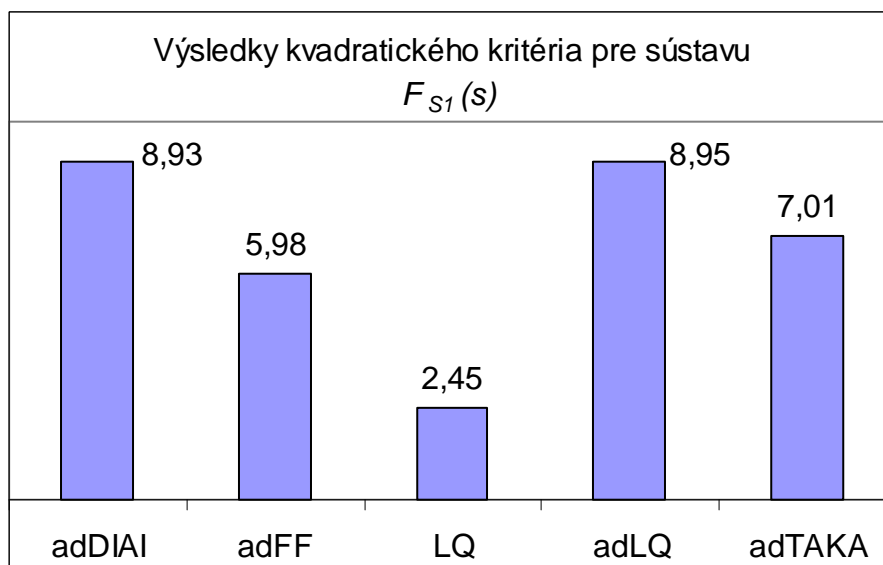
Obrázok 10.54 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{SI}(s)$ s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.54 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{SI}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa neprejavili žiadne zmeny. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Zmena $w(t)$ spôsobila u LQ 50%, u adDIAI menej ako 50%, u adFF a adTAKA 10% a u adLQ takmer 90% prekmit. Porucha $v_1(t)$ sa prejavila u adDIAI 55%, u adTAKA a adFF 40%, u LQ približne 10% a u adLQ 5% prekmitom veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ spôsobila u adDIAI 65%, u adTAKA a adFF 60% u LQ približne 30% a u adLQ takmer 80% prekmit.

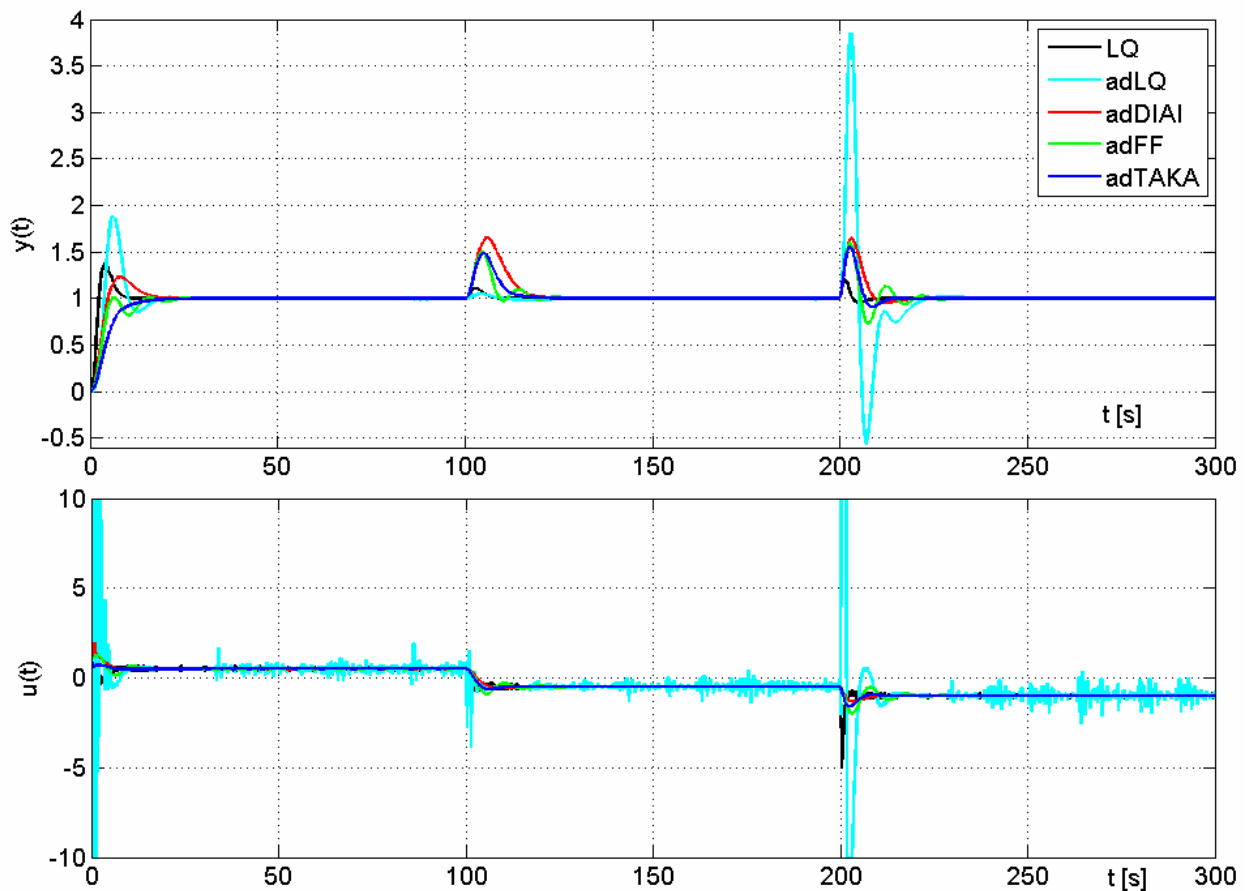
Na Obrázok 10.55 a Obrázok 10.56 sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.55 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S1}(s)$ 16-bitovým prevodníkom



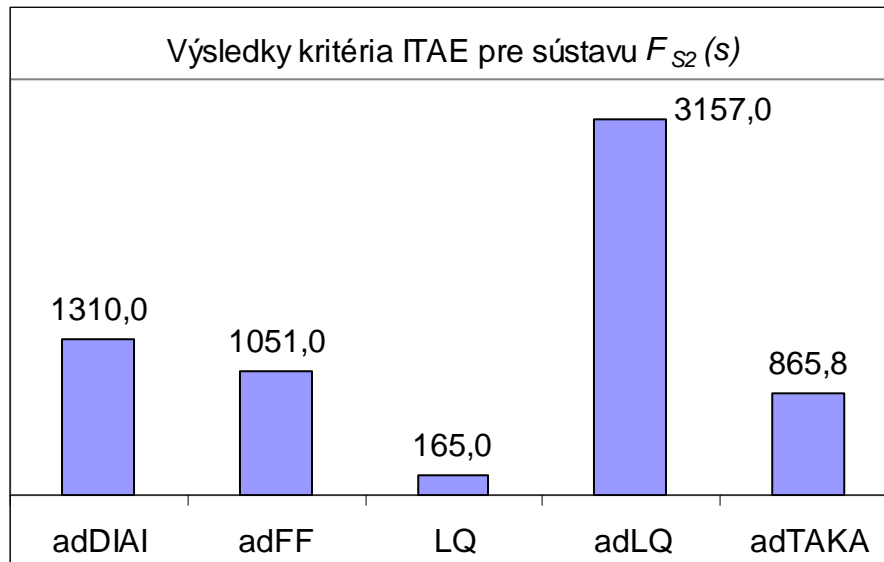
Obrázok 10.56 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S1}(s)$ 16-bitovým prevodníkom



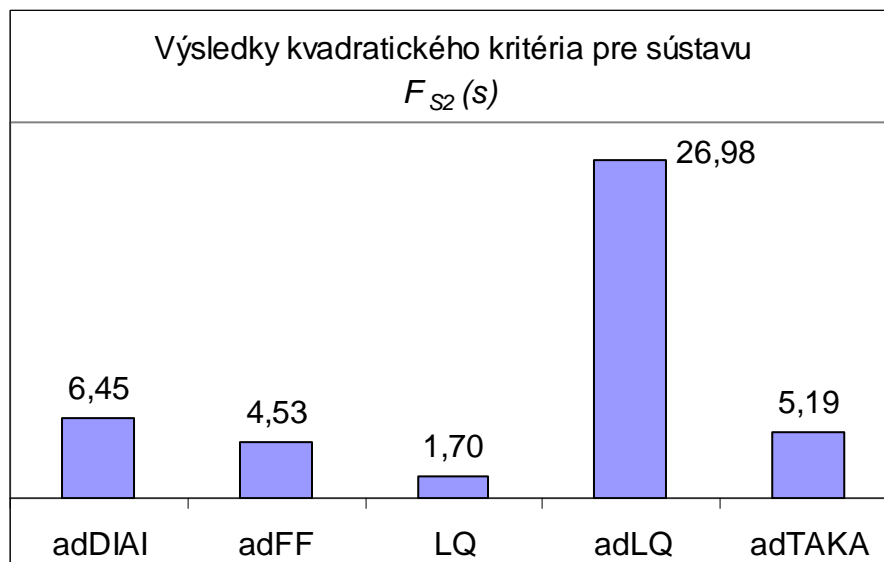
Obrázok 10.57 Grafické znázornenie priebehu regulačného dejú pre sústavu $F_{S2}(s)$ s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.57 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{S2}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny globálnej časovej konštanty. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Zmena riadiacej veličiny $w(t)$ spôsobila u LQ približne 30%, u adDIAI menej ako 25%, u adTAKA 0% a u adLQ takmer 80% prekmit. Porucha $v_1(t)$ sa prejavila u adDIAI 60%, u adTAKA a adFF 50%, u LQ približne 10% a u adLQ 5% prekmitom veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ spôsobila u adDIAI 60%, u adTAKA a adFF 55% u LQ približne 20% a u adLQ takmer 280% prekmit.

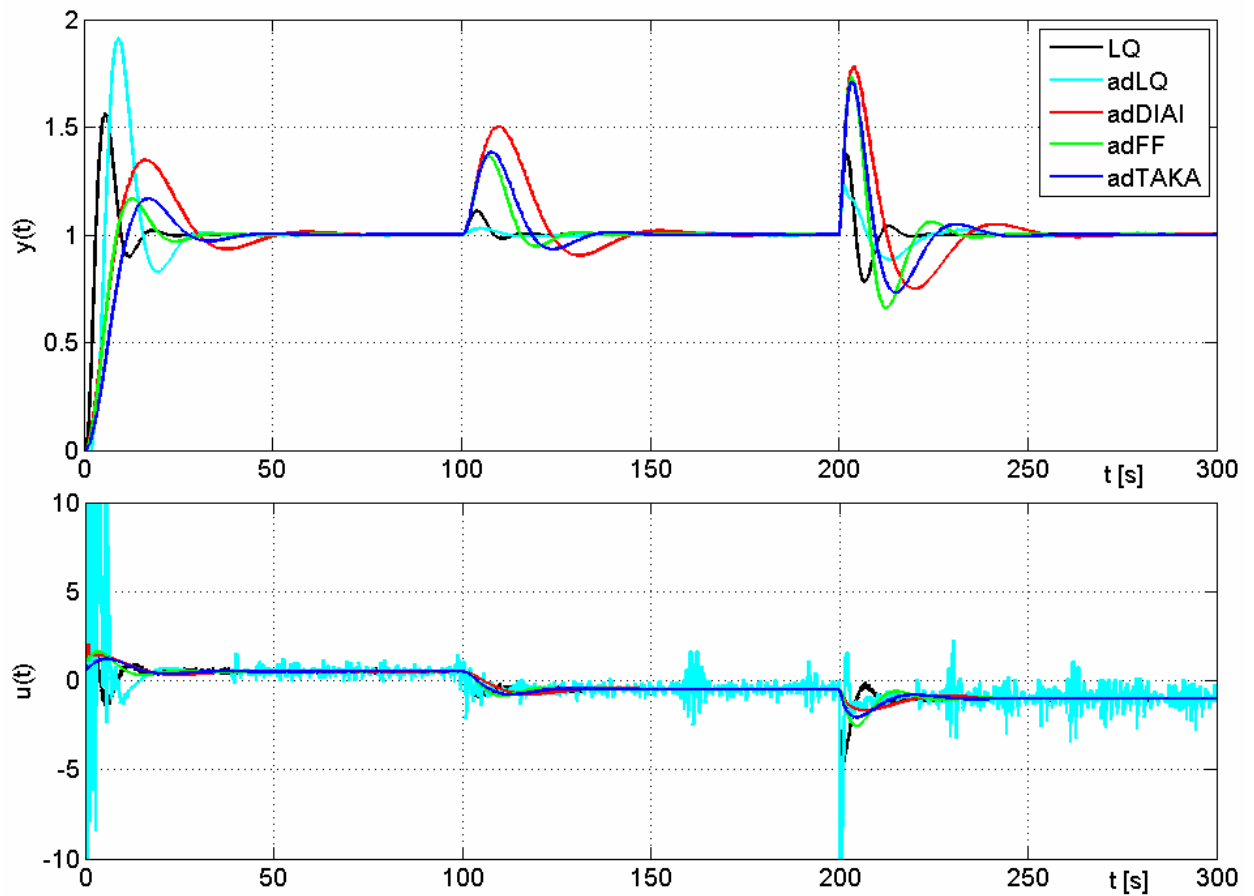
Na *Obrázok 10.58* a *Obrázok 10.59* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.58 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S2}(s)$ 16-bitovým prevodníkom



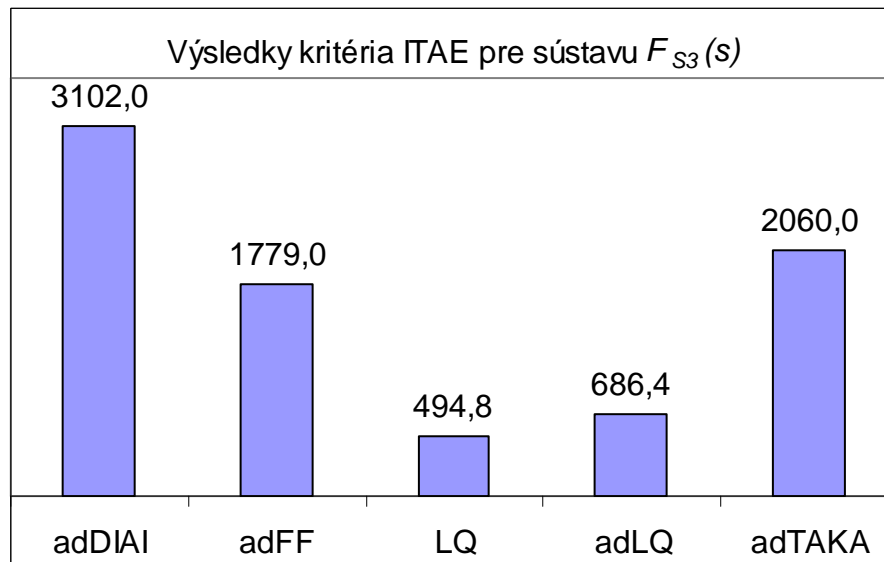
Obrázok 10.59 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S2}(s)$ 16-bitovým prevodníkom



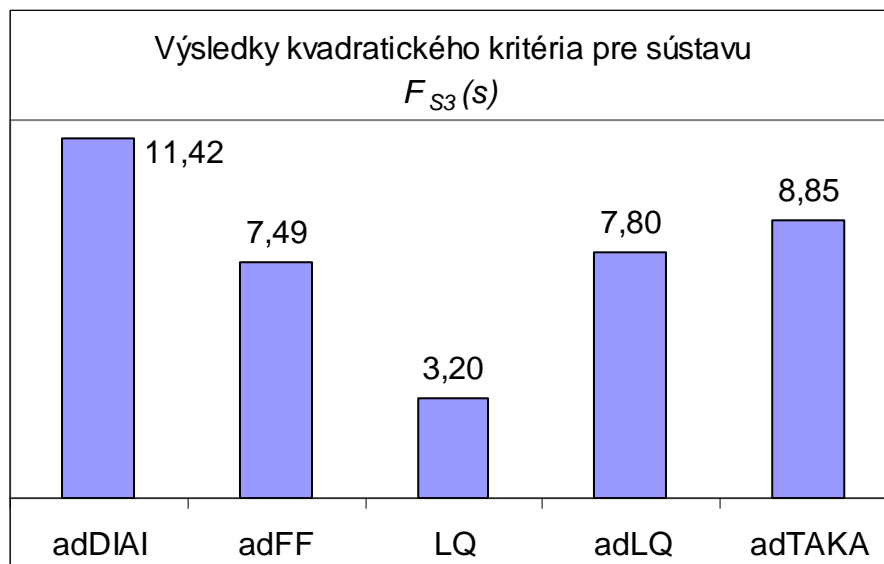
Obrázok 10.60 Grafické znázornenie priebehu regulačného deju pre sústavu $F_{S3}(s)$ s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.60 vidíme zobrazené priebehy regulačných dejov pre prenosovú funkciu $F_{S3}(s)$, ktorá predstavuje riadenú sústavu, u ktorej sa prejavili zmeny globálnej časovej konštanty. V grafe je vyobrazených päť priebehov pre vybrané druhy regulátorov. Zmena riadiacej veličiny $w(t)$ spôsobila u LQ približne 55%, u adDIAI 35%, u adTAKA a adFF 20% a u adLQ 80% prekmit. Porucha $v_1(t)$ sa prejavila u adDIAI 50%, u adTAKA a adFF takmer 40%, u LQ približne 10% a u adLQ 5% prekmitom veličiny $y(t)$. Porucha $v_2(t)$ spôsobila u adDIAI 70%, u adTAKA a adFF 65% u LQ približne 35% a u adLQ takmer 20% prekmit. Najdlhšie trvajúce odozvy mal adDIAI.

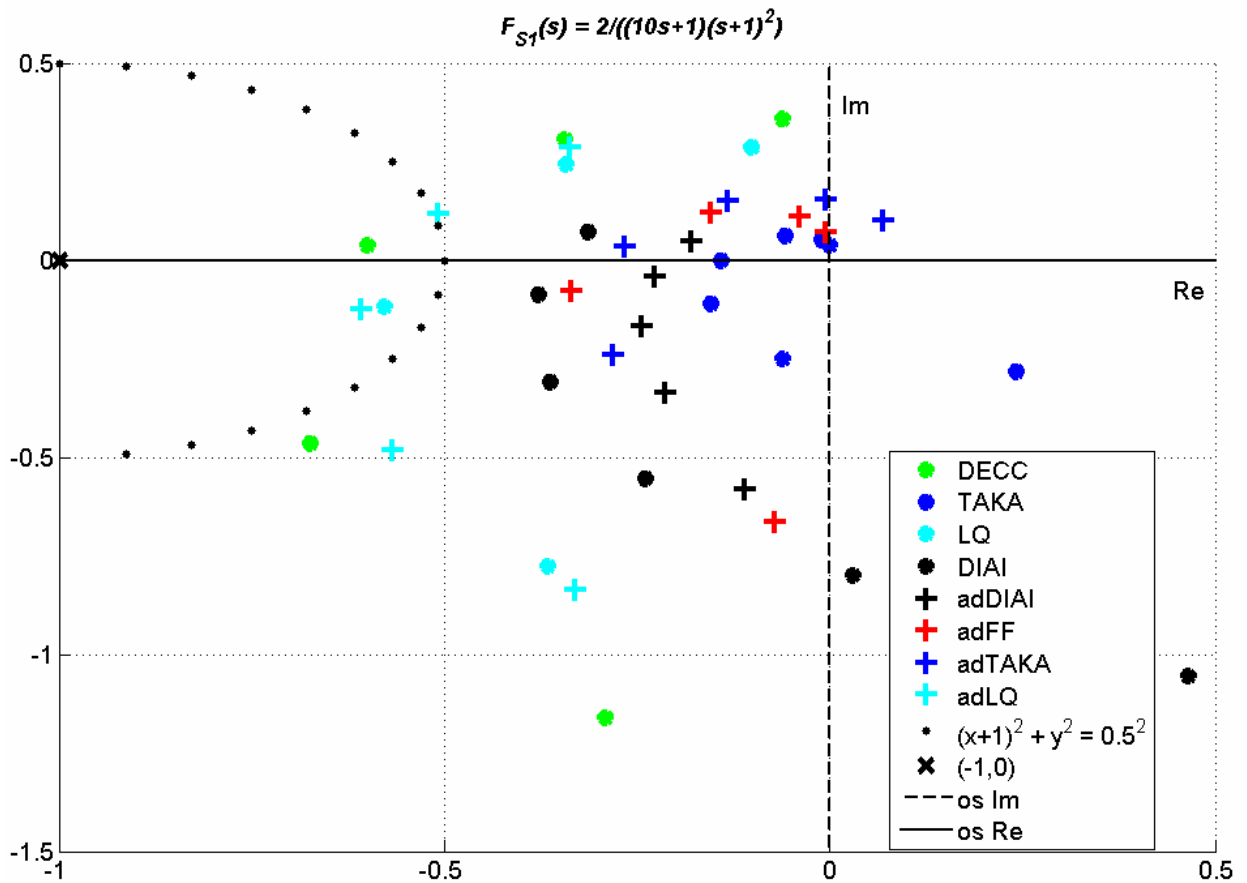
Na *Obrázok 10.61* a *Obrázok 10.62* sú zobrazené výsledky integrálnych kritérií.



Obrázok 10.61 Výsledky kritéria ITAE pre $F_{S3}(s)$ 16-bitovým prevodníkom

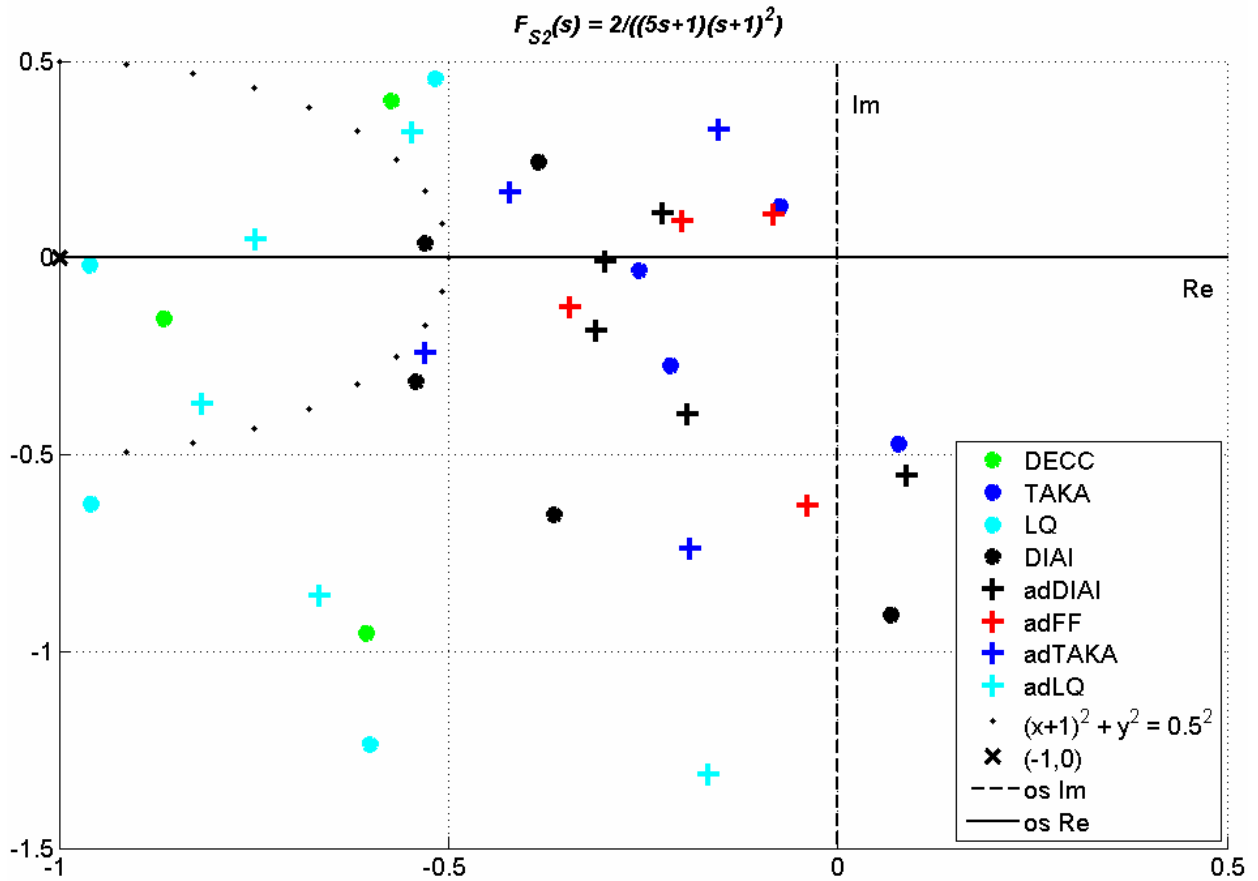


Obrázok 10.62 Výsledky kvadratického kritéria pre $F_{S3}(s)$ 16-bitovým prevodníkom



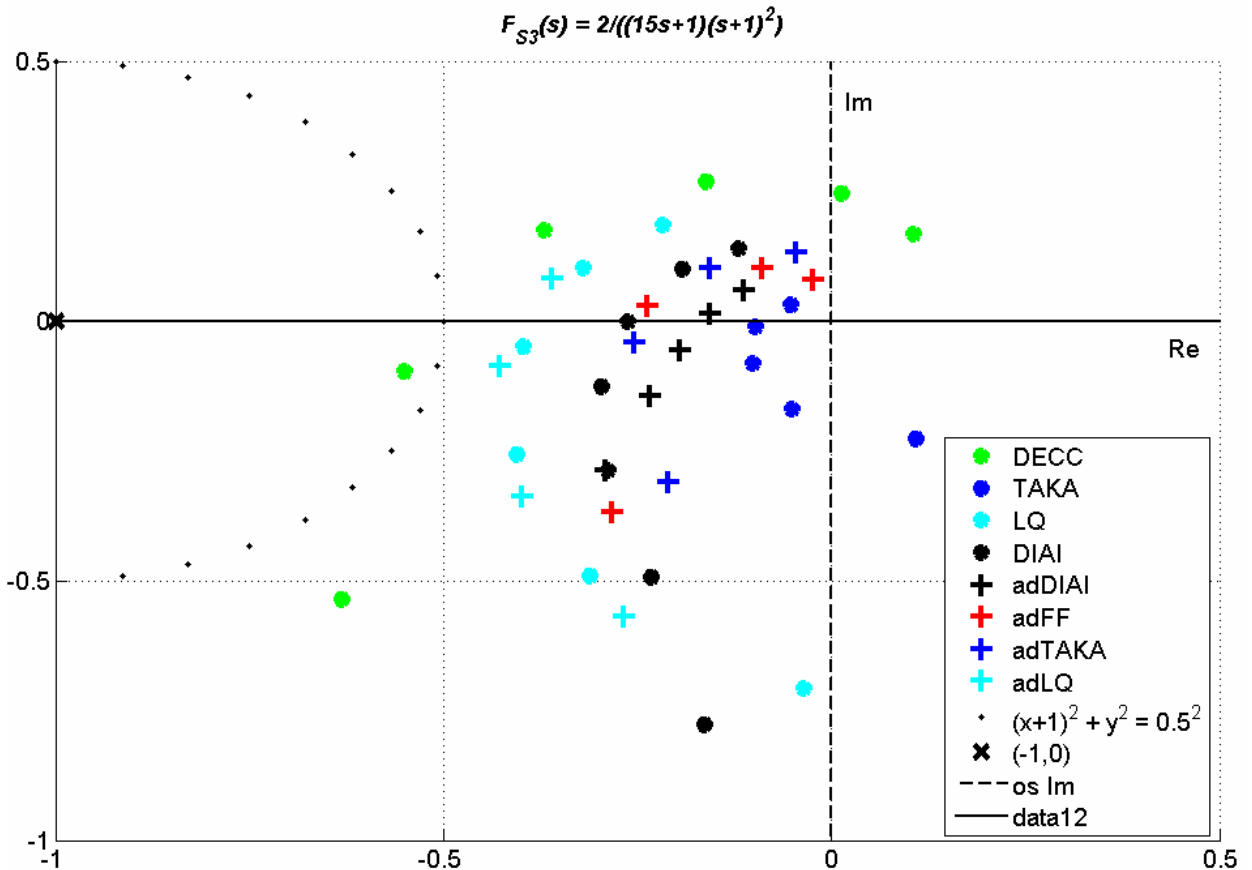
Obrázok 10.63 Zobrazenie frekvenčnej charakteristiky v komplexnej rovine pre sústavu $F_{S1}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.63 je zobrazená frekvenčná charakteristika v komplexnej rovine pre prenosovú funkciu $F_{S1}(s)$, ktorá predstavuje sústavu, v ktorej nenastali žiadne zmeny parametrov. V ľavej hornej časti obrázku je vykreslená kružnica predstavujúca mnou zvolené kritérium. Túto hranicu prekračujú priebehy DECC, LQ a adLQ. Ostatné priebehy, menovite adTAKA, TAKA, DIAI, adDIAI a adFF, sú v dostatočne veľkej vzdialenosti od hranice, a teda splňujú pre tento prípad požiadavky zvoleného kritéria.



Obrázok 10.64 Zobrazenie frekvenčnej charakteristiky v komplexnej rovine pre sústavu $F_{S2}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.64 je zobrazená frekvenčná charakteristika v komplexnej rovine pre prenosovú funkciu $F_{S2}(s)$, ktorá predstavuje sústavu, v ktorej nastali zmeny globálnej časovej konštanty. V ľavej hornej časti obrázku je zobrazená kružnica predstavujúca zvolené kritérium. Túto hranicu prekračujú a teda podmienky kritéria nespĺňajú priebehy DIAI, DECC, LQ a adLQ. LQ sa pri tom nebezpečne blíži k bodu (-1;0j). Ostatné priebehy, menovite TAKA, adDIAI a adFF sú v dostatočne veľkej vzdialenosti od hranice a teda splňujú pre tento prípad požiadavky zvoleného kritéria.



Obrázok 10.65 Zobrazenie frekvenčnej charakteristiky v komplexnej rovine pre sústavu $F_{S3}(s)$ s periódou vzorkovania 0,1 s

Na Obrázok 10.65 je zobrazená frekvenčná charakteristika v komplexnej rovine pre prenosovú funkciu $F_{S3}(s)$, ktorá predstavuje sústavu, v ktorej nastali zmeny globálnej časovej konštanty. V ľavej hornej časti obrázku je zobrazená kružnica predstavujúca zvolené kritérium. Túto hranicu prekračuje, a teda podmienky kritéria nespĺňa priebeh DECC. Ostatné priebehy, menovite TAKA, adTAKA, DIAI, adDIAI, adFF, LQ a adLQ sú v dostatočne veľkej vzdialenosti od hranice a teda splňujú pre tento prípad požiadavky zvoleného kritéria.

11. ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV A ZÁVER

11.1 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Pre porovnanie robustnosti vybraných typov regulátorov boli zvolené dva postupy. Prvým bolo vyšetrenie a porovnanie na základe zvolených integrálnych kritérií a druhým vyšetrenie zásoby stability v module.

Princípom prvého z nich bolo na navrhnutom regulačnom deji spočítať hodnoty integrálnych kritérií a vzájomne porovnať zmenu týchto hodnôt vo vzťahu zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ a $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$. Boli zvolené dve integrálne kritériá – kritérium ITAE a kvadratické kritérium. Toto bolo z dôvodu, že kvadratické kritérium penalizuje väčšie hodnoty regulačnej odchýlky a menšie zanedbáva a kritérium ITAE zvyšuje penalizáciu regulačnej odchýlky s narastajúcim časom.

Princípom druhého postupu pre porovnanie robustnosti vybraných typov regulátorov bolo vyšetrenie zásoby stability v module. Na toto vyšetrenie musela byť stanovená určitá hranica kritéria, aby bolo možné jasne povedať ktorý regulátor túto podmienku splňuje alebo nespĺňuje. Veľkosť kritéria bola určená na $M_M = 0,5$. Toto číslo reprezentuje polomer kružnice zostrojenej okolo bodu $(-1;0j)$ v komplexnej rovine frekvenčnej charakteristiky.

11.1.1 Vyhodnotenie výsledkov pre DECC, DIAI, FF, TAKA a LQ s periódou vzorkovania 0,1 s

Kritérium ITAE sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 28,5 %, pre DIAI o 36,3 %, pre FF o 20,4 %, pre TAKA o 43,5 % a pre LQ o 48,4 %.

Kvadratické kritérium sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 29,6 %, pre DIAI o 33,0 %, pre FF o 23,7 %, pre TAKA o 19,0 % a pre LQ o 30,6 %.

Kritérium ITAE sa v zmysle zmeny parametrov sústavy $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ vyjadrilo takto: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 40,5 %, pre DIAI o 44,0 %, pre FF o 33,2 %, pre TAKA o 54,7 % a pre LQ o 58,6 %.

Kvadratické kritérium v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ nám umožnilo získať tieto hodnoty: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 29,4 %, pre DIAI o 33,3 %, pre FF o 23,9 %, pre TAKA o 20,6 % a pre LQ o 30,6 %.

11.1.2 Vyhodnotenie výsledkov pre DECC, DIAI, FF, TAKA a LQ s periódou vzorkovania 1 s

Kritérium ITAE sa pri zmene parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 24,5 %, pre DIAI o 19,5 %, pre FF o 20,7 % a pre LQ o 21,35. V prípade TAKA došlo k zlyhaniu regulátora a nasledovné rozkmitanie celého regulačného obvodu.

Kvadratické kritérium sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 23 %, pre DIAI o 22,3 %, pre FF o 8,8 % a pre LQ o 30,6 %. V prípade TAKA došlo k zlyhaniu regulátora.

Kritérium ITAE sa v zmysle zmeny parametrov sústavy $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ vyjadrilo takto: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 41,5 %, pre DIAI o 40,1 %, pre FF o 17,3 %, pre TAKA o 16,1 % a pre LQ o 39,3 %.

Kvadratické kritérium v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ nám umožnilo získať tieto hodnoty: pre DECC bola zmena kvality regulácie o 31,1 %, pre DIAI o 28,5 %, pre o 19,7 %, pre TAKA o 13,1 % a pre LQ o 23,3 %.

11.1.3 Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s periódou vzorkovania 0,1 s

Kritérium ITAE sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie

o 39,4 %, pre adFF o 21,5 %, pre LQ o 48,4 %, pre adLQ o 20,8 % a pre adTAKA o 39,2 %.

Kvadratické kritérium sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 28,1 %, pre adFF o 24,5 %, pre LQ o 30,6 %, pre adLQ o 7,9 % a pre adTAKA o 27,0 %.

Kritérium ITAE sa v zmysle zmeny parametrov sústavy $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ vyjadrilo takto: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 44,0 %, pre adFF o 32,8 %, pre LQ o 58,6 %, pre adLQ o 5,7 % a pre adTAKA o 46,8 %.

Kvadratické kritérium v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ nám umožnilo získať tieto hodnoty: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 27,2 %, pre adFF o 24,5 %, pre LQ o 30,6 %, pre adLQ o 0,3 % a pre adTAKA o 28,1 %.

11.1.4 Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s 8-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Kritérium ITAE sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 21,5 %, pre adFF o 12,1 % a pre adTAKA o 14,8 %. V prípade LQ adLQ došlo k zlyhaniu regulátorov. Pre periódu vzorkovania 0,33 s bola zmena kvality regulácie pre adLQ 42,2 % a pre LQ 13,9 %.

Kvadratické kritérium sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 49,7 %, pre adFF o 47,5 % a pre adTAKA o 59,7 %. V prípade LQ a adLQ došlo k zlyhaniu regulátoru. Pre periódu vzorkovania 0,33 s bola zmena kvality regulácie pre adLQ 30,8 % a pre LQ 29,7 %.

Kritérium ITAE sa v zmysle zmeny parametrov sústavy $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ vyjadrilo takto: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 33,5 %, pre adFF o 18,9 % a pre adTAKA o 21,8 %. V prípade LQ a adLQ došlo k zlyhaniu regulátoru. Pre periódu vzorkovania 0,33 s bola zmena kvality regulácie pre LQ 19,5 % .

Kvadratické kritérium v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ nám umožnilo získať tieto hodnoty: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 28,0 %, pre adFF o 29,9 % a pre adTAKA o 33,7 %. V prípade LQ a adLQ došlo k zlyhaniu regulátoru. Pre periódu vzorkovania 0,33 s bola zmena kvality regulácie pre LQ 27,9 % .

11.1.5 Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Kritérium ITAE sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 37,0 %, pre adFF o 21,1 %, pre LQ o 41,9 % a pre adTAKA o 37,7 %. V prípade adLQ došlo k zlyhaniu regulátoru. Pre periódu vzorkovania 0,33 s bola zmena kvality regulácie pre adLQ 2,9 %.

Kvadratické kritérium sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 21,9 %, pre adFF o 84,6 %, pre LQ o 30,9 % a pre adTAKA o 36,6 %. V prípade adLQ došlo k zlyhaniu regulátoru. Pre periódu vzorkovania 0,33 s bola zmena kvality regulácie pre adLQ 16,5 %.

Kritérium ITAE sa v zmysle zmeny parametrov sústavy $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ vyjadrilo takto: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie 43,2 %, pre adFF o 30,6 %, pre LQ o 46,6 %, pre adLQ o 115,6 % a pre adTAKA o 41,5 %.

Kvadratické kritérium v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ nám umožnilo získať tieto hodnoty: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 34,5 %, pre adFF o 204,5 %, pre LQ o 30,5 %, pre adLQ 89,3 % a pre adTAKA o 33,7 %.

11.1.6 Vyhodnotenie výsledkov pre adDIAI, adFF, LQ, adLQ a adTAKA s 16-bitovým A/D a D/A prevodníkom a periódou vzorkovania 0,1 s

Kritérium ITAE sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie

o 39,2 %, pre adFF o 21,6 %, pre LQ o 47,5 %, pre adLQ o 201,0 % a pre adTAKA o 39,0 %.

Kvadratické kritérium sa v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S2}(s)$ vyjadrilo nasledovne: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 27,8 %, pre adFF o 24,2 %, pre LQ o 30,6 %, pre adLQ o 201,5 % a pre adTAKA o 26,0 %. V prípade adLQ došlo k zlyhaniu regulátoru. Pre periódu vzorkovania 0,33 s bola zmena kvality regulácie pre adLQ 16,5 %.

Kritérium ITAE sa v zmysle zmeny parametrov sústavy $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ vyjadrilo takto: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie 43,9 %, pre adFF o 32,8 %, pre LQ o 57,5 %, pre adLQ o 34,6 % a pre adTAKA o 45,1 %.

Kvadratické kritérium v prípade zmeny parametrov sústavy v zmysle $F_{S1}(s) \rightarrow F_{S3}(s)$ nám umožnilo získať tieto hodnoty: pre adDIAI bola zmena kvality regulácie o 27,9 %, pre adFF o 25,3 %, pre LQ o 30,6 %, pre adLQ 12,8 % a pre adTAKA o 26,2 %.

11.1.7 Vyhodnotenie výsledkov vyšetrenia zásoby stability v module

Podmienky stanoveného kritéria $M_M = 0,5$ pre sústavu v tvare $F_{S1}(s)$ splnili tieto regulátory: TAKA, adTAKA, DIAI, adDIAI a adFF. Podmienku nespĺnili nasledovné: DECC, LQ a adLQ.

Podmienky stanoveného kritéria $M_M = 0,5$ pre sústavu v tvare $F_{S2}(s)$ splnili tieto regulátory: TAKA, adTAKA, adDIAI a adFF. Podmienku nespĺnili nasledovné: DECC, LQ, adLQ a DIAI.

Podmienky stanoveného kritéria $M_M = 0,5$ pre sústavu v tvare $F_{S3}(s)$ splnili tieto regulátory: DIAI, adDIAI, adTAKA, TAKA, adFF, adLQ a LQ. Jediný regulátor, ktorý nebol schopný splniť stanovenú podmienku kritéria bol DECC.

11.2 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo preveriť robustnosť rôznych vybraných typov regulátorov na modeloch sústavy, ktorá reprezentovala bežne vyskytujúcu sa sústavu v praxi a tiež overiť vplyv A/D a D/A prevodníkov. Pre lepšie vzájomné porovnanie výsledkov integrálnych kritérií boli ich hodnoty zobrazené do stĺpcových grafov. Všetky priebehy regulačných dejov sú graficky vyobrazené v časovej závislosti.

Z výsledkov kritérií ITAE môžeme vidieť, že najmenšiu zmenu hodnoty kritéria pri zmene parametru sústavy mal obvod s regulátorom FF (pre periódu vzorkovania 0,1 aj 1 s), adLQ (pre periódu vzorkovania 0,1 s), adFF a adTAKA (pri použití 8-bitového A/D a D/A prevodníku) a opäť adFF (pri použití 12 a 16-bitového A/D a D/A prevodníku).

Kvadratické kritérium poskytlo hodnoty, z ktorých môžeme pozorovať, že najmenšiu zmenu hodnoty kritéria pri zmene parametru sústavy mal obvod s regulátorom TAKA (pre periódu vzorkovania 0,1 s), FF (pre periódu vzorkovania 1 s), adLQ (pre periódu vzorkovania 0,1 s), adFF a adDIAI (pri použití 8-bitového A/D a D/A prevodníku), adDIAI (pre $F_{S2}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom), adTAKA (pre $F_{S3}(s)$ s 12-bitovým A/D a D/A prevodníkom) a adFF (pri použití 16-bitového A/D a D/A prevodníku).

Pri použití A/D a D/A prevodníkov v regulačnom obvode s adLQ regulátorom bolo možné pozorovať, že pri použití vzorkovacej periódy 0,1 s takmer vždy tento regulátor zlyhal.

Podľa vyšetrenia zásoby stability v module sa javil ako najmenej vyhovujúci regulátor DECC, ktorý v dvoch z troch prípadov nespĺňal podmienky zvoleného kritéria. Naopak regulačné obvody s regulátormi TAKA, adTAKA, adDIAI a adFF splnili tieto podmienky vo všetkých uvedených prípadoch.

Na záver treba pripomenúť, že zmeny parametru sústavy boli navrhnuté ako 50% nárast alebo pokles globálnej časovej konštanty zvolenej sústavy.

12. ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] PIVOŇKA, P., SCHMIDT, M.: Comparative Analysis of Discrete Derivative Implementations in PID Controllers, VUT Brno, 2007.
- [2] PIVOŇKA, P.: Číslicová řídicí technika, Skriptum VUT v Brně, Brno 2003.
- [3] VAVŘÍN, P., BLAHA, P.: Řízení a regulace 1, Skriptum VUT v Brně.
- [4] KŘÍŽ, R.: Porovnávací studie diskretních PID regulátorů v prostředí MATLAB – programovatelný automat B&R, Bakalářská práce, Brno 2005, Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Petr Pivoňka, CSc.
- [5] PIVOŇKA, P.: Optimalizace regulátorů, Skriptum VUT v Brně, 2005.
- [6] Poznámky získané z cvičení predmetu MOPR, 2007.
- [7] PROKOP R.: Algebraic Methods in Design and Analysis of Robust Controllers, VUTUM, Brno 2004.
- [8] ACKERMANN, J., BARTLETT, A., KAESBAUER, D., SIENEL, W., STEINHAUSER, R.: Robust Control: Systems with Uncertain Physical Parameters, Springer-Verlag, London 1993.

13. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

| | |
|-------------|---|
| DECC | PSD regulátor Discret Equivalent Continuous Controller. |
| DAI | PSD regulátor Discret Impulse Area Invariant. |
| FF | PSD regulátor s Feed-Forward. |
| TAKA | Takahashi regulátor. |
| LQ | LQ regulátor. |
| adDAI | Adaptívny DAI. |
| adFF | Adaptívny FF. |
| adTAKA | Adaptívny TAKA. |
| adLQ | Adaptívny LQ. |
| $F_{S1}(s)$ | Základný zvolený tvar regulovanej sústavy. |
| $F_{S2}(s)$ | Regulovaná sústava s 50% zmenšením globálnej časovej konštanty. |
| $F_{S3}(s)$ | Regulovaná sústava s 50% zväčšením globálnej časovej konštanty. |
| ZN | Metóda Ziegler-Nichols. |