



ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

том 68, книга 2, 2018

**МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОМАТИКА'2018, ФА
ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА
01 - 03 юни 2018 г., Созопол, България**



PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 68, Issue 2, 2018

**INTERNATIONAL CONFERENCE AUTOMATICS'2018, FA
FACULTY OF AUTOMATICS
June 01 - 03, 2018, Sozopol, Bulgaria**

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. дтн Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. дтн Елена ШОЙКОВА

членове

проф. дтн Георги ПОПОВ

проф. дтн Иван КОРОБКО

проф. дфн Иван УЗУНОВ

проф. дтн Иван ЯЧЕВ

проф. дтн Кети ПЕЕВА

проф. дтн Ганчо БОЖИЛОВ

проф. дтн Евелина ПЕНЧЕВА

проф. д.и.н. Младен ВЕЛЕВ

проф. д-р Бончо БОНЕВ

проф. д-р Иво МАЛАКОВ

проф. д-р Огнян НАКОВ

секретар-организатор

инж. Мая СТОЙЧЕВА

EDITORIAL BOARD

Editor -in -Chief

Prof. D.Sc. Emil NIKOLOV

Editor -in -Vice -Chief

Prof. D.Sc. Elena SHOYKOVA

Editors

Prof. D.Sc. Georgi POPOV

Prof. D.Sc. Ivan KOROBKO

Prof. D.Sc. Ivan UZUNOV

Prof. D.Sc. Ivan YACHEV

Prof. D.Sc. Ketii PEEVA

Prof. D.Sc. Gantcho BOJILOV

Prof. D.Sc. Evelina PENCHEVA

Prof. D.Sc. Mladen VELEV

Prof. Ph.D. Boncho BONEV

Prof. Ph.D. Ivo MALAKOV

Prof. Ph.D. Ognyan NAKOV

Organizing Secretary

Eng. Maya STOYCHEVA

Технически университет-София
София 1000, бул. "Кл. Охридски" 8
България <http://tu-sofia.bg>

Technical University of Sofia
Sofia, 1000, boul. Kliment Ohridski 8
Bulgaria <http://tu-sofia.bg>



© Технически Университет-София
© Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА

форум

„ДНИ НА НАУКАТА НА ТУ-СОФИЯ“ Созопол'2018

МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОМАТИКА'2018, ФА

Созопол 01.06. - 03.06.2018

ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ

почетен председател

Емил Николов (BG)

председател

Нина Николова (BG)

членове

Петко	Петков	(BG)	Хасан	Абуайса	(FR)
Тодор	Йонков	(BG)	Даниел	Жоли	(FR)
Снежана	Йорданова	(BG)	Жил	Гонкалвес	(FR)
Валери	Младенов	(BG)	Николай	Христов	(FR)
Емил	Гарипов	(BG)	Стефан	Козак	(SK)
Пламен	Цветков	(BG)	Алена	Козакова	(SK)
Живко	Георгиев	(BG)	Снежана	Терзиева	(BG)
Михо	Михов	(BG)	Теофана	Пулева	(BG)
Васил	Гълъбов	(BG)			

ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

председател

Владислав Славов

зам. председател

Антония Панделова

членове

Александър Ищев

Владимир Христов

Станислав Енев

ТЕХНИЧЕСКИ КОМИТЕТ

координатор

Антония Панделова

системен администратор

Александър Маринчев

организационен секретар

Мая Стойчева

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA

FACULTY OF AUTOMATICS

Forum

„DAYS OF SCIENCE OF TU-SOFIA“ Sozopol'2018

FACULTY OF AUTOMATICS

INTERNATIONAL CONFERENCE

AUTOMATICS'2018, FA

June 01 - 03, 2018, Sozopol, Bulgaria

PROGRAM COMMITTEE

honorable chair of PC

Emil Nikolov (BG)

chair of PC

Nina Nikolova (BG)

members of PC

Petko	Petkov	(BG)	Hassane	Abouaïssa	(FR)
Todor	Ionkov	(BG)	Daniel	Jolly	(FR)
Snejana	Yordanova	(BG)	Gilles	Gonçalves	(FR)
Valeri	Mladenov	(BG)	Nicolai	Christov	(FR)
Emil	Garipov	(BG)	Stefan	Kozak	(SK)
Plamen	Tzvetkov	(BG)	Alena	Kozáková	(SK)
Jivko	Georgiev	(BG)	Snejana	Terzieva	(BG)
Mikho	Mikhov	(BG)	Teofana	Puleva	(BG)
Vasil	Galabov	(BG)			

ORGANIZING COMMITTEE

chair of OC

Vladislav Slavov

vice chair of OS

Antonia Pandelova

members of OC

Aleksandar Ishtev

Vladimir Hristov

Stanislav Enev

TECHNICAL COMMITTEE

coordinator

Antonia Pandelova

system administrator

Alexandar Marinchev

organizing secretary

Maya Stoycheva

НЕЗАВИСИМ СИНТЕЗ НА ПИД РЕГУЛАТОР ЗА ТРИМЕРЕН ОБЕКТ

Божидар Раков

Резюме: Голяма част от индустриалните системи имат многомерен характер. Често такива обекти се управляват с многоконтурни ПИД регулатори, по децентрализирана схема на управление. В настоящата работа е показан сравнително прост инженерен подход за автоматична настройка при минимална информация за обекта на управление.

Ключови думи: Многомерни системи за управление, ПИД, Независим синтез.

INDEPENDENT DESIGN OF PID CONTROL FOR THREE DIMENSIONAL OBJECT

Bozhidar Rakov

Abstract: Most of the industrial systems are multivariable by nature. Often this kind of systems are controlled by multiloop PID controllers in a decentralized scheme. The current work shows reasonably simple engineering approach for auto-tuning with minimal information about the process.

Keywords: Multivariable control systems, PID, Independent design.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Въпреки големия изследователски интерес и развитие на по-мощни методи, ПИД регулаторът все още е предпочитан в индустриалните системи. Това се дължи основно на простата структура, малкия брой параметри за настройка, което го прави лесен при практическа реализация. Освен това голяма част от известните методи за синтез на ПИД са базирани на прости модели, което е полезно в случай на невъзможност за провеждане на сериозна идентификационна процедура, поради технически или икономически причини.

Основен проблем при управлението на многомерни системи е влиянието между отделните контури. Поява на промяна в задание, наличие на шум, смущение, промяна на параметри в контур i се отразява на всички останали контури, а те формират обратна реакция към i -тия контур поради наличието на обратни връзки. Третирането на този проблем е от основно значение за успешното прилагане на ПИД закон за управление на многомерни системи. В литературата са известни различни подходи – пълно динамично декуплиране, декуплиране за конкретен честотен диапазон или статично декуплиране [1], ефективен отворен контур [2], *sequential loop closing*, *detuning* и други. Настоящата работа се базира на независим синтез.

2. НЕЗАВИСИМ СИНТЕЗ

Същността на независимия синтез се изразява в настройка на n на брой независими управляващи устройства при наличие на някакви ограничения, наложени от връзките между отделните контури на обекта [3]. При този подход възникват два основни проблема. Колкото по-силно е влиянието между контурите, толкова по-консервативни ще са получените ПИД регулатори. В допълнение липсата на информация за управляващите устройства в останалите контури също би довело до понижено качество на процесите на затворената система за управление. В настоящата работа е предложен подход, който да осигури лесна настройка, устойчивост и задоволително качество на затворената система при минимална информация.

Нека обектът за управление се описва с предавателна матрица (1) където m е броят входове, а r е броят изходи. За реализация на децентрализирано управление е необходимо предавателната матрица да е квадратна т.е. $m=r$.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & \dots & G_{1m}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ G_{r1}(s) & \dots & G_{rm}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

При известна предавателна матрица в установен режим се предлага корекция на обекта по следния начин [4] (2).

$$G_{sh}(s) = G(s).D, \quad (2)$$

където D е постоянна числова матрица, която се намира от (3). Съществуването на D зависи от възможността за обръщане на матрицата $G(0)$. Обръщането на матрица е трудна операция, особено ако елементите представляват предавателни функции. В уравнение (3) става въпрос за числова матрица.

$$D = G^{-1}(0). \quad (3)$$

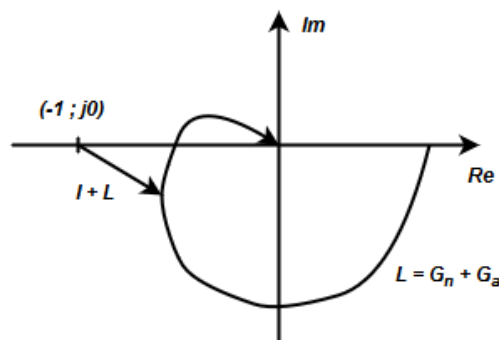
Коригираният обект $G_{sh}(s)$ се характеризира с липса на връзка в статичен режим между отделните контури на управление. Това води до значително намаляване на цялостното влияние в многомерния обект, което от своя страна означава, че предавателната матрица на коригирания обект придобива диагонално-доминираща форма и по-специално единична матрица в статичен режим. В допълнение не е необходимо да се прави анализ и избор на входно-изходни двойки, което е задължителна първа стъпка при многоконтурно управление.

Ако се приеме, че след направената корекция влиянието на контурите е слабо, би било удобно за целите на независимия синтез, многомерната система да се разглежда като n на брой едномерни системи с наличие на адитивна неопределеност (4).

Трябва да се отбележи, че $G_a^i(s)$ не е реална неопределеност в пълния смисъл на думата, но този начин на трактовка на задачата значително улеснява синтеза на независими управляващи устройства при наложени ограничения от взаимните връзки. За всеки модел $G_n^i(s)$ може да се синтезира ПИД регулатор, който осигурява устойчивост и конкретен запас при наличие на адитивна неопределеност. Един лесен подход е осигуряване на конкретна стойност на максимума на фун-

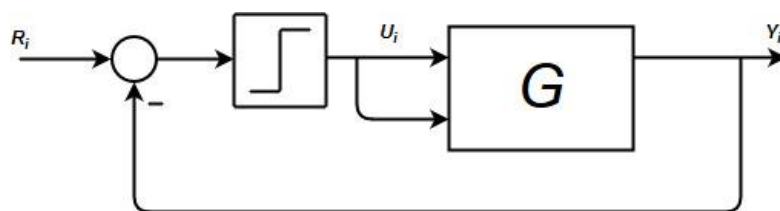
кцията на чувствителност S , който е пряко свързан със запасите по модул и фаза. Реципрочната стойност на $\max|S|$ е най-малкото разстояние до точката на Найкуист.

$$\left| \begin{aligned} G_p^i(s) &= G_n^i(s) + G_a^i(s) \\ G_n^i(s) &= G_{sh}^{ii}(s) \\ G_a^i(s) &= \sum_{i=1, j=1}^{r, m} G_{sh}^{ij}(s), i \neq j \end{aligned} \right|. \quad (4)$$



Фиг.1. Фазово-честотна характеристика

Вторият метод на Астрьом и Хаглунд представлява един такъв подход. За да се осигури запас по устойчивост за номиналния модел $G_n^i(s)$ при наличие на адитивна неопределеност $G_a^i(s)$ е необходимо експериментът в затворен контур с реле да се извърши по следната схема, фиг.2.



Фиг.2. Схема за автоматична настройка

При настройка на i -тия контур обратната връзка се затваря по i -тия вход и изход, но управляващият сигнал от релейния елемент се подава към всички входове на обекта. При тази схема на автоматична настройка се търси ПИД регулатор, който да гарантира, че ходографът на контура $G_p^i(s)$ не обхваща точката на Найкуист.

Погледнато от друга гледна точка, номиналният модел $G_n^i(s)$ е устойчив при наличието на адитивна неопределеност $G_a^i(s)$. Още веднъж трябва да се отбележи, че тази трактовка на задачата има смисъл само ако влиянието между контурите е малко.

В настоящата работа се приема, че това изискване е изпълнено с помощта на извършената корекция (2).

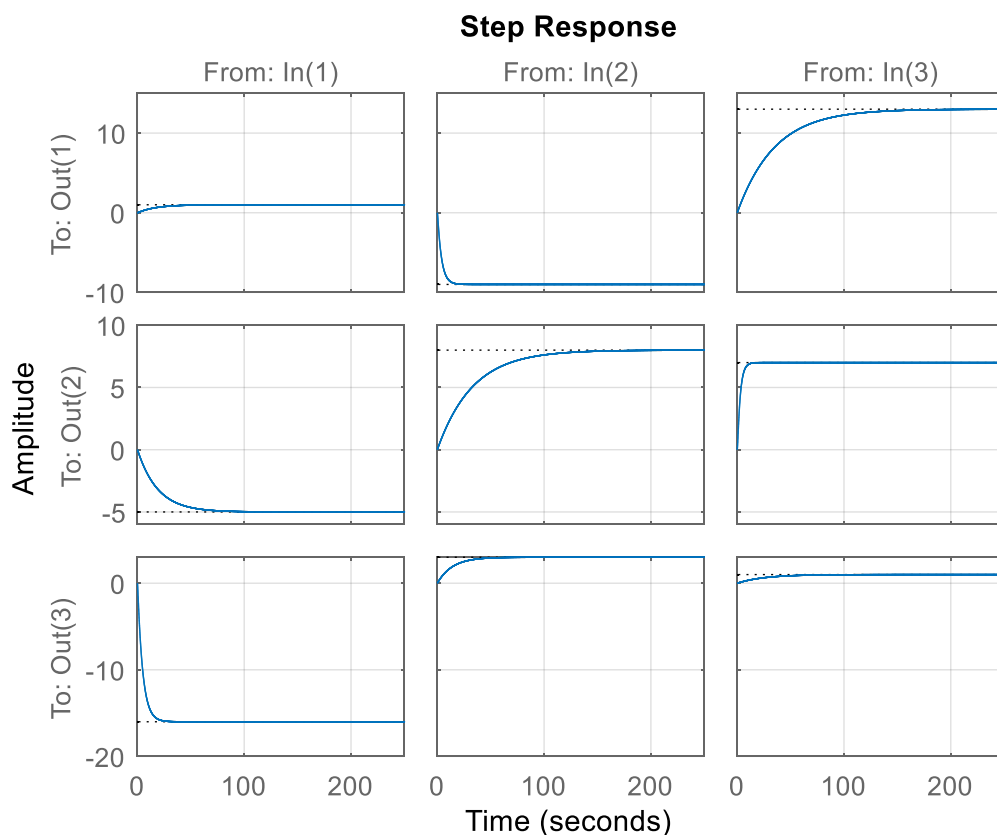
3. ПРИМЕР

Нека е зададен следният обект за управление (5). Предполага се, че динамиката на обекта не е известна, налична е само предавателната матрица в статичен режим (6).

$$G(s) = \begin{vmatrix} \frac{1}{6s^2 + 17s + 1} & \frac{-9}{s^2 + 4s + 1} & \frac{13}{3s^2 + 35s + 1} \\ \frac{-5}{2s^2 + 19s + 1} & \frac{8}{s^2 + 33s + 1} & \frac{7}{s^2 + 3s + 1} \\ \frac{-16}{s^2 + 5s + 1} & \frac{3}{s^2 + 14s + 1} & \frac{1}{3s^2 + 25s + 1} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

$$G = \begin{vmatrix} 1 & -9 & 13 \\ -5 & 8 & 7 \\ -16 & 3 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

На фиг.3 са показани преходни процеси при стъпално въздействие, приложено поотделно на всеки вход. Влиянието между отделните канали е силно, наблюдават се процеси с отрицателен коефициент на пропорционалност. Обектът може да се разглежда като ректификационна колона с процеси на нагряване и охлаждане.



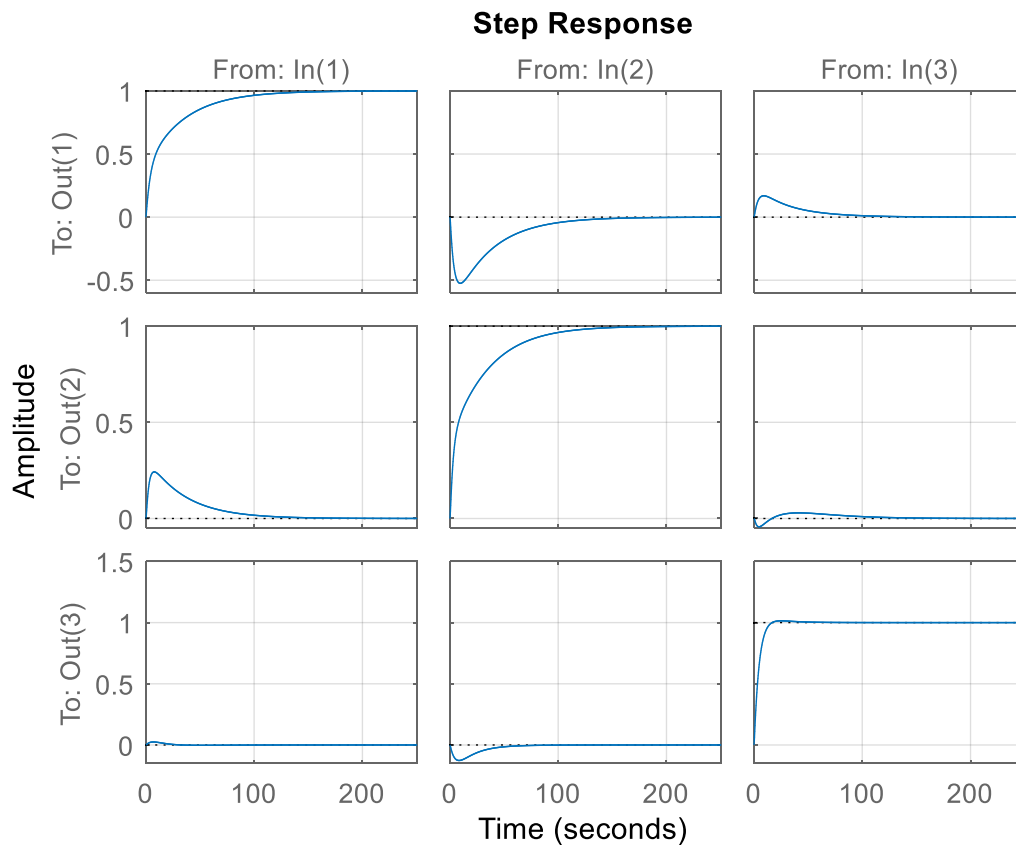
Фиг.3. Преходни процеси на обекта за управление при стъпален входен сигнал

Като първа стъпка се извършва корекция в статиката, използвайки (3). Матри-

цата (6) е от пълен ранг следователно съществува нейната обратна (7).

$$D = \begin{bmatrix} -0.0054 & 0.0198 & -0.069 \\ -0.0442 & 0.0864 & -0.0298 \\ 0.0467 & 0.0583 & -0.0153 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Преходните процеси на коригирания обект са показани на фиг.4.

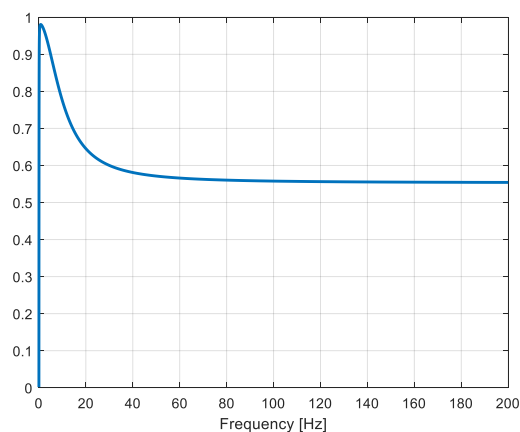


Фиг.4. Преходни процеси на коригирания обект

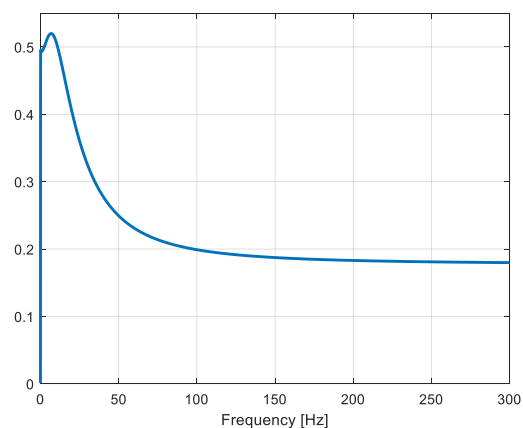
Взаимните връзки значително са намалели. Липсва връзка в статичен режим. Предавателната матрица на коригирания обект придобива диагонално-доминираща форма. Нека многомерната задача се разгледа като 3 едномерни. Големината на пренебрегнатата динамика се оценява с модел с мултипликативна неопределеност, защото е по-информативна от адитивната, като не се забравя че двата типа неопределености са математически еквивалентни.

Неопределеността по първи вход има големи стойности, което ще доведе до консервативни резултати след синтеза, дори е възможно и лошо качество на процесите. Стойностите по втори и трети вход са допустими.

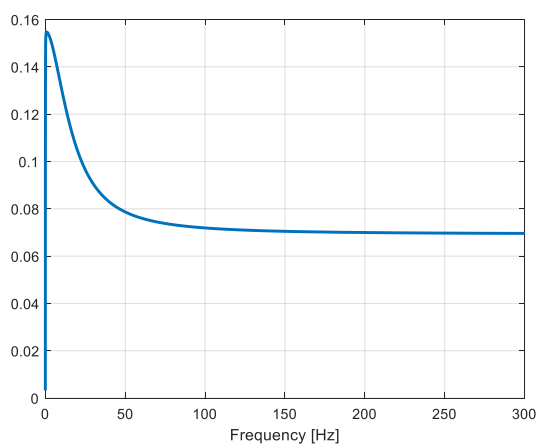
Извършва се автоматична настройка на три ПИД регулатора по втория метод на Астрьом-Хаглунд [5] по схемата показана на фиг.2. Допълнително се поставя филтър (8) на изхода на всеки регулатор [6]. Това прави управляващите устройства строго правилни, осигурява шумоустойчивост и по-голям наклон на амплитудно-честотната характеристика на отворения контур във високочестотния диапазон. Получените параметри са дадени в табл.1.



Фиг.5. Мултипликативна неопределеност по първи вход



Фиг.6. Мултипликативна неопределеност по втори вход



Фиг.7. Мултипликативна неопределеност по трети вход

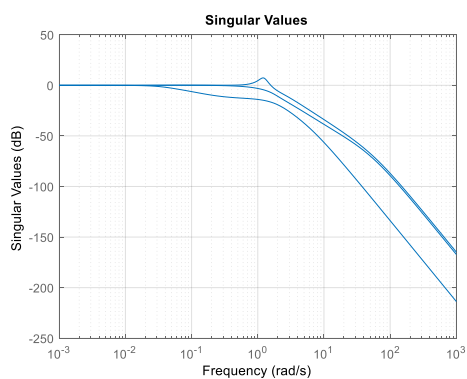
$$F_i(s) = \frac{1}{(T_{fi}s + 1)^2}. \quad (8)$$

Времеконстантата на филтъра е избрана 20 пъти по-малка от времеконстантата на диференциране за всеки ПИД.

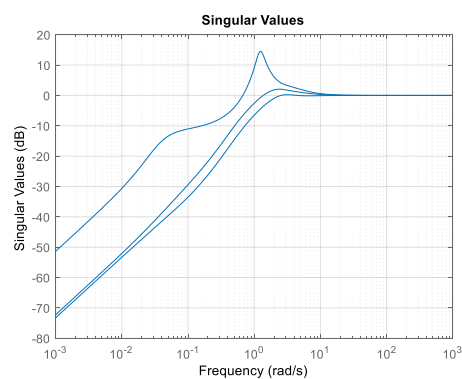
Таблица 1
Параметри на ПИД регулатори

	b	K_p	T_i	T_d	T_f
ПИД1	0.2648	5.8619	15.8555	3.9968	0.1998
ПИД2	0.264	6.2688	1.5344	0.3869	0.0193
ПИД3	0.2624	7.1457	1.555	0.3924	0.0196

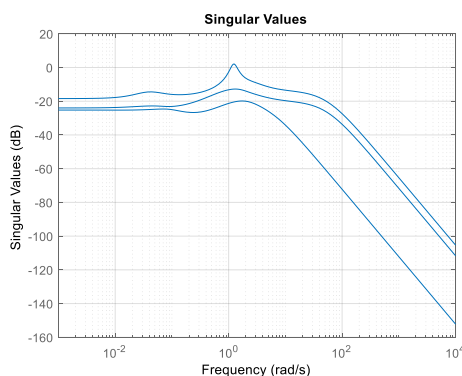
Честотните характеристики на сингулярните числа на функциите на чувствителност на една многомерна система дават поглед върху качеството на затворената система. На фиг.8, фиг.9 и фиг.10 са показани функцията на допълнителна чувствителност T , функцията на чувствителност S и функцията на чувствителност на входа на обекта KS .



Фиг.8. Функция на допълнителна чувствителност



Фиг.9. Функция на чувствителност



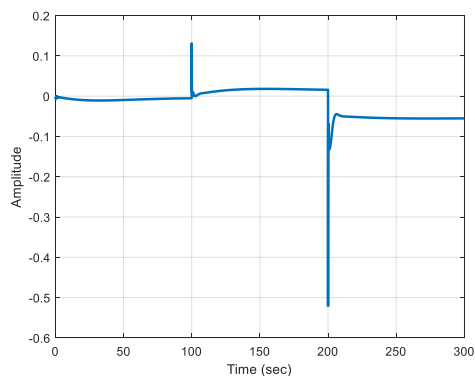
Фиг.10. Функция на чувствителност на входа на обекта KS

Впечатление прави големият пик на функцията на чувствителност S . Това показва, че съществува честотен диапазон в който качеството на процеса на грешката и на процесите по смущение силно се влошава. Интересен резултат се наблюдава на фиг.10. Функцията на чувствителност KS дава оценка на енергията за управление. Може да се види, че затворената система за управление ще се характеризира с малки управляващи сигнали в широк честотен диапазон. Малките управляващи сигнали от своя страна биха довели до слабо влияние между отделните контури на управление.

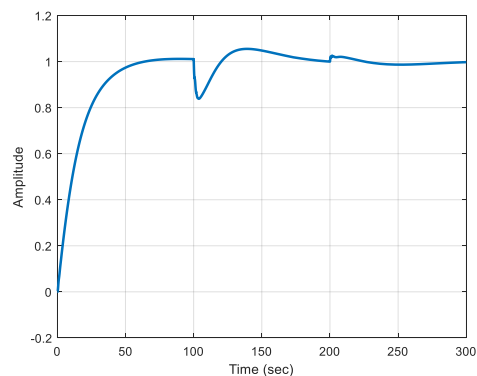
Освен с честотни характеристики качеството на процесите в затворената система се изследват във времевата област. Подават се стъпални въздействия с амплитуда 1 последователно на всеки вход през 100 секунди. Реакциите на изходите, както и техните управляващи сигнали са показани на фигури от 11 до 16.

Преходните процеси по втори и трети вход се характеризират с голямо бързодействие и добро отработване на процесите възникнали от взаимните връзки между контурите. Качеството на процесите в първия контур е по-консервативно особено при отработване на процеси възникнали от връзката му с втория контур. Този резултат не е изненада на фона на фиг.4 и фиг.5. Все пак, имайки се предвид минималната информация и лесната процедура за синтез може да се приеме, че качеството е задоволително.

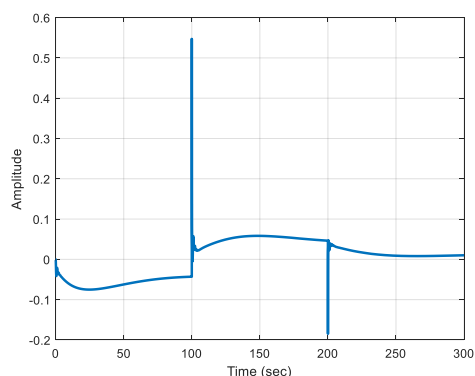
Интересно е да се провери работата на затворената система при наличие на реална (реална се има предвид в смисъла на съществуваща, а не като противоположност на комплексна неопределеност) неопределеност, а не изкуствено приетата на етапа на синтез под формата на взаимни връзки. За целта обектът за управление се представя като модел с неструктурирана входна неопределеност с големина 20%. Извършени са 50 симулации, резултатите са показани на фигури от 17 до 22.



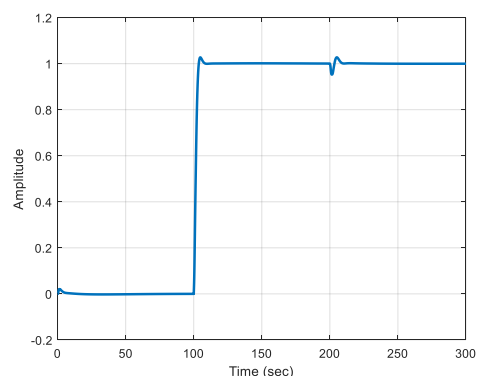
Фиг.11. Управляващ сигнал по първи вход



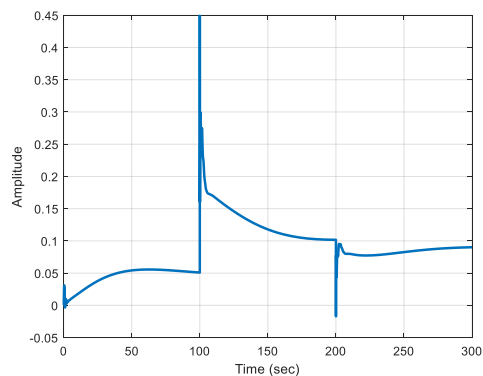
Фиг.12. Преходен процес на първи изход



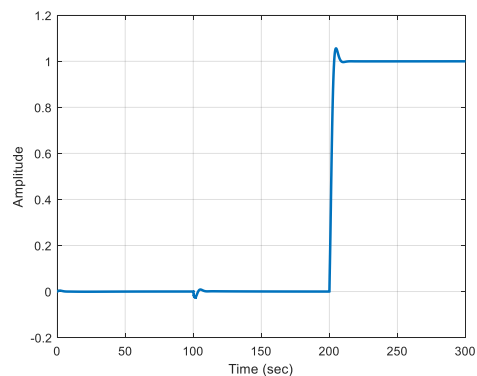
Фиг.13 Управляващ сигнал по втори вход



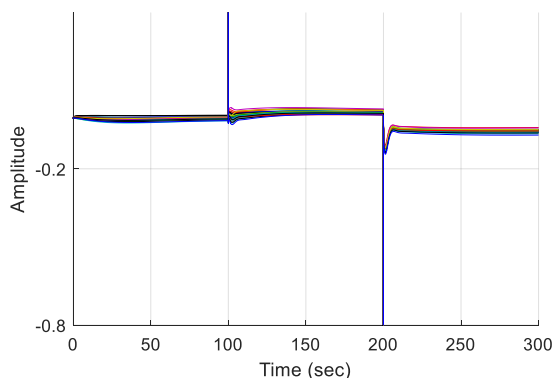
Фиг.14 Преходен процес на втори изход



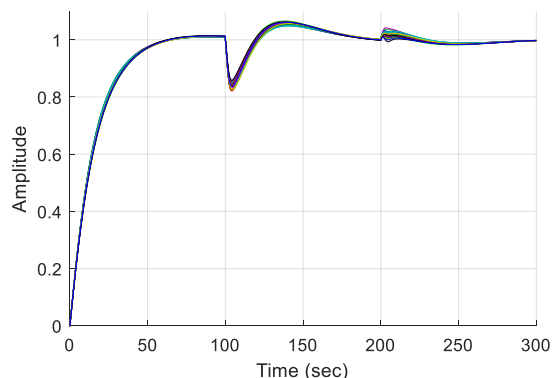
Фиг.15. Управляващ сигнал по трети вход



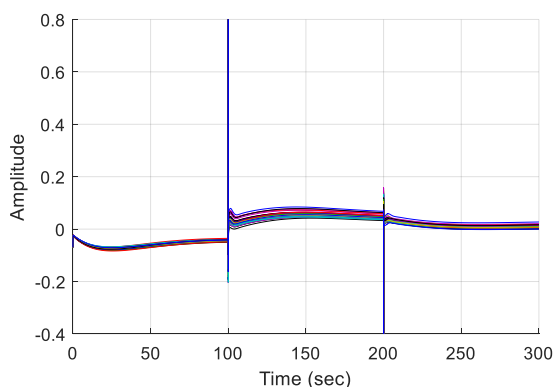
Фиг.16. Преходен процес на трети изход



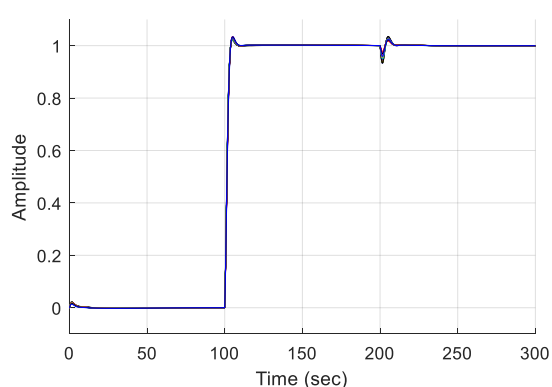
Фиг.17. Управляващ сигнал с неопределеност – първи вход



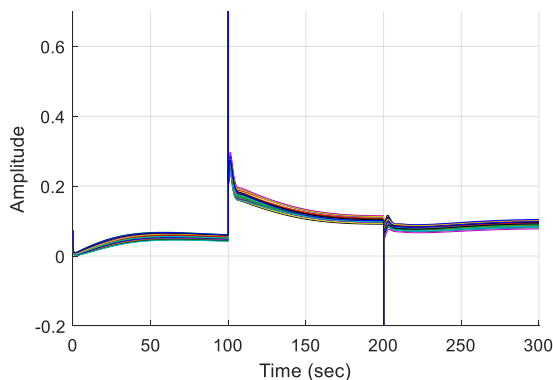
Фиг.18. Преходен процес с неопределеност – първи изход



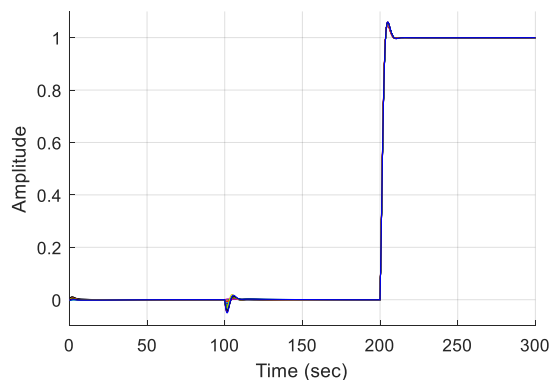
Фиг.19. Управляващ сигнал с неопределеност – втори вход



Фиг.20. Преходен процес с неопределеност – втори изход



Фиг.21. Управляващ сигнал с неопределеност – трети вход



Фиг.22. Преходен процес с неопределеност – трети изход

Не се наблюдава значително влошаване на процесите в затворената система. Разбира се това не означава, че затворената система притежава робастно качество. Трябва да се има предвид и възможността за извършване на нова настройка на трите ПИД регулатора при значителна промяна на параметрите. Да не се забравя и необходимостта от познаване на предавателната матрица в установен режим и възможността за намиране на нейната обратна.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа бе показан сравнително прост инженерен подход за синтезиране на ПИД управляващо устройство при многомерна система. Процедурата бе разделена на две стъпки. На първия етап се извършва корекция на обекта в статичен режим, като е необходимо познание за предавателната матрица в установен режим. След извършване на корекцията се предполага, че влиянието между отделните контури е слабо. Извършва се независим синтез на три ПИД регулатора за едномерни системи при наличие на адитивна неопределеност под формата на влияние между контурите. Бяха показани честотни характеристики на сингулярните числа на функциите на чувствителност, преходни процеси на затворената система дори и при наличие на неопределеност в обекта. В конкретния случай този подход дава добри резултати, при минимална информация за обекта на управление.

Не трябва да се забравя, че този подход към задачата е възможен само ако влиянието между контурите е малко, в противен случай преходните процеси се характеризират с консервативно качество, какъвто бе случаят по първия вход на управление в изложения пример. Освен това адитивната неопределеност под формата на динамика от кръстосаните връзки е функция от управляващите сигнали в съседните контури.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2017 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Multivariable Feedback Control: Analysis and Design 2nd Edition – *Sigurd Skogestad, Ian Postlethwaite*, Wiley & Sons 2001
- [2] Effective Open-loop Transfer Function method for design of multi-loop PI/PID controller for interacting multivariable processes – *A. Harsha Ragini, K. Rajesh, B. Hari Krishna*
- [3] Robust Performance of Decentralized Control Systems by Independent Designs – *Sigurd Skogestad, Manfred Morari*, Automatica Vol. 25, стр. 119-125, 1989
- [4] Advanced PID Control – *Karl J. Astrom, Tore Hagglund*, The Instrumentation, Systems and Automation Society 2006
- [5] PID Controllers: Theory, Design and Tuning 2nd Edition - *Karl J. Astrom, Tore Hagglund*, Instrument Society of America 1995
- [6] Practical PID Control – *Antonio Visioli*, Springer 2006

Автор: Божидар Раков, маг. инж. докторант, кат. „Системи и управление“, Факултет Автоматика, Технически Университет-София, E-mail address: brakov@tu-sofia.bg

Постъпила на 27.04.2018 г.

Рецензент: доц. д-р Цоньо Славов