

## LUCRAREA DE LABORATOR NR.7

## SISTEM DE REGLARE CU REGULATOR PI.

## SISTEM DE REGLARE CU REGULATOR BIPOZIȚIONAL.

## 1. Obiective

- fixarea noțiunilor elementare referitoare la regulatorul PID,
- fixarea noțiunilor elementare referitoare la sistemele de reglare cu reacție după ieșire,
- studiul unui sistem de reglare folosind modele Simulink,
- însușirea unor noțiuni elementare referitoare la regulatoarele bipoziționale,
- însușirea unor noțiuni elementare referitoare la reglarea bipozițională.

## 2. Sisteme de reglare automată

- Reglarea automată reprezintă un procedeu de conducere în buclă închisă a unui proces, astfel încât procesul să ajungă și să se mențină într-un regim de funcționare prescris prin semnalul de conducere. Bucla de reglare este, de regulă, o structură cu reacție negativă.
- Elementul de decizie din bucla de reglare este denumit *regulator*. De la caz la caz, denumirea este folosită pentru elementul de decizie din buclă, sau pentru dependența funcțională pe care acesta o implementează. În mod riguros, dependența este denumită *lege de reglare* sau *algoritm de reglare*.
- În situațiile simple structura unei bucle de reglare are aspectul din exemplul din Fig. 7.1. Bucla conține partea condusă, reprezentată în figură de convertorul de putere (element de execuție sau actuator) și mecanismul condus, elementul de măsurare și regulatorul.

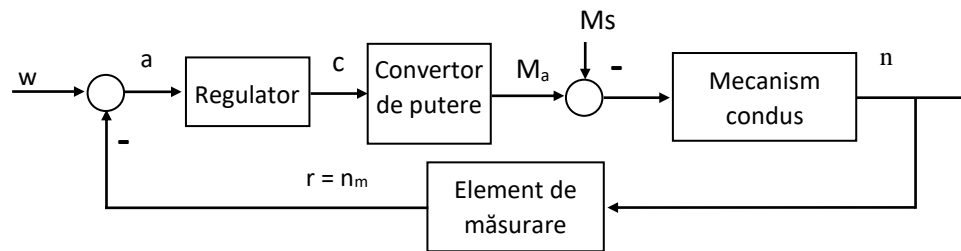


Fig. 7.1.

În particular, această schemă se referă la un sistem de reglare a turației  $n$  a unei acționări electrice. Mecanismul condus (acționat) este comandat de regulator prin convertorul de putere care modifică momentul de acționare  $M_a$ . Pentru fiecare moment  $t$ , regulatorul calculează semnalul de comandă  $c$  în funcție de mărimea de acționare  $a = w - n_m$  ( $w$  – semnal de referință,  $n_m$  semnal de reacție reprezentând valoare măsurată a lui  $n$ ). Semnul „-” din relația anterioară denotă „reacție negativă”. Echilibrul sistemului este afectat de variațiile semnalului de conducere  $w$  care modifică valoarea de referință a turației  $n$  și de variațiile momentului de sarcină  $M_s$  care modifică valoarea lui  $n$ .

În ipoteza că reacția este unitară (aceasta înseamnă că amplificarea canalul  $y \rightarrow r$  are valoarea 1, adică  $r = n_m = y$ ), schema anterioară obține aspectul din Fig. 7.2. Mărimea „ $a$ ” devine  $a = w - y$ . În acest caz ea este denumită *eroare de reglare* și se notează cu  $\varepsilon$ . Pentru mărimea perturbatoare se folosește notația  $v$ .

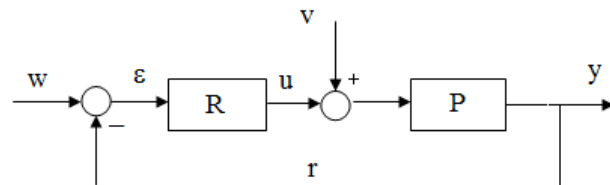


Fig. 7.2.

### 3. Reglatoare PID

- O clasă de reglatoare întâlnită frecvent în practică este cea a reglatoarelor PID. Ele implementează legea de reglare:

$$u(t) = K \cdot \left[ \varepsilon(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau + T_D \cdot \dot{\varepsilon}(t) \right] + u(0) . \quad (1)$$

Alternativ formei (1) se folosește și forma (2):

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \cdot \dot{\varepsilon}(t) + u(0) . \quad (2)$$

În cele două relații,  $u(0)$  reprezintă valoare inițială a mărimii de comandă, valoare impusă de componenta integratoare a legii de reglare. Parametrii expresiilor (1) și (2) sunt legați prin relațiile:

$$K_p = K, \quad K_i = K / T_i, \quad K_d = K \cdot T_d . \quad (3)$$

Figura 7.3. detaliază utilizarea unui reglator PID în bucla de reglare din Fig. 7.1:

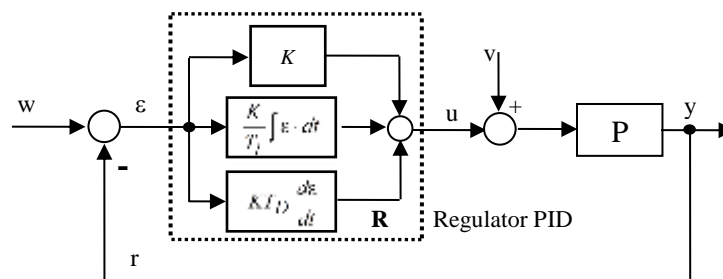


Fig. 7.3.

Semnalul de comandă este o sumă de trei componente:

- componenta proporțională cu eroarea de reglare  $u_p(t) = K \cdot \varepsilon(t) = K_p \cdot \varepsilon(t)$ ,
- componenta integratoare, proporțională cu integrala erorii  $u_I(t) = K \cdot \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau = K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$ ,
- componenta derivatoare, proporțională cu derivata erorii  $u_D(t) = K \cdot T_D \cdot \dot{\varepsilon}(t) = K_d \cdot \dot{\varepsilon}(t)$ .
- Rostul celor trei componente este următorul:
  - *Componenta proporțională (componenta P)* are rolul de a determina, la creșterea erorii de reglare  $\varepsilon$ , o creștere instantanee a valorii semnalului de comandă  $u$  proporțională cu creșterea erorii de reglare. Drept consecință va crește valoarea mărimii reglate  $y$ , iar datorită reacției negative va scădea valoarea erorii  $\varepsilon$ . În consecință, vorbim despre o *acțiune de tip instantaneu-stabilizator (corector)*.
  - *Componenta integratoare (componenta I)* introduce în comanda  $u(t)$  în mod cumulativ, prin integrare, o cantitate ce depinde de persistența erorii de reglare  $\varepsilon$ , indiferent dacă eroarea se datorează mărimii de referință  $w$ , sau mărimii perturbatoare  $v$ . Datorită caracterului cumulativ, nu se forțează atingerea instantanee a valorii staționare a mărimii reglate, dar inerția acestei componente poate contribui la producerea unui suprareglaj. *Acțiunea componentei integratoare este de tip temporizat-corector*.
  - *Componenta derivatoare (componenta D)* intervine de o manieră aditivă, proporțional cu viteza de variație a lui  $\varepsilon(t)$ , aceasta însemnând un caracter anticipativ. În particular, atunci când eroarea de reglare are tendința să crească, comanda  $u$  crește substanțial mai repede decât dacă comanda

ar fi lăsată pe seama componentelor P și I. Ca urmare, se provoacă o creștere mai rapidă a valorii mărimii reglate  $y$ , respectiv o diminuare mai rapidă a erorii de reglare. *Acțiunea de tip derivator este de tip anticipativ-corector.*

- Există o serie de forme particulare de implementare a legii de reglare (1). Ele derivă din (1) prin omiterea unui termen sau a doi termeni. Cele mai importante forme sunt:
  - regulatorul P:  $u(t) = K \cdot \varepsilon(t)$ ; (4)
  - regulatorul PI:  $u(t) = K \cdot \left[ \varepsilon(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau \right] + u(0)$  sau  $u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + u(0)$  (5);
  - regulatorul PD:  $u(t) = K \cdot [\varepsilon(t) + T_D \cdot \dot{\varepsilon}(t)]$ . (6)
- Regulatorul PI este cel mai folosit în practică întrucât, dacă sistemul de reglare este stabil, el asigură o eroare staționară nulă ( $\varepsilon = 0$ ), iar în cazul în care elementul de execuție<sup>1</sup> are suficientă putere, compensează în mare măsură inerția procesului condus, reducând timpul de reglare.

Proiectarea unei legi de reglare PI înseamnă determinarea valorilor amplificărilor  $K_p$  și  $K_i$ , sau a parametrilor  $K$  și  $T_I$  astfel încât compensarea să se facă cu un suprareglaj modic și un timp de reglare cât mai scurt.

#### 4. Un sistem de reglare cu regulator PI

Pentru sistemul de reglare din Fig.1 a fost conceput modelul Simulink din Fig.7.4 – 7.6. Sistemul este structurat pe 6 subsisteme: procesul condus (Fig. 7.5), regulatorul PI (Fig. 7.6), elementul de execuție (convertor de putere de tip ET-PT<sub>1</sub>), elementul de măsurare (traductor de tip P cu modelul  $r(t) = 0.01 n(t)$ ), elementul de prescriere a referinței (generează un semnal treaptă de 15 unități,  $15 \cdot \sigma(t)$ ) și generatorul de moment rezistent (moment perturbator exterior) care intervine printr-un impuls de 20 N·m și durată de 10 secunde,  $M_r(t) = 20 \cdot [\sigma(t-55) - \sigma(t-65)]$ . În cadrul procesului condus, asupra mecanismului acționează un moment perturbator de tip sarcină, dependent de turație,  $M_s(t) = 300 \cdot (1 - 0.5 \cdot e^{-n} - 0.5 \cdot e^{-n/3})$ , modelat prin blocul  $f(u)$  (din librăria User-Defined Functions). Parametrii regulatorului sunt  $K_p = 1.7$ ,  $K_i = 2$ .

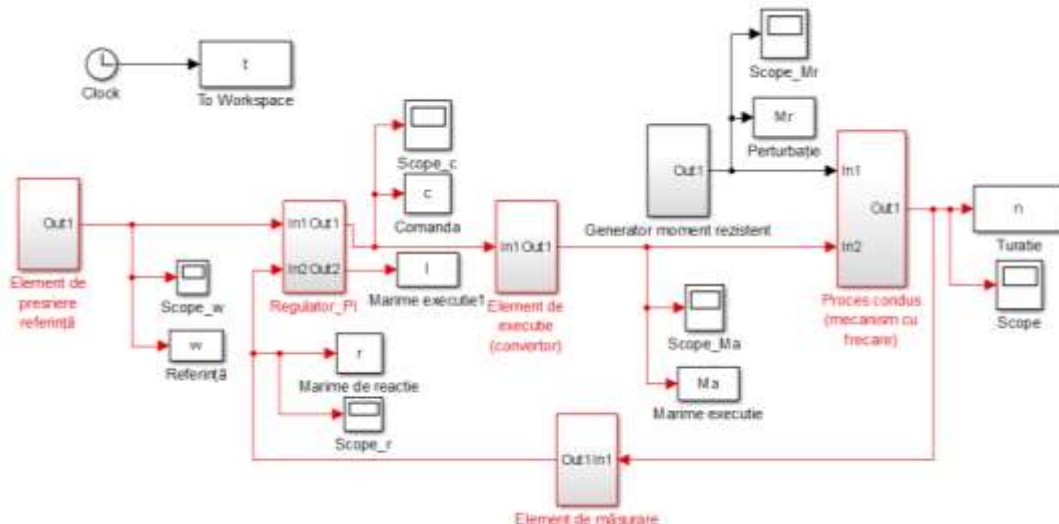


Fig. 7.4.

<sup>1</sup> Elementul de execuție (sau actuatorul) realizează interfațarea dintre regulator și procesul condus. El comandă procesul furnizându-i energie obținută de la o sursă externă.

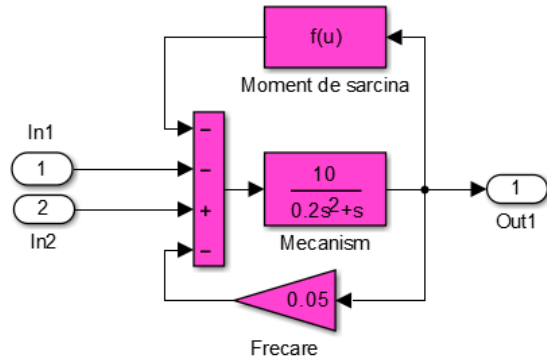


Fig. 7.5.

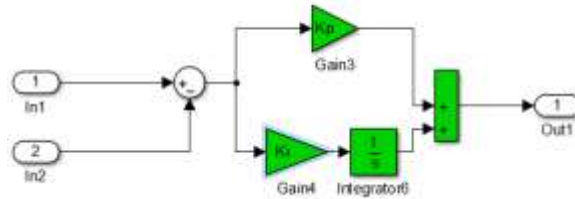


Fig. 7.6.

Funcționarea sistemului în condițiile precizate este redată în Fig. 7.8 și Fig. 7.9. Turația atinge valoarea reglată de 1500 rpm prescrisă prin  $w = 15$  unități. Aplicarea momentului rezistent exterior  $M_r$  produce oscilații ale turației, momentul  $M_r$  fiind compensat de momentul de acțiune  $M_a$ .

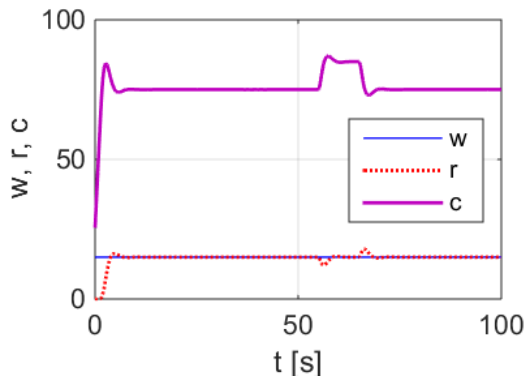


Fig. 7.7

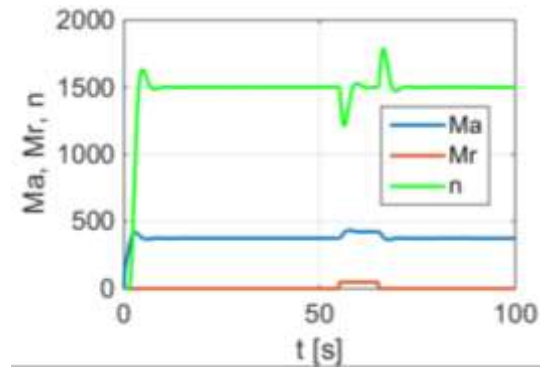


Fig. 7.8.

- Prin modificarea valorilor parametrilor  $K_p$  și  $K_i$  se pot modifica și performanțele sistemului de reglare. Modelul Simulink permite să se studieze și să se coreleze aceste modificări.

## 5. Regulatorul bipozițional

- Regulatorul PID este de tip liniar. În practică se folosesc pe larg și regulatoare neliniare.
- Cea mai simplă lege de reglare neliniară este legea de reglare bipozițională (sau regulatorul bipozițional, R-2P) care realizează dependența intrare-ieșire (7). Această dependență este idealizată, întrucât nu conține elemente inerțiale.

$$c(t) = \begin{cases} 0, & \varepsilon(t) < 0 \\ 1, & \varepsilon(t) \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Atributul „bipozițional” se datorează faptului că semnalul de comandă  $c$  ia doar două valori: 0 și 1 (semnal binar). R-2P comandă procesul condus printr-un element de execuție (actuador) bipozițional care conectează sau deconectează (prin acțiuni de tipul: închis/deschis, stânga/dreapta) procesul condus la o sursă de energie.

- Atunci când procesul condus are inerție redusă, eroarea de reglare  $\varepsilon$  reacționează foarte rapid la modificările comenzii  $c$ , iar frecvența de comutare la care este supus elementul de execuție poate deveni foarte mare. Aceasta poate conduce la uzura rapidă a elementului de execuție și a altor părți din sistem. Din acest motiv în locul R-2P se folosește o variantă a acestuia, regulatorul bipozițional cu histerezis (R-2Ph), care realizează dependența (8) reprezentată în Fig. 7.9.

$$c(t) = \begin{cases} 0, & \text{daca} \begin{cases} \varepsilon(t) < \varepsilon_- \\ \varepsilon(t) \leq \varepsilon_+, c(t_-) = 0 \end{cases} \\ 1, & \text{daca} \begin{cases} \varepsilon(t) > \varepsilon_+ \\ \varepsilon(t) \geq \varepsilon_-, c(t_-) = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

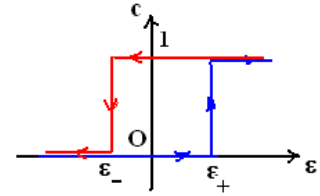


Fig. 7.9.

În (8)  $c(t_-)$  este valoarea semnalului de comandă  $c$  la un moment anterior lui  $t$ , dar foarte apropiat de acesta ( $t - 0$ ). După caz, pragurile  $\varepsilon_-$  și  $\varepsilon_+$  sunt fixe sau ajustabile. Cu cât lățimea ciclului de histerezis  $\varepsilon_+ - \varepsilon_-$  este mai mare, cu atât frecvența de comutare în cursul reglării este mai mică, dar și precizia de reglare mai redusă.

- Dependențele (7) și (8) se cunosc în tehnică și sub denumirea de *caracteristici de tip releu*.

## 6. Reglarea temperaturii apei dintr-un boiler cu regulator bipozițional cu histerezis

În lipsa consumului, încălzirea și răcirea apei dintr-un boiler<sup>2</sup> reprezintă un proces periodic cu două faze: *faza de încălzire*, care începe în momentul conectării elementului încălzitor, și *faza de răcire*, care începe la momentul deconectării elementului încălzitor. Răcirea se datorează pierderilor de căldură prin izolația boilerului. Notăm:

$\theta$  [°C] – temperatura apei din boiler,

$T$  [s] – perioada unui ciclu de încălzire/răcire a apei,

$t_1$  [s] – momentul de început al fazei de încălzire a apei,

$t_2$  [s] – momentul de început al fazei de răcire (momentul intermediar al perioadei  $T$ ).

În primă aproximație, putem considera că propagarea căldurii în masa de apă decurge uniform, după dependențe de tip  $PT_1$ , cu constante de timp diferite la încălzire și la răcire, notate cu  $T_1$  și  $T_2$ , adică după dependențele:

$$T_1 \cdot \dot{\theta}(t) + \theta(t) = K \cdot p(t), p(t) = P, \theta(t_1) = \theta_1, \quad t \in [t_1, t_2), \quad (9)$$

$$T_2 \cdot \dot{\theta}(t) + \theta(t) = 0, \quad \theta(t_2) = \theta_2, \quad t \in [t_2, t_1 + T). \quad (10)$$

În aceste ecuații  $\theta_1$  și  $\theta_2$  sunt temperaturile apei din cursul procesului periodic la momentul începerii fazei de încălzire, respectiv la momentul începerii fazei de răcire,  $P$  [w] este puterea elementului încălzitor, iar  $K$  [°C/w] o constantă de raportare a temperaturii maxime a apei la puterea  $P$  a elementului încălzitor,  $P$  alegându-se astfel încât:  $P \cdot K = 80^\circ\text{C}$ .

Ne dăm seama cu ușurință că temperatura  $\theta$  reprezintă mărimea de stare a procesului: la comutarea dintr-o fază în alta ea nu are salturi, ci o variație continuă. Așadar, ecuațiile (9) și (10) referindu-se la același proces în faze diferite, modelul procesului de încălzire/răcire este dat tocmai de ansamblul lor.

Un astfel de sistem se numește *sistem cu structură variabilă*.

Procesul de variație a temperaturii apei din boiler, privit ca sistem cu structură variabilă, poate fi descris prin MM-ISI (11), rezultat din (9) și (10) prin explicitarea mărimii  $\theta(t)$ :

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = \left[ -\frac{1}{T_b} \right] \cdot [\theta(t)] + \left[ \frac{K}{T_b} \right] \cdot [p(t)], \quad \theta(0) = \theta_0, \\ [y(t)] = [1] \cdot [\theta(t)] + [0] \cdot [p(t)] \end{cases} \quad (11.1)$$

în care

$$T_b = T_1 \cdot \frac{p(t)}{P} + T_2 \cdot \left(1 - \frac{p(t)}{P}\right). \quad (11.2)$$

Cu  $p(t)$  și  $T_b$  s-au notat puterea momentană transmisă boilerului, respectiv constanta de timp formală a boilerului. Când  $p(t) = P$  (faza de încălzire), rezultă  $T_b = T_1$ , iar când  $p(t) = 0$  (faza de răcire), rezultă  $T_b = T_2$ .

Conducerea automată a procesului se realizează printr-o buclă de reglare cu RG-2P, așa cum se vede în modelul Simulink din Fig. 7.10. RG-2P este implementat folosind un modul de tip releu (Relay – librăria Discontinuities).

Parametrii care trebuie setați sunt  $\varepsilon_+$  (switch on point) și  $\varepsilon_-$  (switch of point).

Pentru a asocia mai ușor modelul din Fig. 7.11 cu schema de reglare din Fig. 7.1, în fișierul atașat lucrării modelul din Fig. 7.11 a fost compartimentat pe subsisteme.

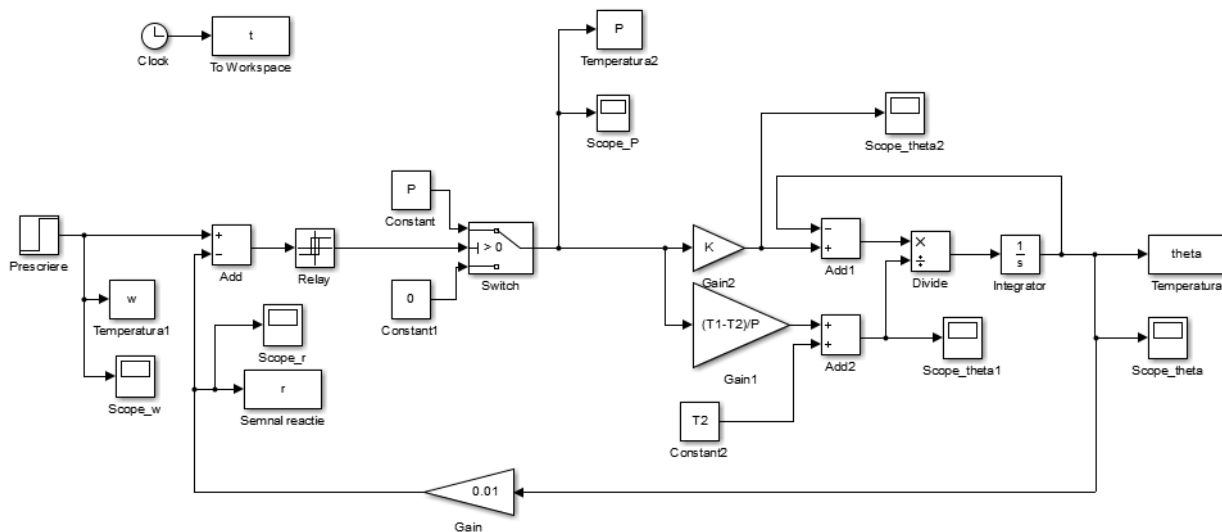


Fig. 7.10.

Delimitarea unui subsistem se obține selectând blocurile care urmau să formeze subsistemul și dând apoi comanda „Create subsystem” care apare, în urma operației de selectare, în poziția marcată cu săgeată roșie în Fig. 7.11. Figura 7.12 ilustrează rezultatul obținut: subsistemul „Recipient boiler”.

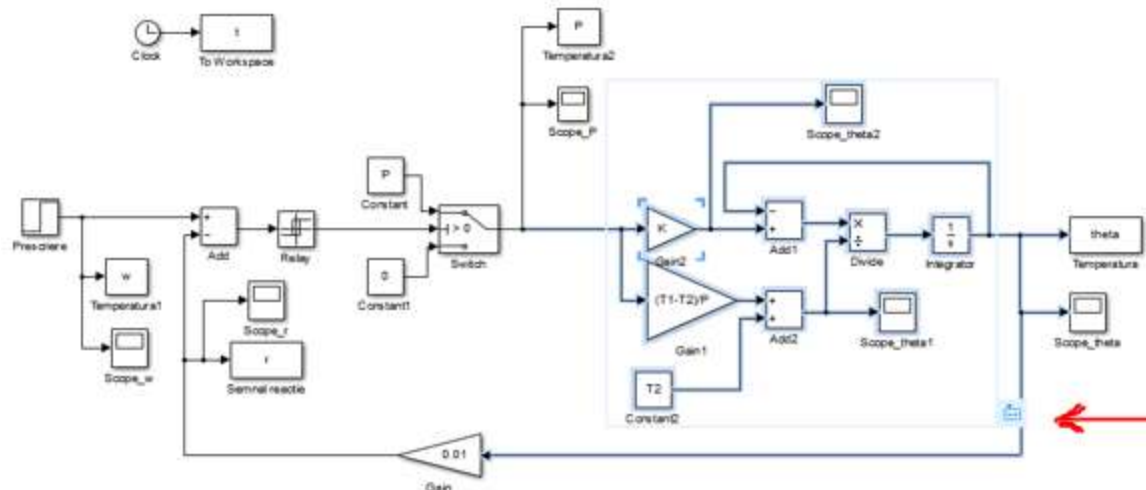


Fig. 7.11.

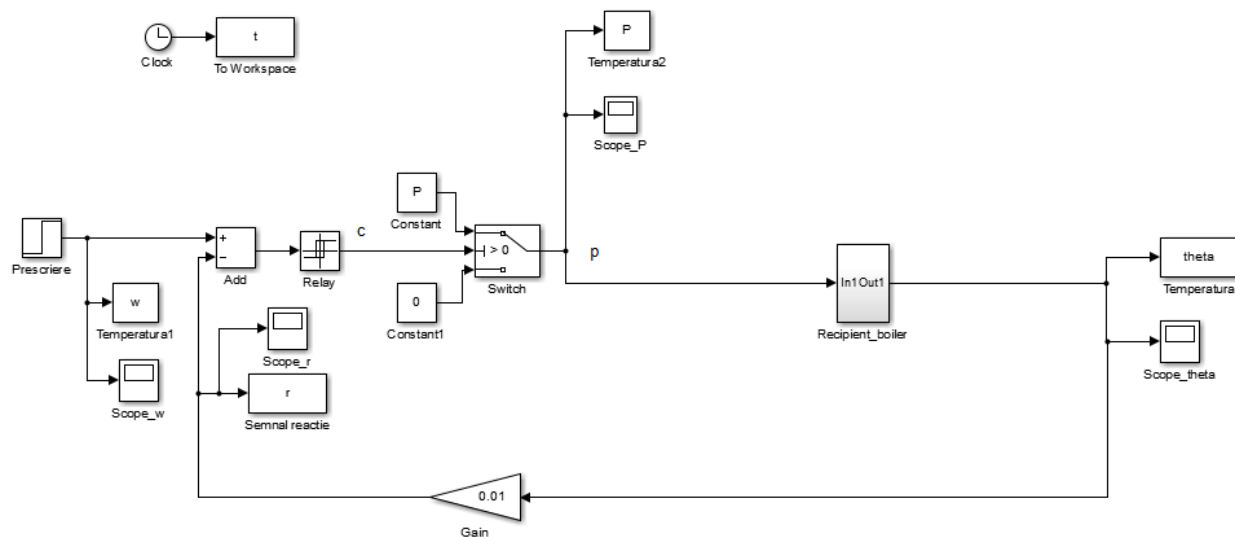


Fig. 7.12.

Continuând în aceeași manieră se obține în final modelul din Fig. 7.13 atașat lucrării de laborator. Osciloscopul și blocul „To workspace” nu au fost integrate în subsisteme.

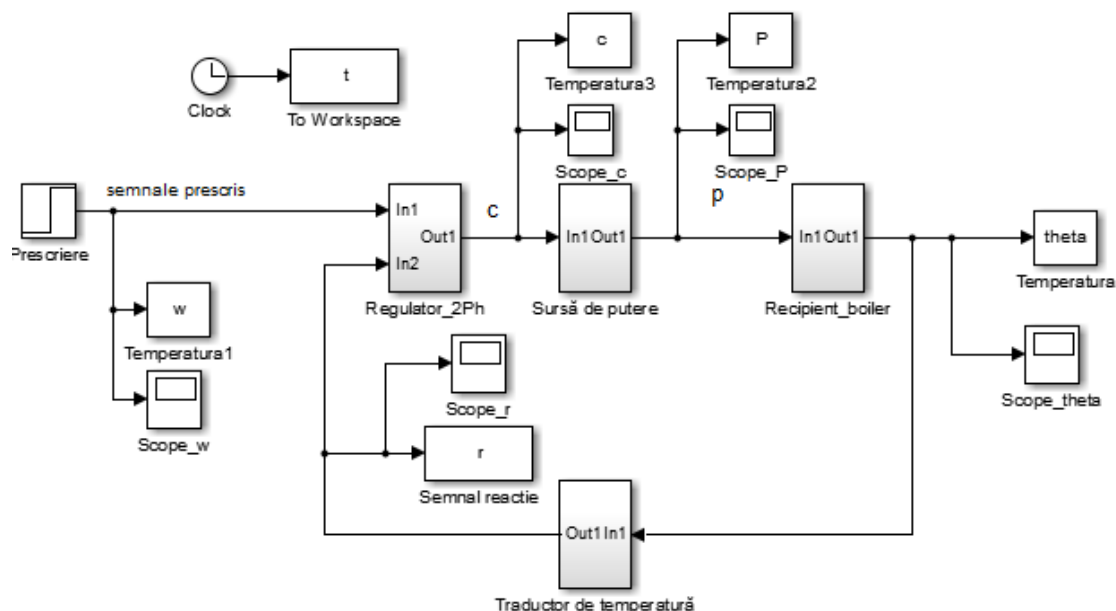


Fig. 7.13

În figurile 7.14 și 7.15 sunt redată variațiile temperaturii apei din boiler și a puterii consumate. Se observă modul în care decurge un proces de încălzire, apoi de menținere a apei în stare încălzită la temperatura  $\theta_r = 50$  °C. Parametrii folosiți au fost:  $\theta_0 = 14$  °C (Recipient\_boiler),  $T_1 = 180$  s,  $T_2 = 720$  s,  $P = 1000$  W,  $K = 0.08$  °C/W (fișier script),  $\varepsilon_+ = 2$  °C,  $\varepsilon_- = -2$  °C (în interfața blocului Relay din subsistemul Regulator\_2Ph s-au introdus valorile normate prin împărțire la 100:  $\varepsilon_+ = 0.02$ ,  $\varepsilon_- = -0.02$ ).

Procesul oscilant se declanșează din momentul atingerii pentru prima dată a temperaturii de 52 °C. Perioada oscilațiilor este de cca. 81.5 s. Temperatura este menținută în plaja [48 °C, 52 °C].

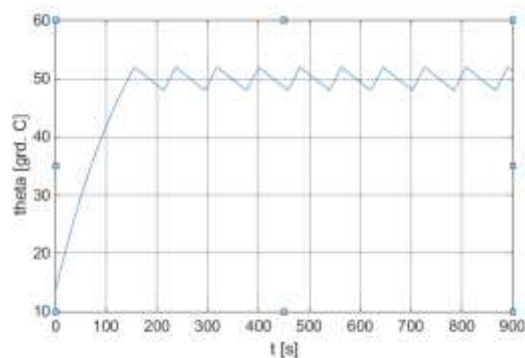


Fig. 7.14.

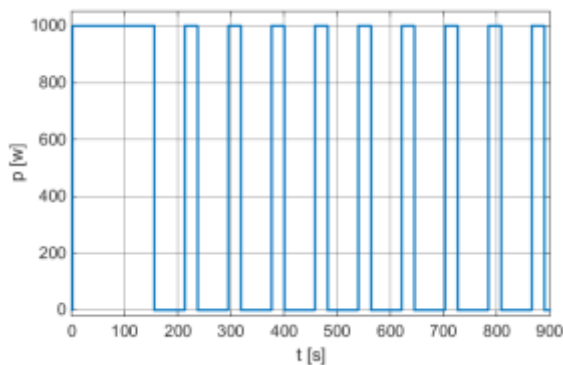


Fig. 7.15.



**7. Tema de casă Nr. 7<sup>3</sup>**

<i>Nume și prenume</i>	<i>Nr. matricol</i>	<i><math>S_1</math> = suma cifrelor numărului matricol</i>	<i><math>a = S_1 \bmod 4</math> <math>b = S_1 \bmod 3</math></i>	<i>Data completării formularului</i>

**1. TEMA DE CASĂ NR. 7**

2. (Tema de casă se depune pe CV în săptămâna consecutivă celei în care s-a efectuat lucrarea de laborator. Formularul completat se depune în format pdf.)

2.1. a) Reprezentați răspunsul sistemului de reglare cu regulator PI discutat în lucrarea de laborator în situația  $K_p=3+0.5 \cdot a^{\text{sgn}(b-a)}$ ,  $K_i=4+0.5 \cdot b^{\text{sgn}(a-b)}$ ,  $M_r(t) = 0$ , păstrând restul parametrilor la valorile setate în lucrare. b) Determinați pentru răspunsul obținut valorile indicatorilor de calitate empirici. Pentru determinarea timpului de reglare se consideră că zona de insensibilitate are o lățime de  $\pm 2\%$  ( $\delta=0.02$ ) din valoarea staționară de 1500 rpm. Durata intervalului de timp de integrare se va lua astfel încât să poată fi determinat timpul de reglare.

a)	
b)	

2.2. Se consideră sistemul de reglare a temperaturii apei dintr-un boiler prezentat în lucrare. a) Completați modelul Simulink astfel încât să calculeze energia consumată de boiler de la sursa de putere  $P = 1000$  W. b) Prescrieți pentru apa din boiler temperatura  $\theta_r = (50 + 2a + b)^\circ\text{C}$  și reprezentați grafic semnalele  $\theta(t)$  și  $P(t)$  pe un interval de timp de 12 minute, păstrând neschimbați restul parametrilor din lucrarea de laborator. Apreciați perioada oscilațiilor temperaturii. c) Determinați energia absorbită de la sursa de putere  $P$  începând cu minutul 3 (pe durata a 9 minute).

a)	
b)	
c)	

<sup>3</sup> Formularul cu tema de casă este disponibil pentru completare în fișierul TS\_II-CTI\_TC\_07.docx.