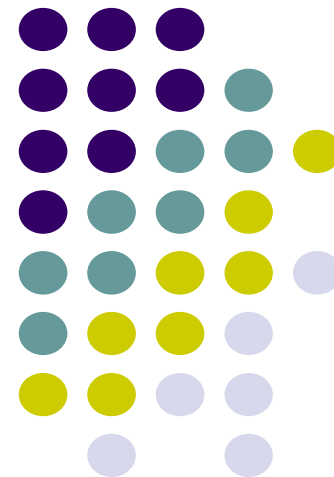


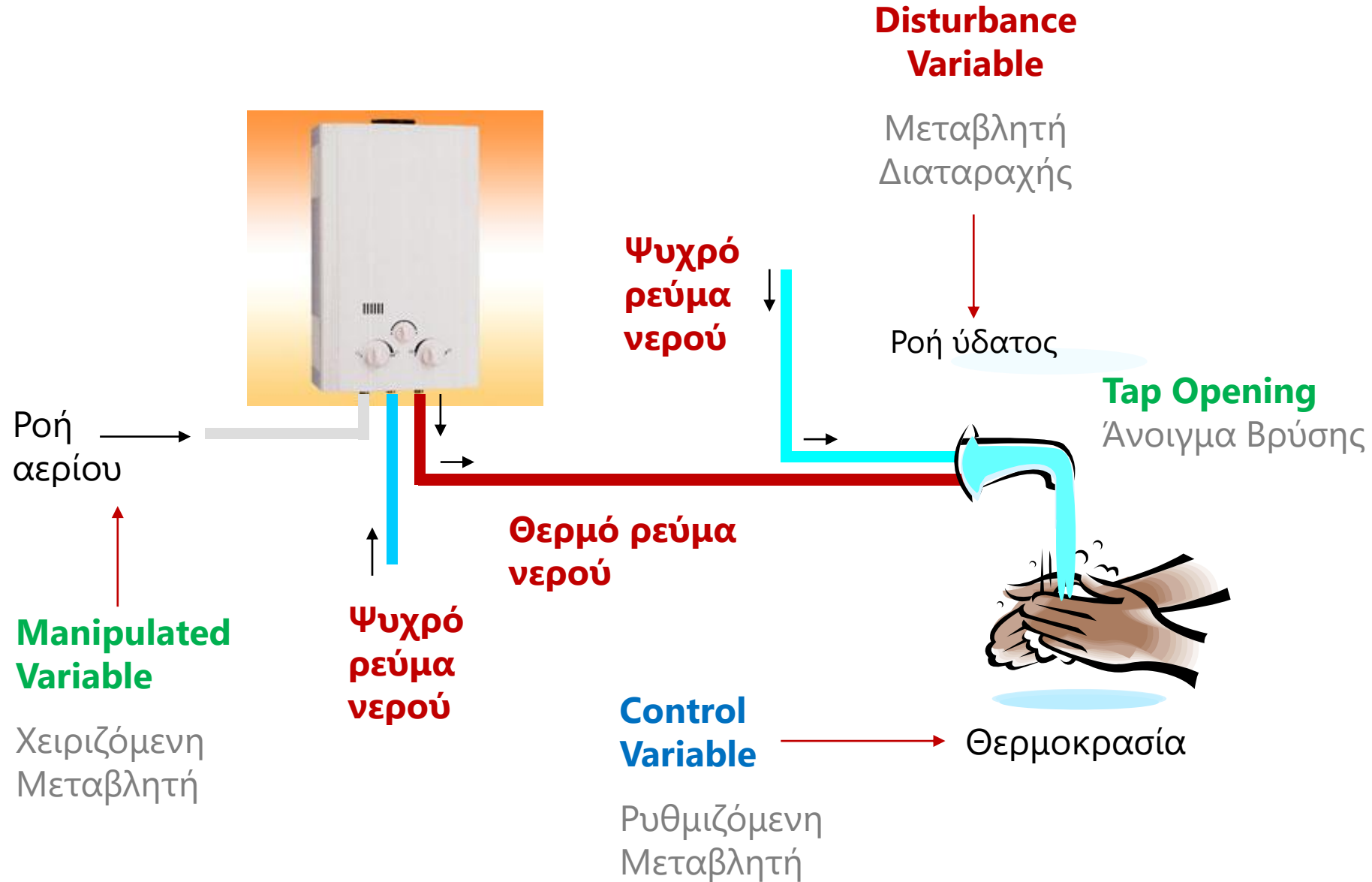
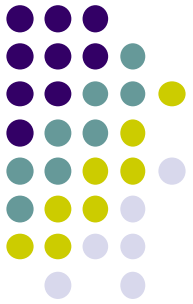
# Δυναμική & Ρύθμιση Διεργασιών

## Διάλεξη 17:

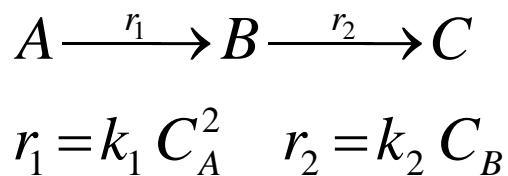
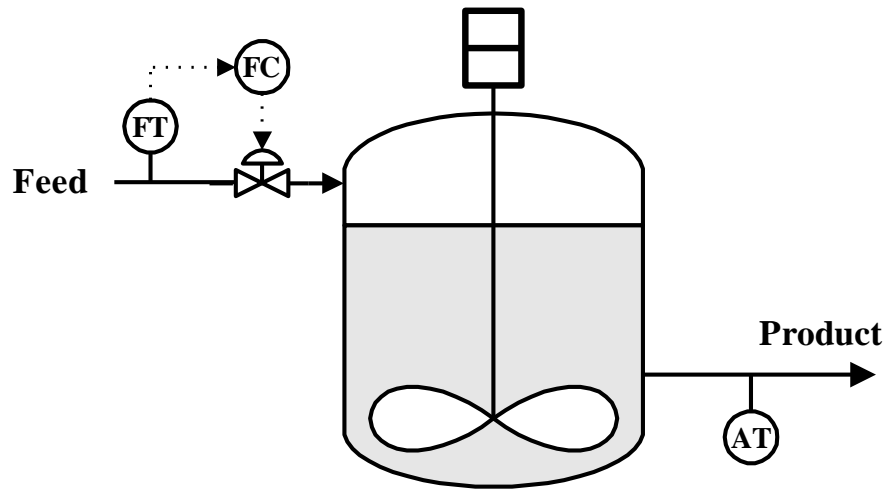
Στόχοι συστημάτων ελέγχου  
Βασικά στοιχεία ρυθμιστών



# Παράδειγμα: Θερμοσίφωνα



# Παράδειγμα: Ισοθερμοκρασιακός ΑΣΑ

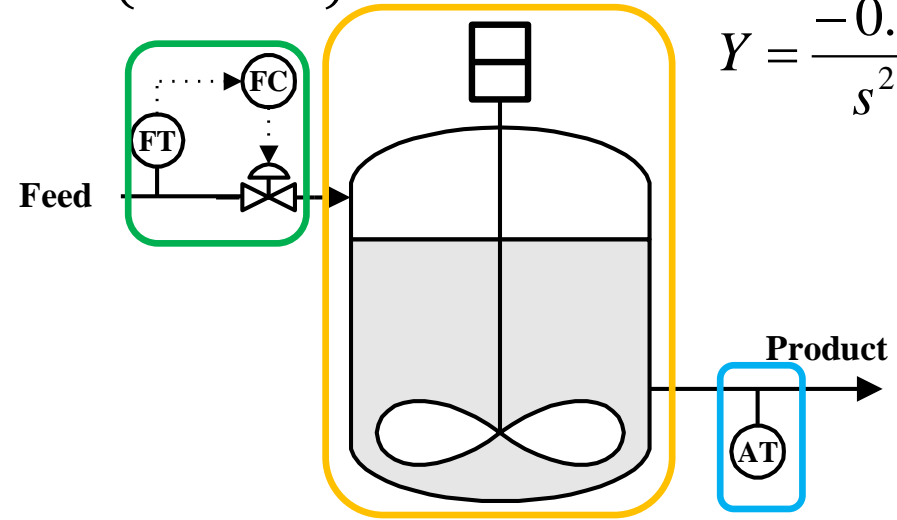


- **Στόχος:** οικονομική παράγωγή συστατικού B
  - Έχουμε δοθεί την  $T$  από βελτιστοποίηση
  - Γνωρίζουμε τον μηχανισμό των αντιδράσεων  
 $k_1 = 0.2[\text{mol/L min}], k_2 = 3[1/\text{min}]$
  - Γνωρίζουμε τον αντιδραστήρα:  $V = 100 [\text{L}]$
- **CV:** Συγκέντρωση B,  $C_B$ 
  - Έχουμε δοθεί την βέλτιστη  $C_B$ ,  $C_{B,s} = 0.11 [\text{mol/L}]$
- **DV:** Η συγκέντρωση στο ρεύμα εισόδου  $C_{A0}$ 
  - Συνήθης τιμή  $C_{A0,s} = 2 [\text{mol/L}]$
- **MV:** Ο ρυθμός ροής εισόδου,  $F$ 
  - Από την βελτιστοποίηση:  $F_s = 71.7[\text{L/min}]$

# Διάγραμμα βαθμίδων: ΑΣΑ και εξοπλισμός

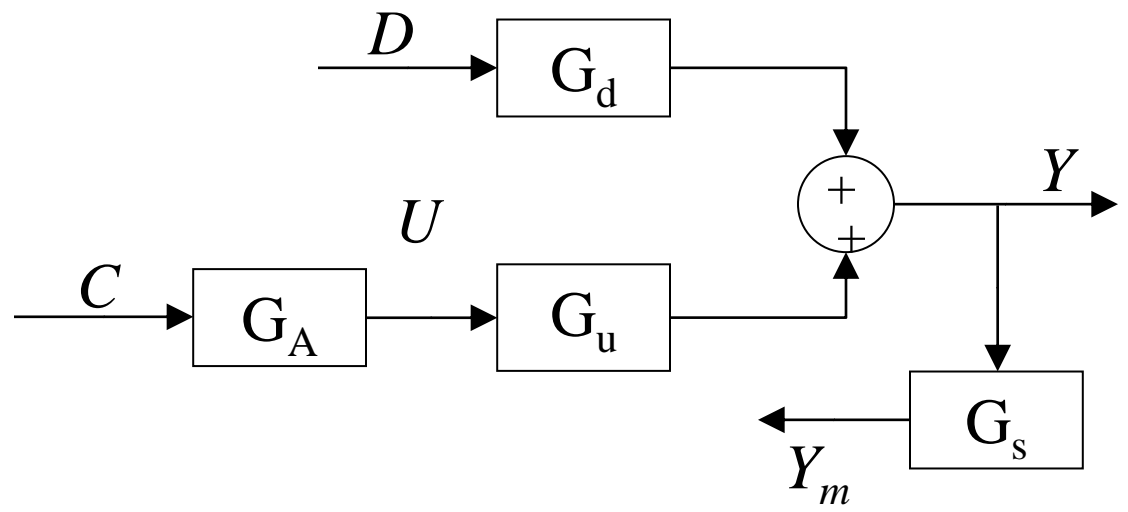


$$U(s) = \frac{1}{(0.5s + 1)} C(s)$$



$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

$$Y_m(s) = \frac{1}{(0.33s + 1)} Y(s)$$

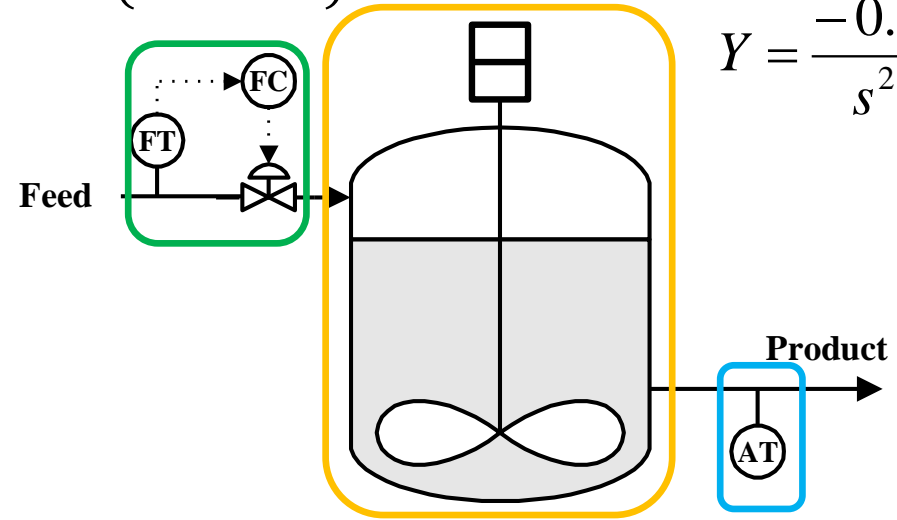


$$Y_m = \frac{1}{(0.33s + 1)} \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} \frac{1}{(0.5s + 1)} C(s) + \frac{1}{(0.33s + 1)} \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

# Διάγραμμα βαθμίδων: ΑΣΑ και εξοπλισμός

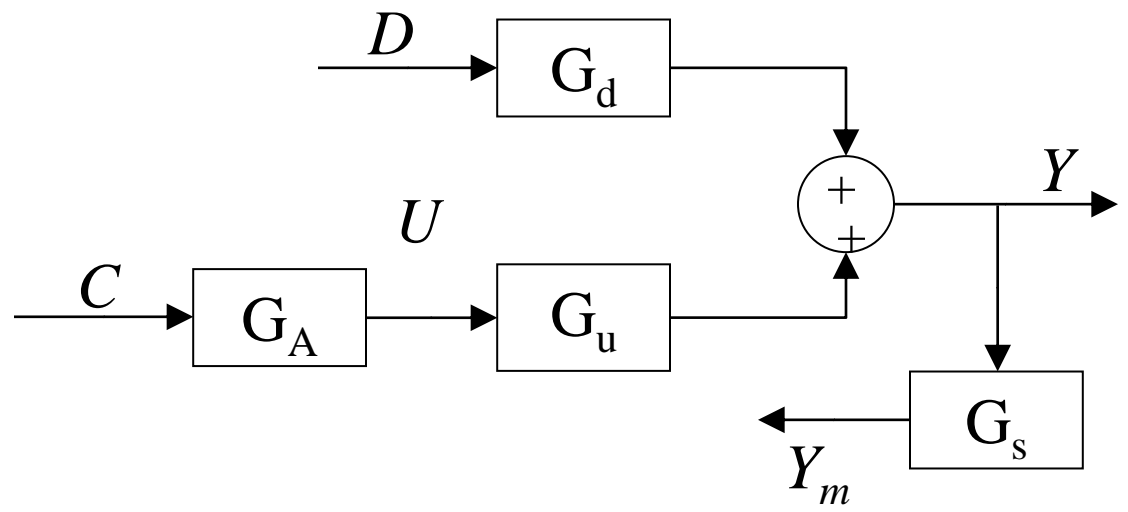


$$U(s) = \frac{1}{(0.5s + 1)} C(s)$$



$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

$$Y_m(s) = \frac{1}{(0.33s + 1)} Y(s)$$



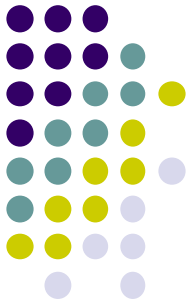
$$Y_m = \frac{1}{(0.33s + 1)} \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} \frac{1}{(0.5s + 1)} C(s) + \frac{1}{(0.33s + 1)} \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

# Αντικείμενο της Ρύθμισης Διεργασιών



- Διασφάλιση μιας ασφαλούς διεργασίας
  - Διατήρηση της μονάδας υπό ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας
  - Ελαχιστοποίηση της φθοράς του εξοπλισμού λόγω των μεταβολών
- Διασφάλιση ότι το τελικό προϊόν της διεργασίας πληροί τις προδιαγραφές
  - Παράδειγμα: Ο αριθμός οκτανίων της βενζίνης στις διεργασίες ανάμειξης προσθέτων
- Ελαχιστοποίηση της επίδρασης των εξωτερικών μεταβολών
  - Παράδειγμα: αλλαγή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος
- Βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας διεργασίας
  - Διατήρηση της παραγωγής
  - Ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους

# Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών, μέρος Α



## 1. Καθορίστε τη διεργασία που εξετάζεται

- a. Διατύπωση υποθέσεων
- b. Ταξινόμηση μεταβλητών (χειριζόμενες, διαταραχές, εσωτερικές, ελεγχόμενες, μετρούμενες)
- c. Διατύπωση μοντέλου διεργασίας
- d. Προσδιορισμός του επιθυμητού σημείου λειτουργίας
- e. Διατύπωση περιγραφής χώρου κατάστασης
- f. Διατύπωση περιγραφής συναρτήσεων μεταφοράς
- g. Αναγνώριση διεργασιών (αν χρειάζεται)

## 2. Ανάλυση Διεργασίας

- a. Ανάλυση παρατηρησιμότητας
- b. Ανάλυση ελεγχιμότητας / ρυθμισιμότητας
- c. Ανάλυση ευστάθειας
- d. Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς
  - a. Απόκριση σε παλμική αλλαγή
  - b. Απόκριση σε ημιτονική αλλαγή

# Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών, μέρος Β



1. Καθορίστε τη διεργασία που εξετάζεται
2. Ανάλυση Διεργασίας
3. **Σύνθεση δομής ελέγχου**
  - a. **Διατύπωση της ερώτησης ελέγχου**
  - b. Προσθήκη ενεργοποιητών/αισθητήρων στην περιγραφή
  - c. Κατασκευή των ρυθμιστών
  - d. Κατασκευή των παρατηρητών
  - e. Ανάλυση κλειστού βρόχου
  - f. Βαθμονόμηση ρυθμιστών
  - g. Βαθμονόμηση παρατηρητών
  - h. Αναδιατύπωση του ερωτήματος ελέγχου και επιστροφή στο [e]
  - i. Διασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας και πρόσθεση συναγερμών
4. Έκδοση μελέτης και εγχειριδίου λειτουργίας
  - a. Περιγραφή συστήματος ρύθμισης
  - b. Συστάσεις και σημεία προσοχής

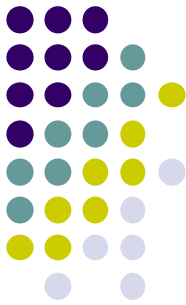


# Οι στόχοι της Ρύθμισης Διεργασιών



- Ασφάλεια διεργασίας
  - Διεργασία ευαίσθητη ή ασταθής: Ενεργή **σταθεροποίηση** διεργασίας
    - Πρόβλημα ρύθμισης → **regulation**
- Παρακολούθηση σημείου λειτουργίας της διεργασίας
  - Στενή **παρακολούθηση** σημείου ρύθμισης (αναφοράς)
    - Πρόβλημα εξυπηρέτησεως → **tracking** aka servo
- Ελαχιστοποίηση της επίδρασης των εξωτερικών μεταβολών
  - Ενεργή **απόρριψη** διαταραχών στην έξοδο
    - Πρόβλημα απόρριψης φορτίου → **rejection** aka load

# Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών, μέρος Β



1. Καθορίστε τη διεργασία που εξετάζεται
2. Ανάλυση Διεργασίας
3. **Σύνθεση δομής ελέγχου**
  - a. **Διατύπωση της ερώτησης ελέγχου**
  - b. Προσθήκη ενεργοποιητών/αισθητήρων στην περιγραφή
  - c. Κατασκευή των ρυθμιστών
  - d. Κατασκευή των παρατηρητών
  - e. Ανάλυση κλειστού βρόχου
  - f. Βαθμονόμηση ρυθμιστών
  - g. Βαθμονόμηση παρατηρητών
  - h. Αναδιατύπωση του ερωτήματος ελέγχου και επιστροφή στο [e]
  - i. Διασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας και πρόσθεση συναγερμών
4. Έκδοση μελέτης και εγχειριδίου λειτουργίας
  - a. Περιγραφή συστήματος ρύθμισης
  - b. Συστάσεις και σημεία προσοχής

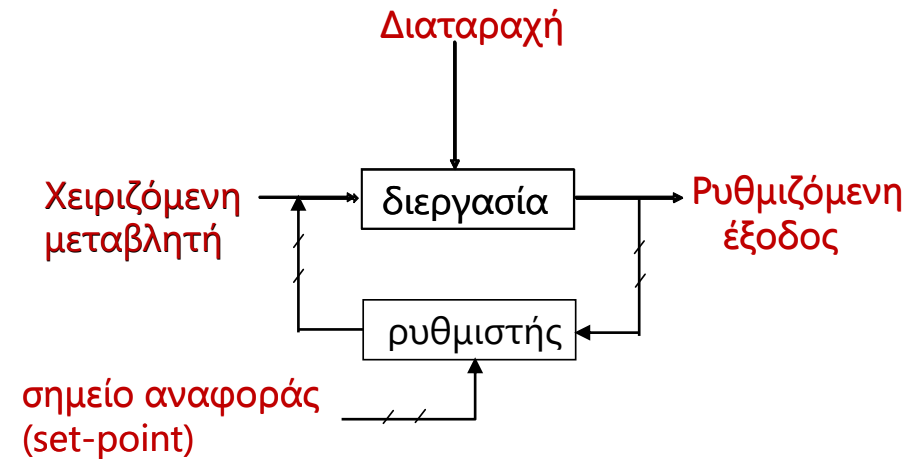


# Τύποι Ρύθμισης:

## Ανάδραση – Feedback control

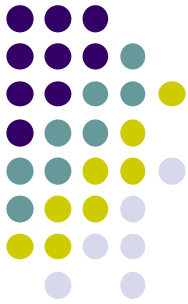


Μπορεί να είναι αργή, εάν ο χρόνος απόκρισης διεργασίας είναι μεγάλος.



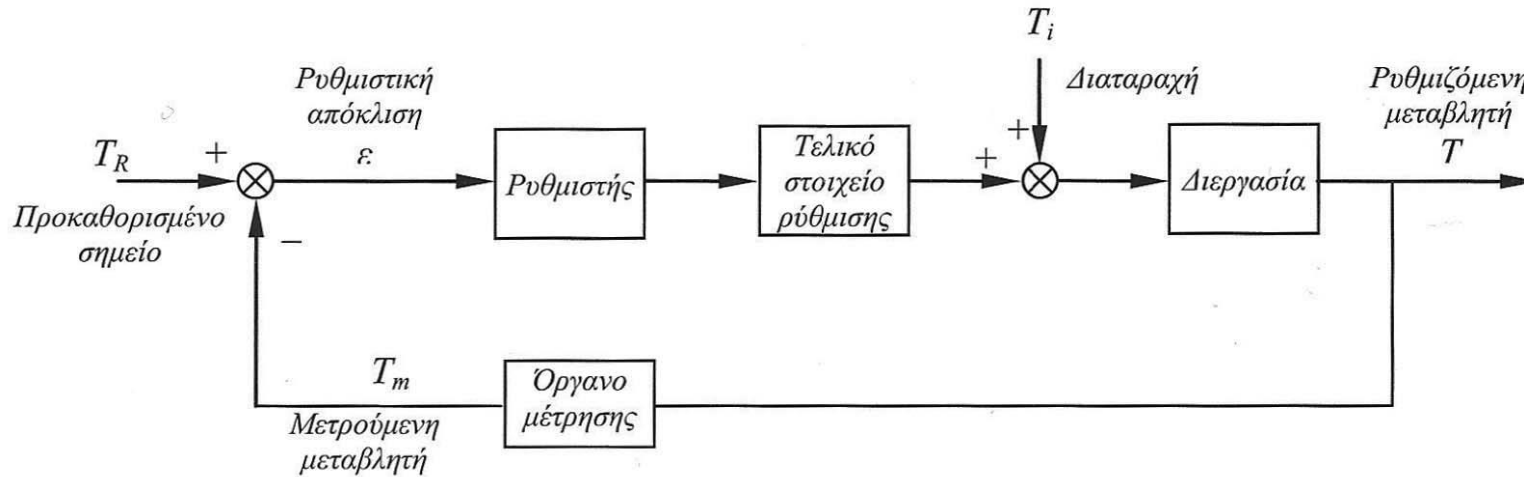
### Παρατήρηση:

Η χειριζόμενη μεταβλητή είναι τώρα εσωτερική μεταβλητή!!



# Διάγραμμα βαθμίδων

- Σύστημα “κλειστού βρόχου” ή σύστημα με ανατροφοδότηση ή σύστημα με ανάδραση (αρνητική)

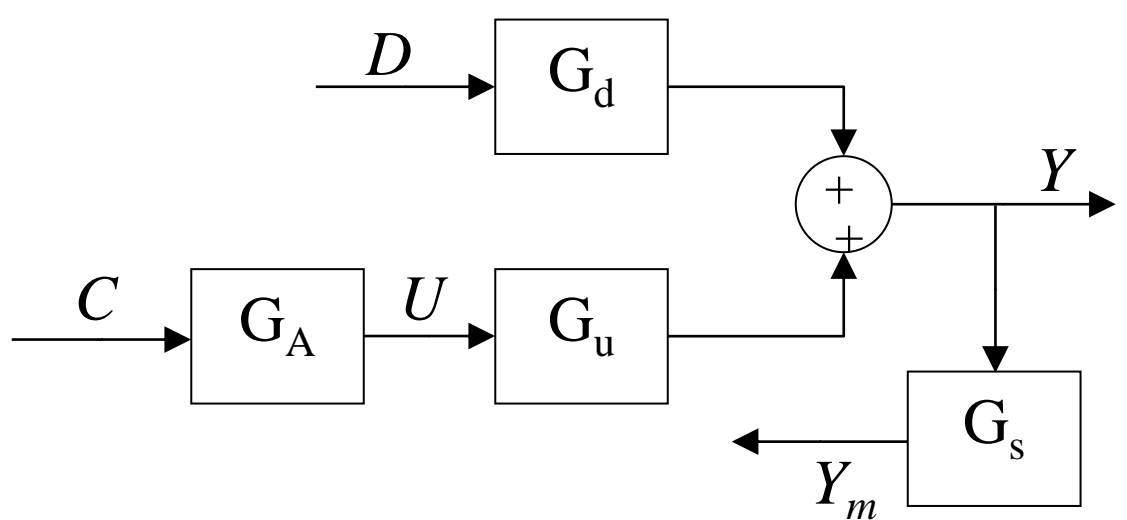


- ‘Σημείο ρύθμισης’ = επιθυμητή τιμή ρυθμιζόμενης μεταβλητής
  - Καλείται επίσης ‘προκαθορισμένο σημείο’ και ‘σημείο αναφοράς’
- ‘διαταραχή’ = μεταβλητή ( $T_i$ ) η μεταβολή της οποίας προκαλεί ‘ρυθμιστική απόκλιση’ ( $\varepsilon = T_R - T_m$ ).

**Στόχος:** μείωση της ρυθμιστικής απόκλισης (S.S. :  $T_R = T_m$ )

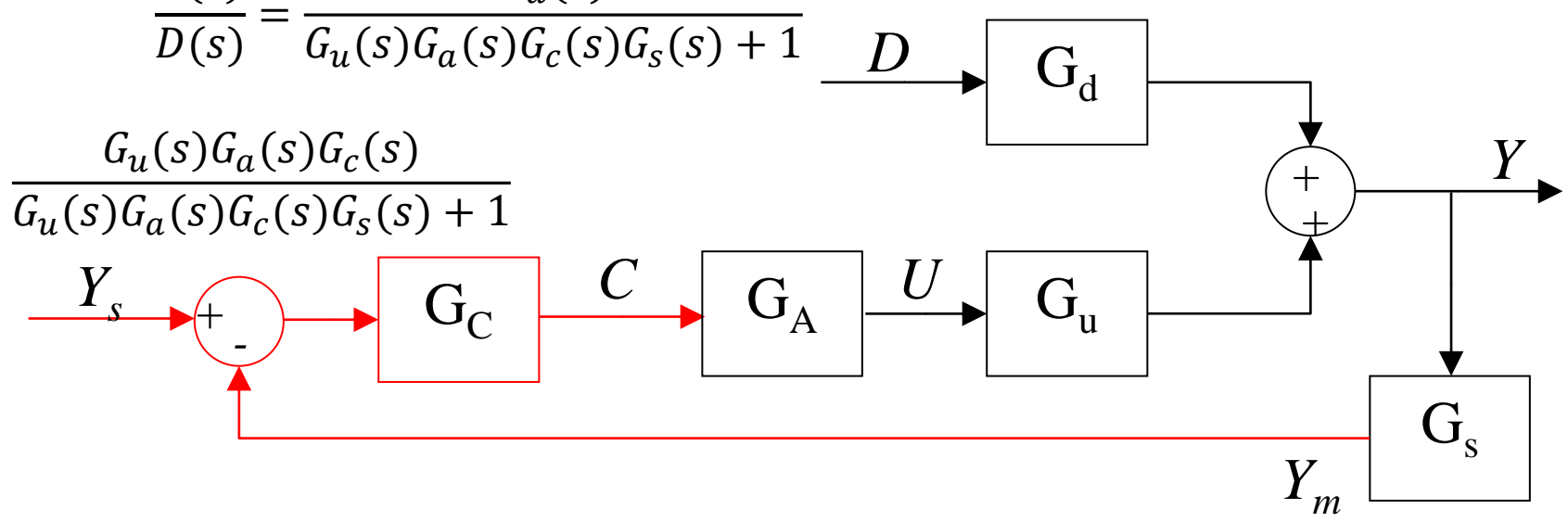
Όχι ‘διαδοχή γεγονότων’ αλλά ‘ταυτόχρονη λειτουργία’

# Διάγραμμα βαθμίδων με βρόχο ανάδρασης

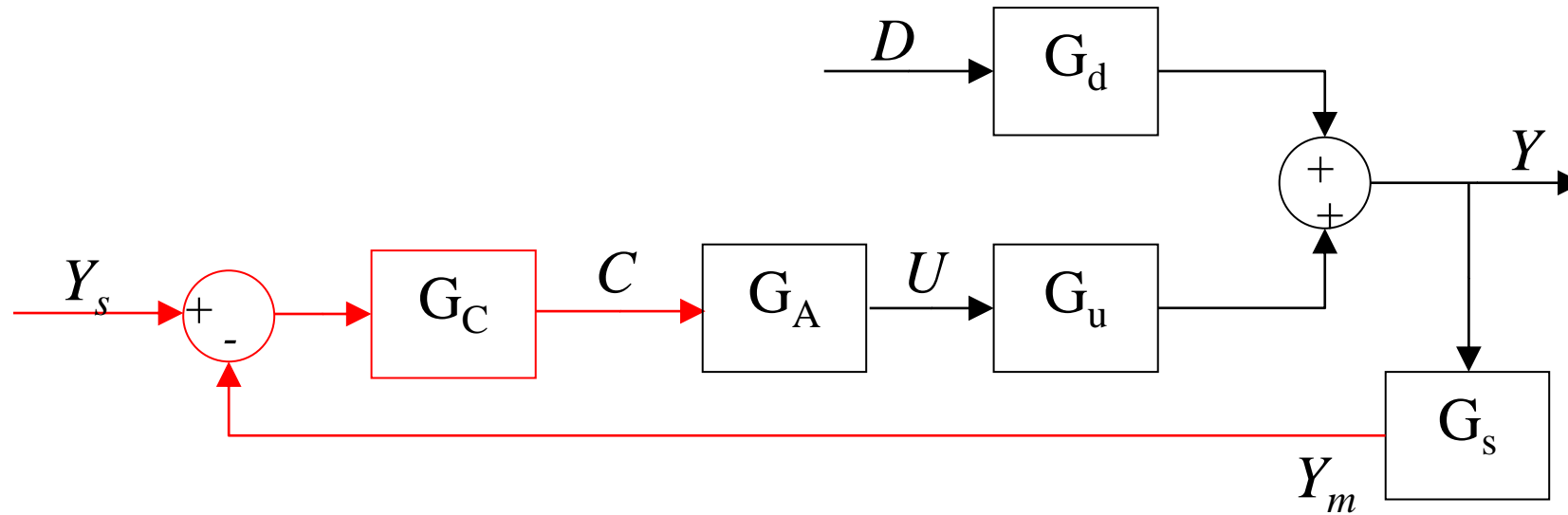
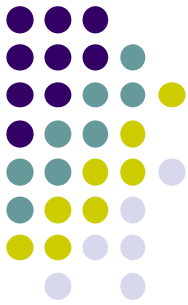


$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{Y_s(s)} = \frac{G_u(s)G_a(s)G_c(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$



# Διάγραμμα βαθμίδων με βρόχο ανάδρασης



Πρόβλημα παρακολούθησης

$$\frac{Y(s)}{Y_s(s)} = \frac{G_u(s)G_a(s)G_c(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$

Πρόβλημα απόρριψης

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$

- Γνωρίζουμε ότι ο παρανομαστής των  $G_u$  και  $G_d$  είναι βασικά ο ίδιος
- Παρατηρούμε ότι στον παρανομαστή έχουμε τις ίδιες ΣΜ.

# Χαρακτηριστική εξίσωση



- Εφόσον η παρακολούθηση σημείου ρύθμισης και η απόρριψη διαταραχής έχουν τον ίδιο παρονομαστή για τις συναρτήσεις μεταφοράς κλειστού βρόχου, τόσο η **παρακολούθηση** σημείου ρύθμισης όσο και η **απόρριψη** διαταραχής έχουν την ίδια γενική δυναμική συμπεριφορά.
- Οι ρίζες του παρονομαστή καθορίζουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της διεργασίας κλειστού βρόχου. Η χαρακτηριστική εξίσωση δίνεται από:

$$G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1 = 0$$

# Οι στόχοι της Ρύθμισης Διεργασιών



- Ασφάλεια διεργασίας
  - Οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης (πόλοι της  $Y/Y_s$ ) είναι αρνητικές
    - Πρόβλημα **ρύθμισης**
- Παρακολούθηση σημείου λειτουργίας της διεργασίας
  - Οι πόλοι και οι μηδενικές τιμές της  $Y/Y_s$  έχουν επιθυμητές τιμές και
  - η στατική ενίσχυση της  $Y/Y_s$  έχει τιμή ένα
    - Πρόβλημα **εξυπηρέτησεως**
- Ελαχιστοποίηση της επίδρασης των εξωτερικών μεταβολών
  - Οι πόλοι και οι μηδενικές τιμές της  $Y/D$  έχουν επιθυμητές τιμές και
  - η στατική ενίσχυση της  $Y/D$  έχει τιμή μηδέν
    - Πρόβλημα **απόρριψης** φορτίου

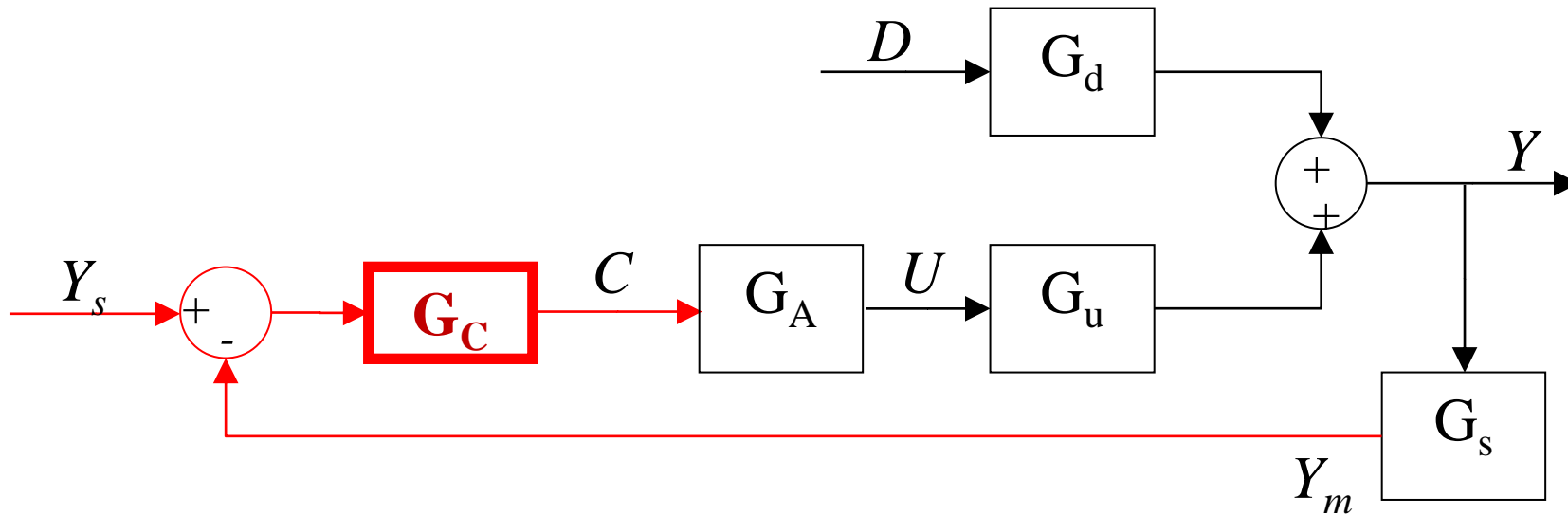
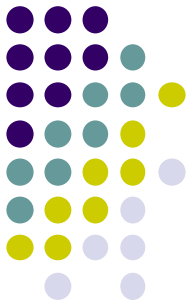


# Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών, μέρος Β



1. Καθορίστε τη διαδικασία που εξετάζεται
2. Ανάλυση Διεργασίας
3. **Σύνθεση δομής ελέγχου**
  - a. Διατύπωση της ερώτησης ελέγχου
  - b. Προσθήκη ενεργοποιητών/αισθητήρων στην περιγραφή
  - c. **Κατασκευή των ρυθμιστών**
  - d. Κατασκευή των παρατηρητών
  - e. Ανάλυση κλειστού βρόχου
  - f. Βαθμονόμηση ρυθμιστών
  - g. Βαθμονόμηση παρατηρητών
  - h. Αναδιατύπωση του ερωτήματος ελέγχου και επιστροφή στο [e]
  - i. Διασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας και πρόσθεση συναγερμών
4. Έκδοση μελέτης και εγχειριδίου λειτουργίας
  - a. Περιγραφή συστήματος ρύθμισης
  - b. Συστάσεις και σημεία προσοχής

# Κατασκευή ρυθμιστή ανάδρασης

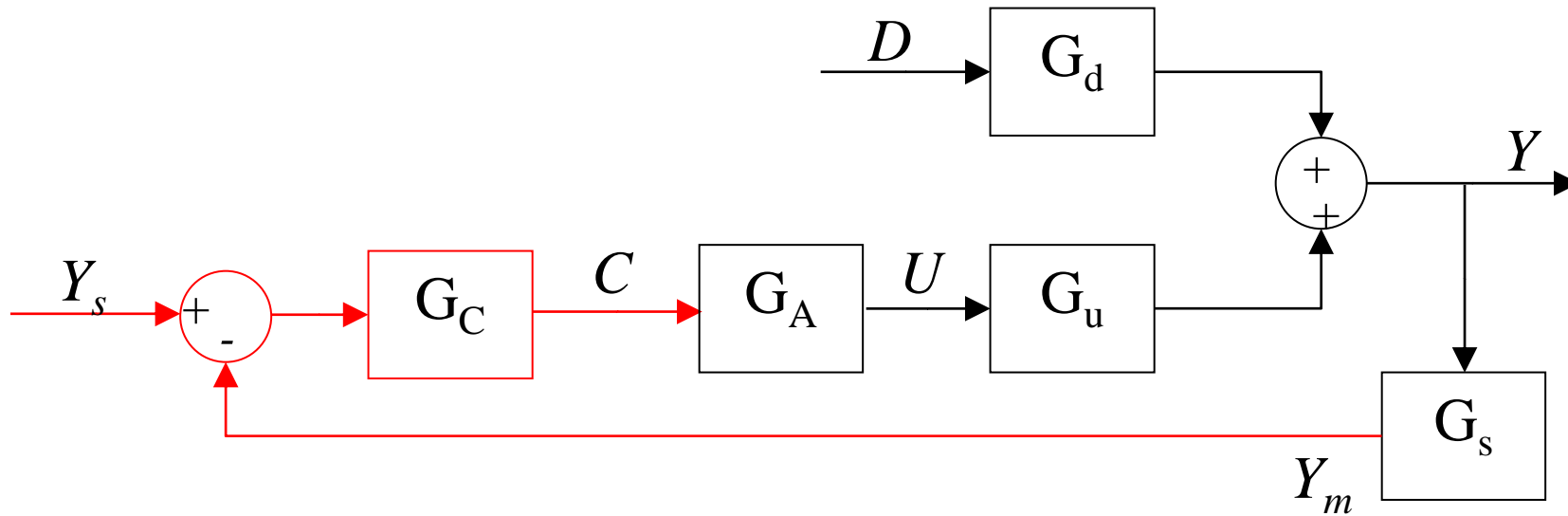


$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d(s)}{G_u(s)G_a(s)\mathbf{G_c(s)}G_s(s) + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{Y_s(s)} = \frac{G_u(s)G_a(s)G_c(s)}{G_u(s)G_a(s)\mathbf{G_c(s)}G_s(s) + 1}$$

- Πρόβλημα εξυπηρέτησας
- Στόχος: Η συνάρτηση μεταφοράς  $Y/Y_s$  έχει επιθυμητά χαρακτηριστικά
- Μέθοδος:
  - Εξατομικευμένος ρυθμιστής
  - Τυπικός ρυθμιστής

# Κατασκευή εξατομικευμένου ρυθμιστή



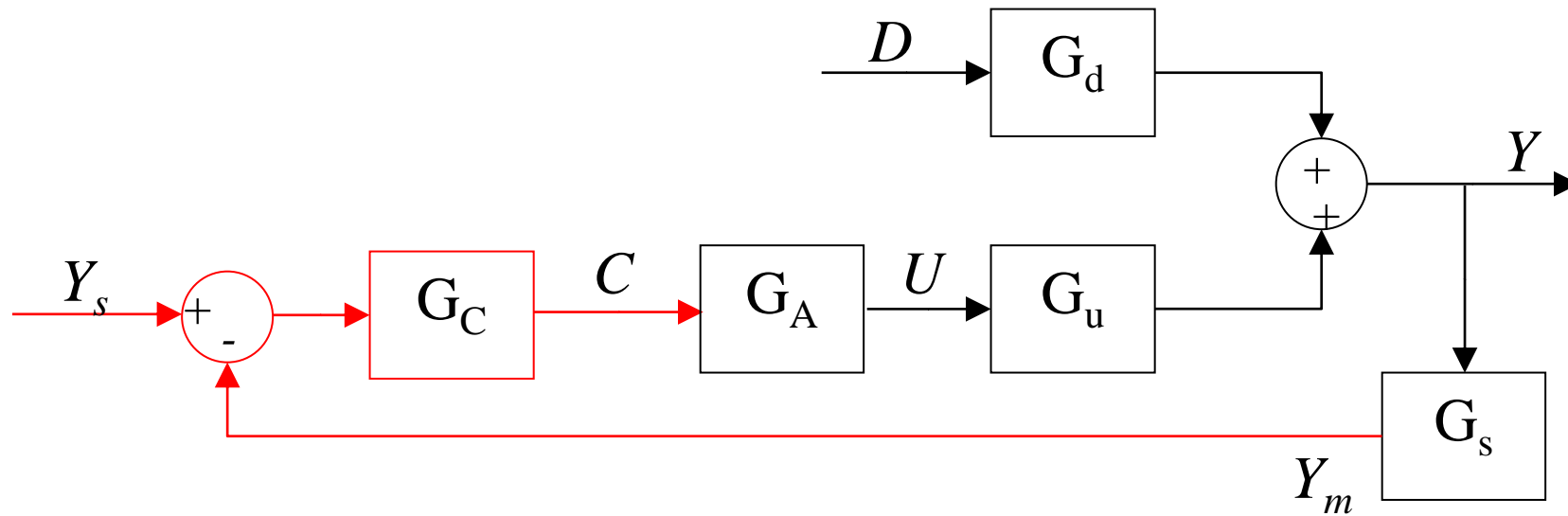
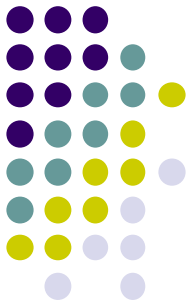
$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{Y_s(s)} = \frac{G_u(s)G_a(s)G_c(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$

- Πρόβλημα εξυπηρέτησας
- Στόχος: Η συνάρτηση μεταφοράς να είναι  $Y/Y_s = G_T$ .
- Αλγεβρική λύση:

$$G_T = \frac{G_u(s)G_a(s)G_c(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1} \Rightarrow G_c = \left( \frac{G_T}{1 - G_T G_s} \right) \frac{1}{G_u G_a}$$

# Κατασκευή εξατομικευμένου ρυθμιστή

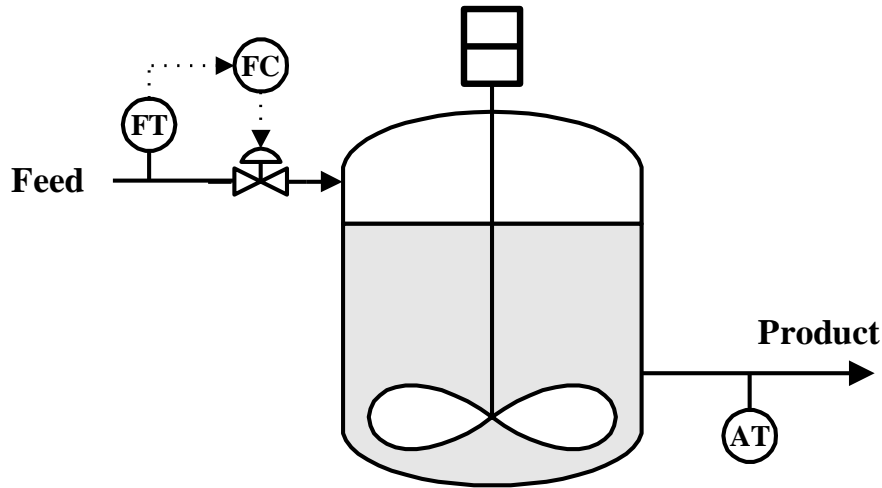
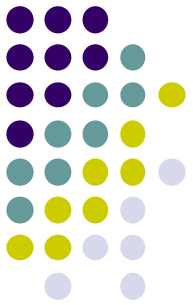


$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_d(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{Y_s(s)} = \frac{G_u(s)G_a(s)G_c(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$

- **Στόχος:** Η συνάρτηση μεταφοράς να είναι  $Y/Y_s = G_T$ .
- **Ρυθμιστής:**  $G_c = \left( \frac{G_T}{1 - G_T G_s} \right) \frac{1}{G_u G_a}$
- Παρατηρήσεις:
  - Η επιλογή του  $G_T$  είναι βασική για την εφαρμοσιμότητα του ρυθμιστή
    - Ασταθής ρυθμιστής
    - Πολλές παραγωγίσεις σήματος (η τάξη του αριθμητή είναι μεγαλύτερη του παρονομαστή)
  - Ο ρυθμιστής είναι ευαίσθητος στην ακρίβεια του μοντέλου.

# Εξατομικευμένος ρυθμιστής απλού ΑΣΑ

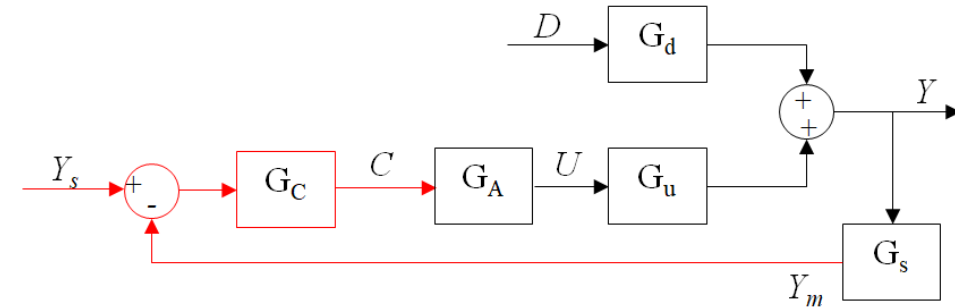


$$G_a = 1$$

$$G_s = 1$$

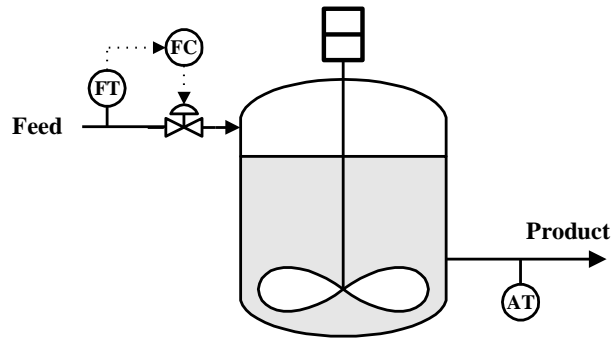
$$G_u = \frac{0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$

- Στόχος:  $G_T = \frac{1}{s^2 + 4s + 1}$
- Ρυθμιστής:  $G_C = \left( \frac{G_T}{1 - G_T G_S} \right) \frac{1}{G_u G_a}$

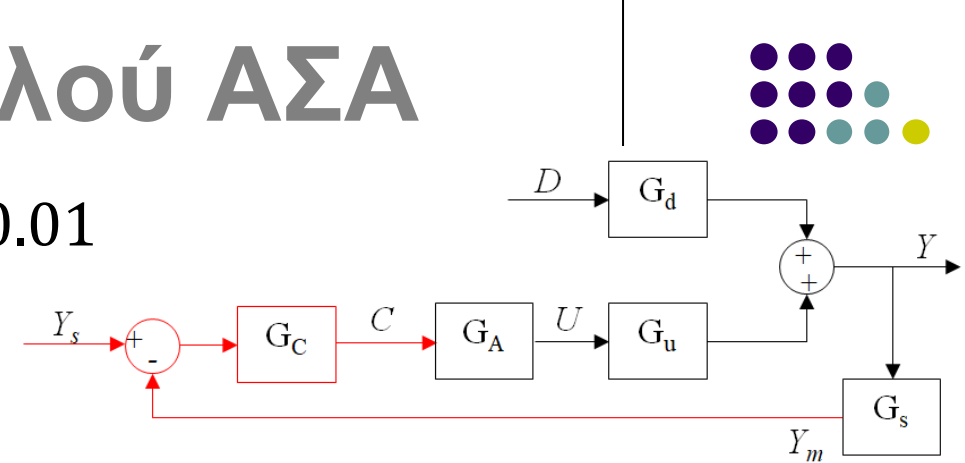


$$G_C = \frac{542.9s^2 + 2175s + 1901}{s^2 + 4s} = 542.9 + \frac{475.3}{s} - \frac{472}{s + 4}$$

# Εξατομικευμένος ρυθμιστής απλού ΑΣΑ



Απόκριση σε βημα  $y_s(t) = 0.01$

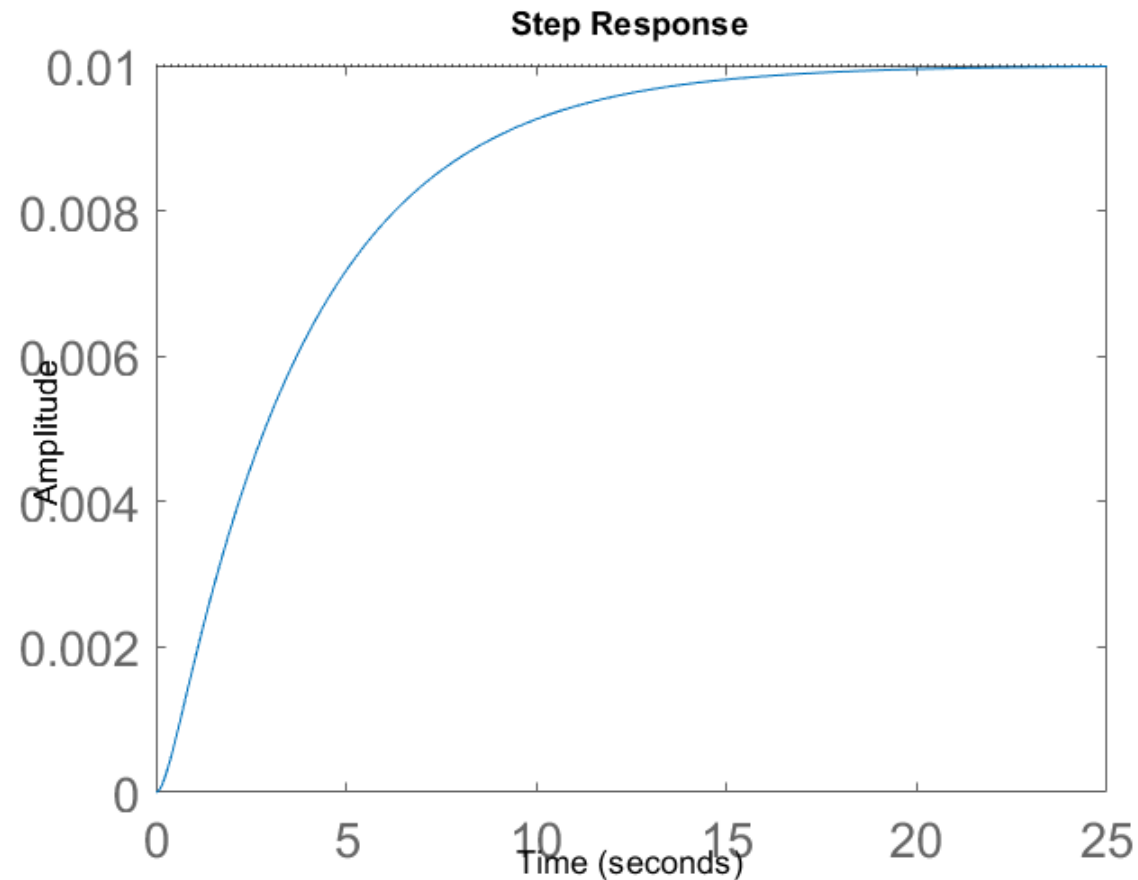


$$G_a = 1$$

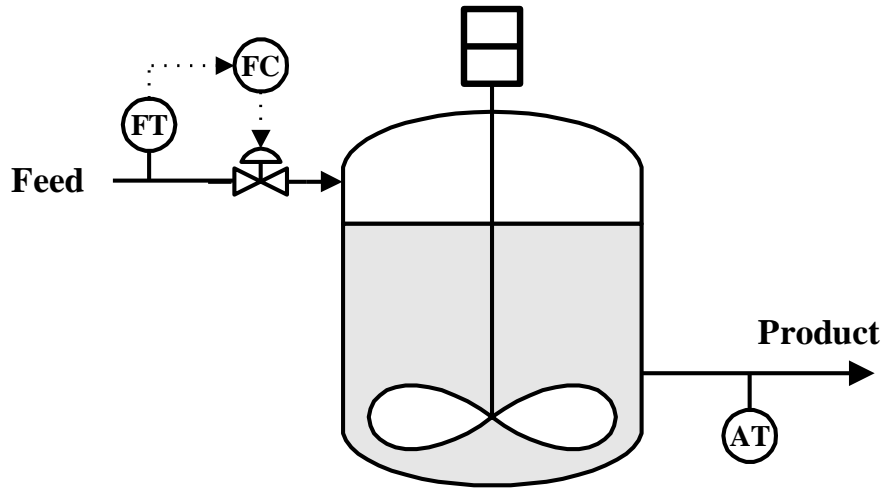
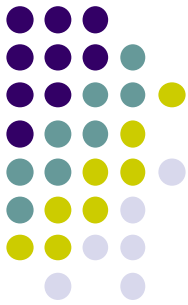
$$G_s = 1$$

$$G_u = \frac{0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$

$$G_T = \frac{1}{s^2 + 4s + 1}$$



# Εξατομικευμένος ρυθμιστής απλού ΑΣΑ

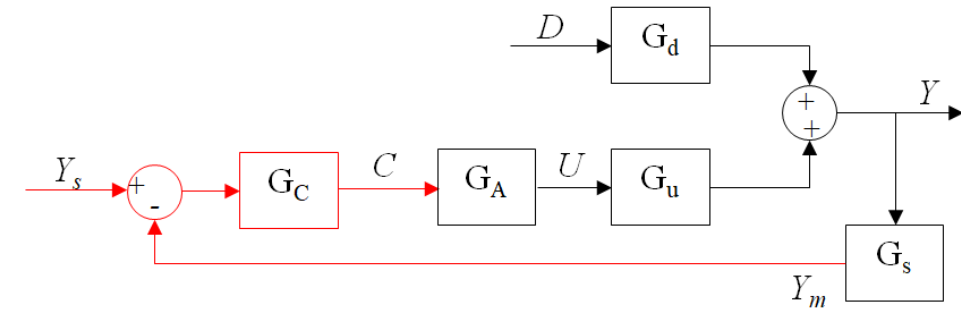


$$G_a = 1$$

$$G_s = 1$$

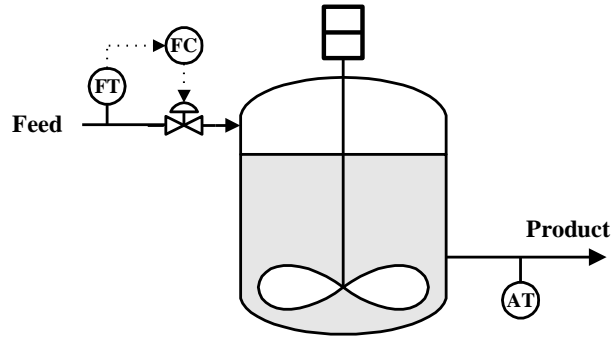
$$G_u = \frac{0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$

- Στόχος:  $G_T = \frac{1}{12s+1}$
- Ρυθμιστής:  $G_C = \left( \frac{G_T}{1-G_T G_S} \right) \frac{1}{G_u G_a}$

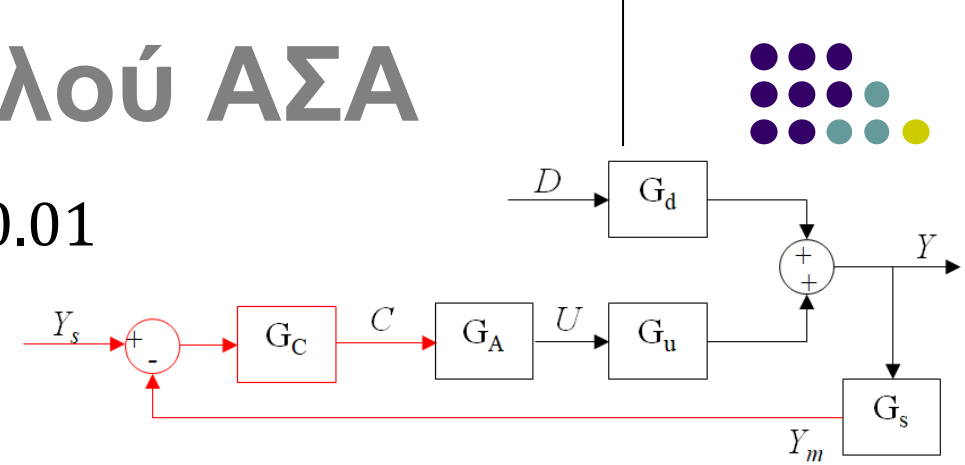


$$G_C = \frac{45.24s^2 + 181.2s + 158.4}{s} = 45.24s + 181.2 + \frac{158.4}{s}$$

# Εξατομικευμένος ρυθμιστής απλού ΑΣΑ



Απόκριση σε βημα  $y_s(t) = 0.01$



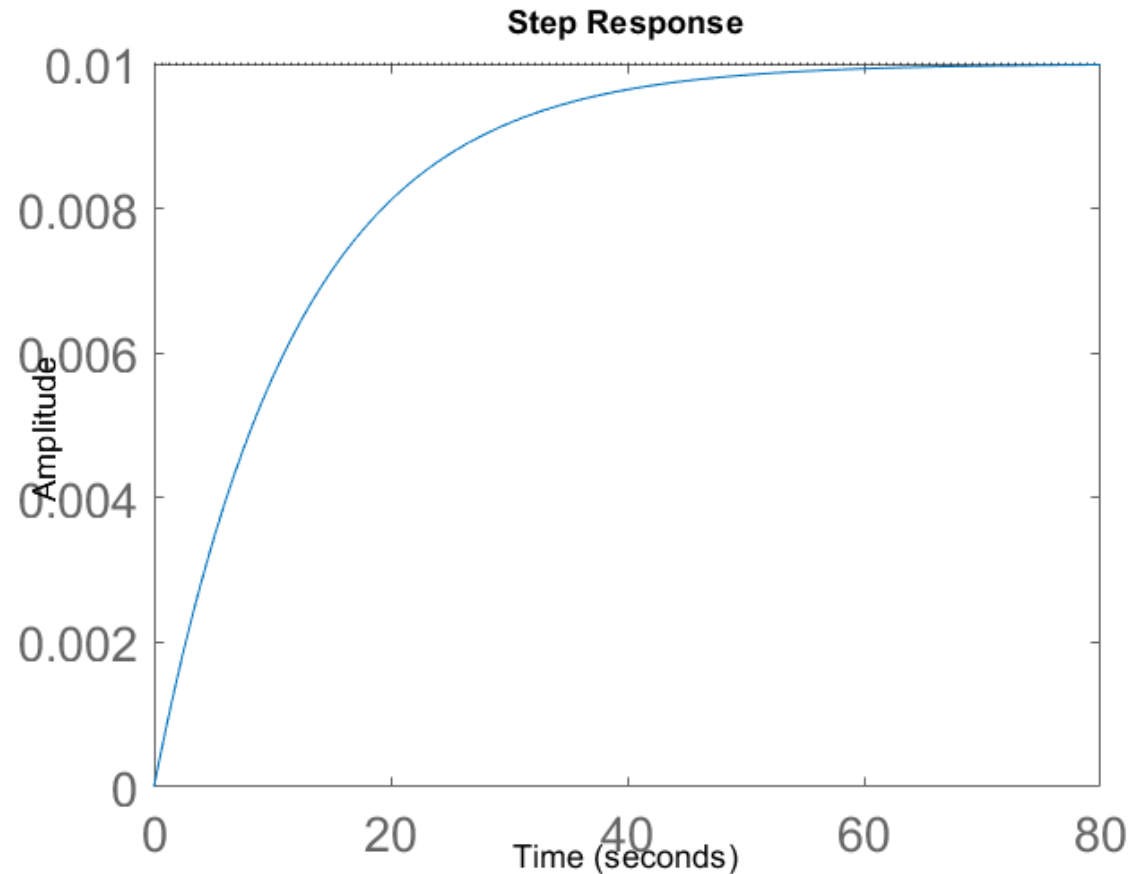
$$G_a = 1$$

$$G_s = 1$$

$$G_u = \frac{0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$

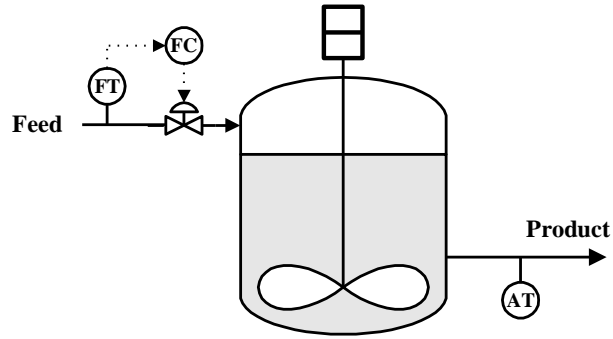
$$G_T = \frac{1}{12s + 1}$$

$$G_c = 45.24s + 181.2 + \frac{158.4}{s}$$

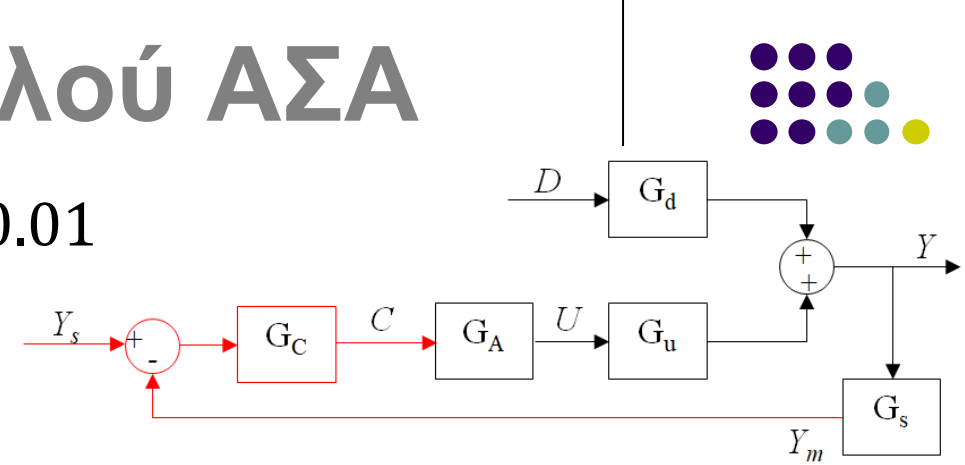




# Εξατομικευμένος ρυθμιστής απλού ΑΣΑ



Απόκριση σε βημα  $y_s(t) = 0.01$



$$G_a = 1$$

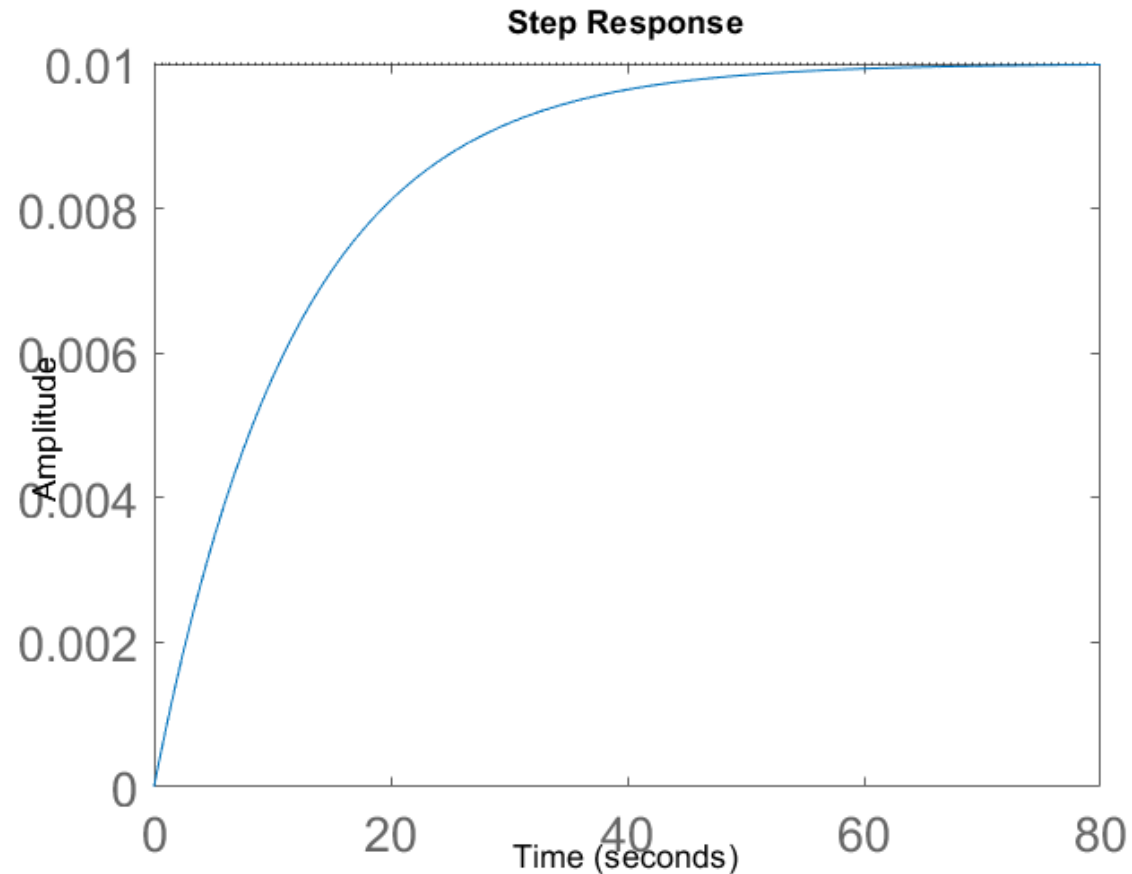
$$G_s = 1$$

$$G_u = \frac{0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$

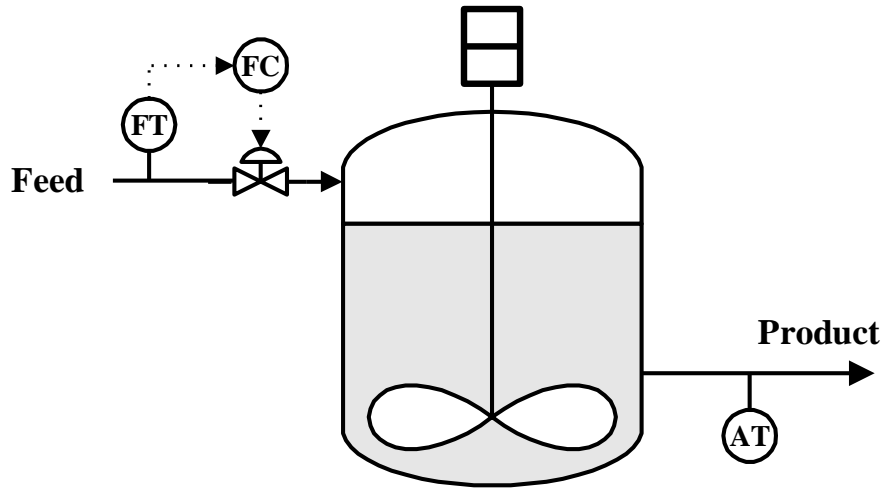
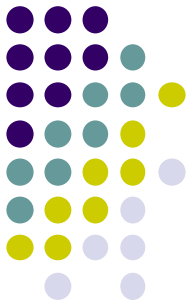
$$G_{uM} = \frac{0.002}{s^2 + 4s + 3.5}$$

$$G_T = \frac{1}{12s + 1}$$

$$G_C = 41.7s + 166.7 + \frac{145.8}{s}$$



# Εξατομικευμένος ρυθμιστής του ΑΣΑ

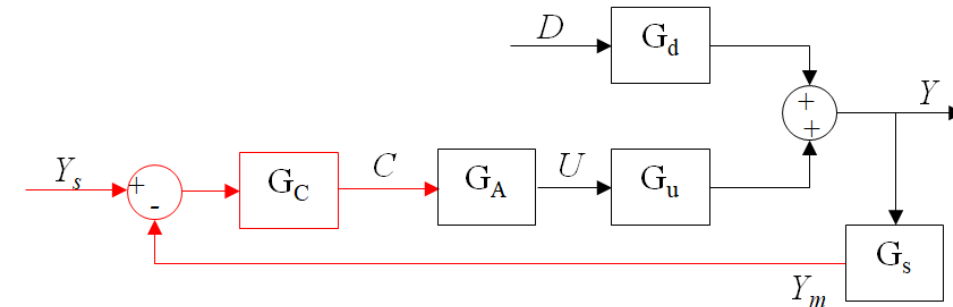


$$G_a = \frac{1}{(0.5s + 1)}$$

$$G_s = \frac{1}{(0.33s + 1)}$$

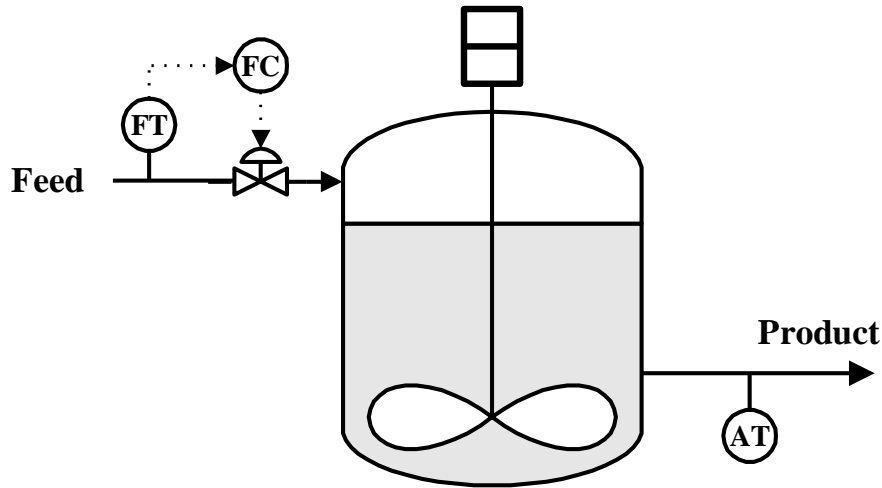
$$G_u = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$

- Στόχος:  $G_T = \frac{1}{12s+1}$
- Ρυθμιστής:  $G_C = \left( \frac{G_T}{1-G_T G_S} \right) \frac{1}{G_u G_a}$



$$G_C = - \frac{37.88 s^4 + 342.3s^3 + 1126s^2 + 1587s + 803.9}{s^3 + 1.439 s^2 - 5.214 s}$$

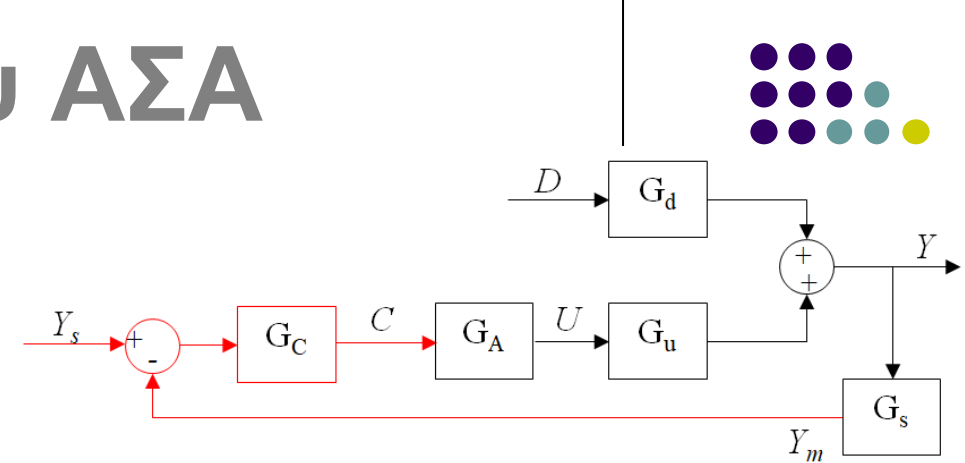
# Εξατομικευμένος ρυθμιστής του ΑΣΑ



$$G_a = \frac{1}{(0.5s + 1)}$$

$$G_s = \frac{1}{(0.33s + 1)}$$

$$G_u = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$



$$G_c = -\frac{37.88 s^4 + 342.3s^3 + 1126s^2 + 1587s + 803.9}{s^3 + 1.439 s^2 - 5.214 s}$$

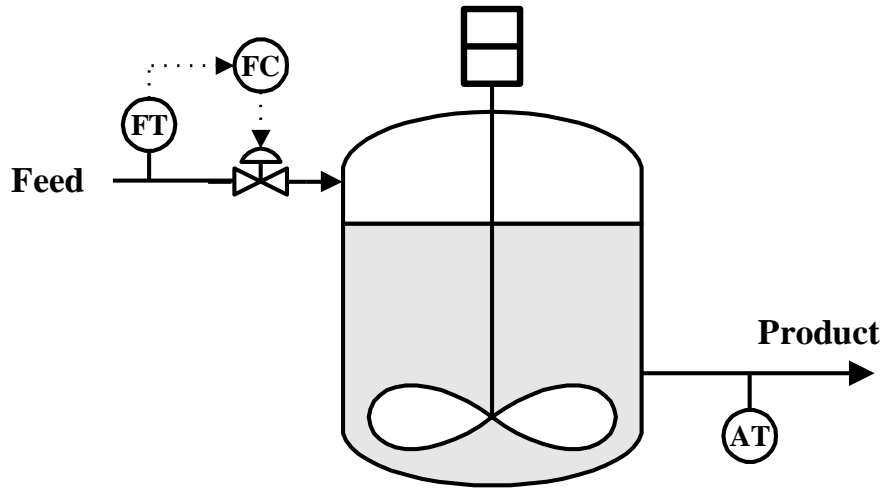
$$G_c = -287.8 - 37.88s - \frac{0.1706}{s + 3.114} - \frac{1062.9}{s - 1.675} + \frac{154.2}{s}$$

$$G_T = \frac{1}{12s + 1}$$

- Παρατηρήσεις:

- Πόλοι:  $p_1 = 0, p_2 = -3.1136, p_3 = 1.6745$
- Τάξη αριθμητή: 4, τάξη παρονομαστή: 3 → Πρέπει να προστεθεί φίλτρο.

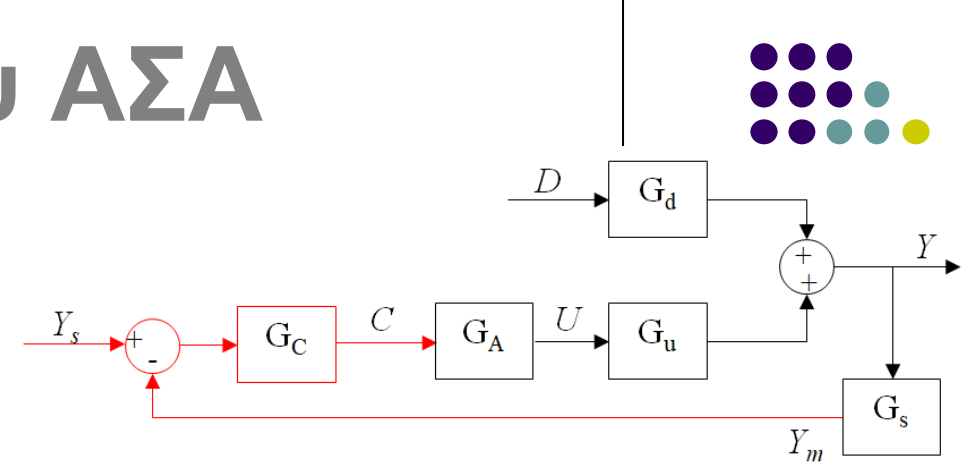
# Εξατομικευμένος ρυθμιστής του ΑΣΑ



$$G_a = \frac{1}{(0.5s + 1)}$$

$$G_s = \frac{1}{(0.33s + 1)}$$

$$G_u = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$



$$G_c = \frac{22.62s^4 + 204.4s^3 + 672.1s^2 + 947.7s + 480.1}{s^2 + 3.264s}$$

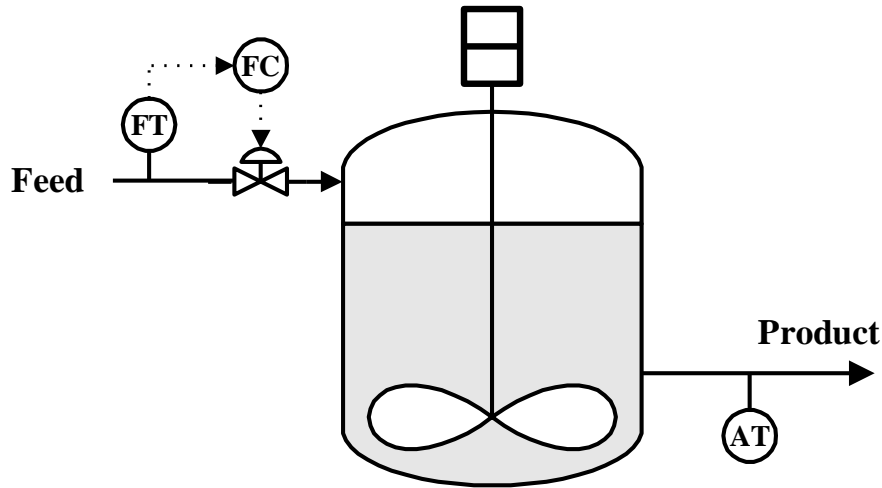
$$G_c = 245.9 + 130.6s + 22.62s^2 - \frac{2.218}{s + 3.264} + \frac{147.1}{s}$$

$$G_T = \frac{1}{12s + 1}$$

- Παρατηρήσεις:

- Πόλοι:  $p_1 = 0, p_2 = -3.264, p_3 = -1.6745$
- Τάξη αριθμητή: 4, τάξη παρονομαστή: 2 → Πρέπει να προστεθεί φίλτρο 2<sup>ης</sup> τάξης!!

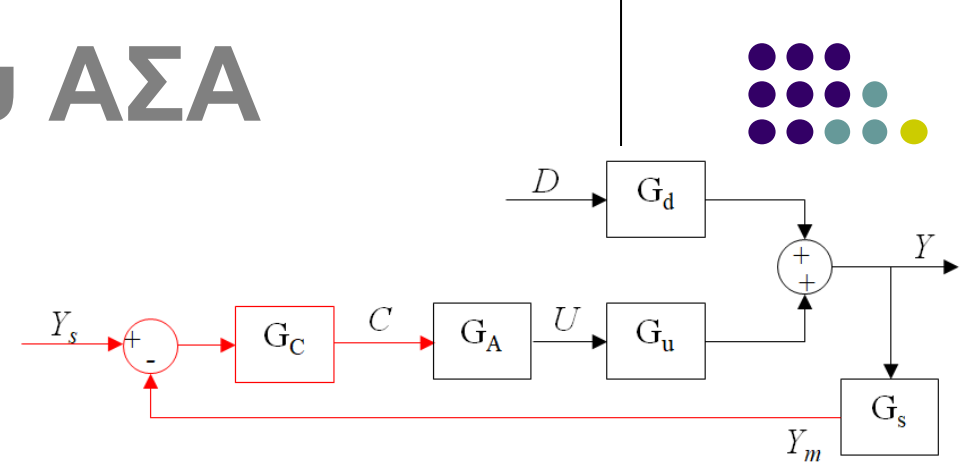
# Εξατομικευμένος ρυθμιστής του ΑΣΑ



$$G_a = \frac{1}{(0.5s + 1)}$$

$$G_s = \frac{1}{(0.33s + 1)}$$

$$G_u = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502}$$



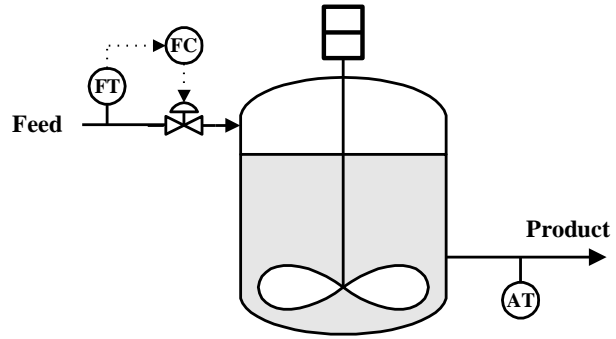
$$G_c = \frac{22.62s^5 + 166.5s^4 + 329.8s^3 - 177.9s^2 - 1107s - 803.9}{s^3 + 1.59s^2 - 5.466s}$$

$$G_T = \frac{1}{12s + 1} - \frac{1.6746s + 1}{12s + 1}$$

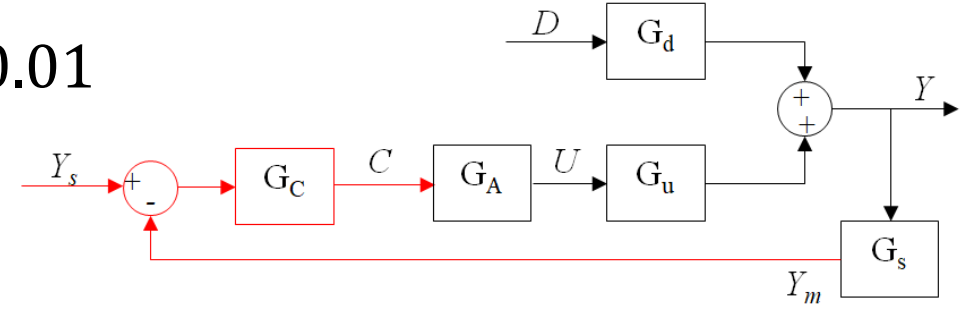
- Παρατηρήσεις:

- Πόλοι:  $p_1 = 0, p_2 = -3.264, p_3 = 1.6745$  παραμένει ο θετικός πόλος
- Τάξη αριθμητή: 5, τάξη παρονομαστή: 3 → Πρέπει να προστεθεί φίλτρο 2<sup>ης</sup> τάξης!!

# Εξατομικευμένος ρυθμιστής του ΑΣΑ



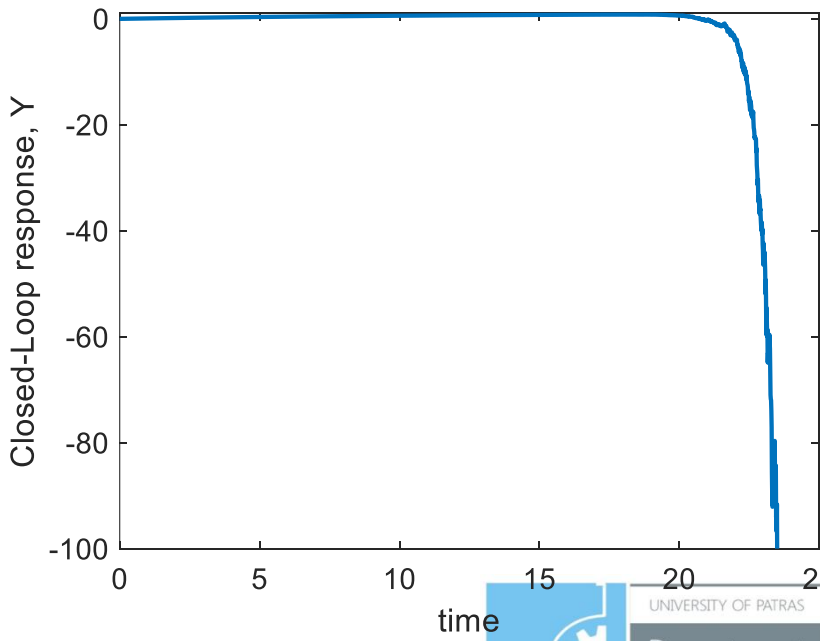
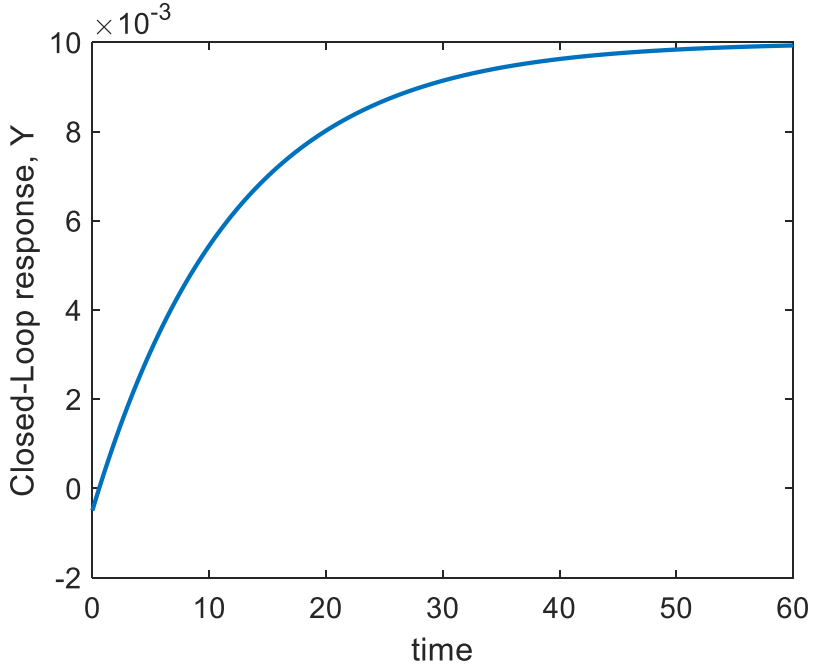
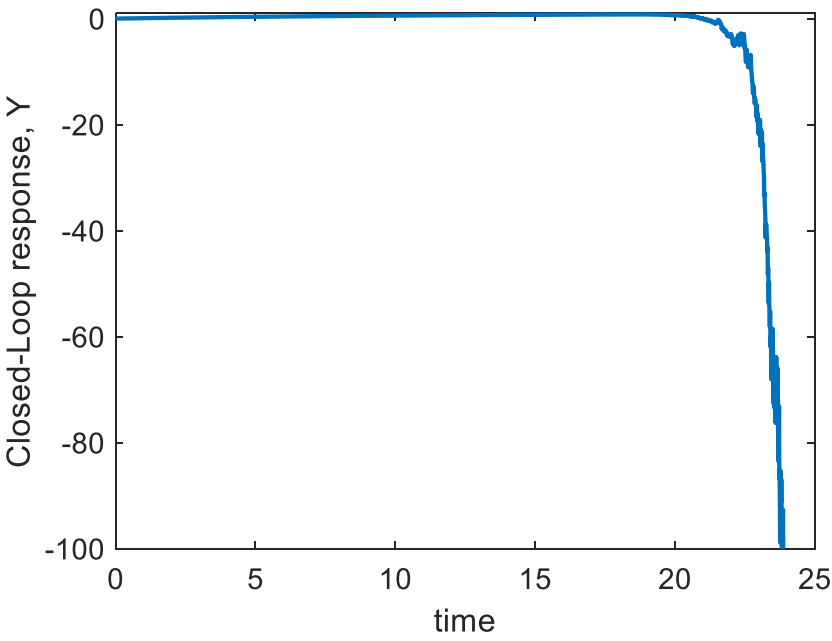
Απόκριση σε βημα  $y_s(t) = 0.01$



$$G_T = \frac{1}{12s + 1}$$

$$G_T = \frac{-\frac{1}{1.6745}s + 1}{12s + 1}$$

$$G_T = \frac{-\frac{1}{1.6746}s + 1}{12s + 1}$$



# Κατασκευή ρυθμιστή



- **Μέθοδος:** Κατασκευή εξατομικευμένου ρυθμιστή
  - Η επιλογή του  $G_T$  είναι βασική στην εφαρμοσιμότητα του ρυθμιστή
  - Καλή για απλές διεργασίες
  - Ο ρυθμιστής είναι ευαίσθητος στην ακρίβεια του μοντέλου
  - Ο ρυθμιστής δεν έχει τυπική μορφή
  - **Μη εφαρμόσιμη** μέθοδος για ασταθείς διεργασίες και διεργασίες με ανάστροφη απόκριση
    - Λόγος: Η απαλοιφή των θετικών πόλων και θετικών μηδενικών τιμών είναι **αδύνατη** στην πράξη
- **Μέθοδος:** Χρήση τυπικών ρυθμιστών
  - Δεν χρειάζεται συγκεκριμένη επιλογή στόχου
  - Μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς εκτεταμένη γνώση των μοντέλων
  - Αποφεύγουν την απαλοιφή των θετικών πόλων και θετικών μηδενικών τιμών
  - **Επιλογή των παραμέτρων** του ρυθμιστή;

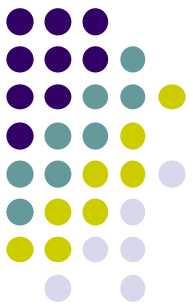
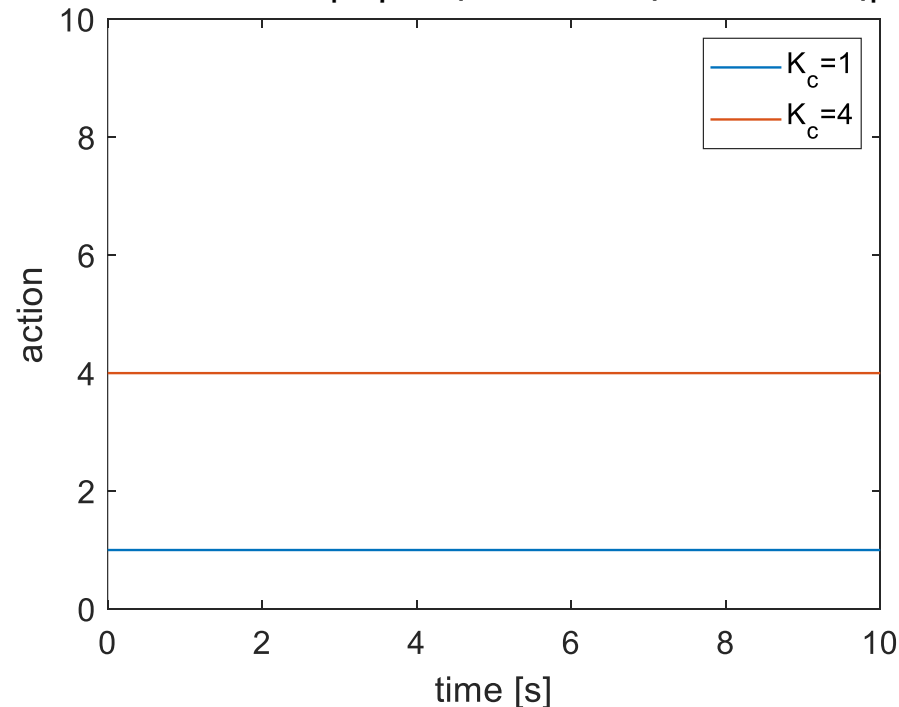
# Τυπικοί αλγόριθμοι ρυθμιστή:

## P: Αναλογικός (Proportional)

- Η έξοδος του ρυθμιστή είναι ανάλογη του σφάλματος.

$$c(t) = K_c e(t)$$

- Η σταθερά αναλογίας ονομάζεται ενίσχυση ρυθμιστή.
  - Υψηλή ενίσχυση δείχνει γρήγορη απόκριση, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια.
  - Χαμηλή ενίσχυση μπορεί να προκαλέσει μεγάλη απόκλιση από το σημείο ρύθμισης.





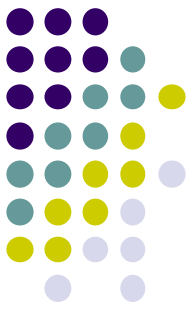
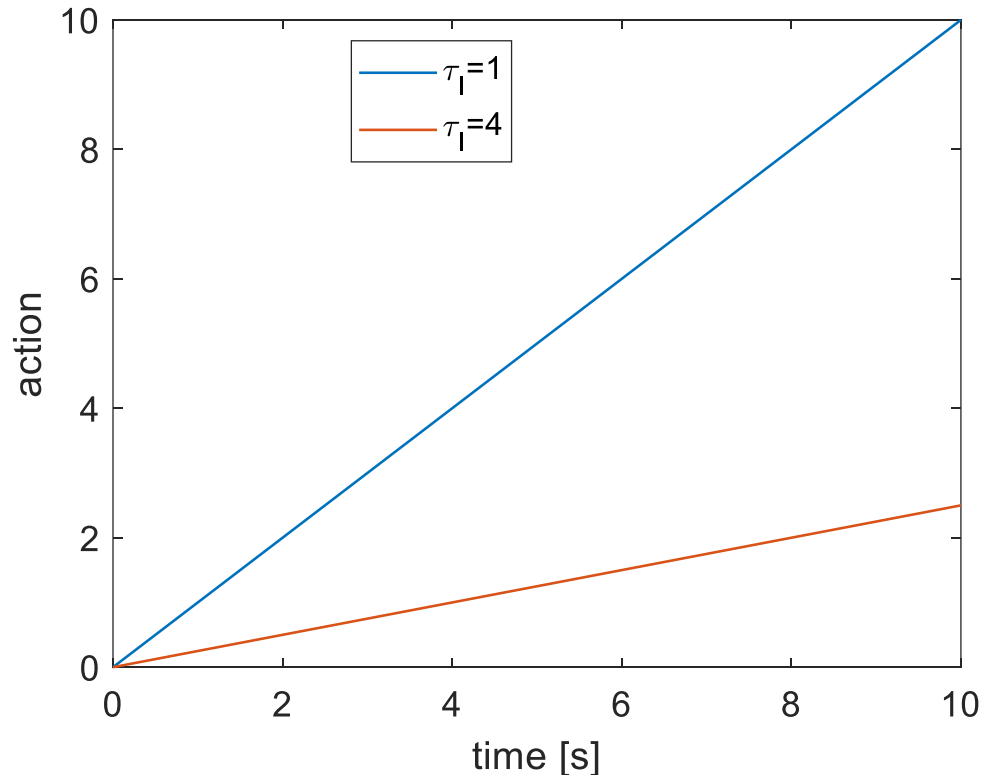
# Τυπικοί αλγόριθμοι ρυθμιστή:

## I: Ολοκληρωτικό (Integral)

- Η έξοδος του ρυθμιστή είναι ανάλογη του ολοκληρώματος του σφάλματος.

$$c(t) = K_c \left[ \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt \right]$$

- Ελαχιστοποιεί την απόκλιση, και κάνει την απόκριση ηπιότερη.



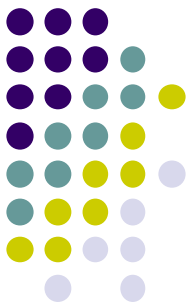
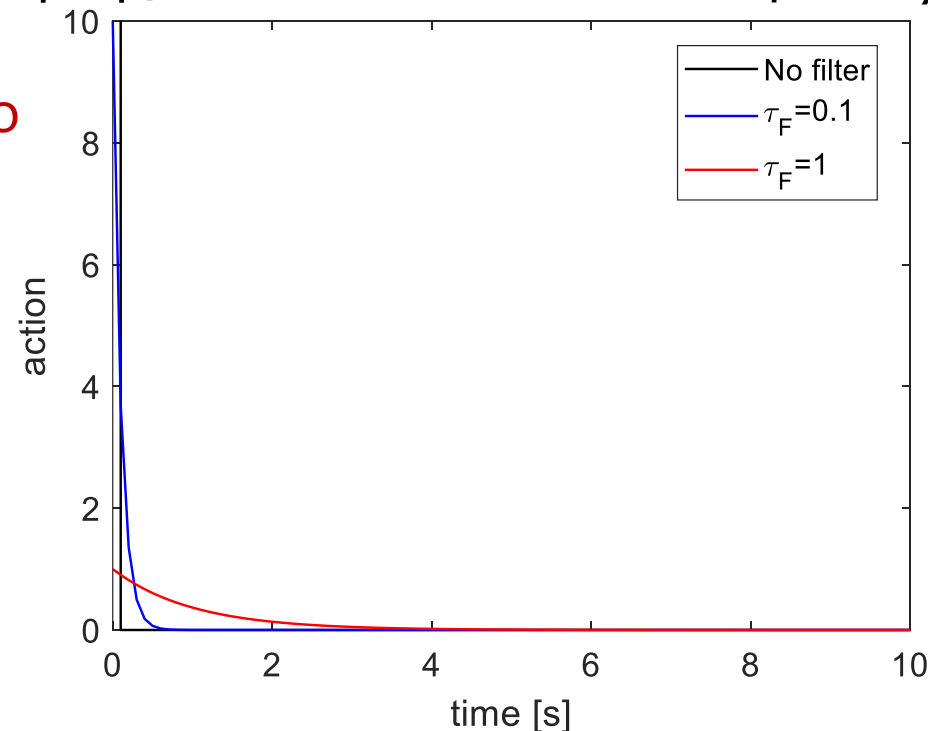
# Τυπικοί αλγόριθμοι ρυθμιστή:

## D: Διαφορικό (Derivative)

- Η έξοδος του ρυθμιστή είναι ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος.

$$c(t) = K_c \left[ \tau_D \frac{de}{dt} \right]$$

- Προκαλεί την απόσβεση της ταλάντωσης και επιτρέπει χρήση υψηλότερης σταθεράς ενίσχυσης.
- **Ευαίσθητο στο θόρυβο**
  - Πρόσθεση φίλτρου



# Μοντέλο Ρυθμιστή PID



Για ένα ρυθμιστή τύπου PID,

$$c(t) = c_0 + K_c \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{d e(t)}{dt} \right]$$

$$C(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right] E(s)$$

- όπου:
- $K_c$  = Ενίσχυση ρυθμιστή
  - $e$  = Ρυθμιστική απόκλιση (set point **μείον** μετρούμενη τιμή)
  - $\tau_i$  = Χρονική σταθερά ολοκληρωτικού όρου
  - $\tau_d$  = Χρονική σταθερά διαφορικού όρου

Η έξοδος του ρυθμιστή είναι ανάλογο με το σφάλμα, το ολοκλήρωμα στο χρόνο του σφάλματος και τον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος.  $K_c$ ,  $\tau_i$  και  $\tau_d$  είναι οι καθοριζόμενες παράμετροι του ρυθμιστή.

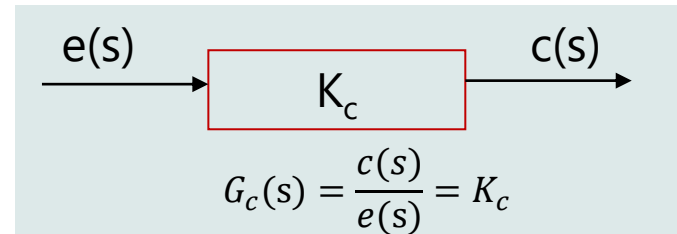
# Συναρτήσεις Μεταφοράς Τυπικών Ρυθμιστών



- Αναλογικός ρυθμιστής (P)

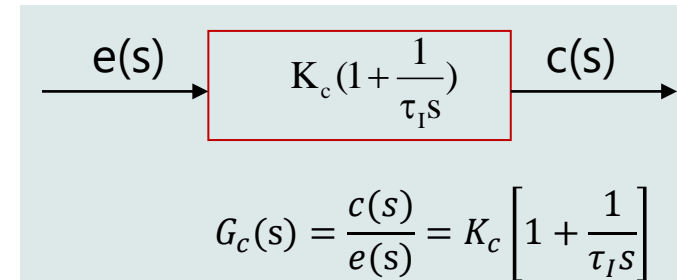
$$\begin{aligned} & c(t) = K_c e(t) \\ \hookrightarrow & c(s) = K_c e(s) \end{aligned}$$

$$e = T_{spt} - T$$



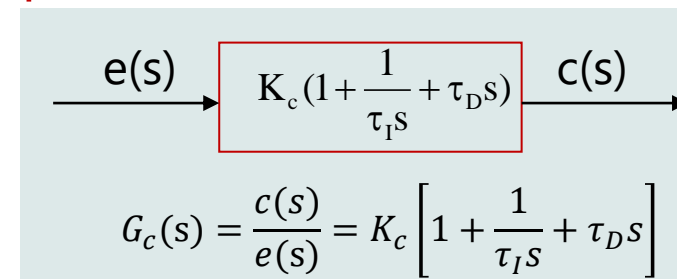
- Αναλογικός ολοκληρωτικός ρυθμιστής (PI)

$$\begin{aligned} & c(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt \right] \\ \hookrightarrow & c(s) = K_c \left[ e(s) + \frac{1}{\tau_I s} e(s) \right] \end{aligned}$$

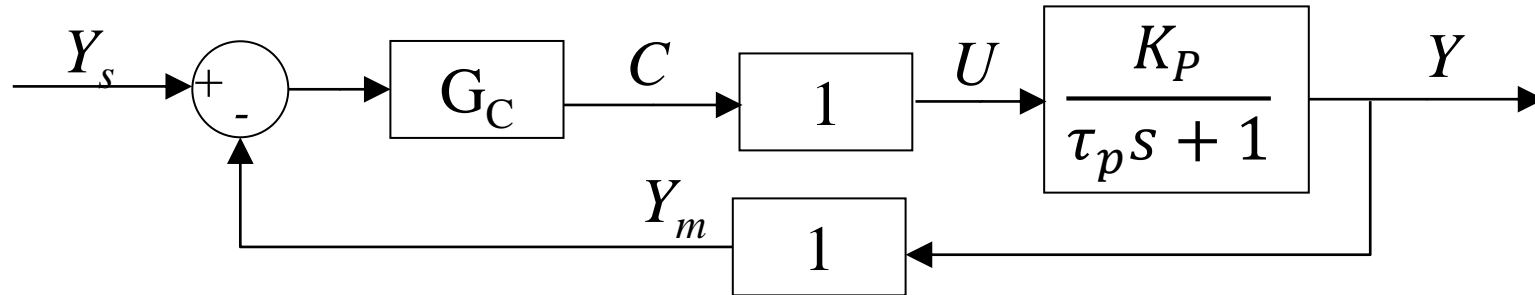


- Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός ρυθμιστής (PID)

$$\begin{aligned} & c(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de}{dt} \right] \\ \hookrightarrow & c(s) = K_c e(s) \left[ 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right] \end{aligned}$$



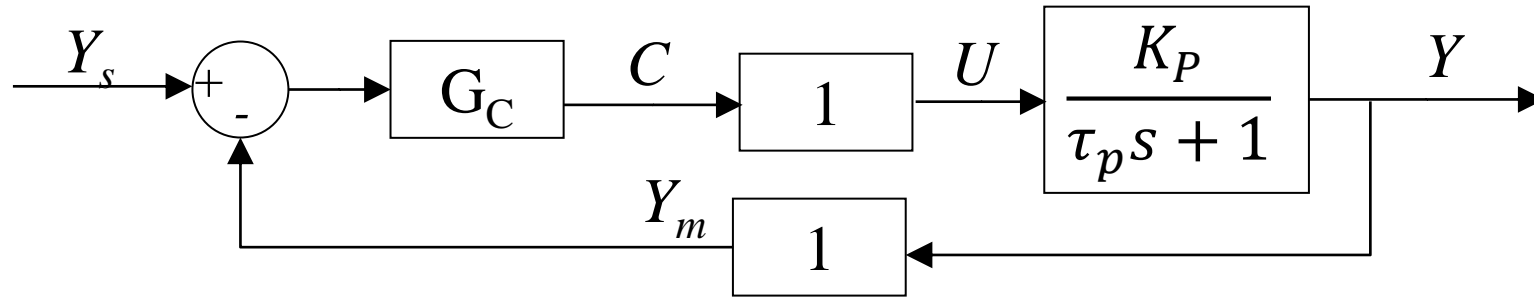
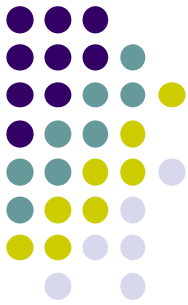
# Παράδειγμα: Διεργασία 1<sup>ης</sup> τάξης (FOS)



## Παρατηρήσεις

- Το FOS είναι ευσταθές
- Ο ενεργοποιητής και τελικό στοιχείο ρύθμισης είναι τέλεια
- Ο αισθητήρας είναι τέλειος
- Άρα το μοντέλο αυτό περιγράφει μια **ιδεατή διεργασία και εξοπλισμό**

# Ιδιότητες P σε διεργασία 1<sup>ης</sup> τάξης (FOS)



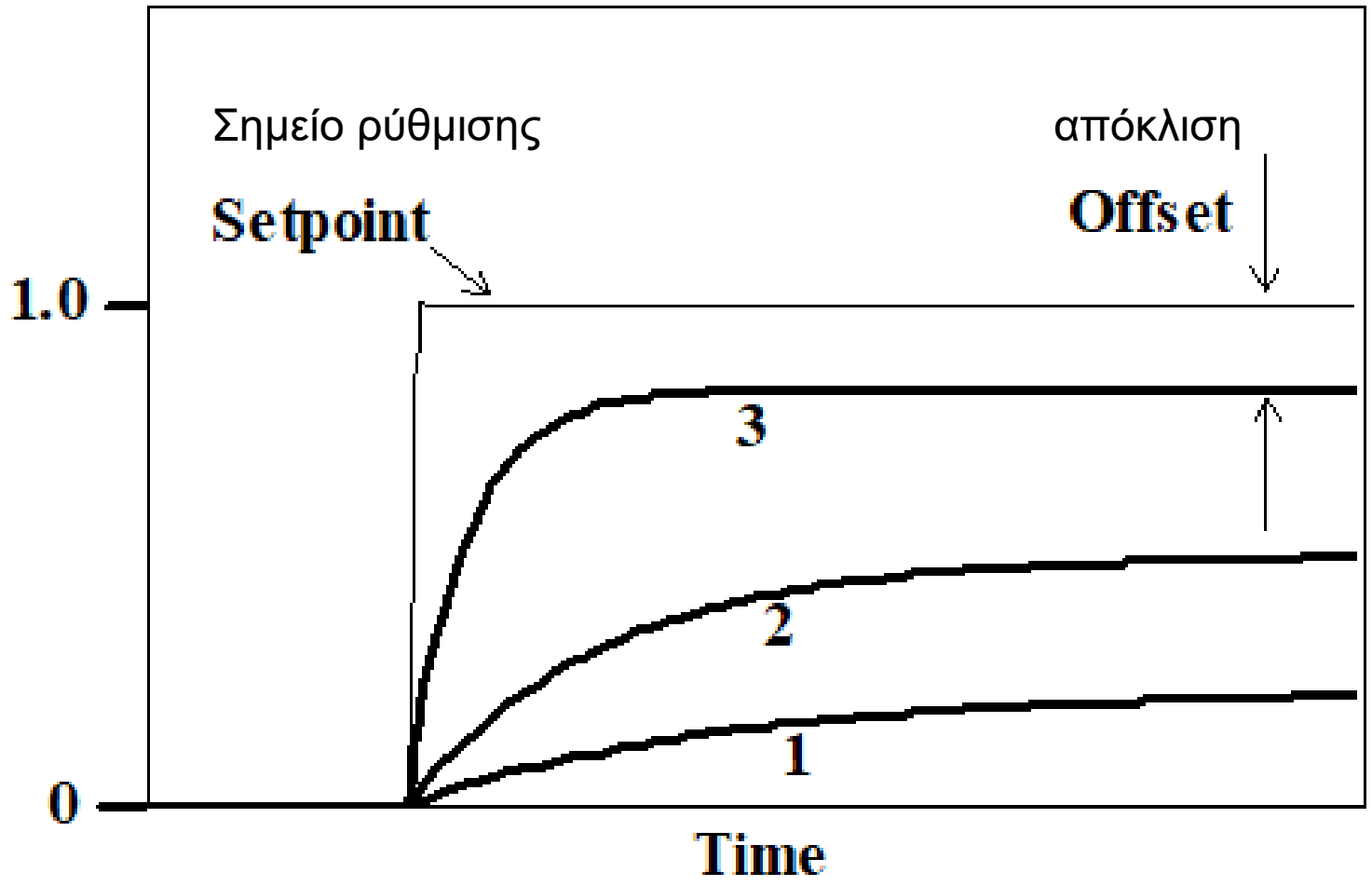
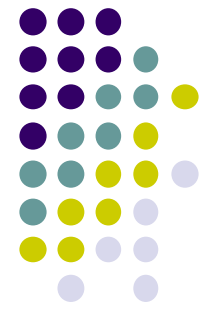
$$c(t) = c_0 + K_c e(t)$$

$$G_c(s) = K_c$$

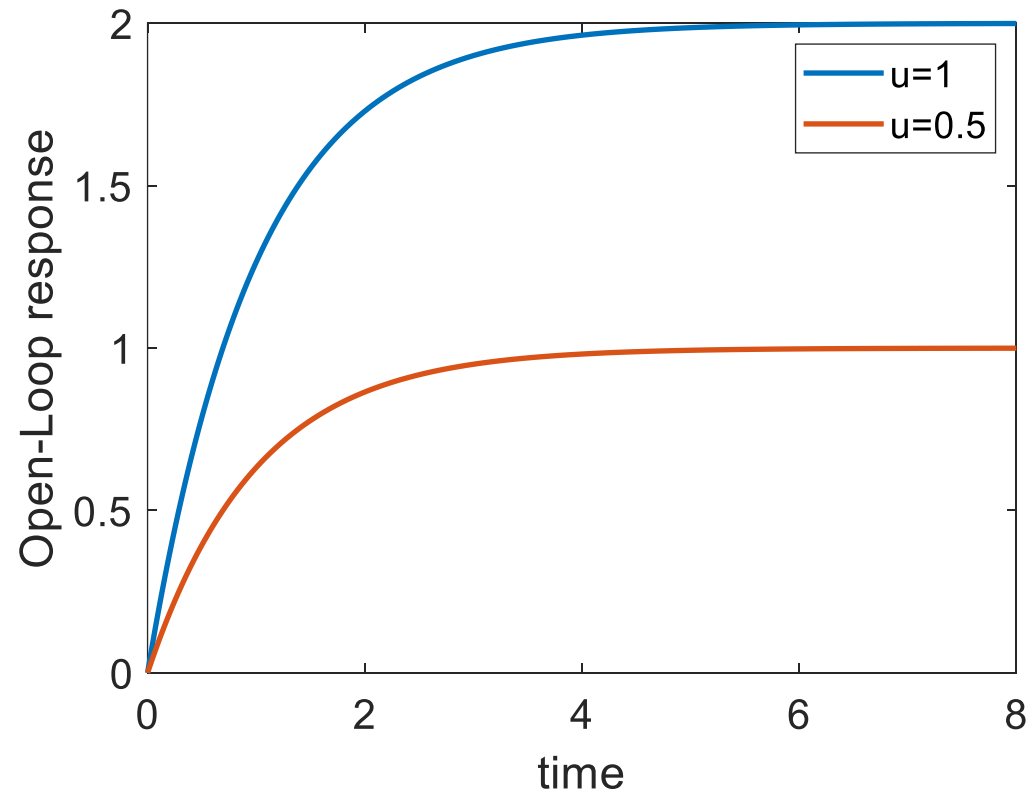
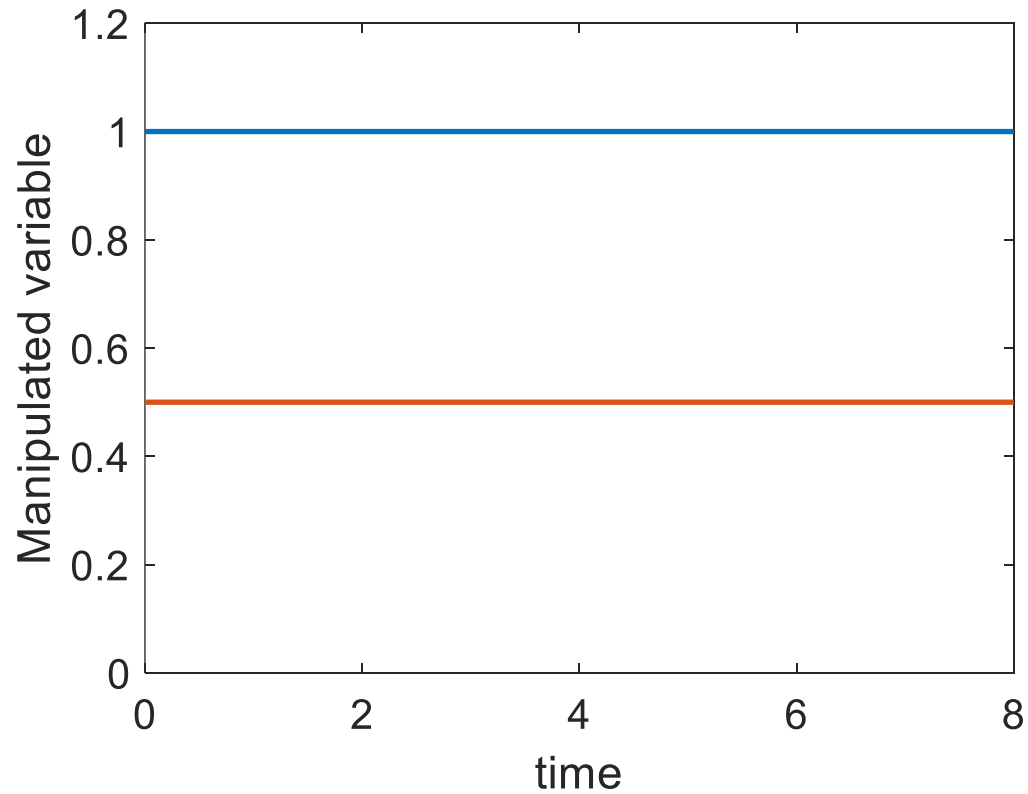
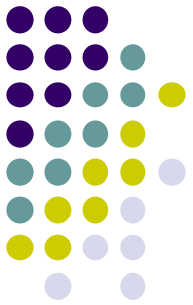
$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{\frac{K_c K_p}{K_c K_p + 1}}{\frac{\tau_p}{K_c K_p + 1} s + 1} \neq 1$$

- ΠΣΜ του κλειστού βρόγχου σε διεργασία 1<sup>ης</sup> τάξης
- Παρατηρήσεις του P ρυθμιστή
  - Δεν αλλάζει η τάξη της ΠΣΜ
  - Ο χαρακτηριστικός χρόνος της διεργασίας κλειστού βρόγχου είναι μικρότερος από αυτόν της ανοικτής διεργασίας  $\tau_p$
  - Δεν απαλείφεται η απόκλιση.

# Δράση και απόκριση με P

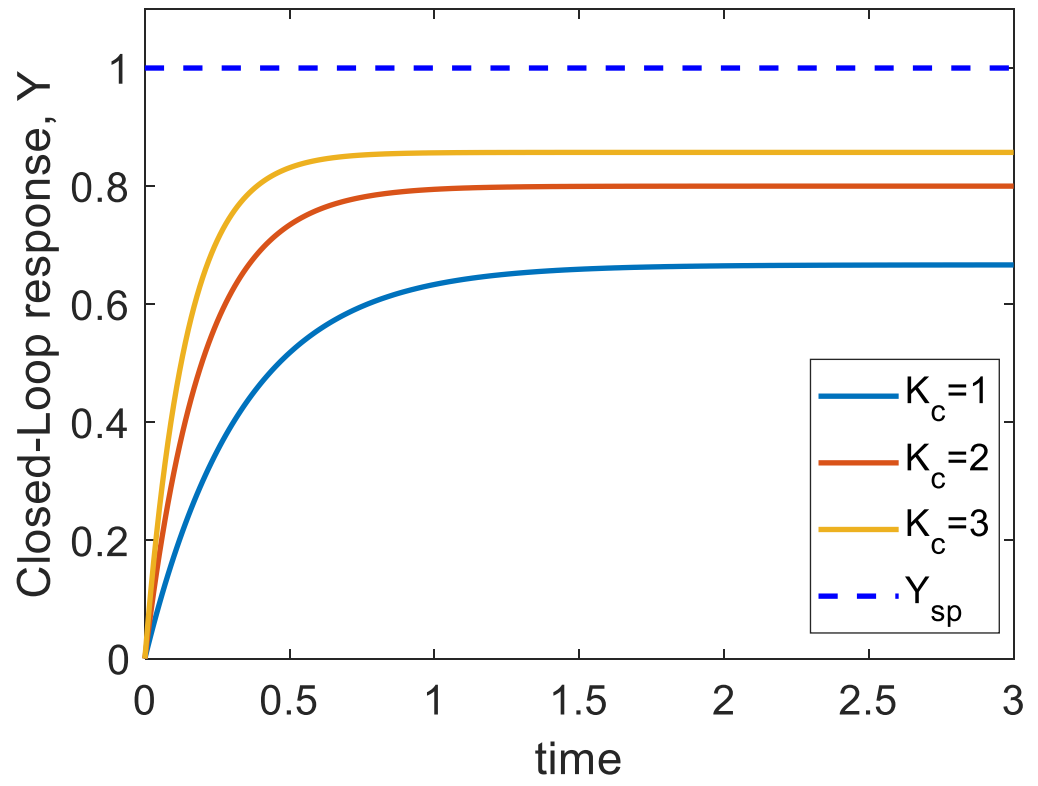
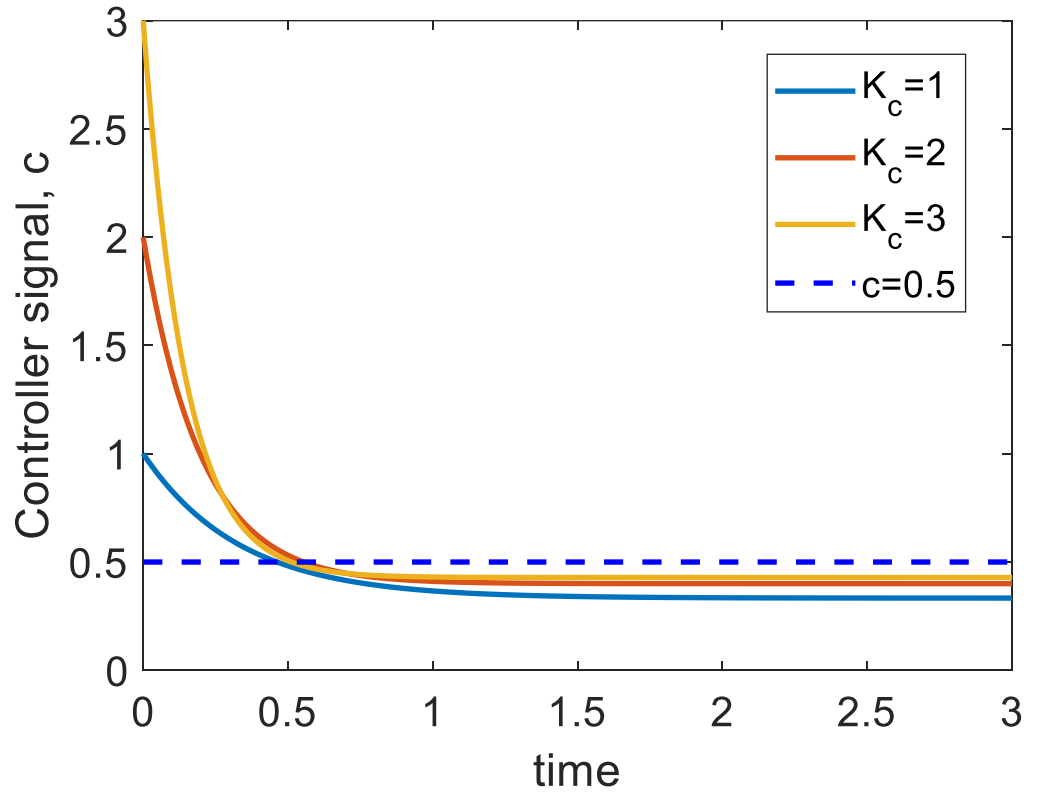


# Απόκριση χωρίς ανάδραση

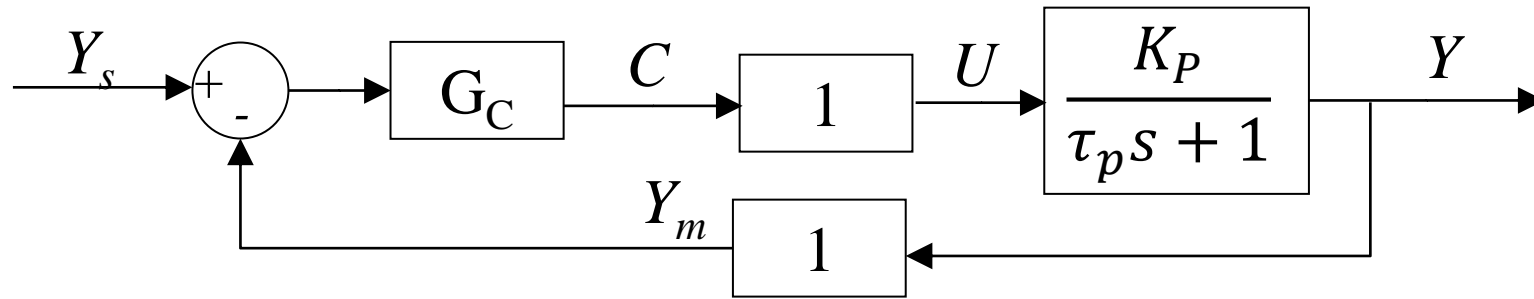
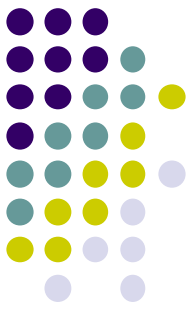




# Δράση και απόκριση με P



# Ιδιότητες I σε διεργασία 1<sup>ης</sup> τάξης (FOS)



$$c(t) = c_0 + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt$$

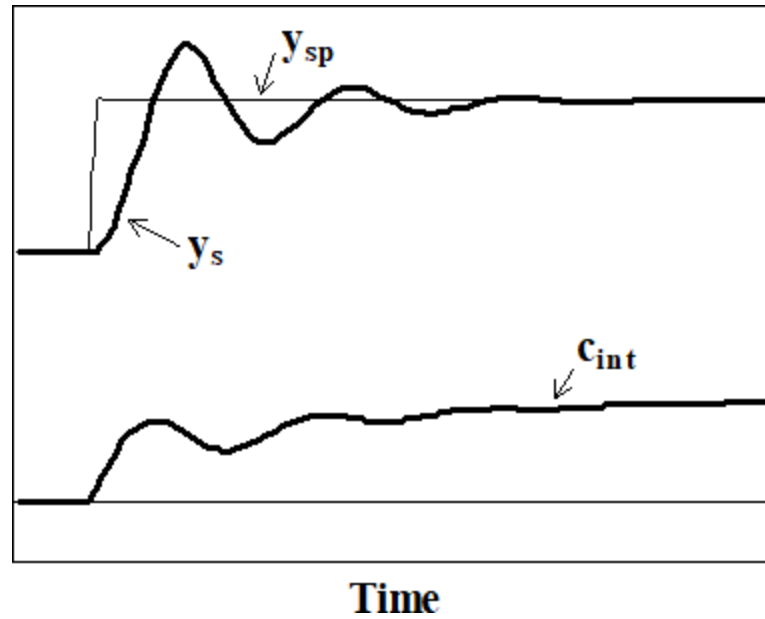
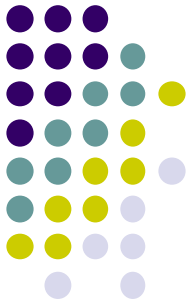
$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{1}{\frac{\tau_I \tau_p}{K_c K_p} s^2 + \frac{\tau_I}{K_c K_p} s + 1}$$

$$\tau'_p = \sqrt{\frac{\tau_I \tau_p}{K_c K_p}}$$

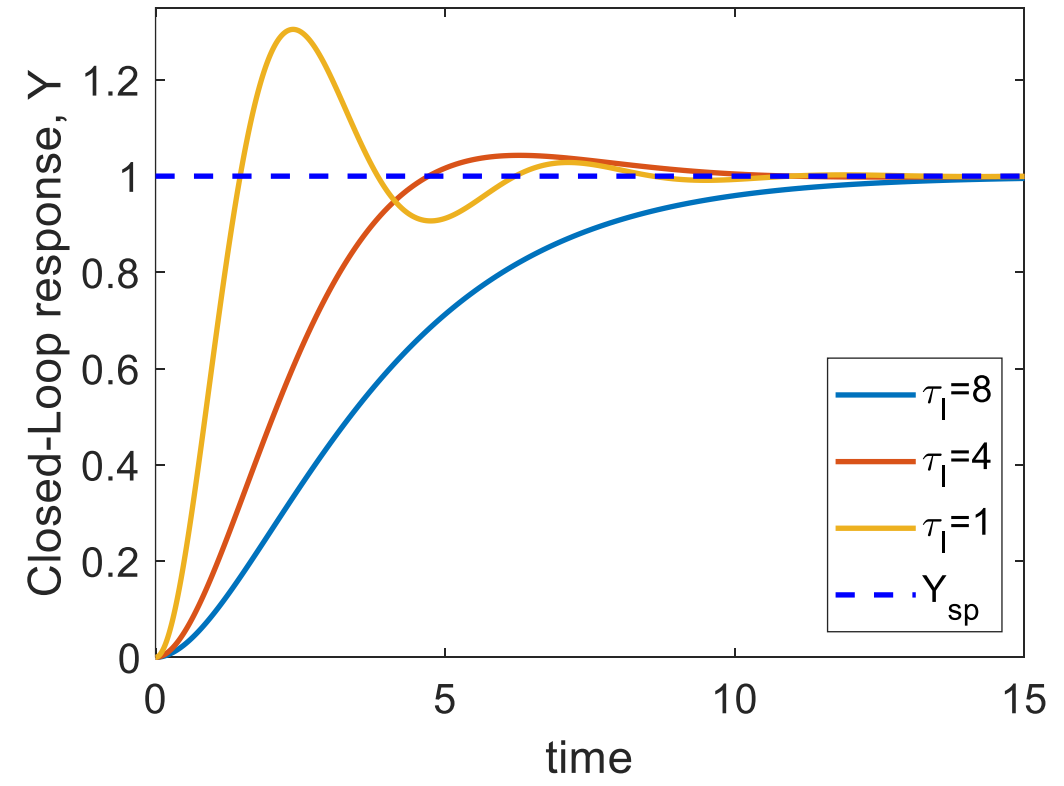
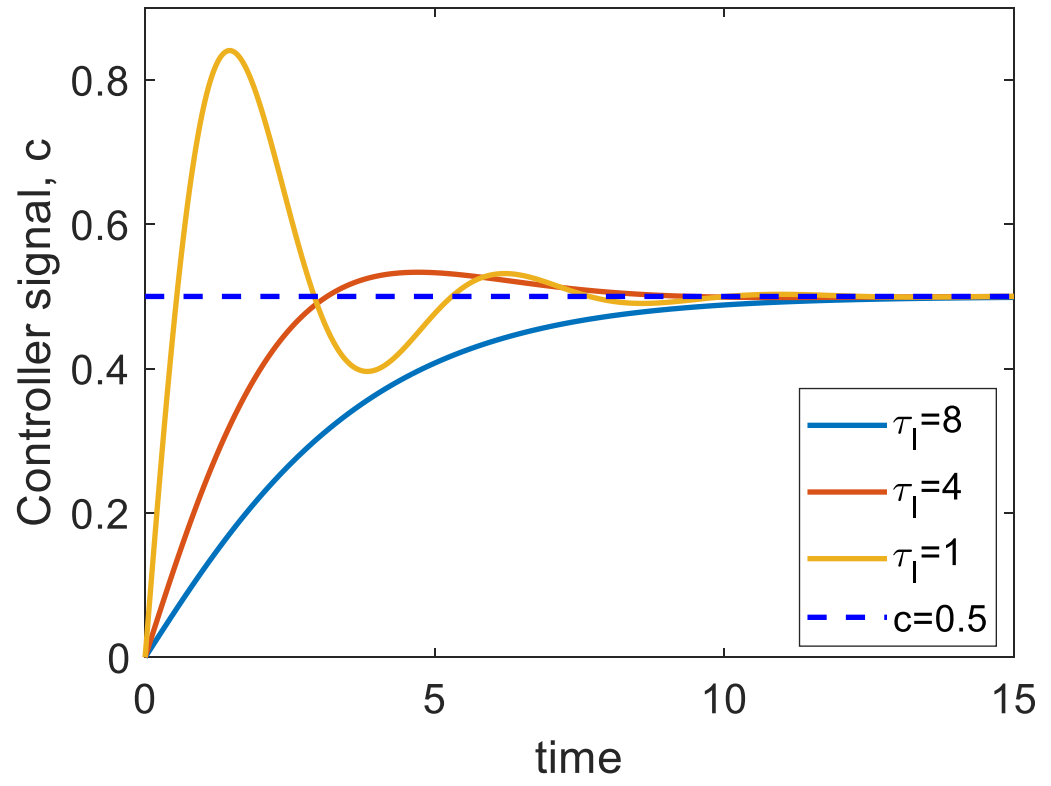
$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau_I}{\tau_p K_c K_p}}$$

- ΠΣΜ του κλειστού βρόγχου σε διεργασία 1<sup>ης</sup> τάξης
- Παρατηρήσεις του I ρυθμιστή
  - Η απόκλιση απαλείφεται
  - Αυξάνει η τάξη της ΠΣΜ κατά 1
  - Όσο αυξάνει η δράση η απόκριση της διεργασίας κλειστού βρόγχου γίνεται γρηγορότερη αλλά με κόστος αυξανόμενου πλάτους ταλαντώσεων

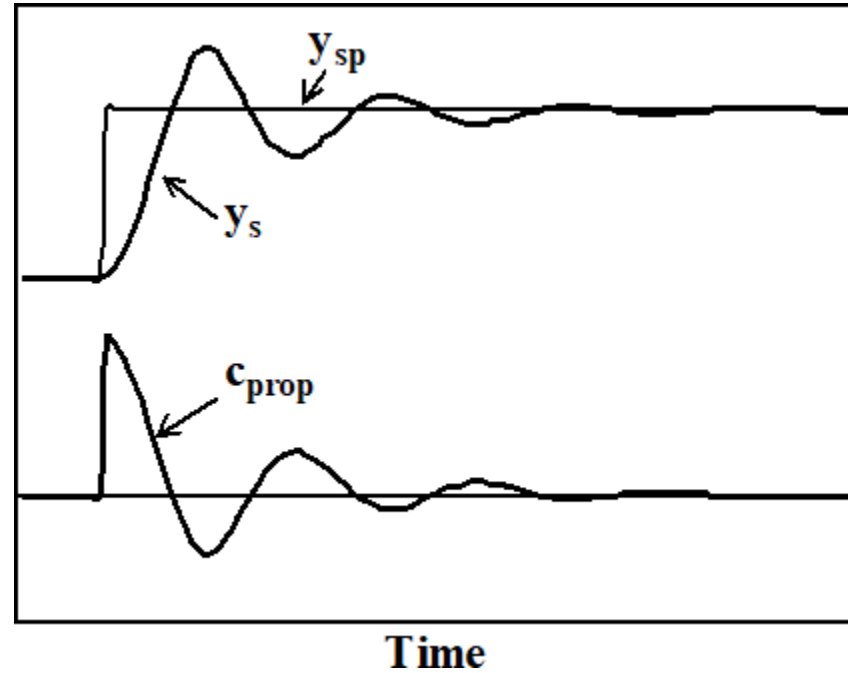
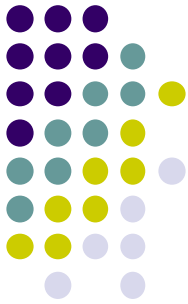
# Δράση και απόκριση με I



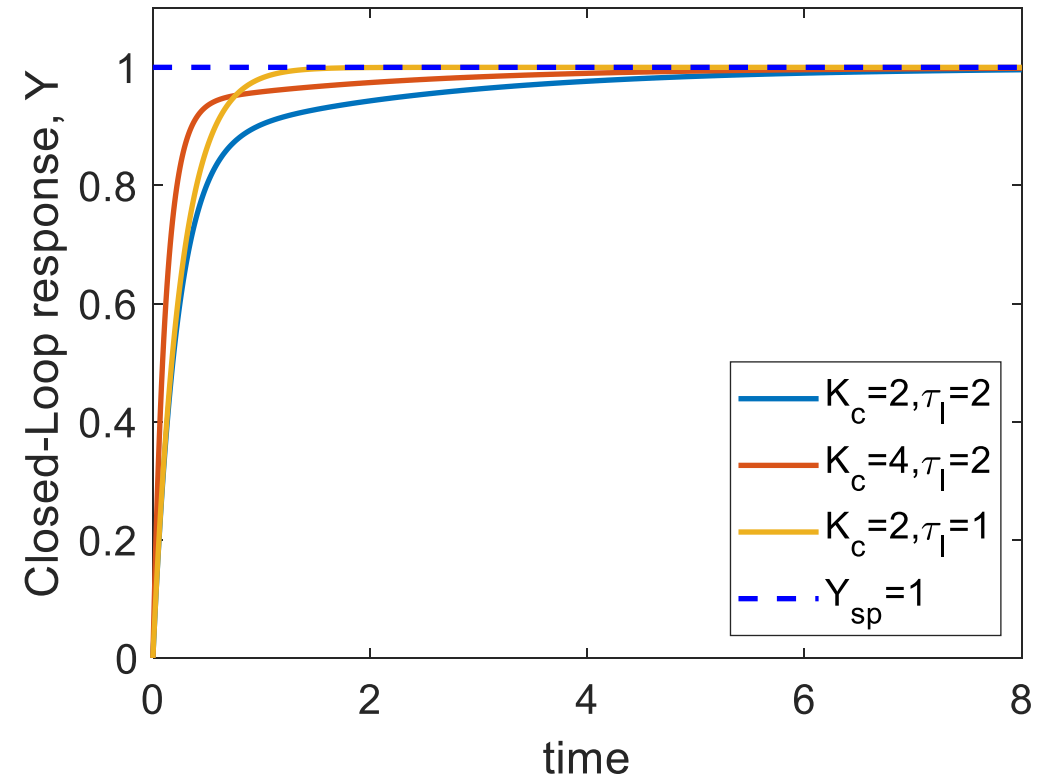
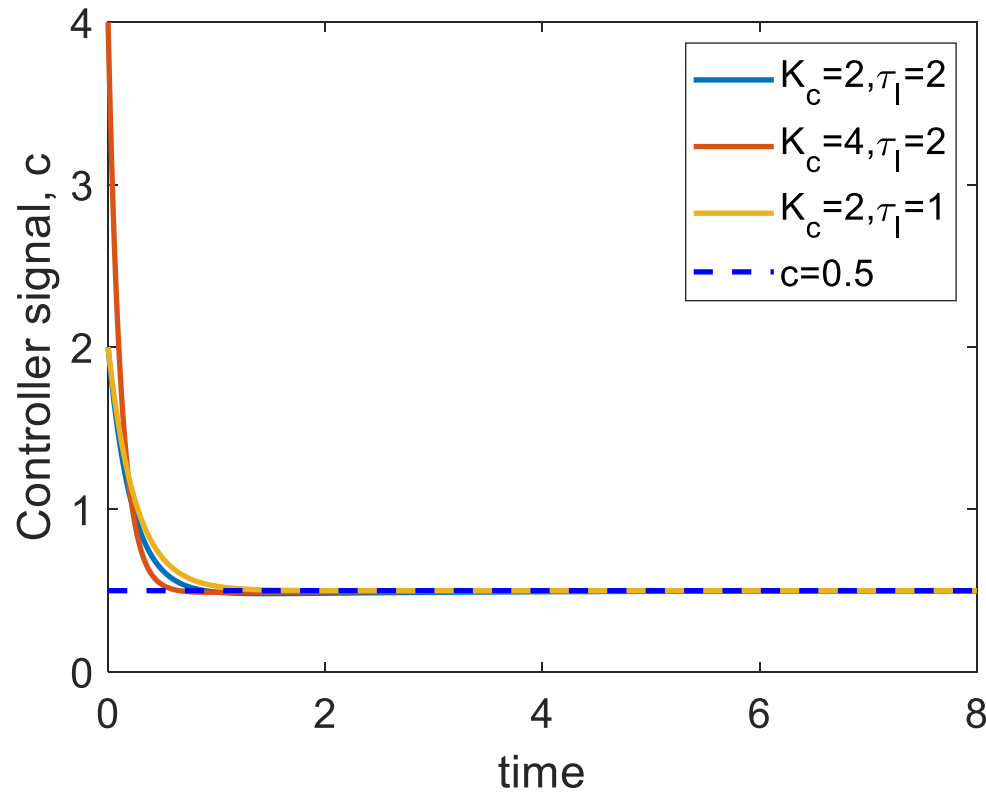
# Δράση και απόκριση με I



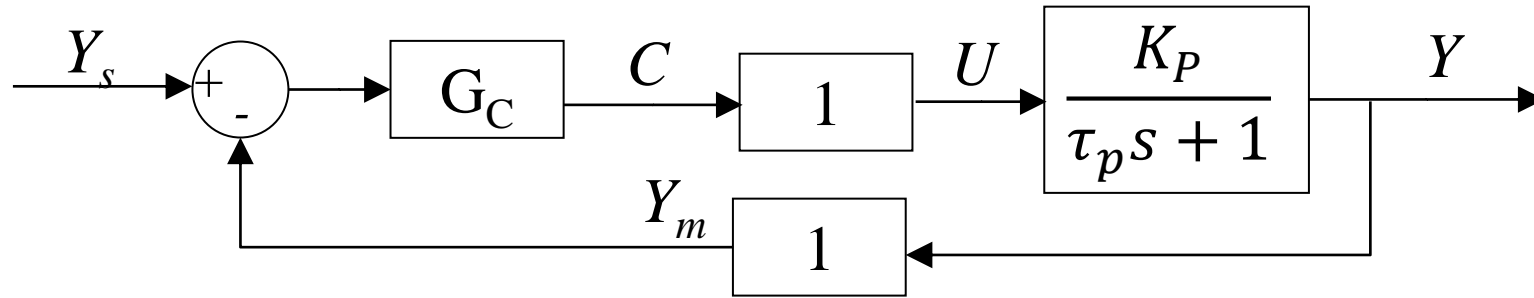
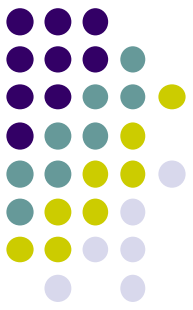
# Δράση και απόκριση με **PI**



# Δράση και απόκριση με PI



# Ιδιότητες D σε διεργασία 1<sup>ης</sup> τάξης (FOS)



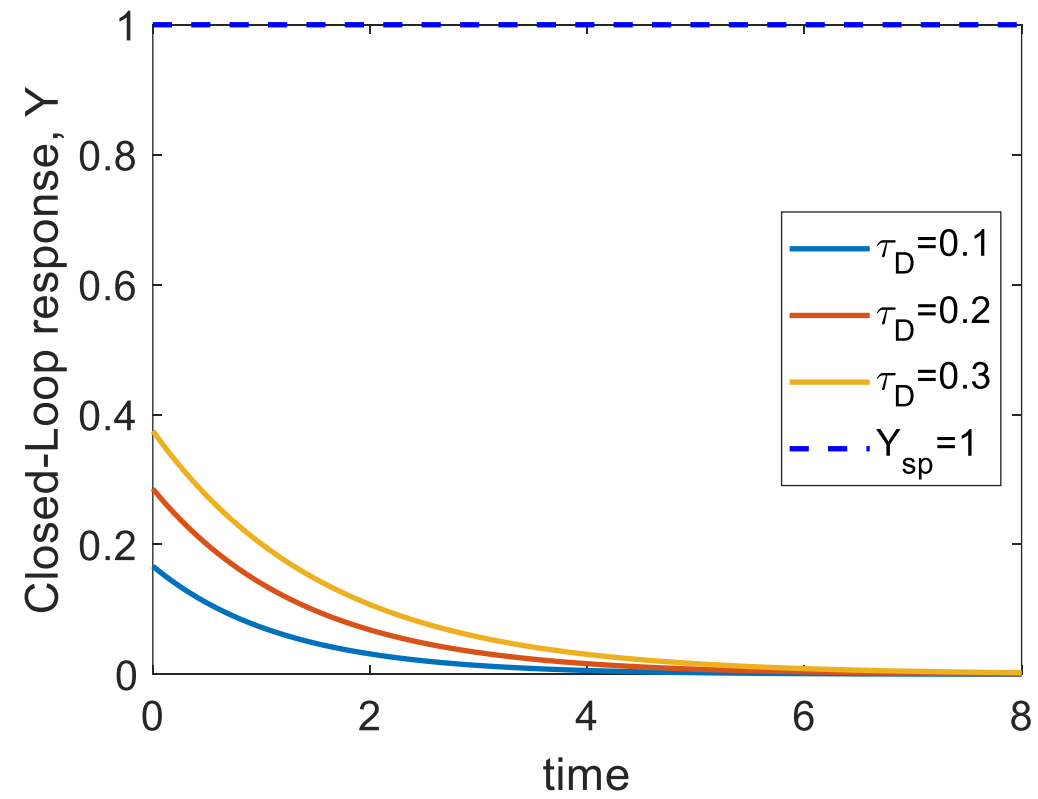
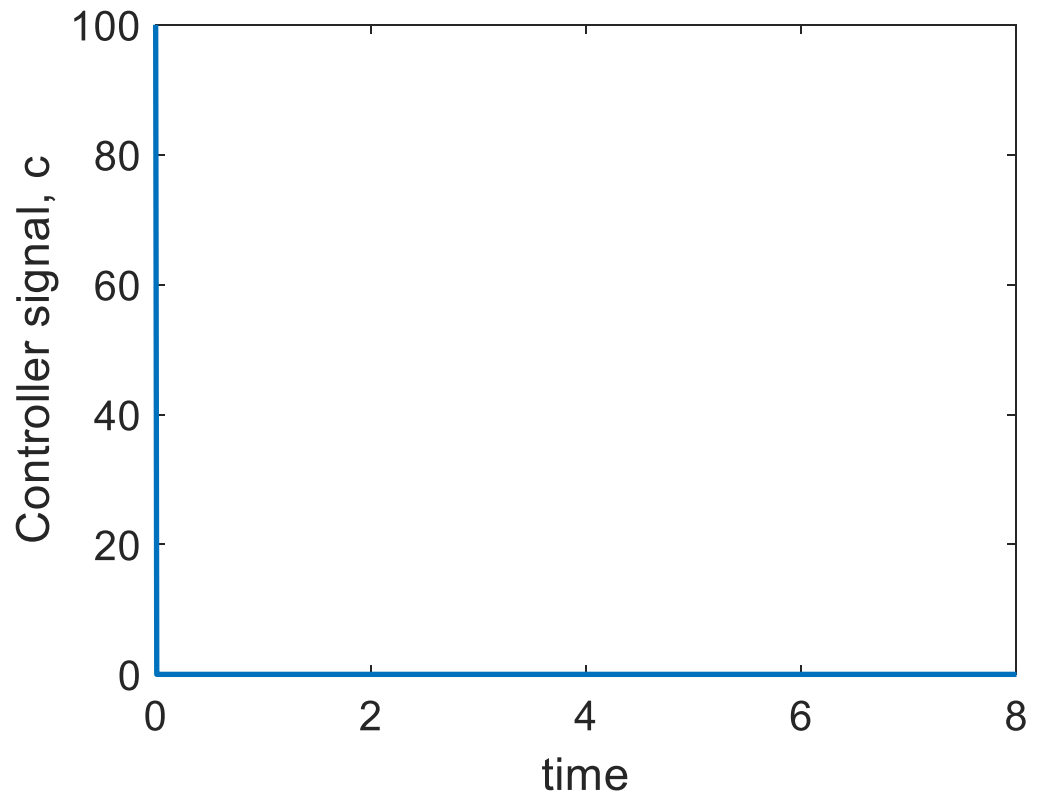
$$c(t) = c_0 + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt}$$

$$G_c = K_c \tau_D s$$

$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{K_c K_p \tau_D s}{(\tau_p + K_c K_p \tau_D) s + 1}$$

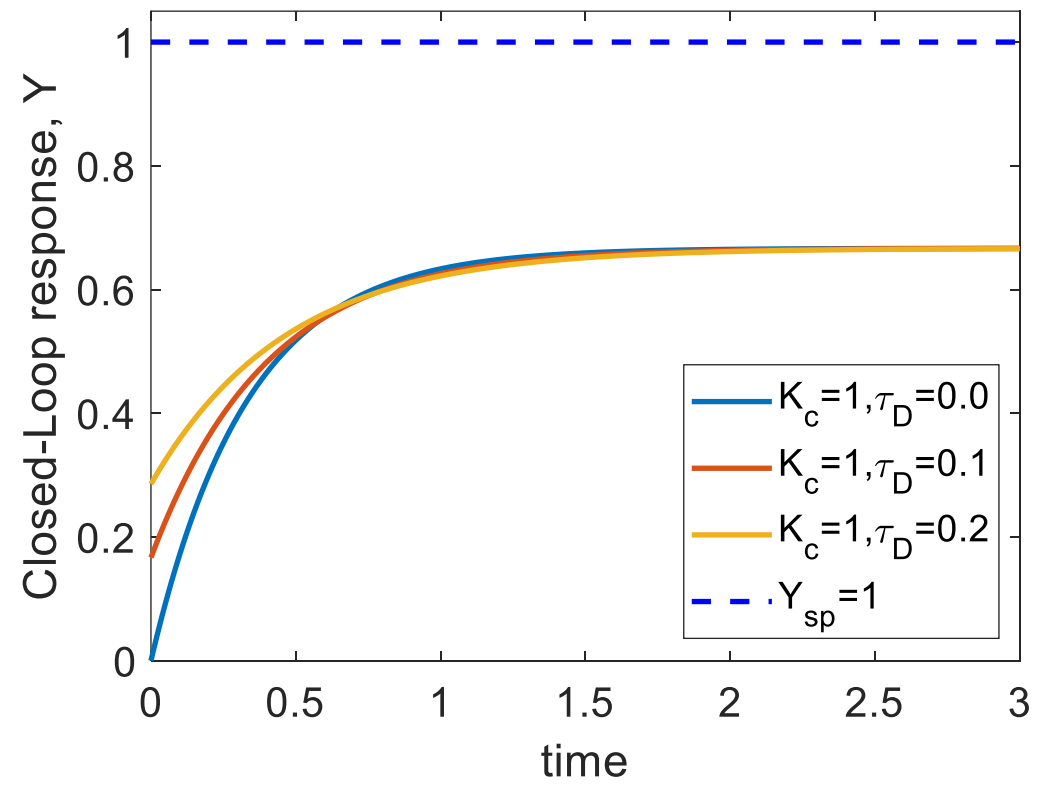
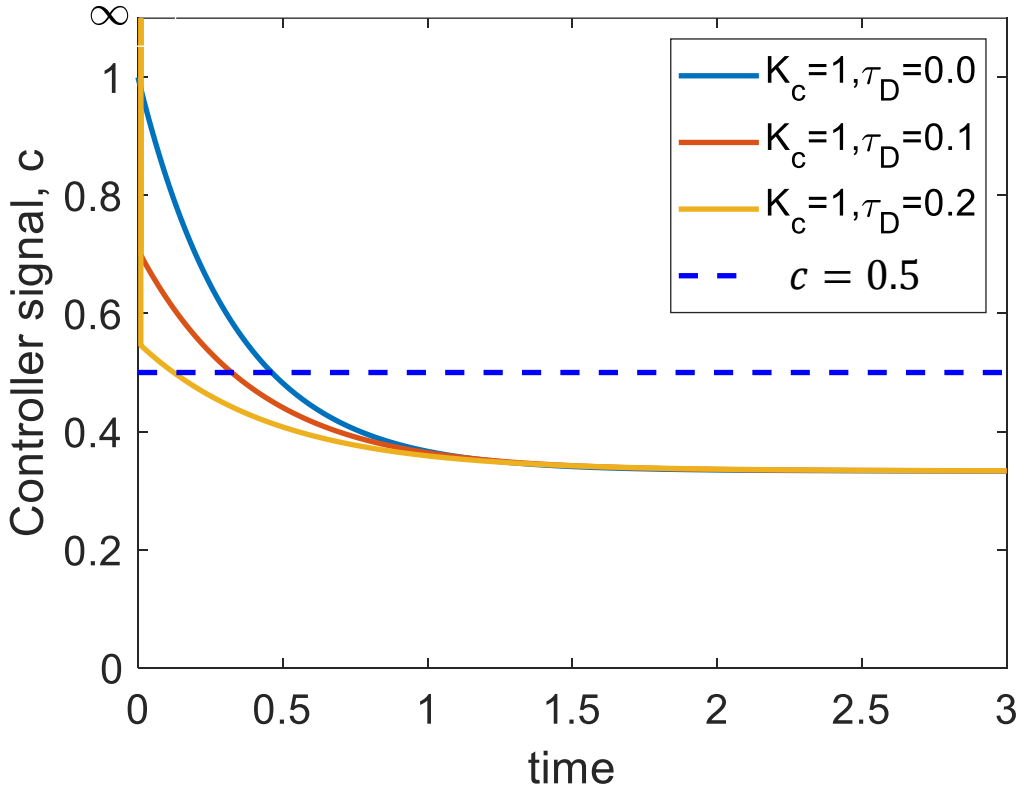
- ΠΣΜ του κλειστού βρόγχου σε διεργασία 1<sup>ης</sup> τάξης
- Παρατηρήσεις του D ρυθμιστή
  - Δεν αλλάζει η τάξη της ΠΣΜ
  - Δεν απαλείφεται η απόκλιση
  - **Μειώνει την ταλάντωση στην απόκριση της διεργασίας κλειστού βρόχου.**
  - **Είναι ευαίσθητος στον θόρυβο!**

# Δράση και απόκριση με D

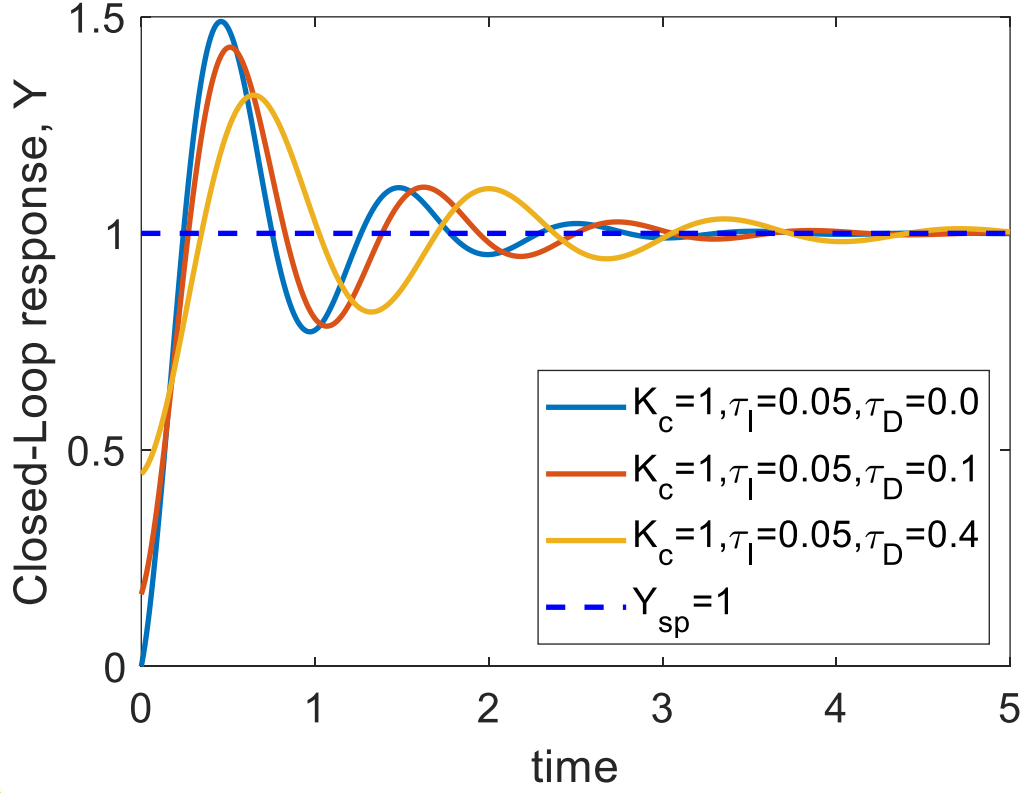
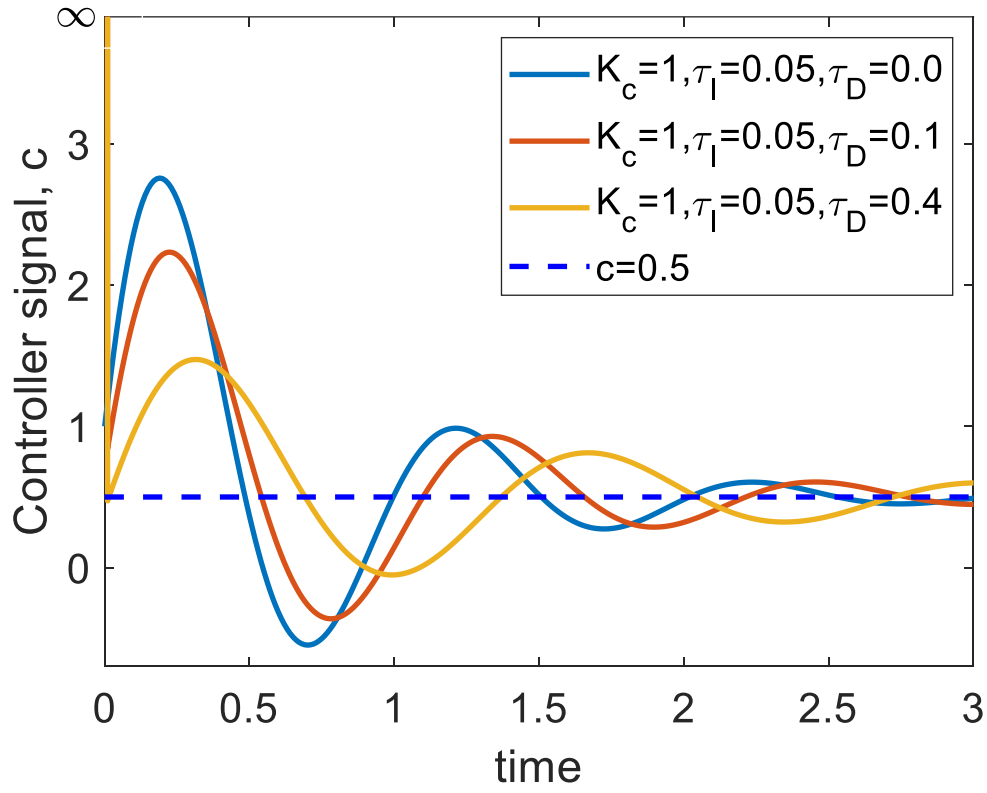




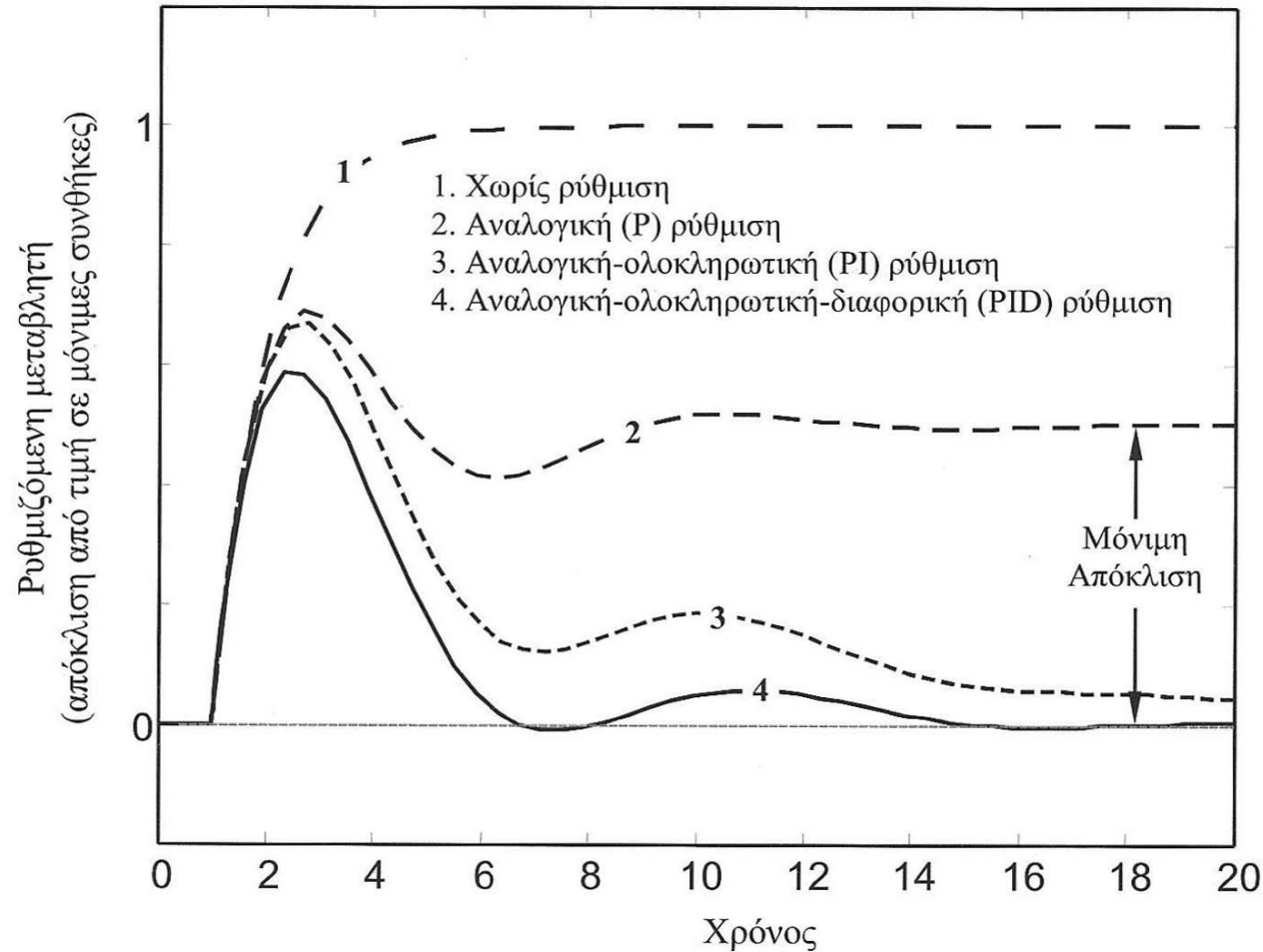
# Δράση και απόκριση με PD



# Δράση και απόκριση με PID



# Απόκριση με P, PI, PID σε διαταραχή



# Μοντέλο Ρυθμιστή PID με φίλτρο



$$c(t) = c_0 + K_c \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de_f}{dt}(t) \right]$$

$$\tau_F \frac{de_f}{dt} = e - e_f$$

$$C(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \frac{\tau_D s}{\tau_F s + 1} \right] E(s) = K_c \frac{\tau_I (\tau_F + \tau_D) s^2 + (\tau_I + \tau_F) s + 1}{\tau_F \tau_I s^2 + \tau_I s} E(s)$$

---

$$c(t) = c_0 + K_c \left[ e_f(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t e_f(t) dt + \tau_D \frac{de_f}{dt}(t) \right]$$

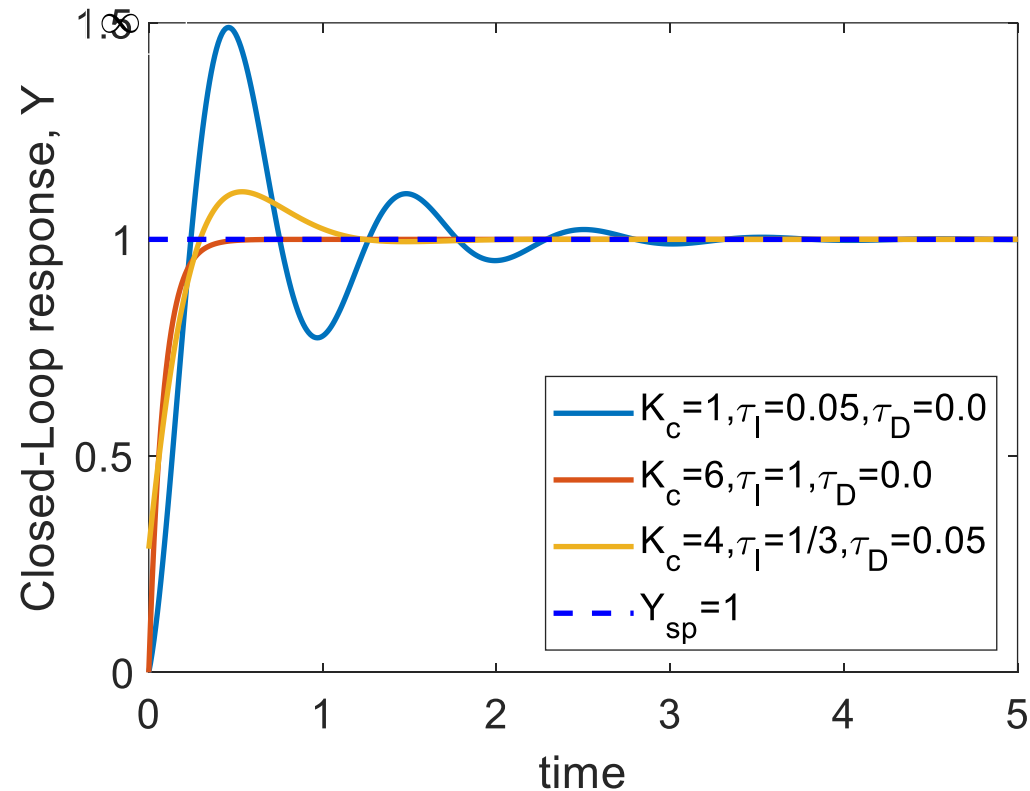
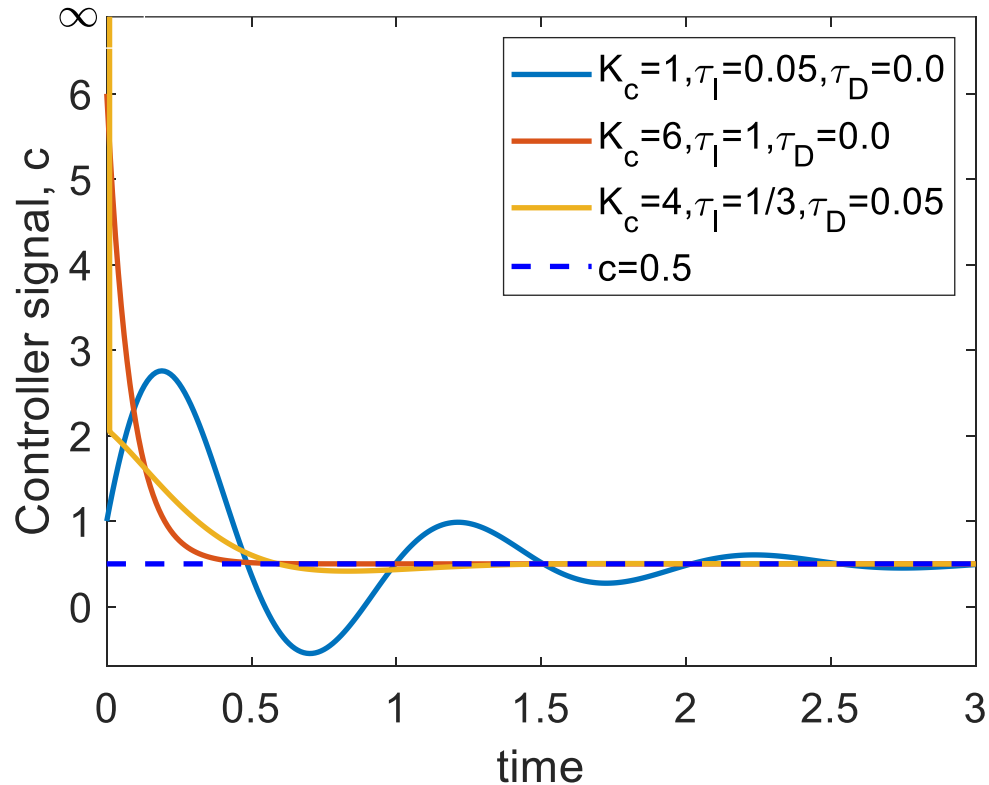
$$\tau_f \frac{de_f}{dt} = e - e_f$$

$$C(s) = \frac{K_c}{\tau_f s + 1} \left[ 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right] E(s) = K_c \frac{\tau_I \tau_D s^2 + \tau_I s + 1}{\tau_f \tau_I s^2 + \tau_I s} E(s)$$

# Δράση και απόκριση με PID.



- Οι παράμετροι του ρυθμιστή έχουν σημαντική μη-γραμμική επίδραση στην απόκριση.



**Πως βρίσκουμε τις τιμές των παραμέτρων του ρυθμιστή; Βαθμονόμηση!**