



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. 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-н 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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ЛАБОРАТОРЕН МОДЕЛ „МНОГОСВЪРЗАН ОБЕКТ“

Георги Ружеков, Божидар Раков

Резюме: Лабораторният стенд „Система за управление на многосвързан обект“ се състои от две части – термичен обект и система за управление. Термичният обект представлява 4 термично свързани модула (три с нагревател и един с вентилатор за охлаждане), който представлява многосвързан обект – 4 входа и 4 изхода. Обекти с подобни характеристики са разпространени в индустрията.

Ключови думи: Лабораторен стенд, Програмируем логически контролер, Многомерен ПИД регулатор, SCADA.

EXPERIMENTAL CONTROL SYSTEM FOR LABORATORY BENCH “MULTI INPUT AND MULTI OUTPUT (MIMO) CONTROL SYSTEM”

Georgi Ruzhekov, Bozhidar Rakov

Abstract: The laboratory bench “Multi Input and Multi Output (MIMO) Control System” consists of two parts – a thermal object and a control system. The thermal object consists of 4 thermally connected modules (three with a heater and one with a cooler), which is a MIMO object - 4 inputs and 4 outputs. Objects with similar characteristics are spread in the industry.

Key words: Laboratory bench, Programmable logic controller, Multi-dimensional PID, SCADA.

1. УВОД

Натрупаният опит от разработване и поддържане на реални индустриални системи, както и изготвена литературна справка показват, че многомерното ПИД управление не е достатъчно разработено, публикуват се симулационни резултати без отчитане на особеностите на реалните приложения, липсват практически примери и реализации.

В индустрията има много многоконтурни обекти, в които има съществено влияние между отделните контури. Във всички проучени реализации на подобни системи за управление се използват едноконтурни ПИД регулатори, като се пренебрегват взаимните влияния между контурите и се разчита, че при стабилизация на някой от контурите и другите ще се стабилизират. Постигат се настройки при които се получава задоволително качество на процесите, което е достатъчно за много от случаите. ПИД управлението се предпочита в индустрията по следните съображения:

- Малко параметри за настройка.
- Параметрите имат физически смисъл, лесно разбираеми.
- Съществуват инженерни методи, които лесно се прилагат.
- В голяма част от случаите регулаторите имат вградена функция за самонастройка.
- ПИД регулаторите могат да работят и при нелинейни обекти.
- Параметрите на инсталациите се променят много, тъй като те работят в много различни режими и с различни суровини. В тези случаи пренастройката на регулаторите се извършва от операторите на база на натрупан опит.

Алтернативният подход е многомерно управление. При него трябва да бъдат настроени много параметри, които нямат интуитивна връзка с параметрите на системата. Необходима е сложна система за автоматична настройка, като в голяма част от случаите не може да бъде приложена на практика, поради физически ограничения. При многомерното управление се предполага, че обектът е линеен, което не винаги е изпълнено.

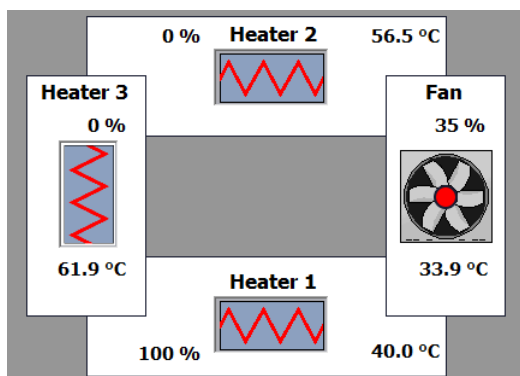
2. СТРУКТУРА НА СИСТЕМАТА

Състои от две отделни части – термичен обект и табло за управление. Термичният обект се състои от 4 модула, на всеки от които е монтиран термосензор (Pt100), на три от тях са монтирани нагреватели и на четвъртия – вентилатор. Четирите модула са термично свързани (фиг.1), при което се осигурява взаимното влияние между тях. Конструкцията позволява промяна на конфигурацията на обекта, което променя и неговите параметри.

Таблото за управление е реализирано с Програмируем Логически Контролер (ПЛК) Simatic S7-1500 – CPU 1511C, блок електронни преобразуватели за измерване на температура, силови модули за управление на нагревателите и охладителя и захранващи блокове. Има останали свободни входове и изходи, което позволява разширение на възможностите на лабораторния стенд.

Скоростта на въртене на вентилатора се задава с коефициента на запълване на сигнал с честота 25 kHz, който се генерира от контролера. Вентилаторът генерира импулсен сигнал, пропорционален на скоростта на въртене, което дава възможност за измерването ѝ. Управлението на трите нагреватели се осъществява с електронни релета (Solid State Relay, SSR) SSR1 – нагревател 1 и SSR2 – нагреватели 2 и 3. Тези електронни релета се включват при преход през 0 (zero crossing), поради което минималното време на включване е 10 ms. (при захранване 50 Hz). За управлението на мощността се използва Широчинно-Импулсна Модулация (ШИМ, Pulse Width Modulation - PWM) като е избран период $T_{PWM} = 1\text{ s}$. В този случай коефициентът на запълване $K_{PWM} = [0 \div 100]\%$, т.е. за управление на мощността на нагревателя се използват 100 дискретни стойности. За измерване на температурата на всеки един от модулите се използват термосензори тип Pt100, и преобразуватели Pt100 – 4 – 20mA при температура 0 – 100 °C. Входните аналогови канали на CPU са настроени в диапазон 4 – 20mA.

На фиг.2 е показана снимка на системата – таблото за управление и температурния обект.



Фиг.1. Термичен обект -схематично изображение от SCADA системата



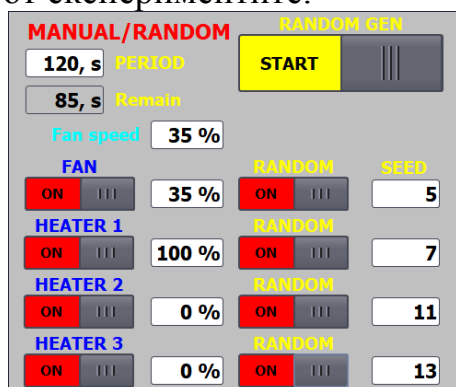
Фиг.2. Снимка на системата - табло за управление и термичен обект

3. ПРОГРАМНА СИСТЕМА

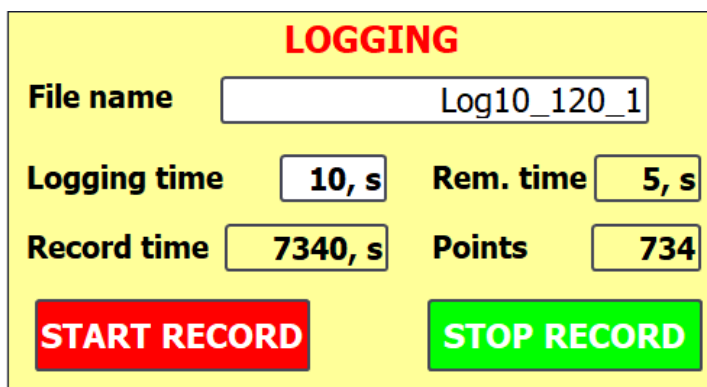
Разработването на софтуера се извършва в среда на TIA Portal V15 и MATLAB/Simulink. В среда на TIA Portal се извършва разработването на програмното осигуряване за PLC и SCADA, а в MATLAB/Simulink се обработват получените данни. Разработено е базово програмно осигуряване:

- Физическо ниво – температурни измервания, управление и измерване на скоростта на въртене на вентилатора и управление на мощността на нагревателите.
- Генериране на типови сигнали за провеждане на идентификация – стъпални и псевдо-случайна двоична последователност.
- ПИД регулатор и блок за автоматична настройка на параметрите.
- Система за запис на експериментални данни и експорт към MATLAB.
- OPC сървър за връзка в реално време с MATLAB приложения.
- Система за визуализация на измерваните параметри и заданията по всички канали.
- Система за управление на режимите на работа и задаване на параметрите на регулаторите.

Разработени са и програми в среда на MATLAB за идентификация на модела на системата на база стъпално въздействие и псевдо-случайна двоична последователност. На фиг.3 е показан контролният панел за типови сигнали – стъпални въздействия или псевдо-случаен двоичен сигнал, а на фиг.4 – за запис на данни от експериментите.

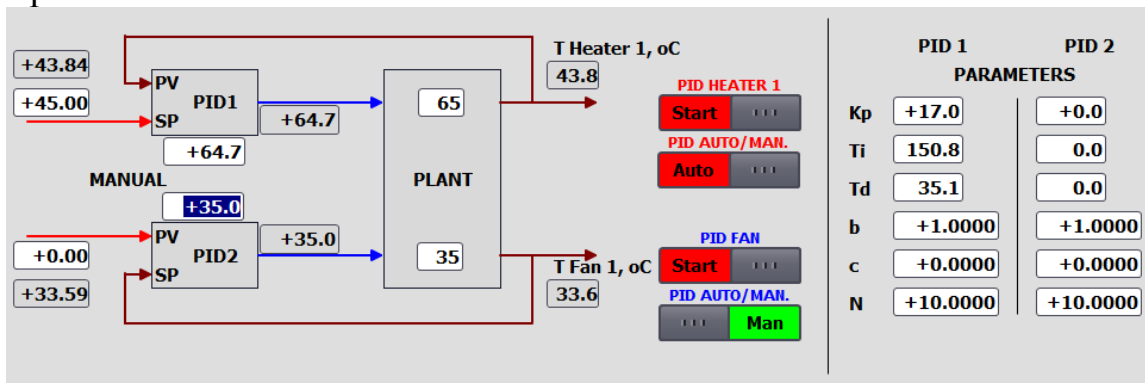


Фиг.3. Контролен панел за типови сигнали



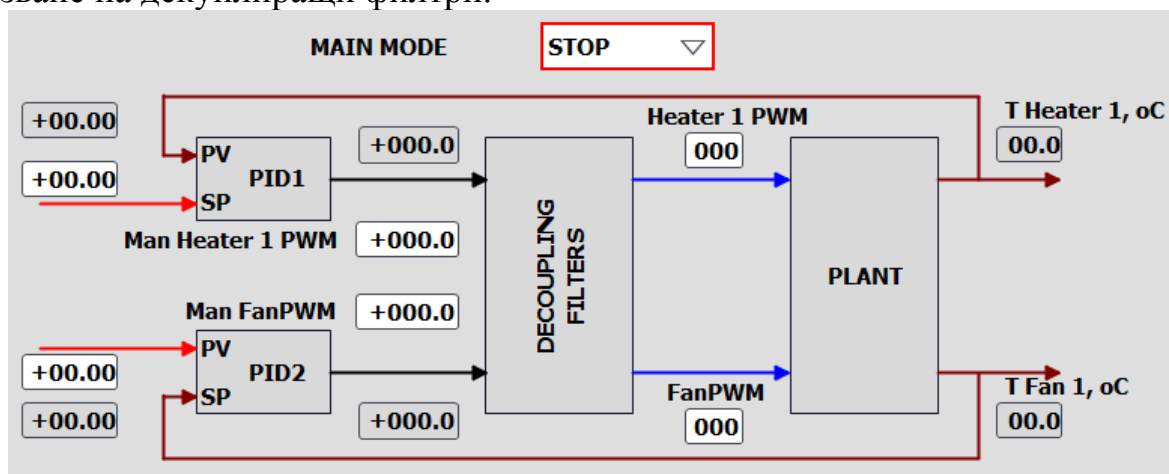
Фиг.4. Контролен панел за запис на данни от експерименти

На фиг.5 е показан елемент от SCADA системата самостоятелно управление на два термични елемента.



Фиг.5. Самостоятелно управление на термични елементи

На фиг.6 е показан елемент от SCADA системата за двумерно управление с използване на декупиращи филтри.



Фиг.6. Двумерно управление с използване на декупиращи филтри

4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ

От гледна точка на автоматиката обектът може да се разглежда като система за управление с четири входа и четири изхода. Използвайки матричен запис може да се запише (1).

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

където $G(s)$ представлява предавателната матрица на обекта, а G_{ij} са предавателните функции, описващи входни изходните връзки между изход i и вход j . За пълно описание на многомерния обект е необходимо познаване на всяка една предавателна функция G_{ij} . Една възможност е моделиране по аналитичен път, с използване на физични закони, описващи процесите. Друга възможност е моделиране на базата на идентификация. Съществуват различни подходи за идентификация. В конкретния случай се използва оптимизационна процедура по непараметричен модел на обекта за намиране на три или четири параметрични мо-

дели, като се търси съвпадение във времевата област, на базата на следния показател (2)

$$J(\Theta) = \int_0^T e^2(t) dt, \quad (2)$$

където θ е вектор с параметрите на търсения модел, $e(t)$ представлява разликата между реалния изход $y(t)$ и изхода на настройваемия модел $y_m(t)$. Термичните обекти се характеризират с апериодично поведение и самоустановяване. Това оправдава използването на апроксимации от типа (3), (4) и (5) съответно за модели от II-ри ред без и със чисто закъснение и за модел от III-ти ред.

$$G_m(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (3)$$

$$G_m(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-Ls}, \quad (4)$$

$$G_m(s) = \frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}, \quad (5)$$

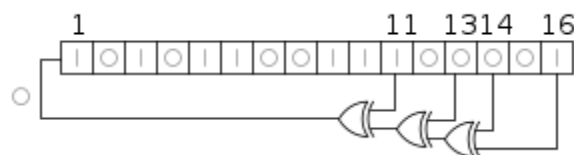
където k , T_i , L са коефициент на пропорционалност, времеконстанта и чисто закъснение. За оценяване на получените резултати се използва съвпадение между реалния изход и реакцията на модела при едностъпално входно въздействие. За получаване на количествена оценка се използва следния показател (6).

$$J = \frac{\|y(t) - y_m(t)\|_2}{\|y(t)\|_2}, \quad (6)$$

където $\| \cdot \|_2$ представлява норма на сигнал. Нормата на сигнал се свързва с неговата „големина“. Използването на този критерий е наложен от факта, че е налична реакцията на реалния изход единствено под формата на сигнал във времевата област. Числителят на показателя (6) може да се третира като абсолютна грешка от апроксимация, а (6) като относителна грешка.

За провеждането на идентификационната процедура първо е необходимо събиране на входно-изходни данни за всеки един контур. Последователно на всеки вход се подава единичен стъпаловиден сигнал, като се записват изходните реакции на обекта. След приключване на експеримента се разполага с 16 комплекта входно-изходни данни, на тяхна база се търсят 16 предавателни функции от вида (3), (4) и (5). Идентификацията се извършва в средата на MATLAB. Резултатът от изпълнението води до предавателна функция на избраната апроксимация, пресметнат показател (6) и графично сравнение между реакциите на реалния изход и неговия модел.

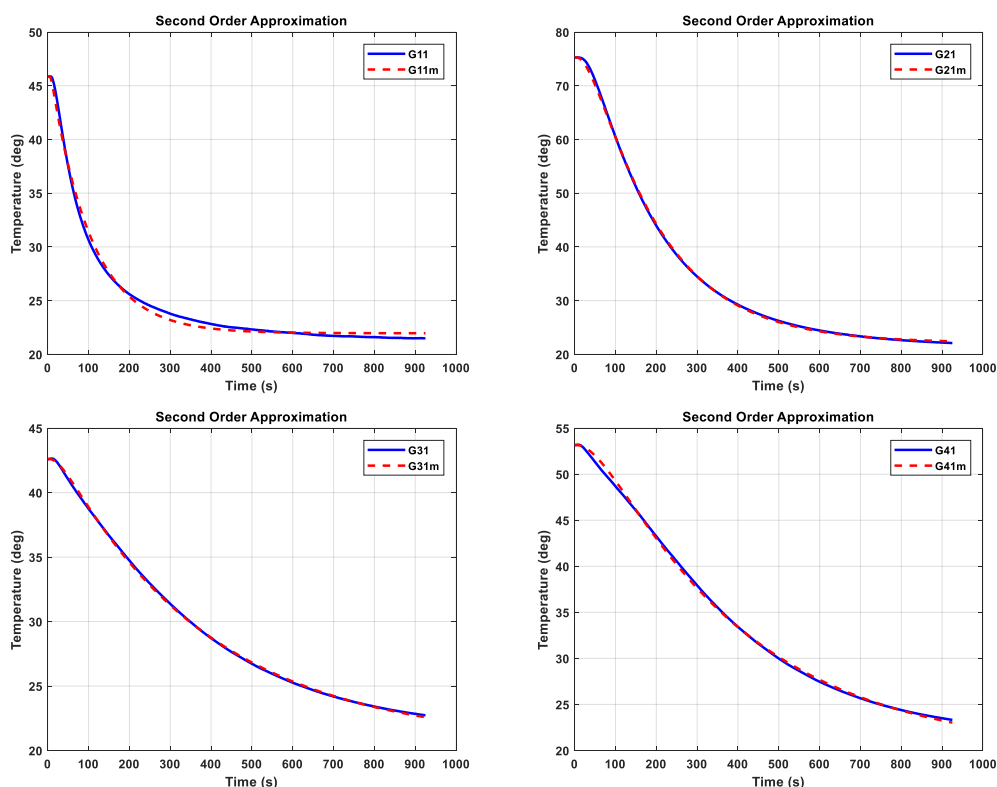
Извършен е и експеримент с управление на два от нагревателите с псевдо-случайни сигнали. Използван е методът на подпространството (*Subspace method*), описан подробно в [1]. Сигналите са получени от програмно реализиран в среда на TIA Portal генератор на псевдо-случайни двоични сигнали на базата на схемата на Фибоначи, като линейна обратна връзка с преместващи регистри (фиг.7).



Фиг.7. Принцип на изграждане на генератор на псевдо-случайни двоични сигнали

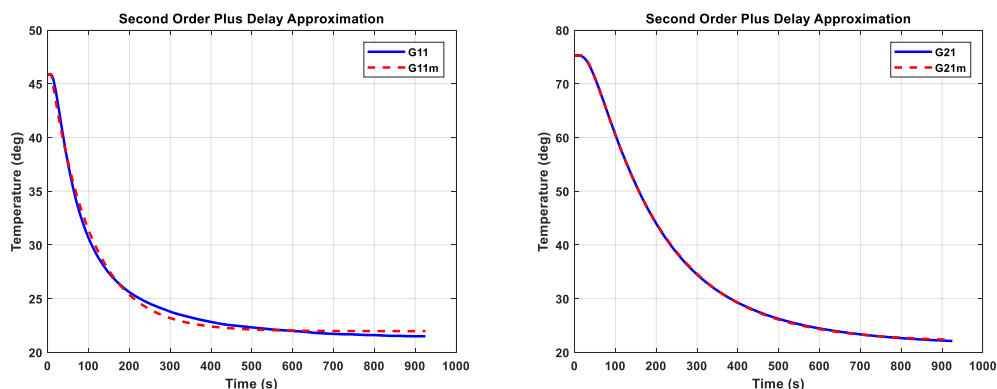
5. РЕЗУЛТАТИ

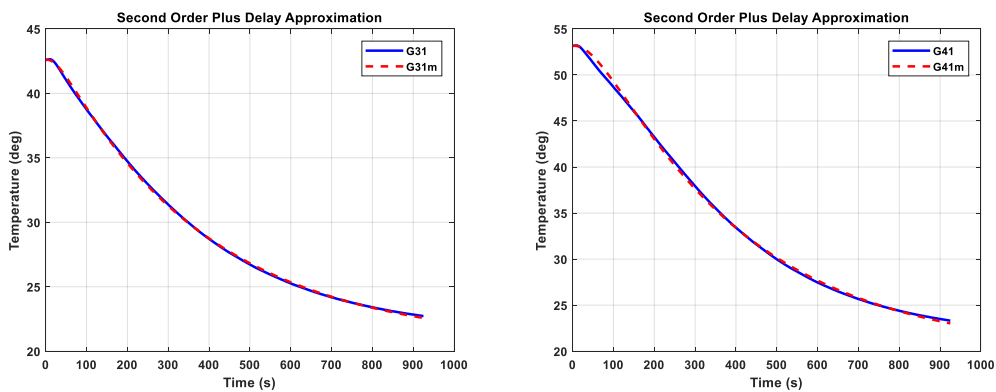
За всяка входно-изходна двойка е намерена предавателна функция от вида (4) и (5). На фиг.8 са показани някои резултатите от извършените експерименти и получените апроксимации с модел от втори ред.



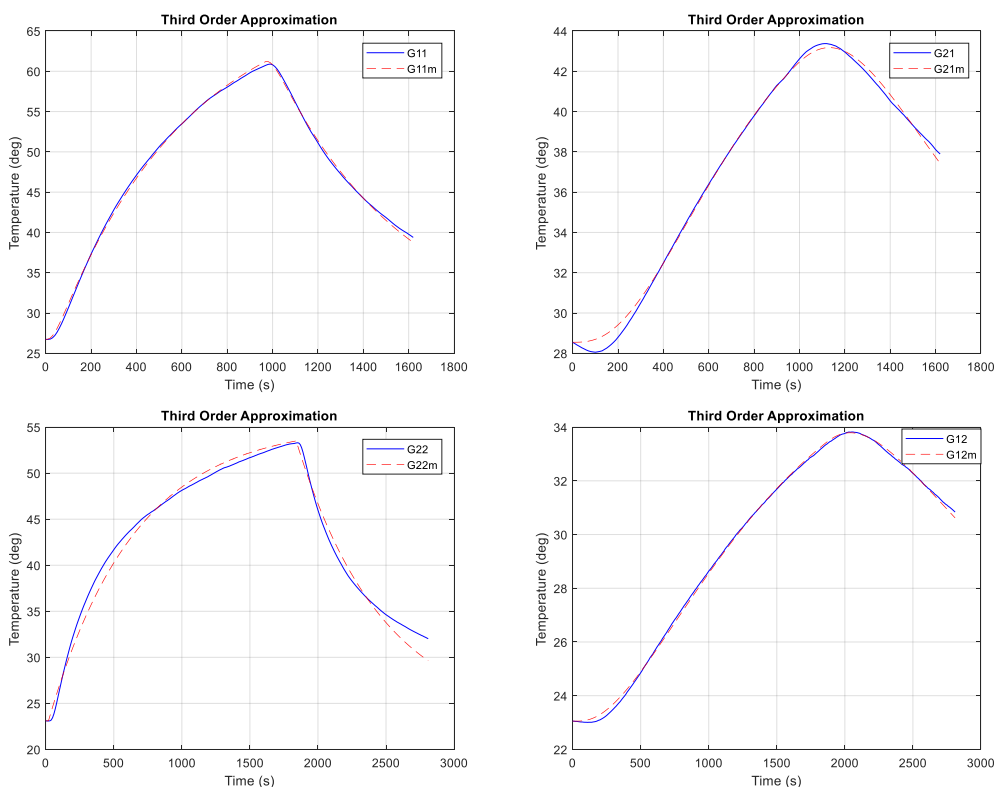
Фиг.8. Апроксимация на предавателните функции по канал 1

На фиг.9 са показани някои резултатите от извършените експерименти и получените апроксимации с модел от втори ред с чисто закъснение. На фиг.10 са показани някои резултатите от извършените експерименти и получените апроксимации с модел от трети ред.



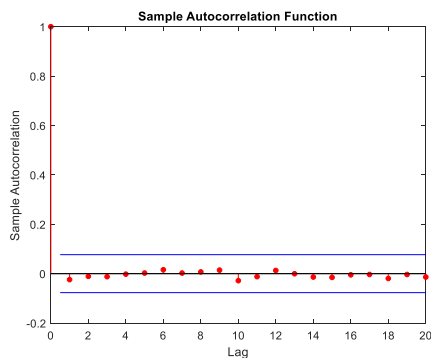


Фиг.9. Апроксимация на предавателните функции по канал 1

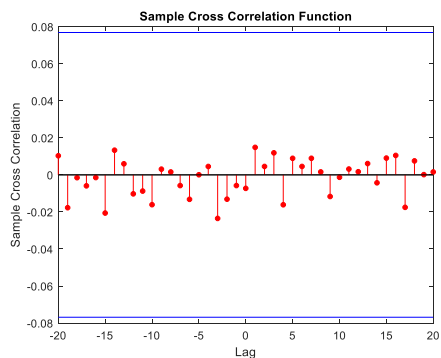


Фиг.10. Апроксимация от трети ред

На фиг.11 и фиг.12 са показани автокорелационна и корелационна функции на извадки, получени от генератора на псевдо-случайна двоична последователност, от които се вижда, че те са генерирани коректно.

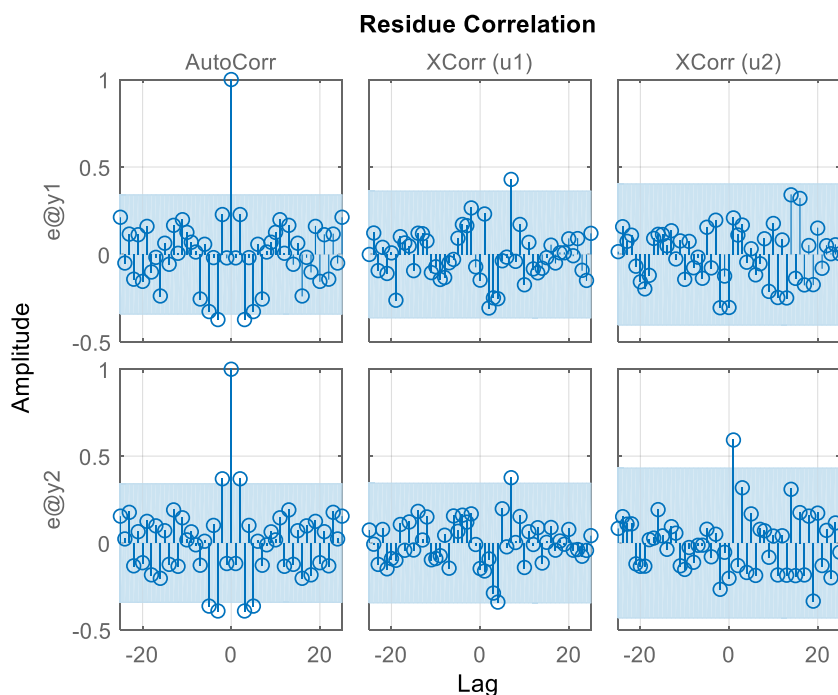


Фиг.11. Автокорелационна функция на извадка



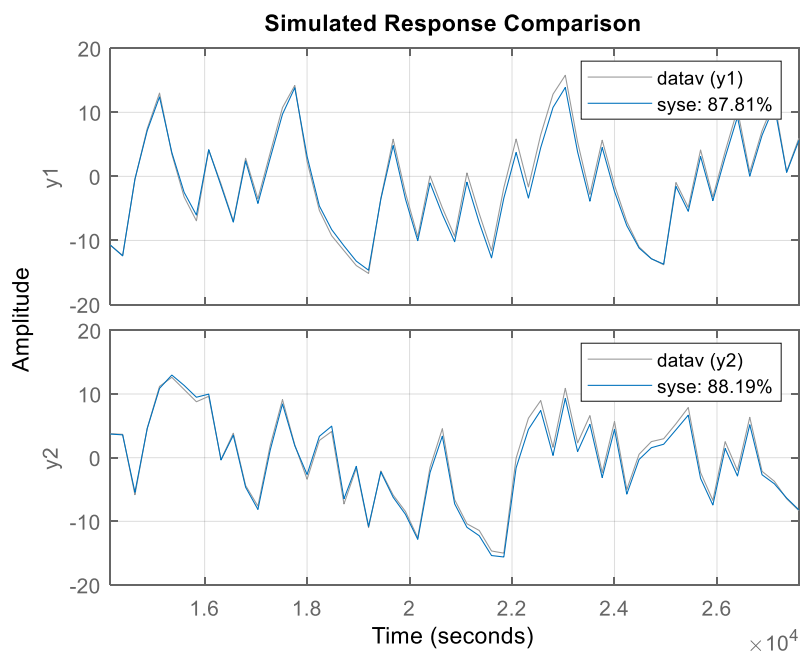
Фиг.12. Корелационна функция между две различни извадки

На фиг.13 са показани резултати от проведена идентификационна процедура с псевдо-случайни сигнали по два от входовете на обекта. Изследванията в тази област са в начална фаза.

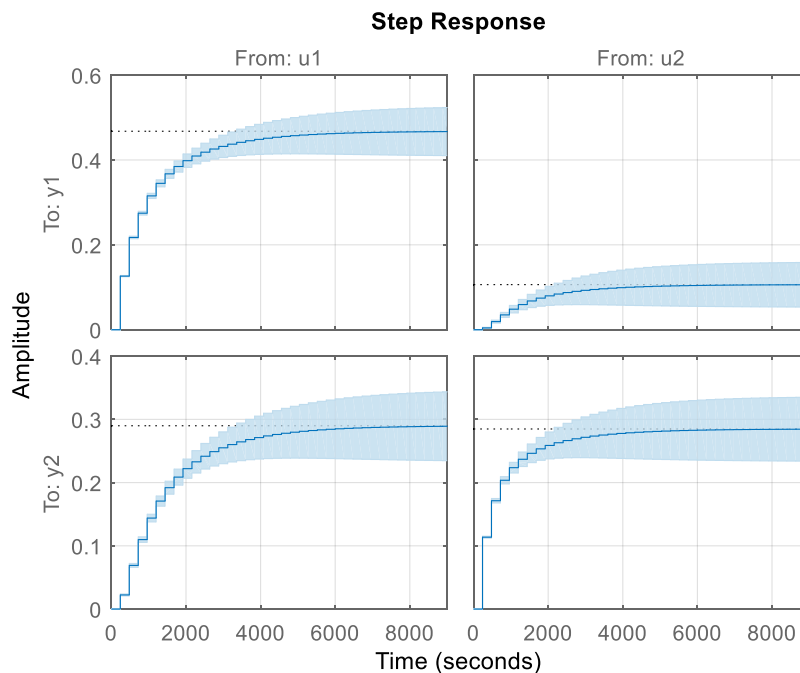


Фиг.13. Корелационни функции на остатъците

На фиг.14 е показано сравнение между данните и получения модел, а на фиг.15 преходна функция на получения модел с доверителен интервал 99%.



Фиг.14. Сравнение между данните и получения модел



Фиг.15. Преходна функция на получения модел с доверителен интервал 99%

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Създаден е лабораторен стенд, който включва многосвързан термичен обект, състоящ се от 4 свързани термични модули и система за управление, с която се измерва температурата на всеки от модулите и се управлява мощността на нагревателите и скоростта на вентилатора.
2. Термичните модули могат да се конфигурират по различен начин, което осигурява различна динамика на обекта и позволява гъвкавост при реализацията на различни стратегии на управление.
3. Разработени са ел. схеми, доставени са необходимите компоненти, разработено е необходимото програмно осигуряване за управление на термичния обект в отворен контур.
4. Разработено е програмно осигуряване за генериране на псевдо-случаен сигнал и е доказана коректната му работа.
5. Разработен е софтуер за запис и визуализация на данни от проведен експеримент. Записът се извършва в текстов файл, който е удобен за последваща обработка и използване на данните. За последваща обработка основно се използва MATLAB и са разработени програмни системи за предварителна обработка на данните.
6. Разработена е програмна система за идентификация с модел от втори ред без и със чисто закъснение и от трети ред. Направени са сравнения между данните от експеримента и получените модели. Резултатите показват много добро съвпадение на експериментални и теоретични резултати, като тези с модел от втори ред с чисто закъснение дават малко по-добро приближение, а моделите от трети ред са по-удобни при синтез на регулатори.
7. Разработена е програмна система за идентификация с използване на псевдо-случайни сигнали.

8. Разработен е модул за ПИД регулатор и процедура за автоматична настройка на параметрите.
9. Разработена е комуникация на SCADA системата с Matlab на база OPC сървър

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] System identification: Theory for The User 2nd Edition – *Lennart Ljung*, Prentice Hall, 1999
- [2] PID Controllers: Theory, Design and Tuning 2nd Edition - *Karl J. Astrom, Tore Hagglund*, Instrument Society of America 1995
- [3] Practical PID Control – *Antonio Visioli*, Springer 2006

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