

## УПРАВЛЕНИЕ НА СИСТЕМИ С ЧИСТО ЗАКЪСНЕНИЕ

Ахмед Кула, Георги Ружеков

**Резюме:** Разработва се хибридна система за управление. Обектът е реализиран в среда на MATLAB, работещ в реално време. Системата за управление използва индустриален контролер и SCADA система. Извършва оценка на чистото закъснение, моделиране на еталонен обект и реализация на автоматична настройка на регулатора. Разработената хибридна система дава възможност за изследване на различни видове регулатори за обекти с голямо чисто закъснение.

**Ключови думи:** Управление на обекти с чисто закъснение, хибридна система, PLC, SCADA, MATLAB.

## CONTROL SYSTEMS WITH TRANSPORT DELAY

Ahmed Kula, Georgi Ruzhekov

**Abstract:** A hybrid system is being developed. The plant is realized in MATLAB, works in real time. The control system uses an industrial controller and a SCADA system. Estimation of time-delay, modelling of reference object and autotune is performed. The developed hybrid system gives opportunities for research different types of regulators for plants with big time-delay.

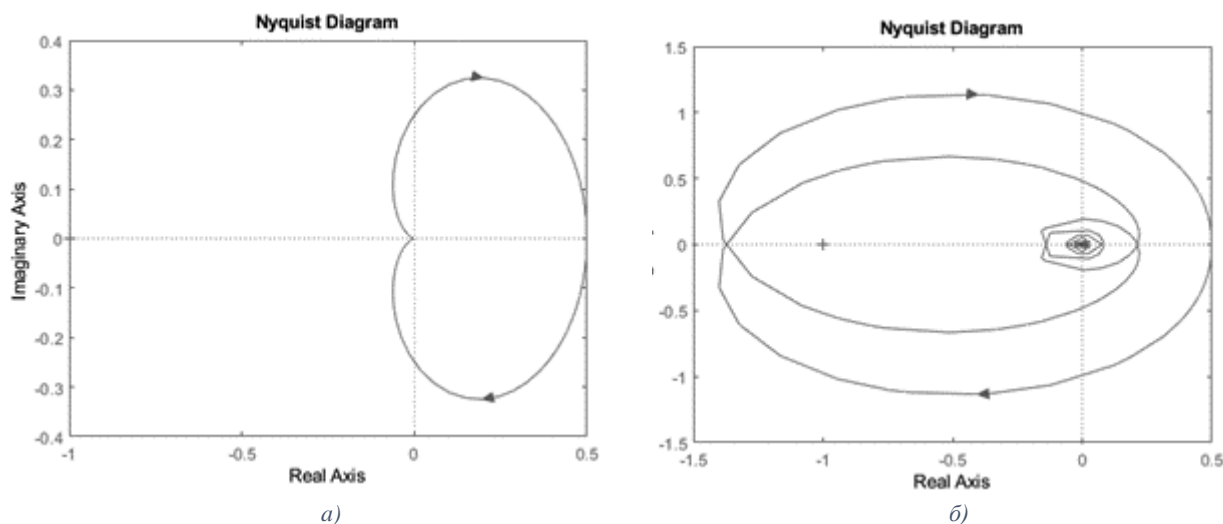
**Keywords:** Control plant with time-delay, Hybrid system, PLC, SCADA, MATLAB

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Системите за автоматично управление със закъснение са особен вид линейни системи. Те имат аналогична структура на обикновените линейни системи, но за разлика от тях притежават закъснение на изменението на изходната величина в едно или няколко звена, включени в системата.

Чистото закъснение е свързано с крайната скорост на пренасянето на веществата и енергията (транспортно закъснение). Налице е в системи за регулиране и управление и поради някои особености в начина на получаване на информация.

Наличието на значително чисто закъснение в обектите за управление води до влошаване на работата на системата за управление. С увеличаване на закъснението АФЧХ на отворената система се разширява и дори може да обхване критичната точка  $(-1, j0)$  от комплексната равнина и системата да премине в неустойчив режим. За такива случаи се прилагат специални структурни решения с цел компенсирание на закъснението. [1]



Фиг. 1. Обект за управление: а) без закъснение; б) със закъснение

## 2. МЕТОДИ ЗА КОМПЕНСАЦИЯ НА ЗАКЪСНЕНИЕТО

Регулаторите имат възможност да изчисляват изменението на регулируемата величина и спрямо това да формират регулиращо въздействие.

Действието на PID регулатора се състои в постоянно следене на регулируемата величина, определяне на текущата грешка и нейното коригиране, така че изходния сигнал на регулатора да остане почти без промяна.

При PID закон за управление, управляващият сигнал може да се определи чрез зависимостта:

$$u(nT_0) = k_p \left( e(nT_0) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{k=1}^n T_0 e(kT_0) + \frac{T_d}{T_0} (e(nT_0) - e(nT_0 - T_0)) \right) \quad (1)$$

където:

$e(nT_0) = y(nT_0) - r(nT_0)$  – грешка в системата;

$k_p$  – пропорционална съставка;

$T_i$  – интегрална съставка;

$T_d$  – диференциална съставка;

$T_0$  – такт на дискретизация.

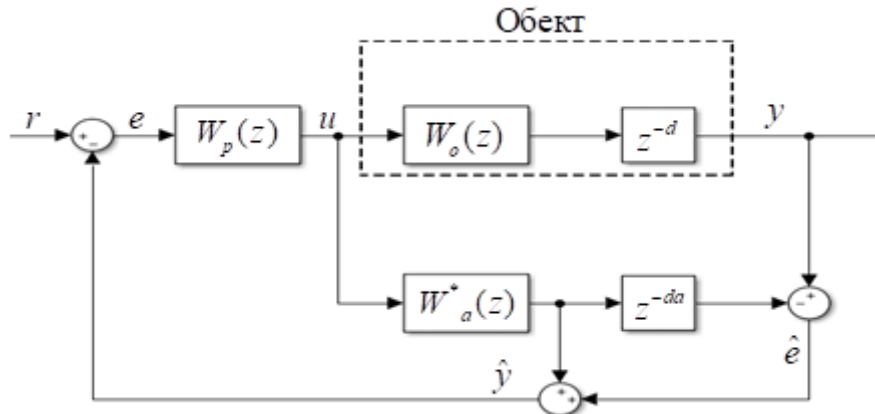
Този вид регулатор често се нарича „идеален PID“. По-добро управление се получава при „реалния PID“, който се представя със зависимостта:

$$W_{PID}(z) = k_p \left( 1 + \frac{T_0}{T_i} \frac{z}{z-1} + T_d \frac{z-1}{(T_d/N) + T_0 z} \right), \quad (2)$$

където  $N$  е константа, която приема стойности между 8 и 20. Използва се за филтрация на диференциалната съставка.

Освен PID закон за управление могат да се използват PD и PI закони за управление.

При системи със закъснение използването само на PID регулатор не е ефективно. Най-често се комбинира с предиктор на Смит. На фиг. 2 е представена структурна схема на предиктора на Смит. Вижда се, че този регулатор трябва да съдържа много подробно информация за обекта, тъй като трябва да има равенство в чистите закъснения и предавателната функция  $W(z)$  в обекта и в регулатора.

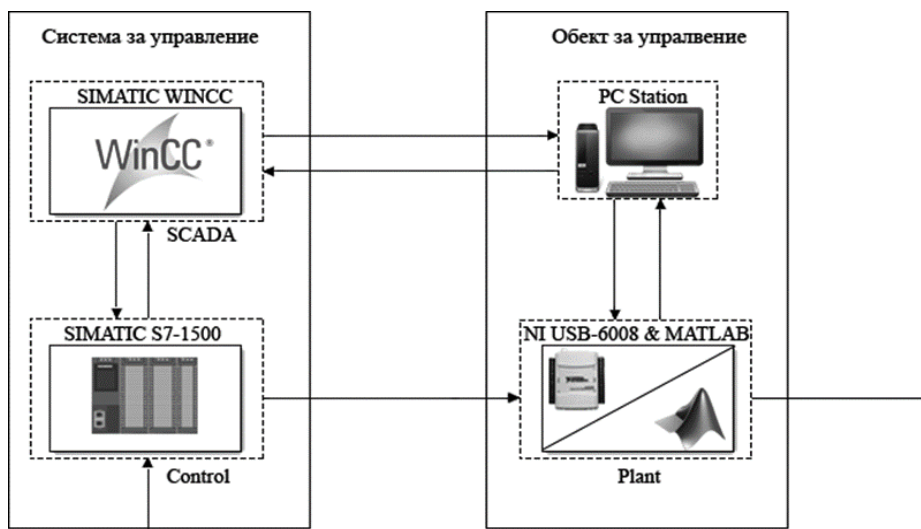


Фиг. 2. Структурна схема на регулатор на Смит

Основният регулатор обикновено реализира PID/PI закон за регулиране и е обхванат от локална отрицателна обратна връзка, съдържаща модела на обекта за управление. Възможно е за модел на обекта в предиктора да се използва апроксимиращ модел от първи ред с чисто закъснение от вида:

$$W_a(z) = \frac{k_a z}{T \left( z - e^{-\frac{T_0}{T}} \right)} z^{-d}, \quad d_a > d \quad (3)$$

### 3. СТРУКТУРА НА СИСТЕМАТА И СЪЗДАВАНЕ НА ОБЕКТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

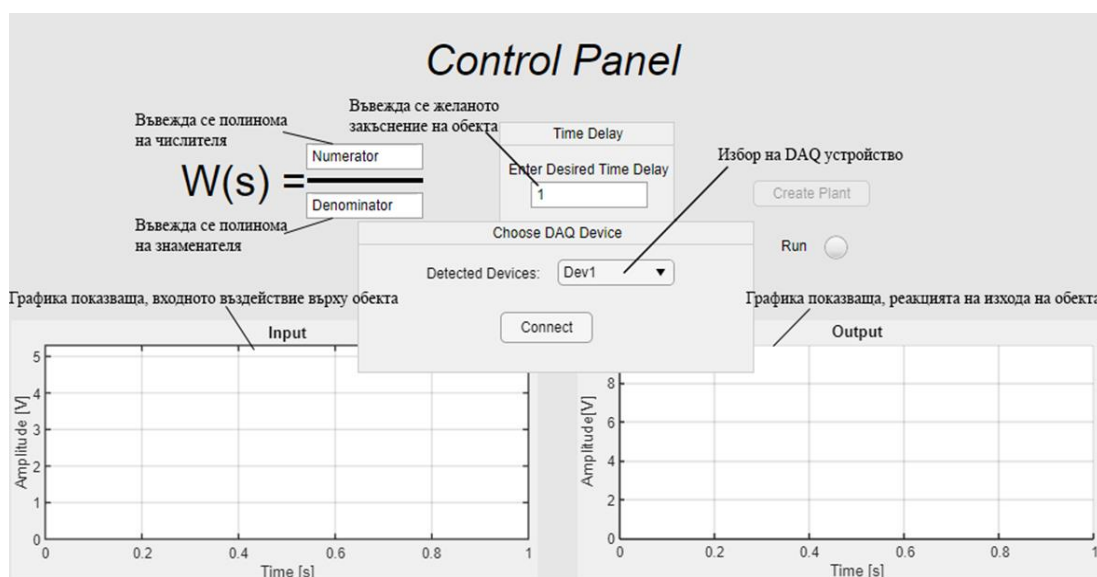


Фиг. 3. Структурна схема на системата

Реализирана е хибридна система за управление на обекти със закъснение (фиг. 3), която се състои от две подсистеми – моделиране на обекта и управление на обекта.

За създаването на обекта за управление се използва софтуерния продукт *MATLAB*, съвместно с цифрово-аналоговия преобразувател *NI USB-6008* на *National Instruments*. Устройството има възможност за 8 аналогови входа (12 bit), 2 аналогови изхода (150 Hz) и 12 цифрови входа-изхода.

Създаден е графичен потребителски интерфейс, където се въвеждат полинома на числителя и знаменателя, желаното закъснение на обекта и избор на метода на дискретизация (фиг. 4).



Фиг. 4. Графичен потребителски интерфейс

След въвеждането на данните и натискането на бутона *Create Plant*, се създава предавателна функция в непрекъснато време, която в последствие се дискретизира с такт *100ms*.

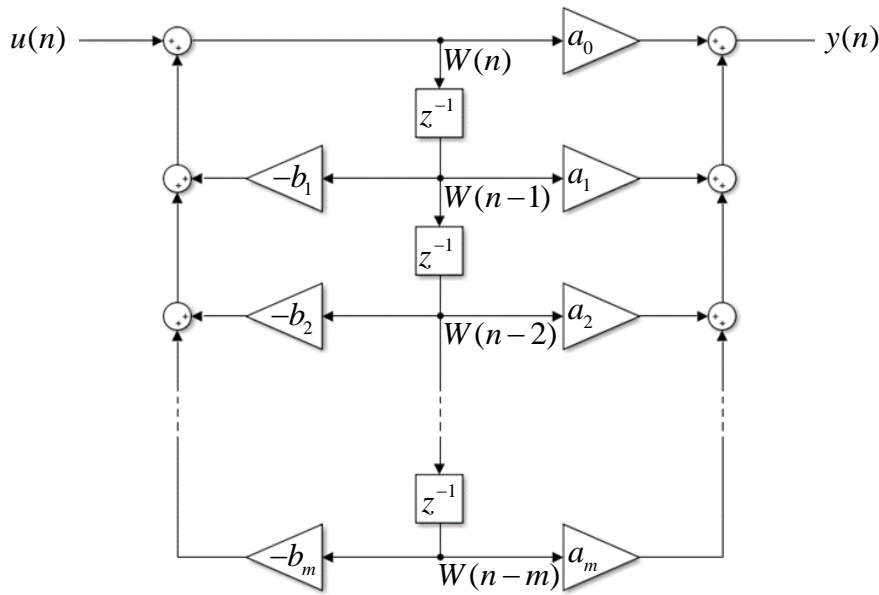
Изходния сигнал на обекта се оформя, чрез използването на директна канонична форма. Тя има следната предавателна функция:

$$H(z^{-1}) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \quad (4)$$

или в областта на времето се представя като:

$$y(n) = a_0 u(n) + a_1 u(n-1) + a_2 u(n-2) - b_1 y(n-1) - b_2 y(n-2) \quad (5)$$

Структурна схема на каноничната форма, която е оптимална спрямо използването на изчислителни ресурси (фиг. 5). По този начин системата работи в реално време.



Фиг. 5. Структурна схема на директна канонична форма

#### 4. МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕТАЛОНЕН МОДЕЛ

##### 4.1. Оценка на закъснението

Оценката на закъснението се извършва като се подаде стъпално входно въздействие към входа на обекта и се изчака реакцията на системата при зададен определен праг.

##### 4.2. Определяне на еталонен модел

Параметрите на еталонния модел, с който ще работи предиктора, се извършва чрез графоаналитичен подход. Към обекта се подава детерминиран изпитателен сигнал и по конкретно стъпално въздействие. Определянето на параметрите на обекта се извършва по метода *Method of Moments* [3]. При използването на този метод, обектът се моделира с предавателна функция от първи ред със закъснение:

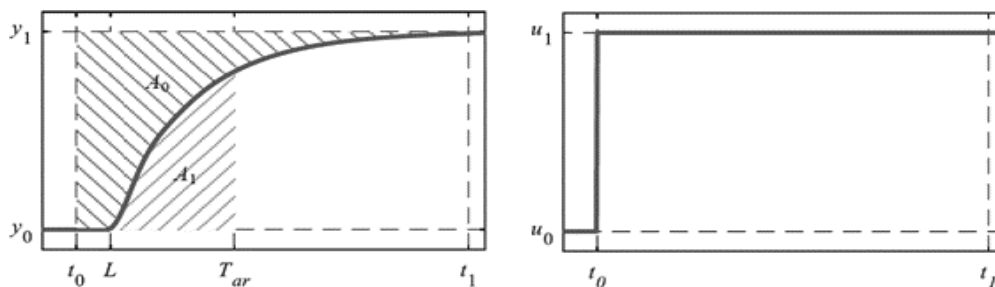
$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} \quad \text{или} \quad W(z) = \frac{Kz}{T \left( z - e^{-\frac{T_0}{T}} \right)} z^{-d} \quad (6)$$

Моделът от първи ред със закъснение има три параметъра:  $K$  – коефициент на пропорционалност,  $T$  – времеконстанта и  $L$  – закъснение. За разлика от повечето методи, където моделите се получават на база на определяне на инфлексна точка, този метод се получава на базата на изчисляване на отделни площи от переходната характеристика (фиг. 6).

Коефициентът на обекта се изчислява със следната формула:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0} \quad (7)$$

където:  $\Delta y$  е изменението на изходната величина,  $\Delta u$  – изменение на входната величина.



Фиг. 6. Графично представяне на Method of Moments

За намирането на времеконстантата и закъснението се изчисляват допълнителни променливи: площ  $A_0$  (интегриране на установената стойност и текущия изход на обекта), време  $T_{ar}$  и площта  $A_1$  (площта под преходната функция до време  $T_{ar}$ ) [3]. Пресмятането на тези променливи се извършва чрез следните формули:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \int_{t_0}^{t_1} [y_1(t) - y(t)] dt \xrightarrow{Z} \sum_{t_0}^{t_1} y_1(t_1) - y(t_0) \\
 T_{ar} &= \frac{A_0}{K} \\
 A_1 &= \int_{t_0}^{T_{ar}} y(t) dt \xrightarrow{Z} \sum_{t_0}^{T_{ar}} y(t_0) \\
 T &= \frac{eA_1}{K} \\
 L &= T_{ar} - T
 \end{aligned} \tag{8}$$

където  $e$  – числото на Ойлер.

### 4.3. Определяне на закъснение на еталонен модел

Закъснението на еталонния модел се получава като от оцененото закъснение (т.4.1) се добави закъснението, което се получава от метода за получаване на еталонен модел (т.4.2).

В [5] е демонстриран начин за реализация на закъснение чрез използването на апроксимация на Паде. Този начин за практическа реализация не е ефективна, защото изисква голям изчислителен ресурс и е по-труден за реализация. По-ефективно е използването на закъснителна верига [4]. Представява масив, съдържащ изхода на каноничната форма, който се измества наляво/надясно с всеки такт на дискретизацията.

## 5. УПРАВЛЕНИЕ НА ОБЕКТА

За управление на обекта се използва индустриален контролер на Siemens, Simatic S7-1500 CPU 1513-1 PN. Към него са добавени и три модула – модул за

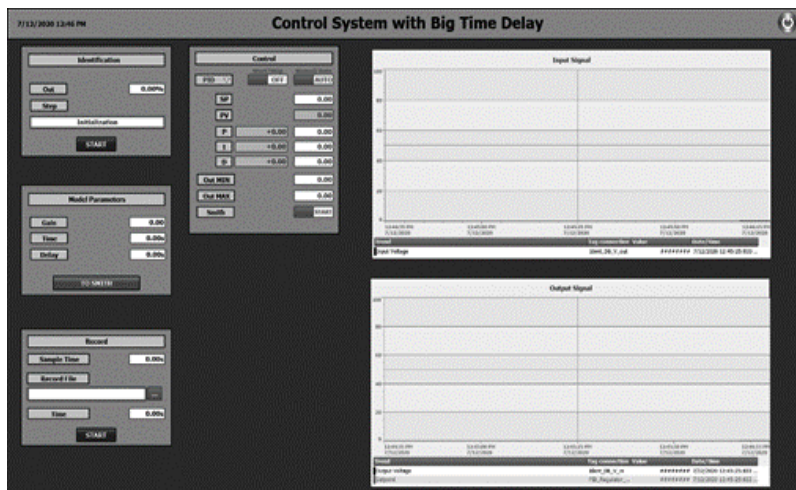
цифрови входове, изходи и един модул за аналогови входове/изходи. За обработка на информацията са нужни по един аналогов вход и изход. На аналоговия вход се получават данни за процесната величина, които се обработват и се изпращат обратно към обекта през аналоговия изход.

В среда на TIA Portal е реализирана процедура за определяне на параметрите на еталонния модел в предиктора на Smith и PID регулатор. Създаден е екран в WinCC RT Advanced (фиг. 7). В този екран, потребителя има възможност да пусне процедура по идентификация на обекта, да направи запис от експерименти и настройка на регулаторите.

## 6. РЕЗУЛТАТИ

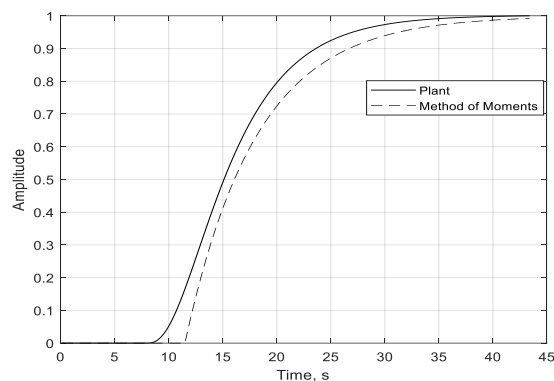
Резултати, които ще бъдат изложени в тази точка, са получени на базата на следната предавателна функция, въведена в контролния панел (фиг. 4):

$$W(s) = \frac{1}{(2s+1)(1.5s+1)(5s+1)} e^{-8s}$$



Фиг. 7. SCADA екран

След извършване на процедура по идентификация е получена следната преходна характеристика:



Фиг. 8. Преходни характеристики на обект и модел

Използвайки метода за идентификация описан в т.4, за параметри на модела са получени коефициентите:

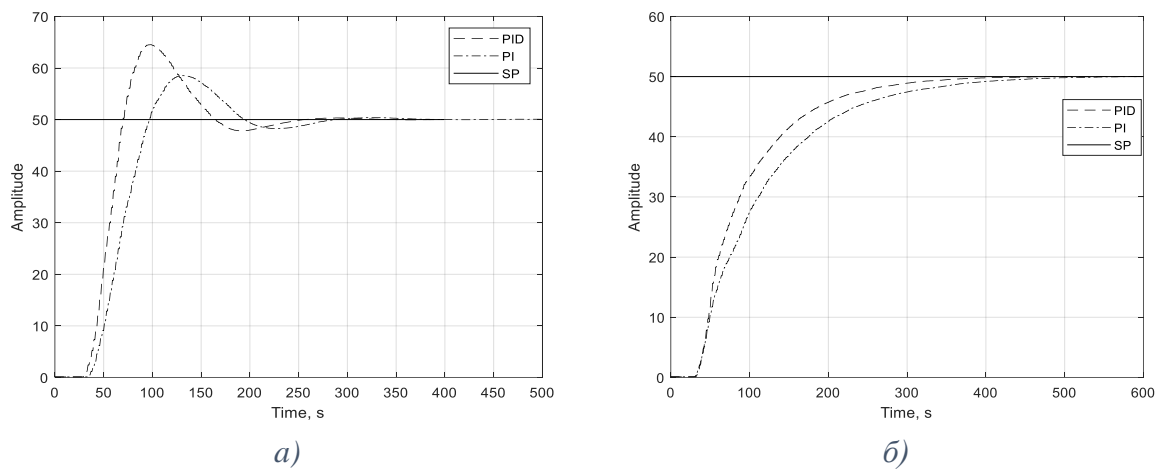
$$K=1 \quad T=6.6s \quad L=11.6s$$

Синтезирани са PI и PID закони за управление. Използван е *AMIGO* метод за синтезиране на законите за управление (табл. 1) [3,6].

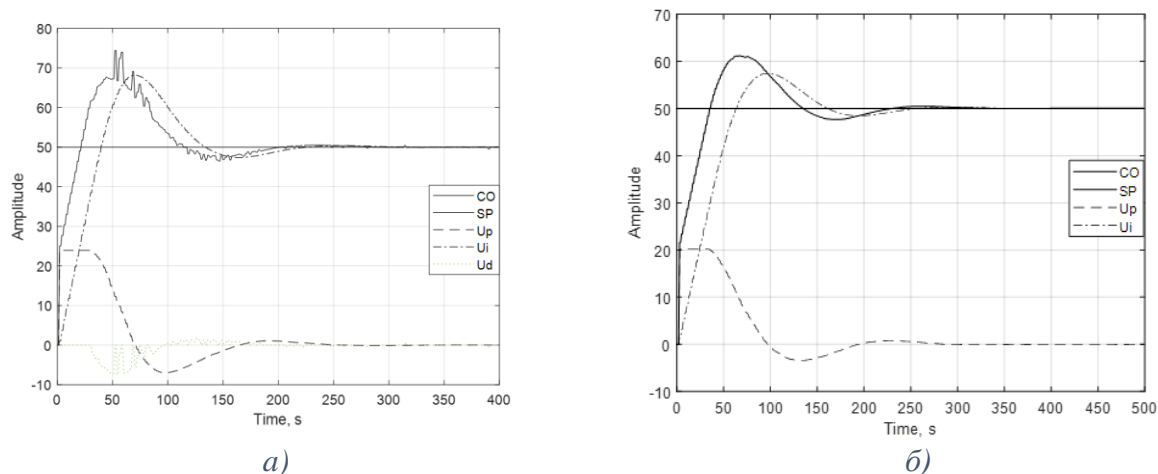
Табл. 1. Резултати след синтез на регулаторите

Регулатор	Формула	Коефициенти
PID	$K_p = \frac{1}{K} \left( 0.2 + 0.45 \frac{T}{L} \right)$ $T_i = \frac{0.4L + 0.8T}{L + 0.1T} L$ $T_d = \frac{0.5LT}{0.3L + T}$	$K_p = 0.4802$ $T_i = 8.9620$ $T_d = 3.5767$
PI	$K_p = \frac{0.15}{K} + \left[ 0.35 - \frac{LT}{(L+T)^2} \right] \frac{T}{KL}$ $T_i = 0.35L + \frac{13LT^2}{T^2 + 12LT + 7L^2}$	$K_p = 0.3528$ $T_i = 7.3052$

След провеждане на експерименти с получените коефициенти за регулаторите са получени следните резултати:



Фиг. 9. Експерименти с а) без и б) със схема на Smith



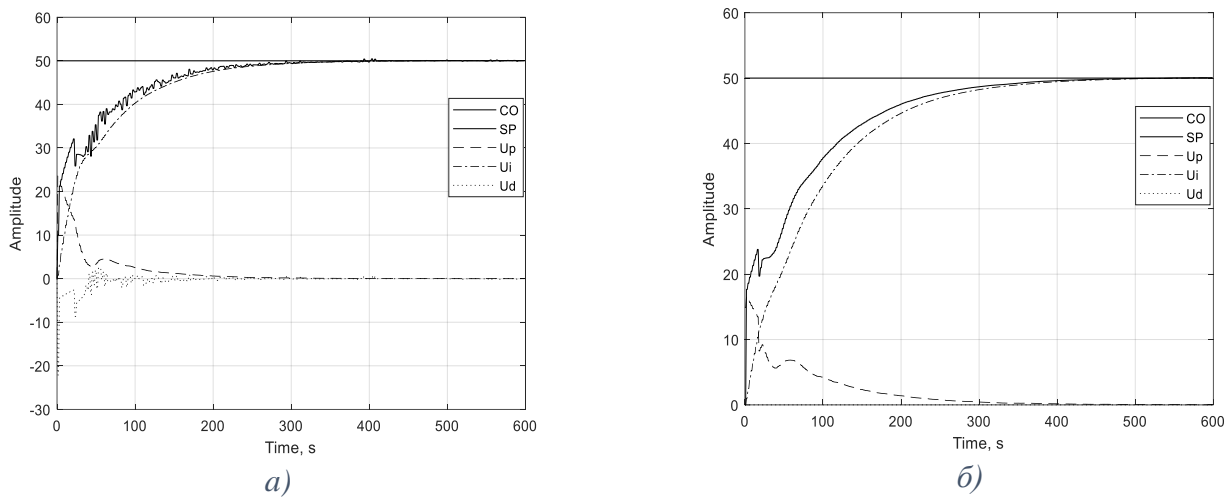
Фиг. 10. Управляващи сигнали на а) PID и б) PI регулатор без схема на Smith



От получените резултати с двата регулатора се вижда, че използването само на PID/PI регулатор за управление на обект с чисто закъснение не е ефективно. За тази цел в обратната връзка се включва схема на Smith, който компенсира закъснението. На фиг. 9. б) е показана реакцията на изхода при използването на PID/PI регулатор заедно със схема на Smith. Вижда се, че предиктора на Smith успешно компенсира закъснението.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализирана е хибридна система за управление на обекти със закъснение. Използва се нов подход за реализация на чисто закъснение. Направен е графичен интерфейс в новия продукт на *MATLAB – App Designer*. За управлението на обекта се използва контролер на *SIEMENS*. Реализирани са алгоритми за получаване на модел на обекта, PID и Smith регулатори в среда на *TIA Portal V16*. Създаден е *SCADA* екран в *WinCC RT Advanced*. От направените експерименти се стига до



Фиг. 11. Управляващи сигнали на а) PID и б) PI регулатор със схема на Smith

извода, че за системи със закъснение самостоятелната употреба на PID/PI регулатор не е ефективна. Необходимо е да се добави регулатор на Smith в обратната връзка. Като заключение може да се каже, че регулатора на Smith подобрява стабилността на системите със закъснение.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ружеков Г., Обработка на данни и сигнали, Технически университет – София, 2011.
- [2] Драготинов И., И. Ганчев, Автоматизация на технологични процеси, УХТ-Пловдив, 2003.
- [3] Danium M., M. Awtoniuk, R. Salat, Implementation of PID autotuning procedure in PLC controller, ITM Web Conferences 15, 2017.
- [4] Sophocles J. O., Introduction to Signal Processing, Rutgers University, 2010.
- [5] Hanta V., A. Prochazka, Rational Approximation of Time Delay, Institute of Chemical Technology in Prague, 2009.
- [6] Åström K.-J., T. Häggglund, Revisiting The Ziegler-Nichols step response method for PID control, Journal of Process Control, 2004.

**Автори:** *Ахмед Кула*, бак. инж., Технически университет-София, Факултет Автоматика,  
кафедра Системи и управление,  
*e-mail: [akula@tu-sofia.bg](mailto:akula@tu-sofia.bg)*;

*Георги Ружеков*, доц. д-р, Технически университет-София, Факултет Автоматика,  
кафедра Системи и управление,  
*e-mail: [g\\_ruzhekov@tu-sofia.bg](mailto:g_ruzhekov@tu-sofia.bg)*;

**Authors:** *Ahmed Kula*, Technical University of Sofia, Faculty of Automatics,  
dept. Systems and Control,  
*e-mail: [akula@tu-sofia.bg](mailto:akula@tu-sofia.bg)*;

*Assoc. prof. Dr. Georgi Ruzhekov*, Technical University of Sofia, Faculty of Automatics,  
dept. Systems and Control,  
*e-mail: [g\\_ruzhekov@tu-sofia.bg](mailto:g_ruzhekov@tu-sofia.bg)*;