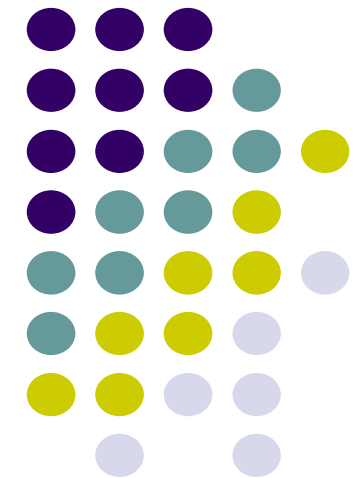


# Δυναμική & Ρύθμιση Διεργασιών

## Διάλεξη 21:

Ρυθμιστές με εσωτερικό μοντέλο

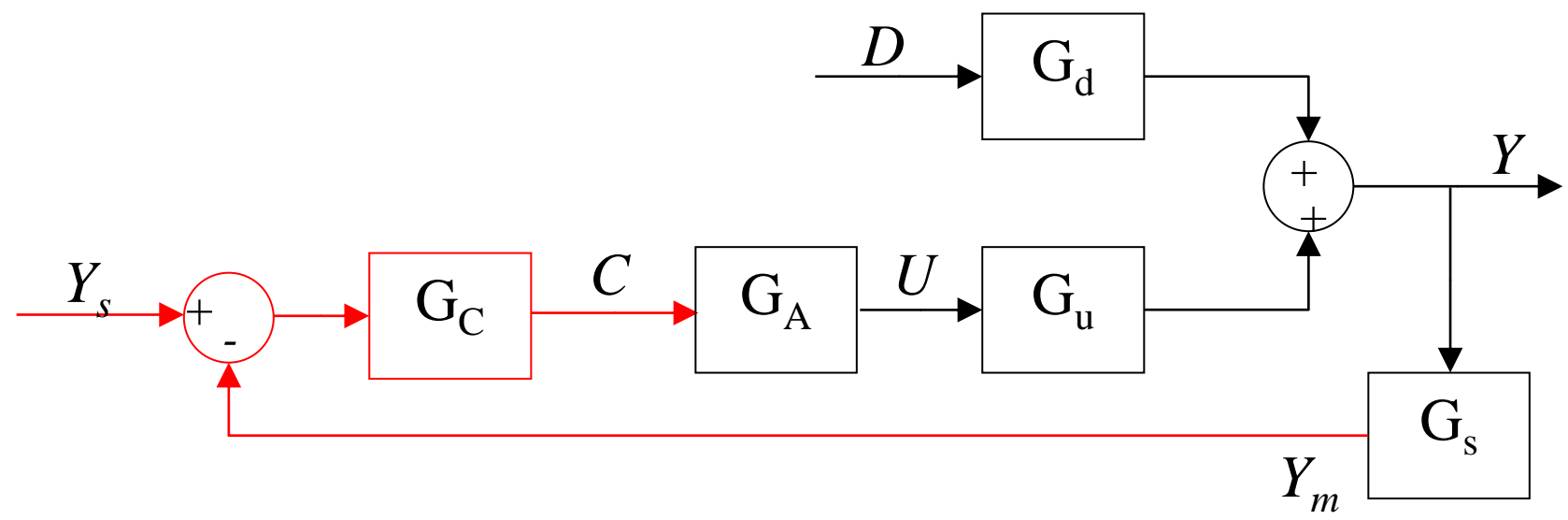
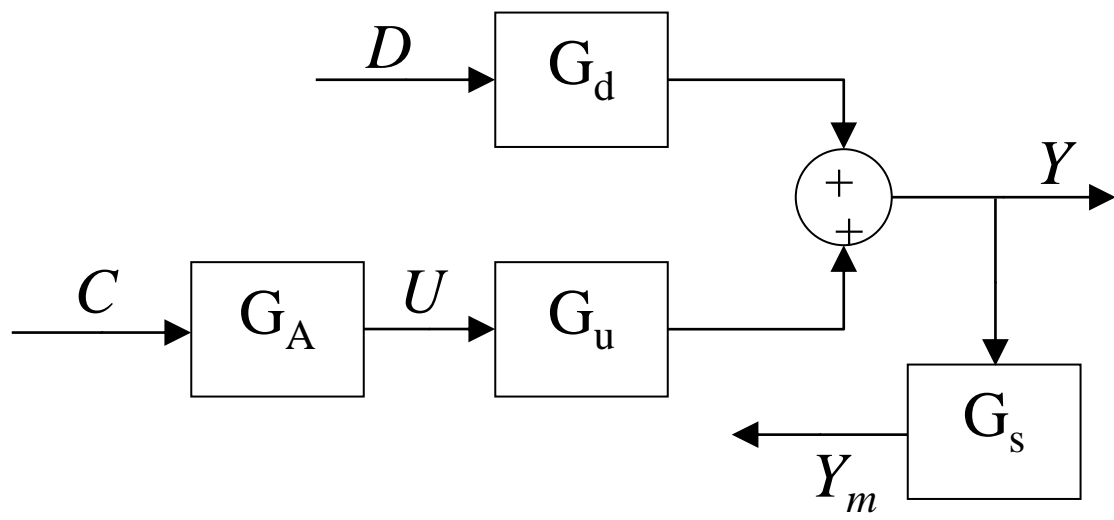


# Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών, μέρος Β

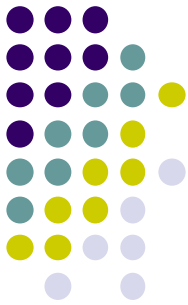


1. Καθορίστε τη διεργασία που εξετάζεται
2. Ανάλυση Διεργασίας
3. **Σύνθεση δομής ελέγχου**
  - a. Διατύπωση της ερώτησης ελέγχου
  - b. Προσθήκη ενεργοποιητών/αισθητήρων στην περιγραφή
  - c. **Κατασκευή των ρυθμιστών**
  - d. **Κατασκευή των παρατηρητών**
  - e. Ανάλυση κλειστού βρόχου
  - f. **Βαθμονόμηση 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

# Διάγραμμα βαθμίδων με ανάδραση



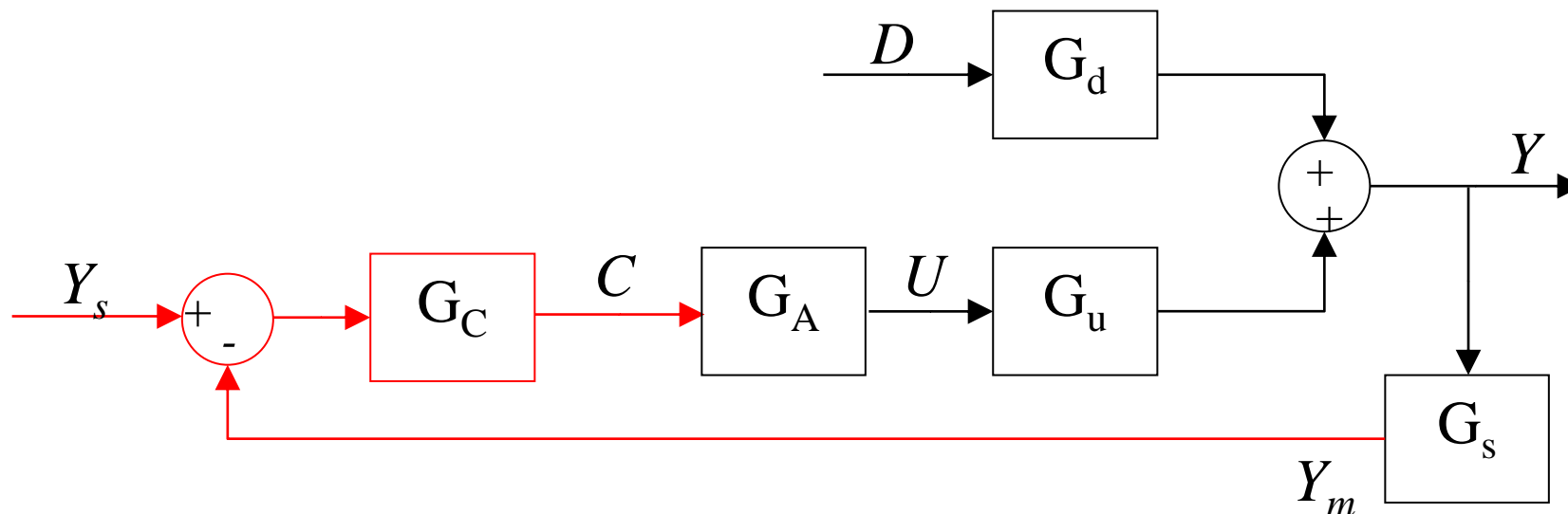
# Διάγραμμα βαθμίδων με ανάδραση



- Βασικά χαρακτηριστικά
  - Ένας βρόχος ρύθμισης
    - Ένας ρυθμιστής
    - Ένας αισθητήρας
  - Ένα σημείο ρύθμισης

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

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



# Ρύθμιση συστοιχίας και πρόδρασης



- Κάθε μία από τις τεχνικές προτείνει πλεονεκτήματα για το πρόβλημα φορτίου:
  - Η συστοιχία μειώνει την επίδραση συγκεκριμένων διαταραχών.
    - Αργές διεργασίες
  - Η πρόδραση είναι μια γενική μεθοδολογία για την αντιστάθμιση μετρούμενων διαταραχών.
- **Απαιτούν περισσότερο εξοπλισμό από ένα σύστημα ανάδρασης.**

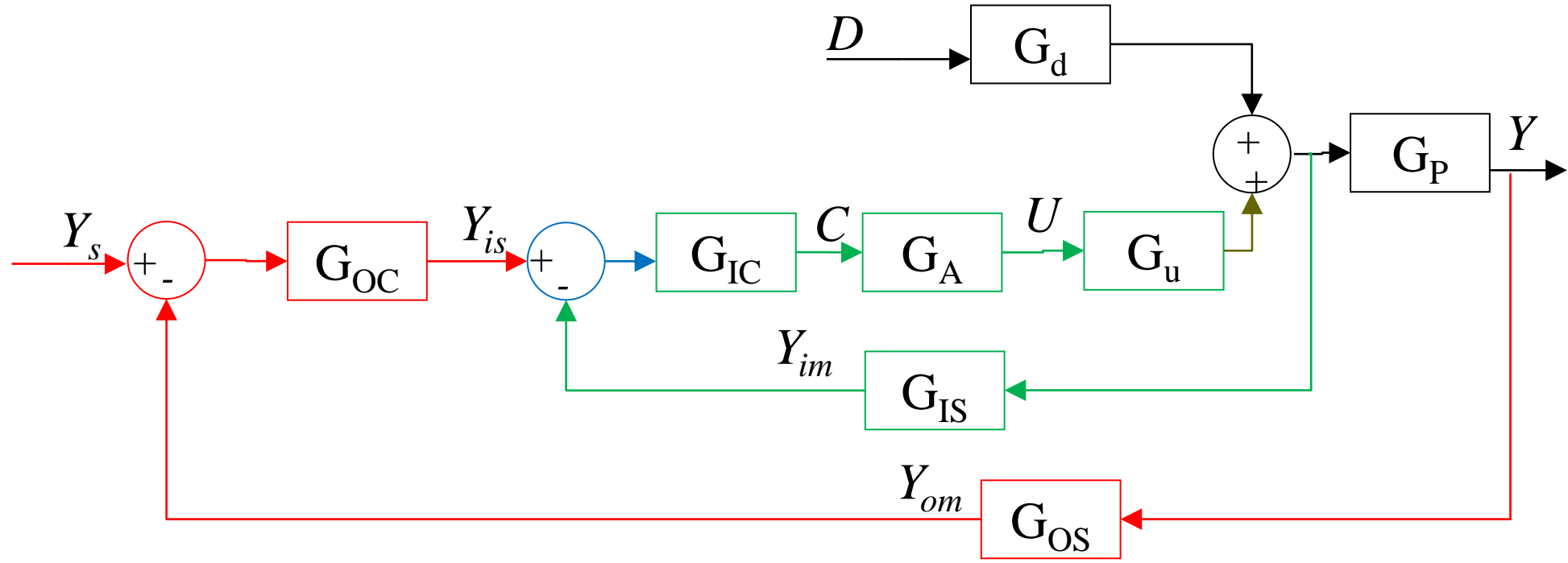
# Διάγραμμα βαθμίδων: ρύθμιση συστοιχίας



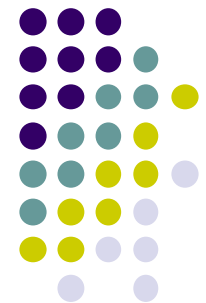
- Δύο βρόχοι
  - Ο δευτερεύον βρόχος συνδέεται με την βάνα
    - Έξτρα ρυθμιστής
    - Έξτρα αισθητήρας ρυθμού ροής
    - Στόχος ρύθμισης η ροή στην έξοδο
  - Ο πρωτεύον βρόχος συνδέεται με τον δευτερεύον
    - Βασικός ρυθμιστής δίνει το σημείο ρύθμισης

$$G_{ILS} = \frac{G_u G_A G_{IC}}{1 + G_u G_A G_{IC} G_{IS}}, G_{ILD} = \frac{G_d}{1 + G_u G_A G_{IC} G_{IS}}$$

$$Y = \frac{G_P G_{ILD}}{1 + G_P G_{ILS} G_{OC} G_{OS}} D + \frac{G_P G_{ILS} G_{OC}}{1 + G_P G_{ILS} G_{OC} G_{OS}} Y_s$$



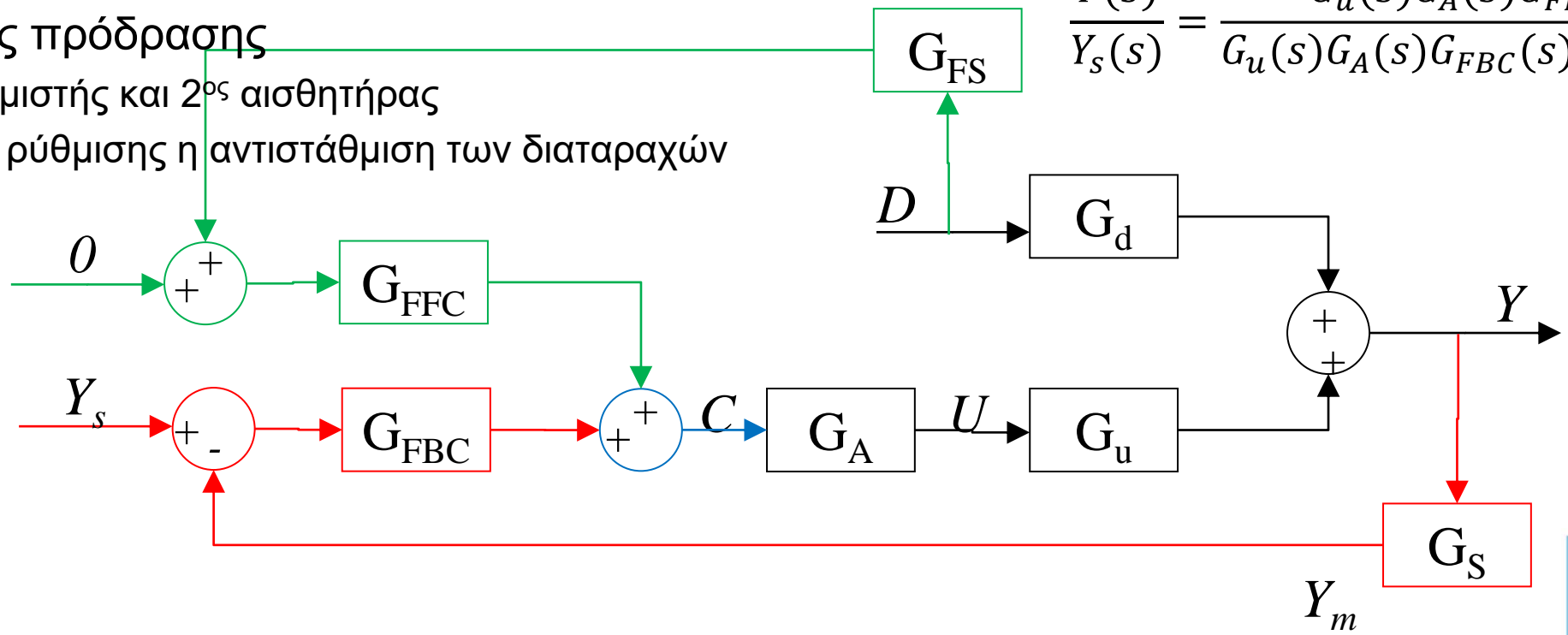
# Διάγραμμα βαθμίδων: πρόδραση/ανάδραση



- Δύο βρόχοι
  - Και οι δύο βρόχοι συνδέονται με τον ενεργοποιητή
  - Είναι ανεξάρτητοι βρόχοι
  - Ο βρόχος ανάδρασης
    - Βασικός Ρυθμιστής και αισθητήρας
    - Στόχος ρύθμισης κυρίως η παρακολούθηση σημείου
  - Ο βρόχος πρόδρασης
    - 2<sup>ος</sup> ρυθμιστής και 2<sup>ος</sup> αισθητήρας
    - Στόχος ρύθμισης η αντιστάθμιση των διαταραχών

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = - \frac{G_d(s) + G_u G_A G_{FFC} G_{FS}}{G_u(s) G_a(s) G_{FBC}(s) G_S(s) + 1}$$

$$\frac{Y(s)}{Y_s(s)} = \frac{G_u(s) G_A(s) G_{FBC}(s)}{G_u(s) G_A(s) G_{FBC}(s) G_S(s) + 1}$$





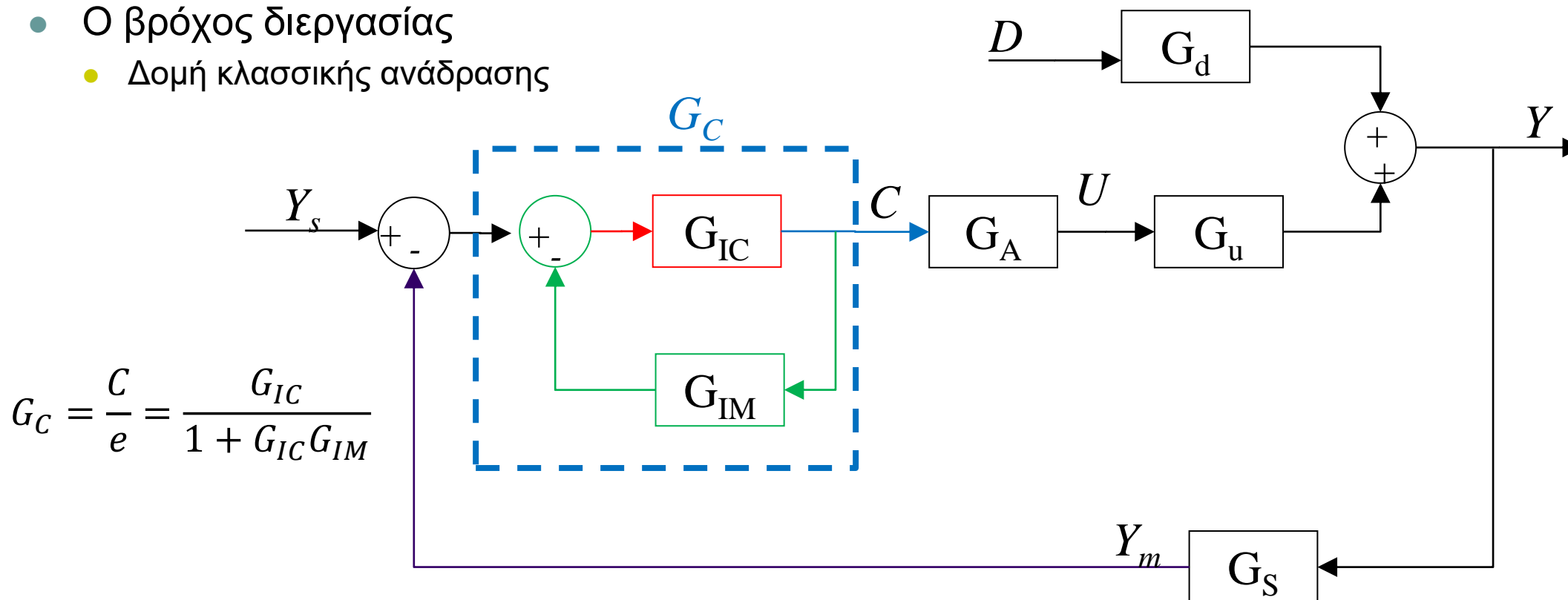
# Διάγραμμα βαθμίδων: Εσωτερικό μοντέλο

- Δύο βρόχοι

- Ο βρόχος μοντέλου/ρυθμιστή
  - Βασικός Ρυθμιστής
  - Μοντέλο της διεργασίας
  - Στόχος βρόχου η αντιμετώπιση ιδιοτεροτήτων της διεργασίας
- Ο βρόχος διεργασίας
  - Δομή κλασσικής ανάδρασης

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

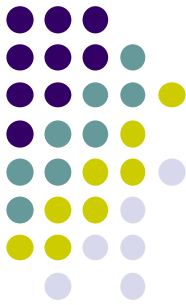
$$\frac{Y(s)}{Y_s(s)} = \frac{G_u(s)G_a(s)G_c(s)}{G_u(s)G_a(s)G_c(s)G_s(s) + 1}$$



$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

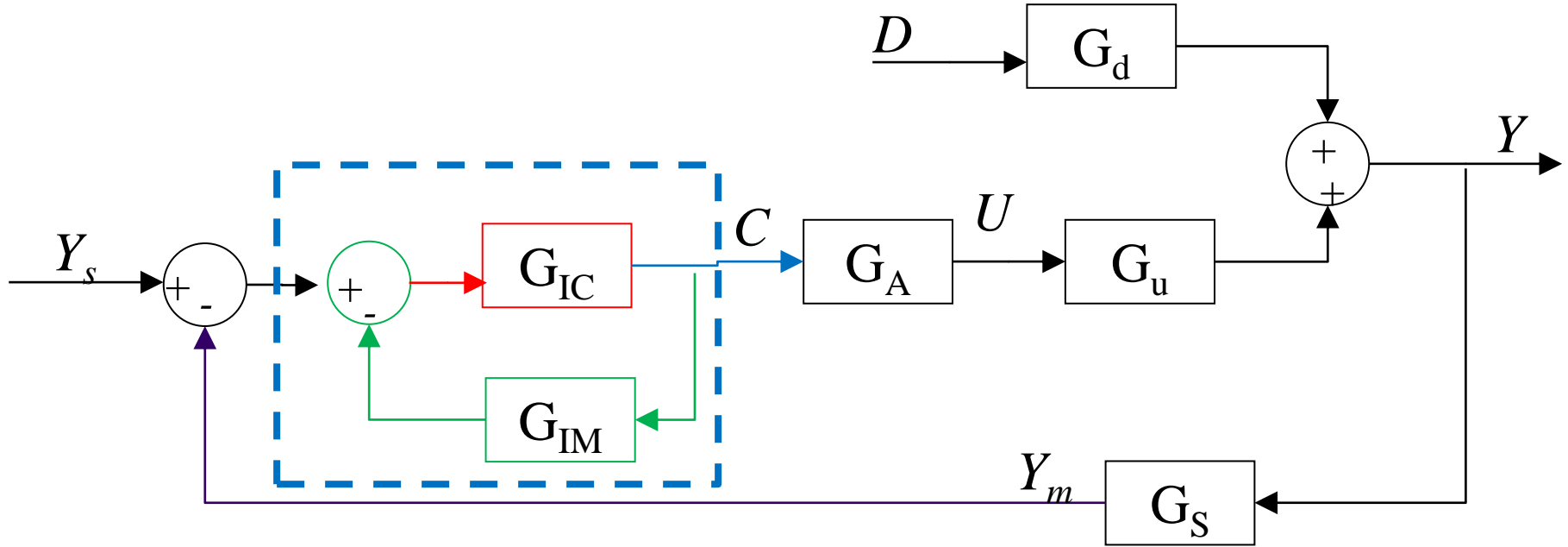
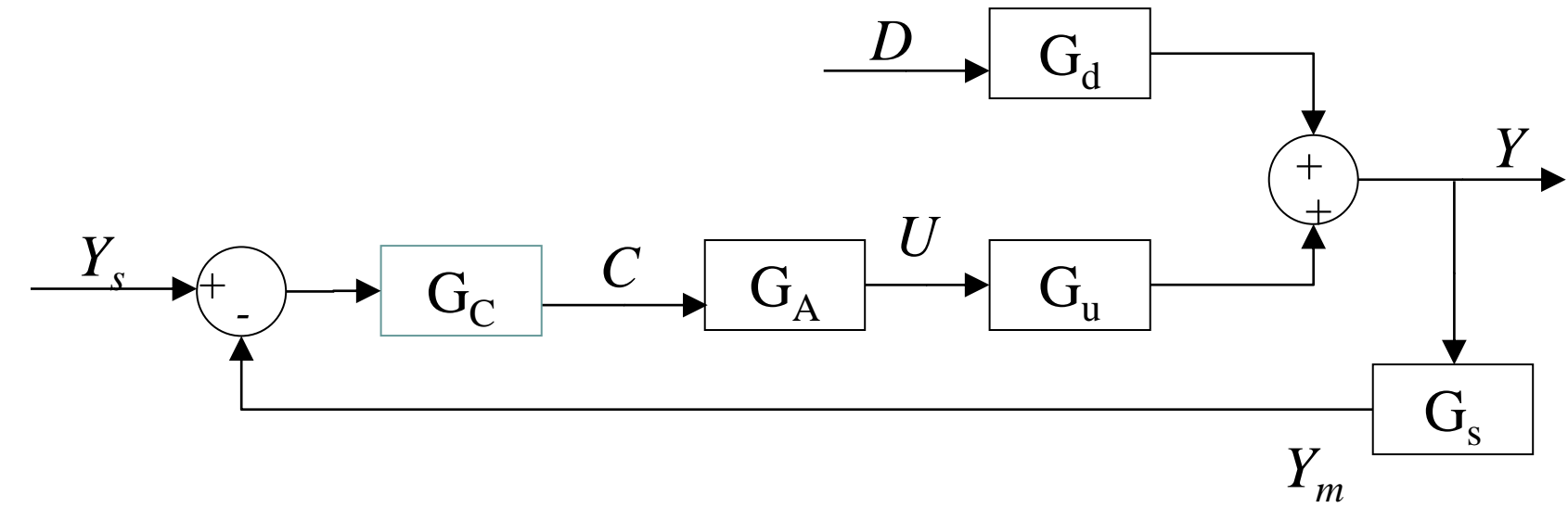


# Ρύθμιση εσωτερικού μοντέλου

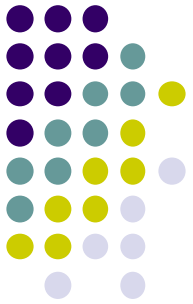


- Συγκέντρωση στο πρόβλημα παρακολούθησης σημείου.
- Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά τα **χαρακτηριστικά διεργασίας**:
  - Καθυστέρηση στη συμπεριφορά της διεργασίας
  - Αντίστροφη απόκριση στη συμπεριφορά διεργασίας
  - «βέλτιστος» σχεδιασμός χωρίς βαθμονόμηση παραμέτρων
- **Απαιτούν μοντελοποίηση σε σχέση με τον απλό βρόχο ανάδρασης**
  - Πολλαπλοί «εσωτερικοί» βρόχοι ελέγχου (Δύο σε αυτές τις διαλέξεις)
  - Το μοντέλο "διορθώνει" τη μέτρηση με βάση τη γνώση της συμπεριφοράς της διεργασίας και του εξοπλισμού

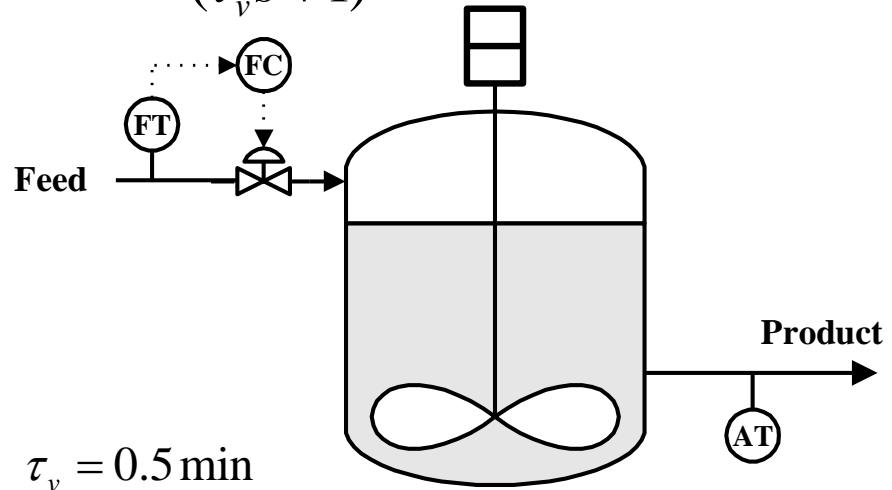
# Διάγραμμα βαθμίδων: Εσωτερικό μοντέλο



# Παράδειγμα διεργασίας: Αντιδραστήρας



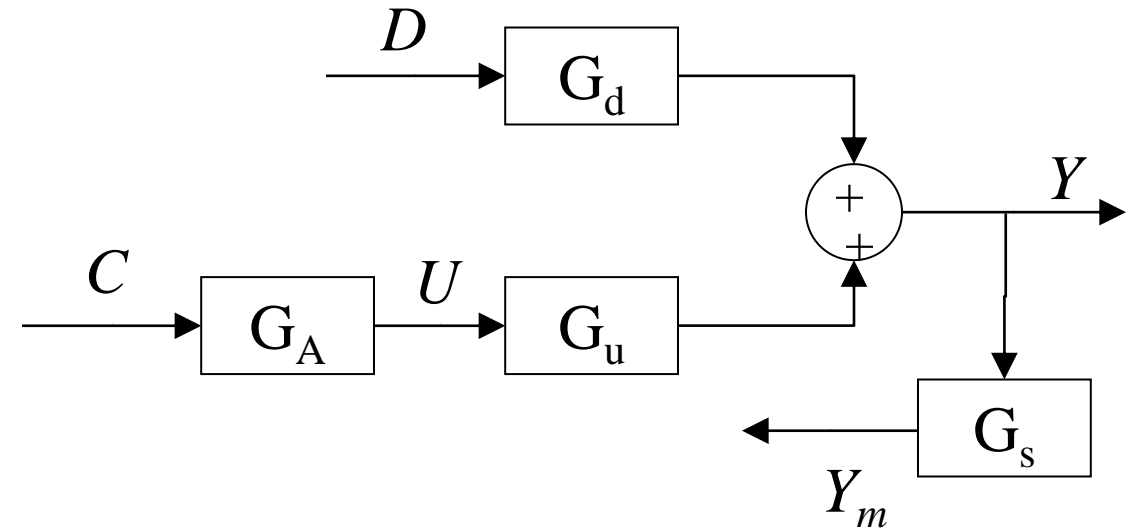
$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$



$$\tau_v = 0.5 \text{ min}$$

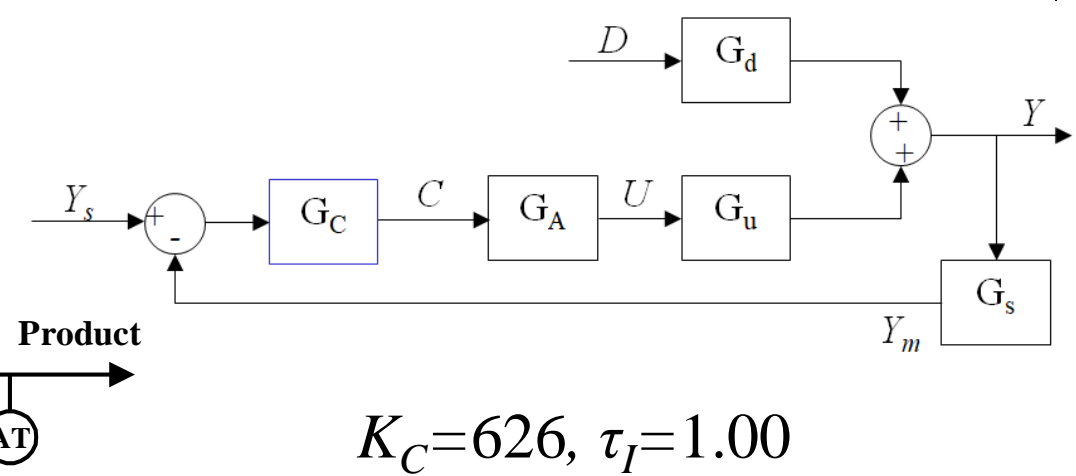
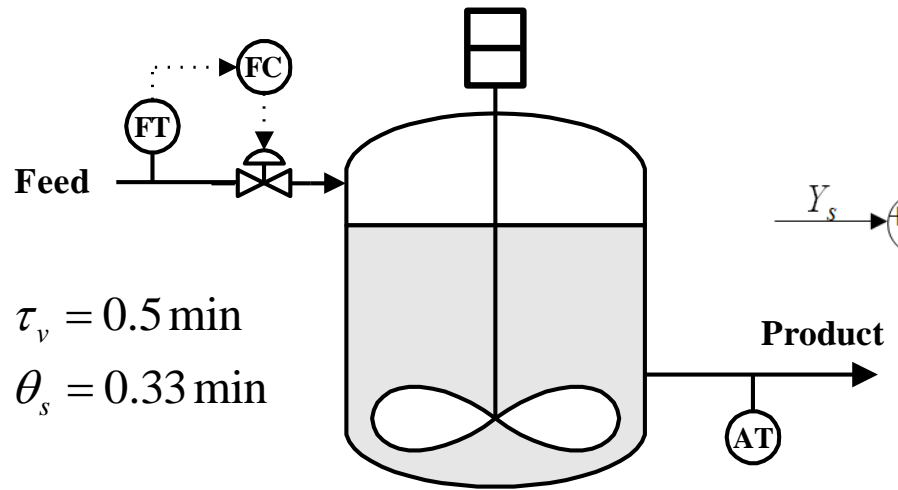
$$\theta_s = 0.33 \text{ min}$$

$$Y_m(s) = e^{-\theta_s s} Y(s)$$

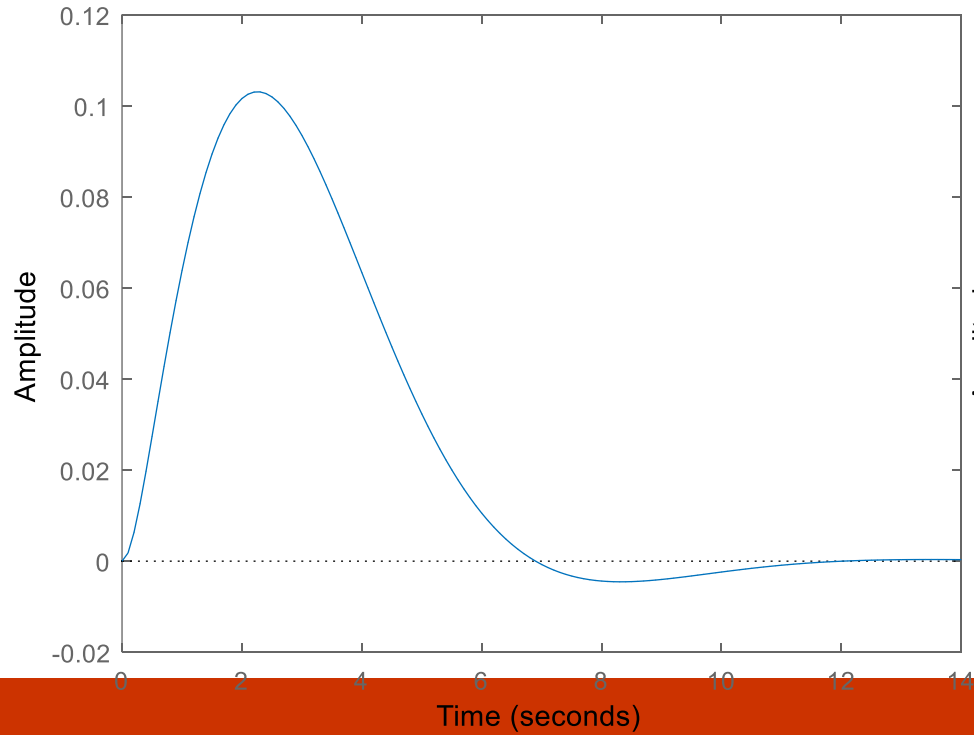


$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

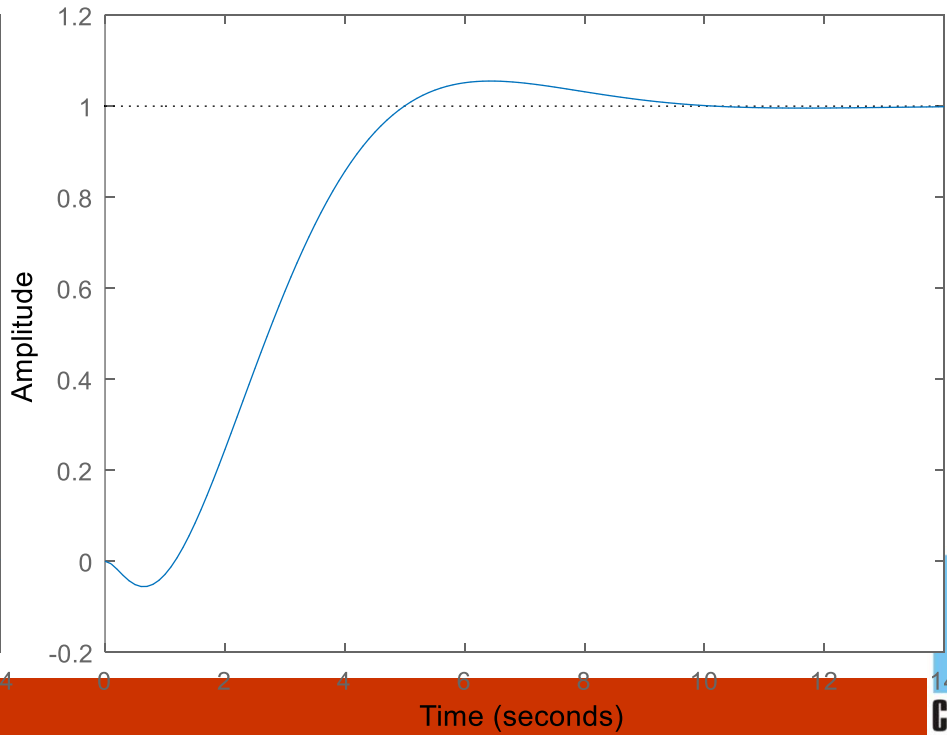
# Παράδειγμα: Αντιδραστήρας με PID



Step Response



Step Response

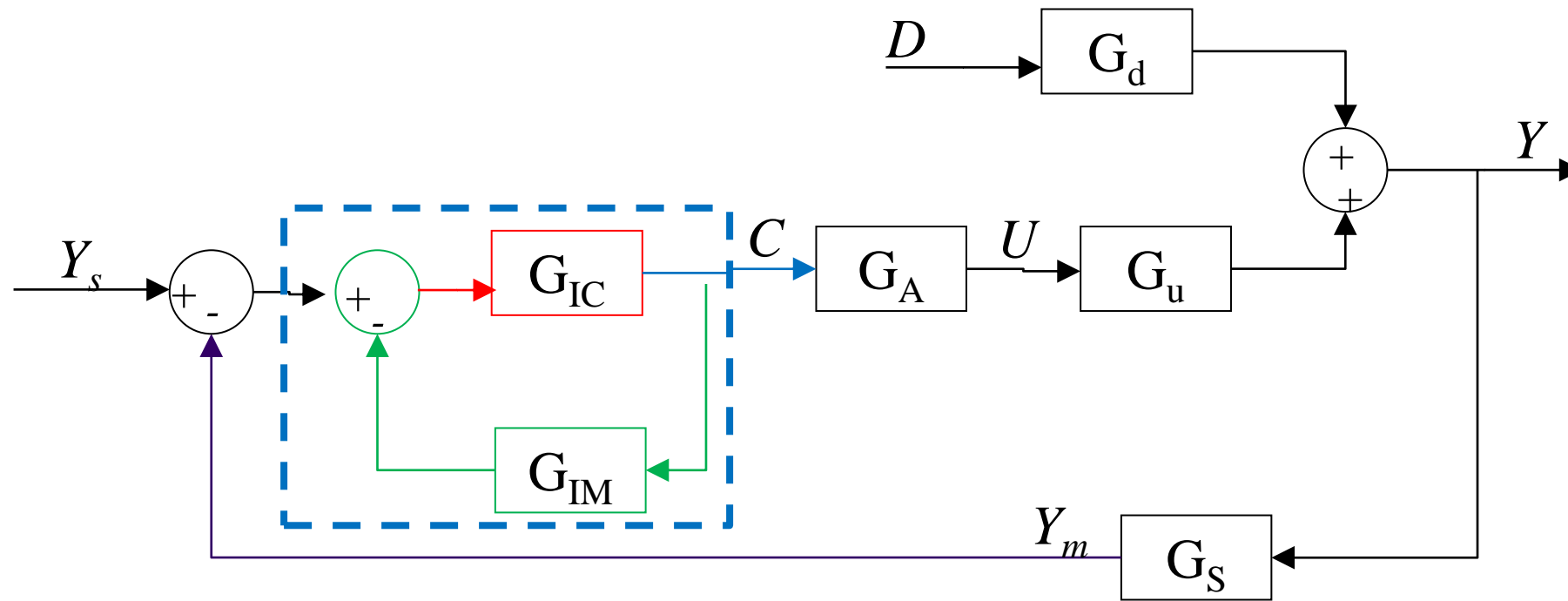
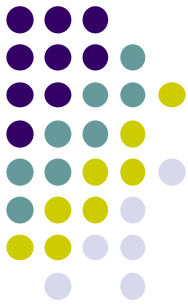


# Internal Model: Smith Predictor



- **Smith Predictor (aka delayed response compensator)** προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά τα **χαρακτηριστικά διεργασίας**:
  - **Καθυστέρηση στη συμπεριφορά της διεργασίας**
  - Αντίστροφη απόκριση στη συμπεριφορά διεργασίας
  - «βέλτιστος» σχεδιασμός χωρίς βαθμονόμηση παραμέτρων
  - **Απαιτεί καλή γνώση των**
    - Του όρου της καθυστέρησης
    - Δυναμική της διεργασίας
    - Δυναμική των αισθητήρων και ενεργοποιητών
  - Έχει έναν "εσωτερικό" βρόχο ελέγχου που περιέχει τη **διόρθωση** του μοντέλου

# Διάγραμμα βαθμίδων: Smith Predictor



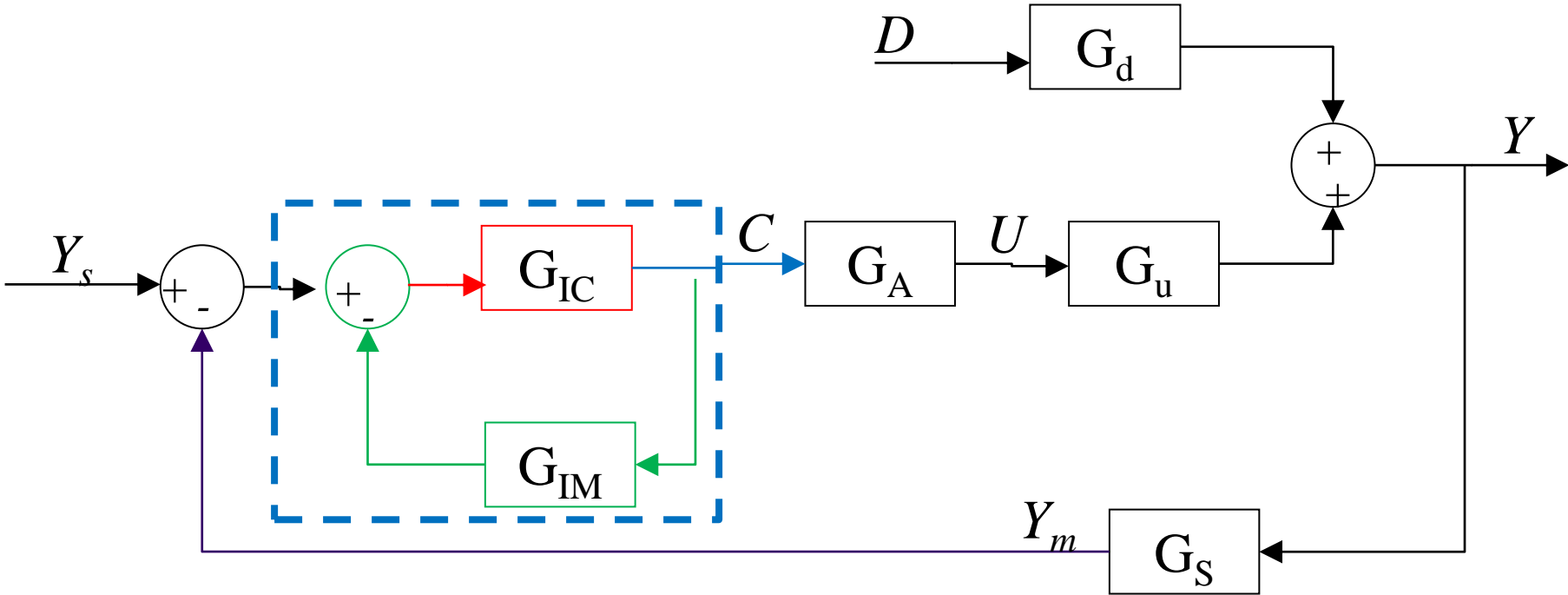
$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

$G_{IC}$  = PID ή παρόμοιο

$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_S = G_0 - G_p$$

- Στόχος του εσωτερικού μοντέλου
  - να «διορθώσει» την καθυστέρηση της διεργασίας
    - Το μοντέλο δίνει τι πρέπει να αντισταθμίσει ο ρυθμιστής
- Τι κάνει ο βρόχος;
  - «Ανοίγει» όταν το μοντέλο είναι τέλειο
  - «διορθώνει» και τις αποκλίσεις μοντέλου/διεργασίας

# Διάγραμμα βαθμίδων: Smith Predictor



$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

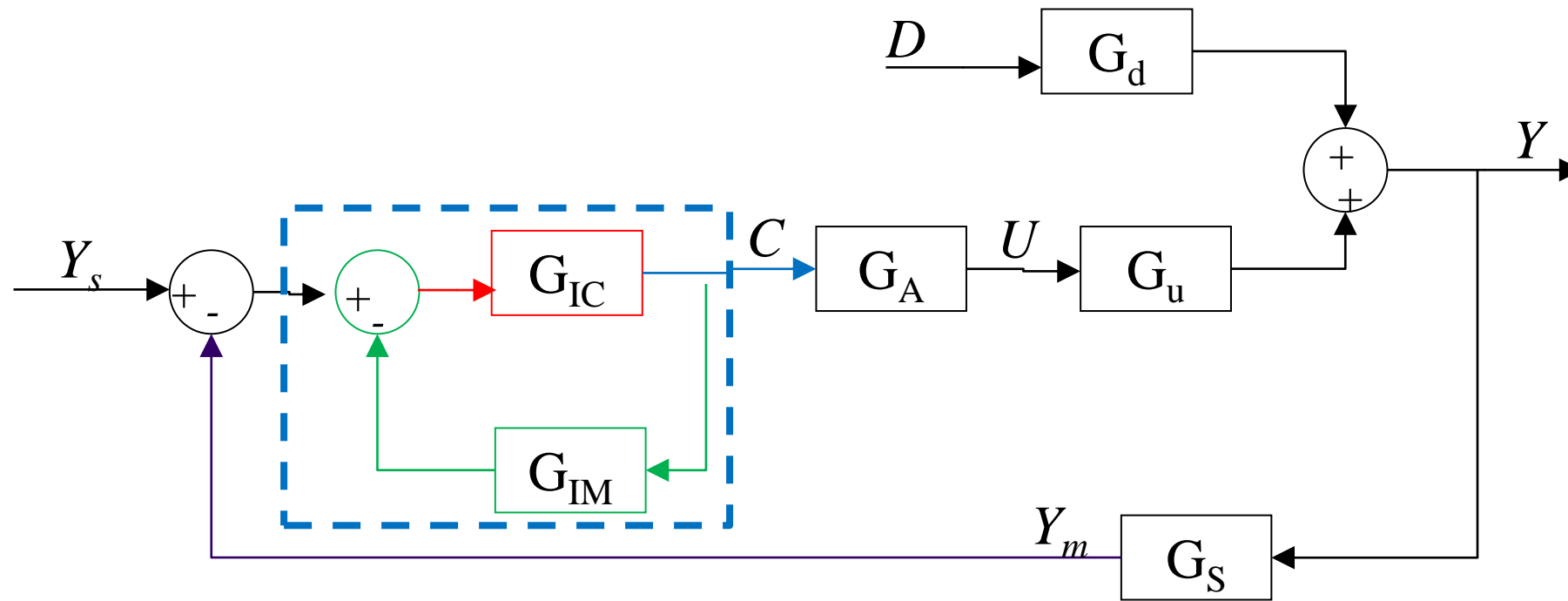
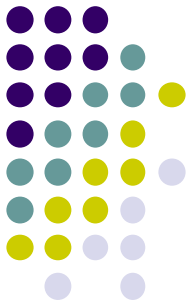
$$Y = G_u G_A G_C (Y_s - G_S Y) \Rightarrow (1 + G_{IC} G_{IM}) Y = G_u G_A G_{IC} Y_s - G_p G_{IC} Y \Rightarrow Y + G_{IC} G_0 Y - G_{IC} G_p Y = G_A G_u G_{IC} Y_s - G_p G_{IC} Y \Rightarrow$$

$G_{IC}$  = PID ή παρόμοιο

$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_S = G_0 - G_p$$

$$Y = \frac{G_A G_u G_{IC}}{1 + G_{IC} G_0} Y_s$$

# Διάγραμμα βαθμίδων: Smith Predictor



$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

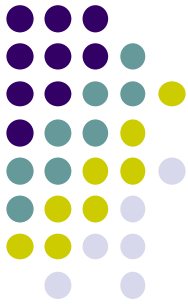
$G_{IC}$  = PID ή παρόμοιο

$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_S = G_0 - G_p$$

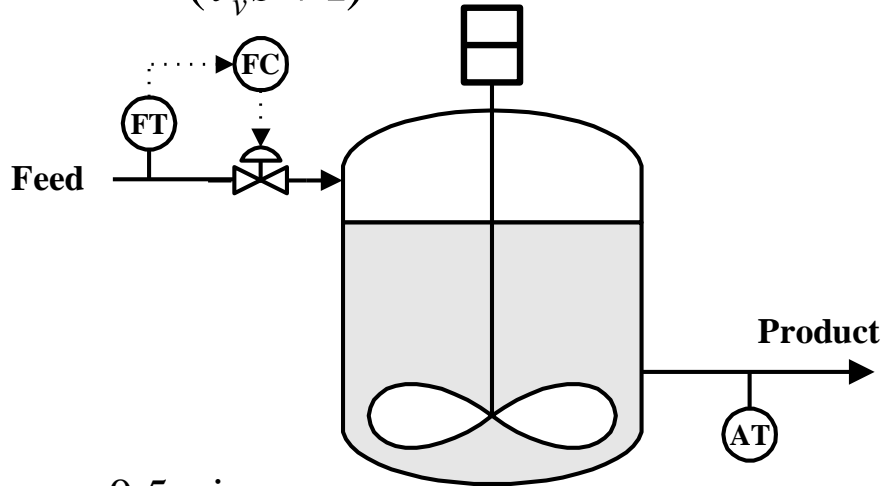
- Κατασκευή του εσωτερικού μοντέλου
  - Εμπεριέχει το μοντέλο της διεργασίας και το στόχο
    - Ο στόχος  $G_0$  είναι η διεργασία «χωρίς» καθυστέρηση
- Βαθμονόμηση του εσωτερικού ρυθμιστή
  - Γίνεται με βάση το  $G_0$  που βρίσκουμε
  - Χαρακτηριστική εξίσωση:  $1 + G_{IC}G_0 = 0$



# Παράδειγμα διεργασίας με DRC



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



$$\tau_v = 0.5 \text{ min}$$

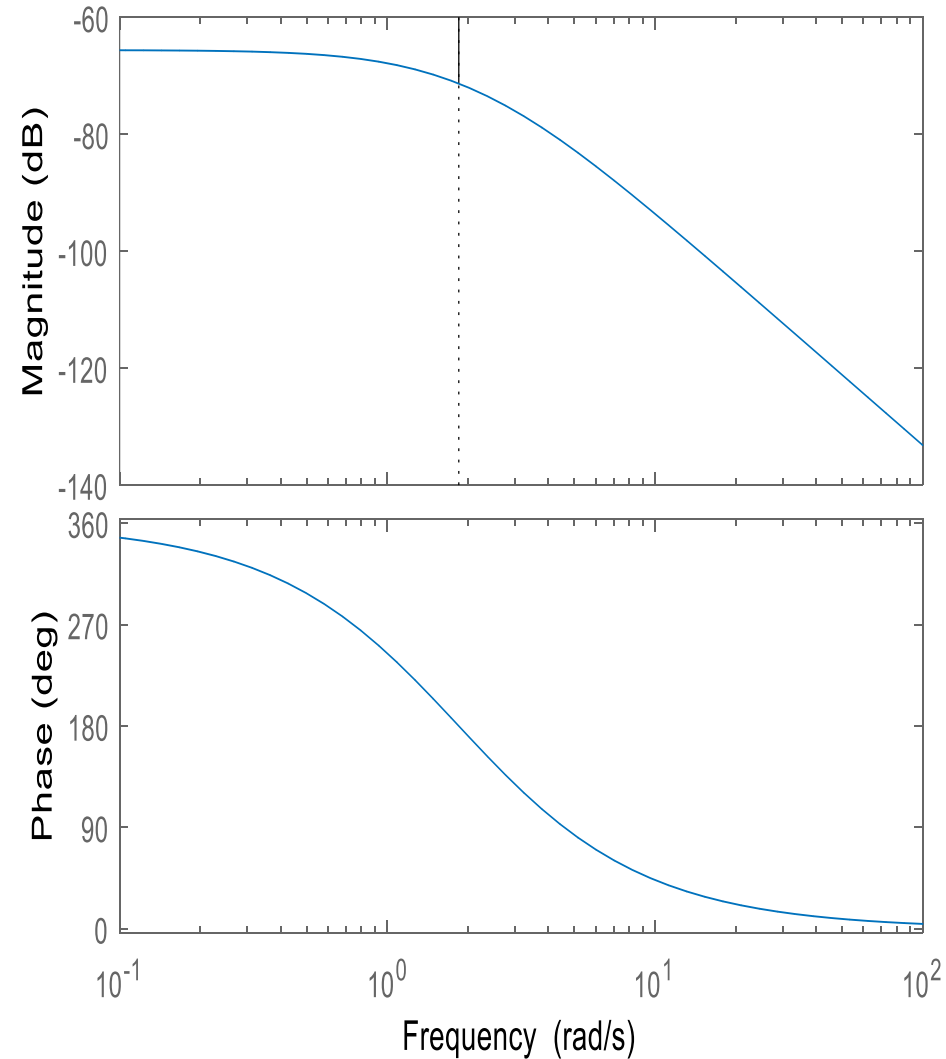
$$\theta_s = 0.33 \text{ min}$$

$$Y_m(s) = e^{-\theta_s s} Y(s)$$

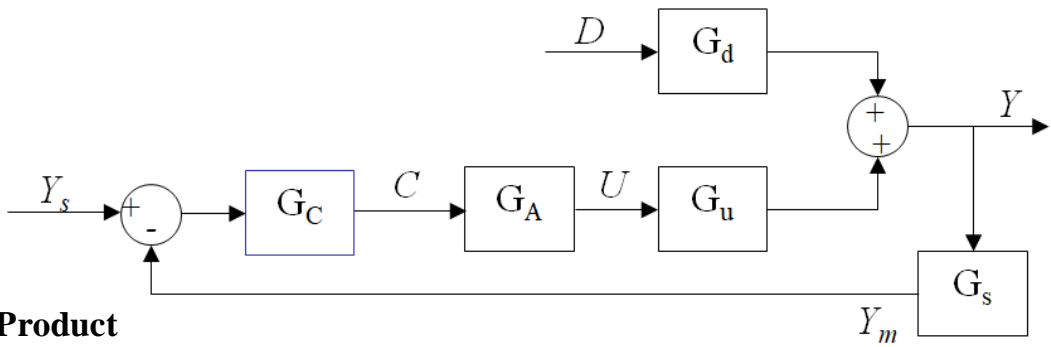
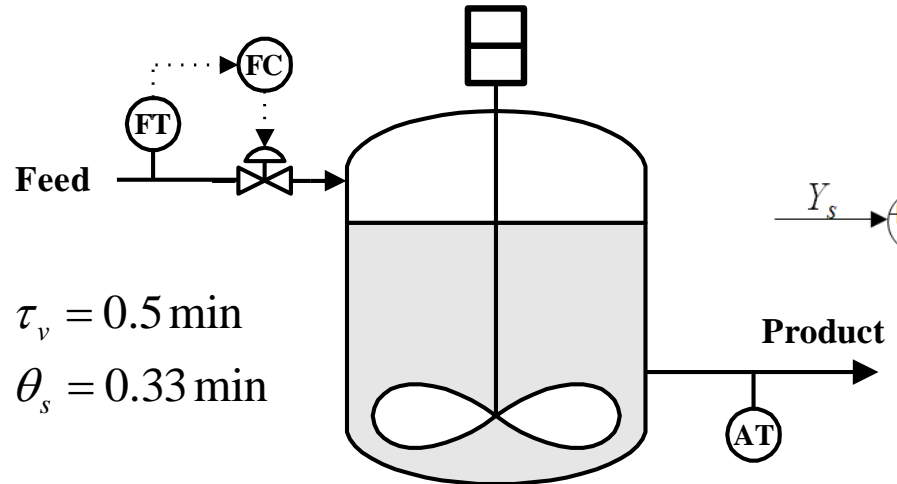
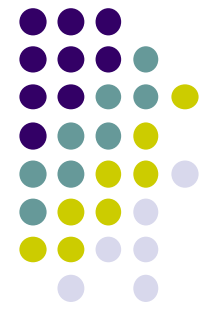
$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

Bode Diagram

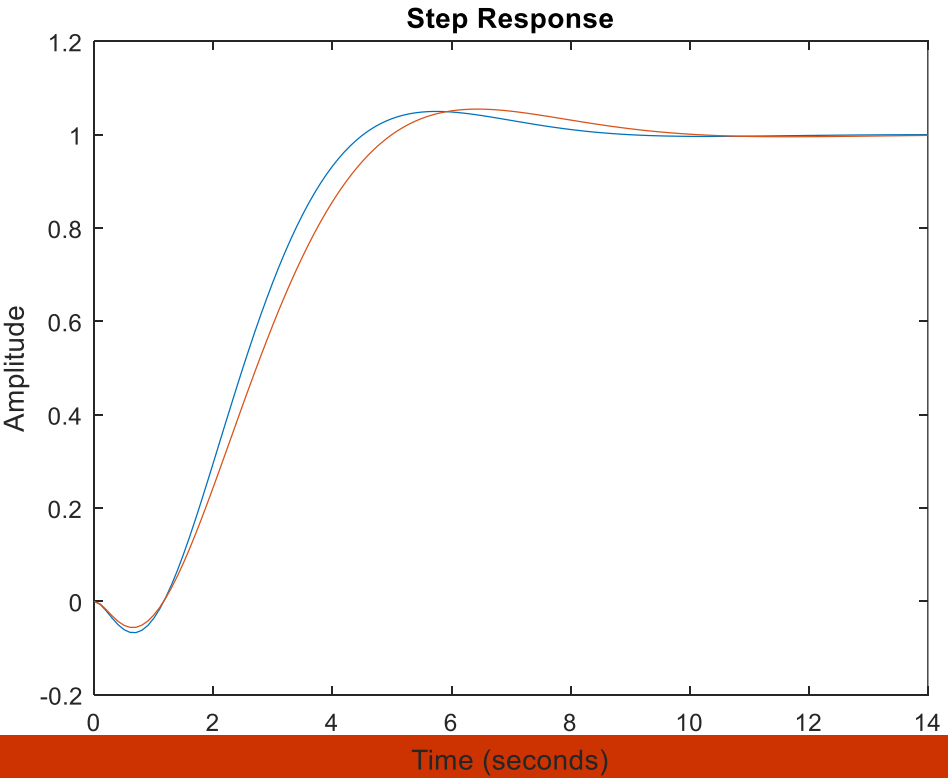
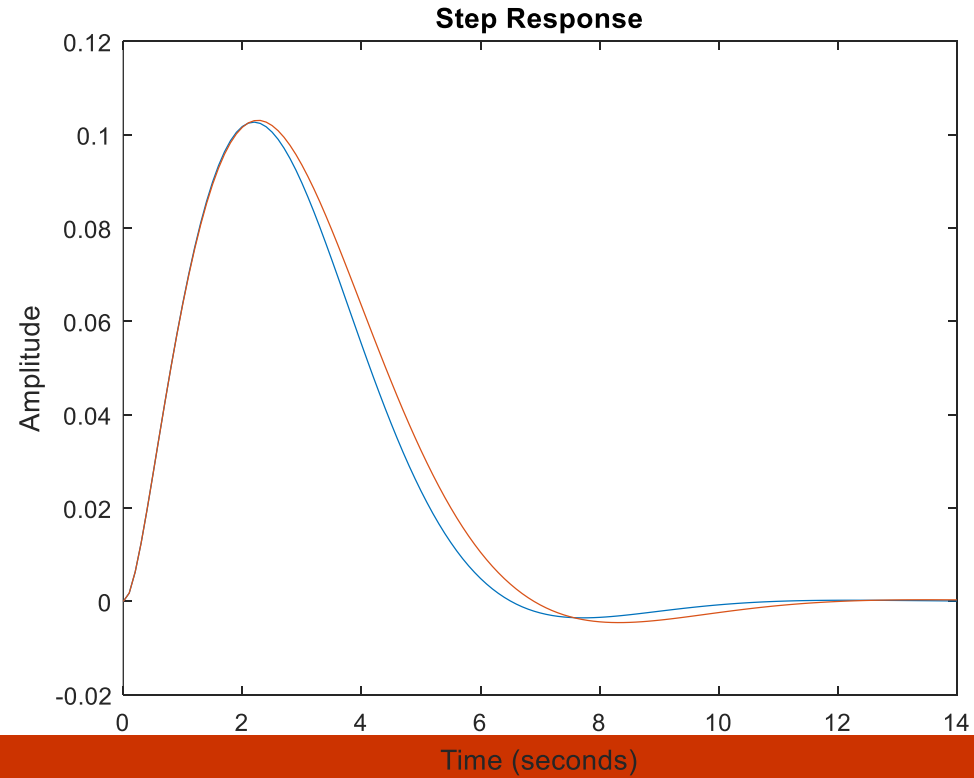
Gm = 71.3 dB (at 1.85 rad/s), Pm = Inf



# Παράδειγμα: Αντιδραστήρας με DRC



$K_C=711, \tau_I=0.94$



# Internal Model: Inverse Response Compensator

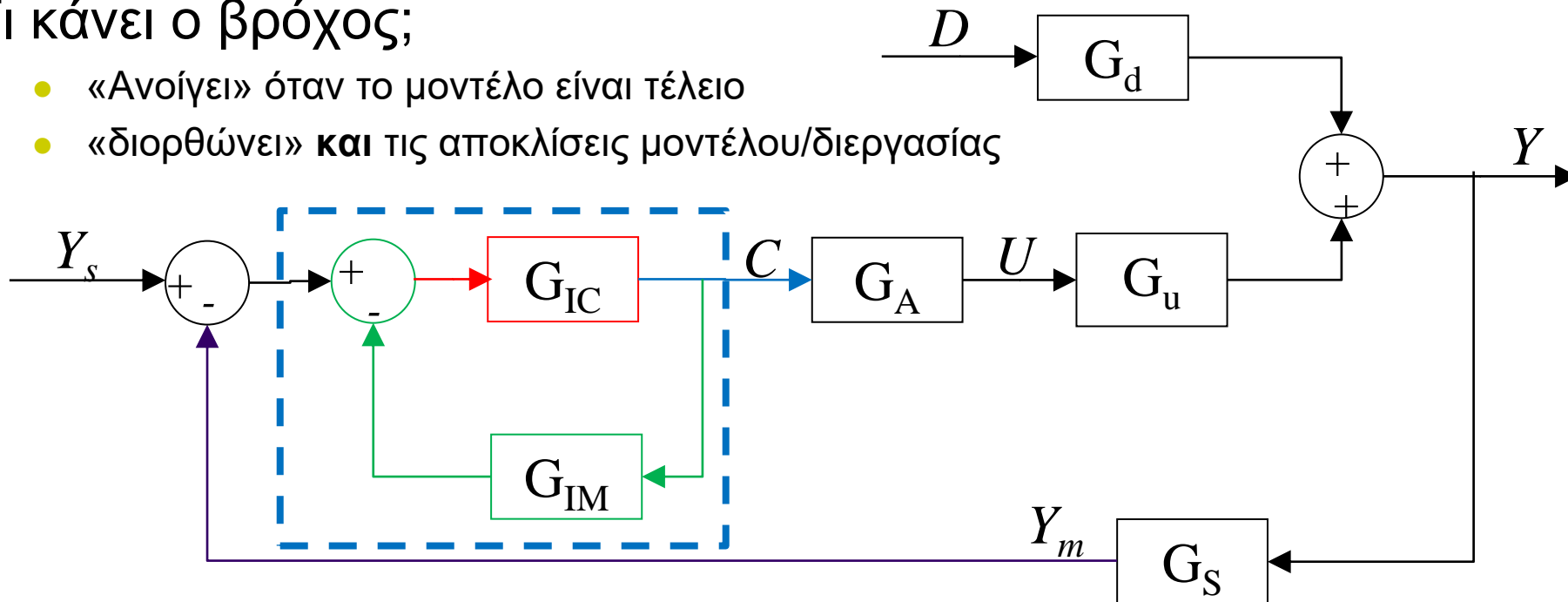


- **Inverse response compensator** προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά τα **χαρακτηριστικά διεργασίας**:
  - Καθυστέρηση στη συμπεριφορά της διεργασίας
  - **Αντίστροφη απόκριση στη συμπεριφορά διεργασίας**
  - «βέλτιστος» σχεδιασμός χωρίς βαθμονόμηση παραμέτρων
- **Απαιτεί καλή γνώση των**
  - Των μηδενικών τιμών στην ΠΣΜ της διεργασίας
  - Δυναμική της διεργασίας
  - Δυναμική των αισθητήρων και ενεργοποιητών
- Έχει έναν "εσωτερικό" βρόχο ελέγχου που περιέχει τη **διόρθωση** του μοντέλου



# Διάγραμμα βαθμίδων: IRC

- Στόχος του εσωτερικού μοντέλου
  - να «διορθώσει» την αντίστροφη απόκριση της διεργασίας
    - Το μοντέλο δίνει τι πρέπει να αντισταθμίσει ο ρυθμιστής
- Τι κάνει ο βρόχος;
  - «Ανοίγει» όταν το μοντέλο είναι τέλειο
  - «διορθώνει» και τις αποκλίσεις μοντέλου/διεργασίας

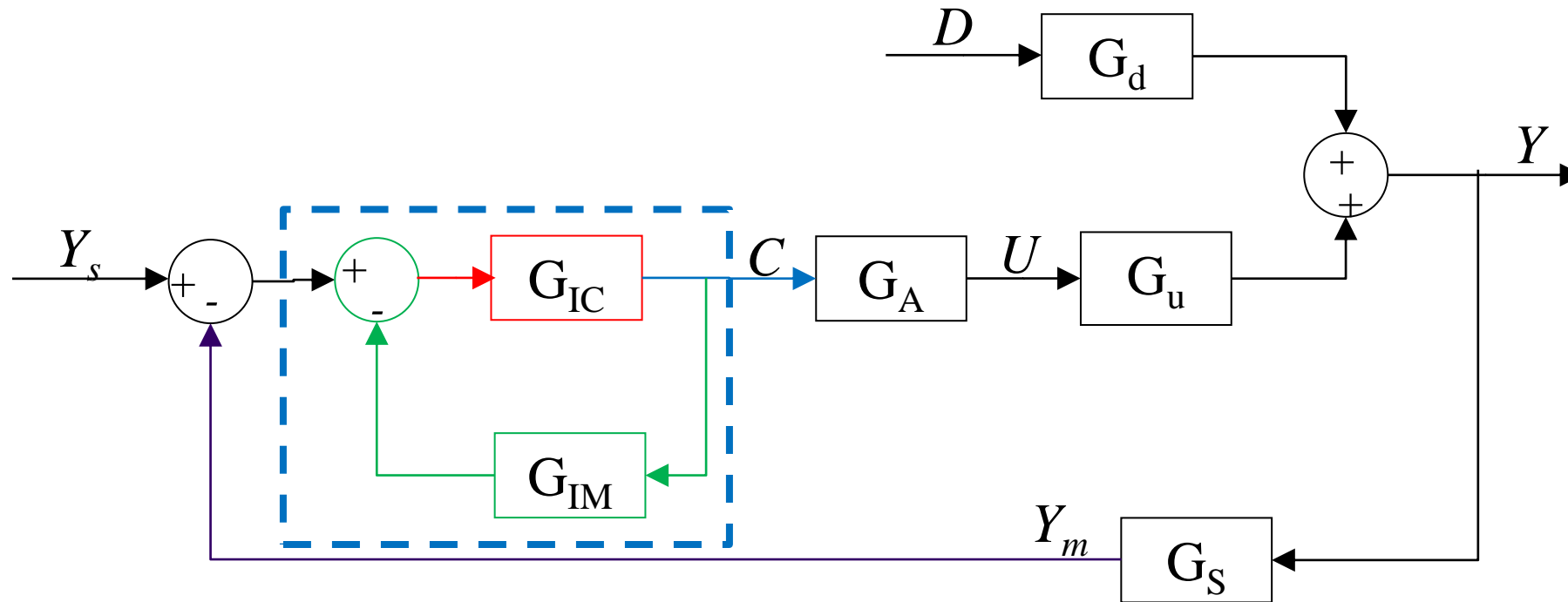


$G_{IC}$  = PID ή παρόμοιο

$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_s = G_0 - G_p$$

# Διάγραμμα βαθμίδων: IRC



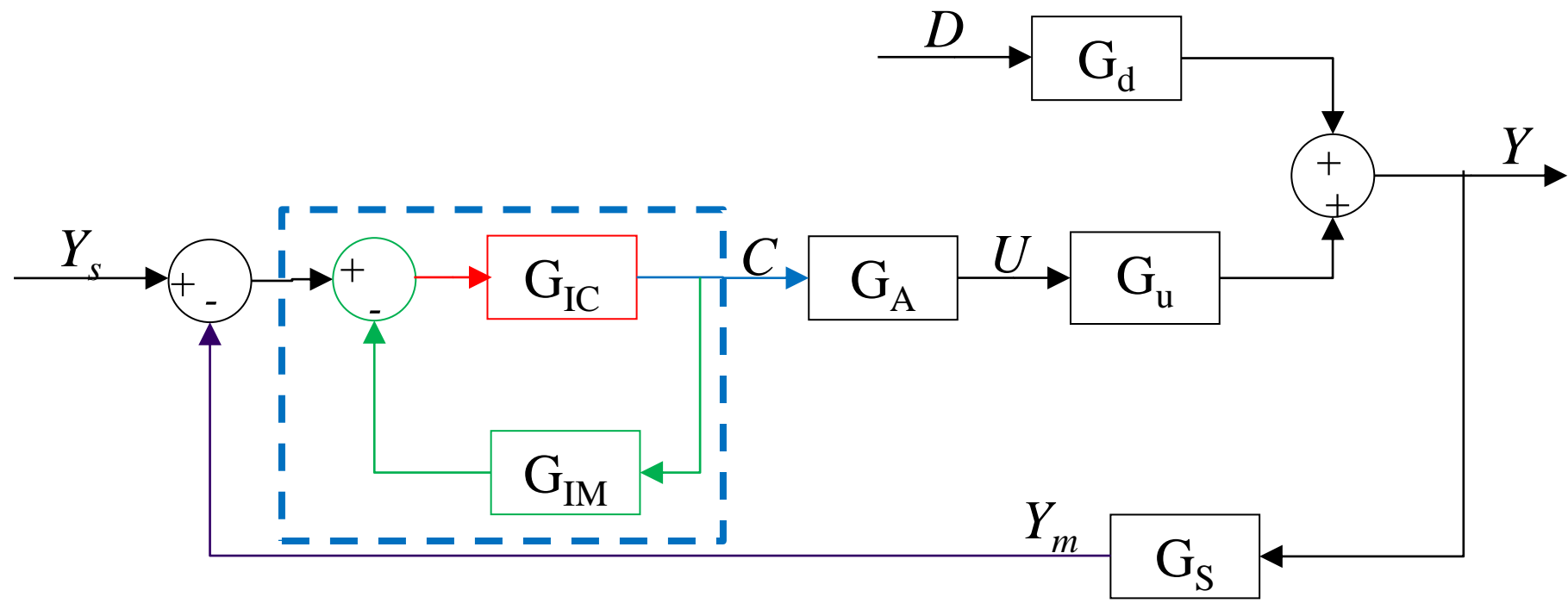
$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

$G_{IC}$  = PID ή παρόμοιο

$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_S = G_0 - G_p$$

- Στόχος του εσωτερικού μοντέλου
  - να «διορθώσει» την αντίστροφη απόκριση της διεργασίας
    - Το μοντέλο δίνει τι πρέπει να αντισταθμίσει ο ρυθμιστής
- Τι κάνει ο βρόχος;
  - «Ανοίγει» όταν το μοντέλο είναι τέλειο
  - «διορθώνει» και τις αποκλίσεις μοντέλου/διεργασίας

# Διάγραμμα βαθμίδων: IRC



$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

$G_{IC}$  = PID ή παρόμοιο

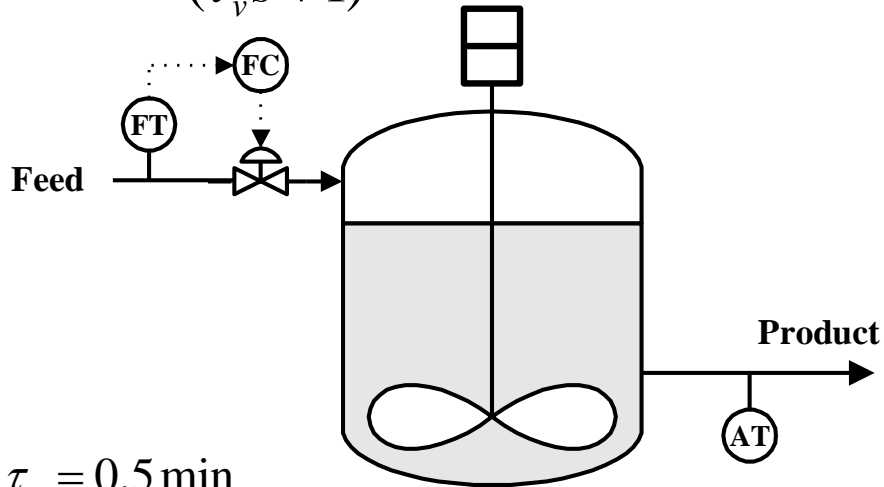
$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_S = G_0 - G_p$$

- Κατασκευή του εσωτερικού μοντέλου
  - Εμπεριέχει το μοντέλο της διεργασίας και το στόχο
    - Ο στόχος  $G_0$  είναι η διεργασία «χωρίς» θετικές μηδενικές τιμές
- Βαθμονόμηση του εσωτερικού ρυθμιστή
  - Γίνεται με βάση το  $G_0$  που βρίσκουμε
  - Χαρακτηριστική εξίσωση:  $1 + G_{IC}G_0 = 0$

# Παράδειγμα διεργασίας με IRC



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



$$\tau_v = 0.5 \text{ min}$$

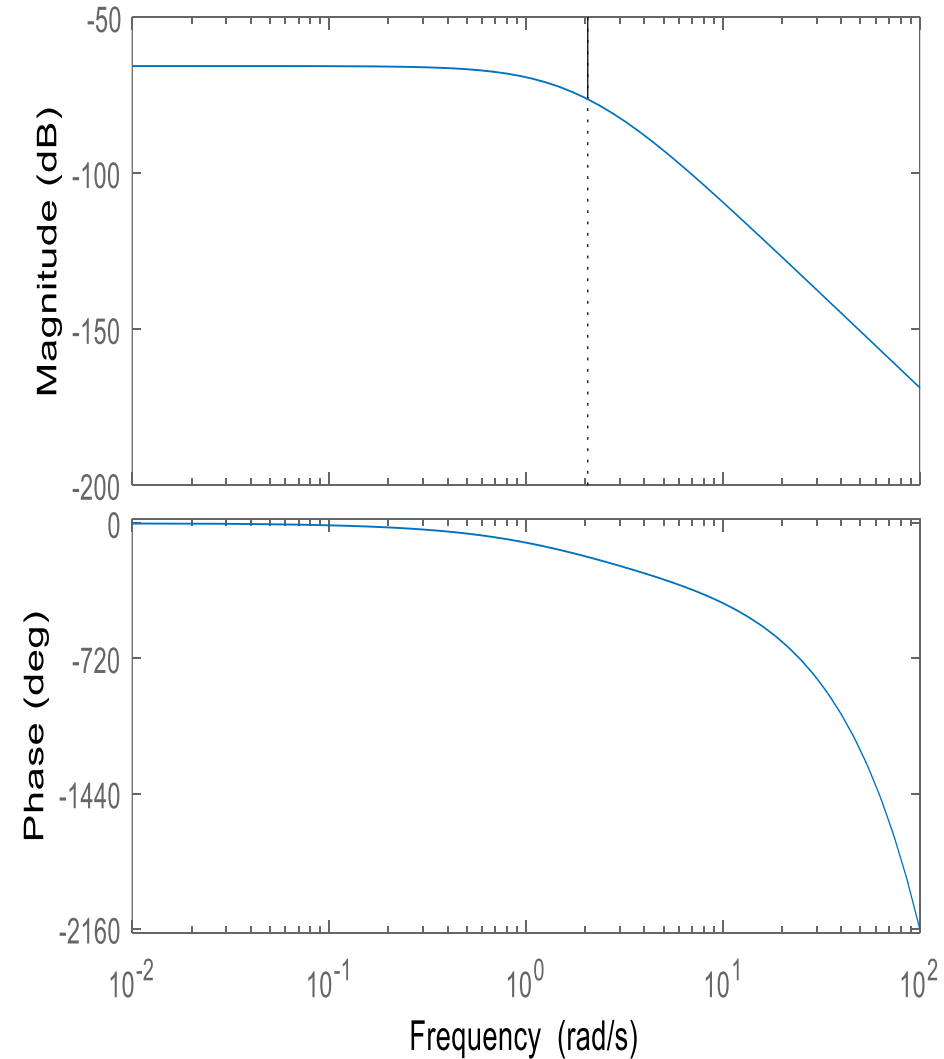
$$\theta_s = 0.33 \text{ min}$$

$$Y_m(s) = e^{-\theta_s s} Y(s)$$

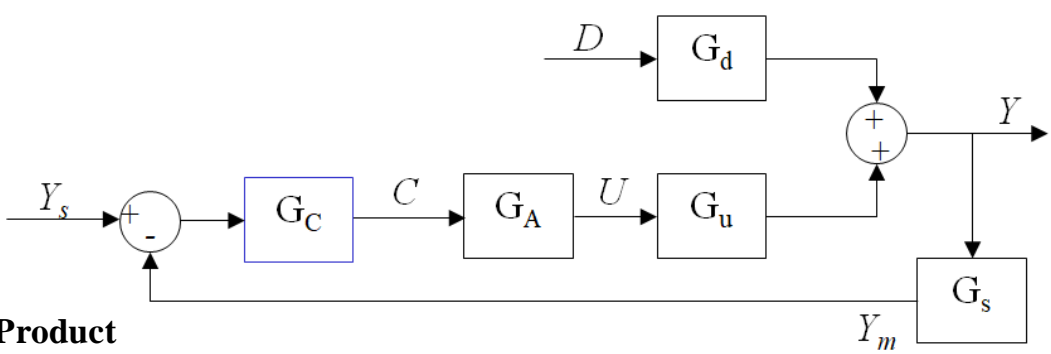
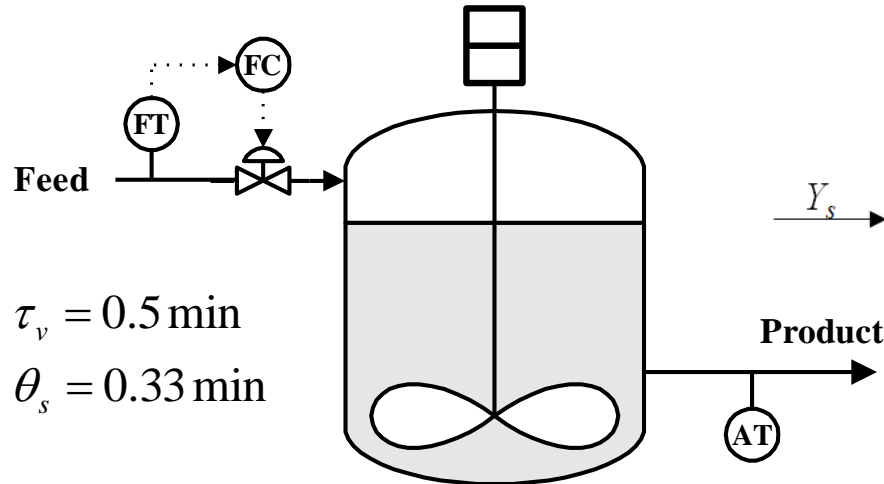
$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

Bode Diagram

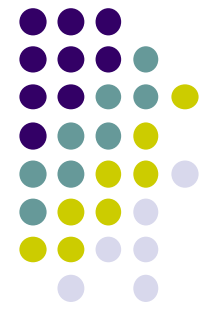
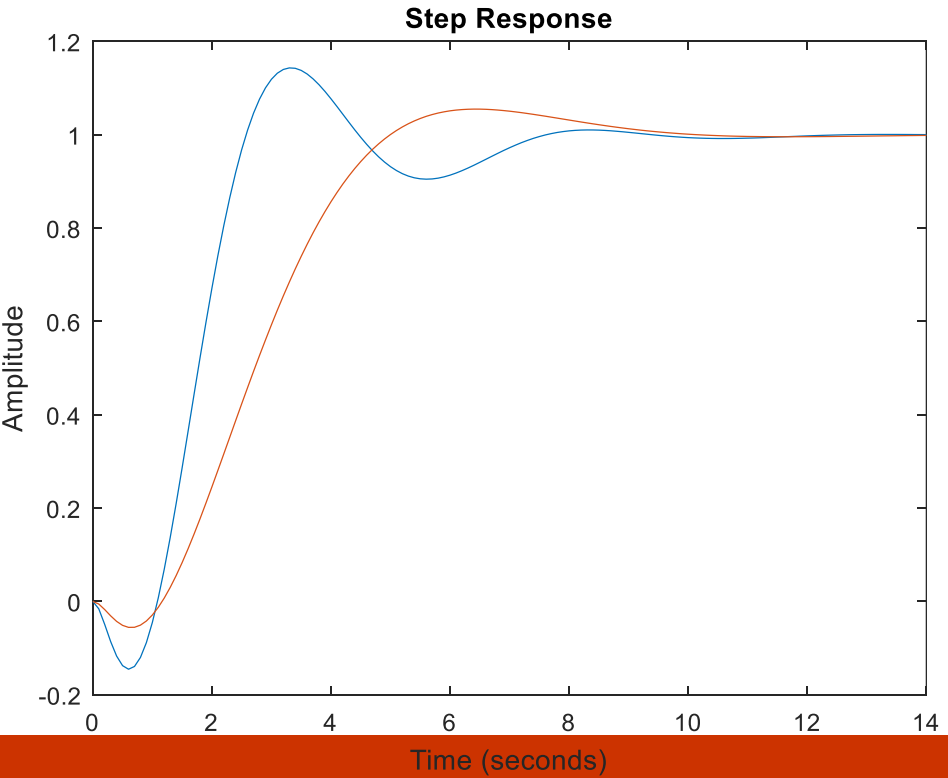
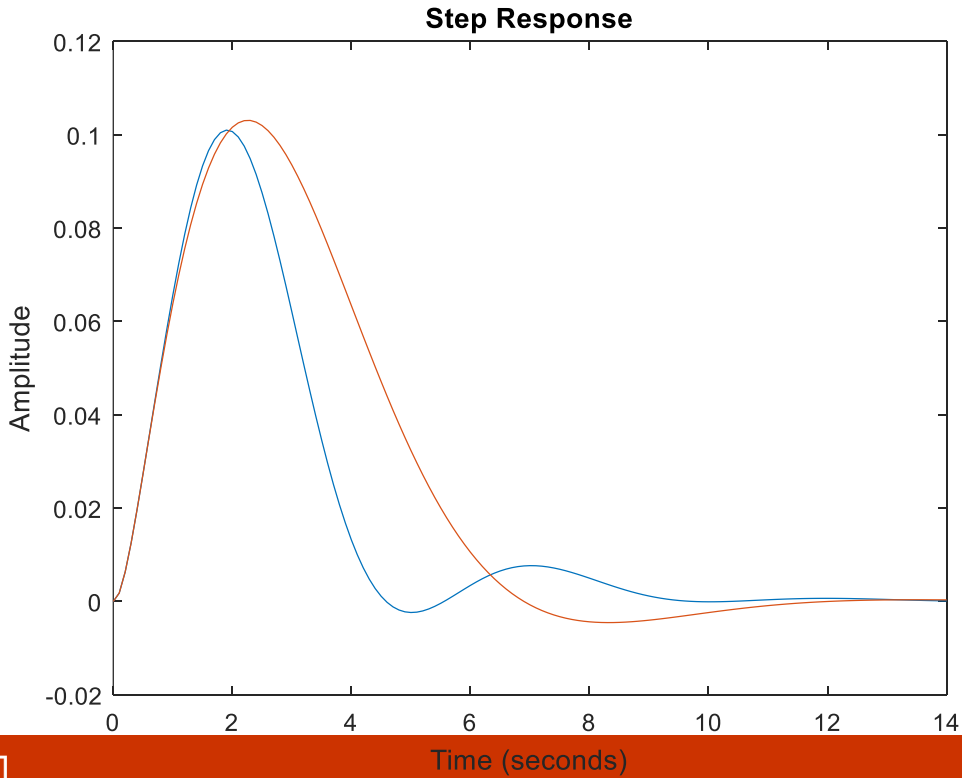
Gm = 76.2 dB (at 2.06 rad/s) , Pm = Inf



# Παράδειγμα διεργασίας με IRC

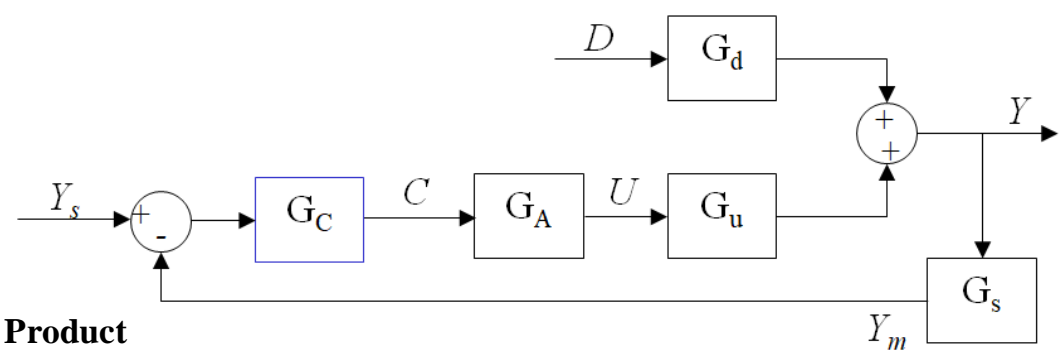
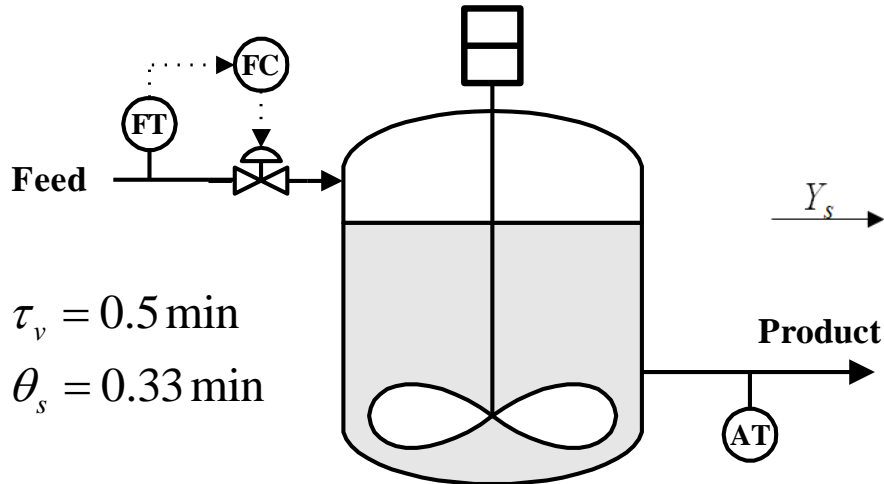
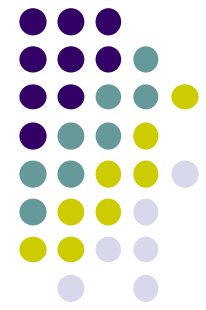


$K_C=1815, \tau_I=1.55$

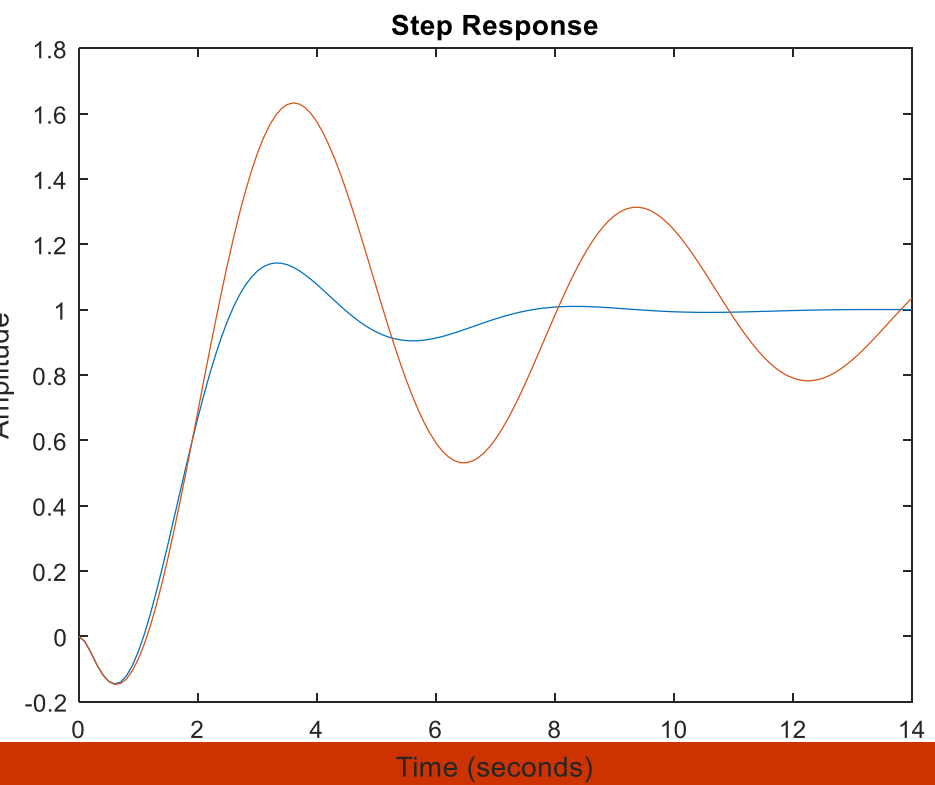
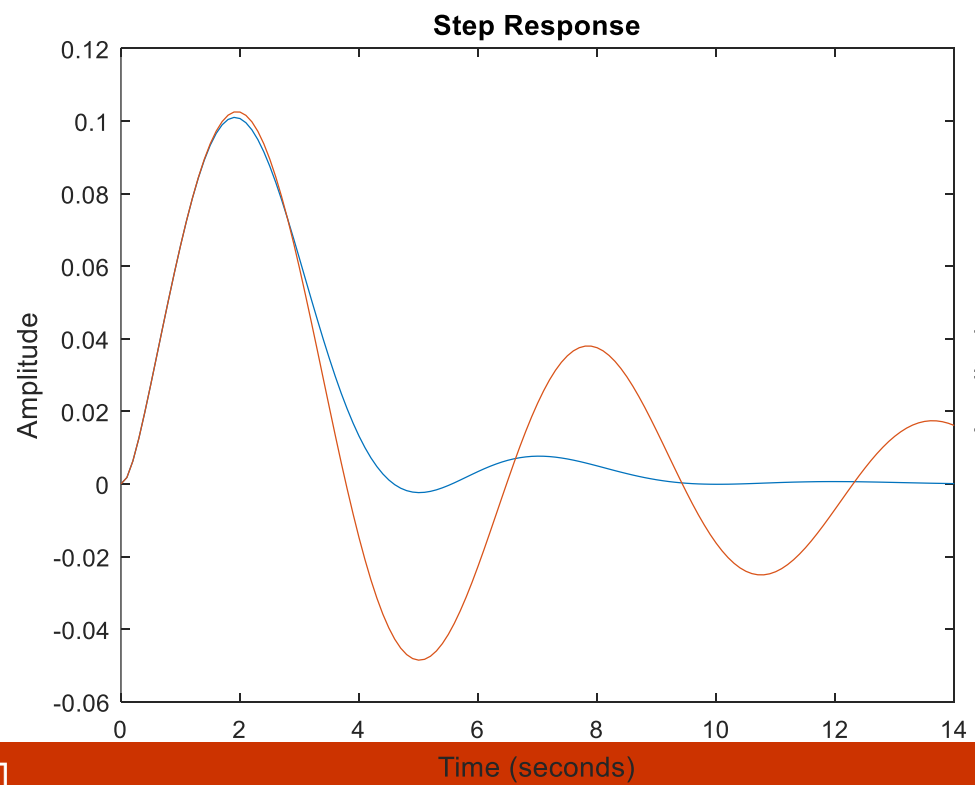




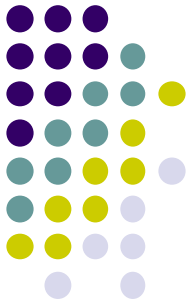
# Παράδειγμα διεργασίας με IRC



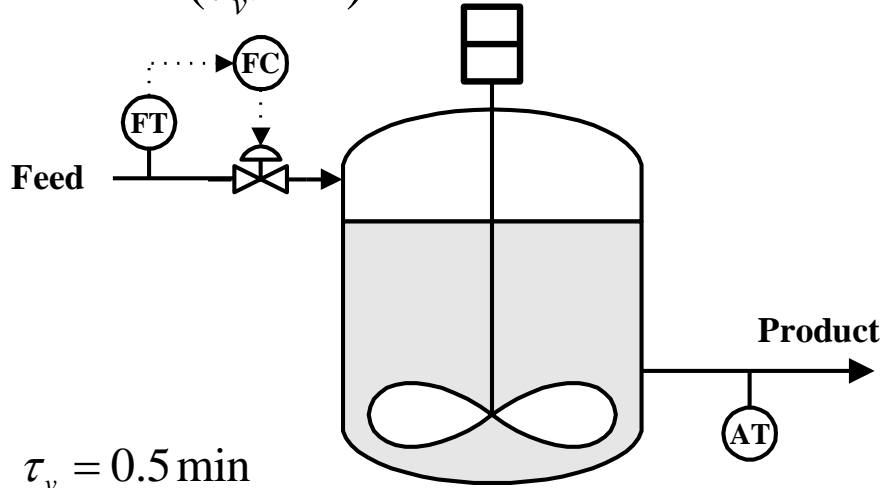
$K_C=1815, \tau_I=1.55$  PI ρυθμιστής άμεση σύνδεση



# Παράδειγμα διεργασίας: Αντιδραστήρας



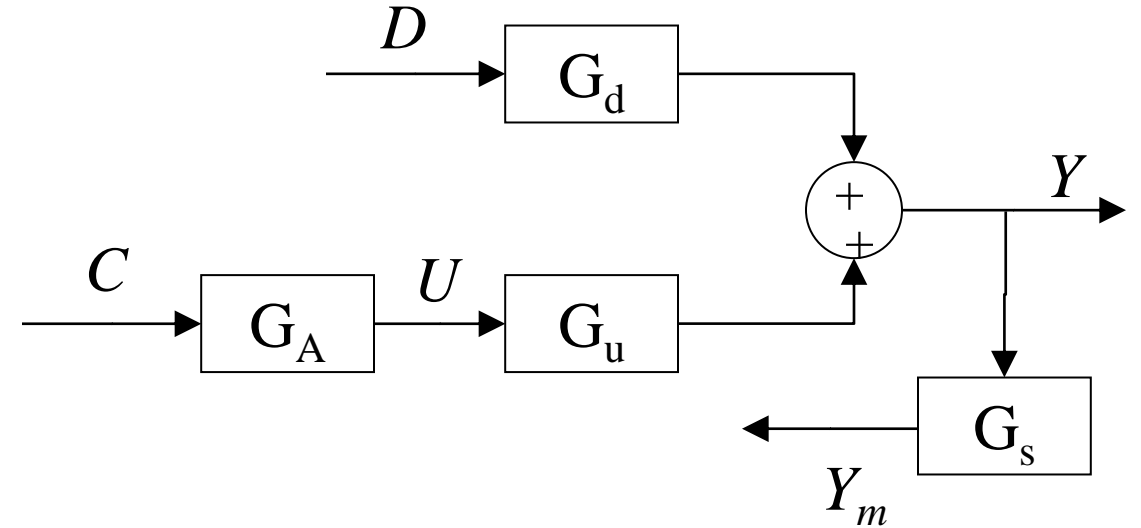
$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$



$$\tau_v = 0.5 \text{ min}$$

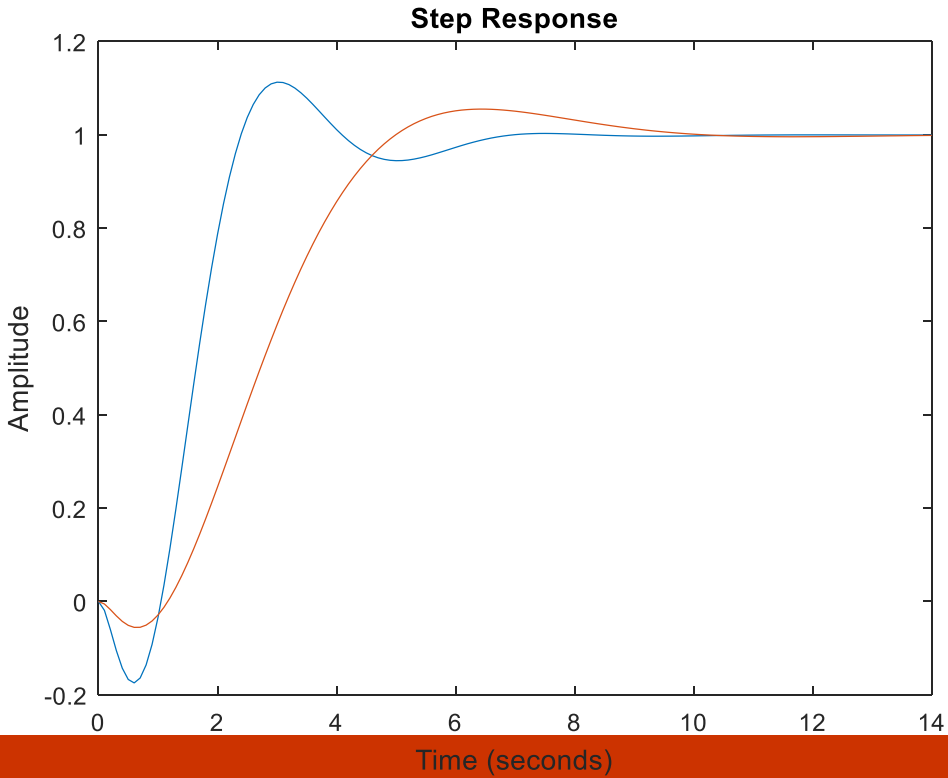
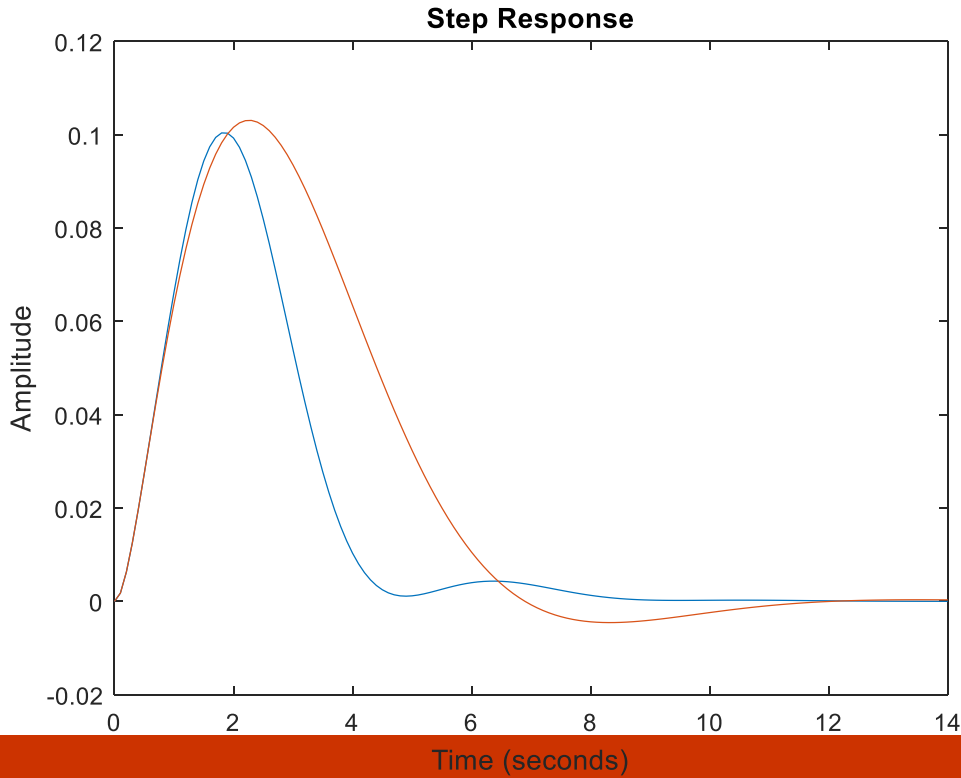
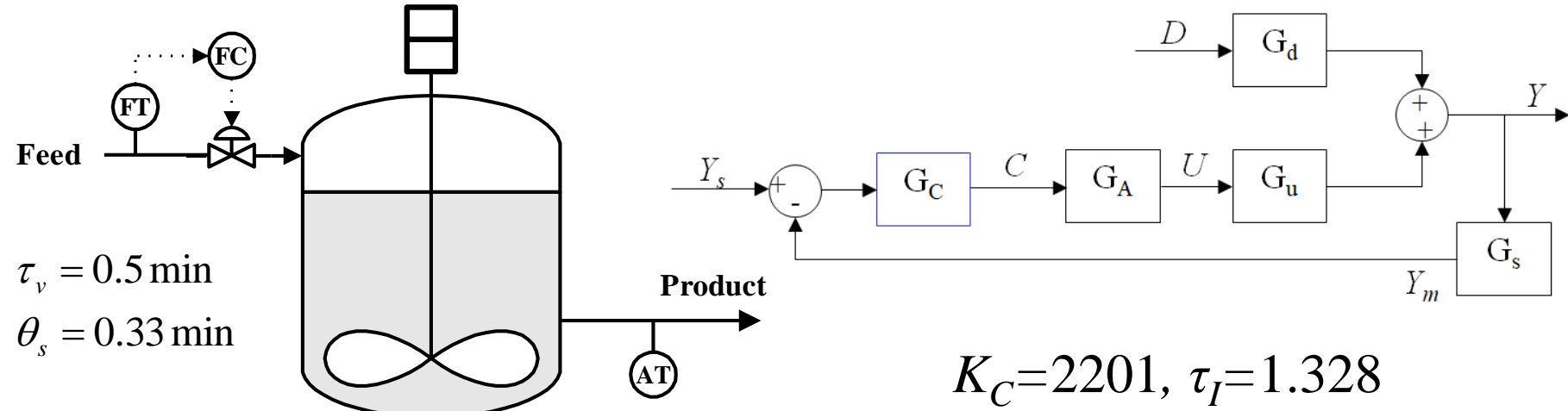
$$\theta_s = 0.33 \text{ min}$$

$$Y_m(s) = e^{-\theta_s s} Y(s)$$

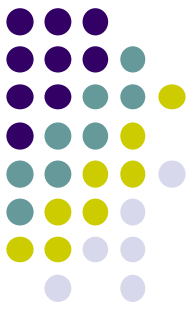


$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

# Παράδειγμα διεργασίας με IRC+DRC

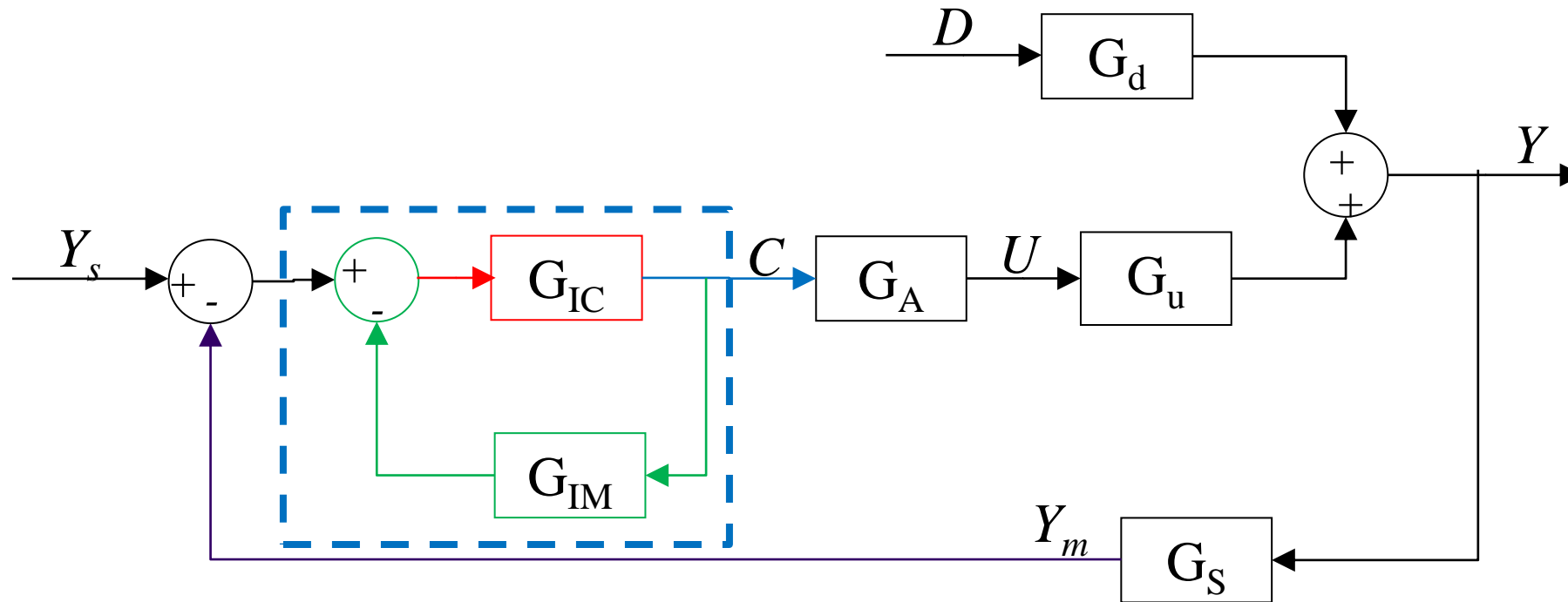
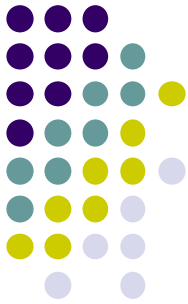


# Internal Model: Internal Model Control



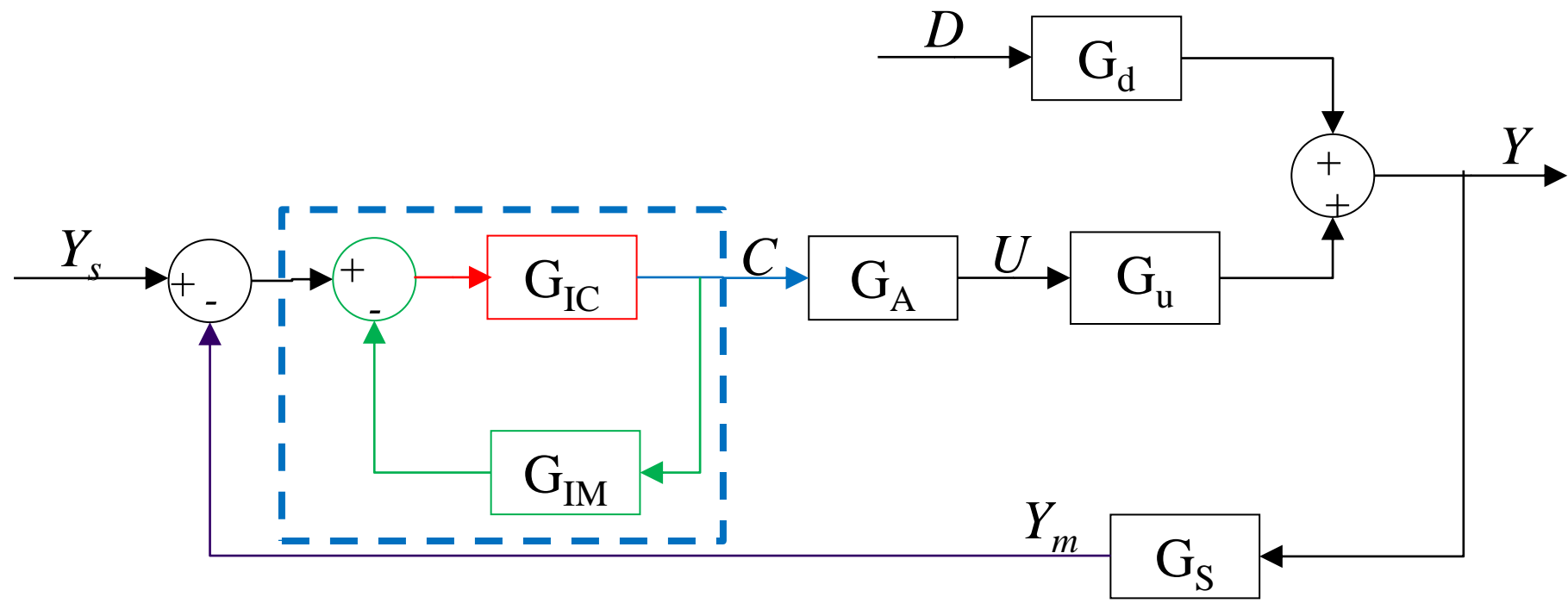
- **Internal model controller** προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά τα **χαρακτηριστικά διεργασίας**:
  - Καθυστέρηση στη συμπεριφορά της διεργασίας
  - Αντίστροφη απόκριση στη συμπεριφορά διεργασίας
  - **«βέλτιστος» σχεδιασμός χωρίς βαθμονόμηση παραμέτρων**
- **Απαιτεί καλή γνώση των**
  - **Των μηδενικών τιμών στην ΠΣΜ της διεργασίας**
  - **Δυναμική της διεργασίας**
  - **Δυναμική των αισθητήρων και ενεργοποιητών**
- Έχει έναν "εσωτερικό" βρόχο ελέγχου που περιέχει το μοντέλο
- **Ο εσωτερικός ρυθμιστής προσπαθεί να αντιστρέψει την δυναμική!**

# Διάγραμμα βαθμίδων: IMC



- Με το IMC, ένας σταθερός και γρήγορος ρυθμιστής μπορεί να σχεδιαστεί έχοντας μόνο την περιγραφή του μοντέλου.
- Ο ίδιος σχεδιασμός είναι καλός για την παρακολούθηση σημείων ρύθμισης και την απόρριψη διαταραχών.

# Διάγραμμα βαθμίδων: IMC



$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

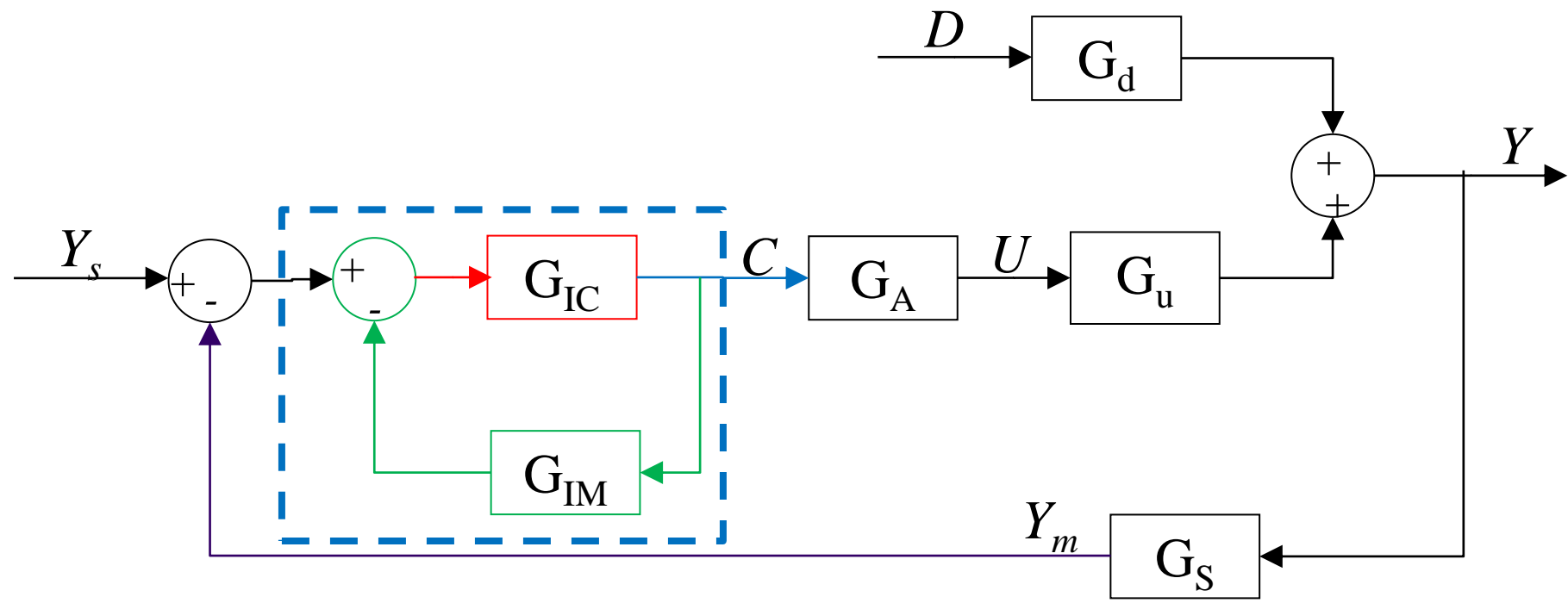
$$Y = G_u G_A G_C (Y_s - G_S Y) \Rightarrow (1 + G_{IC} G_{IM}) Y = G_u G_A G_{IC} Y_s - G_p G_{IC} Y \Rightarrow Y - G_{IC} G_p Y = G_A G_u G_{IC} Y_s - G_p G_{IC} Y \Rightarrow$$

$$G_{IC} = ??$$

$$Y = G_A G_u G_{IC} Y_s !!!$$

$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_S = -G_p$$

# Διάγραμμα βαθμίδων: IMC



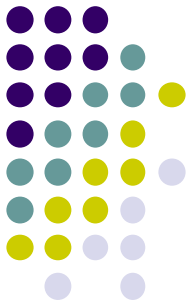
$$G_C = \frac{C}{e} = \frac{G_{IC}}{1 + G_{IC}G_{IM}}$$

$$G_{IC} = ??$$

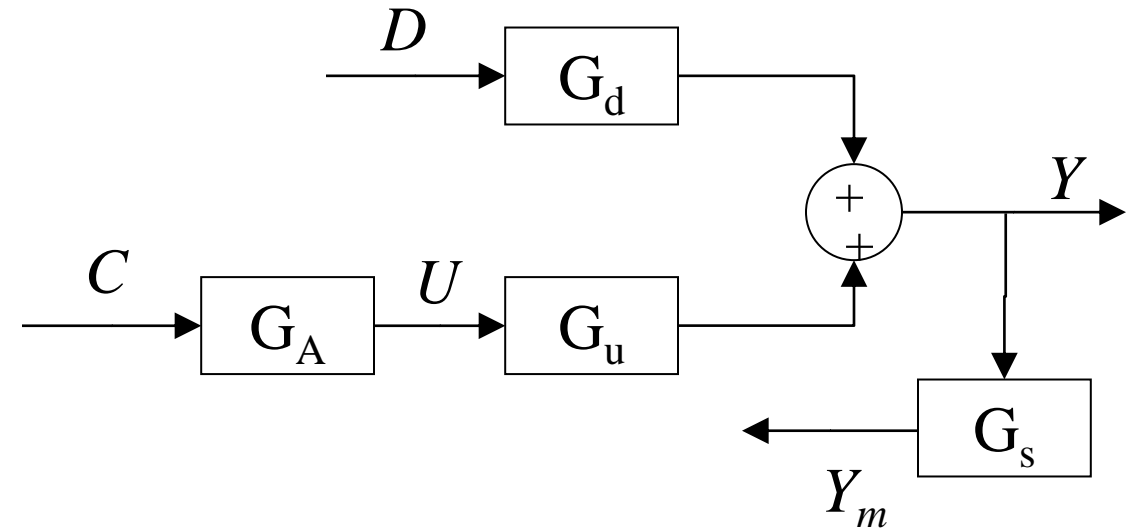
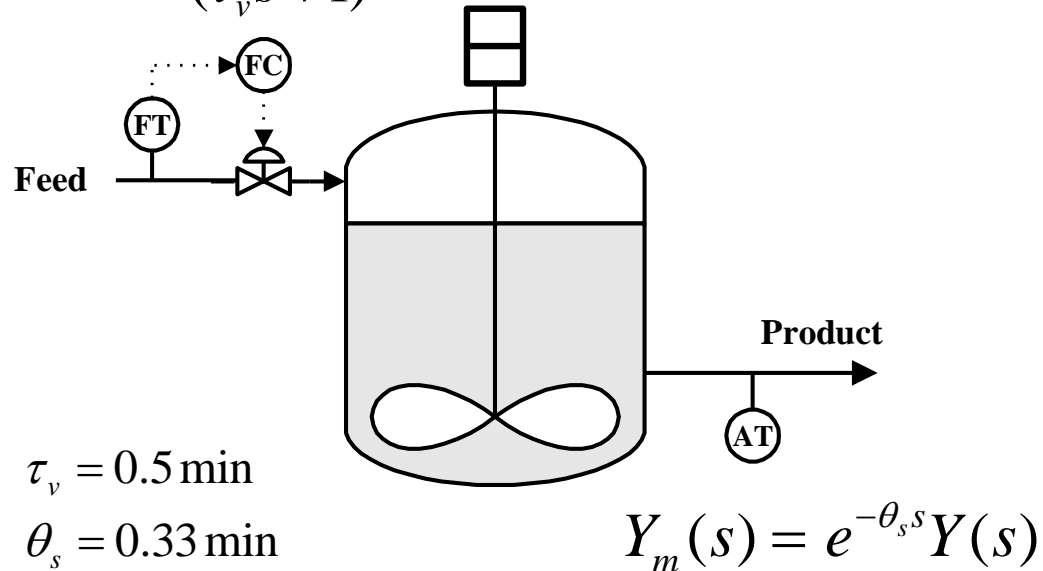
$$G_{IM} = G_0 - G_A G_u G_s = -G_p$$

- Κατασκευή του εσωτερικού μοντέλου
  - Εμπεριέχει δύο μέρη. Τα «ευσταθή» μέρη και τα «ασταθή»
- Βαθμονόμηση του εσωτερικού ρυθμιστή
  - Γίνεται με βάση το  $G_p$  που βρίσκουμε
  - Από την ανοικτή εξίσωση:  $G_u G_A G_{IC} = 1 \Rightarrow G_{IC} = \frac{1}{G_u G_A} !!$

# Παράδειγμα διεργασίας: Αντιδραστήρας



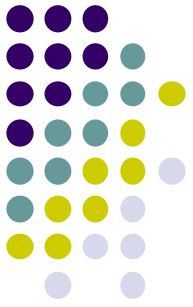
$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$



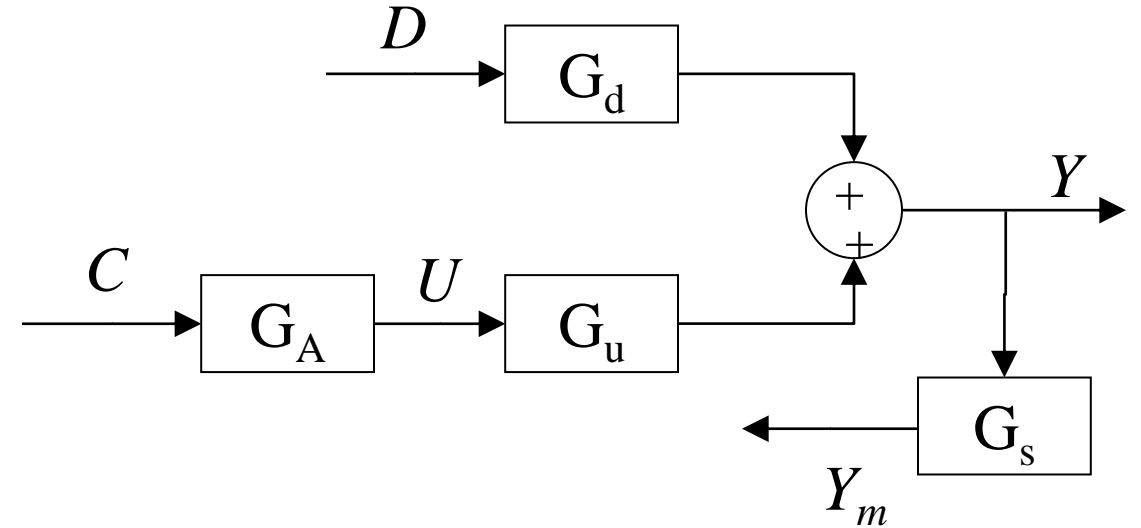
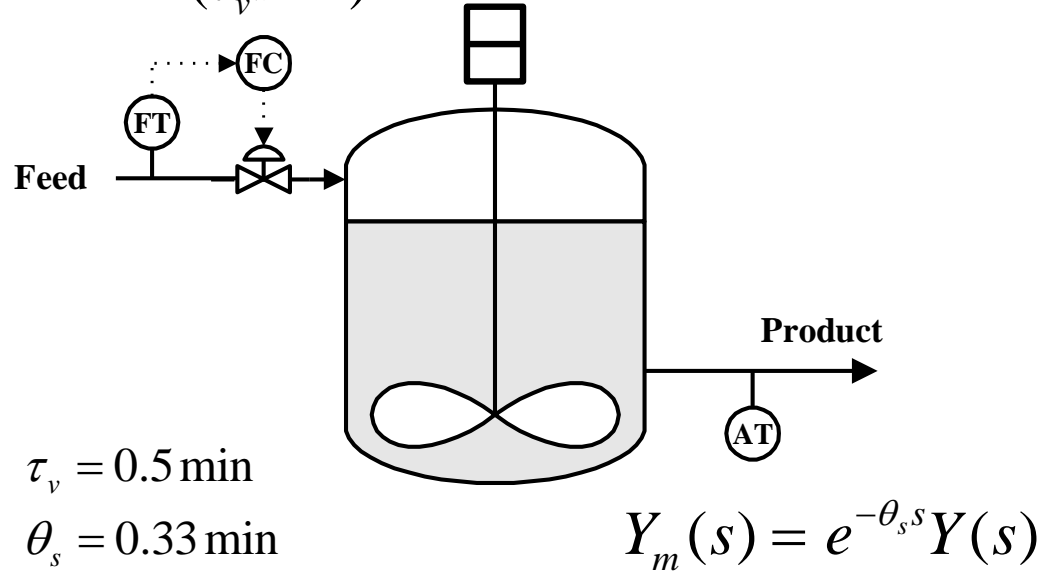
$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$



# Παράδειγμα διεργασίας: Αντιδραστήρας

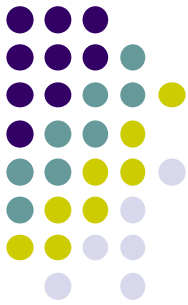


$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$

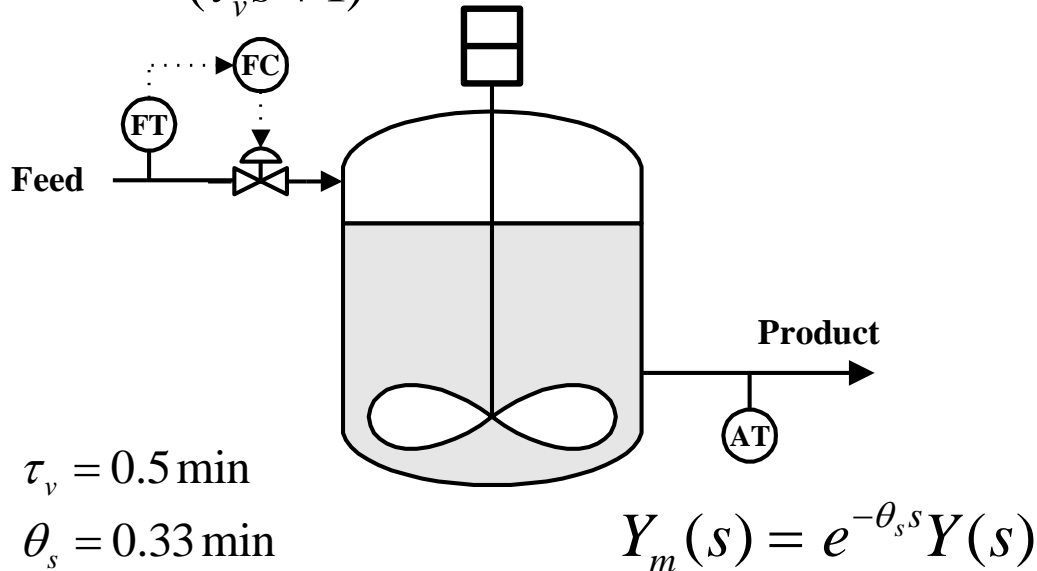


$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

# Παράδειγμα διεργασίας με IMC



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



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

$$G_{IM} = -G_p = -G_u G_A G_S$$

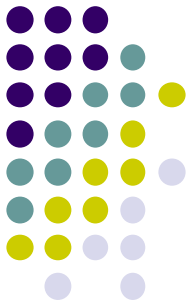
$$= - \frac{0.001842(-0.597s + 1)}{s^2 + 4.006s + 3.502} \frac{1}{0.5s + 1} e^{-0.33s}$$

$$G_P = G_{MP} G_{NMP}$$

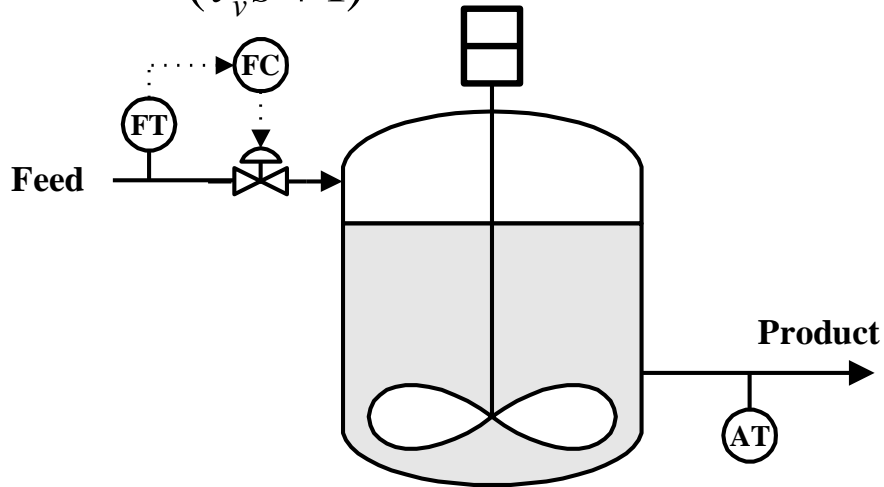
$$G_{MP} = \frac{0.001842(0.597s + 1)}{s^2 + 4.006s + 3.502} \frac{1}{0.5s + 1}$$

$$G_{NMP} = e^{-0.33s} \frac{-0.597s + 1}{0.597s + 1}$$

# Παράδειγμα διεργασίας με IMC



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



$$\tau_v = 0.5 \text{ min}$$

$$\tau_s = 0.33 \text{ min}$$

$$Y_m(s) = e^{-\theta_s s} Y(s)$$

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

$$G_P = G_{MP} G_{NMP}$$

$$G_{MP} = \frac{0.001842(-0.597s + 1)}{s^2 + 4.006s + 3.502} \frac{1}{0.5s + 1}$$

$$G_{NMP} = e^{-0.33s} \frac{-0.597s + 1}{0.597s + 1}$$

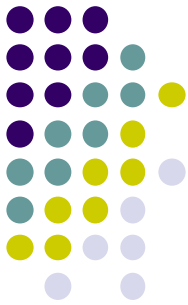
$$G_{IC} = \frac{1}{G_{MP}} !$$

$$G_{IC} = \frac{s^2 + 4.006s + 3.502}{0.011s + 0.001842} (0.5s + 1) \quad \begin{matrix} n_z = 3 \\ n_p = 1 \end{matrix}$$

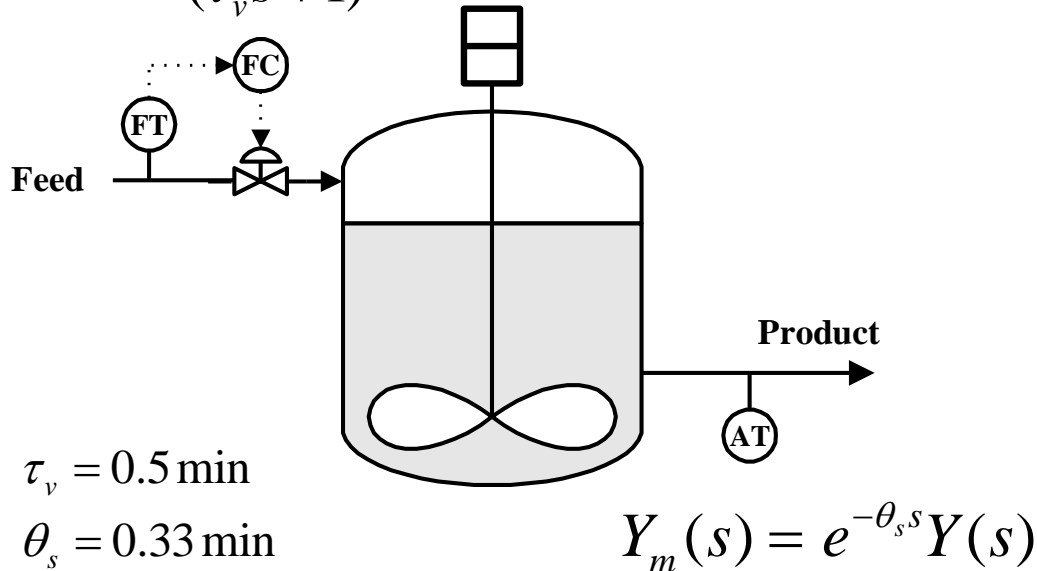
$$n = 2$$

Χρειαζόμαστε φίλτρο!!

# Παράδειγμα διεργασίας με IMC



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



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

$$G_{IC} = \frac{1}{G_{MP}}$$

$$G_{IC} = \frac{s^2 + 4.006s + 3.502}{0.011s + 0.001842} (0.5s + 1)$$

Χρειαζόμαστε φίλτρο!!

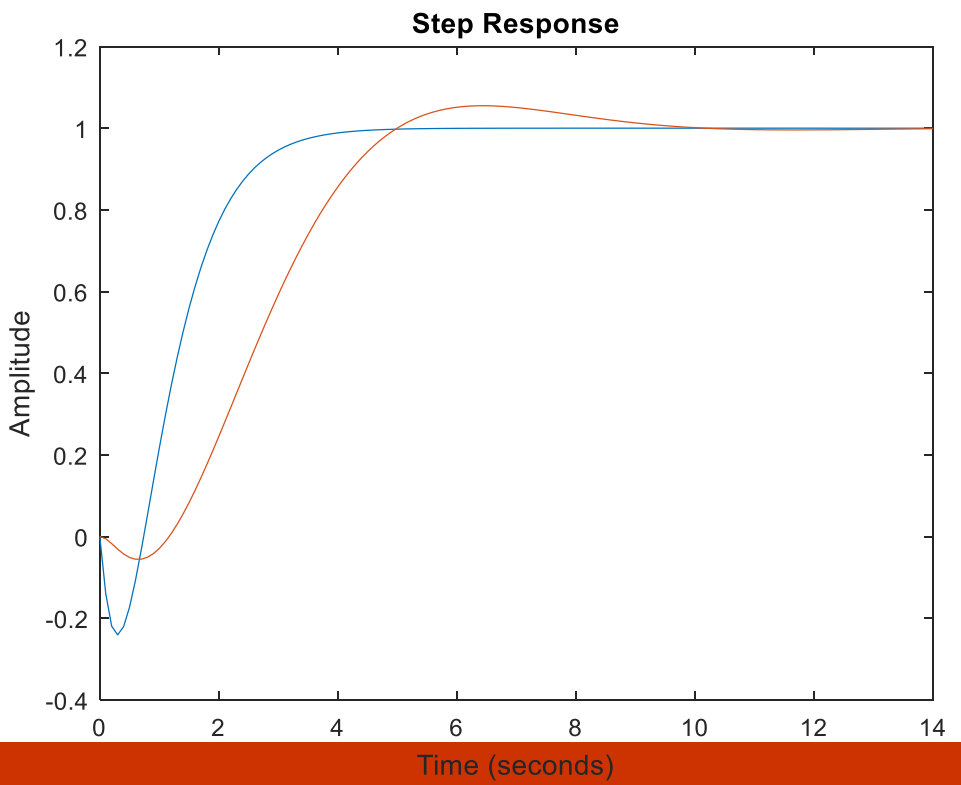
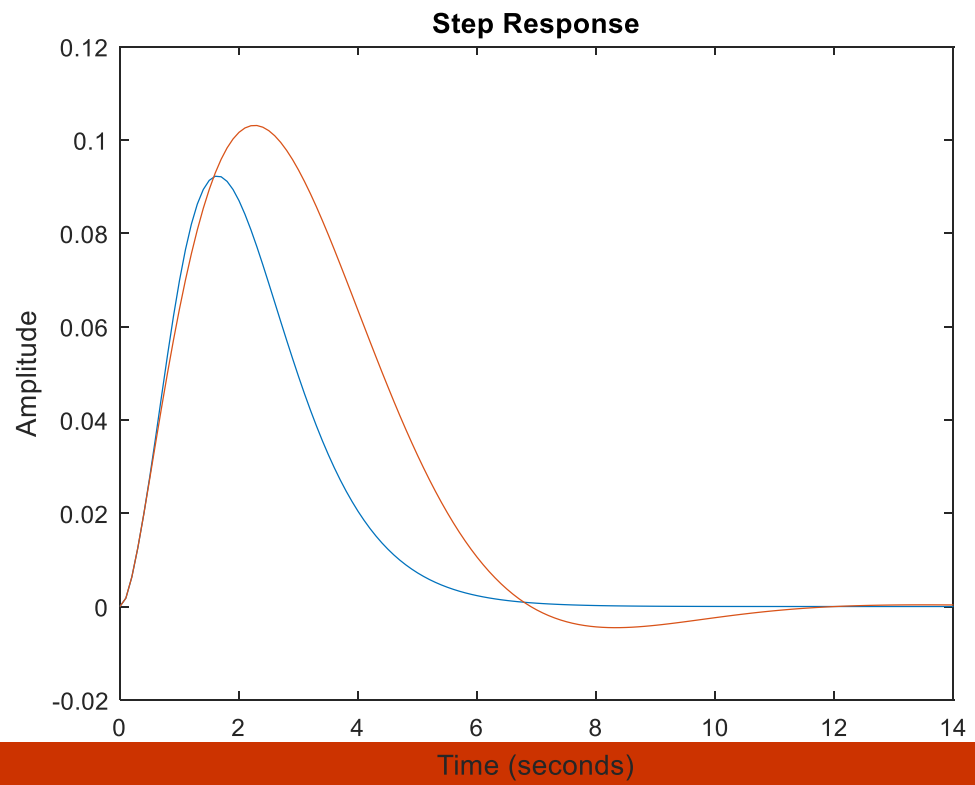
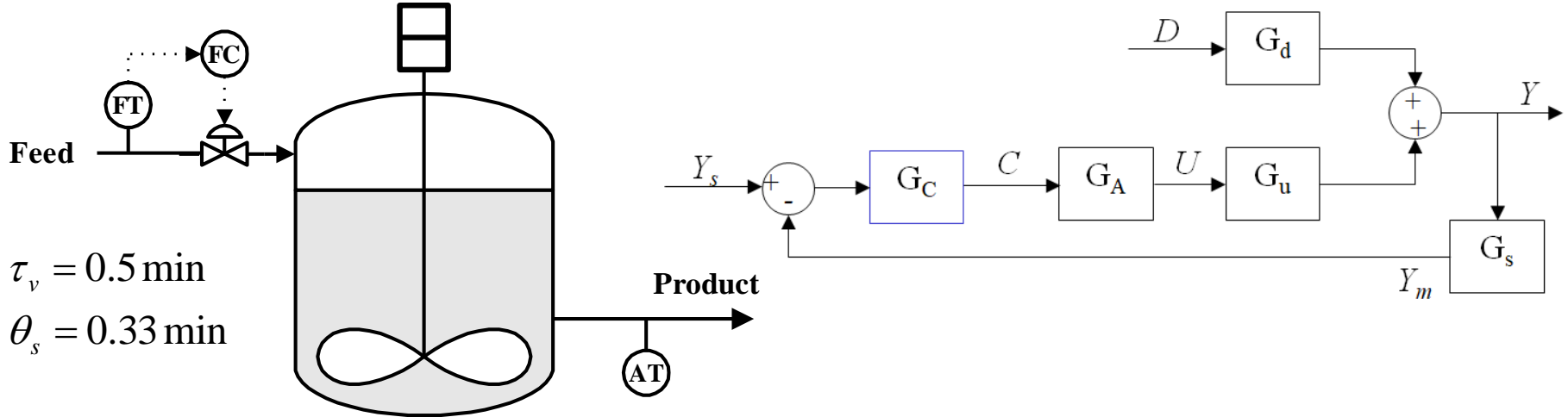
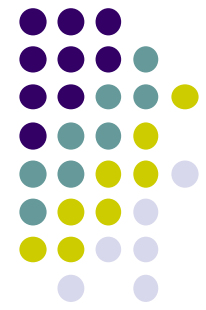
$$G_{IC} = \frac{1}{G_{MP}} \frac{1}{(\lambda s + 1)^n}$$

$$\tau_1 = 0.5, \tau_2 = 0.368, \tau_3 = 0.776$$

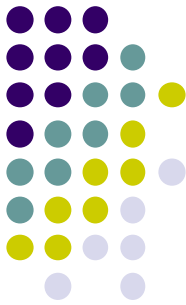
$$G_{IC} = \frac{s^2 + 4.006s + 3.502}{0.011s + 0.001842} \frac{0.5s + 1}{(0.033s + 1)^2}$$

Φίλτρο με  $\tau=2s$ .

# Παράδειγμα διεργασίας με IMC



# Ανάλυση των IMC



- Οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περίπλοκες διαδικασίες
- Τα σχέδια παρέχουν μεγαλύτερη ευστάθεια στις διεργασίες κλειστού βρόχου
- Η «απλότητα» των αρχιτεκτονικών βρίσκεται στη χρήση του μοντέλου που εξηγεί την πολυπλοκότητα.