

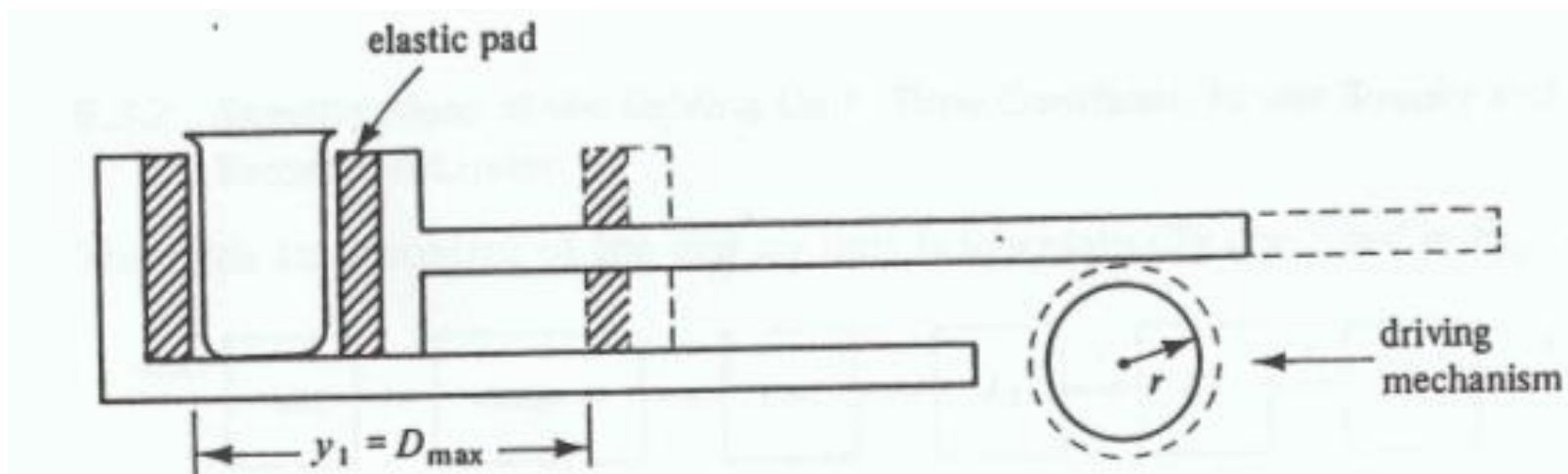
Ψηφιακός Έλεγχος

διάλεξη

Σχεδιαστικό Παράδειγμα

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

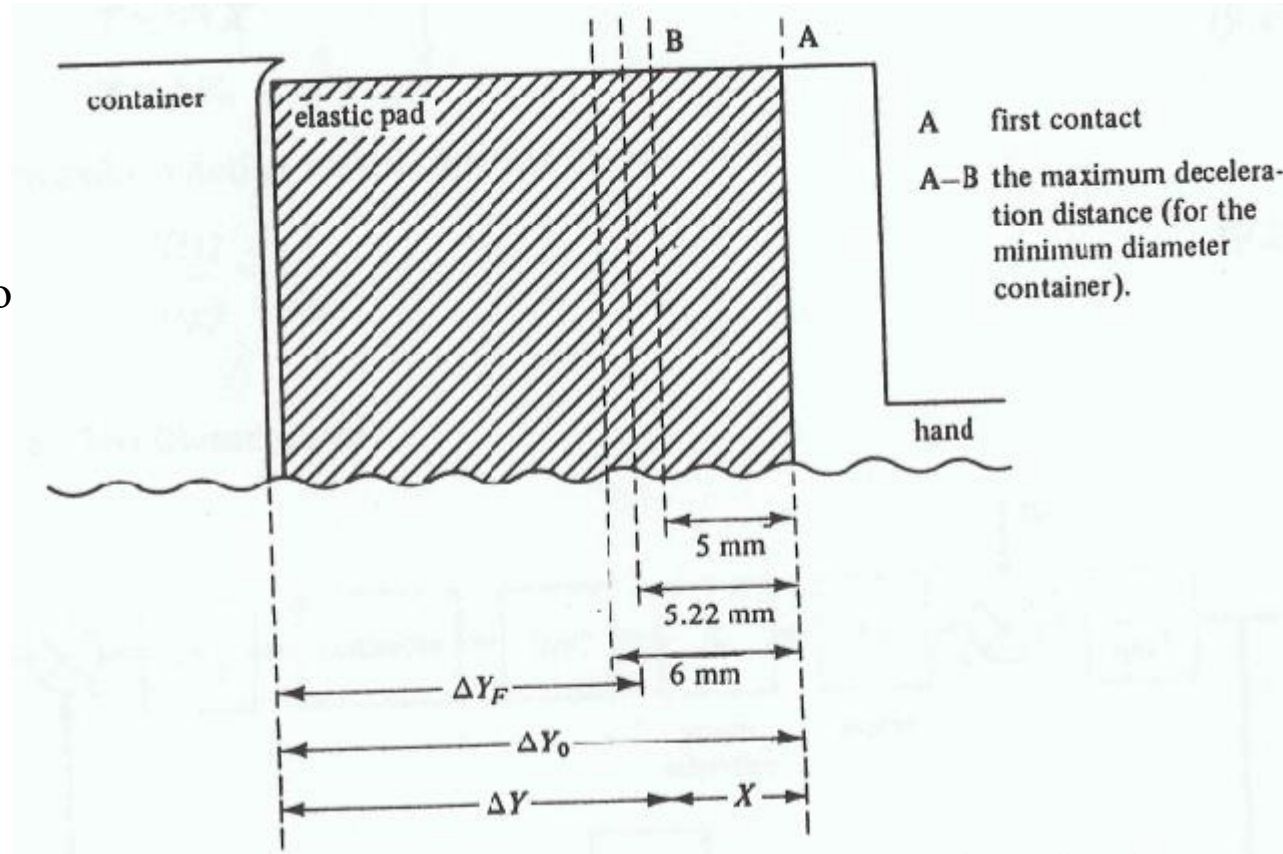
Θέλουμε να κάνουμε έλεγχο τεχνητού χεριού που πιάνει και μεταφέρει εύθραστα γυάλινα δοχεία διαφόρων μεγεθών. Ο στόχος είναι να σχεδιάσουμε ένα ψηφιακό σερβομηχανισμό που θα ελέγχει τη δαγκάνα. Ο σερβομηχανισμός βασίζεται σε ένα DC κινητήρα



Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Ένας αισθητήρας πίεσης υπολογίζει το κενό ΔY όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ο αισθητήρας έχει ακρίβεια 0.1mm.

Προκειμένου να πιαστεί το γυάλινο δοχείο χωρίς να σπάσει, η ελαστική συστολή X πρέπει να είναι τουλάχιστο 5 mm και όχι περισσότερο απο 6 mm. Το βάρος της δαγκάνας είναι 1Kg. Η κίνηση της δαγκάνας που κλείνει πρέπει να είναι γρήγορη και ο χρόνος απο την αρχή μέχρι τη στάση πρέπει να είναι περίπου 0.5 sec.



Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Η κίνηση κατά την οποία κλείνει η δαγκάνα γίνεται σε τρία στάδια:

α) Επιτάχυνση. Σε αυτό το στάδιο, ο μηχανισμός θα προκαλέσει κίνηση με σταθερή επιτάχυνση μέχρι ο αισθητήρας πίεσης να ακουμπήσει το γυάλινο δοχείο. Η διάμετρος του δοχείου είναι άγνωστη αλλά η μέγιστη διάμετρος είναι $D_{max}=0.2\text{ m}$ Για μικρά δοχεία, αυτό το στάδιο είναι το πιο χρονοβόρο. Η απαίτηση για το σχεδιασμό είναι $t_1 < 0.5\text{sec}$, όπου t_1 είναι ο χρόνος της επιτάχυνσης. Το αρχικό άνοιγμα της δαγκάνας είναι ίσο με τη μέγιστη διάμετρο που υποθέτεται, δηλαδή $Y_1=0.2\text{m}$.

β) Επιβράδυνση. Αυτό το στάδιο αρχίζει με την πρώτη επαφή μεταξύ του αισθητήρα πίεσης και του δοχείου και τελειώνει όταν η δαγκάνα σταματήσει. Η απόσταση επιβράδυνσης είναι $X < 5\text{mm}$.

γ) Θέση. Αυτό το στάδιο (position servo stage) αρχίζει όταν τελειώσει το στάδιο της επιβράδυνσης. Μια συνεχής εντολή δίνεται στο σερβομηχανισμό θέσης ώστε

$$\Delta Y_0 - \Delta Y_F = 5.22\text{mm}$$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

$$\Delta Y_0 - \Delta Y_F = 5.22mm$$

όπου

$$\Delta Y_0$$

Η ένδειξη του αισθητήρα πίεσης κατα την πρώτη επαφή

$$\Delta Y_F$$

Η ένδειξη του αισθητήρα πίεσης όταν το χέρι ηρεμεί

Το όριο υπερέψωσης είναι $\frac{6 - 5.22}{5.22} * 100\% = 15\%$

Η απαίτηση για μικρή υπερέψωση οφείλεται σε δύο περιορισμούς:

α) η ακρίβεια του αισθητήρα είναι 0.1mm, η A/D ακρίβεια είναι 0.02mm και the stiffness of the loop 0.1mm.

Το σύνολο είναι $0.1 + 0.1 + 0.02 = 0.22mm$

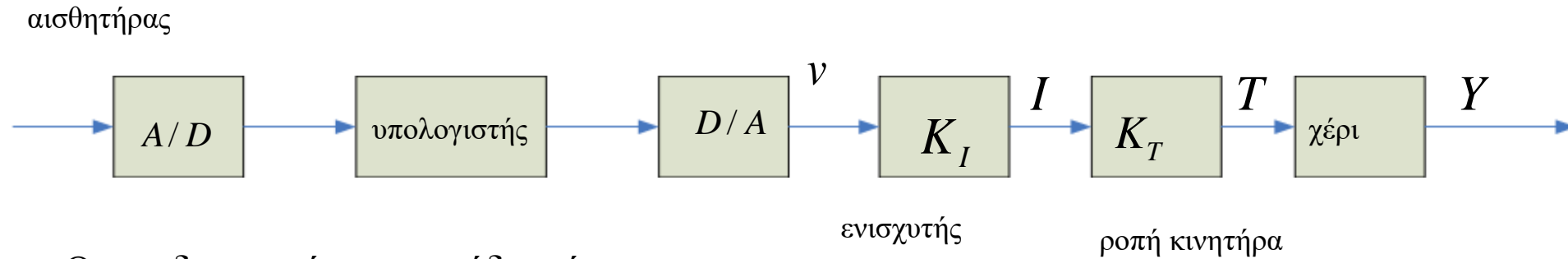
Αυτή η αβεβαιότητα προστίθεται στην ελάχιστη απαιτούμενη συστολή του

$$(\Delta Y_0 - \Delta Y)_{\min} = 5mm \quad \text{άρα το σύνολο είναι } 5.22 \text{ mm.}$$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

α) η μέγιστη συστολή είναι $(\Delta Y_0 - \Delta Y)_{\min} = 6mm$

Ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου της μονάδας που οδηγεί το χέρι φαίνεται παρακάτω:



Οι προδιαγραφές της μονάδας είναι

επιτάχυνση $a_1 = \frac{2Y_1}{t_1^2} = 1.6m/sec^2$

μέγιστη ταχύτητα $V_{\max} = a_1 t_1 = 0.8m/sec$

επιβράδυνση $a_2 = \frac{V_{\max}^2}{2 * 5mm} = 64m/sec^2$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Για $r=0.015$ m , η απαιτούμενη ροπή για την επιβράδυνση είναι $T_1 = rma_2 = 0.96Nm$

Έτσι , επιλέγουμε ως μέγιστη ροπή $T_{\max} = 1.2Nm$

Έτσι , $K_T = 0.3Nm$

Η ροπή του κινητήρα οδηγείται από ένα ενισχυτή οπότε η συνάρτηση μεταφοράς του είναι vK_T (Nm / A)

Το εύρος ζώνης του ενισχυτή είναι πολύ μεγαλύτερο απο αυτό του κλειστού βρόχου με αποτέλεσμα να μπορούμε να αγνοήσουμε τη δυναμική του.

Ο κορεσμός του ενισχυτή ισχύος είναι

$$I_{\max} = \frac{T_{\max}}{K_T} = 4A$$
$$K_I \cong 1A/V$$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Η μέγιστη ισχύς εξόδου του ηλεκτρικού κινητήρα P_{\max} είναι το γινόμενο της μέγιστης ροπής T_{\max} και της μέγιστης ταχύτητας ω_{\max}

Πιο συγκεκριμένα, $\omega_{\max/r} = 53rad / sec$

$$\text{οπότε} \quad P_{\max} = T_{\max} * \omega_{\max} = 64W$$

Η αντίσταση του κινητήρα R_m είναι περίπου 4Ω και η αντίσταση των τρανζίστορ ισχύος είναι $R_{KI} = 1\Omega$. Συγκεντρωτικά, η επιπρόσθετη ισχύς που χρειάζεται δίνεται από:

$$\Delta P = I^2 (R_m + R_{KI}) = 80W$$

Έτσι, η μέγιστη ισχύς είναι $P_{\max} = P_0 + \Delta P = 144W$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Το δυναμικό μοντέλο του τεχνητού χεριού είναι

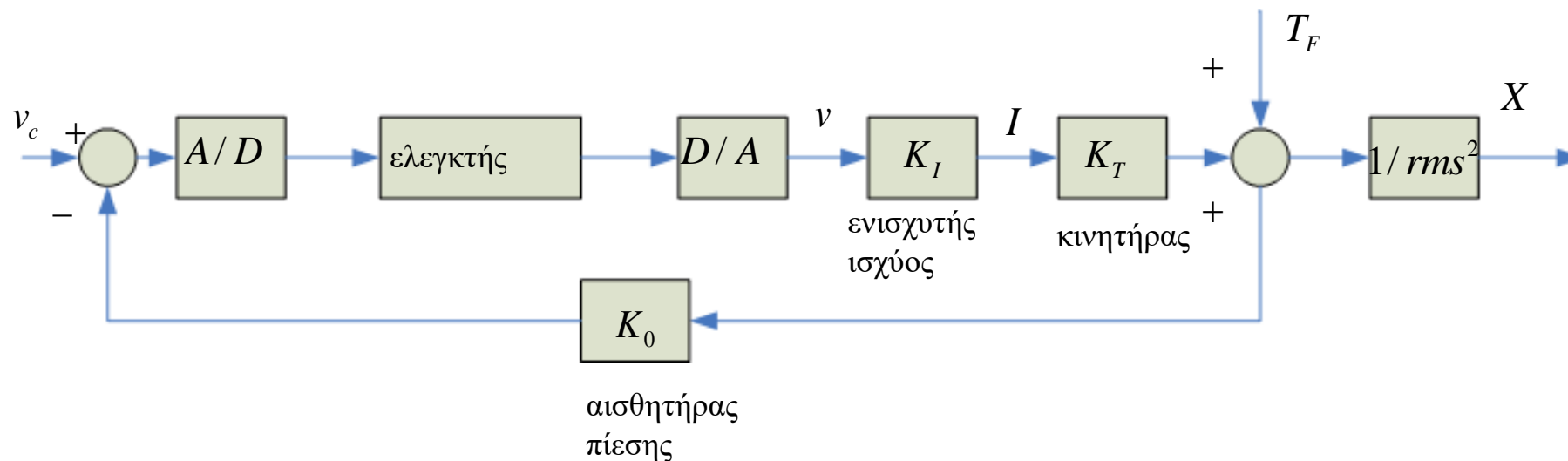
$$T = rm\ddot{X}$$

$$X = \Delta Y_0 - \Delta Y$$

Η συνάρτηση μεταφοράς είναι

$$\frac{X(s)}{T(s)} = \frac{1}{rms^2}$$

Ο κλειστός βρόχος του συστήματος φαίνεται παρακάτω:



Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Η αριθμητική τιμή του κέρδους K_0 του αισθητήρα πίεσης είναι $\frac{5V}{6mm} = 0.83V / mm$

Καθως η σταθερή είσοδος αντιστοιχεί σε 5.22mm, η ονομαστική συστολή $V_{είναι}$

$$V_c = (\Delta Y_0 - \Delta Y_F) K_0 = 4.33V$$

Σχεδιασμός ελεγκτή

η απαιτούμενη DC stiffness ST είναι $ST=0.1mm$

Η υπολογισμένη τριβή Coulomb T_F είναι $T_F = 10^{-2} Nm$

Το DC κέρδος του ελεγκτή είναι $K = \frac{T_F}{(ST)(K_0 K_I K_T)}$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Η συνάρτηση μεταφοράς του ανοιχτού βρόχου (χωρίς τη δυναμική του ελεγκτή) είναι

$$G(z) = \underbrace{\frac{K_0 K K_I K_T}{rm}}_{K_1} (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{1}{s^3} \right\} \qquad G(z) = \frac{K_1 T^2}{2} \frac{z+1}{(z-1)^2}$$

Καθώς ο σχεδιασμός θα γίνει στο w επίπεδο, μπορούμε να αντικαταστήσουμε

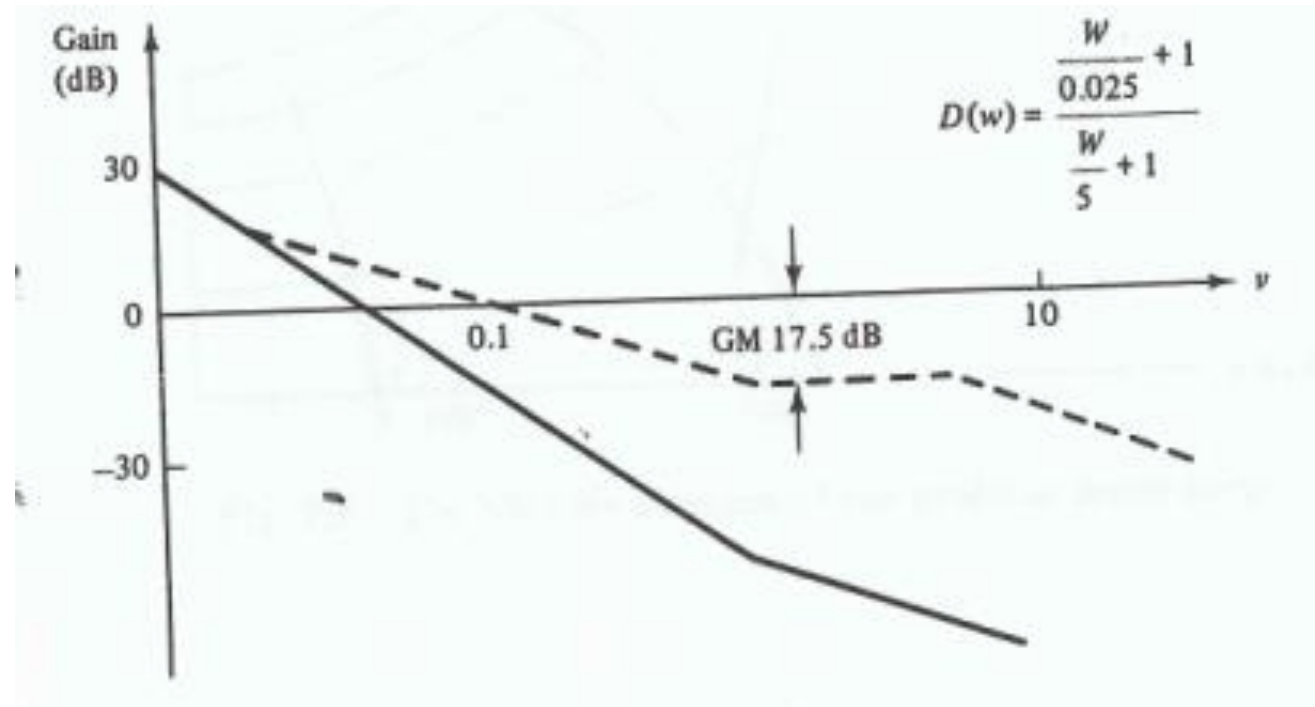
$$z = \frac{1+w}{1-w}$$

το οποίο δίνει $G(w) = \frac{K_1 T^2}{4} \frac{(1-w)}{w^2}$

Η απόκριση συχνότητας ανοιχτού βρόχου δίνεται απο $G(j\nu) = 1660 T^2 \frac{(1-j\nu)}{(j\nu)^2}$

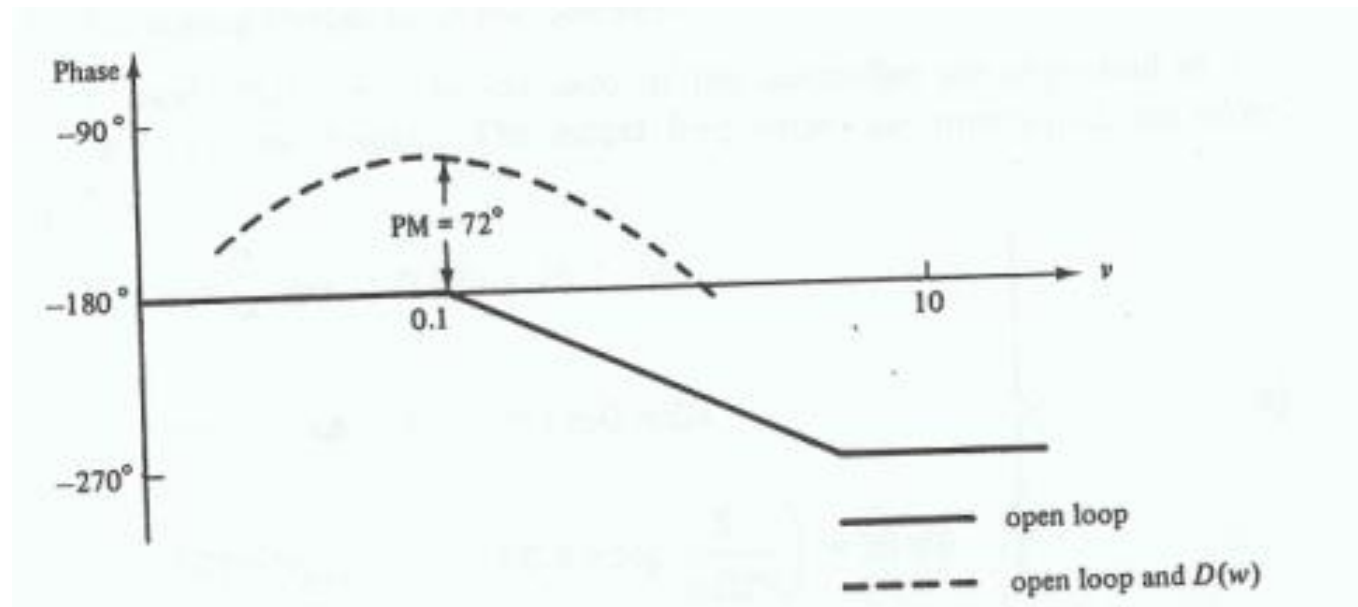
Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Το διάγραμμα Bode του συστήματος ανοιχτού βρόχου με και χωρίς αντιστάθμιση φαίνεται παρακάτω:



(διάγραμμα πλάτους)

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού



(διάγραμμα φάσης)

Σε αυτήν την περίπτωση οι θέσεις των πόλων και των μηδενικών στο ω επίπεδο είναι ανεξάρτητες από το χρόνο δειγματοληψίας T . Το DC κέρδος όμως σχετίζεται άμεσα με το T^2 .

Στο διάγραμμα Bode φαίνεται ότι μια αύξηση στο T απαιτεί περισσότερη προσπάθεια για να σταθεροποιηθεί το σύστημα. Επιλέγουμε $T=1.4\text{ms}$.

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Παρατήρηση

Η συνάρτηση μεταφοράς στο ω επίπεδο είναι μη ελαχίστης φάσης, έτσι το μηδενικό δημιουργεί αρνητική φάση.

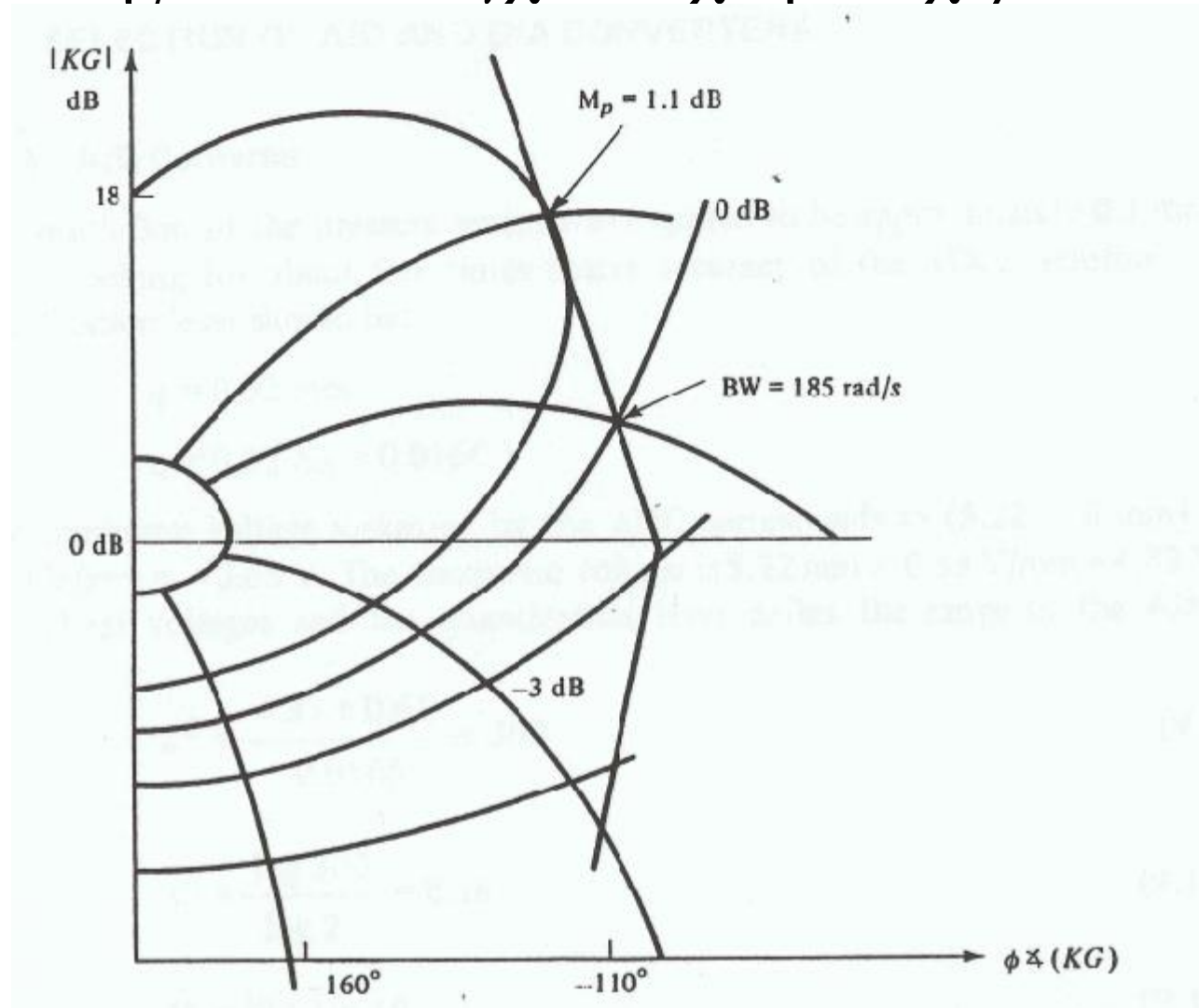
Σχεδίαση του δικτύου αντιστάθμισης

Η μέγιστη επιτρεπτή υπερύψωση είναι 15%. Επίσης απαιτούμε περιθώριο φάσης $PM > 50^\circ$ και περιθώριο κέρδους $GM > 10dB$

Το σύστημα κλειστού βρόχου μπορεί να προσεγγιστεί από ένα σύστημα 2^{ης} τάξης. Έτσι, η υπερύψωση 15% αντιστοιχεί σε $M_p = 1.3dB$ στο διάγραμμα Nichols

M_p είναι το μέγιστο κέρδος του κλειστού βρόχου

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού



(διάγραμμα Nichols)

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Ύστερα απο μερικές δοκιμές ένα κατάλληλο δίκτυο αντιστάθμισης έχει την συνάρτηση μεταφοράς

$$D(w) = 0.4 \frac{\left(\frac{w}{0.025} + 1\right)}{\left(\frac{w}{5} + 1\right)}$$

το διάγραμμα Bode της συνάρτησης μεταφοράς φαίνεται στις προηγούμενες σελίδες (με διακεκομμένη γραμμή)

Απόκριση συχνότητας του ελεγκτή.

Ο πόλος και το μηδενικό του ελεγκτή εκφράζονται στη φανταστικό πεδίο συχνότητας w . Οι πραγματικές συχνότητες είναι

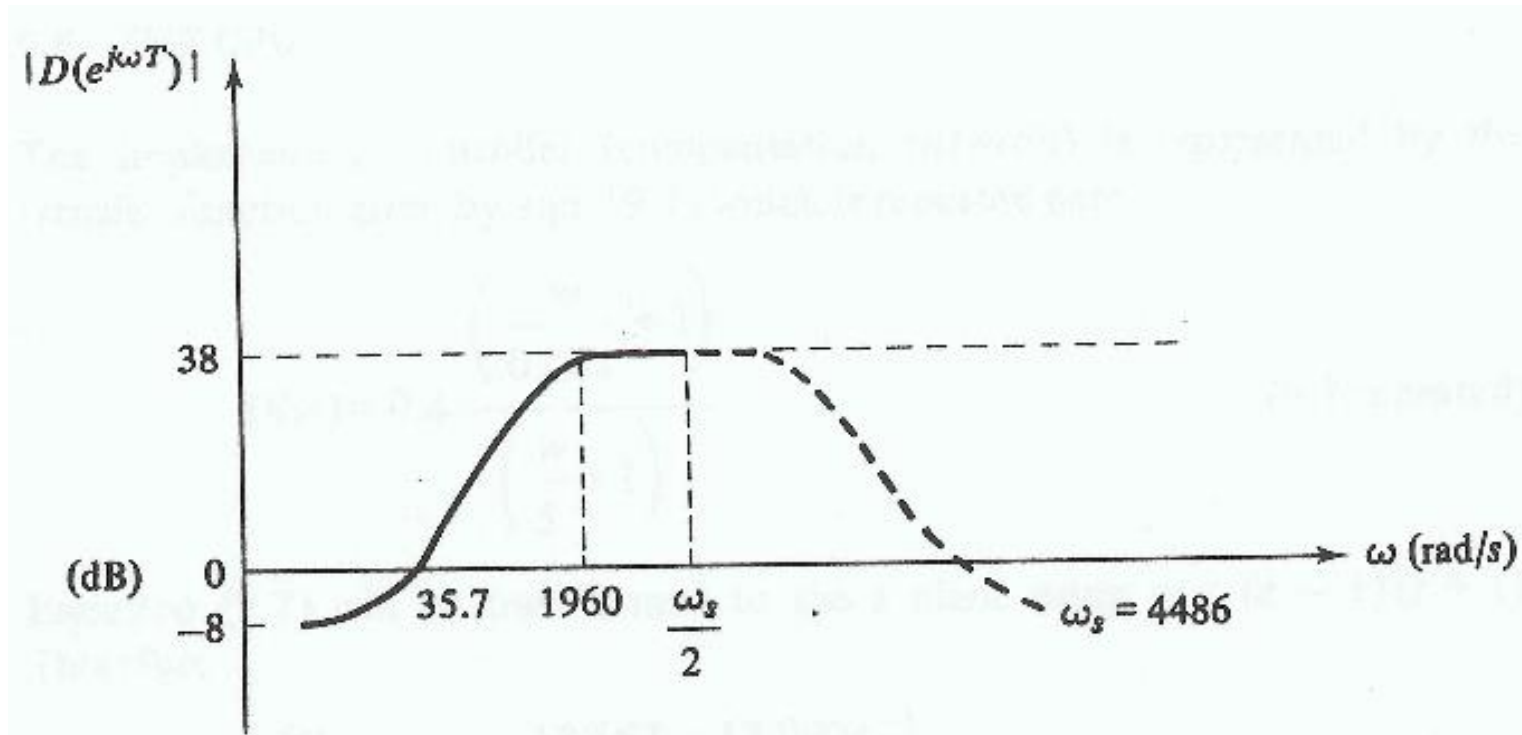
$$a = \frac{2}{T} \tan^{-1} 0.025 = 35.7 \text{ rad / sec}$$

$$b = \frac{2}{T} \tan^{-1} 5 = 1960 \text{ rad / sec}$$

$$|D(j\nu)|_{\max} = 20 \left(\log 0.4 + \log \frac{5}{0.025} \right) = 38 \text{ dB}$$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Το κέρδος του ελεγκτή συναρτήσει της συχνότητας φαίνεται παρακάτω:



Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

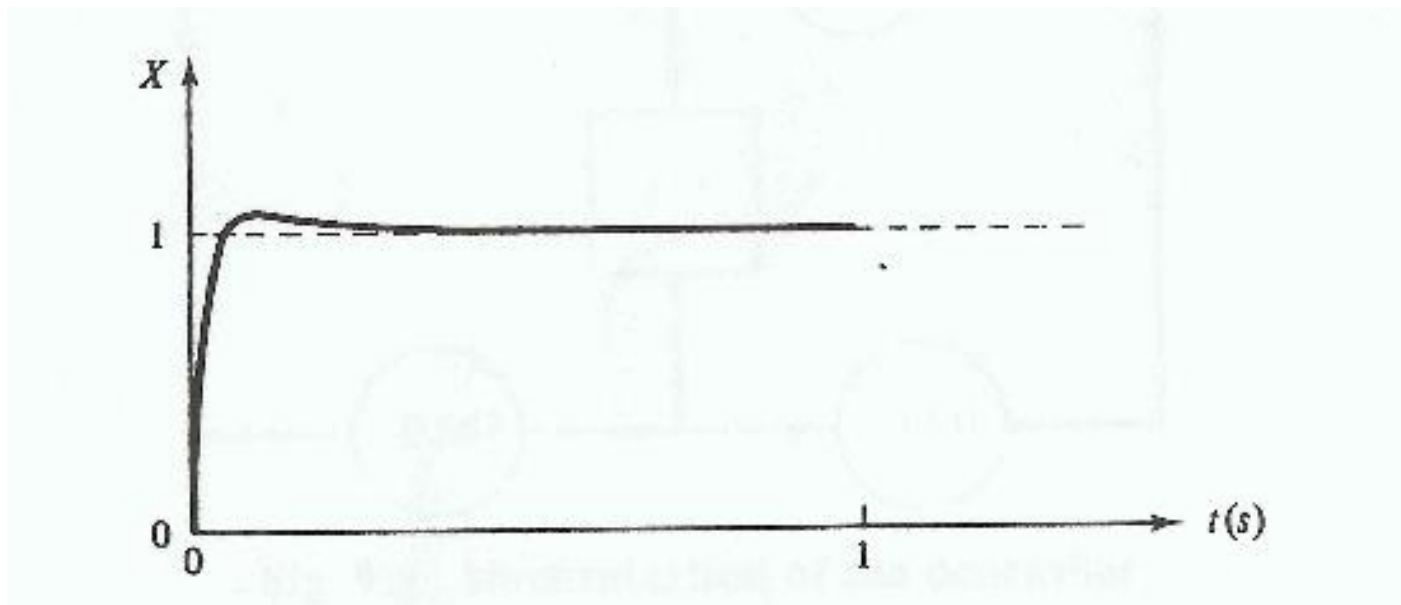
Ιδιότητες του κλειστού βρόχου

Από το διάγραμμα Bode βλέπουμε ότι

$$PM = 72^{\circ}$$

$$GM = 17.5dB$$

Η υπέρψωση είναι 12%. Παρακάτω φαίνεται η βηματική απόκριση:



Το εύρος ζώνης το κλειστού συστήματος είναι 185rad/sec όπως φαίνεται απο τα διαγράμματα Bode και Nichols:

$$BW \cong \frac{2}{T} \tan^{-1} 0.13 \approx 185rad / sec$$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Επιλογή των μετατροπέων A/D και D/A

A/D

Η ακρίβεια του αισθητήρα πίεσης θεωρείται ότι είναι περίπου 0.1mm. Θέλουμε γύρω στις 5 φορές καλύτερη ακρίβεια απο τον A/D μετατροπέα, όποτε το επίπεδο κβαντισμού είναι

$$q = 0.02m$$

$$q = 0.02K_0 = 0.0166V$$

Η ελάχιστη τάση που μπορεί να μετρηθεί απο τον A/D αντιστοιχεί σε

$$(5.22 - 6)mm * 0.83V / mm = -0.65V$$

Η μέγιστη τάση είναι $5.22mm * 0.83V / mm = 4.33V$

$$2^C = \frac{4.33 + 0.65}{0.0166} \approx 300$$

Έχουμε:

$$C = \frac{\log 300}{\log 2} = 8.26$$

$$M = C + 1 = 10$$

Έτσι, ο απαιτούμενος αριθμός bits είναι 10

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

D/A

Ο αριθμός των bits που απαιτούνται για την αναπαράσταση του αριθμού είναι ίδιος με τον μετατροπέα A/D , δηλαδή 10.

Ο θόρυβος κβαντισμού που προκαλείται από τον A/D μετατροπέα προέρχεται από το πεπρασμένο μήκος λέξης. Ο τυχαίος θόρυβος είναι

$$F = 10 \log \frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{\varepsilon}_T^2} = 10 \log_{10} \frac{2^{2(C+1)}}{3}$$

$$F = 10 \log_{10} 2^{20} = 55.4 \text{ dB}$$

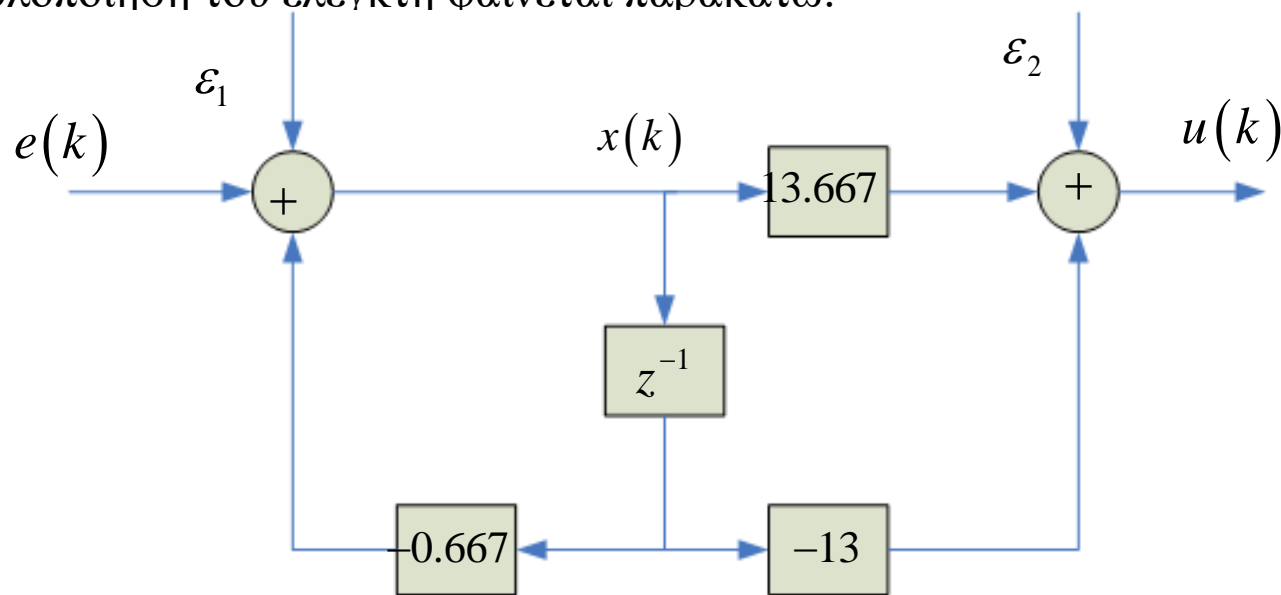
Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι (στο επίπεδο w)

$$D(w) = 0.4 \frac{\left(\frac{w}{0.025} + 1\right)}{\left(\frac{w}{5} + 1\right)}$$

Στο επίπεδο z είναι $\frac{u(z)}{e(z)} = D(z) = \frac{13.667 - 13z^{-1}}{1 + 0.667z^{-1}}$

Η υλοποίηση του ελεγκτή φαίνεται παρακάτω:



Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Απαιτούμενο μήκος λέξης CPU

Ο πολλαπλασιαστικός θόρυβος (ϵ_1, ϵ_2) παράγεται στα 2 αθροιστικά σημεία του συστήματος.

Η ενίσχυση του θορύβου (ϵ_1, ϵ_2) που μεταφέρεται στο σύστημα είναι

$$K' = \frac{1}{2\pi j} \oint \left(D_1(z) D_1(z^{-1}) z^{-1} + z^{-1} \right) dz$$

Η συνάρτηση μεταφοράς $D_1(z)$ είναι ίδια με την $D(z)$ οπότε:

$$K' = \frac{1}{2\pi j} \oint \left(\left(\frac{13.67z - 13}{z + 0.66} \right) \left(\frac{13.67z^{-1} - 13}{z^{-1} + 0.66} \right) + 1 \right) z^{-1} dz$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα των ολοκληρωτικών υπολοίπων έχουμε $K' \approx 1325$

Ο θόρυβος είναι περίπου $F=40\text{dB}$

Έτσι, το απαιτούμενο μήκος λέξης είναι

$$C + 1 = \frac{F(\text{dB})}{6} + 0.8 + \frac{10}{6} \log_{10} K' = 12.67 \quad C = 14\text{bits}$$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Μήκος λέξης μνήμης

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το διάγραμμα Bode , η ακρίβεια της συνάρτησης μεταφοράς είναι ευαίσθητη στη θέση του μηδενικού στο w επίπεδο.

Το μηδενικό βρίσκεται στο w -επίπεδο στη θέση $a=0.025$. επιτρέπεται μια μέγιστη μετατόπιση 20%, ή $\Delta a=0.005$. Αυτή η αβεβαιότητα μεταφράζεται σε ελάχιστο μήκος λέξης :

$$\frac{w}{a} + 1 \rightarrow \frac{a+1}{a} \frac{z + \frac{a+1}{a-1}}{z+1}$$

$$\frac{a+1}{a-1} - \frac{a+\Delta a-1}{a+\Delta a+1} = \frac{-2\Delta a}{(a+1)(a+\Delta a+1)}$$

$$2^{-c} = \left| \frac{2\Delta a}{(a+1)(a+\Delta a+1)} \right| \quad C = -3.32 \log_{10} \left| \frac{2\Delta a}{(a+1)(a+\Delta a+1)} \right|$$

Ψηφιακός έλεγχος τεχνητού χεριού

Αντικαθιστώντας $\alpha=0.025$ και $\Delta\alpha=0.005$ παίρνουμε $C=6.7$.

Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου

Η συνάρτηση μεταφοράς είναι
$$\frac{u(z)}{e(z)} = D(z) = \frac{13.667 - 13z^{-1}}{1 + 0.667z^{-1}}$$

Στο χρόνο είναι
$$u(k) = -0.667u(k-1) + 13.667e(k) - 13e(k-1)$$

Το πρόγραμμα στον υπολογιστή που ελέγχει το τεχνητό χέρι πρέπει να συμπεριλαμβάνει και τα 3 στάδια που έχουν περιγραφεί .

Στο στάδιο επιτάχυνσης, η έξοδος του D/A μετατροπέα είναι
$$u_a = \left(\frac{rma_1 + T_F}{K_T K_I} \right) = 0.11V$$

Στο στάδιο επιβράδυνσης είναι
$$u_d = \left(\frac{T_{\max}}{K_T K_I} \right) = 4V$$

Το διάγραμμα ροής είναι:

