



ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

том 66, книга 2, 2016

**МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОМАТИКА'2016, ФА
ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА
03 - 05 юни 2016 г., Созопол, България**



PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 66, Issue 2, 2016

**INTERNATIONAL CONFERENCE AUTOMATICS'2016, FA
FACULTY OF AUTOMATICS
June 03 - 05, 2016, Sozopol, Bulgaria**

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

главен редактор

проф. д-н Емил НИКОЛОВ

зам. главен редактор

проф. д-н Елена ШОЙКОВА

членове

проф. д-н Георги ПОПОВ

проф. д-н Иван КОРОБКО

проф. д-н Иван УЗУНОВ

проф. д-н Иван ЯЧЕВ

проф. д-н Кети ПЕЕВА

проф. д-н Ганчо БОЖИЛОВ

проф. д-р Бончо БОНЕВ

проф. д-р Евелина ПЕНЧЕВА

проф. д-р Иво МАЛАКОВ

проф. д-р Младен ВЕЛЕВ

проф. д-р Огнян НАКОВ

секретар-организатор

инж. Мария ДУХЛЕВА

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. Ph.D. Boncho BONEV

Prof. Ph.D. Evelina PENCHEVA

Prof. Ph.D. Ivo MALAKOV

Prof. Ph.D. Mladen VELEV

Prof. Ph.D. Ognyan NAKOV

Organizing Secretary

Eng. Maria DUHLEVA

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'2016

МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОМАТИКА'2016, ФА

Созопол 03.06. - 05.06.2016

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)	Иван	Калайков	(SE)
Емил	Гарипов	(BG)	Николай	Христов	(FR)
Пламен	Цветков	(BG)	Стефан	Козак	(SK)
Живко	Георгиев	(BG)	Алена	Козакова	(SK)
Михо	Михов	(BG)	Снежана	Терзиева	(BG)
Васил	Гълъбов	(BG)	Теофана	Пулева	(BG)

ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ

председател

Владислав Славов

зам. председател

Антония Панделова

членове

Георги	Ценов
Александър	Ищев
Евтим	Йончев
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'2016

FACULTY OF AUTOMATICS

INTERNATIONAL CONFERENCE

AUTOMATICS'2016, FA

June 03 - 05, 2016, 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)	Ivan	Kalaykov	(SE)
Emil	Garipov	(BG)	Nicolai	Christov	(FR)
Plamen	Tzvetkov	(BG)	Stefan	Kozak	(SK)
Jivko	Georgiev	(BG)	Alena	Kozáková	(SK)
Mikho	Mikhov	(BG)	Snejana	Terzieva	(BG)
Vasil	Galabov	(BG)	Teofana	Puleva	(BG)

ORGANIZING COMMITTEE

chair of OC

Vladislav Slavov

vice chair of OS

Antonia Pandelova

members of OC

Georgi Tsenov

Aleksandar Ishtev

Evtim Jonchev

Stanislav Enev

TECHNICAL COMMITTEE

coordinator

Antonia Pandelova

system administrator

Alexandar Marinchev

organizing secretary

Maya Stoycheva

ПОДХОД ЗА ДВУМЕРНО ПИД УПРАВЛЕНИЕ С ДЕКУПЛИРАЩИ ФИЛТРИ

Божидар Раков, Георги Ружеков

Резюме: Показан е подход за управление на двумерен обект с използване на декуплиращи филтри. Този подход е приложен върху двумерен обект, представен чрез математически модел. Даден е метод за синтез на системата за управление и са направени симулационни изследвания. Получените резултати са сравнени с резултати от многомерен H_∞ регулатор.

Ключови думи: ПИД регулатор, многомерно управление, декуплиращи филтри

APPROACH FOR TWO-DIMENSIONAL PID CONTROL WITH DECOUPLING FILTERS

Bozhidar Rakov, Georgi Ruzhekov

Abstract: An approach for control of two-dimensional object using a decoupling filter was shown. This approach is applied to a two-dimensional object represented by a mathematical model. Method of control system design was shown. The result was compared with results from MIMO H_∞ regulator.

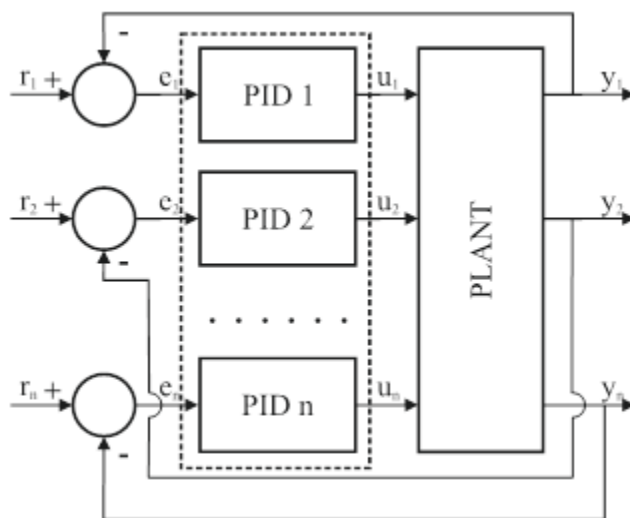
Keywords: PID Control, MIMO Control, Decoupling Filters

1. ВЪВЕДЕНИЕ

ПИД законът за управление е масово използван в индустриалните системи. Факторите, които са го наложили като най-употребяван са простата структура, лесната настройка на параметрите (автоматизирано и ръчно), натрупаният с годините опит както и наличието на много хардуерно реализирани регулатори и библиотеки при програмна реализация, ПИД регулаторите имат подчертано робастни свойства. Основното му приложение е при системи с един вход и един изход, но е често срещан и при системи с много входове и изходи, въпреки проблемите, които възникват при настройката и реализацията. Основен проблем при управлението на многомерни обекти е наличието на свързаност между отделните контури. Всякакви промени, възникващи в един от контурите (промяна на задание, наличие на смущение, промяна на параметрите на обекта за управление или на регулатора) се отразяват на всички останали в определена степен. Настоящият материал дава подход за реализация на многомерно управление с ПИД регулатори с използване на декуплиращи филтри. Показан е и алтернативен вариант за система за управление, базирана на H_∞ регулатор. Показани са и резултати, получени при промяна на параметрите на обекта.

2. ИЗПОЛЗВАНИ ПОДХОДИ

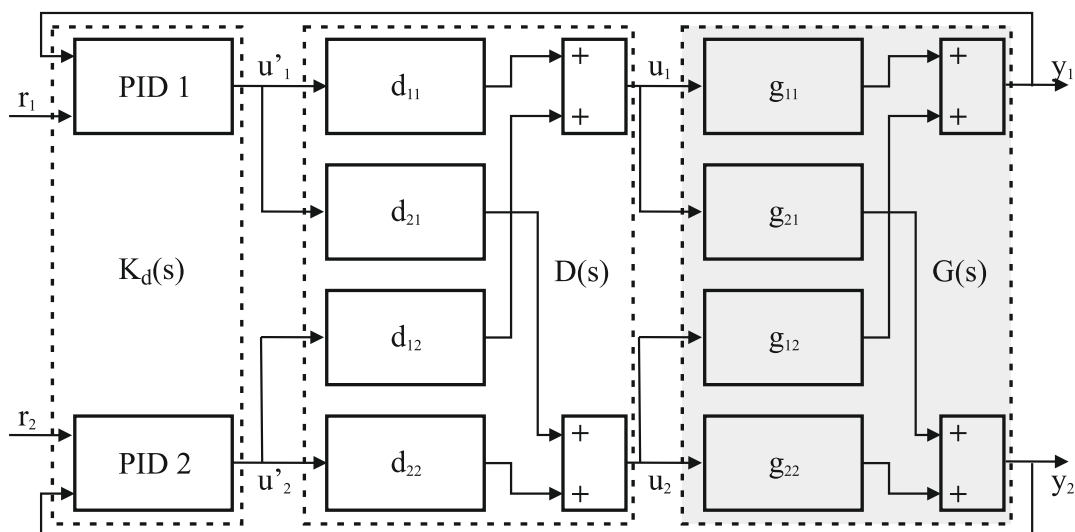
Най-простият вариант за управление на многомерен обект с ПИД закон е чрез използване на отделни регулатори за всеки контур, без да се отчитат взаимните връзки, фиг.1.



Фиг.1. Отделни регулатори

Предполага се, че стабилизирането на всеки отделен контур води до стабилизация на цялата затворена многомерна система. Получените резултати често водят до незадоволително качество или дори неустойчиво поведение, поради игнориране динамиката на взаимните връзки в обекта.

Често прилаган метод за решаване проблема с взаимните връзки в обекта е използването на декупиращи филтри, наречени още компенсатори, фиг.2.



Фиг.2. Регулатори с декупиращи филтри

Чрез въвеждането на компенсатор предавателната матрица на съединението $G(s)D(s)$ (където $G(s)$ е обектът, а $D(s)$ е компенсаторът) се превръща в диагонална или диагонално-доминираща, което отговаря на N на брой независими или слабо свързани едномерни системи. Тогава синтезът се свежда до намиране на N на брой ПИД регулатора за разширения обект $\tilde{G}(s) = G(s)D(s)$. Най-известният метод за декупиране е Lineal Decoupling [1] линейно или пряко де-

куплиране). При него се търси цялостно елиминирание на взаимните връзки. За двумерен обект елементите на компенсатора могат да се получат по показания начин.

$$\begin{bmatrix} \tilde{G}_{11}(s) & \tilde{G}_{12}(s) \\ \tilde{G}_{21}(s) & \tilde{G}_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{11}(s) & d_{12}(s) \\ d_{21}(s) & d_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

След извършване на матрично умножение елементите на разширения обект $\tilde{G}_{ij}$ се записват като (2):

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{11}(s) &= G_{11}(s)d_{11}(s) + G_{12}(s)d_{21}(s) \\ \tilde{G}_{12}(s) &= G_{11}(s)d_{12}(s) + G_{12}(s)d_{22}(s) \\ \tilde{G}_{21}(s) &= G_{21}(s)d_{11}(s) + G_{22}(s)d_{21}(s) \\ \tilde{G}_{22}(s) &= G_{21}(s)d_{12}(s) + G_{22}(s)d_{22}(s) \end{aligned} \quad (2)$$

За елиминирание на взаимните връзки е необходимо елементите, които не се намират на главния диагонал да са равни на нула (3).

$$\tilde{G}_{12}(s) = 0, \tilde{G}_{21}(s) = 0 \quad (3)$$

Достига се до система от две уравнения с четири неизвестни $d_{ij}(s)$. Две от неизвестните се полагат равни на единица $d_{11}(s) = d_{22}(s) = 1$. Уравнения (3) добиват вида (4).

$$\begin{aligned} G_{12}(s) + d_{12}(s)G_{11}(s) &= 0 \\ d_{21}(s)G_{22}(s) + G_{21}(s) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

След като се реши системата по отношение на $d_{ij}(s)$ се достига до конкретните изрази (5).

$$\begin{aligned} d_{12}(s) &= -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}, \\ d_{21}(s) &= -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)}. \end{aligned} \quad (5)$$

където $g_{ij}(s)$ представляват предавателните функции на обекта по отделните контури. Както може да се види от (5) декуплиращите филтри пряко зависят от модела на обекта. Това води до редица недостатъци. На първо място е необходимостта от точно познаване на модела на обекта. В идеалния случай на съвпадение между модел и обект, компенсацията би била пълна, което отговаря на диагонална предавателна матрица. В действителност винаги съществува някаква немоделирана динамика, което води до разминаване между обекта и него-

вия модел. Тогава предавателната матрица на разширения обект става диагонално-доминираща. Колкото по-точен е моделът, толкова по-малко е влиянието на взаимните връзки. При наличието на неустойчиви полюси и нули, получените компенсатори ще имат неминимално-фазов или неустойчив характер, което е недопустимо, защото те могат да се разглеждат като част от регулатора. Ако по един или няколко от контурите има закъснение е възможно то да се отрази в знаменател на декупиращ филтър. В този случай предавателната функция става ирационална. Различието в редовете също може да се окаже проблем. Възможен е случай на неправилни предавателни функции на компенсатора, които от своя страна са физически нереализуеми. За борба с горепосочените проблеми обикновено се използват апроксимации или факторизации на предавателните функции, компенсиране само на отделни контури или дори само на статиката. Един недостатък, който няма решение е сложността на структурата. С увеличаване броя на входовете и изходите на обекта за управление, структурата на декупиращия филтър нараства значително.

Както може да се види от фиг.2, компенсаторът се намира на входа на обекта. Управляващите сигнали в този случай може да се опишат със следните уравнения (6).

$$\begin{aligned} U_1(s) &= U_{PID1}(s) + U_{d_{12}}(s) \\ U_2(s) &= U_{PID2}(s) + U_{d_{21}}(s) \end{aligned} \quad (6)$$

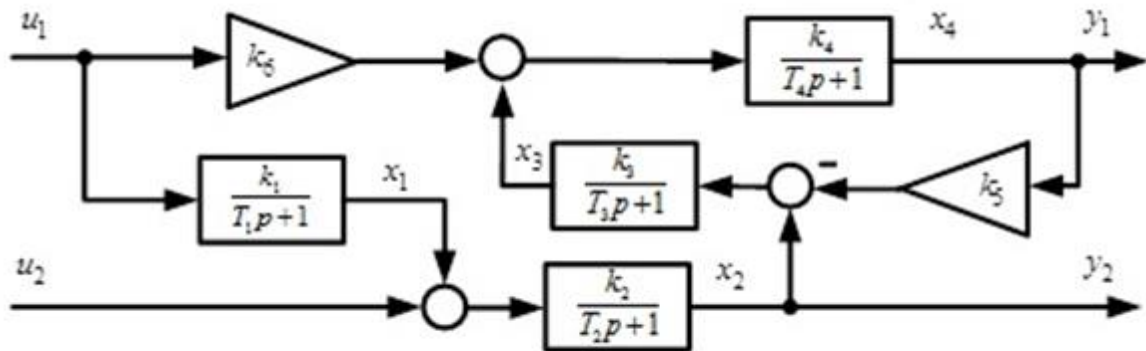
където $U_1(s)$ и $U_2(s)$ са сигналите на входа на обекта, $U_{PID1}(s)$ и $U_{PID2}(s)$ са управляващите сигнали изработени от ПИД регулаторите, $U_{d_{12}}(s)$ и $U_{d_{21}}(s)$ са управляващите сигнали необходими за компенсация на взаимните връзки в обекта. Важен въпрос, на който трябва да се обърне внимание, е ограничението на сигналите на входа на обекта (изходните сигнали от регулатора). Тези сигнали обикновено представляват физически величини, които заемат стойности в ограничен интервал поради своя характер или от технико-икономическа гледна точка. Наличието на допълнителните сигнали $U_{d_{12}}(s)$ и $U_{d_{21}}(s)$ в уравнения (6) могат да допринесат за по-лесно достигане и надминаване на граничните стойности на управляващите сигнали. След преминаване на тези гранични стойности затворената система за управление започва да работи неефективно поради две причини. Регулаторите работят в режим на интегрално насищане (няма критерий, по който насищането на интегралната съставка да бъде спряно) и не подават адекватни управляващи сигнали, необходими за отработване на грешките в съответните контури. Управляващите сигнали необходими за компенсация на взаимните връзки също не отговарят на динамиката на обекта, при което качеството на процесите в затворената система за управление се влошават допълнително.

Може да се премине към синтез на многомерен регулатор. Често срещани са линейно-квадратичният регулатор, H_∞ -регулатор, μ -регулатор. При тези закони за управление получените управляващи устройства са оптимални по даден критерий. Обикновено получените резултати са много добри. Ефектите от влиянието между контурите са елиминирани или силно намалени. Затворената сис-

тема се характеризира с робастни свойства. Но дори и тук проблемът с ограничените сигнали на входа на обекта остава в сила. При синтеза на тези регулатори може да се държи сметка за управляващите сигнали, но то не е в явен вид. Въпреки натрупания опит в тази област многомерните регулатори все още остават неясни за инженерите, много трудни за настройка и поради тази причина са много по-малко използвани от ПИД регулаторите. Основен принос за това имат високият ред на получените управляващи устройства и липсата на пряка връзка между параметрите на регулатора и поведението на обекта. Получените регулатори обикновено са от ред много по-висок от този на обекта. Предлагат се методи за редуциране на реда, но това води до разминаване между синтезирания регулатор и редуцирания.

3. ПРИМЕР

Зададен е следният обект за управление, показан на фиг.3.



Фиг.3. Обект за управление

Параметрите на обекта са:

$$k_1 = 1; k_2 = 3; k_3 = 0.5; k_4 = 3; k_5 = 10; k_6 = 5.5;$$

$$T_1 = 0.3; T_2 = 0.5; T_3 = 1; T_4 = 0.7;$$

Предавателните функции, описващи обекта са:

$$G_{11} = \frac{23.571(s + 3.721)(s^2 + 2.612s + 2.28)}{(s + 3.33)(s + 2)(s^2 + 2.429s + 22.86)} \quad G_{12} = \frac{12.857}{(s + 2)(s^2 + 2.429s + 22.86)}$$

$$G_{21} = \frac{20}{(s + 2)(s + 3.333)} \quad G_{22} = \frac{6}{s + 2}$$

Като се използват уравнения (5) се получава декупиращ филтър от вида, показан на фиг.2:

$$d_{12}(s) = -\frac{0.54545(s + 3.333)}{(s + 3.721)(s^2 + 2.621s + 2.8)} \quad (8)$$

$$d_{21}(s) = -\frac{3.333}{(s + 3.333)}$$

За разширения обект се извършва настройка на ПИД регулатори по двата контура, като се използва вторият метод на Astrom-Hagglund [3]. Получените настройки на регулаторите са дадени в табл.1.

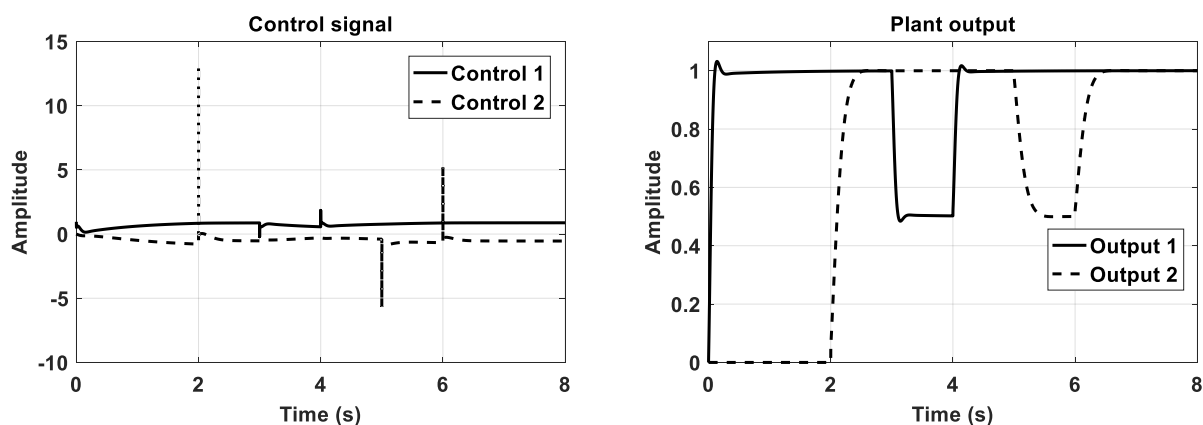
Табл.1

Контур	K_p	T_i	T_d	T_f	b
1	3.5181	0.0491	0.0123	0.00123	0.2709
2	19.69	0.1677	0.0426	0.00426	0.2522

Провежда се симулационен експеримент със затворената система. Подават се задания на двата входа в различни времена и се следят преходните процеси на входа и изхода на обекта. Входните сигнали към обекта не са ограничени.

Симулационните резултати са показани на фиг.4. и от тях се вижда ефектът от използване на компенсатори. Влиянието между отделните контури е напълно елиминирано, поради използване на точен модел за получаване на декуплиращите филтри. Лошо впечатление прави наличието на големи пикове в управляващите сигнали. Такива ефекти са нереалистични в една система за управление. Експериментът се повтаря като се налагат ограничения върху управляващите сигнали в интервала от -1 до 1 (фиг.8). За борба с ефектите от интегрално насищане се прилага схемно решение [2].

Ограничаването на сигналите води до леко насищане, което обаче не оказва влияние в конкретния случай, фиг.5.



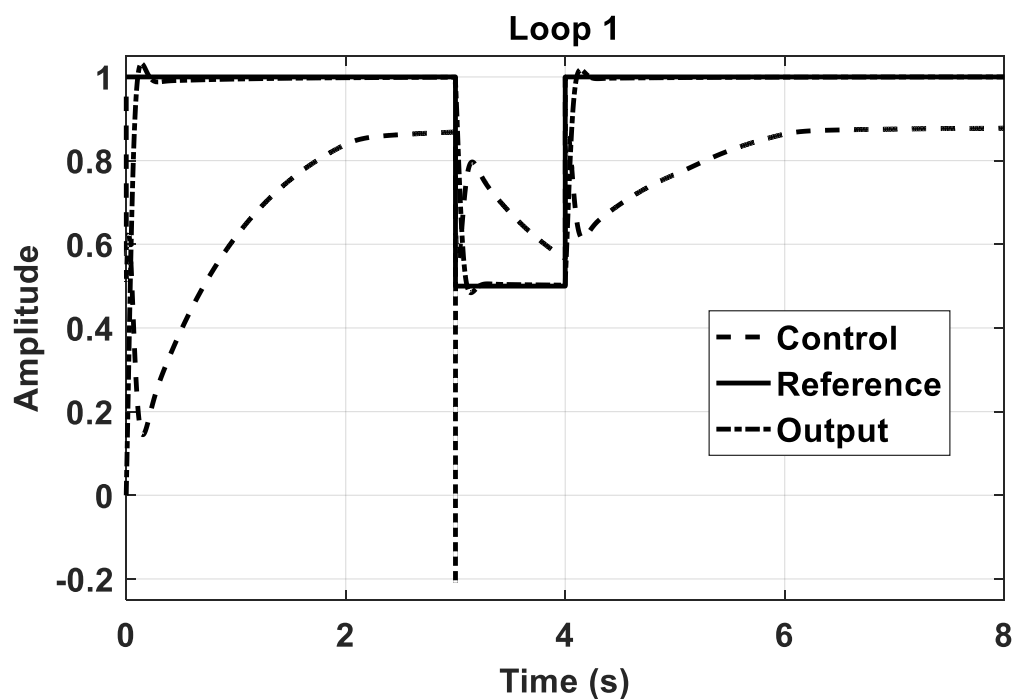
Фиг.4. Преходни процеси в системата за управление без ограничение в управлението

За сравнение с алтернативни методи за управление е синтезиран H_∞ регулатор при S/KS чувствителност [3], с две степени на свобода и интегрална съставка. Получено е управляващо устройство от 12 ред с $\gamma = 0.9976$. За синтеза е необходимо задаване на шест тегловни филтъра на качеството – два за грешката в системата, два за интегралната грешка и два за управляващите сигнали.

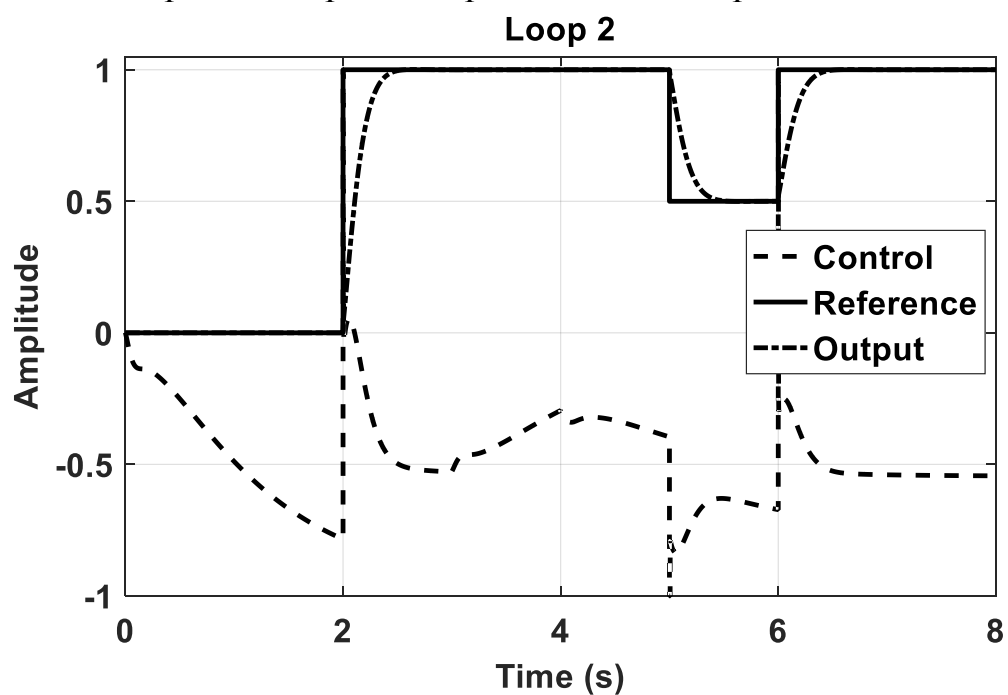
За намирането на съответните филтри се преминава през редица варианти до достигане на желаното качество на затворената система и удовлетворяване на условието $\gamma \leq 1$.

Провежда се експеримент без да са наложени ограничения върху управляващите сигнали фиг.6.

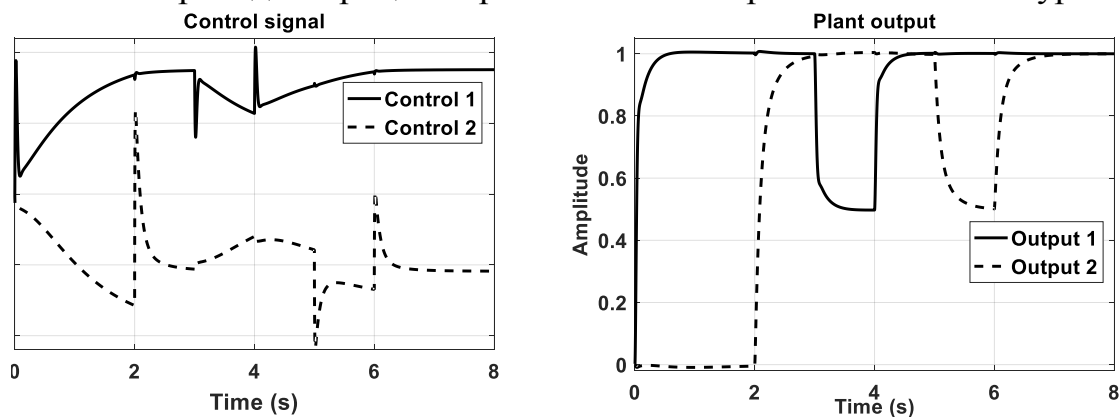
Процесите в затворената система с H_∞ регулатор са малко по-бавни, но съизмерими с тези с ПИД. Наблюдава се наличие на незначително влияние между контурите. Като недостатък може да се отбележи по-високият ред.



Фиг.5.а. Преходни процеси при наличие на ограничение за контур 1

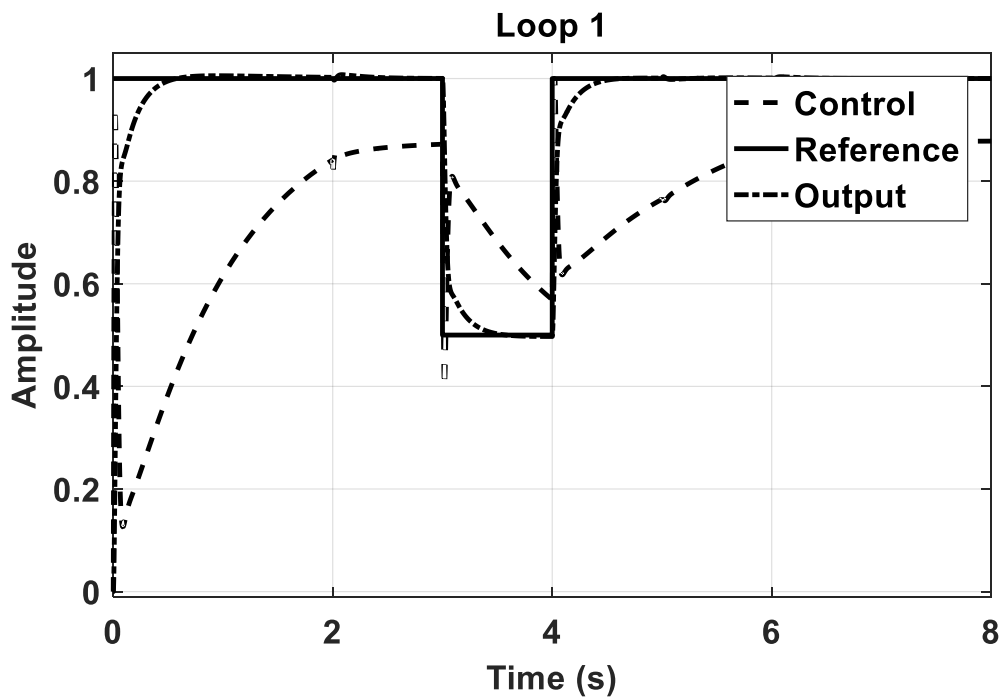


Фиг.5.б. Преходни процеси при наличие на ограничение за контур 2

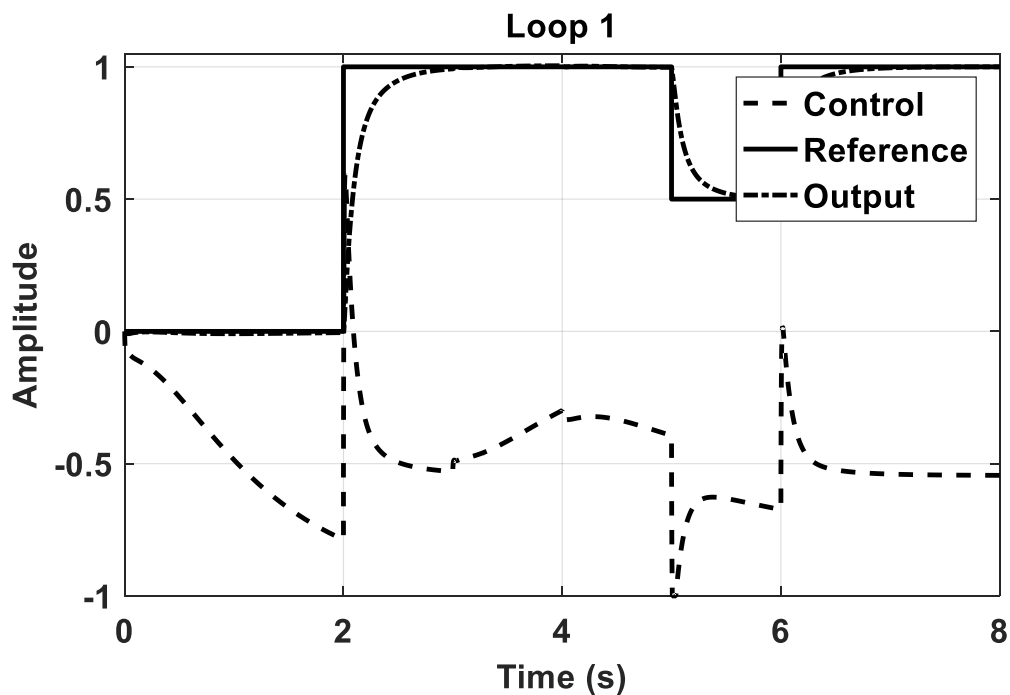


Фиг.6. Преходни процеси без ограничение с H_∞ регулатор

За следващия експеримент управляващите сигнали се ограничават в диапазона от -1 до 1 - фиг.7.



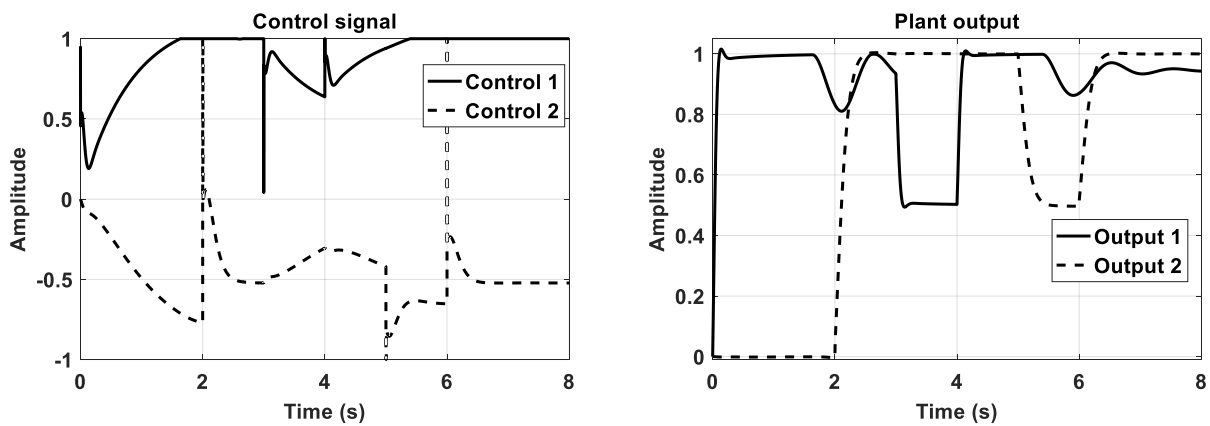
Фиг.7.а. Преходни процеси с ограничение с H_{∞} регулатор за контур 1



Фиг.7.б. Преходни процеси с ограничение с H_{∞} регулатор за контур 2

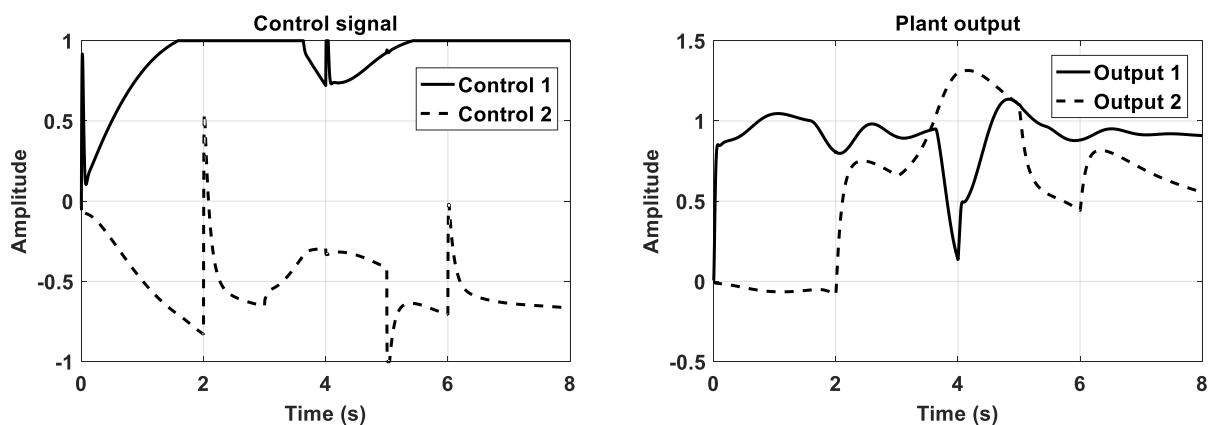
Както се вижда от графиките получените резултати не са се влошили значително. Още от фиг.6 може да се види, че не се наблюдават значителни амплитуди извън интервала ± 1 .

За следващия експеримент параметрите на обекта се променят с $\pm 20\%$, с които са направени сравнение на поведението на затворените системи с ПИД регулатори (фиг. 8) и H_{∞} регулатор (фиг.9).



Фиг.8. Преходни процеси с ПИД регулатори и промяна на параметрите

Показани са накратко някои от проблемите при използване на ПИД управление при многомерни системи. Отделено е внимание на приложението на декупиращите филтри и проблемите, които възникват с ограничения в изходите им (входовете към обекта, които са ограничени от физически съображения, обикновено $0 \div 1$ или $0 \div 100\%$).



Фиг. 9. Преходни процеси с H_{∞} регулатор и промяна на параметрите

5. ИЗВОДИ

Показан е метод за синтез на декупиращи филтри. Разгледан е пример за реализация на двумерно управление с ПИД регулатори с използване на декупиращи филтри и са показани резултати без и с ограничения на изходите на декупиращите филтри.

При този подход, при цифрова реализация на регулаторите и декупиращите филтри, е възможно те да се реализират като част от програмната система за управление. Резултатите от направените симулационни изследвания потвърждават теоретично получените резултати.

За сравнение е показана реализация с многомерен регулатор (алтернативен вариант), без и с ограничения в изходите на регулатора. Резултатите са по-лоши отколкото с използването на ПИД регулатори.

Извършени са експерименти с променени параметри на обекта. Резултатите показват много по-добро качество на процесите при управление с ПИД регулатори в сравнение с H_{∞} регулаторите.

ЛИТЕРАТУРА

1. Deshpande, B. (1989): *“Multivariable process control”*. Instrument Society of America
2. Гарипов Е., Цифрови системи за управление, Част 1. Проектиране на ПИД регулатори, ТУ-София, 2004
3. Петков П., Константинов М., *„Робастни системи за управление“*, АВС Техника, 2002

Автори: Божидар Раков, маг. инж. докторант, катедра „Системи и управление“, Факултет Автоматика, Технически Университет-София; E-mail address: brakov@tu-sofia.bg; Георги Ружеков, доц. д-р инж., катедра „Системи и управление“, Факултет Автоматика, Технически Университет-София; E-mail address: g_ruzhekov@tu-sofia.bg

Постъпила на 23.04.2016

Рецензент: доц. д-р Т. Пулева