



ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

Том 65, книга 1, 2015

МЕЖДУНАРОДНА КОНФЕРЕНЦИЯ АВТОМАТИКА'2015, ФА
ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА
юбилей "70 ГОДИНИ ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ"
05 - 07 юни 2015 г., Созопол, България



PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 65, Issue 1, 2015

INTERNATIONAL CONFERENCE AUTOMATICS'2015, FA
FACULTY OF AUTOMATICS
Anniversary "70 YEARS TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA"
June 05 - 07, 2015, Sozopol, Bulgaria

СЪДЪРЖАНИЕ том 65, книга 1

АВТОМАТИКА

1. Емил Николов.	15
<i>Алгебрична производна и приложения в честотния анализ - част I</i>	
2. Емил Николов.	23
<i>Алгебрична производна и приложения в честотния анализ - част II</i>	
3. Христо Стоянов, Тодор Йонков	33
<i>Управление на термопомпени системи чрез коригиране в реално време на заданието на температурата на отоплителния/охладителния работен флуид</i>	
4. Марин Жилевски, Михо Михов.	41
<i>Алгоритъм за съгласуване на задвижванията на фрезови машини с цифрово-програмно управление</i>	
5. Иван Костов	51
<i>Моделиране и изследване на асинхронно електрозадвижване с регулатор на напрежение с ШИМ</i>	
6. Дочо Цанков.	61
<i>Селекторно базирано управление с подобряване на локалния вентилационен индекс на замърсяване</i>	
7. Владимир Христов.	69
<i>Позиционно постоянно-токово сервозадвижване с линейно квадратичен регулатор</i>	
8. Владимир Христов.	79
<i>Безсензорно оценяване на скоростта и позицията в системи с безчеткови електрозадвижвания</i>	
9. Камен Христов	89
<i>Методи за управление и оценка на параметри на променливотокови двигатели в диапазона на ниските скорости</i>	
10. Николай Братованов, Владимир Заманов.	99
<i>Моделиране и симулация на движенията на клас манипулационни роботи и анализиране на потребителски сценарии в полупроводниковата индустрия</i>	
11. Никола Ценов, Иван Аврамов.	109
<i>Концептуално проектиране и прототипно развитие на мехатронни модули за машина – автомат, подготвяща рециклирането на опаковъчни пластмасови бутилки и алуминиеви течностни мини контейнери (Част 1 – проектиране на мехатронни модули)</i>	
12. Никола Ценов, Иван Аврамов	119
<i>Моделиране на транспортния трафик в класа на обектите с разпределени параметри Концептуално проектиране и прототипно развитие на мехатронни модули за машина - автомат, подготвяща рециклирането на опаковъчни бутилки и течностни мини контейнери (Част 2 - прототипно развитие и интегриране на мехатронните модули)</i>	
13. Нина Г. Николова, Емил К. Николов	129
<i>Методи за анализ на робастните и филтриращи свойства на системи за релативно управление - част I</i>	

14. Нина Г. Николова, Емил К. Николов	139
<i>Методи за анализ на робастните и филтриращи свойства на системи за репетитивно управление - част II</i>	
15. Снежана Йорданова, Десислава Стоицева-Деличева	147
<i>Супервайзорно размито управление на анаеробно биологично пречистване на отпадни води</i>	
16. Борис Грасиани, Нина Николова	157
<i>Изследване на робастни репетитивни системи за управление с вътрешен модел</i>	
17. Станислав Енев	167
<i>Адаптивно управление на лабораторен модел на въздушно-витлово махало в система с еталонен модел и ПИД закон в основния контур</i>	
18. Александър Ефремов.	175
<i>Приложение на инженерния подход в нетехническата сфера</i>	
19. Александър Маринчев, Весела Карлова-Сергиева	185
<i>Синтез на регулатор със свойства подобни на човека оператор при управление на ниво</i>	
20. Методи Георгиев	195
<i>Приложение на симулационен софтуер при определяне на влиянието на комуникационната среда при управление на индустриални обекти</i>	
21. Петър Йонков, Борис Киров, Десислава Стоицева-Деличева, Васил Гълъбов	201
<i>Разработка на биопроцесна система за производство на метан при директна консумация на техногенниелектрони от <i>Methanosaeta barundinacea</i>, Част I - регулиране на температурата</i>	
22. Албена Танева, Робърт Казала, Иван Ганчев, Михаил Петров	207
<i>Система за управление с LabVIEW</i>	
23. Павел Николов.	215
<i>Методи за клъстерен анализ на данни</i>	
24. Соня Николова, Чавдар Дойчинов.	225
<i>Мотивация, интуитивни решения и нагласи за риск на трейдъра в борсовата търговия с енергия</i>	
25. Чавдар Дойчинов.	235
<i>Подход за извличане на знания от данни за нуждите на експертна система за управление на балансираща група</i>	
26. Димитринка Владева, Иван Трендафилов.	243
<i>Диференцирания в триъгълник – I част. Проекцията на най-малкия стринг на триъгълник е диференциране</i>	
27. Димитринка Владева, Иван Трендафилов.	253
<i>Диференцирания в триъгълник - II част. Проекцията на всеки един от стринговете на триъгълник е диференциране</i>	
28. Николай Николов, Антония Панделова, Пламен Цветков.	263
<i>Модифицирана процедура за качествен контрол на данни за разтворен кислород в Черно море</i>	
29. Тони Драгомиров, Николай Гуров	271
<i>Анализ и оптимизация на мощностни превключватели с тиристори за стъпални регулатори на напрежение</i>	

30. Божидар Джуджев	281
<i>Виртуален инструмент за въвеждане на данни от измервания в Word документи</i>	
31. Mária Hypiusová, Alena Kozáková	287
<i>Robust Control of Motion Systems Using LMI</i>	
32. Alena Kozáková, Róbert Krasňanský	297
<i>Stabilization of Switched Linear Control Systems in Frequency Domain</i>	
33. Štefan Kozák	307
<i>Soft Computing Methods for Modelling and Control of Safety-Critical Processes</i>	
34. Теофана Пулева	317
<i>Адаптивно оценяване на аеродинамичния момент на ветрогенератор</i>	
35. Цоньо Славов, Йордан Кралев, Петко Петков	327
<i>μ-Управление на двуколесен робот</i>	
36. Цвета Спасова, Емил Гарипов	337
<i>Идентификация на зашумени динамични обекти в затворен контур на управление чрез ARX модели</i>	
37. Камен Перев	347
<i>Редуциране на реда на модела чрез използване на Ханкеловия оператор</i>	
38. Андрей Йончев	357
<i>Анализ на чувствителността на задачата за синтез по зададени полюси основана на ЛМН</i>	
39. Александър Ищев, Людмила Балтова	365
<i>Предварителен графоаналитичен анализ за избор на технологичен вариант за сглобяване на механично изделие при наличие на неопределеност</i>	
40. Людмила Балтова, Александър Ищев	373
<i>Приложение на предварителен графоаналитичен анализ за избор на технологичен вариант за сглобяване на механично изделие – зъбна хидравлична помпа при наличие на неопределеност</i>	
41. Андрей Йончев, Найден Ценов	381
<i>Робастно ЛМН базирано управление на ветрогенератор</i>	
42. Здравко Каракехайов	391
<i>ZETA алгебра: оптимизиране на енергията за комуникация при безжични мрежи</i>	
43. Живко Георгиев, Иван Трушев	401
<i>Някои проблеми при прилагане на класическия метод за анализ на преходни процеси в електрически вериги, съдържащи индуктивно свързани бобини</i>	
44. . Живко Георгиев, Иван Трушев	411
<i>Някои проблеми при прилагане на операторния метод за анализ на преходни процеси в електрически вериги, съдържащи индуктивно свързани бобини</i>	
45. Анна Апостолова-Йорданова, Снежана Терзиева	419
<i>Подготвени ли са студентите-второкурсници в ТУ за предизвикателството „Теоретична електротехника“</i>	
46. Стоян Кирилов, Валери Младенов	425
<i>Синтез на нова схема на синусоидален генератор с мемристори и елементи с отрицателни параметри</i>	

μ-УПРАВЛЕНИЕ НА ДВУКОЛЕСЕН РОБОТ

Цоньо Славов, Йордан Кралев, Петко Петков

Резюме: В работата са представени разработеният от авторите двуколесен робот и синтезираните μ-регулатор, ПИ регулатор и ПИ филтър на Калман. μ-регулаторът стабилизира робота в горно равновесно положение и осигурява следене на заданието за движение напред-назад. ПИ регулаторът осигурява следене на заданието при движение на робота около вертикалната ос. В средата на MATLAB/Simulink е разработен специализиран софтуер за генериране на код за вграждане на синтезираните регулатори и филтри в цифров сигнален процесор TMS320F28335. Дадени са експериментални резултати за движението на робота в равнината, които демонстрират качеството на вградената система за управление.

Ключови думи: управление на двуколесен робот, μ- управление, вградени системи

μ-CONTROL OF TWO WHEELED ROBOT

Tsonyo Slavov, Jordan Kralev, Petko Petkov

Abstract: In this paper the developed two-wheeled robot, μ controller, PI controller and PI Kalman filter are presented. The μ controller stabilizes two wheeled robot in upright position and ensures good tracking of wheel position reference. The PI controller controls two wheeled robot rotation around the vertical axis. A software in MATLAB®/Simulink environment for generation of code which is embedded in a Texas Instruments Digital Signal Controller is developed. Experimental results of system performance are given that confirm the efficiency of the control system developed.

Keywords: Two-wheeled robot control, μ- control, Embedded system

1. Въведение

Поради трудностите възникващи при управление на крачещите мобилни роботи, в последните години се наблюдава засилен интерес към колесните такива [1]. Те започват да се използват във все повече области на човешката дейност като антитерористична дейност, спасителни операции, ежедневна домашна дейност и др. Нещо повече, колесните роботи са енергийно по-ефективни от крачещите и механичната им конструкция е сравнително проста, което обуславя и не високата им цена. От гледна точка на управлението те могат да бъдат устойчиви обекти, ако имат най-малко три колела или неустойчиви обекти ако са с по-малко от три колела. Роботите с повече от две колела са по-прости за управле-

ние и са по – енергийно ефективни в сравнение с тези с по-малко, т.к. за да се поддържа устойчиво състояние на двуколесните роботи е необходима енергия. Въпреки това двуколесните роботи имат редица предимства в сравнение с устойчивите колесни роботи като компактни размери, висока маневреност, поради факта че могат да се въртят около вертикалната си ос, способност за преминаване през тесни пространства, способност за толериране на големи товарни смущения, които биха обърнали робот с повече от две колела, възможност за бързо ускоряване и др. Всичко това обуславя засиления интерес към двуколесните мобилни роботи.

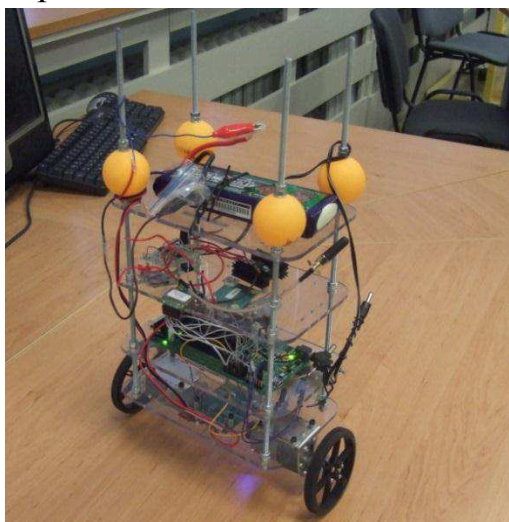
Най-популярният търговски продукт, представляващ двуколесен робот, е средството за персонално придвижване Сигуей (Segway[®]), произвеждано от Segway Inc., САЩ [2], което напоследък придобива популярност и у нас. Някои от неговите модели имат максимална скорост 20 km/h и могат да пропътуват до 38 km с единствено зареждане на батерията. Приложение в обучението намира и двуколесният робот, построен въз основата на развойния кит LEGO[®] Mindstorms NXT [3]. Двуколесните роботи притежават динамика, която е подобна на динамиката на обърнатото махало и поради това е необходимо да бъдат стабилизирани принудително около вертикалното положение с помощта на система за управление. За целта обикновено се използват линейно-квадратични или ПИД-закони за управление, с които се постига вертикална стабилизация на робота и преместване в желана точка на хоризонталната равнина [4,5]. В литературата все още няма докладвани резултати за синтез и реализация на робастни регулатори за управление на двуколесни роботи, с помощта на които биха се гарантирали робастно качество и робастна устойчивост на системата за управление. Това мотивира авторите да синтезират и реализират μ -регулатор за стабилизация и управление на надлъжното движение на двуколесен робот.

В настоящата работа са представени теоретични и експериментални резултати, свързани с разработването на вградена система за управление на двуколесен робот, в която за вертикалната стабилизация и управление на надлъжното движение се използва μ -регулатор от 30-ти ред, а за управление на движението около вертикалната ос се използва ПИ регулатор с ПИ филтър на Калман от 2 ред. Поради отсъствието на аналитичен модел при синтеза на системата за управление се използва модел с неопределеност, построен от авторите с подходящи процедури за идентификация [6]. В средата на MATLAB/SIMULINK е разработен специализиран софтуер за генериране на код, който е вграден в цифров сигнален процесор TMS320F28335. Представени са резултати от реален експеримент с вградената система за управление.

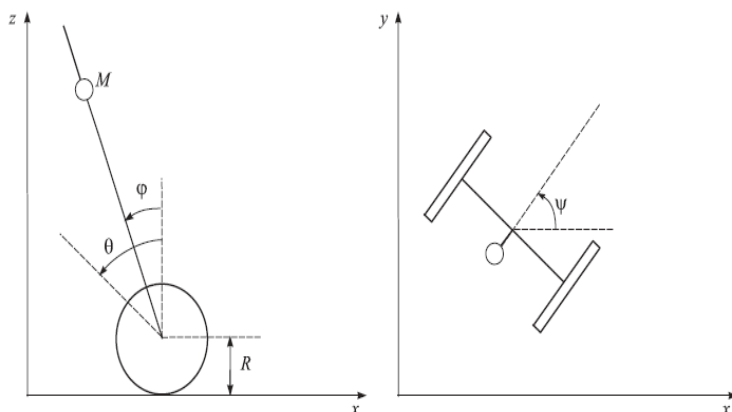
2. Двуколесен мобилен робот

Обект на управление е разработеният от авторите двуколесен мобилен робот, чиято снимка и кинематична схема са показани на фиг.1 и фиг.2 [5]. Управляващите сигнали са заданията към двата сервомотора, а в реално време се измерват ъгловата скорост на наклона на робота $\dot{\varphi}$, ъгловата скорост на въртене на робота около вертикалната ос $\dot{\psi}$ и ъгловата скорост на колелата $\dot{\theta}$, съответно

посредством инерциален сензор *ADIS16405* и енкодери куплирани към сервомоторите.



Фиг.1. Двучколесен мобилен робот



Фиг.2. Кинематична схема на двучколесния робот

Комуникацията между контролера на двигателите и развойния кит и между инерциалния сензор и развойния кит се осъществява по *SPI* интерфейс. Данните от измерванията и заданията към робота се получават и предават в реално време от РС с помощта на Bluetooth комуникация.

3. Модел с неопределеност на двучколесния робот

Поради липсата на точен аналитичен модел при синтеза на системата за управление се използва модел получен със средствата на идентификацията. Съгласно резултатите представени в [6], за описание на робота между ъгловата скорост $\dot{\phi}$ и управляващото въздействие u се използва ARMAX модел със структурни параметри $na = 7, nb = 7, nc = 7, nk = 3$, а за описание между ъгловите скорости $\dot{\theta}$ и $\dot{\phi}$ се използва ВJ модел със структурни параметри $nb = 3, nf = 3, nc = 3, nd = 3, nk = 1$. Тези модели се записват във вида

$$\dot{\phi}(z) = W_{\dot{\phi}u, \text{ном}}(z)u(z) + v_{\dot{\phi}}(z), \quad \dot{\theta}(z) = W_{\dot{\theta}\dot{\phi}, \text{ном}}(z)\dot{\phi}(z) + v_{\dot{\theta}}(z), \quad (1)$$

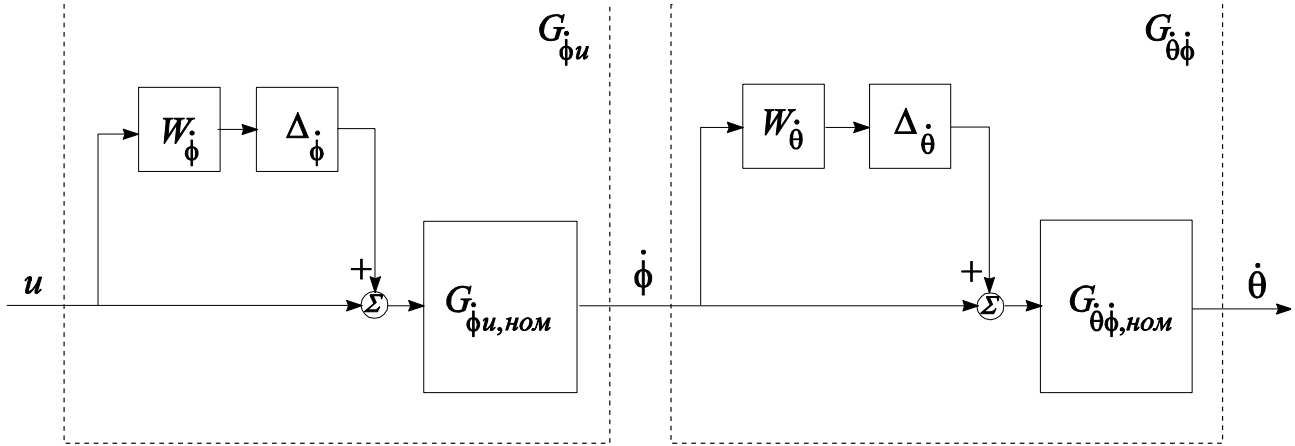
където

$$W_{\dot{\phi}u, \text{ном}}(z) = \frac{B_{\dot{\phi}u}(z)}{A_{\dot{\phi}u}(z)}, \quad W_{\dot{\theta}\dot{\phi}, \text{ном}}(z) = \frac{B_{\dot{\theta}\dot{\phi}}(z)}{F_{\dot{\theta}\dot{\phi}}(z)}, \quad (2)$$

са дискретните предавателни функции на номиналните модели, $B_{\dot{\phi}u}(z)$, $A_{\dot{\phi}u}(z)$, $B_{\dot{\theta}\dot{\phi}}(z)$, $F_{\dot{\theta}\dot{\phi}}(z)$ са съответните полиноми на ARMAX и ВJ моделите, а $v_{\dot{\phi}}(z)$ и $v_{\dot{\theta}}(z)$ са приведени към изхода смущения, които отразяват несъответствието между номиналния и действителния модели. Смущенията $v_{\dot{\phi}}(z)$ и $v_{\dot{\theta}}(z)$ могат

да се представят като входна мултипликативна неопределеност за номиналния модел.

Неизместеността на оценките (параметрите на номиналния модел) получени при идентификацията дава основание да се счита, че точните стойности на параметрите на моделите попадат с вероятност клоняща към единица в доверителните интервали на оценките. Това позволява да се изведат модели на двуколесния робот с входна мултипликативна неопределеност (фиг.3)



Фиг.3. Структурна схема на неопределения модел на двуколесния робот

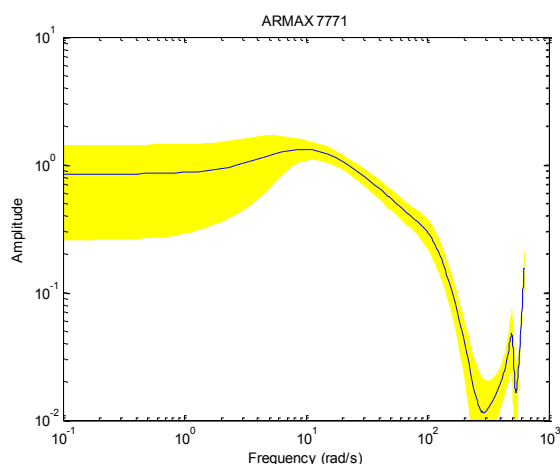
$$\begin{aligned} G_{\dot{\phi}u}(z) &= W_{\dot{\phi}u,ном}(z)(1 + \Delta W_{\dot{\phi}u}(z)\Delta_{\dot{\phi}}), \\ G_{\dot{\theta}\dot{\phi}}(z) &= W_{\dot{\theta}\dot{\phi},ном}(z)(1 + \Delta W_{\dot{\theta}\dot{\phi}}(z)\Delta_{\dot{\theta}}), \end{aligned} \quad (3)$$

където $|\Delta_{\dot{\phi}}| < 1$ и $|\Delta_{\dot{\theta}}| < 1$ са неопределености и

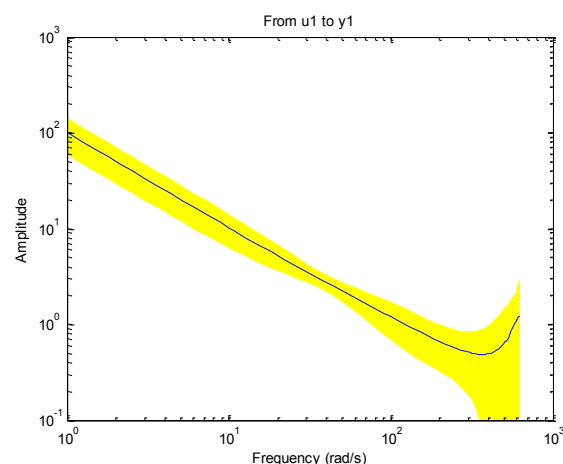
$$\begin{aligned} |\Delta W_{\dot{\phi}u}(j\omega)| &= \frac{|W_{\dot{\phi}u,макс}(j\omega)| - |W_{\dot{\phi}u,ном}(j\omega)|}{|W_{\dot{\phi}u,ном}(j\omega)|}, \\ |\Delta W_{\dot{\theta}\dot{\phi}}(j\omega)| &= \frac{|W_{\dot{\theta}\dot{\phi},макс}(j\omega)| - |W_{\dot{\theta}\dot{\phi},ном}(j\omega)|}{|W_{\dot{\theta}\dot{\phi},ном}(j\omega)|}, \end{aligned} \quad (4)$$

са максималните относителни отклонения на честотните характеристики от тези на номиналния модел, а $W_{\dot{\phi}u,макс}(j\omega)$ и $W_{\dot{\theta}\dot{\phi},макс}(j\omega)$ са абсолютните максимални отклонения от честотните характеристики на номиналния модел. $W_{\dot{\phi}u,макс}(j\omega)$ и $W_{\dot{\theta}\dot{\phi},макс}(j\omega)$ се определят на базата на доверителните интервали на оценките и се апроксимират (параметризируют) на базата на оптимизация с модели от 9 и 5 ред.

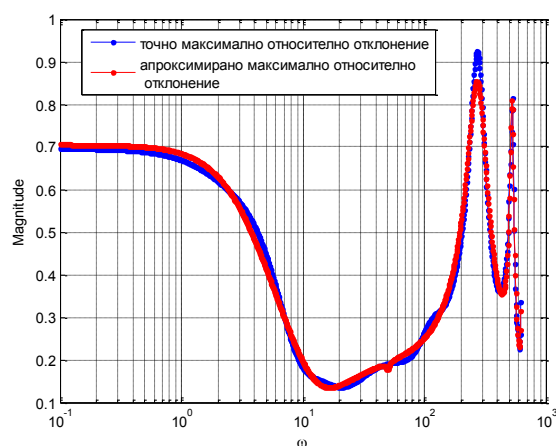
На фиг.4- фиг.5 са показани ЛАЧХ на номиналните модели заедно с доверителните им интервали, а на фиг.6- фиг.7 са показани относителните максимални отклонения (4) заедно с техните апроксимации.



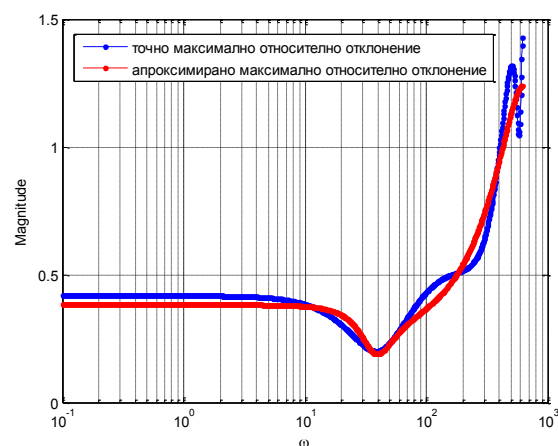
Фиг.4. ЛАЧХ с доверителен интервал на модела между $\dot{\phi}$ и u



Фиг.5. ЛАЧХ с доверителен интервал на модела между $\dot{\theta}$ и $\dot{\phi}$



Фиг.6. Точно и апроксимирано максимално относително отклонение между $\dot{\phi}$ и u

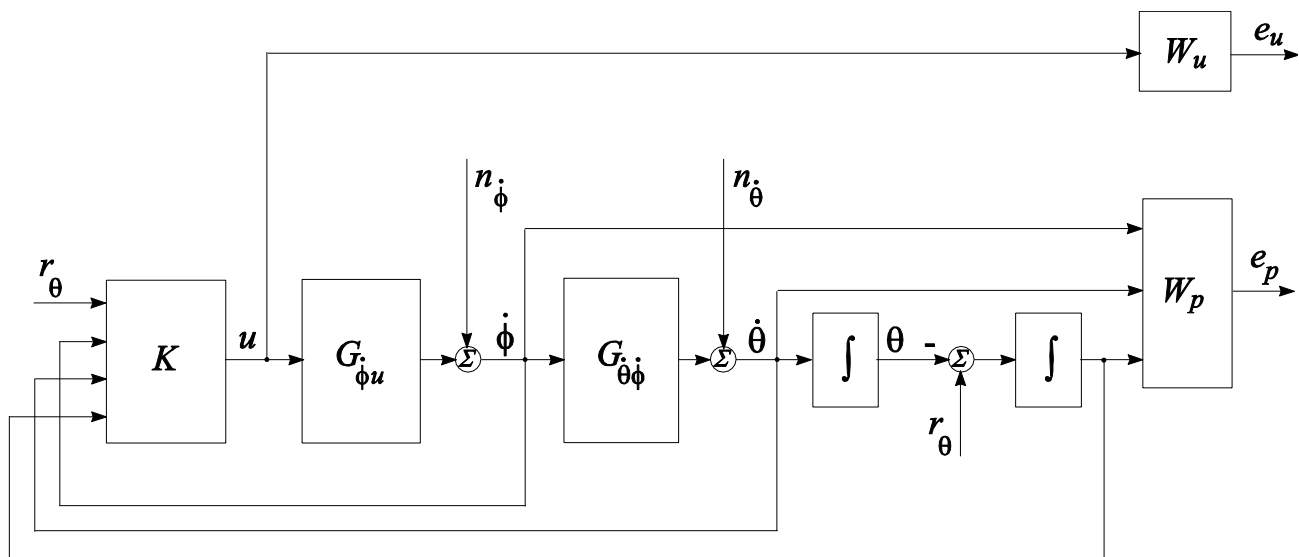


Фиг.7. Точно и апроксимирано максимално относително отклонение между $\dot{\theta}$ и $\dot{\phi}$

4. Синтез на μ -регулатор

Блоковата схема на системата за управление използвана при синтеза на регулатора е показана на фиг.8. С цел да се постигне по-добро следене на заданието по позиция се взема обратна връзка по интеграл от разликата между заданието за ъгъла на колелата r_θ и ъгъла на колелата θ [7].

Управляващото устройство се вгражда в цифров сигнален процесор и работи с честота на дискретизация 200 Hz , поради което се синтезира дискретен μ регулатор. За постигане на по-добро качество на затворената система се синтезира регулатор с две степени на свобода [8], при което управлението се определя с (5)



Фиг.8. Блокова схема на системата за управление използвана при синтеза на μ регулатор

$$u_c = [K_r \ K_y] \begin{bmatrix} r_\theta \\ y_c \end{bmatrix} = K_r r_\theta + K_y y_c, \quad (5)$$

където $y_c = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \int(r_\theta - \theta)]^T$, K_r е предавателната матрица на предфилтъра и K_y е предавателната матрица на регулатора по изхода. Системата от фиг.8 се описва с

$$\begin{bmatrix} e_y \\ e_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_p \Phi_{y_c} \\ W_u \Phi_u \end{bmatrix} r_\theta, \quad (6)$$

където Φ_{y_c} е предавателната матрица между y_c и r_θ , Φ_u е предавателната матрица между u и r_θ . Решава се задача за μ - синтез, като се търси управляващото устройство от уравнение (5), такова че да се удовлетворят следните условия:

Робастна устойчивост: Затворената система е робастно устойчива, ако е вътрешно устойчива за всички допустими неопределености.

Робастно качество: Затворената система да е робастно устойчива и за всяка допустима G да се удовлетворява условието за качество

$$\left\| \begin{bmatrix} W_p \Phi_{y_c} \\ W_u \Phi_u \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1. \quad (7)$$

Тегловните предавателни матрици W_p и W_u се използват за задаване на изискванията към качеството на системата за управление в честотната област. μ – синтезът е извършен за множество тегловни матрици W_p и W_u , които осигуряват добър баланс между качество и робастност, но на базата на експерименти е избрано

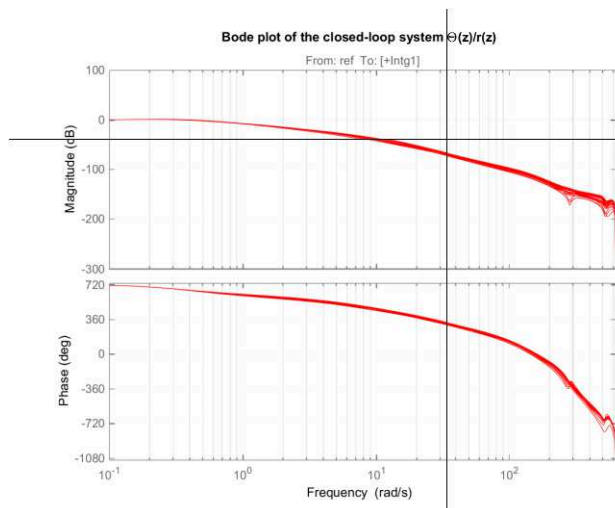
$$W_p(p) = \begin{bmatrix} 52.2 \frac{0.005p+1}{p+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0.029 \frac{0.6p+1}{0.007p+1} & 0 \\ 0 & 0 & 4.7 \frac{4p+1}{125p+1} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$W_u(p) = \frac{1}{30000} \frac{\frac{1}{0.007} p + 1}{\frac{1}{200} p + 1}.$$

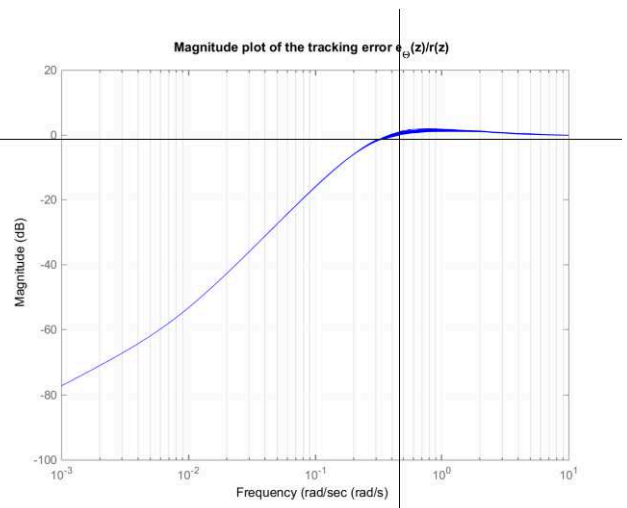
Вижда се, че тегловните функции на качеството по отделните канали на обратната връзка представляват нискочестотни филтри, а тегловната функция на управлението представлява високочестотен филтър с подходяща честотна лента, чрез която се налагат ограничения върху спектъра на управляващия сигнал. Тегловните матрици се дискретизират с честота на дискретизация 200 Hz .

μ -синтезът е извършен с MATLAB функцията *dksyn* [9]. За постигане на по-добра сходимост на D - K итерациите към ъгловите скорости $\dot{\varphi}$ и $\dot{\theta}$ са добавени шумове $n_{\dot{\varphi}}$ и $n_{\dot{\theta}}$ с интензивности 10^{-4} . След три итерации на процедурата се получава $\mu = 0.693$ при управляващо устройство от 50 ред.

На фиг.9 е показана Бод-характеристиката на затворената система, а на фиг.10 е показана функцията на изходната чувствителност. На фиг.11- фиг.12 са показани чувствителностите на управлението към шумовете $n_{\dot{\varphi}}$ и $n_{\dot{\theta}}$.



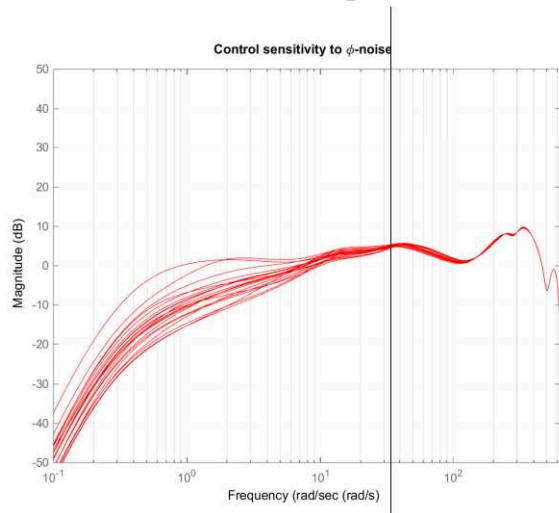
Фиг.9. ЛАЧХ и ФЧХ на затворената система



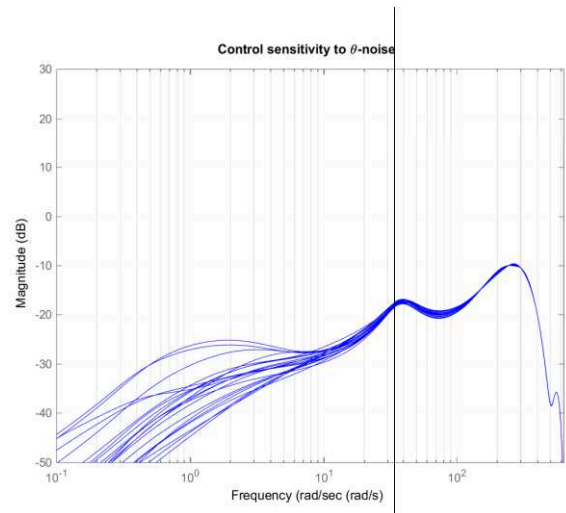
Фиг.10. Изходна чувствителност

Вижда се, че честотната лента на системата е около 1 rad/s и системата добре ще потиска смущения с честота до 0.1 rad/s . Също така управляващият сигнал е по-чувствителен към шума в $\dot{\varphi}$ отколкото към шума в $\dot{\theta}$. Това означава, че шумът на жирокопа ще оказва по-силно влияние в системата отколкото шумът на енкодерите на колелата на работа. На фиг.13 са показани границите на структури-

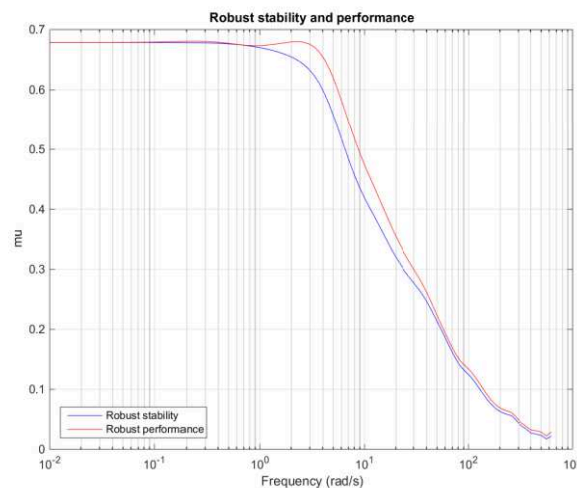
раното сингулярно число по отношение на анализа робастната устойчивост и робастното качество. Вижда се, че системата ще запази качество и устойчивост при 30% по-големи неопределености.



Фиг.11. Чувствителност на управлението към шума в $\dot{\phi}$



Фиг.12. Чувствителност на управлението към шума в $\dot{\theta}$



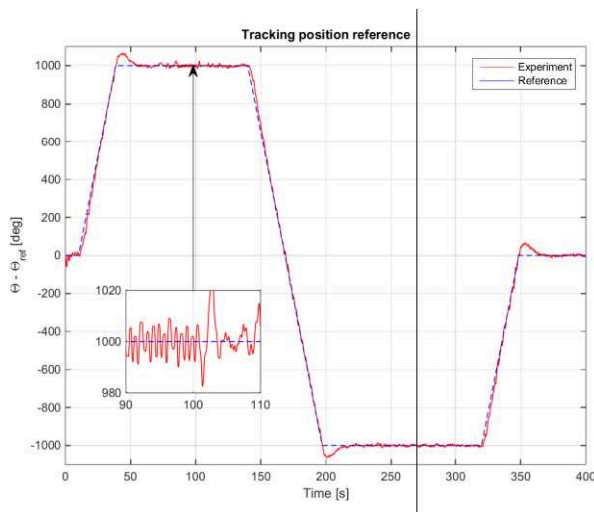
Фиг.13. Робастна устойчивост и робастно качество на затворената система

Синтезираният μ -регулатор осигурява стабилизация на робота и управлява движението напред-назад. За управление на въртеливото движение около вертикалната ос се използват ПИ регулаторът и ПИ филтърът на Калман представени [5].

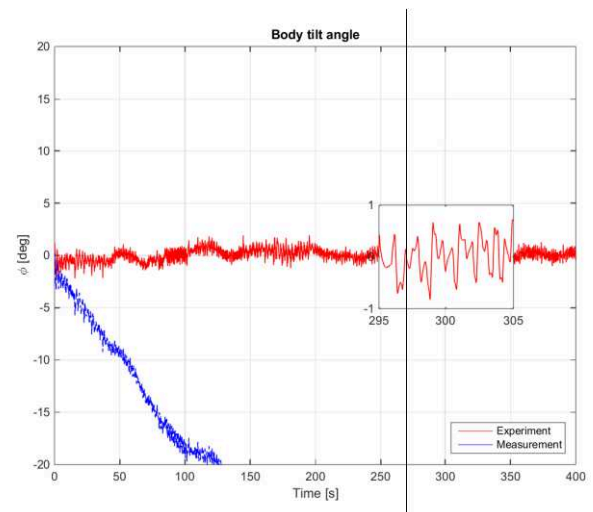
5. Експериментални резултати

За по-лесна реализация на μ -регулатора в сигналния процесор, неговият ред се редуцира от 50 на 30. В средата на *Simulink* са разработени симулационна схема на системата за управление и специализиран софтуер. С помощта на *Simulink Coder* и *Code Composer Studio* от този софтуер се генерира код, който се вгражда в цифров сигнален процесор *TMS320F28335*. Проведени са редица експерименти с разработения регулатор. На фиг. 14-17 са показани получените резул-

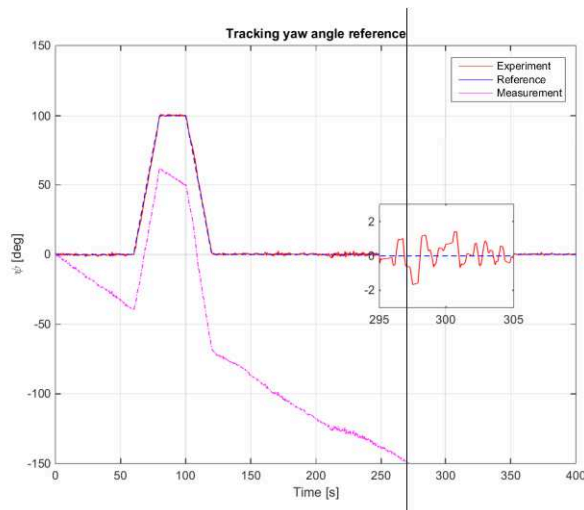
тати от експеримента по отношение на основните сигнали в системата за управление.



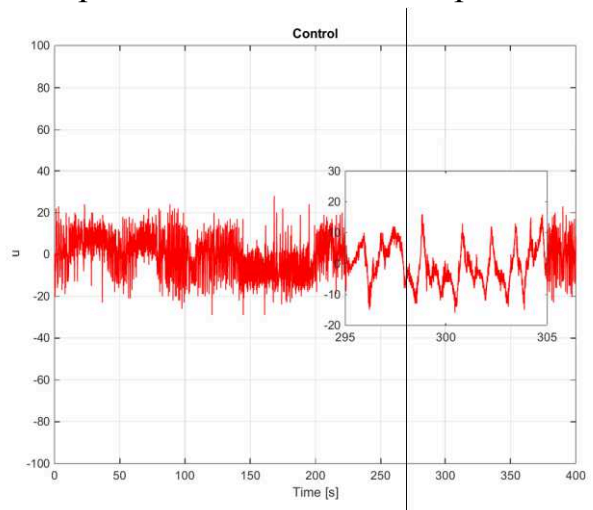
Фиг.14. Положение на колелата и задание за положението на колелата



Фиг.15. Ъгъл на наклона на робота и измерен ъгъл на наклона на робота



Фиг.16. Ъгъл на завъртане около вертикалната ос и измерен ъгъл на завъртане около вертикалната ос



Фиг.17. Управляващ сигнал

От фиг.14 и фиг.15 се вижда, че колелата следят добре зададеното положение и роботът стои изправен (отклоненията от горно положение са ± 1 градус). Измереният ъгъл на наклон φ съдържа значителна нискочестотна грешка, която се филтрира off-line с филтър на Калман от 17 ред. Тази грешка не оказва влияние на стабилизацията на робота благодарение на добрите филтриращи свойства на системата за управление с μ -регулатор. На фиг.16 се вижда подобна грешка при измерването на ъгъла на завъртане около вертикалната ос. Тази грешка се филтрира on-line с ПИ филтъра на Калман от 2 ред, благодарение на което роботът се завърта точно на зададения ъгъл. Максималните стойности на управляващия сигнал са около 30 единици което е значително по-малко от ограничението от 50 единици.

6. Заключение

В статията са представени разработените μ -регулатор, филтри на Калман и ПИ регулатор за управление на равнинното движение на двуколесен робот. μ -регулаторът осигурява робастно качество и робастна устойчивост на затворената система съгласно получения със средствата на идентификацията неопределен модел на двуколесния робот. Алгоритмите за управление са вградени в цифров сигнален процесор TMS320F28335. Дадени са експериментални резултати за движението на робота в равнината, които показват качеството на вградената система за управление.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] G. Campion, W. Chung. ***Wheeled Robots***. In B. Siciliano and O. Khatib, editors, *Springer Handbook of Robotics*, chapter 17, pp. 391-410, Springer, Berlin, 2008.
- [2] ***Segway Personal Transporters***. Bedford, NH, 2012.<http://www.segway.com>
- [3] Y. Yamamoto. ***NXTway-GS (Self-Balanced Two-Wheeled Robot Controller Design)***. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>
- [4] Ronald Ping Man Chan, Karl A. Stol, C. Roger Halkyard. ***Review of modelling and control of two-wheeled robots***. Annual Reviews in Control. Vol. 37, 2013, p.89-103.
- [5] Й. Кралев, Ц. Славов, П. Петков. ***Синтез и реализация на каскаден линейно квадратичен регулатор за управление на двуколесен робот***. Годишник на ТУ-София, том 64,кн.2, 2014, стр.153-162.
- [6] Ц. Славов, Й. Кралев, П. Петков. ***Идентификация на двуколесен робот като обект с неопределеност***. Годишник на ТУ-София, том 64,кн.1, 2014, стр.343-352.
- [7] Goodwin, G.C., S.F. Graebe, M.E. Salgado. ***Control System Design***, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001, ISBN: 9780139586538.
- [8] Gu, D.-W., P.Hr. Petkov, M.M. Konstantinov. ***Robust ControlDesign with MATLAB , 2nd ed.*** Springer-Verlag, London. 2013, ISBN: 978-1-4471-4681-0.
- [9] Balas, G., R. Chiang, A. Packard, M. Safonov. ***Robust Control Toolbox 3 , User's Guide***, The MathWorks, Inc., Natick, MA, 2013. Available from http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/robust/robust_ug.pdf

Автори: Цоньо Славов, доц. д-р, кат. „Системи и управление“, Факултет Автоматика, ТУ-София, E-mail adress: ts_slavov@tu-sofia.bg; Йордан Кралев, маг. инж. докторант кат. „Системи и управление“, Факултет Автоматика, ТУ-София, E-mail adress: jkrlev@yahoo.com; Петко Петков, проф. дтн кат. „Системи и управление“, Факултет Автоматика, ТУ-София, E-mail adress: php@tu-sofia.bg

Постъпила на 15.05.2015

Рецензент гл. ас. д-р А. Марковски