3^o Εργαστήριο στα Συστήματα Ελέγχου

Ευάγγελος Κατσούπης 2017030077
Απόστολος Γιουμερτάκης 2017030142
Α. Ραφαήλ Ελληνιτάκης 2017030118
Κωνσταντίνος Βούλγαρης 2017030125

Ομάδα 37

13 Μαου 2021

Κεφάλαιο 1

Υπολογιστικό Μέρος

Βασικός μας στόχος είναι να ελέγξουμε την παραγώμενη θερμοκρασία του λαμπτήρα, σύμφωνα με την προηγούμενη θερμοκρασία που καταγράφηκε. Έχοντας την συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει το θερμικό σύστημα, προσπαθούμε να υπολογίσουμε την παραγόμενη θερμοκρασία του, σε διάφορες καταστάσεις φόρτου και εισόδων ελέγχου. Χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό Ματλαβ για όλους τους υπολογισμούς και τις γραφικές παραστάσεις. Η συνάρτηση μεταφοράς που μας δίνεται:

$$H(s) = K_s \frac{1}{T_1 s + 1} \frac{1}{T_2 s + 1} = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

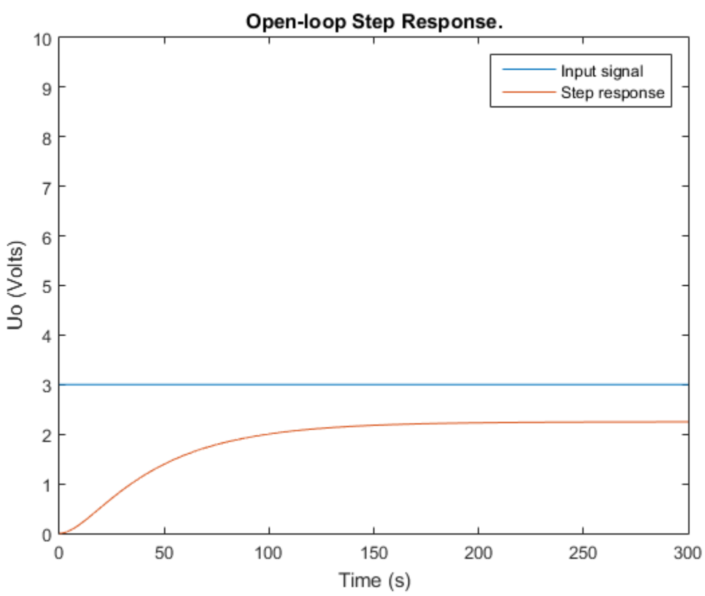
1. Σύμφωνα με την βηματικη απόκριση του ανοιχτού συστήματος χωρίς δράση ελεγκτή υπόλογίσταν (εργαστιριακό μέτρος) οι εξής παράμετροι:

   $$K_s = 0.75, T_g = 50sec, T_u = 0.5sec$$

   Δεδομένων των παραπάνω, υπολογίστικαν χρονικές σταθερές $T_1 = 10\ sec$ και $T_2 = 40\ sec$, του δευτεροβάθμιου θερμικού συστήματος και με την χρήση της μεθόδου την συνάρτηση μεταφοράς του θερμικού συστήματος:

   $$H(s) = \frac{0.75}{400s^2 + 50s + 1}$$

   Η βηματικη απόκριση του συστήματος, χρησιμοποιώντας το ίδιο σήμα εισόδου και το ίδιο παράθυρο παρατήρησης:



Σχήμα 1.1: Βηματική απόκρηση ανοιχτού βρόγχου

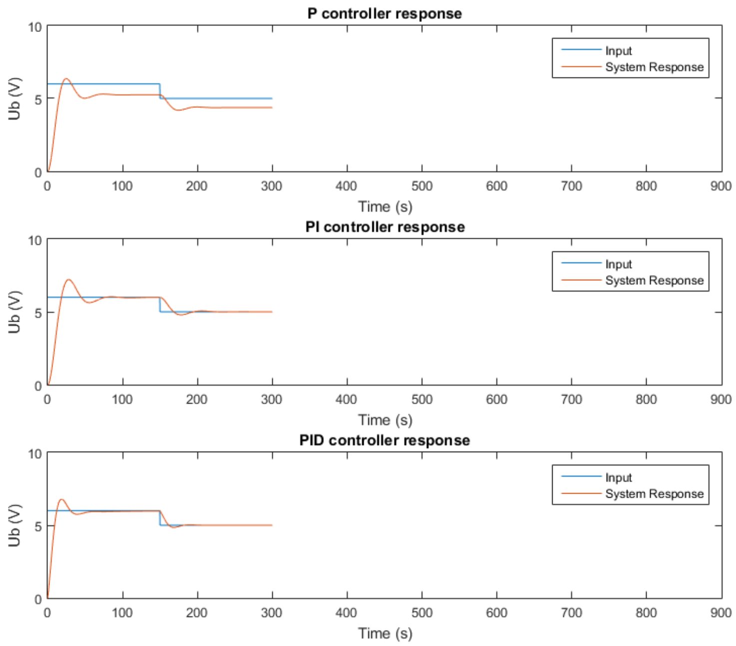
Το παραπάνω υλοποιημένο σε Matlab :

```
Ks = 0.75;
Tg = 50;
Tu = 5;

T1 = 10;
T2 = 40;

sys  = Ks * tf(1, [T1 1]) * tf(1, [T2 1])

%D1
figure('Name','Transfer function')
% [y,t] = step(sys);
t=0:0.01:300;
for k=1:length(t)
    if(t(k)<0)
        y(k) = 0;
    else
        y(k) = 3;
    end
end
```

2. Για το δεύτερο ερώτημα, δημιουργήσουμε το σήμα εισόδου του θερμικού συστήματος που εικονίζεται, ο οποίος δόθηκε ώς είσοδος ελέγχου στο σύστημα ρυθμισμένο με την μέθοδο CHR για 20% overshoot και reference aperiodic control. Συγκεκριμένα για τον κάθε ελεγκτή και σύμφωνα με τον πίνακα:

20% Overshoot			
Ελεγκτης	K	T_i	T_d
P	$\frac{0.7}{K}\frac{T_b}{T_e}$	.	.
PI	$\frac{0.6}{K}\frac{T_b}{T_e}$	T_b	.
PID	$\frac{0.95}{K}\frac{T_b}{T_e}$	$1.4T_b$	$0.47T_e$

Οι αποκρήσεις του συστήματος για κάθε περίπτωση:



Σχήμα 1.2: Βηματική απόκρηση ανοιχτού βρόγχου

Για τον υπολογισμό των δεικτών σφάλματος, με όμοιο τρόπο, ορίσαμε το σφάλμα των δύο παλμών κάθε χρονική στιγμή:

$$e(t) = |response(t) - pulse(t)|$$

Το οποίο υλοποιήθηκε ώς **e = resp - (pulse.');** (με όρους Matlab) με την τελεία και την απόστροφο να δείχνουν τον ανάστροφο πίνακα του pulse για να μπορεί να γίνει η πράξη με την απόκριση. Το σφάλμα συναρτήσει του χρόνου, μπορεί να ολοκληρωθεί με τις παρακάτω μεθόδους, για να μας δώσει τους αντίστοιχους δείκτες σφάλματος, που είναι ένας καλός τρόπος να συγκρίνουμε μεθόδους ρύθμισης συστημάτων ελέγχου:

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t)\,dx,\; ISE = \int_0^\infty |e(t)|\,dx$$

$$ITSE = \int_0^\infty te^2(t)\,dx,\; ITAE = \int_0^\infty t|e(t)|\,dx$$

Τα παραπάνω υλοποιήθηκαν με την συνάρτηση trapz() της Matlab , που υλοποιεί ολοκλήρωση χωρίζοντας το επίπεδο σε τραπέζια όπως φαίνεται παρακάτω (ίδια διαδικασία για κάθε ελεγκτή).

```
% Errors
iea = trapz(t1,abs(e));          % IAE trapz=numerical integration
ise = trapz(t1,e.^2);            % ISE
itae = trapz(t1, t1'.*abs(e));     % ITAE
itse = trapz(t1,t1'.*(e.^2));      % ITSE
```

Με τα παραπάνω,καταλήξαμε στους εξείς δείκτες απόδοσης αθροισμάτων τετραγώνων σφαλμάτων(ISE) και όχι μόνο, για κάθε μέθοδο.

Απο τους επιπλέον δείκτες θα χρησιμοποιήσουμε ώς μέτρο σύγκρισης τον $ITAE$ καθώς είναι ο καταλληλότερος:

Ελεγκτης	ISE	IAE	$ITAE$	$ITSE$
P	387.183	241.331	$2.910 \cdot 10^4$	$2.041 \cdot 10^4$
PI	301.039	103.784	$3.983 \cdot 10^3$	$3.196 \cdot 10^3$
PID	143.331	58.559	$2.145 \cdot 10^3$	$1.084 \cdot 10^3$

Κώδικες για τον υπολογισμό των ελεγκτών και των σφαλμάτων:

```
Kp1 = (0.7*Tg)/(Ks*Tu);
%\\\
PID_controller = pidstd(Kp1);
tf(PID_controller)
m1 = feedback(PID_controller*sys,1)
```

P controller

```
Kp2 = (0.6*Tg)/(Ks*Tu);
Ti1 = Tg;
%\\\
PID_controller = pidstd(Kp2, Ti1);
tf(PID_controller)
m2 = feedback(PID_controller*sys,1)
```

PI controller

```
Kp3 = (1.2*Tg)/(Ks*Tu);
Ti2 = 1.4*Tg;
Td = 0.47*Tu;
%\\\
PID_controller = pidstd(Kp3, Ti2, Td);
tf(PID_controller)
m3 = feedback(PID_controller*sys,1)
```

PID controller

3. Για το 3^o ερώτημα όμοια δημιουργήσουμε το σήμα εισόδου η οποία εισάγεται στο θερμικό σύστημα παρουσία της εικονιζόμενης διαταραχής. Το σύστημα είναι ρυθμισμένο με την μέθοδο CHR για 0% overshoot και load disturbance response.

   Ο υπολογισμός του PID ελενκτή έγινε με την χρήση του παρακάτω πίνακα:

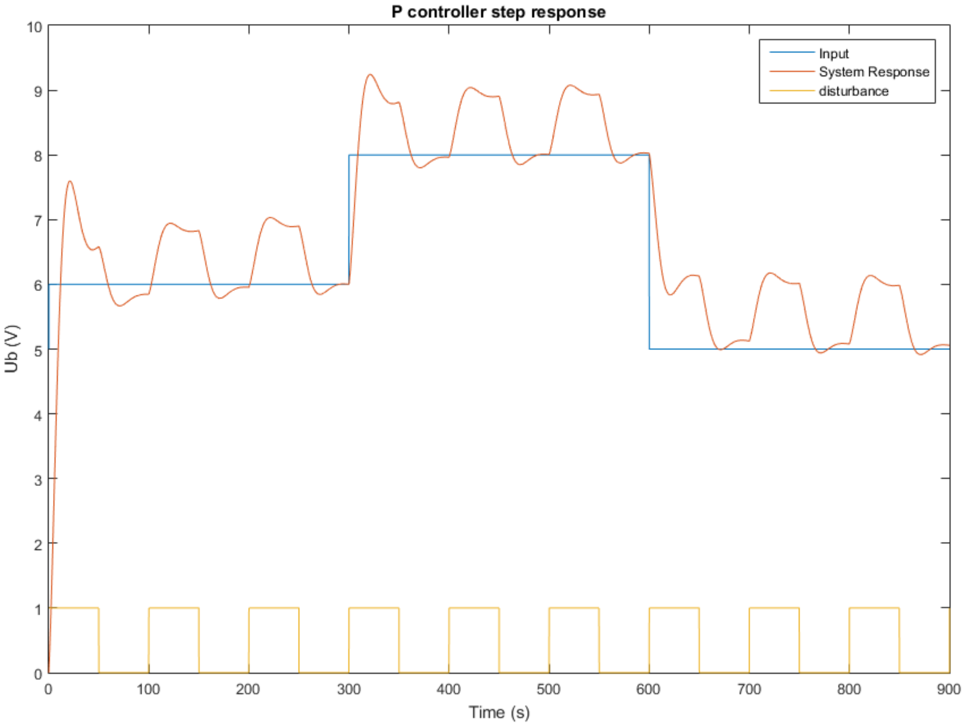
0% Overshoot			
Ελεγκτής	K	T_i	T_d
PID	$\frac{0.95}{K}\frac{T_g}{T_u}$	$2.4T_g$	$0.42T_u$

   Ο υπολογισμός του ελεγκτή στο περιβάλλον της Matlab:

```
Kp3 = (0.95*Tg)/(Ks*Tu); % = 12.667
Ti2 = 2.4*Tg;     % = 120
Td = 0.42*Tu;     % = 2.1
%\\\
PID_controller = pidstd(Kp3, Ti2, Td);
tf(PID_controller)
m4 = feedback(PID_controller*sys,1)
```

PID controller

Η απόκρηση του συστήματος, για τον υπόλογισμό της οποίας δώθηκε ως είσοδος το σήμα εισόδου, το οποίο προστέθηκε με την διαταραχή:



Όμοια με το προηγούμενο ερώτημα, για την μέθοδο CHR για 0% overshoot και load disturbance response βρέθηκε ο δέικτης απόδοσης τετραγώνων του σφάλματος:

$$ISE = 606.022$$

Ενώ οι υπόλοιποι δείκτες σφάλματος ήταν οι εξής:

$$IAE = 518.46$$

$$ITAE = 2.202 \cdot 10^5 \text{ (προτιμητέος δείκτης)}$$

$$ITSE = 2.1902 \cdot 10^5$$

4. **Ρύθμιση με την εμπειρική μέθοδο T_{sum}.**

Για να ρυθμίσουμε τους ελεγκτές με την συγκεκριμένη μέθοδο, αρκεί να συμβουλευτούμε τον πίνακα που ξέρουμε για την ρύθμιση T_{sum}, όπως φαίνεται παρακάτω:

Ελεγκτης	K	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K_s}$	$\cdot$	$\cdot$
PI	$\frac{0.5}{K_s}$	$0.5T_\Sigma$	$\cdot$
PID	$\frac{1}{K_s}$	$0.66T_\Sigma$	$0.17T_\Sigma$

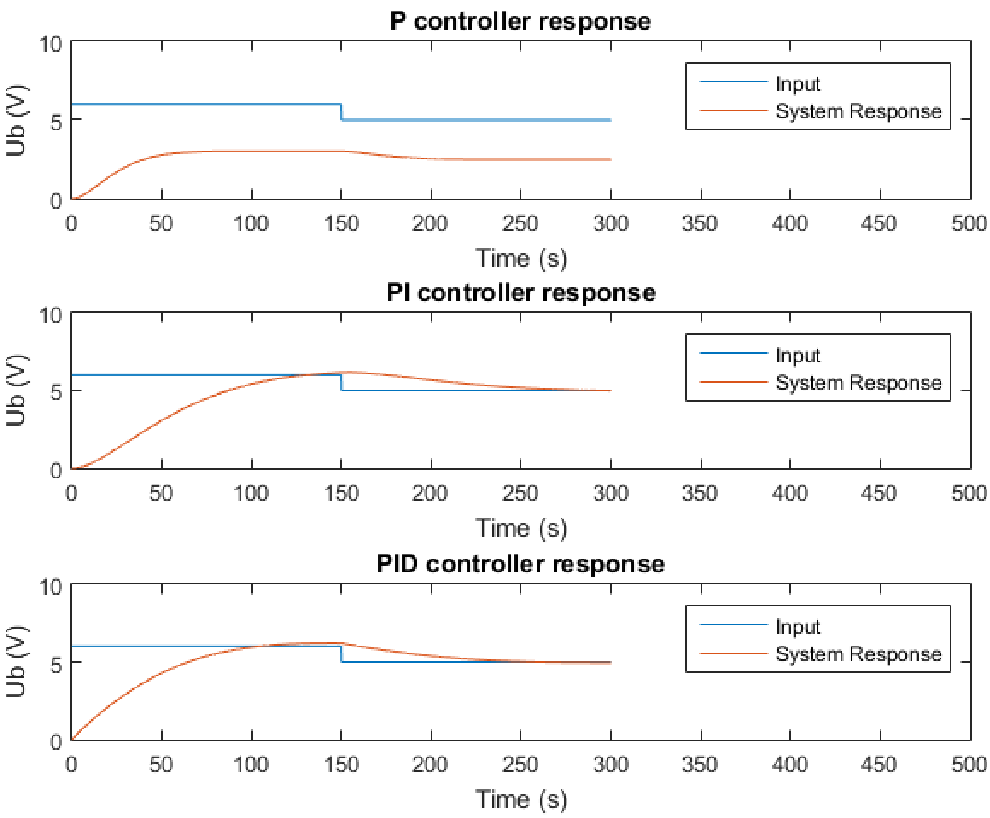
Το T_Σ για την περίπτωσή μας:

$$T_\Sigma = T_1 + T_2 = 50\ s$$

Και οι παράμετροι των ελεγκτών:

Ελεγκτης	K	T_i	T_d
P	1.33	$\cdot$	$\cdot$
PI	0.6667	25	$\cdot$
PID	1.33	33	8.5

Οι αποκρήσεις του συστήματος για κάθε ελεγκτή:



Τέλος οι δείκτες απόδοσης με τους προτειμότερους τους (ISE & $ITEA$) για κάθε ελενκτή:

Ελεγκτησ	ISE	IAE	$ITAE$	$ITSE$
P	$2.8276 \cdot 10^3$	887.5	$1.1731 \cdot 10^5$	$3.1176 \cdot 10^5$
PI	$1.3446 \cdot 10^3$	393.94	$2.5362 \cdot 10^4$	$4.2223 \cdot 10^4$
PID	792.2891	269.6954	$1.5485 \cdot 10^4$	$1.9531 \cdot 10^4$

Κεφάλαιο 2

Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Παρατηρούμε ότι με τους παραμέτρους που δώθηκαν, η βηματική απόκρηση ανοιχτού βρόγχου είναι αρχικά αργή και δεν φτάνει το σήμα εισόδου.

2. Η μέθοδοι σχεδιασμού ελεγκτή Ziegler-Nichols, βασίζεται στην εύρεση του κέρδους κρίσιμου ελεγκτή $K_{p_{crit}}$, το οποίο προϋποθέτει το σύστημα να μπορεί να ταλαντωθεί χωρίς να προκληθεί ζημιά, το οποίο είναι αδύνατο για το θερμικό σύστημα.

3. Η επιλογή της μεθόδου CHR για την ρύθμιση του συστήματος, κάνει για εμάς αρκετά πιο εύκολο να υπολογίσουμε τις σταθερές T_u και T_g καθώς υπάρχει σημείο καμπής, κάτι που δεν μας διευκολύνει απαραίτητα με άλλες μεθόδους σχεδιασμού ελεγκτή. Επίσης, χρησιμοποιείται ελεγκτής με 20% overshoot καθώς το σύστημα είναι αρκετά αργό και δεν χρειάζεται απότομη-γρήγορη διόρθωση.

4. Με την παρουσία διαταραχών, απαιτείται γρηγορότερη διόρθωση του σφάλματος , οπότε χρησιμοποιούμε την μέθοδο CHR με 0% overshoot για load disturbance response, η οποία είναι καταλληλότερη από της προηγούμενες μεθόδους.

5. Ο PID ελεγκτής είναι πολύ αποτελεσματικός στο σύστημα μας, καθώς τα θερμικά συστήματα είναι πολύ αργά και χρειάζονται και το διαφορικό (Derivative) στοιχείο για τον σωστό έλεγχο τους.

6. Για την κάθε περίπτωση:

   - Για την 1^{η} περίπτωση (ανοιχτού βρόνχου) παρατηρούμε πως η απόκρηση δεν φτάνει το σήμα εισόδου μιας και το κέρδος, του υπό έλεγχο συστήματος, K_s έχει τιμή που ισούτε με $0,75$.
   - Για την 2^{η} περίπτωση όπου υλοποιήθηκαν οι P, PI, PID ελεγκτές με την μέθοδο CHR για 20% overshoot και setpoint response, παρατηρούμε πώς η υλοποίηση με τον PID ελεγκτή έχει τον καλύτερο τρόπο σύγκλισης μιας και το error είναι μικρότερο, σε σχέση με τους P, PI ελεγκτές αλλά έχει και τον καλήτερη απόκρηση στις μεταβολές του σήματος εισόδου στο θερμικό σύστημα.
   - Για την υλοποίηση του PID με CHR για 0% overshoot και load disturbance response, παρουσία θορύβου, ο τρόπος σύγκλιση, σε γενικές γραμμές έιναι εξίσου αποδεκτός. Αυτό θα αποτυπώνονταν καλήτερα στις γραφικές παραστάσεις αν το πλάτος του noise ήταν μικρότερο και σε επόμενο στάδιο οι μεταβολές του σήματος εισόδου συνεύεναν ποιο αργά.
   - Τέλος για την εμπειρική με την χρήση του T_{Σ}, ο τρόπος σύγκλισης δεν ειναι αποδεκτός μιας και τα σφάλματα είναι αρκετά μεγαλήτερα (εμπειρική μέθοδος που στην περίπτωσή του θερμικού μας συστήματος δεν βολεύει).

Κεφάλαιο 3

Επεξεργασία του υπολογιστικού μέρους – Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

1. Αρχικά και στα δύο πειράματα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος CHR για τον υπολογισμό των παραμέτρων (P, I, D) του κάθε ελεγκτή. Για την σύγκριση αποδοτικότητας της κάθε περίπτωσης μετρήσαμε το σφάλμα μεταξύ της εισόδου και της απόκρισης του κάθε συστήματος.
   Αυτό έγινε με την χρήση των δεικτών απόδοσης, που προαναφέρθηκαν. Συγκεκριμένα εστιάσαμε στα:

   - ISE που, τετραγωνίζοντας το σφάλμα, αγνοεί τα τα σφάλματα μικρότερα της μονάδας αλλά, αντίστοιχα προωθεί τα ποιο μεγάλα.
   - Αντίστοιχα ο $ITEA$ οπού εξαρτάται από το μέτρο του σφάλματος για κάθε χρονική στιγμή, λαμβάνει υπόψιν όλες τις αποκλίσεις στον ίδιο βαθμό τονίζοντας αυτά τα οποία γίνονται κατά την μόνιμη κατάσταση. Μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί πως ο $ITEA$ είναι πιο αποδοτικός για τα παραπάνω πειράματα.

   Στο πείραμα Δ2 , έχουμε την υλοποίηση τριών ελεγκτών P, PI, PID. Παρατηρούμε ότι για τον P ελεγκτή έχουμε μεγαλύτερη τιμή σφαλμάτων σε σχέση με τον PI και PID ελεγκτή για 20% overshoot και setpoint response. Ποιο συγκεκριμένα:

Ελεγκτης	ISE	$ITAE$
P	387.183	$2.910 \cdot 10^4$
PI	301.039	$3.983 \cdot 10^3$
PID	143.331	$2.145 \cdot 10^3$

   Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο καταλληλότερος ελεγκτής για το θερμικό σύστημα είναι ο PID, συμπέρασμα το οποίο αναφέρεται και στο ερώτημα 5 του κεφαλαίου Ε.
   Στο πείραμα Δ3, έχουμε την υλοποίηση ενός μόνο ελεγκτή PID για 0% overshoot για load disturbance response. Παρατηρούμε ότι παρότι υπάρχει διαταραχή σε μορφή τετραγωνικού παλμού στο σύστημα, η απόκριση του συστήματος ¨ακολουθεί' κοντά την είσοδο, με μικρή τιμή σφαλμάτων.
   Αναλυτικότερα:

   $$ISE = 606.022$$

   $$ITEA = 2.202 \cdot 10^5$$

   Παρατηρούμε ότι όταν έχουμε διαταραχή στο σύστημα , ο έλεγχος του γίνεται πιο δύσκολος με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερο σφάλμα όπως φαίνεται παραπάνω.

2. Στο πείραμα Δ4, έχουμε την υλοποίηση τριών ελεγκτών P, PI, PID με την εμπειρική μέθοδο $Tsum$. Συγκρίνοντας τις 2 μεθόδους μπορούμε να πούμε πως η CHR έχει καλύτερη απόδοση

συγκριτικά από αυτή της T_sum λόγω των χαμηλότερων τιμών που λαμβάνουν οι $ISE\&ITAE$, αλλά περισσότερη πολυπλοκότητα αντίστοιχα, καθώς με την T_{sum} μπορούμε να υπολογίσουμε την παράμετρο T_Σ εμπειρικά χωρίς να γνωρίζουμε τις προδιαγραφές του συστήματος.
Αναλυτικότερα:

Ελεγκτης	ISE	$ITAE$
P	$2.8276 \cdot 10^3$	$1.1731 \cdot 10^5$
PI	$1.3446 \cdot 10^3$	$2.5362 \cdot 10^4$
PID	792.2891	$1.5485 \cdot 10^4$

Παρατηρούμε πως οι τιμές των σφαλμάτων είναι μεγαλύτερες από αυτές του πειράματος Δ2 όπως φαίνεται στο παραπάνω ερώτημα.