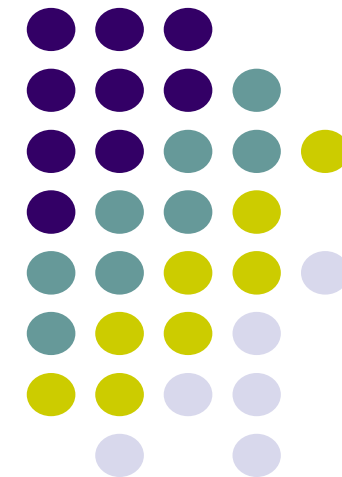


Δυναμική & Ρύθμιση Διεργασιών

Διάλεξη 19: Βαθμονόμηση ρυθμιστών



Βήματα της Ρύθμισης Διεργασιών, μέρος Β

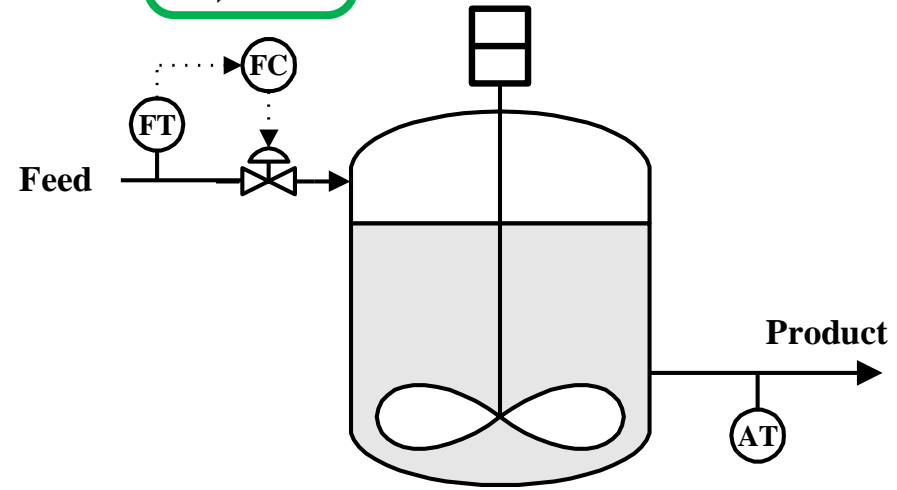


1. Καθορίστε τη διαδικασία που εξετάζεται
2. Ανάλυση Διεργασίας
3. **Σύνθεση δομής ελέγχου**
 - a. Διατύπωση της ερώτησης ελέγχου
 - b. Προσθήκη ενεργοποιητών/αισθητήρων στην περιγραφή
 - c. Κατασκευή των ρυθμιστών
 - d. Κατασκευή των παρατηρητών
 - e. **Ανάλυση κλειστού βρόγχου**
 - f. **Βαθμονόμηση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

Αντιδραστήρας και εξοπλισμός



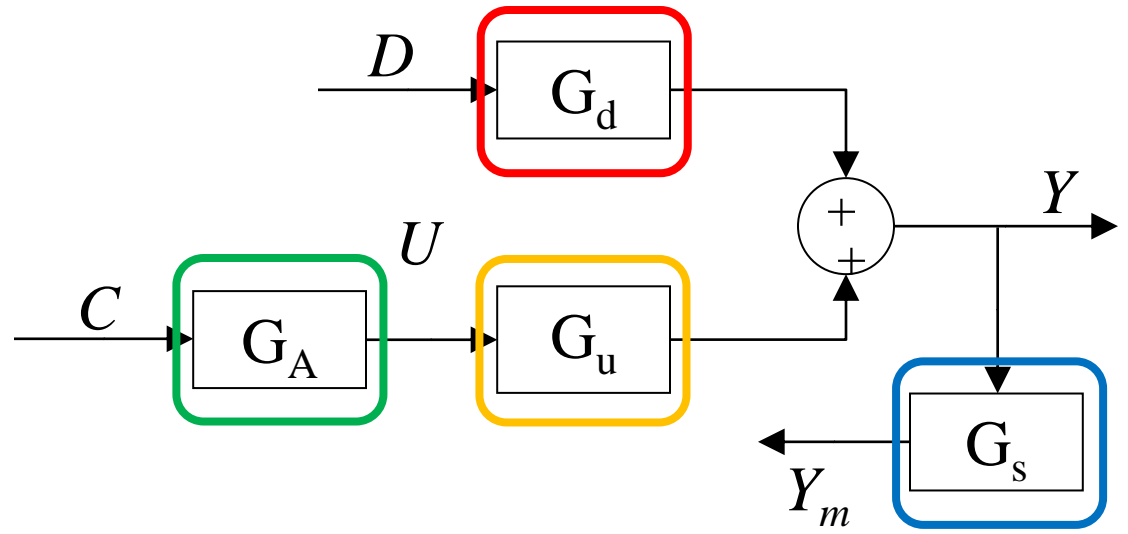
$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$



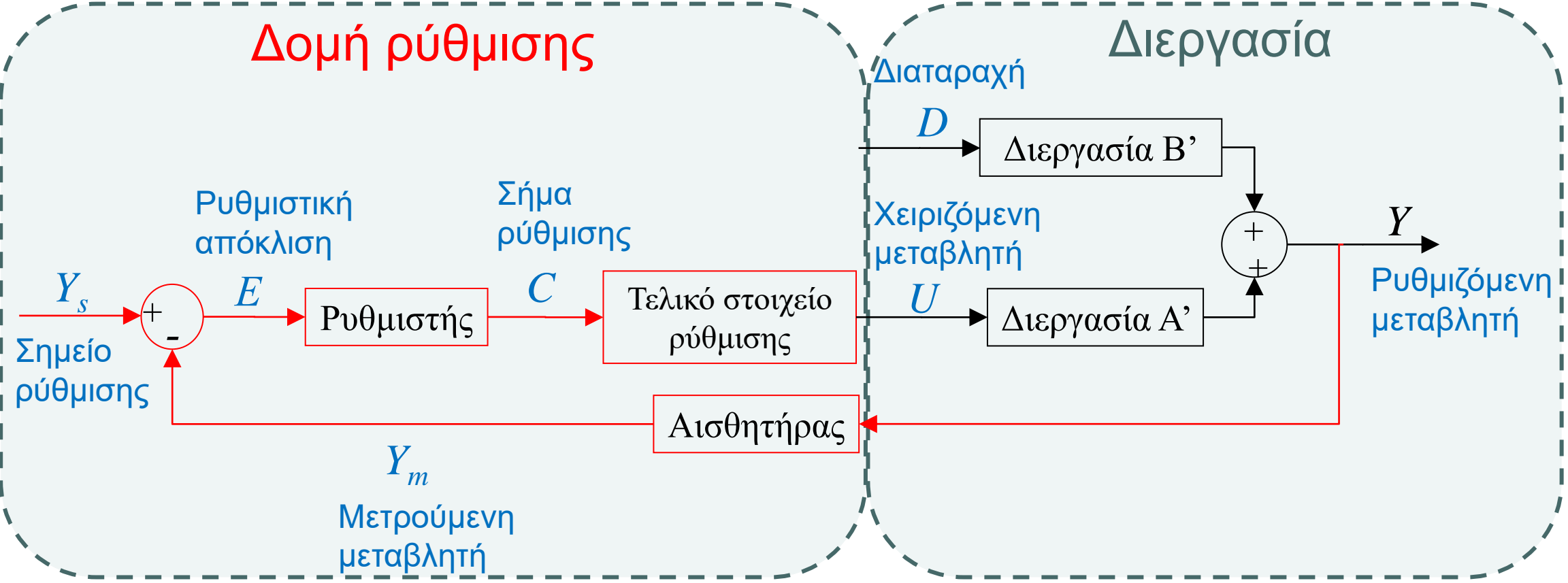
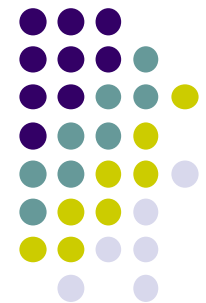
$\tau_v = 0.5 \text{ min}$
 $\tau_s = 0.33 \text{ min}$

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

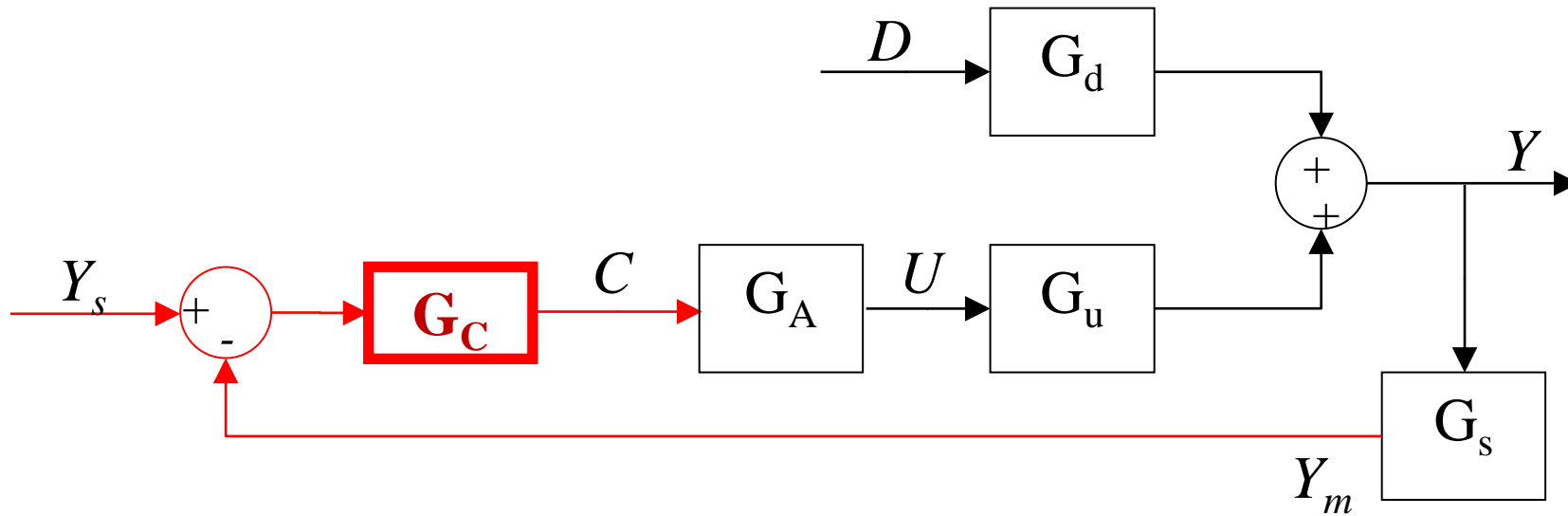
$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$



Διάγραμμα βαθμίδων με ανάδραση



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
- Χρήση τυπικού ρυθμιστή
 - Τιμές παραμέτρων ρυθμιστή;

Μοντέλο Ρυθμιστή PID με φίλτρο



Για ένα ρυθμιστή τύπου PID,

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

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

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

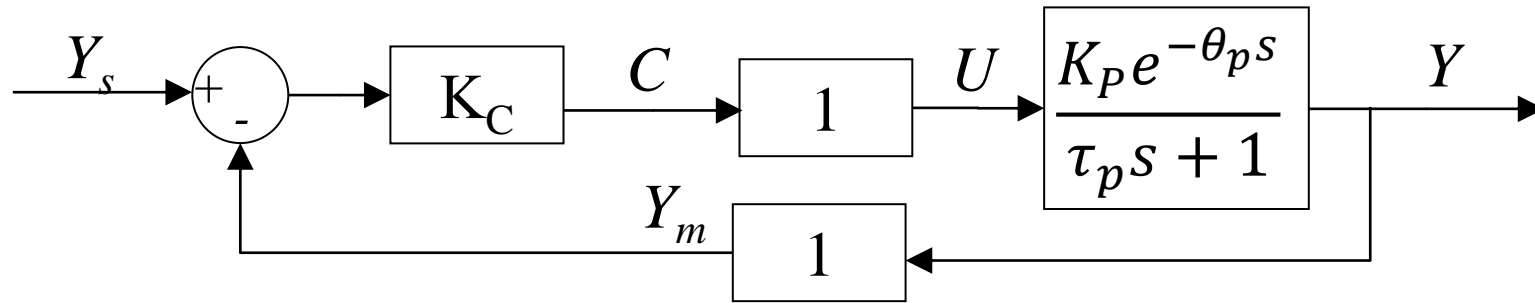
$$= K_c \frac{\tau_I \tau_D s^2 + \tau_I s + 1}{\tau_f \tau_I s^2 + \tau_I s} E(s)$$

- όπου:
- K_c = Ενίσχυση ρυθμιστή
 - e = Το σφάλμα (set point **μείον** μετρούμενη τιμή)
 - τ_i = Χρονική σταθερά ολοκληρωτικού όρου
 - τ_d = Χρονική σταθερά διαφορικού όρου
 - τ_f = Χρονική σταθερά φίλτρου

Η έξοδος του ρυθμιστή είναι ανάλογη με την ρυθμιστική απόκλιση, το ολοκλήρωμα στο χρόνο της απόκλισης και τον ρυθμό μεταβολής της απόκλισης.

K_c , τ_i , τ_d και τ_f είναι οι παράμετροι του ρυθμιστή που καθορίζει ο χειριστής.

Παράδειγμα: Διεργασία FODS υπό P



- Η ανάλυση της συμπεριφοράς της διεργασίας κλειστού βρόχου είναι περίπλοκη

$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{G_c G_p}{G_c G_p + 1}$$

- Ο εκθετικός όρος στην περιγραφή

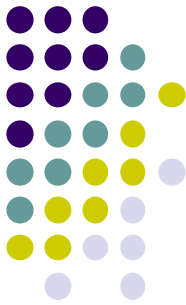
$$\frac{Y(s)}{Y_{sp}(s)} = \frac{K_c K_p}{\tau_p s + (K_c K_p + 1)e^{\theta_p s}}$$

- Προσέγγιση της συμπεριφοράς μέσω κλασματικών ΣΜ

- Προσέγγιση μέσω SOS $G_p = \frac{K_p e^{\theta_p s}}{\tau_p s + 1} \cong \frac{K_p}{(\tau_p s + 1)(\theta_p s + 1)}$

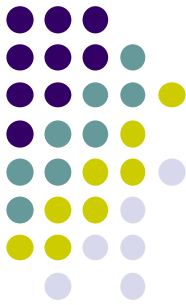
- Η συμπεριφορά της διεργασίας κλειστού βρόχου είναι πιο περίπλοκη φυσικά

FODS κάτω από P ρυθμιστή



- Για μια διεργασία με καθυστέρηση, όταν κλείνουμε τον βρόχο καθώς αυξάνεται το K_c , η δυναμική απόκριση έχει την ακόλουθια συμπεριφοράς
 - Υπερκρίσιμη overdamped
 - Κρίσιμη critically damped
 - Αποσβενόμενες ταλαντώσεις oscillatory
 - Κουδούνισμα ringing
 - Διατηρούμενες ταλαντώσεις sustained oscillations
 - Αυξανόμενες ταλαντώσεις unstable oscillations

Βαθμονόμηση ρυθμιστή



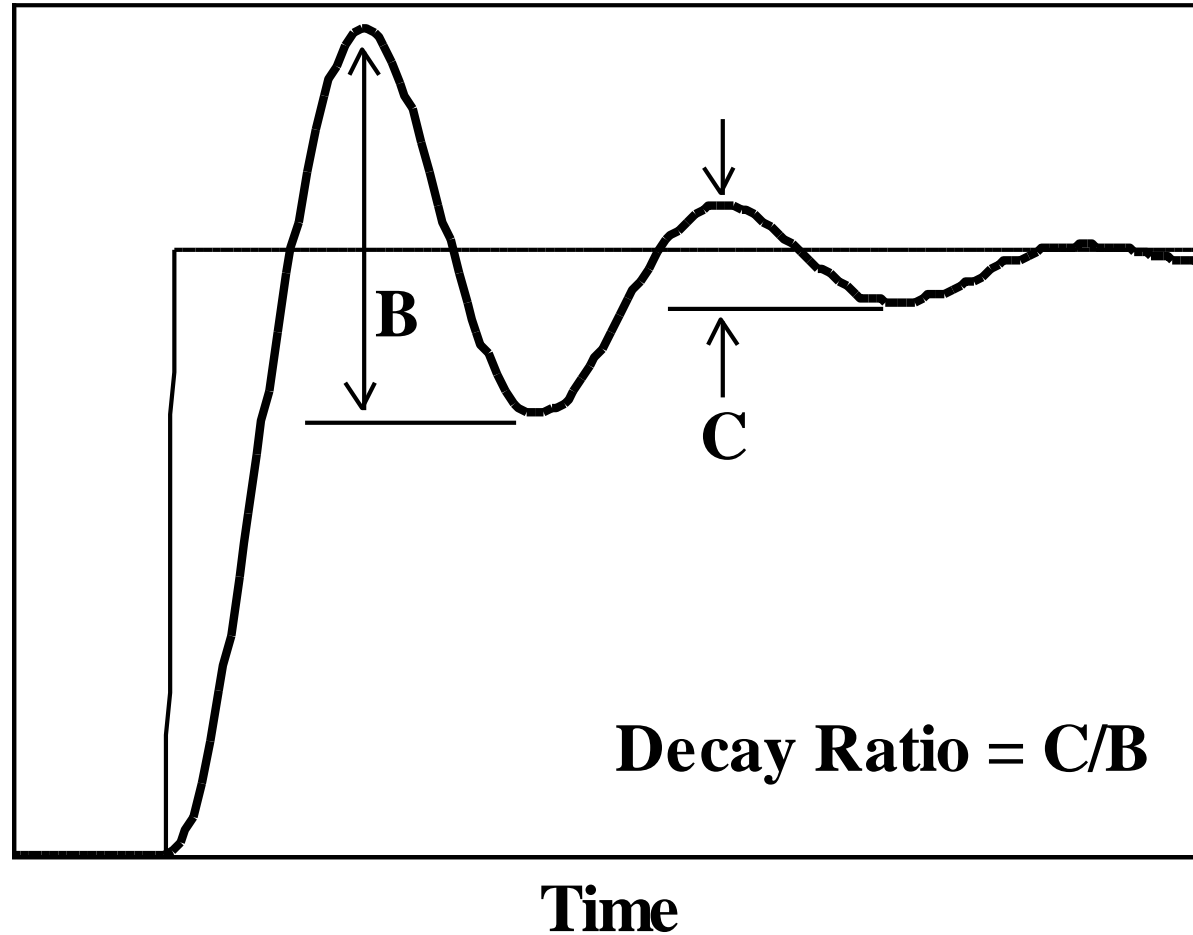
- Είναι η επιλογή των «σωστών» τιμών παραμέτρων του ρυθμιστή.
 - Για PID αυτές είναι K_C , τ_I , και τ_D (και τ_f).
- Επηρεάζει την απόδοση του ρυθμιστή.
 - Πόση είναι η ρυθμιστική απόκλιση, η υπέρβαση, η ταλάντωση
- Επηρεάζει την αξιοπιστία του ρυθμιστή.
 - Αντέχει θόρυβο, διαφορά μοντέλου/διεργασίας
- Η βαθμονόμηση άρα είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ απόδοσης και αξιοπιστίας.

Κριτήρια βαθμονόμησης



- Γενικά κριτήρια (που πρέπει ο ρυθμιστής να ικανοποιεί)
 - Ελαχιστοποιεί την μεταβλητότητα της ρυθμιζόμενης μεταβλητής (δλδ απόδοση)
 - Παραμένει ευσταθής για την χειρότερη διαταραχή (δλδ, αξιοπιστία)
 - Αποφεύγει υπερβολική μεταβλητότητα στην χειριζόμενη μεταβλητή
- Συγκεκριμένα κριτήρια
 - Λόγος απόσβεσης (decay ratio)
 - Ελαχιστοποίηση χρόνου απόκρισης (settling time)

Λόγος απόσβεσης σε ταλαντωτική απόκριση



Αξιολόγηση επίδοσης ρυθμιστή



- Στατιστικές επίδοσης (IAE, ISE, etc.) που χρησιμοποιούνται σε μελέτες προσομοίωσης.
- Τυπική απόκλιση από το σημείο ρύθμισης που είναι ένα μέτρο της μεταβλητότητας της ρυθμιζόμενης μεταβλητής.
- Διαγράμματα SPC που απεικονίζουν την ανάλυση της σύνθεσης του προϊόντος μαζί με τα ανώτερα και κατώτατα όριά του

$$IAE: \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad ITAE: \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

$$ISE: \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad ITSE: \int_0^{\infty} t e(t)^2 dt$$

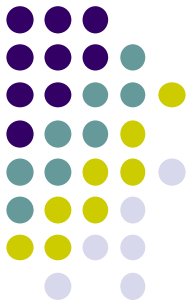
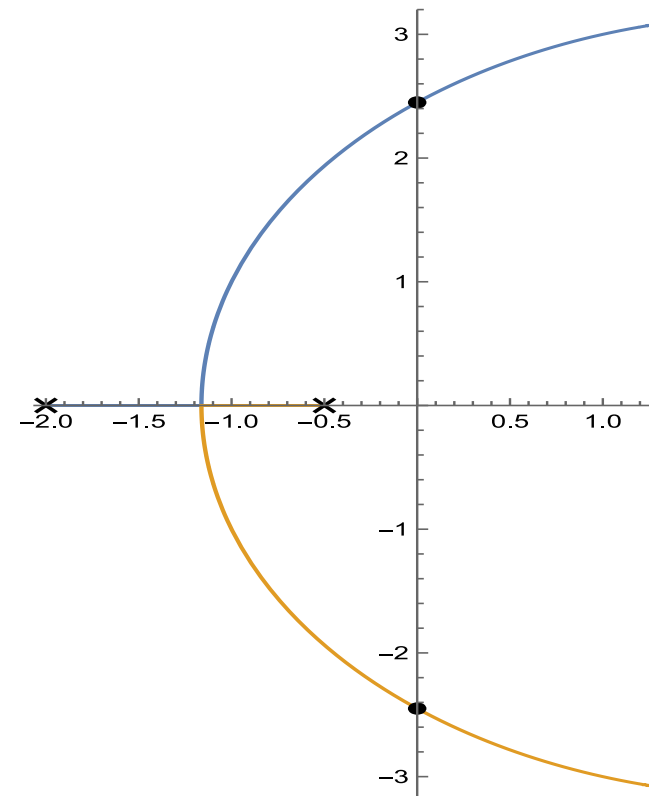
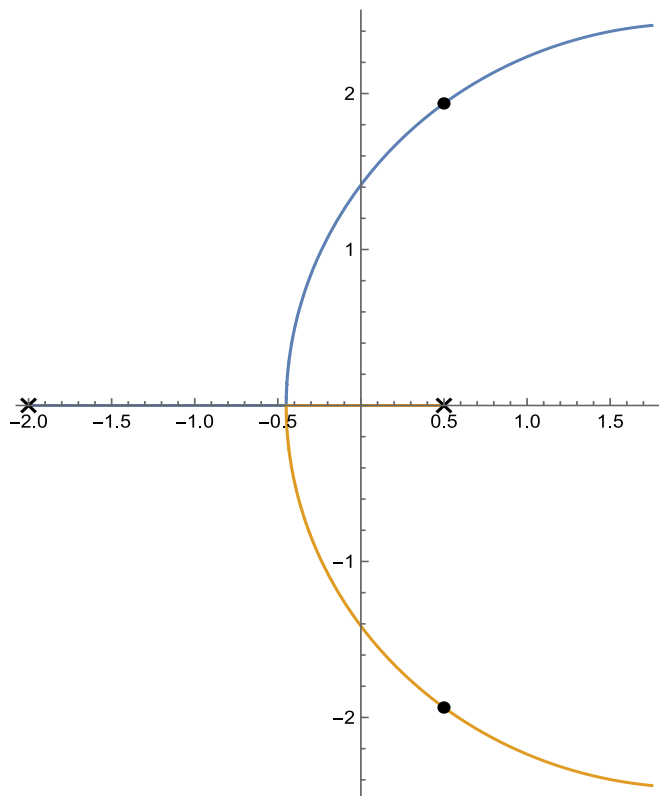
Βαθμονόμηση μέσω τοποθέτησης πόλων



- Ένας γενικευμένος ρυθμιστής (δηλαδή, όχι PID) μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τοποθέτηση πόλων.
- Οι γενικευμένοι ελεγκτές συνήθως δεν χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία σε επίπεδο διεργασίας επειδή
 - Τα μοντέλα διεργασιών δεν είναι συνήθως διαθέσιμα.
 - Ο PID είναι μια τυπική επιλογή ενσωματωμένη σε DCS.

Βαθμονόμηση μέσω τοποθέτησης πόλων

- Βασίζεται στο μοντέλο της διεργασίας
- Επιλέξτε μια επιθυμητή δυναμική απόκριση κλειστού βρόχου και υπολογίστε τις αντίστοιχες παραμέτρους.
 - Το διάγραμμα πόλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση P.
 - Συνήθως τα τ_I, τ_d ορίζονται αρχικά σε $\infty, 0$ αντίστοιχα.

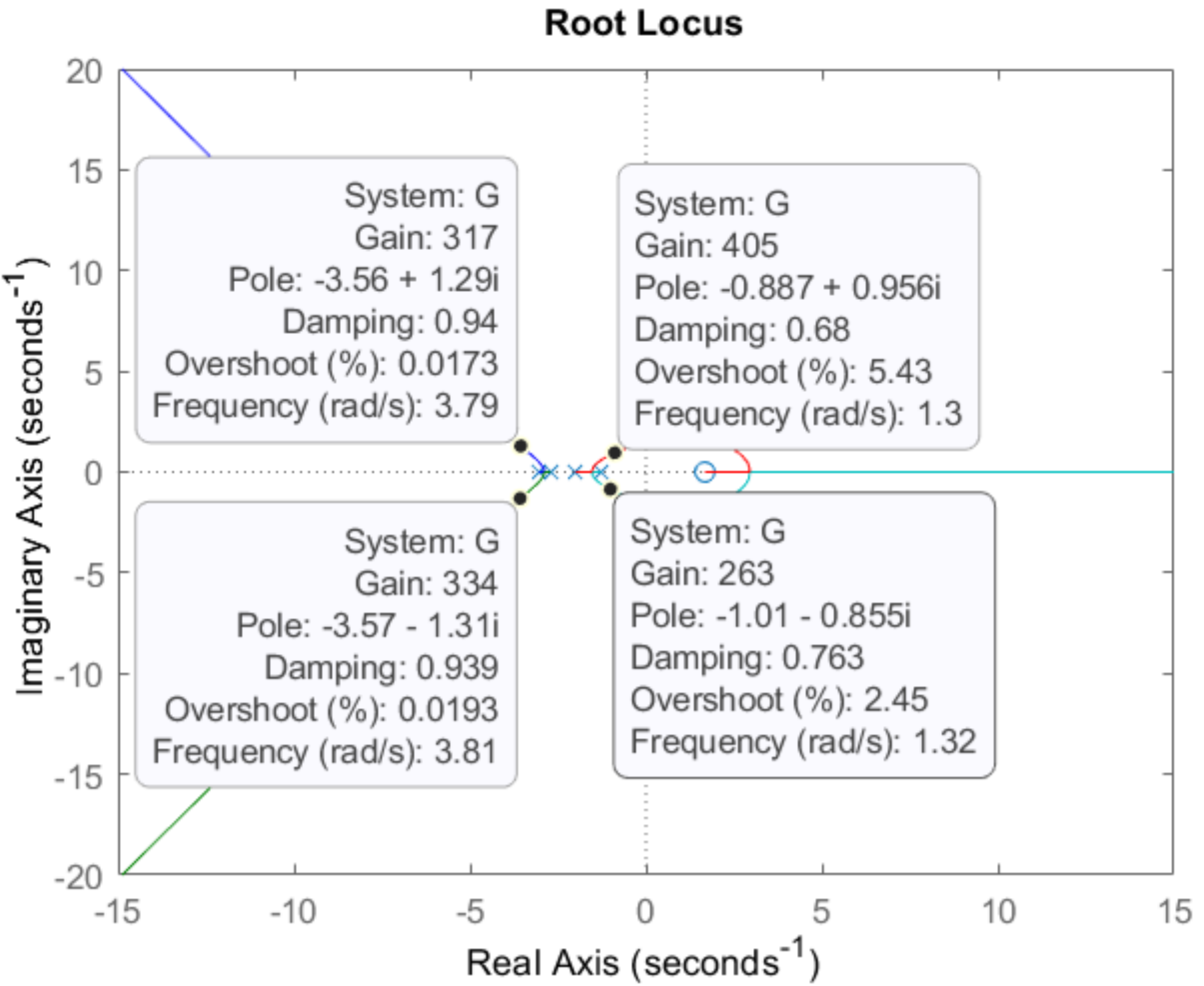
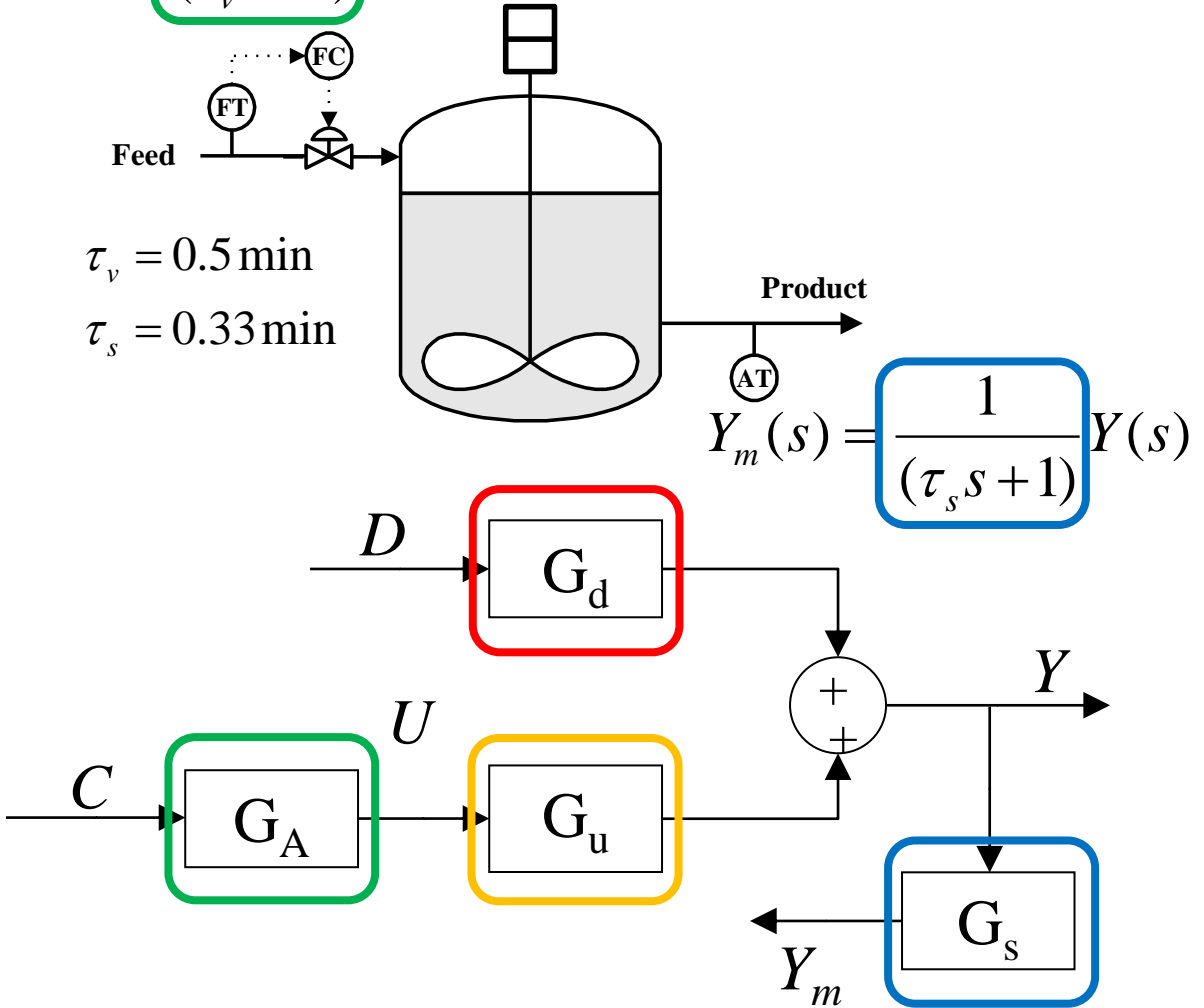




Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου

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

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

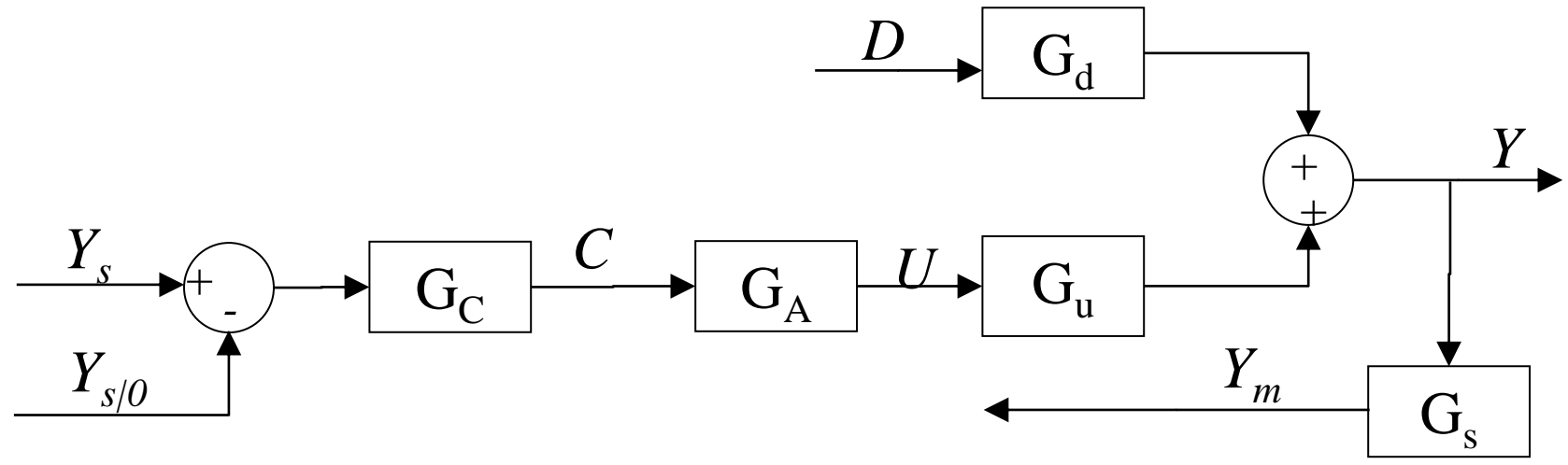
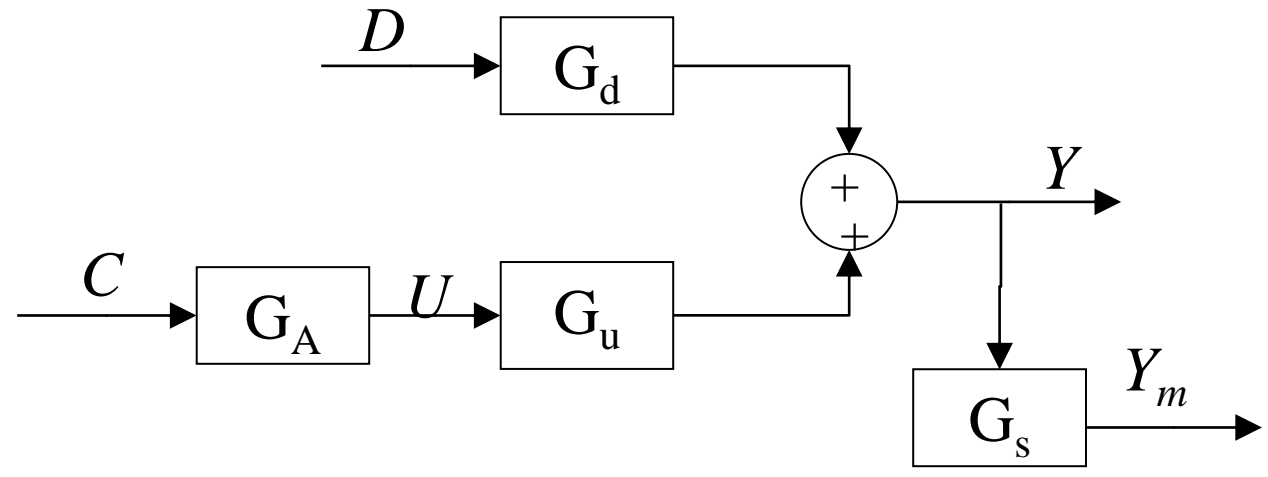
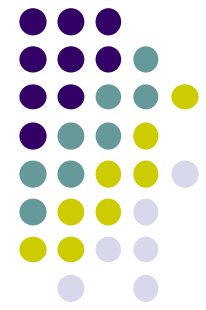


Κλασσικές μέθοδοι βαθμονόμησης

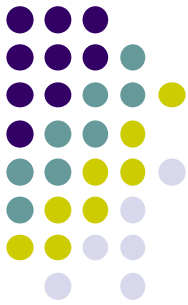


- Διάφορες μέθοδοι βασιζόμενες σε βιομηχανική εμπειρία:
 - Π.χ. Cohen-Coon, Ziegler-Nichols, Cianione-Marlin, και πολλές άλλες.
- Συνήθως βασίζονται στην ύπαρξη ενός μοντέλου 1^{ης} τάξης της διεργασίας (ένα FODS)
 - Στις περισσότερες περιπτώσεις στην βιομηχανία, ο χρόνος που απαιτείται για την ανάπτυξη του μοντέλου, ο ρυθμιστής θα μπορούσε να έχει βαθμονομηθεί αρκετές φορές χρησιμοποιώντας άλλες τεχνικές.
 - Βασίζονται σε ένα προκαθορισμένο κριτήριο επίδοσης (e.g., QAD)
- Υπάρχουν μέθοδοι για να βρεθούν εμπειρικά οι βασικές παράμετροι K_c, τ_I, τ_D
 - Υποθέτουν ότι δεν υπάρχει θόρυβος στη μέτρηση

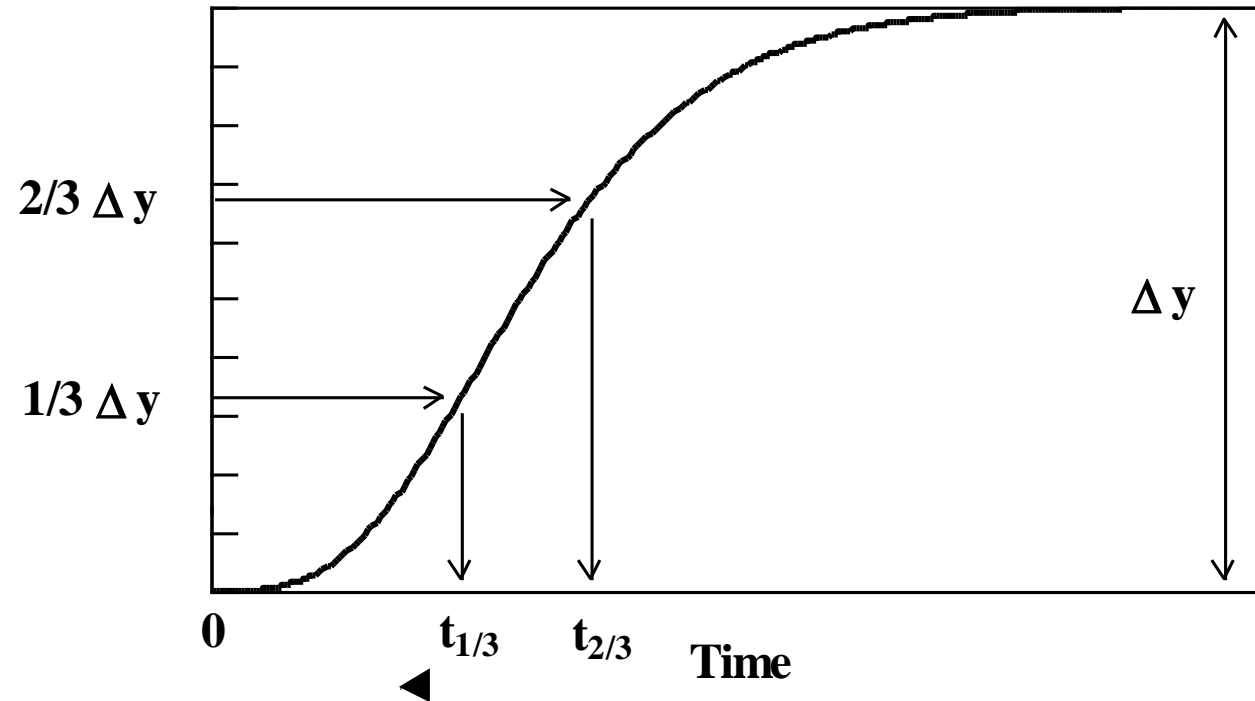
Βαθμονόμηση μέσω ΔΒΔ ανοικτού βρόχου



Αναγνώριση παραμέτρων FODS



$$Y_m(s) = \frac{K_p e^{-\theta_p s}}{\tau_p s + 1} C(s)$$



- Προσδιορίστε το χρόνο έως το ένα τρίτο της συνολικής αλλαγής και το χρόνο έως τα δύο τρίτα της συνολικής αλλαγής μετά από μια αλλαγή εισόδου

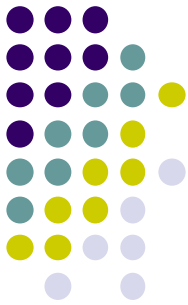
- Παράμετροι FODS: $\tau_p = \frac{t_{2/3} - t_{1/3}}{0.7}$ $\theta_p = t_{1/3} - 0.4 \tau_p$ $K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u}$

Βαθμονόμηση μέσω τοποθέτησης πόλων

- Βασίζονται στο FODS μοντέλο της διεργασίας και προσέγγιση Padé
- Επιλέξτε μια επιθυμητή δυναμική απόκριση κλειστού βρόχου και υπολογίστε τις αντίστοιχες παραμέτρους του ρυθμιστή.
- Η εφαρμογή της μεθόδου τοποθέτησης των πόλων δείχνει ότι ο συντελεστής απόσβεσης κλειστού βρόχου και η σταθερά χρόνου είναι αλληλεξαρτώμενες.
- Επομένως, ο λόγος απόσβεσης είναι ένα λογικό κριτήριο βαθμονόμησης.
 - Root-locus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της κατάλληλης τιμής ενίσχυσης του ρυθμιστή.



Βαθμονόμηση μέσω παραμέτρων FODS



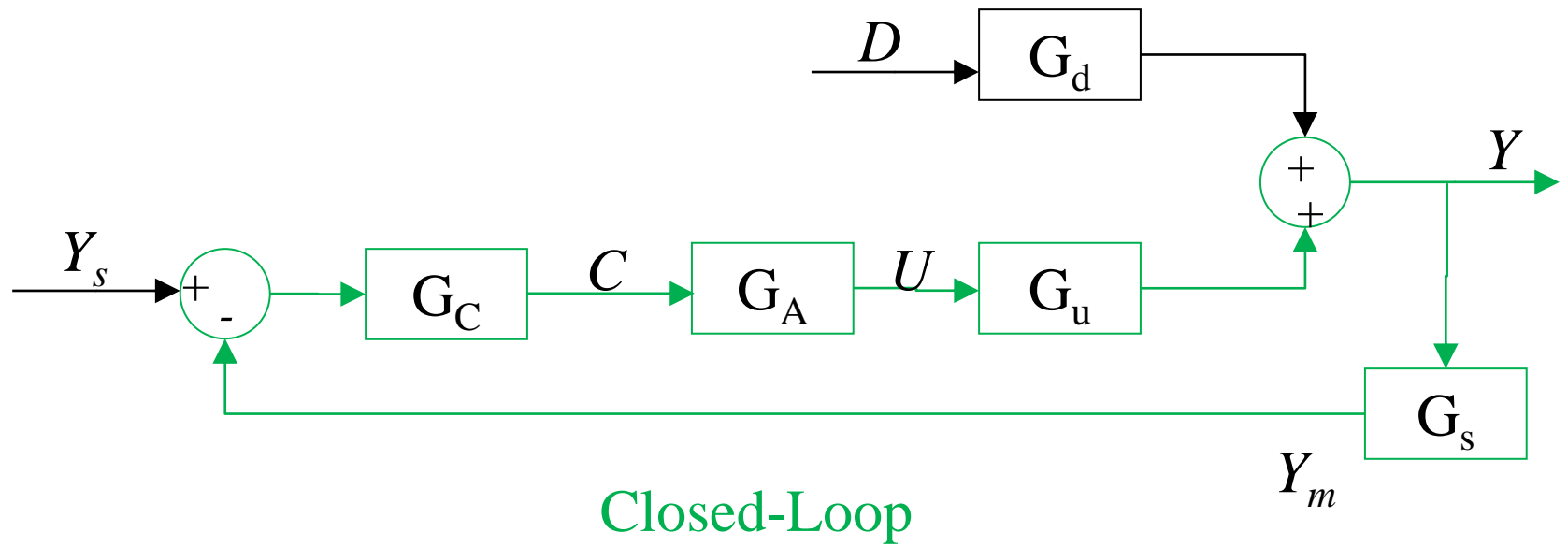
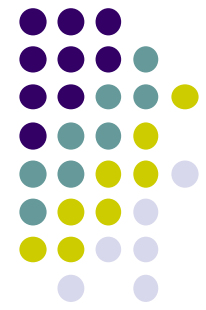
- Απενεργοποιήστε την ολοκληρωτική και διαφορική δράση:
 $\tau_I = \infty, \tau_d = 0$.
- Θέστε $K_C = 1$.
- Δημιουργήστε την καμπύλη απόκρισης. Βρείτε τ_p, θ_p, K_p
- Μέθοδος βαθμονόμησης Cohen-Coon

$$P: K_C = \frac{1.03}{K_p} \left(\frac{\tau_p}{\theta_p} + 0.34 \right)$$

$$PI: K_C = \frac{0.9}{K_p} \left(\frac{\tau_p}{\theta_p} + 0.092 \right) \quad \tau_I = 3.33\theta_p \frac{\tau_p + 0.092\theta_p}{\tau_p + 2.22\theta_p}$$

$$PID: K_C = \frac{1.35}{K_p} \left(\frac{\tau_p}{\theta_p} + 0.185 \right) \quad \tau_I = 2.5\theta_p \frac{\tau_p + 0.185\theta_p}{\tau_p + 0.611\theta_p} \quad \tau_D = 0.37\theta_p \frac{\tau_p}{\tau_p + 0.185\theta_p}$$

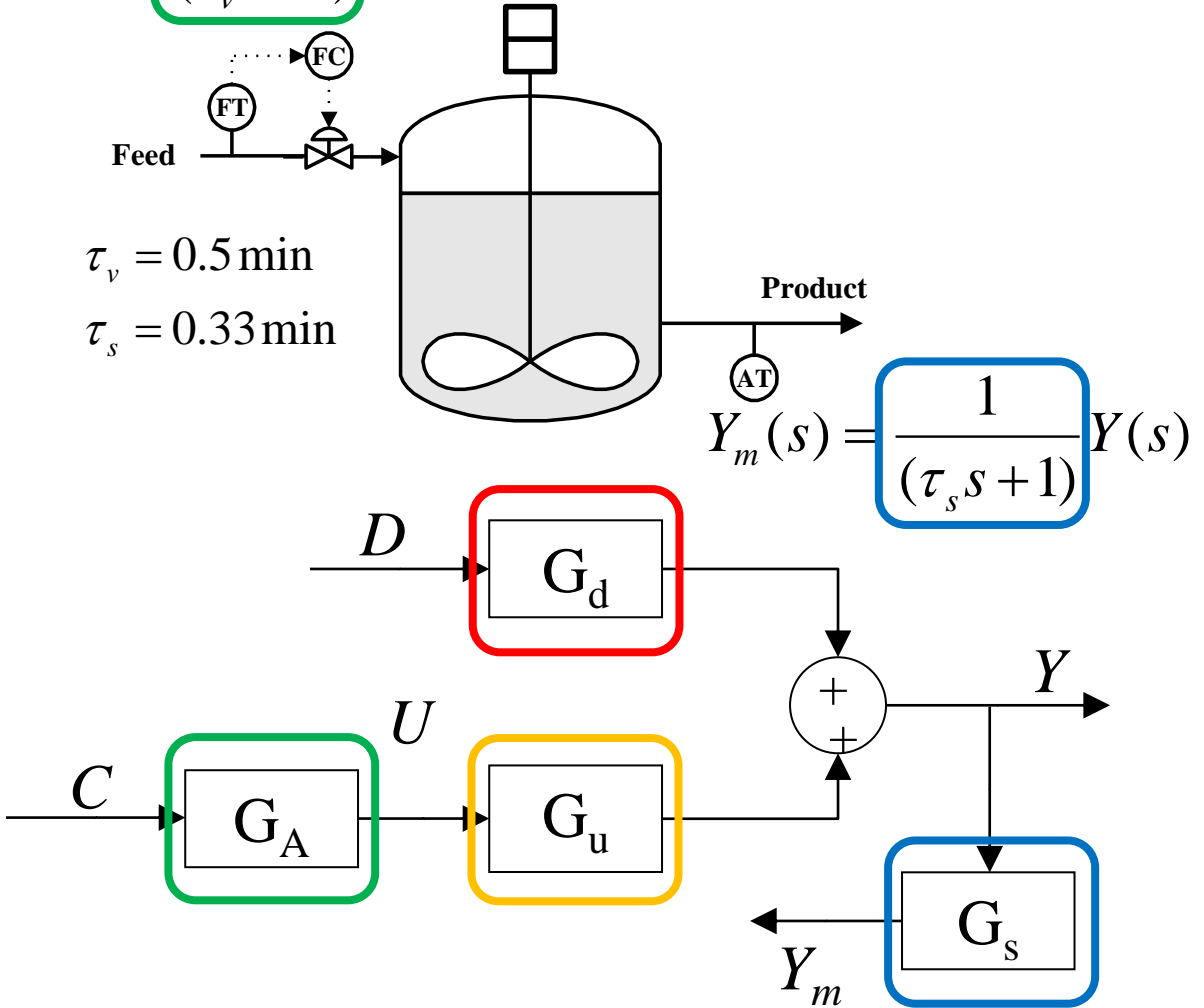
Κλείσιμο βρόγχου



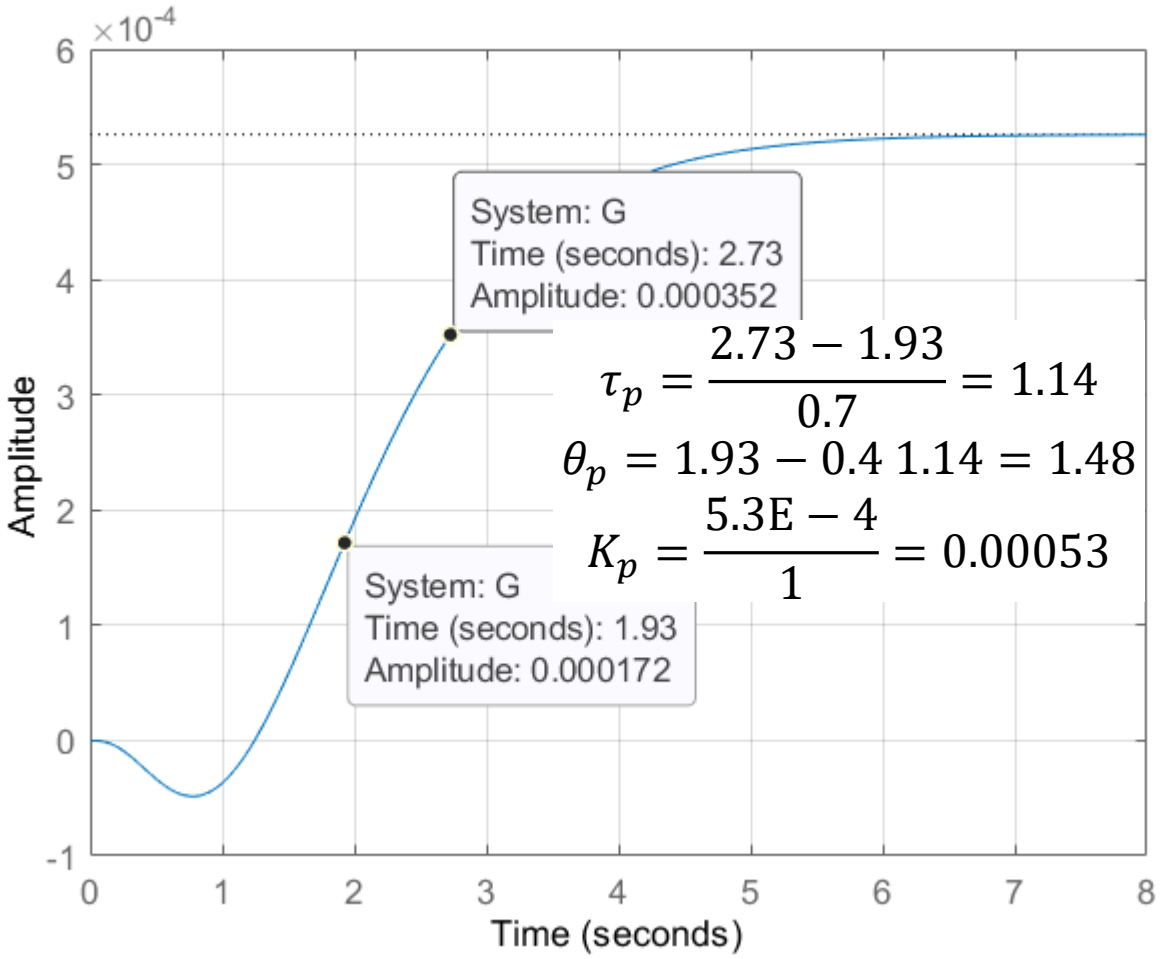
Αντιδραστήρας Συνεχούς Έργου



$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s) \quad Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$



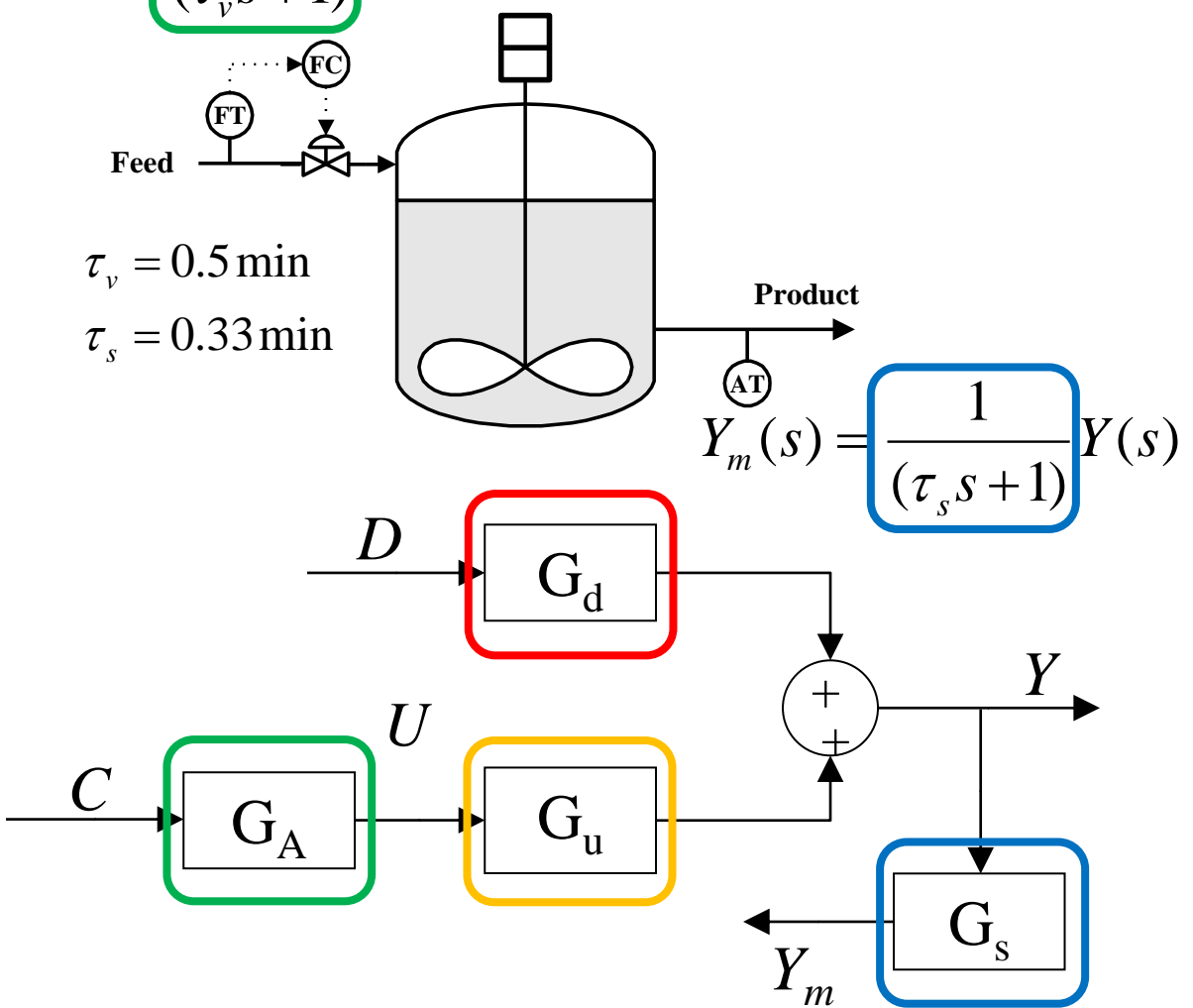
Step Response





Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου

$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s) \quad Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$



Βαθμονόμηση τυπικού ρυθμιστή

Βήμα 1°: Άνοιγμα βρόχου (ρυθμιστής σε manual)

Βήμα 2°: Υπολογισμός παραμέτρων FODS

$$\tau_p = 1.14, \theta_p = 1.47, K_p = 0.00053$$

Βήμα 3°: Χρήση εξισώσεων Cohen-Coon

$$K_c = 2168$$

ή

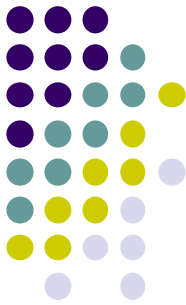
$$K_c = 1473, \tau_I = 1.42$$

ή

$$K_c = 2546, \tau_I = 2.55, \tau_D = 0.44$$

Βήμα 4°: Κλείσιμο βρόχου (ρυθμιστής σε auto)

Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου



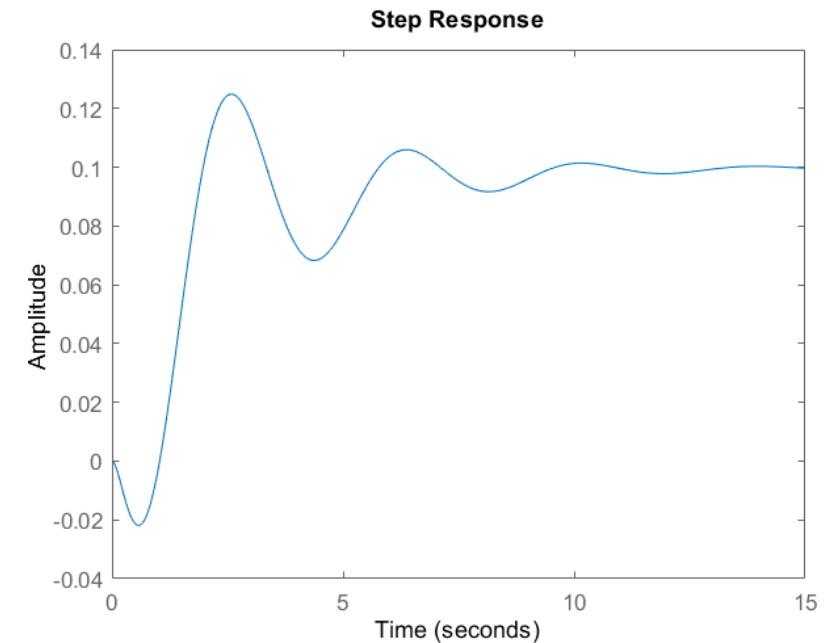
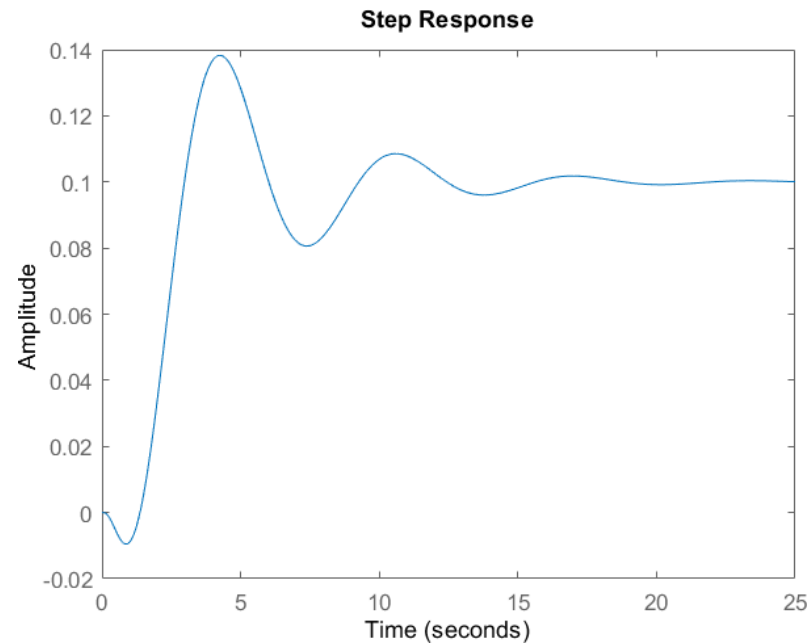
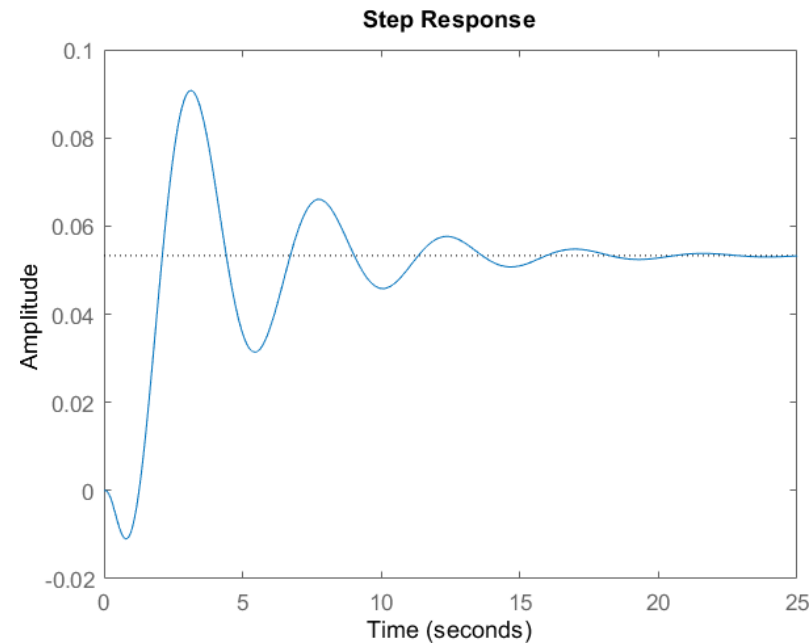
Στο μοντέλο της διεργασίας
Από Cohen-Coon: $K_c = 2168$

ή

$K_c = 1473, \tau_I = 1.42$

ή

$K_c = 2546, \tau_I = 2.55, \tau_D = 0.44$



Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου



Από Cohen-Coon

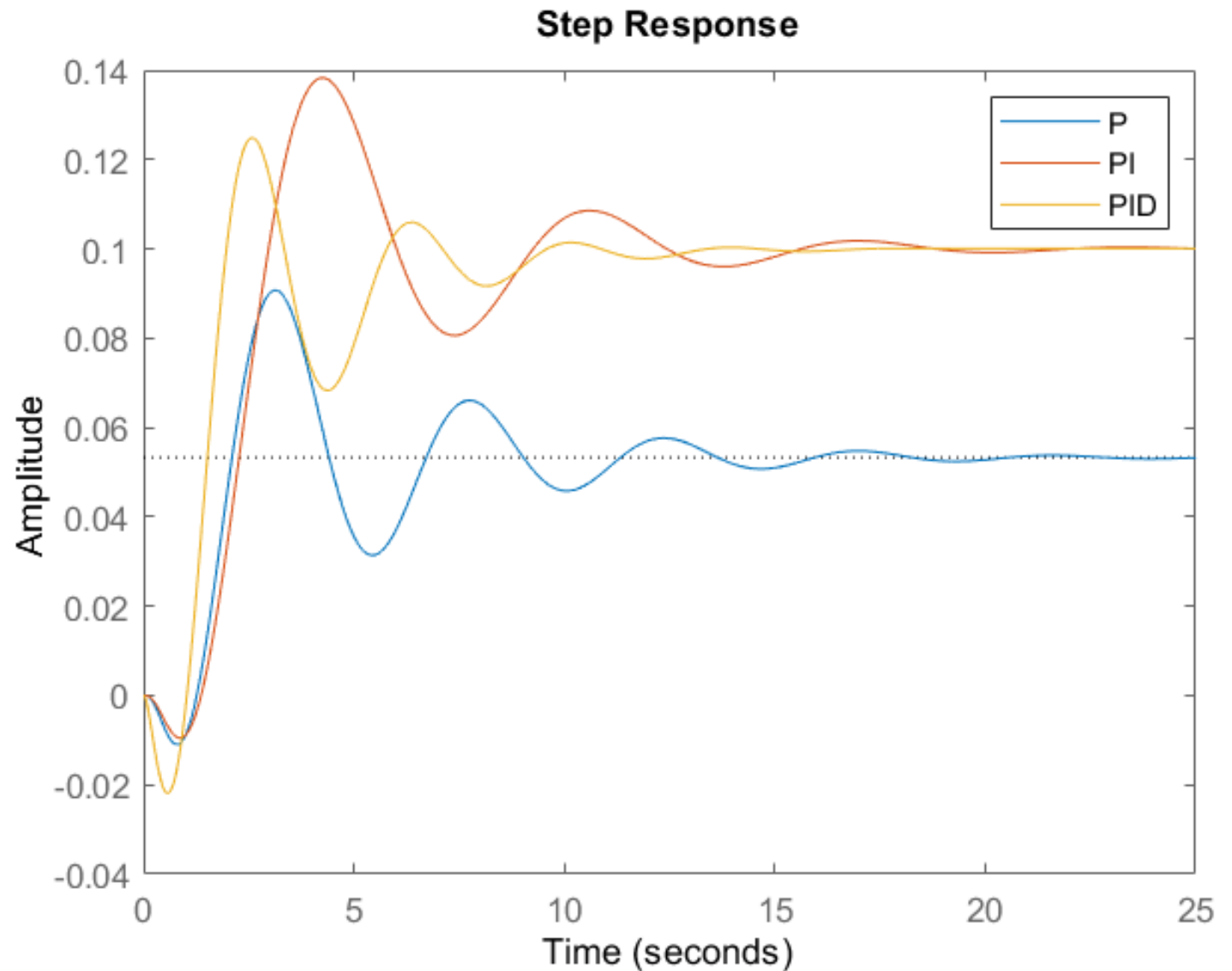
$$K_c = 2168$$

ή

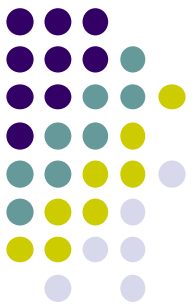
$$K_c = 1473, \tau_I = 1.42$$

ή

$$K_c = 2546, \tau_I = 2.55, \tau_D = 0.44$$



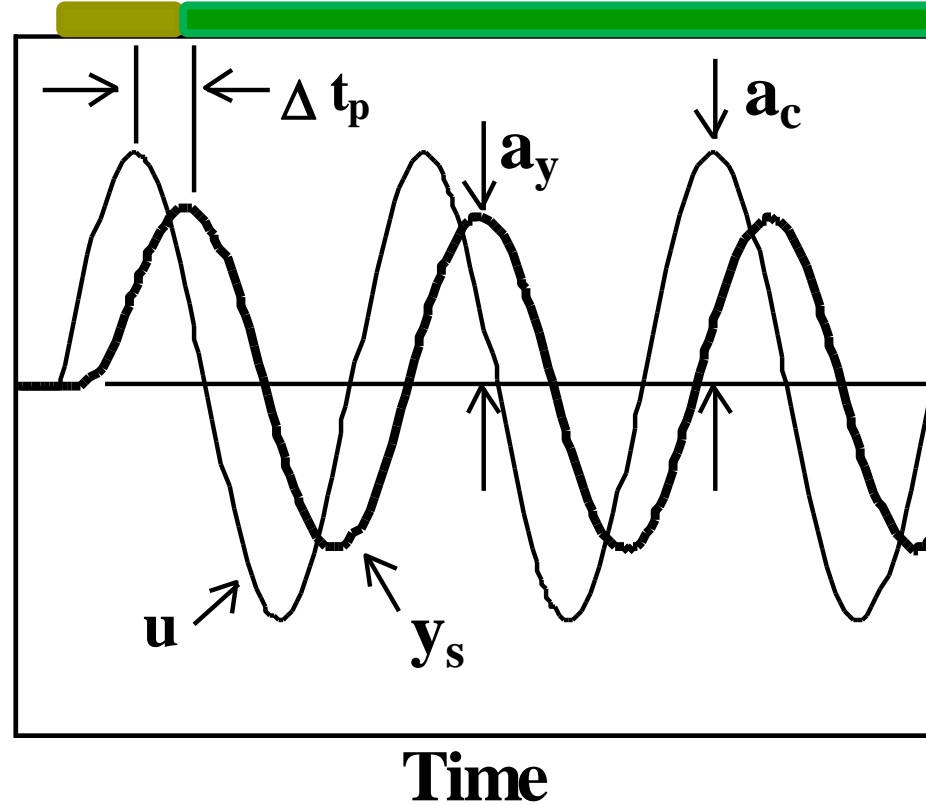
Βαθμονόμηση μέσω Ανάλυσης συχνοτικής απόκρισης (ΑΣΑ)



δυναμική συμπεριφορά:

“Μεταβατική”

“Μόνιμη”



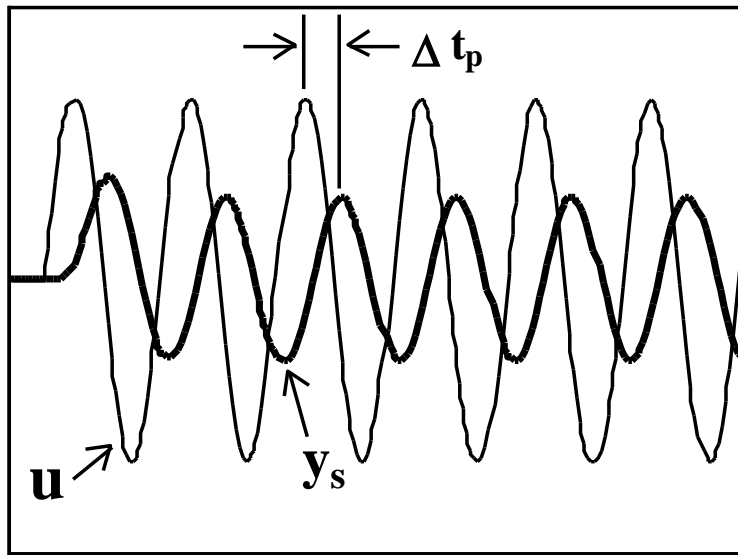
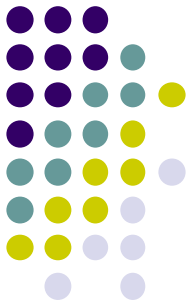
Λόγος Ενίσχυσης

$$A_r = \frac{a_y}{a_c}$$

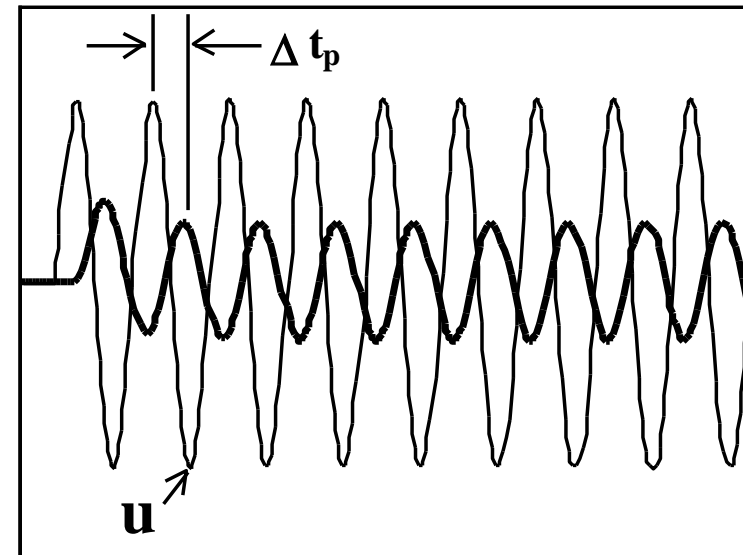
$$\phi = \frac{\omega \Delta t_p}{2\pi} \times 360^\circ$$

Φασική υστέρηση
ή
Υστέρηση φάσης

Η επίδραση της συχνότητας στα A_r και ϕ

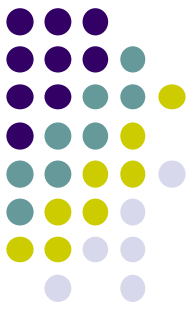


Time



Time

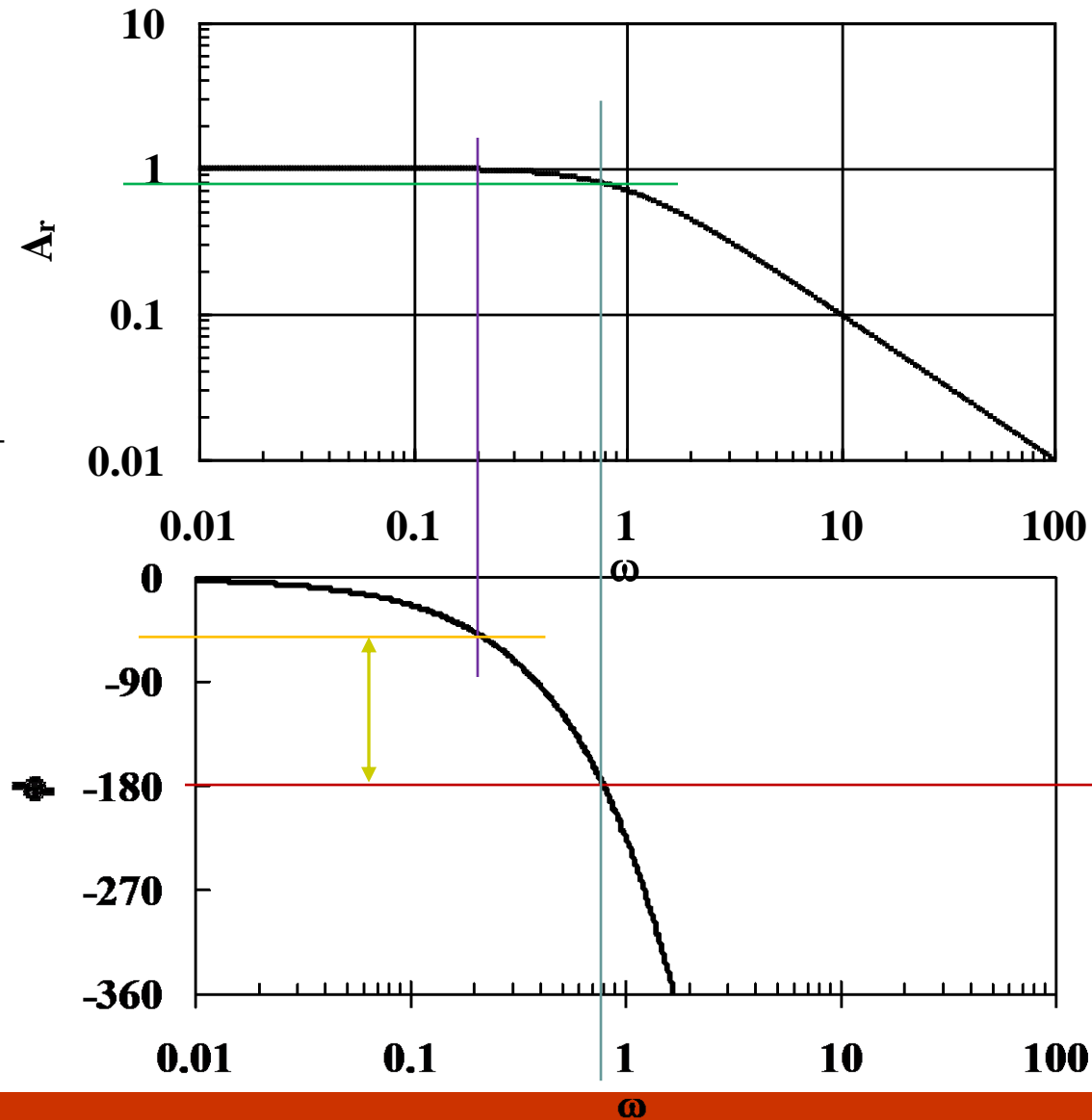
Διάγραμμα Bode: Σημαντικές παράμετροι



$$G_p(i\omega) = R(\omega) + iI(\omega)$$

$$A_r(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)}$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{I(\omega)}{R(\omega)} \right]$$



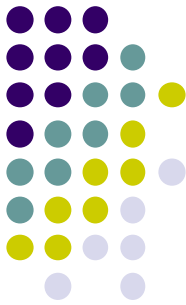
- Κρίσιμη συχνότητα: ω_c
- Κρίσιμος ΛΕ: AR_c
- Περιθώριο ενίσχυσης: $AR_m = 1/AR_c$
- Περιθώριο φάσης: ϕ_m

Κριτήρια ευστάθειας



- Όταν έχουμε επιλέξει τις τιμές των όρων του συστήματος ρύθμισης
- Κριτήριο ευστάθειας Bode: «Ένα σύστημα ρύθμισης είναι ασταθές εάν η συχνотική απόκριση του συστήματος ανοικτού βρόχου παρουσιάζει Λόγο Ενίσχυσης μεγαλύτερο της μονάδας στην συχνότητα για την οποία η καθυστέρηση φάσης είναι -180° .»
 - Η συχνότητα ω_c στην οποία $\varphi = -180$ καλείται κρίσιμη συχνότητα
 - Ο λόγος ενίσχυσης στην κρίσιμη συχνότητα καλείται κρίσιμος, AR_c
- Περιθώριο ενίσχυσης: Μία τυπική προδιαγραφή είναι $AR_m > 1.7$
- Περιθώριο φάσης: Μια τυπική προδιαγραφή είναι $\phi_m > 30^\circ$

Βαθμονόμηση μέσω διαγράμματος Bode



- Απενεργοποιήστε την ολοκληρωτική και διαφορική δράση:
 $\tau_I = \infty, \tau_d = 0.$
- Θέστε $K_C = 1.$
- Δημιουργήστε γράφημα Bode. Βρείτε $K_u = \frac{1}{AR_C}$ $P_u = \frac{2\pi}{\omega_c}$
- Μέθοδος βαθμονόμησης Ziegler-Nichols:

$$P: K_C = \frac{K_u}{2}$$

$$PI: K_C = \frac{K_u}{2.2} \quad \tau_I = \frac{P_u}{1.2}$$

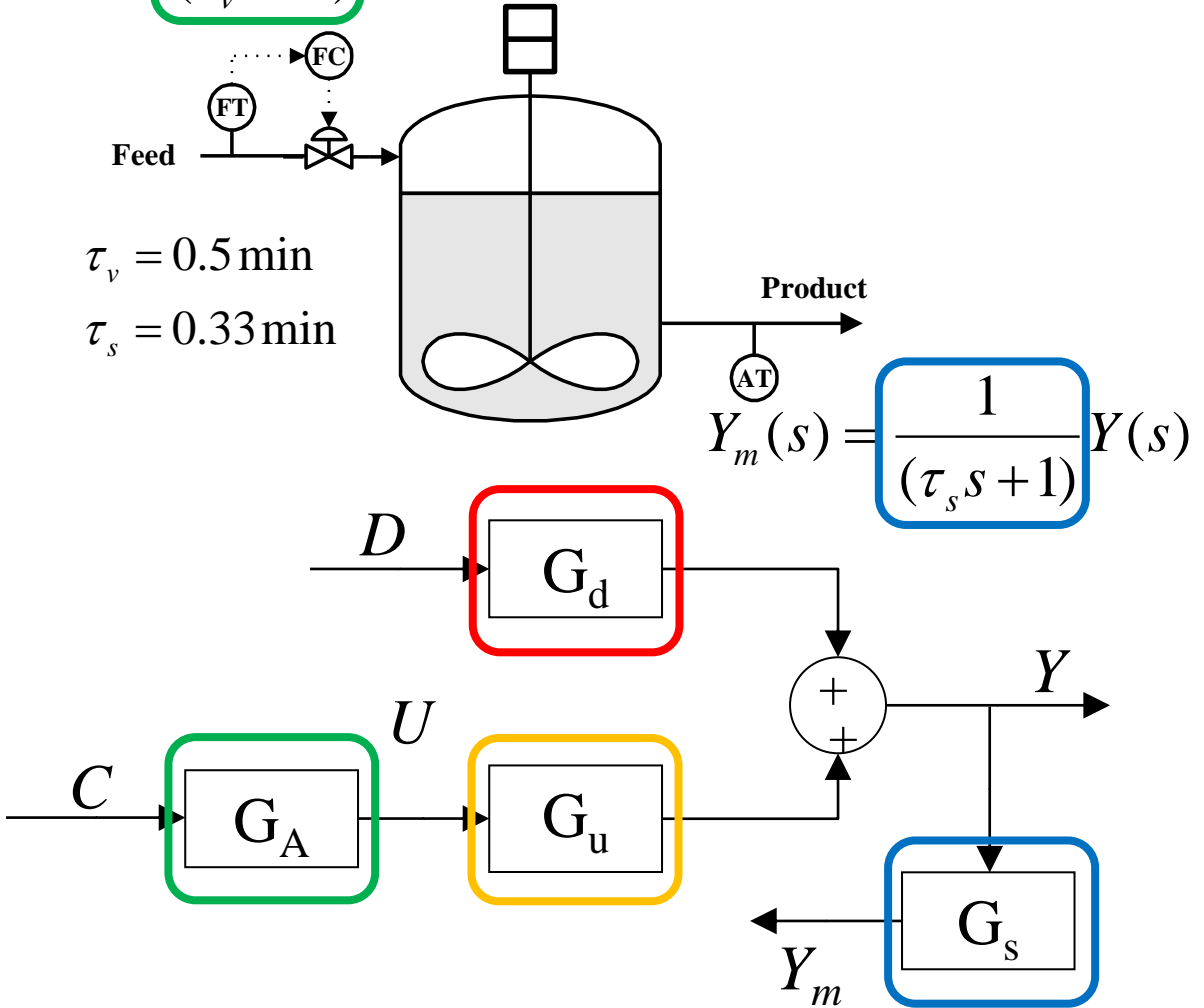
$$PID: K_C = \frac{K_u}{1.66} \quad \tau_I = \frac{P_u}{2} \quad \tau_D = \frac{P_u}{8}$$

Αντιδραστήρας Συνεχούς Έργου

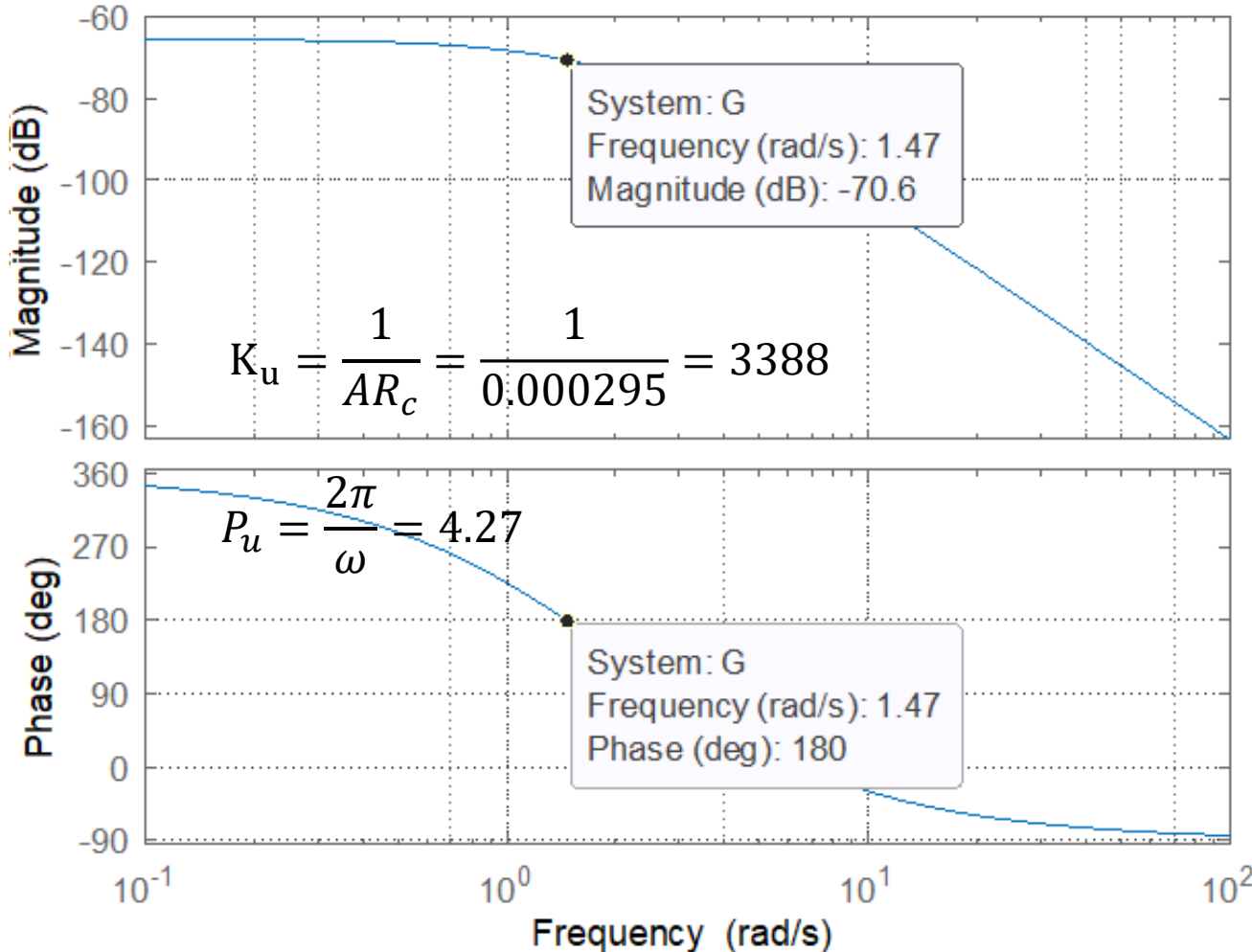


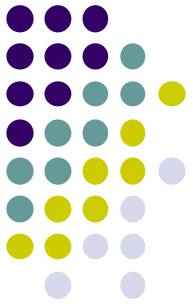
$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$

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



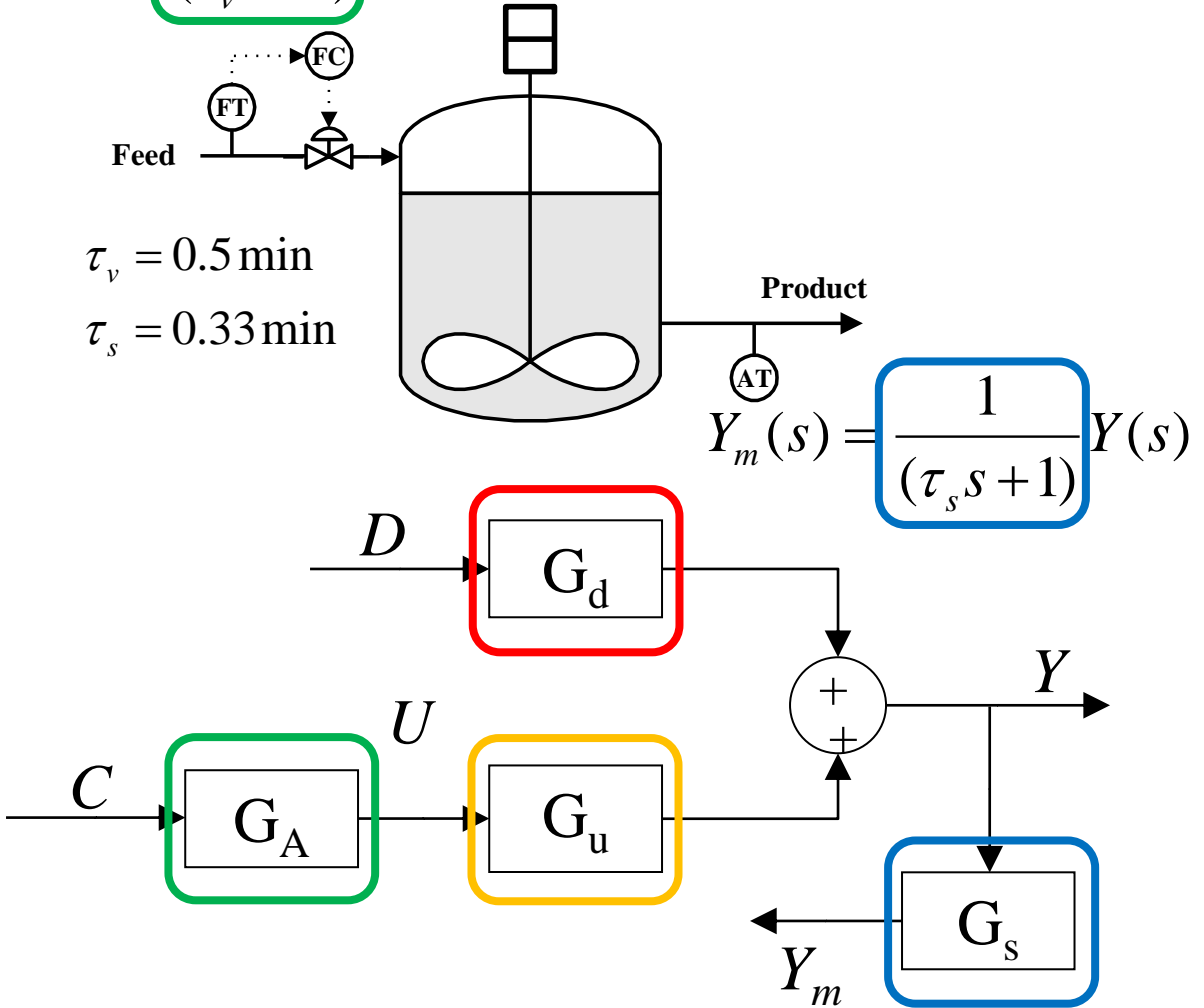
Bode Diagram





Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου

$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s) \quad Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$



$K_u = 3388, P_u = 4.27$
 Από Ziegler-Nichols

$$K_c = 1694$$

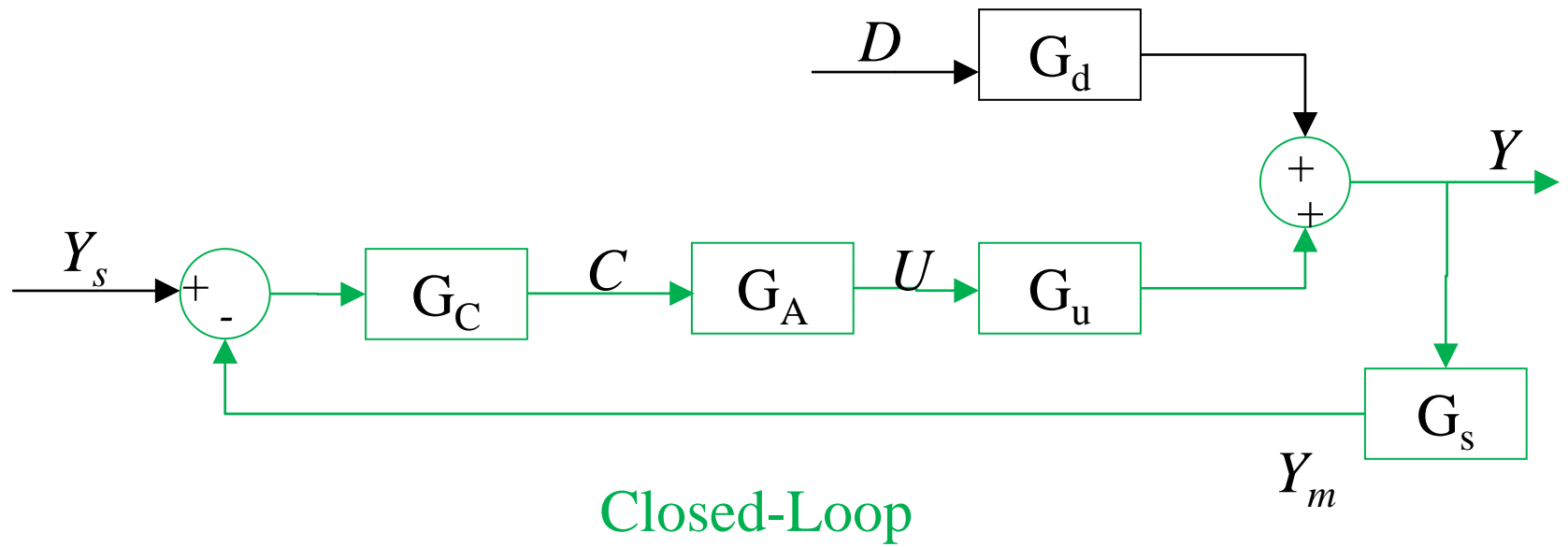
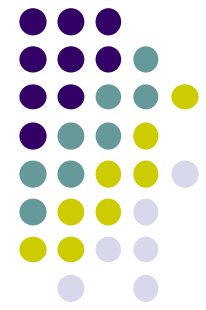
ή

$$K_c = 1525, \tau_I = 3.56$$

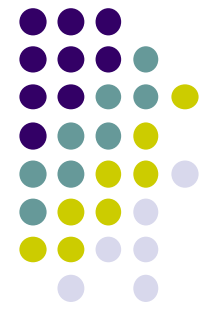
ή

$$K_c = 2033, \tau_I = 2.14, \tau_D = 0.53$$

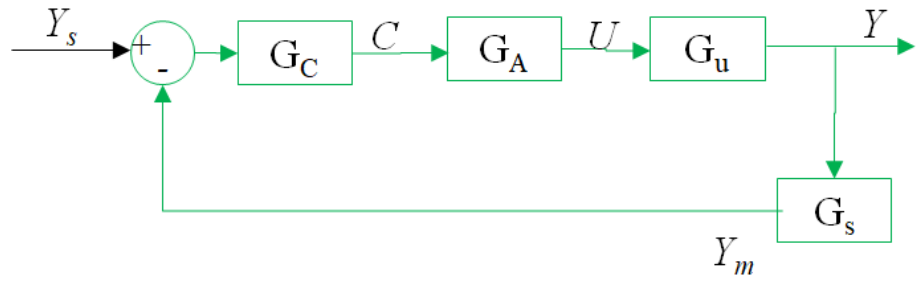
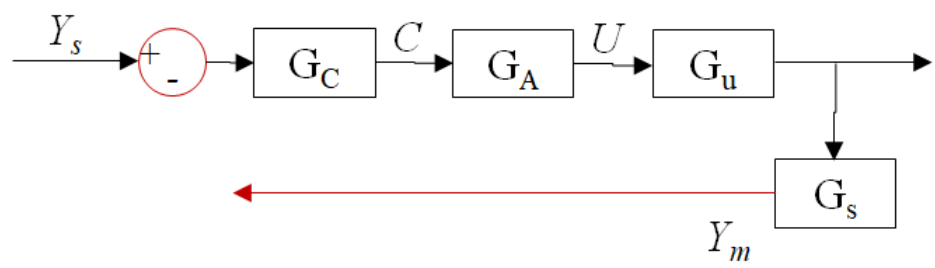
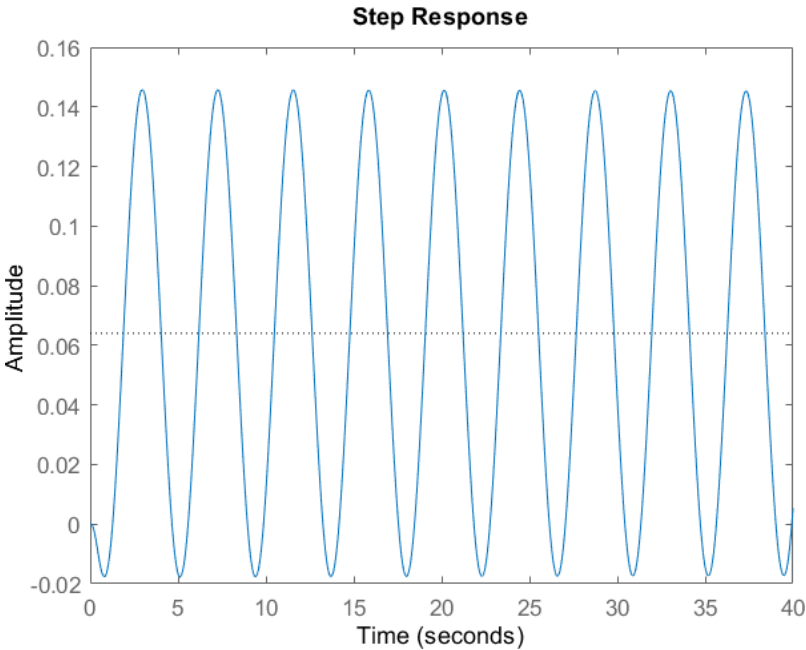
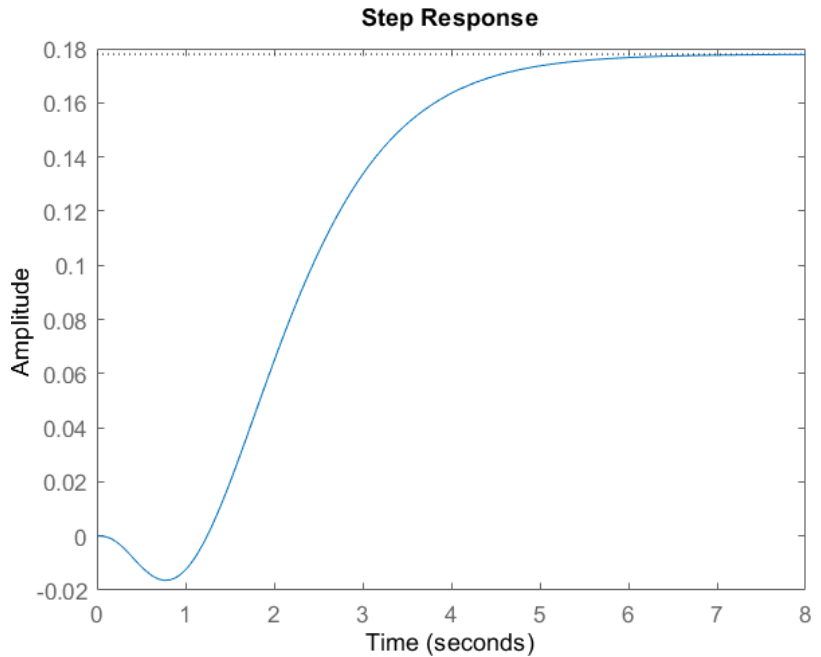
Κλείσιμο βρόγχου



Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου



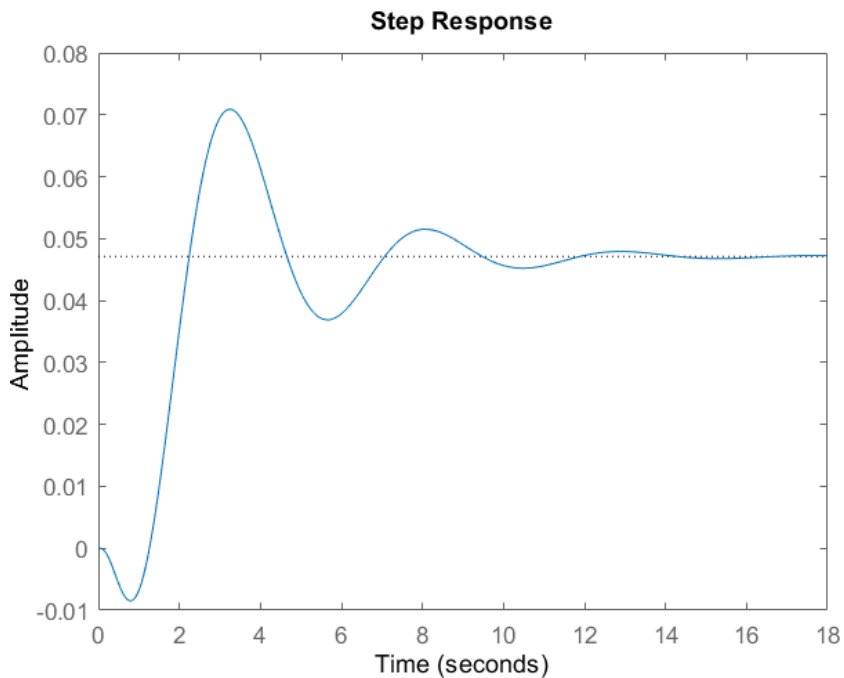
Υπολογίστηκε $K_u = 3388, P_u = 4.27$. Τι συμβαίνει όταν κλείσει ο βρόχος για $K_c = K_u$;



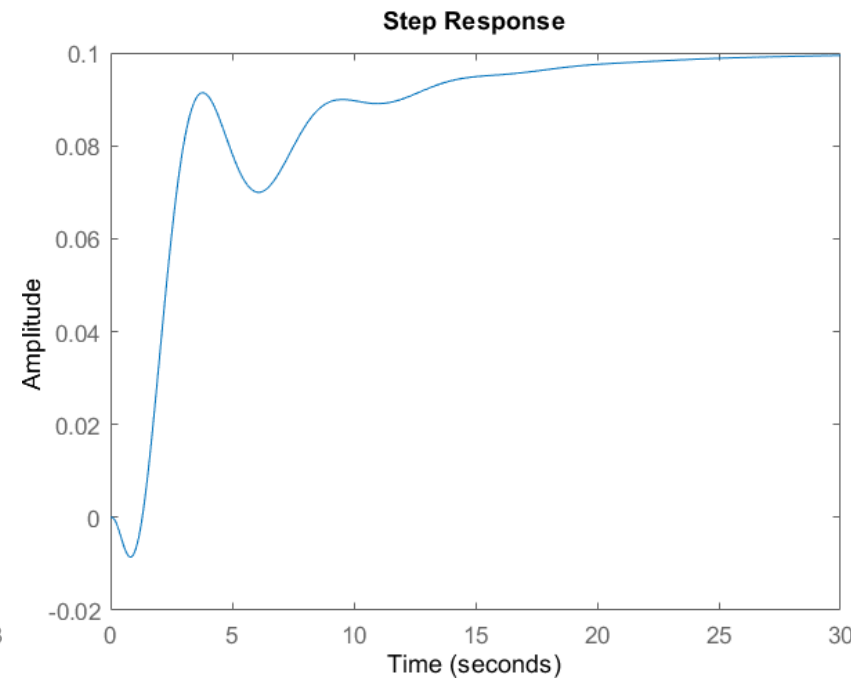
Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου



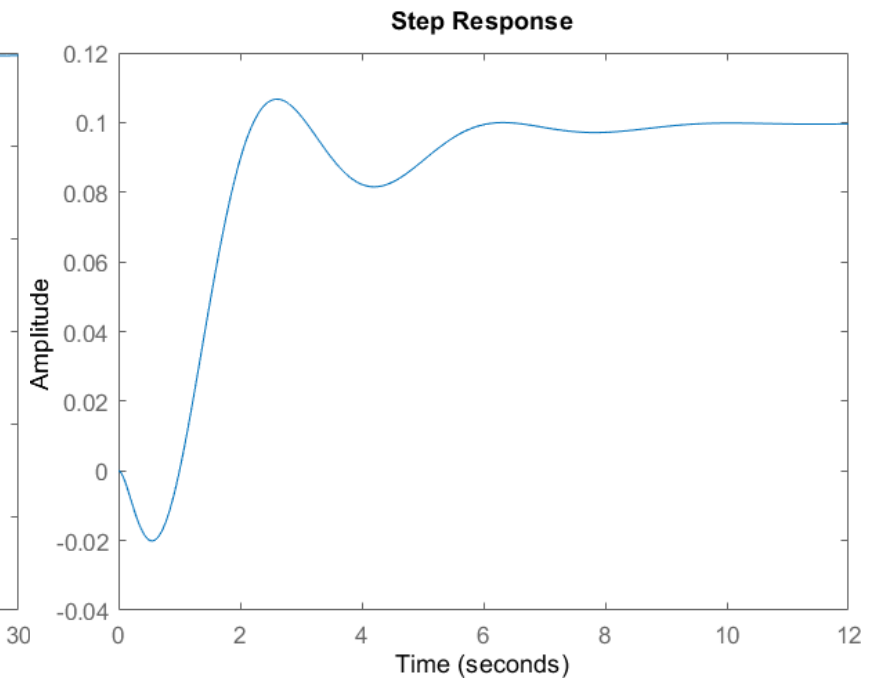
Στο μοντέλο της διεργασίας
Από Ziegler-Nichols: $K_c = 1694$



ή $K_c = 1525, \tau_I = 3.56$



ή $K_c = 2033, \tau_I = 2.14, \tau_D = 0.53$



Αντιδραστήρας Συνεχούς έργου



$$K_u = 3388, P_u = 4.27$$

Από Ziegler-Nichols

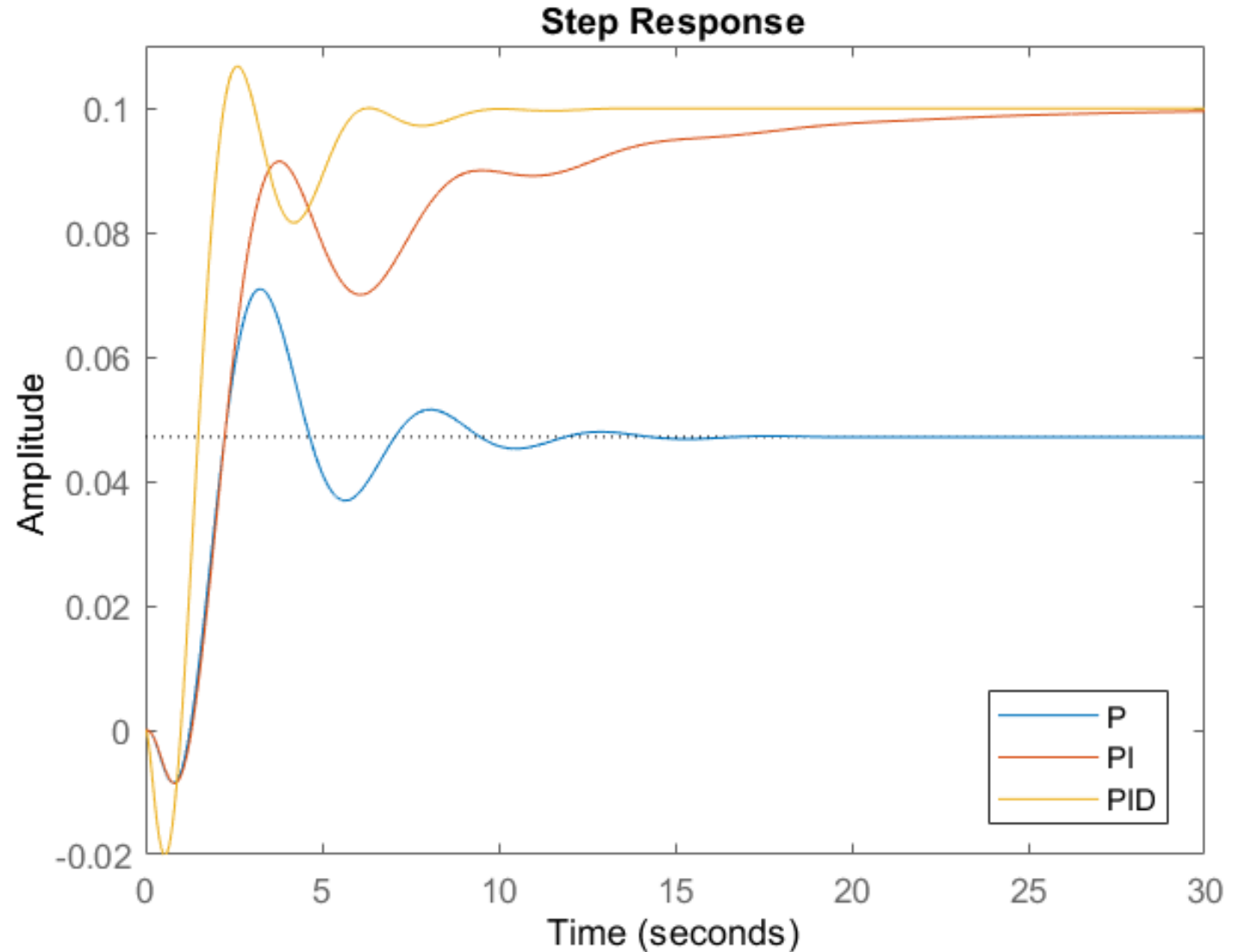
$$K_c = 1694$$

ή

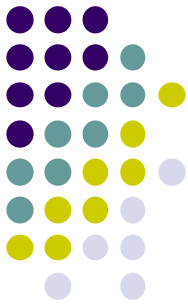
$$K_c = 1525, \tau_I = 3.56$$

ή

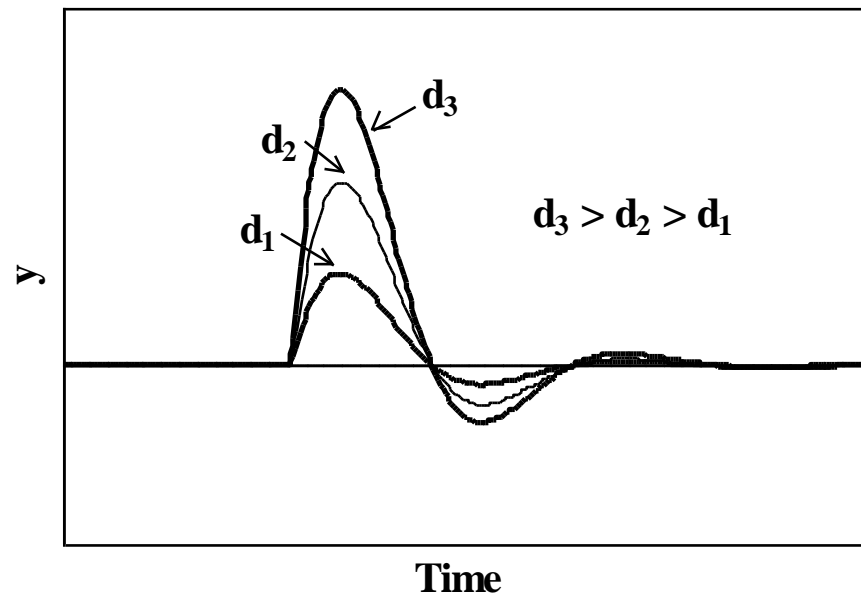
$$K_c = 2033, \tau_I = 2.14, \tau_D = 0.53$$



Αξιοπιστία ρυθμιστή



- Η ικανότητα ενός ρυθμιστή να παραμένει σε ευσταθή λειτουργία με αποδεκτές επιδόσεις παρουσία των χειρότερων διαταραχών που αναμένεται να χειριστεί.



- Ανάλυση της ΣΜ κλειστού βρόχου για διαταραχή δείχνει ότι ο τρόπος της δυναμικής απόκρισης (i.e., λόγος απόσβεσης) δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της διαταραχής.

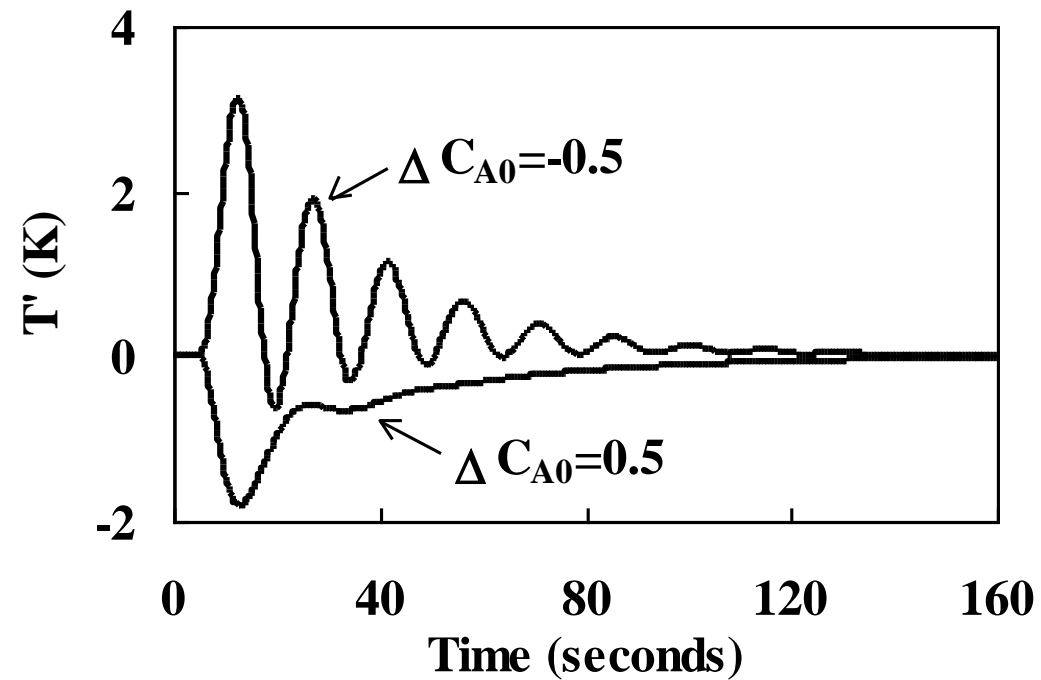
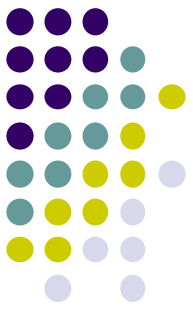
Αξιοπιστία ρυθμιστή



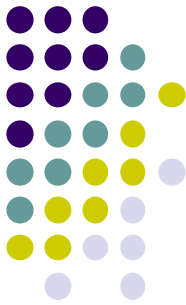
- Γνωρίζουμε από βιομηχανική εμπειρία ότι ορισμένες διαταραχές μεγάλου μεγέθους μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια στους βρόχους ελέγχου.
- Η εξήγηση αυτής της φαινομενικά αντίφασης είναι ότι οι διαταραχές μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στα K_p , τ_p , και θ_p που μια γραμμική ανάλυση δεν εξετάζει.

Παράδειγμα αξιοπιστίας: CSTR with ΔC_{A0}

Upsets

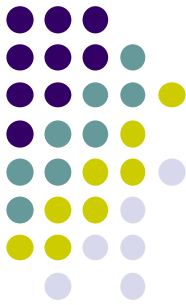


Αξιοπιστία ρυθμιστή



- Καθορίζεται από το συνδυασμό των ακόλουθων παραγόντων
 - Μη γραμμικότητα διεργασίας
 - Τύπο διαταραχής
 - Μέγεθος και διάρκεια διαταραχής
- Εάν η μη γραμμικότητα είναι υψηλή αλλά το μέγεθος της διαταραχής είναι χαμηλό, η αξιοπιστία είναι καλή.
- Εάν το μέγεθος της διαταραχής είναι υψηλό αλλά η μη γραμμικότητα είναι χαμηλή, η αξιοπιστία είναι καλή.

Επιλογή κριτηρίου βαθμολόγησης

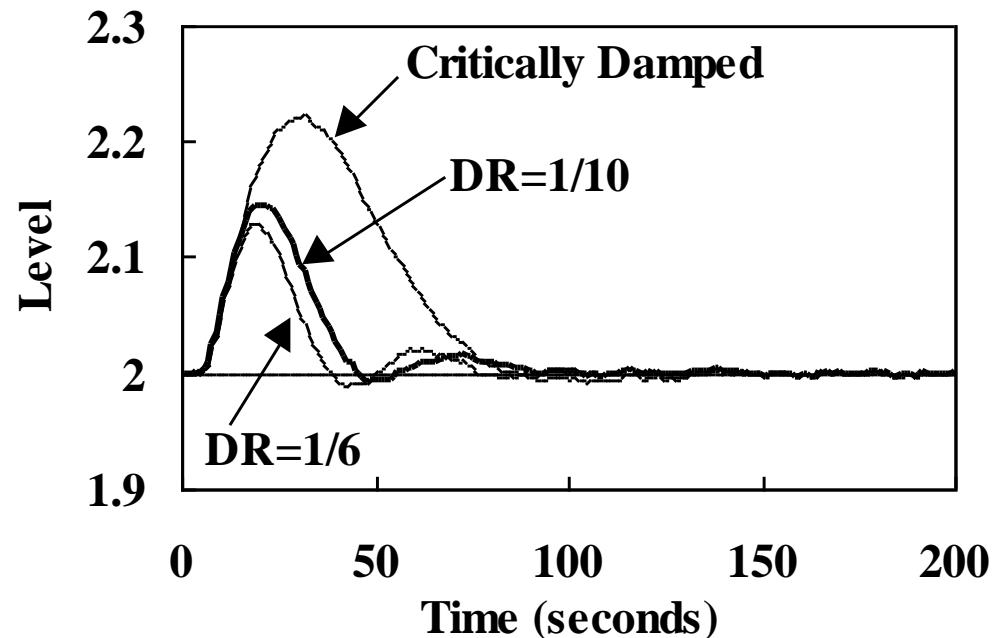


- Πρώτον, με βάση τους γενικούς στόχους της διεργασίας, αξιολογήστε την απόδοση του ρυθμιστή στον εν λόγω βρόχο.
- Εάν ο βρόχος ελέγχου πρέπει να «ξεκουρδιστεί» με βάση τους γενικούς στόχους της διεργασίας, ορίζεται το κριτήριο βαθμολόγησης.
- Εάν ο βρόχος ελέγχου πρέπει να βαθμολογηθεί επιθετικά βασιζόμενοι στους γενικούς στόχους της διεργασίας, το κριτήριο βαθμολόγησης επιλέγεται βάσει συμβιβασμού μεταξύ απόδοσης και αξιοπιστίας.
- Επιλέξτε το κριτήριο βαθμολόγησης (Συνήθως από κρίσιμη απόσβεση έως 1/6 λόγου απόσβεσης) με βάση τα χαρακτηριστικά της διεργασίας:
 - Μη γραμμικότητα διεργασίας
 - Τύποι και μεγέθη διαταραχών

Επίδραση κριτηρίου βαθμονόμησης στην επίδοση ρυθμιστή



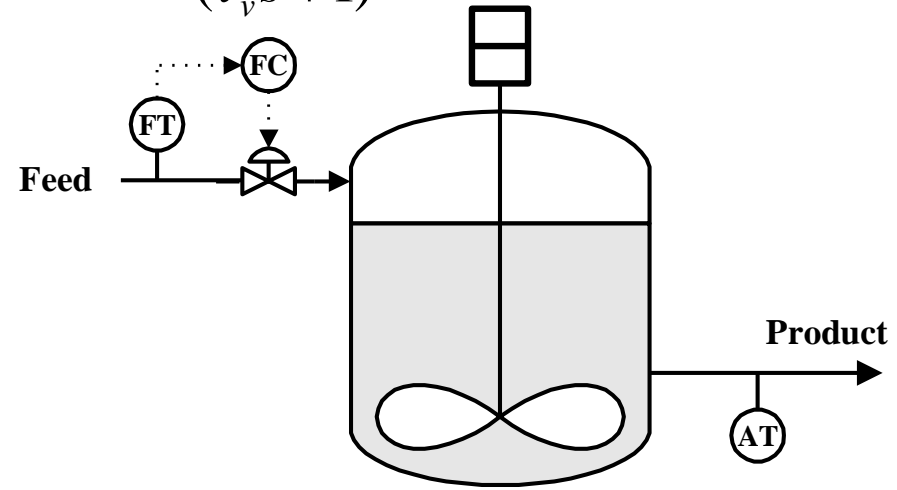
- Όσο πιο επιθετικό είναι το κριτήριο ελέγχου, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του ρυθμιστή, αλλά και τόσο πιο πιθανό είναι ο ρυθμιστής να είναι ασταθής.



Διάγραμμα βαθμίδων: ΑΣΑ και εξοπλισμός

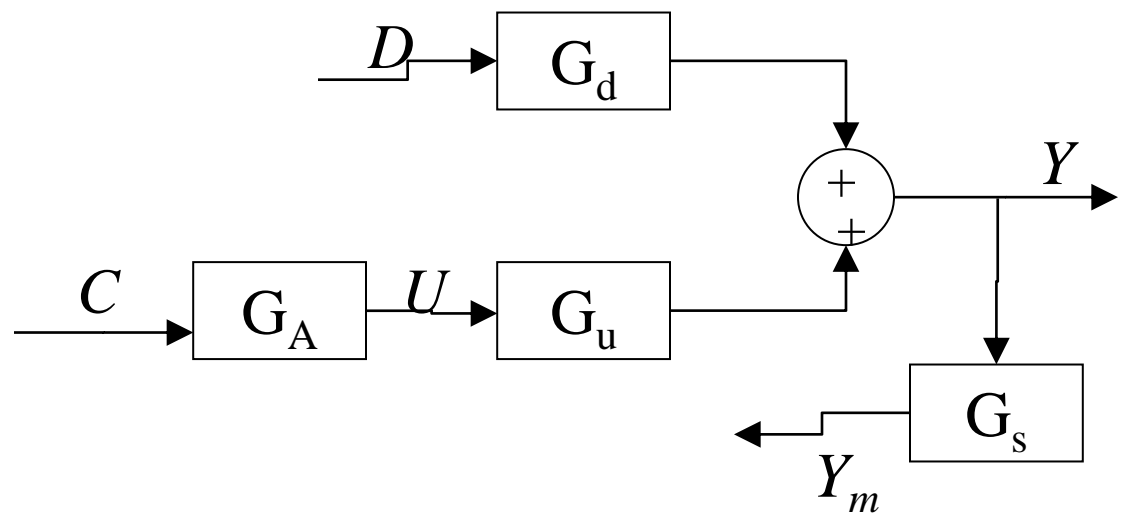


$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$



$\tau_v = 0.5 \text{ min}$
 $\theta_s = 0.33 \text{ min}$

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

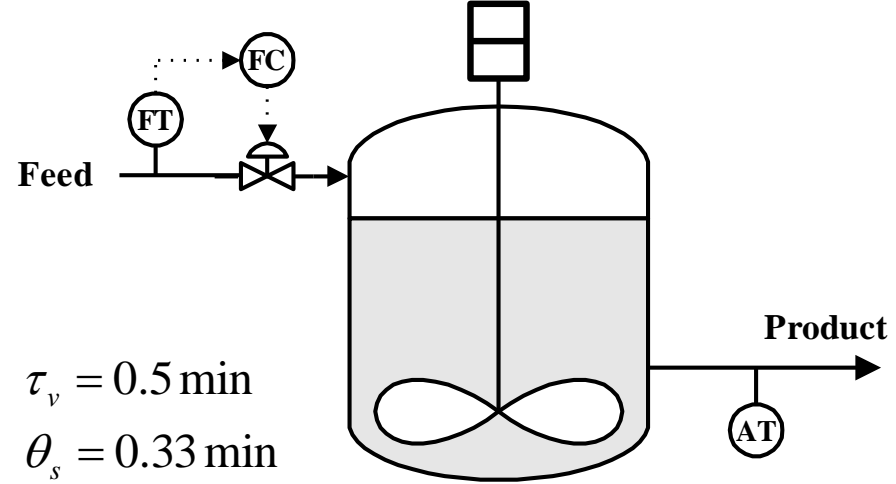


$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U + \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

Διάγραμμα βαθμίδων: Βαθμονόμηση ΑΣΑ



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



$\tau_v = 0.5 \text{ min}$
 $\theta_s = 0.33 \text{ min}$

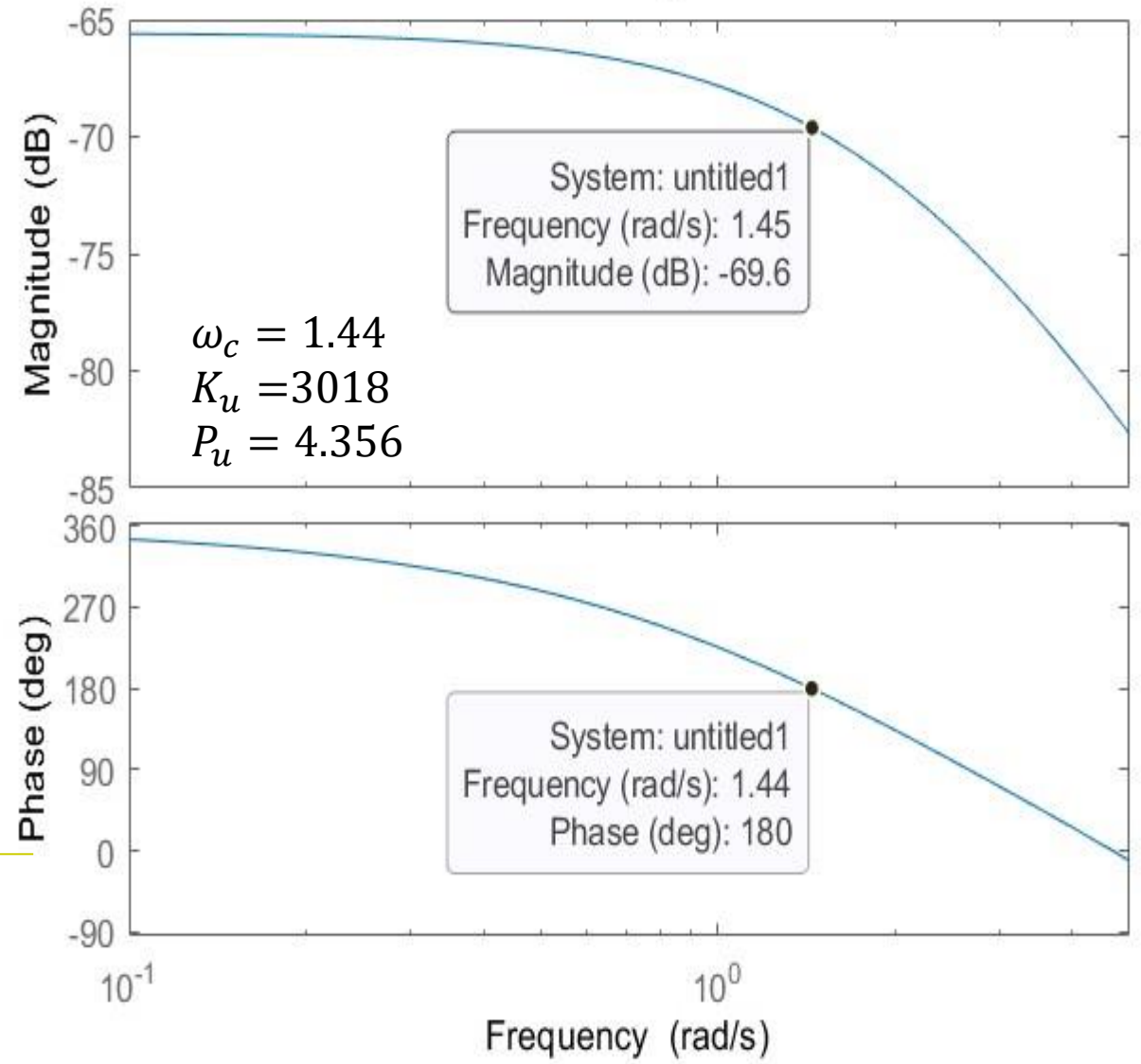
$$Y_m(s) = e^{-\theta_s s} Y(s)$$

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

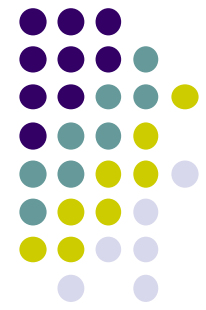
ZN:
 $K_c = 1372$
 $\tau_I = 3.63$

Optimized:
 $K_c = 626$
 $\tau_I = 1.00$

Bode Diagram



Κλείσιμο βρόγχου και δοκιμές

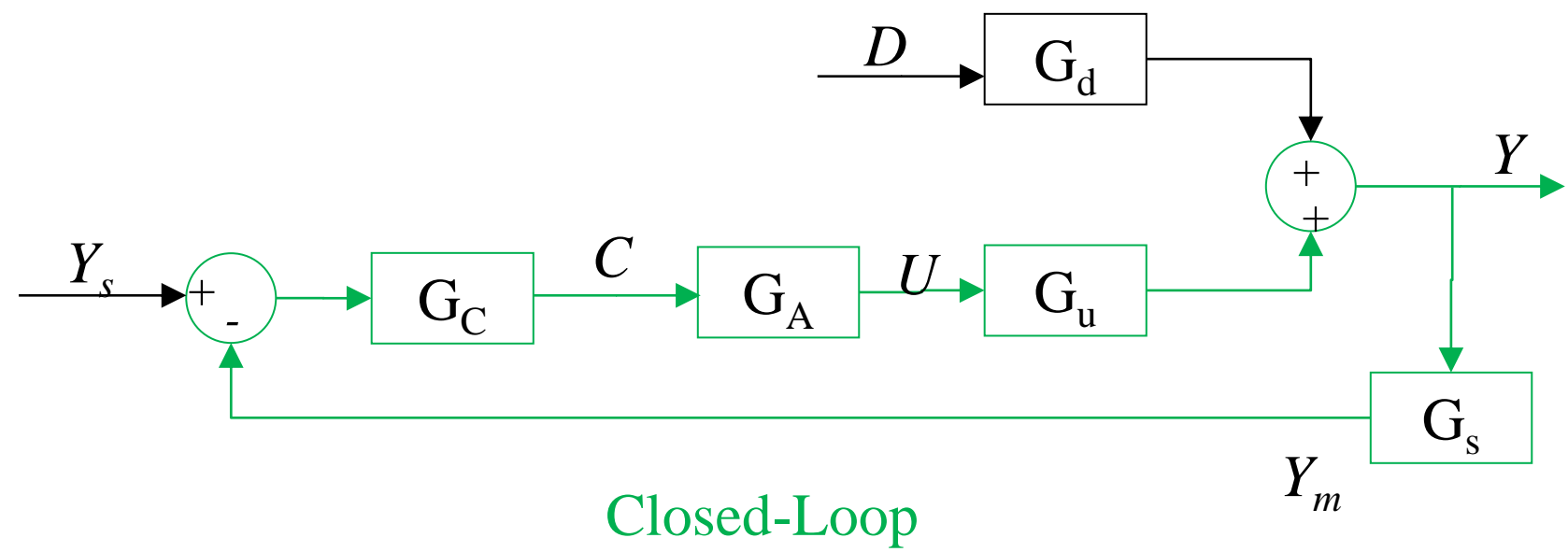
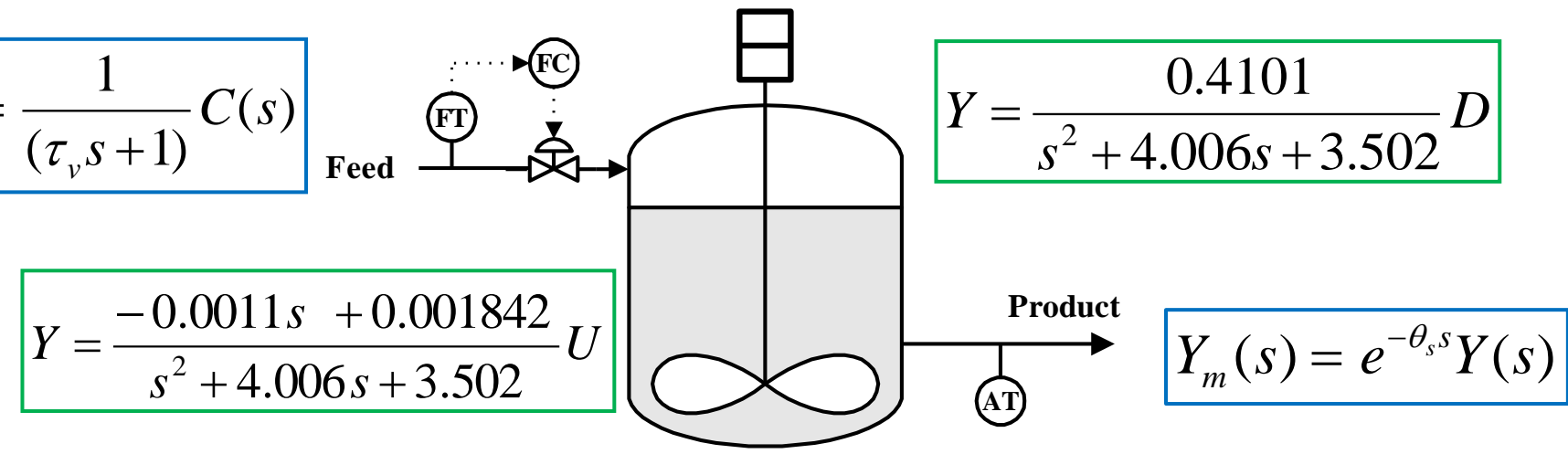


$$U(s) = \frac{1}{(\tau_v s + 1)} C(s)$$

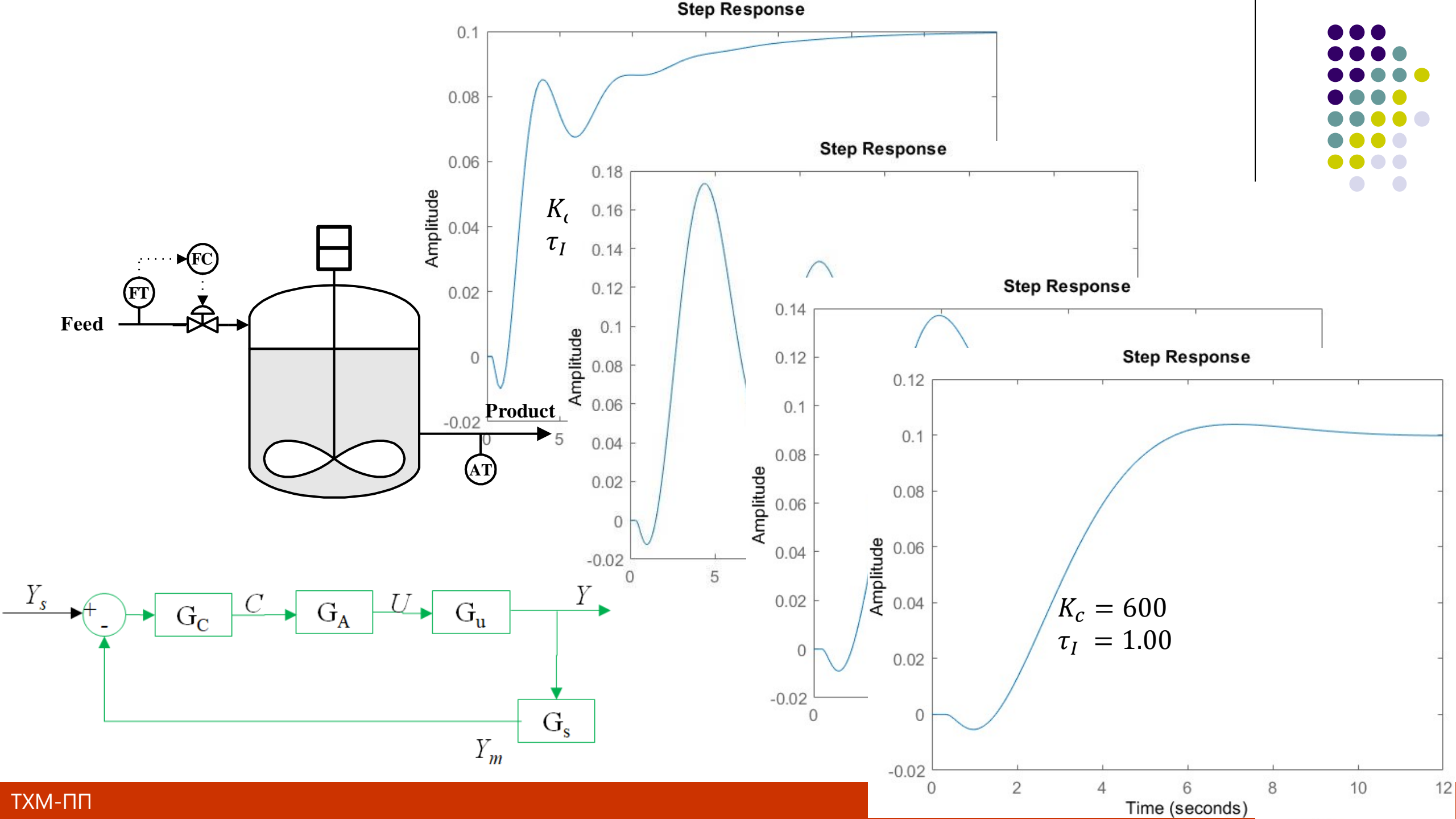
$$Y = \frac{0.4101}{s^2 + 4.006s + 3.502} D$$

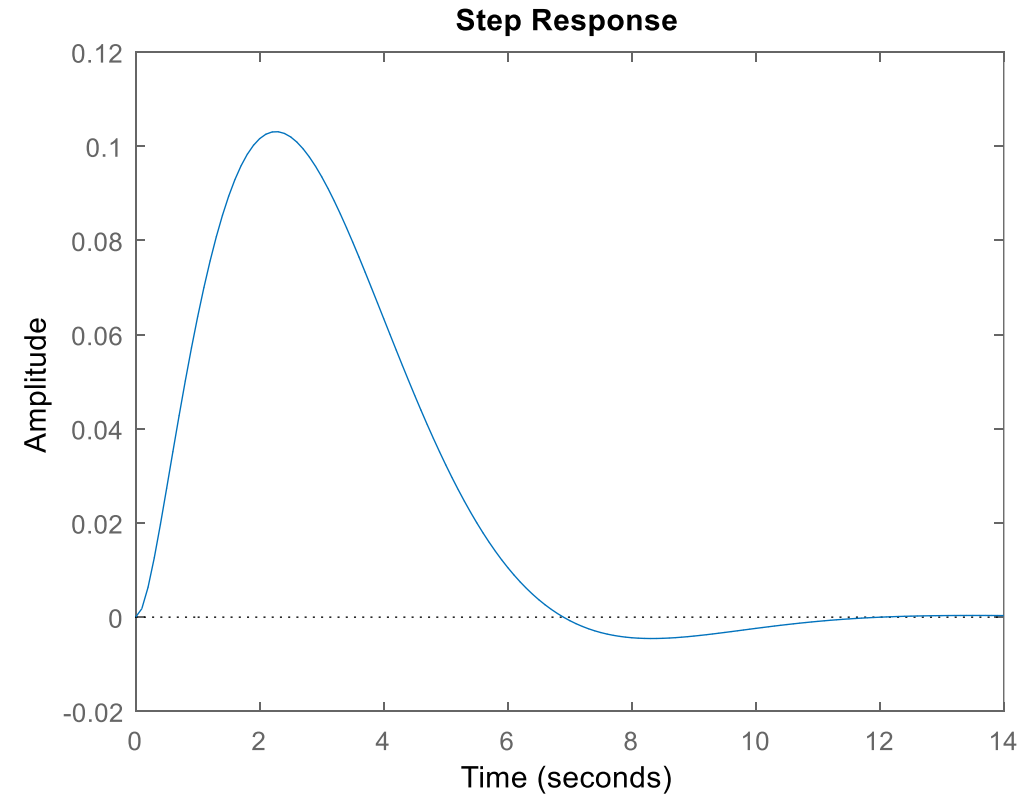
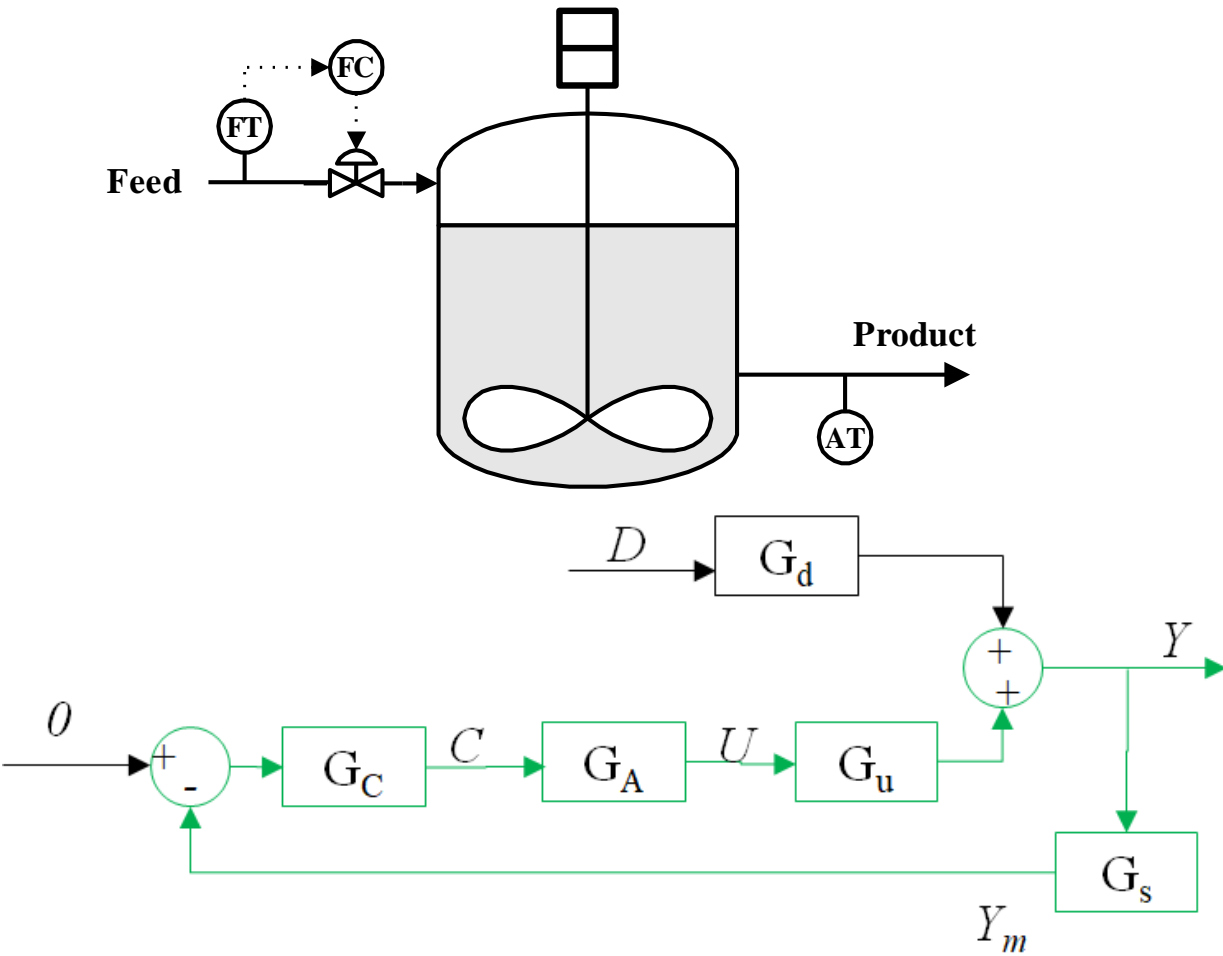
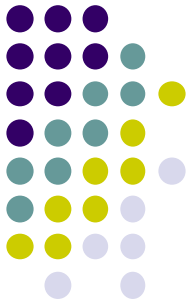
$$Y = \frac{-0.0011s + 0.001842}{s^2 + 4.006s + 3.502} U$$

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

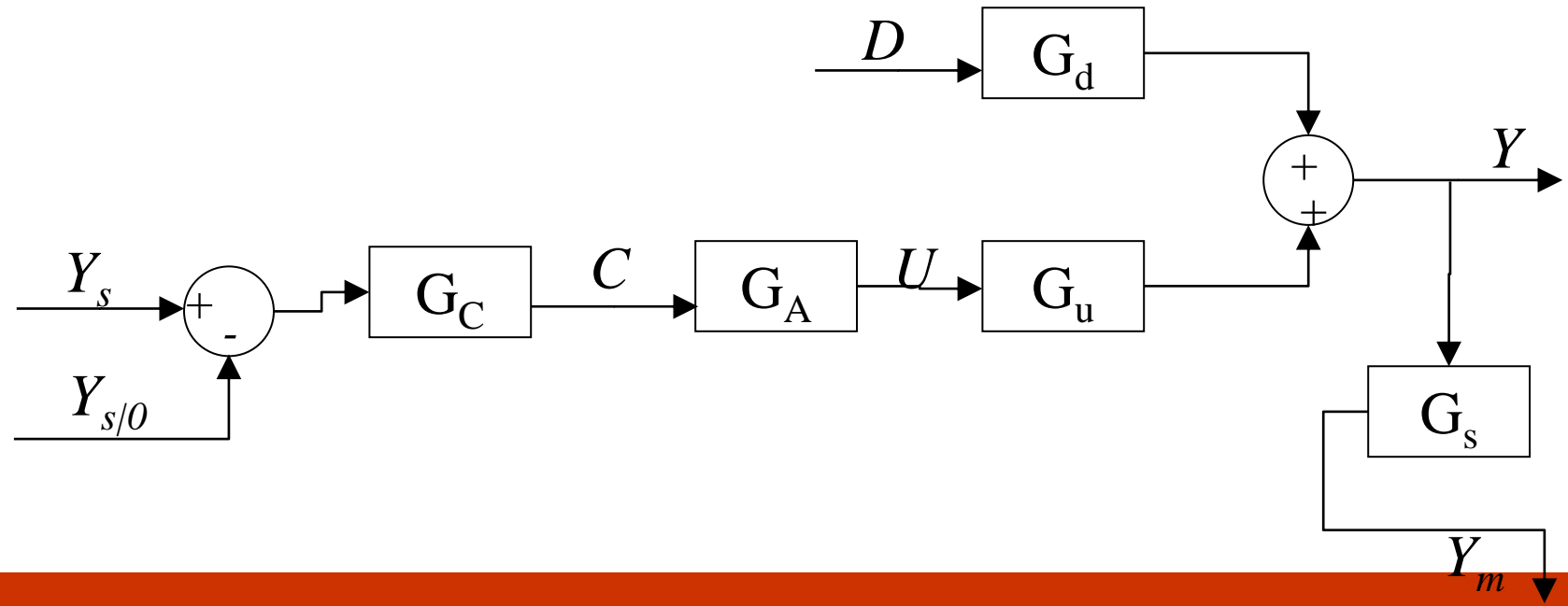
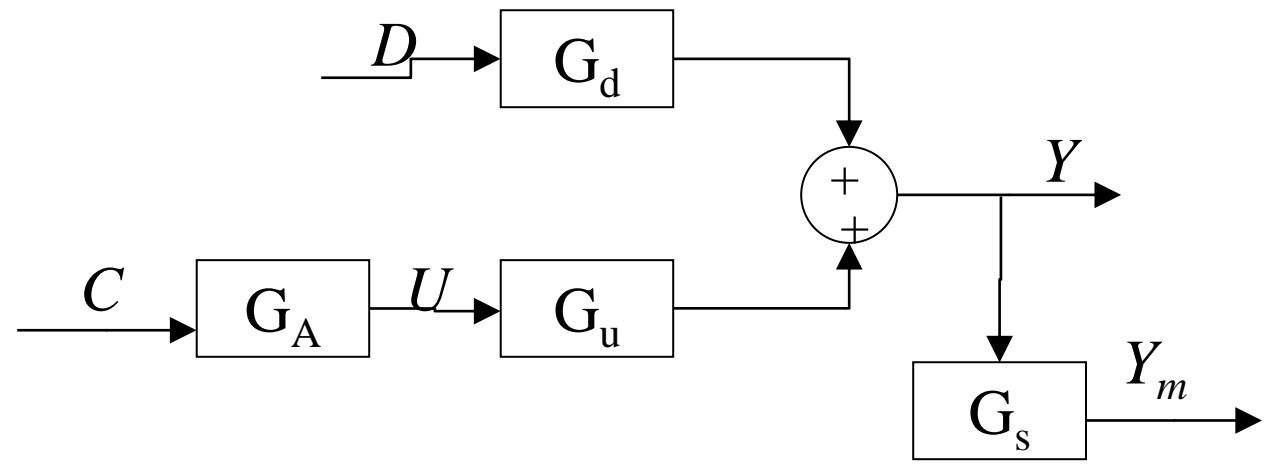
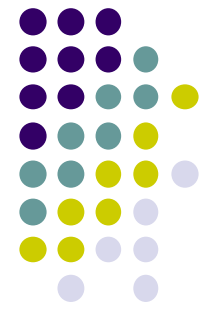


Closed-Loop





Βαθμονόμηση εμπειρικά: Άνοιγμα βρόχου



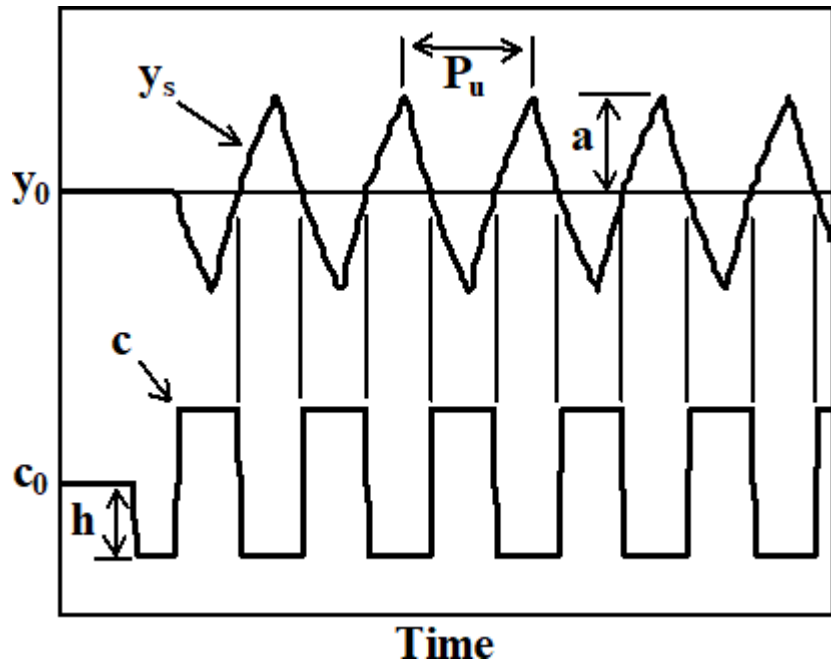
Μέθοδος ATV



- Εκτελέστε ATV τεστ and καθορίστε τη κρίσιμη ενίσχυση και κρίσιμη περίοδο.
- Επιλέξτε μέθοδο βαθμονόμησης (i.e., CC, ZN ή TL).
- Επιλέξτε συντελεστή ρύθμισης, F_T , που ικανοποιεί το κριτήριο βαθμονόμησης online χρησιμοποιώντας αλλαγές σημείου ρύθμισης ή παρατηρώντας την απόδοση της διεργασίας:

- $K_C = K_C^{ZN} / F_T$ $\tau_I = \tau_I^{ZN} \times F_T$

Μέθοδος ATV



- Επιλέξτε h έτσι ώστε η διεργασία να μην διαταράσσεται αδικαιολόγητα αλλά να έχει ακριβή αποτελέσματα.
- Η έξοδος του ρυθμιστή αλλάζει όταν το y_s περνά το y_0
- Συνήθως χρειάζονται 3-4 κύκλοι πριν εδραιωθεί η απόκριση και μπορούν να μετρηθεί το a και το P_u .

Μέθοδος ATV



- Υπολογίστε K_u από τα αποτελέσματα της ATV.

$$K_u = \frac{4h}{\pi a}$$

- ZN μέθοδος PI ρυθμίσεις

$$K_c^{ZN} = 0.45 K_u \quad \tau_I^{ZN} = P_u / 1.2$$

$$P: K_C = \frac{K_u}{2}$$

$$PID: K_C = \frac{K_u}{1.66} \quad \tau_I = \frac{P_u}{2} \quad \tau_D = \frac{P_u}{8}$$

- TL μέθοδος PI ρυθμίσεις

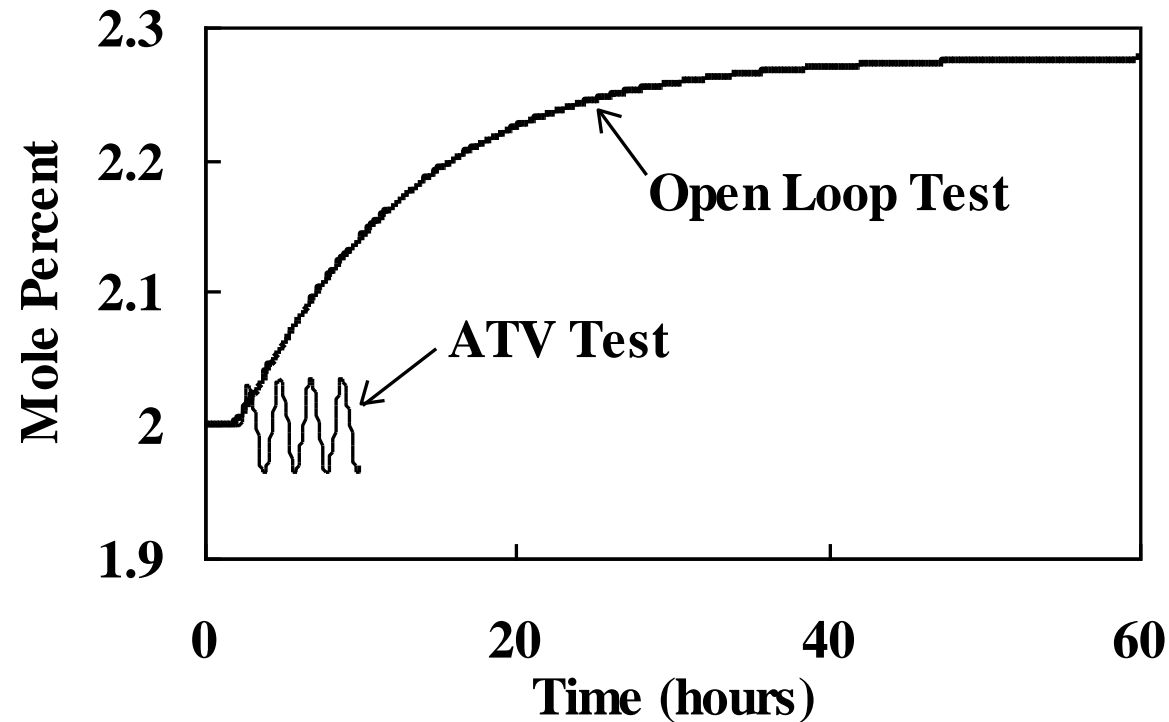
$$K_c^{TL} = 0.31 K_u \quad \tau_I^{TL} = P_u / 0.45$$

Σύγκριση ZN και TL



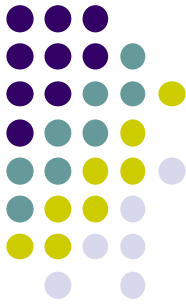
- Οι ρυθμίσεις ZN είναι πολύ επιθετικές συνήθως, ενώ οι ρυθμίσεις TL τείνουν να είναι πολύ συντηρητικές.
- Οι ρυθμίσεις TL χρησιμοποιούν πολύ λιγότερη ολοκληρωτική δράση σε σύγκριση με την αναλογική δράση των ρυθμίσεων ZN. Ως αποτέλεσμα, σε ορισμένες περιπτώσεις κατά τη χρήση ρυθμίσεων TL, απαιτείται η πρόσθεση ολοκληρωτικής δράσης για την έγκαιρη εξάλειψη της ρυθμιστικής απόκλισης.

Πλεονεκτήματα μεθόδου ATV



- Πολύ πιο γρήγορη από τη δοκιμή ανοιχτού βρόχου.
- Λιγότερο επιρρεπής σε διαταραχές και μη γραμμικότητα
- Δεν διαταράσσει αδικαιολόγητα τη διαδικασία.

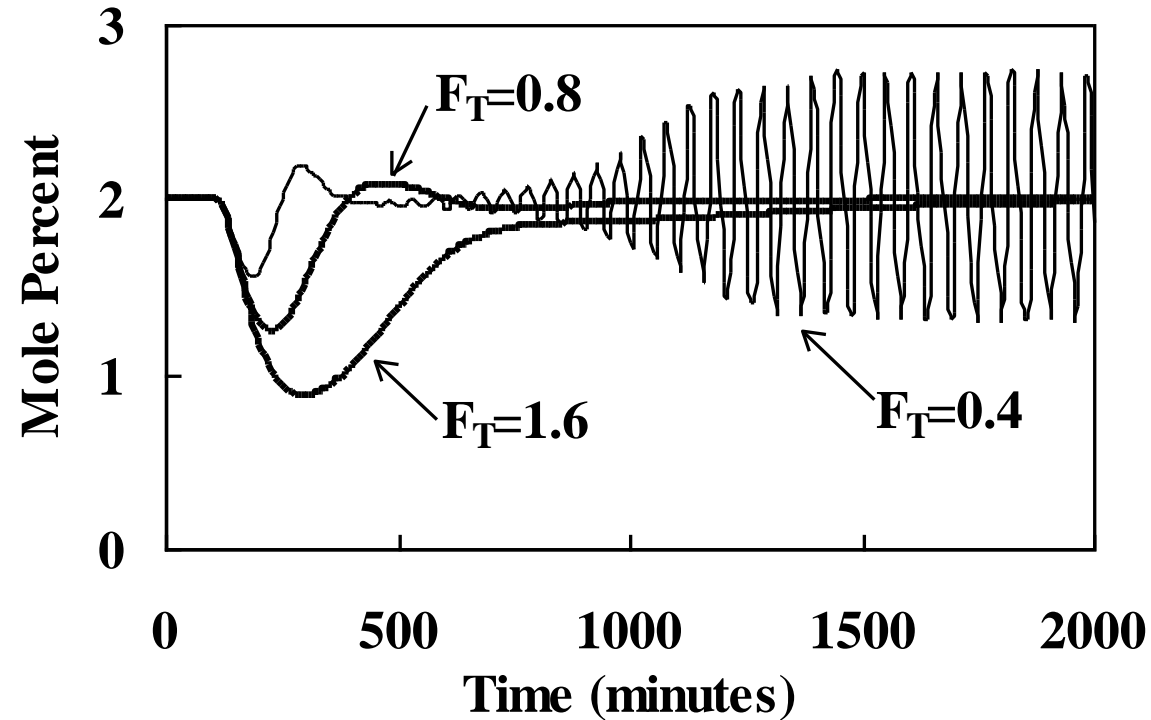
Βαθμονόμηση on-line



- Ανοίξτε τον βρόχο και χρησιμοποιήστε τεστ να βρείτε κρίσιμες τιμές (καμπύλη απόκρισης, Bode, ATV,...)
- Επιλέξτε μέθοδο βαθμονόμησης (i.e., CC, ZN ή TL).
- Κλείστε τον βρόχο
- Επιλέξτε συντελεστή ρύθμισης, F_T , που ικανοποιεί ένα γενικό κριτήριο βαθμονόμησης (1/6,...) χρησιμοποιώντας αλλαγές σημείου ρύθμισης και παρατηρώντας την απόδοση της διεργασίας:

- Για PI: $K_c = K_c^{ZN} / F_T$, $\tau_I = \tau_I^{ZN} \times F_T$

Βαθμονόμηση on-line

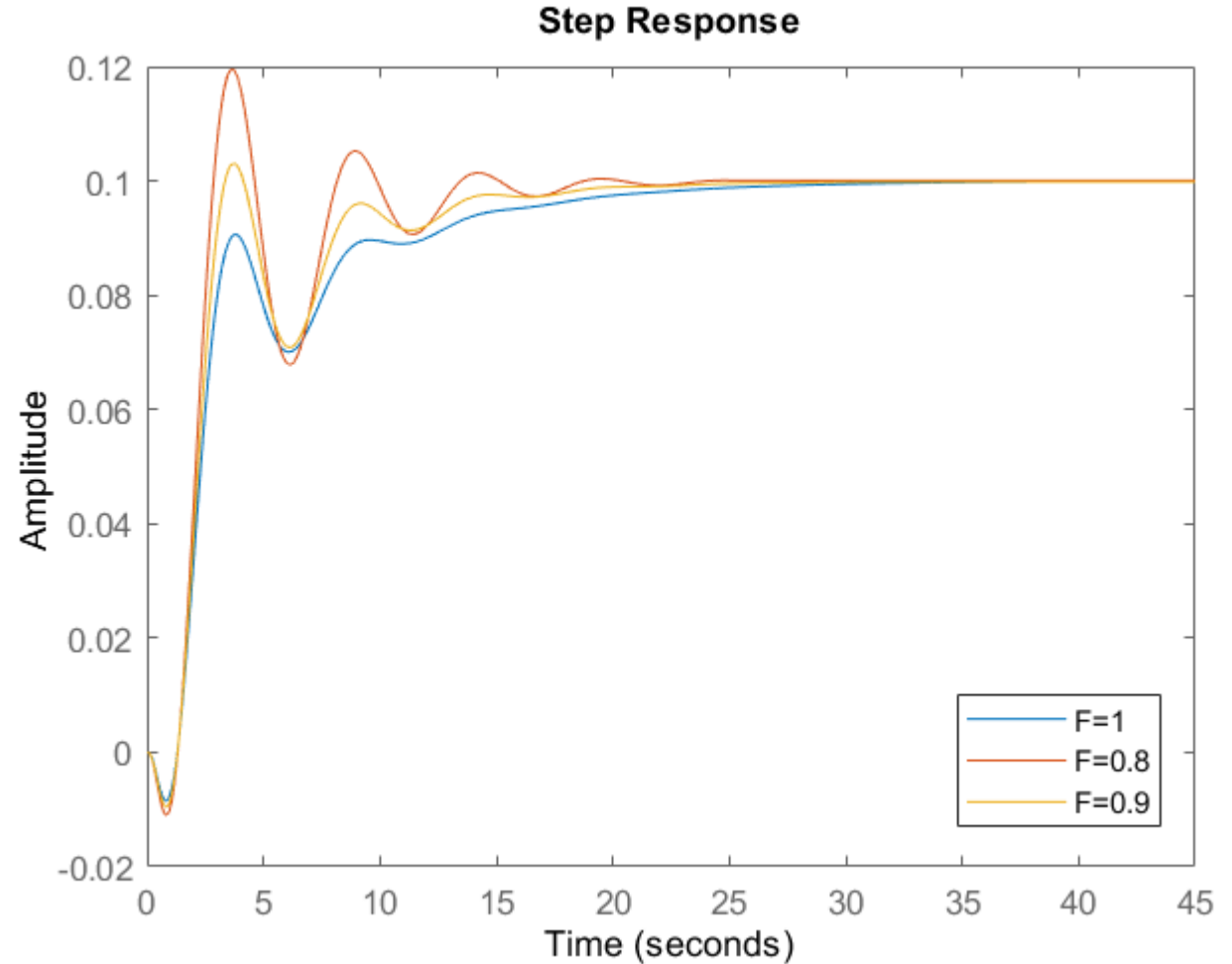
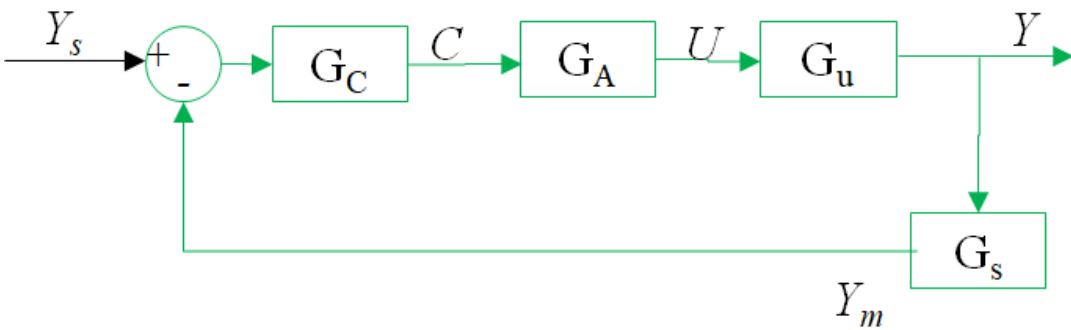
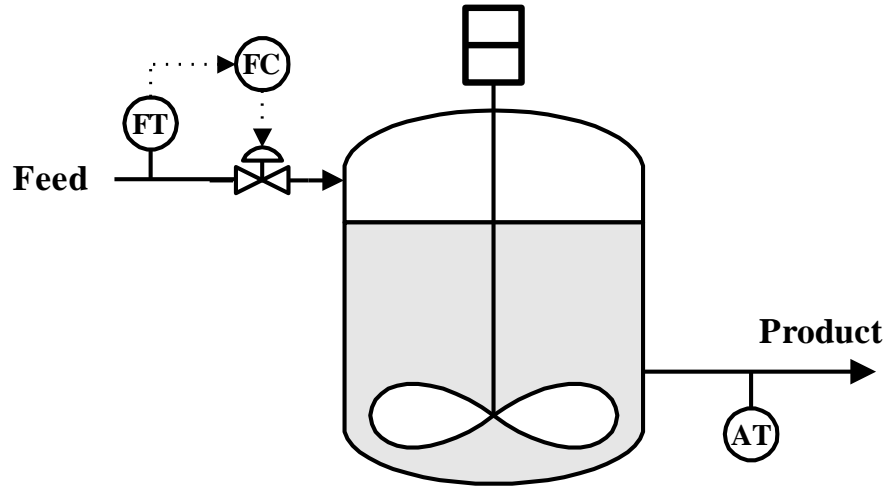


- Το F_T παρέχει απλή μονοδιάστατη βαθμονόμηση που μπορεί να εφαρμοστεί κατά τις αλλαγές σημείου ρύθμισης ή παρατηρώντας την απόδοση του ρυθμιστή για μια χρονική περίοδο.



- Calculate K_u
- Calculate ZN settings
- Apply online tuning

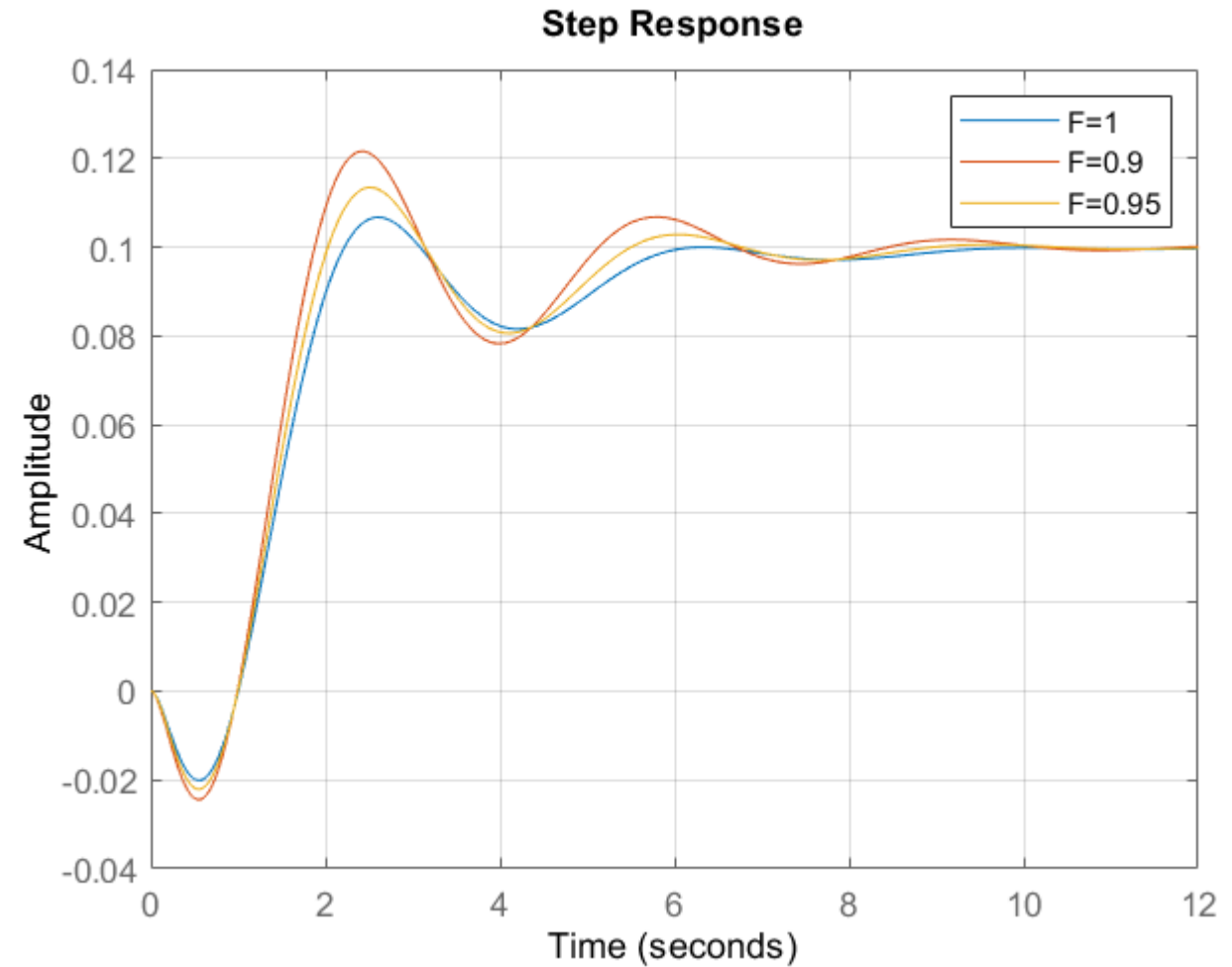
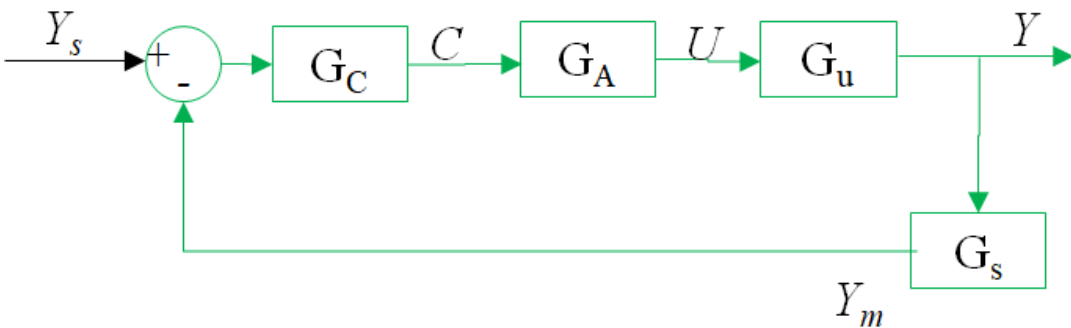
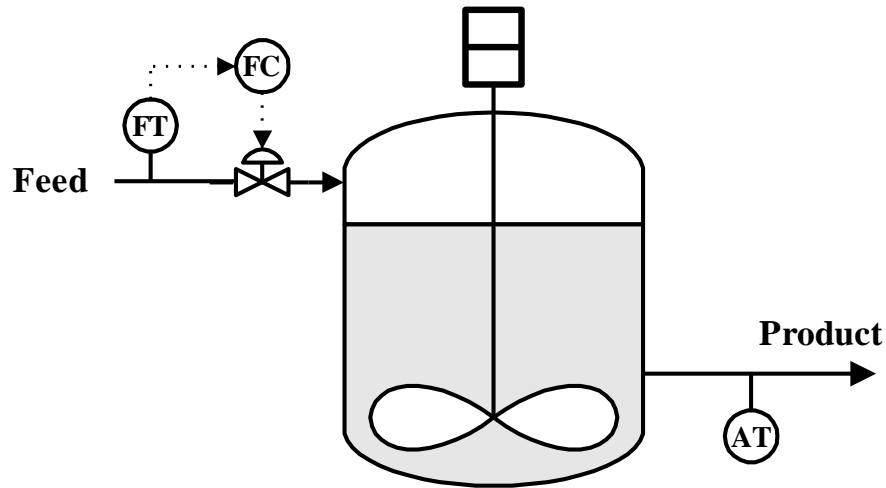
$$K_c = K_c^{ZN} / FT, \quad \tau_I = \tau_I^{ZN} \times F_T$$





- Calculate K_u
- Calculate ZN settings
- Apply online tuning

$$K_c = K_c^{ZN} / FT, \quad \tau_I = \tau_I^{ZN} \times F_T \tau_D = \tau_D^{ZN} / FT$$



Μέθοδος βαθμονόμησης PID

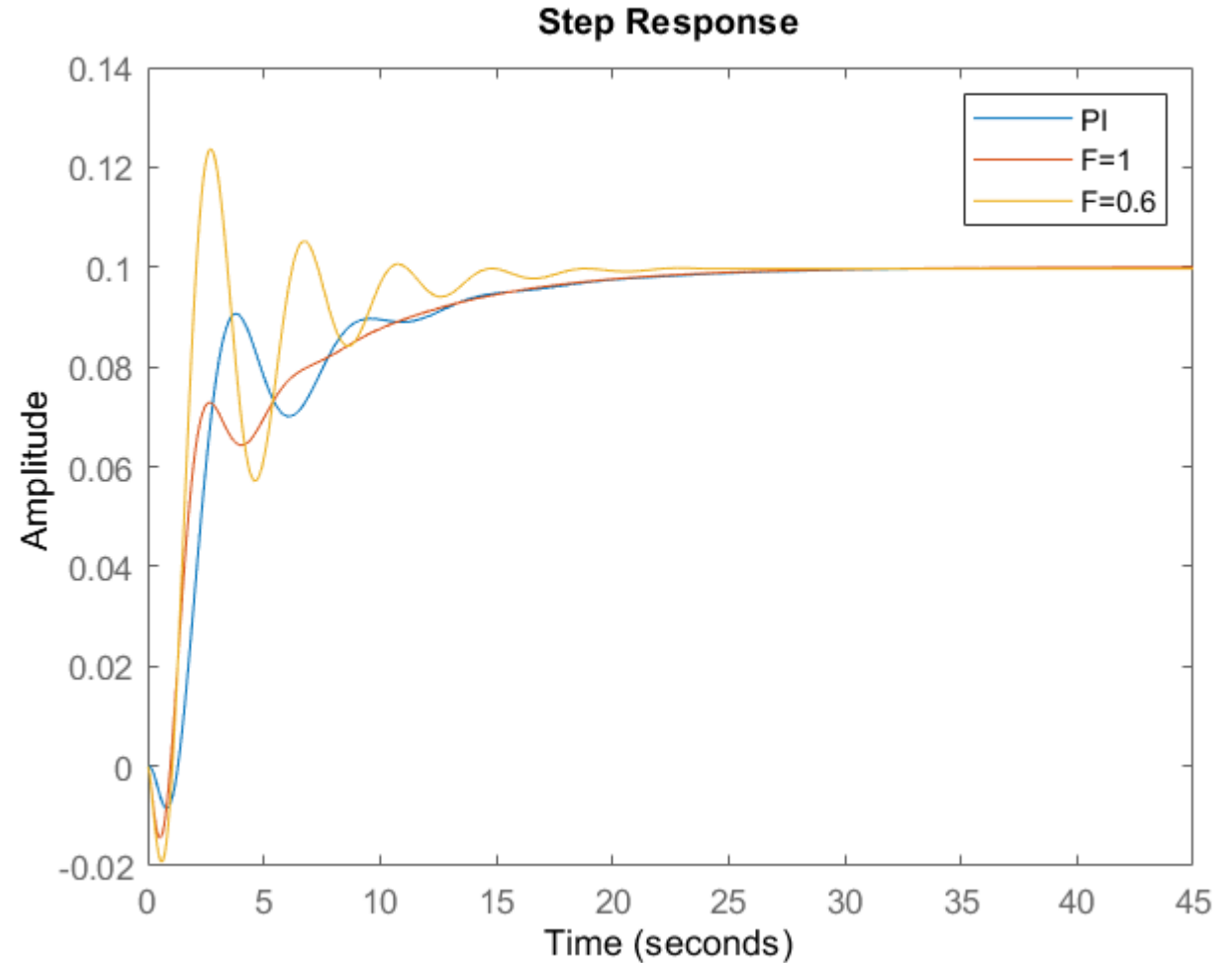
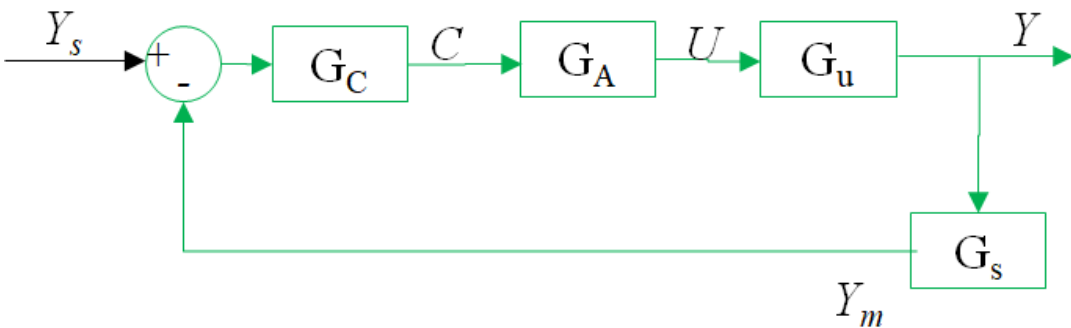
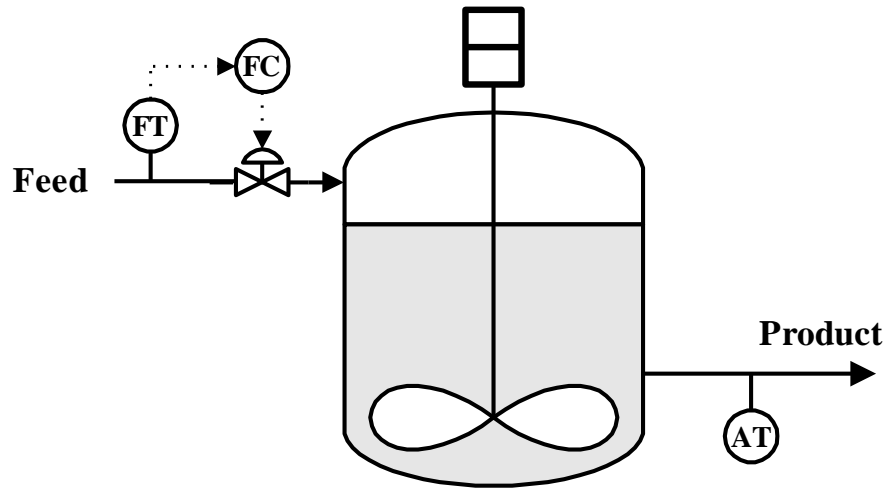


- Βαθμονομήστε τον PI χρησιμοποιώντας, ZN, απ'ευθείας βαθμονόμηση ή μέθοδο ATV.
- Αυξήστε το τ_D μέχρι να επιτευχθεί ελάχιστος χρόνος απόκρισης. Αρχικά ορίστε $\tau_D = P_u/8$.
- Αυξήστε το τ_D και το K_c κατά τον ίδιο παράγοντα μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση.
- Ελέγξτε την απόκριση για να βεβαιωθείτε ότι χρησιμοποιείται η κατάλληλη ποσότητα ολοκληρωτικής δράσης.



- Calculate K_u and P_u
- Calculate ZN settings for PI
- Apply online tuning for τ_D

$$K_c = 0.45K_u/F_T, \quad \tau_I = \frac{P_u}{1.2} \quad \tau_D = \frac{P_u}{8}/F_T$$



Βασικά χαρακτηριστικά φίλτρων



- Για να μειωθεί η επίδραση του θορύβου αυξάνεται ο χαρακτηριστικός χρόνος του φίλτρου τ_f
 - Το φίλτρο επιβραδύνει την απόκριση του συστήματος δραματικά όταν τ_f είναι μεγαλύτερο από 10% του τ_p .
- Για την επιλογή του χαρακτηριστικού χρόνου του φίλτρου
 - Χαρακτηρίζονται οι χρόνοι τ_a, τ_s, τ_p και συγκρίνονται με τ_n
 - Ζητήται $\tau_f > 2\tau_n$ και $\tau_f < 0.1\tau_p, \tau_f < 0.5\tau_s, \tau_f < 0.5\tau_a$
 - Συνήθως τ_f στα 2 με 3 δευτερόλεπτα είναι επαρκές.

Προτεινόμενη μέθοδος βαθμονόμησης

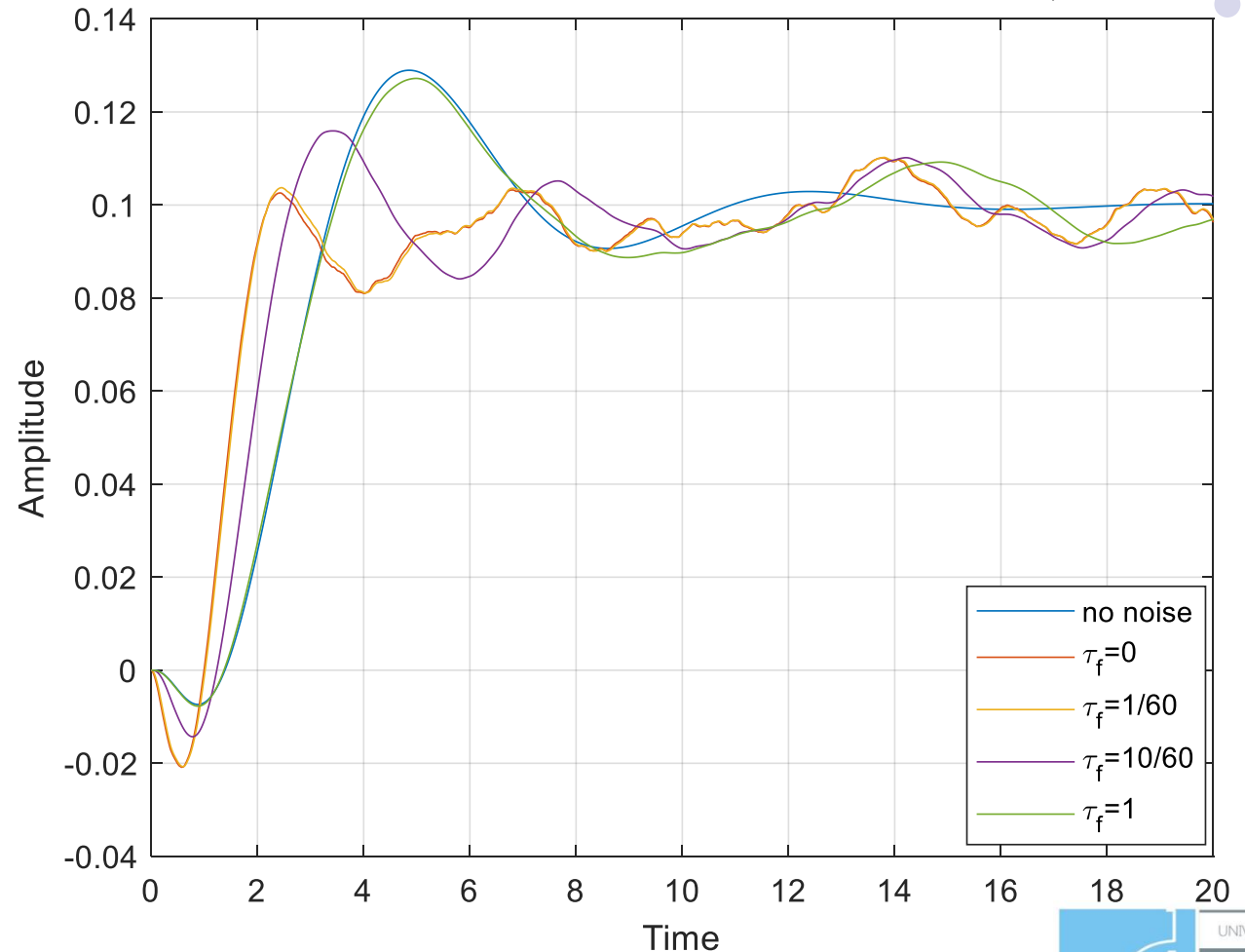
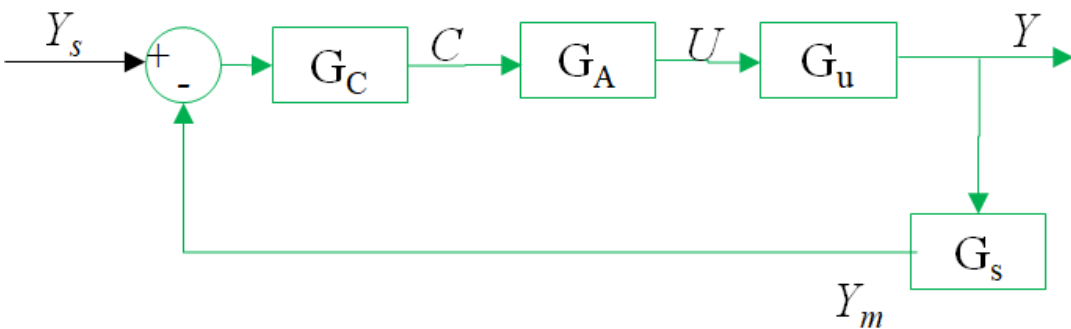
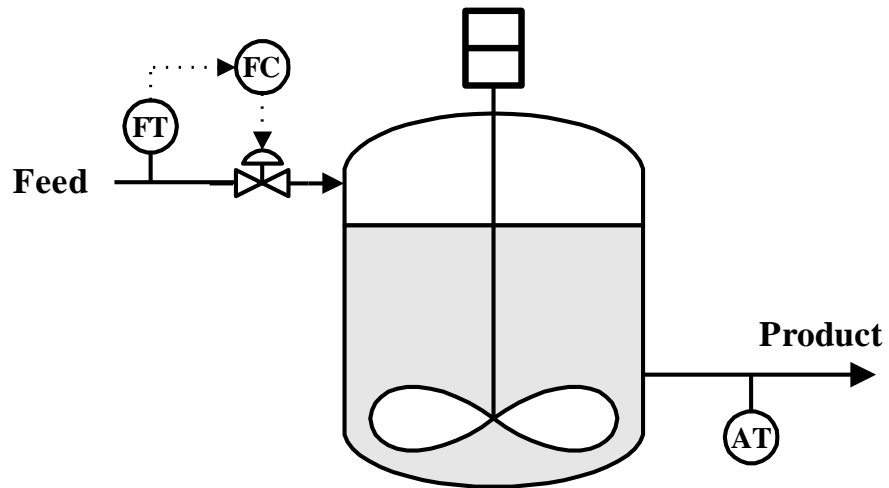
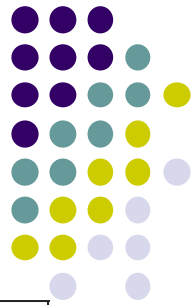


- Επιλέξτε το κριτήριο βαθμονόμησης για τον βρόχο ελέγχου.
- Βαθμονόμηση φίλτρου στην ένδειξη του αισθητήρα
- Προσδιορίστε εάν το σύστημα ελέγχου ανταποκρίνεται γρήγορα ή αργά.
 - Για γρήγορη απόκριση, βαθμονομήστε με δοκιμή και σφάλμα
 - Για αργή απόκριση, εφαρμόστε βαθμονόμηση βάσει ATV

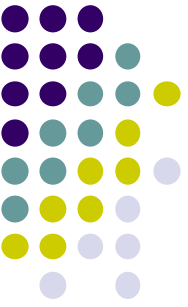
- Calculate ZN settings
- Apply filter
- Apply online tuning

$$G_c = \frac{K_c^{ZN} \left(1 + \frac{1}{\tau_I^{ZN} s} + \tau_D^{ZN} s \right)}{\tau_f s + 1}$$

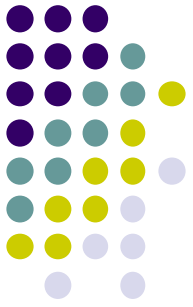
$$\tau_n = 0.1s, \tau_a = 30s, \tau_s = 20s, \tau_p = 46.5s$$



Overview



- Controller tuning is many times a compromise between performance and reliability.
- Reliability is determined by process nonlinearity and the disturbance type and magnitude.
- The controller tuning criterion should be based on controller reliability and the process objectives.



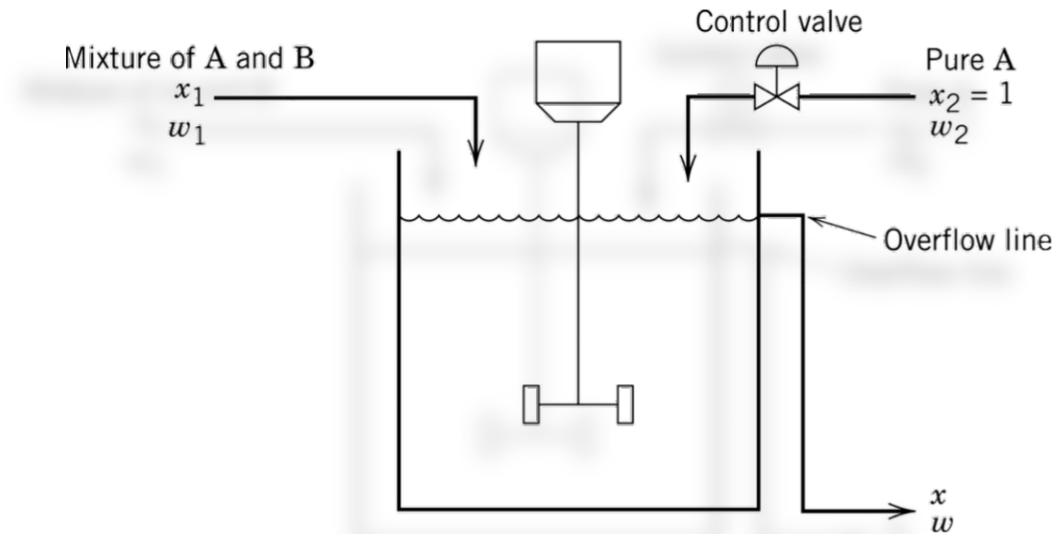
Διεργασία Ανάμειξης

Στόχος: Διατήρηση της σύστασης στο δοχείο

CV: σύσταση, x

MV: ογκομετρική παροχή των A, x_2

DV: ογκομετρική παροχή του μίγματος και σύσταση x_1, w_1



Το συνολικό ισοζύγιο μάζας

$$0 = \bar{w}_1 + \bar{w}_2 - \bar{w}$$

Ισοζύγιο μάζας για το A

$$0 = \bar{w}_1 \bar{x}_1 + \bar{w}_2 \bar{x}_2 - \bar{w} \bar{x}$$

$$\bar{x}_1 = 0.5$$

$$\bar{w}_1 = 1 \text{ m}^3 / \text{min}$$

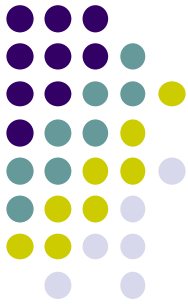
$$V = 10 \text{ m}^3 = \text{constant}$$

$$\bar{w}_2 = 0.5 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$\bar{w}(t) = \bar{w}_1(t) + \bar{w}_2(t)$$

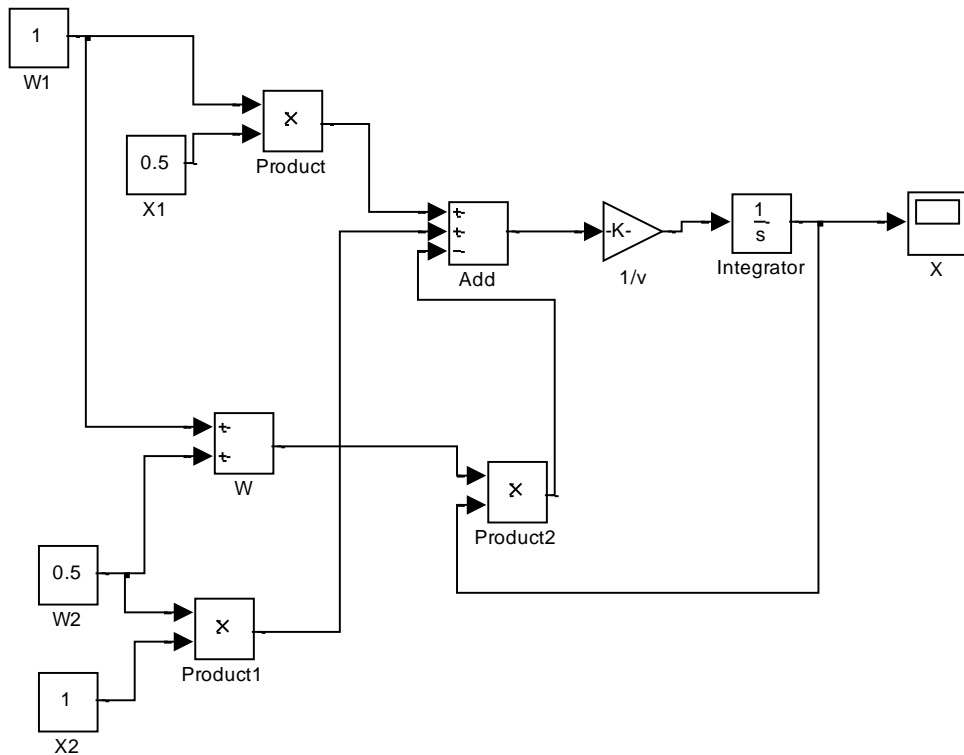
$$\bar{x} = \frac{(1 \times 0.5 + 0.5 \times 1)}{1 + 0.5} = \frac{2}{3}$$

Διεργασία Ανάμειξης – SIMULINK

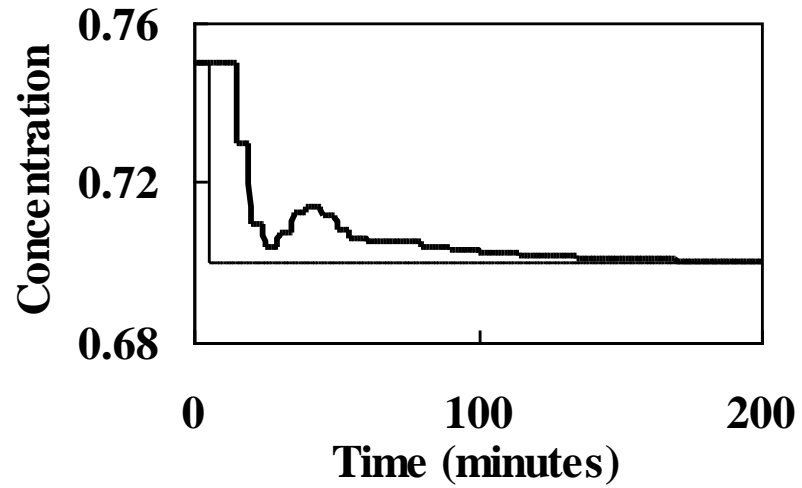
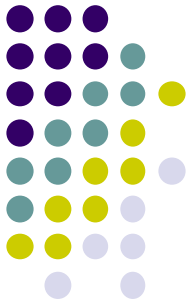


$$V \frac{dx}{dt} = w_1 x_1 + w_2 \times 1 - (w_1 + w_2) x$$

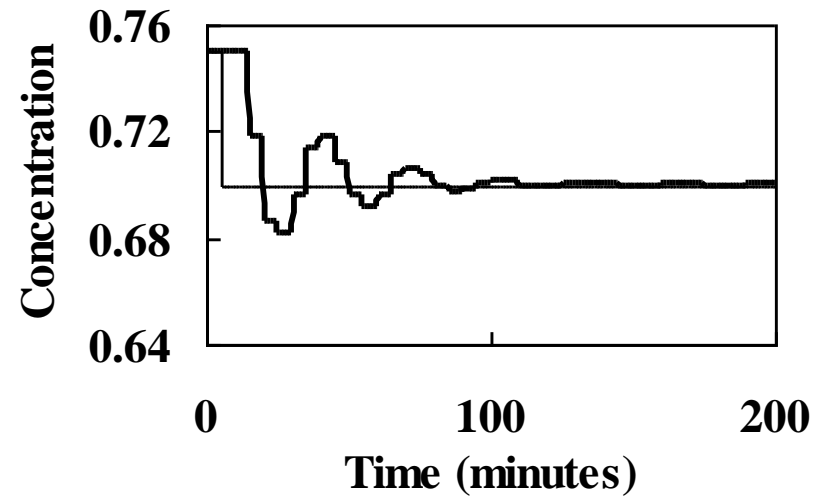
$$x(0) = \frac{2}{3}$$



- Calculate K_u
- Calculate ZN settings
- Apply online tuning

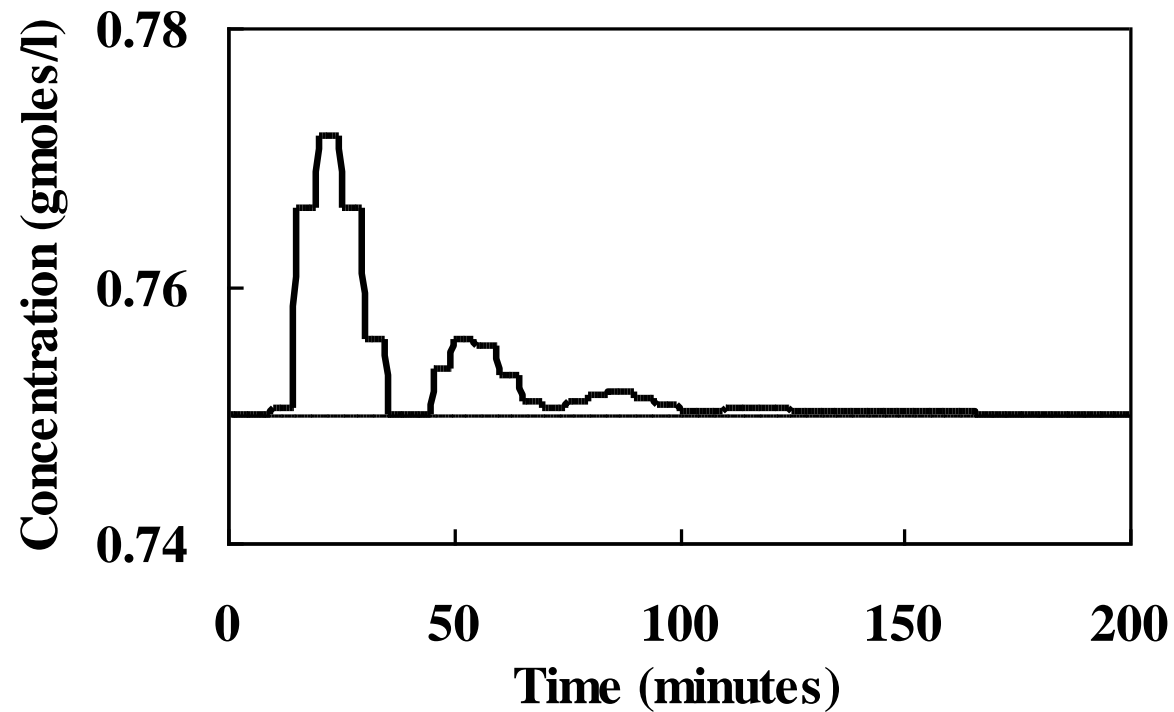


● $F_T=0.75$

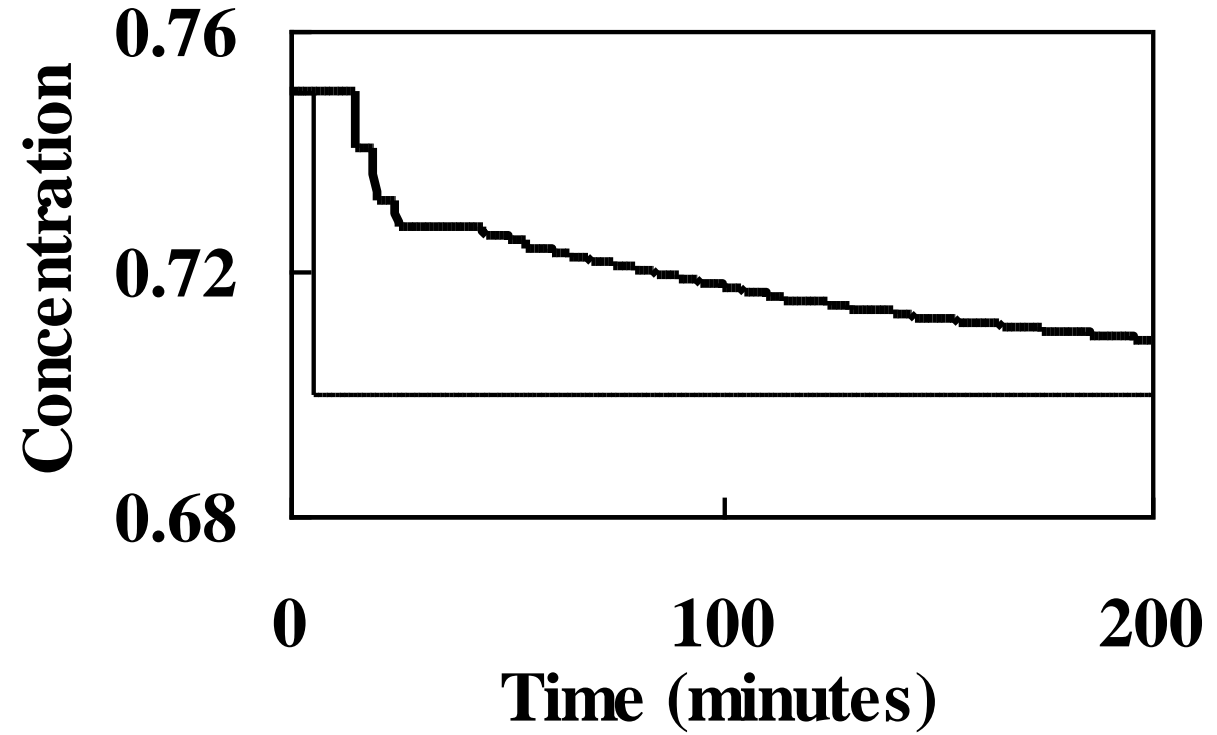
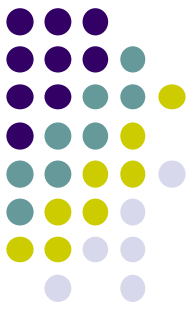


● $F_T=0.5$

Αποτέλεσμα βαθμονόμησης on-line



Βαθμονόμηση για κρίσιμη απόκριση



Σύγκριση κριτηρίου 1/6 και κρίσιμης.

