

## Άσκηση 4

### Υλοποίηση ON/OFF και PID Ελεγκτών

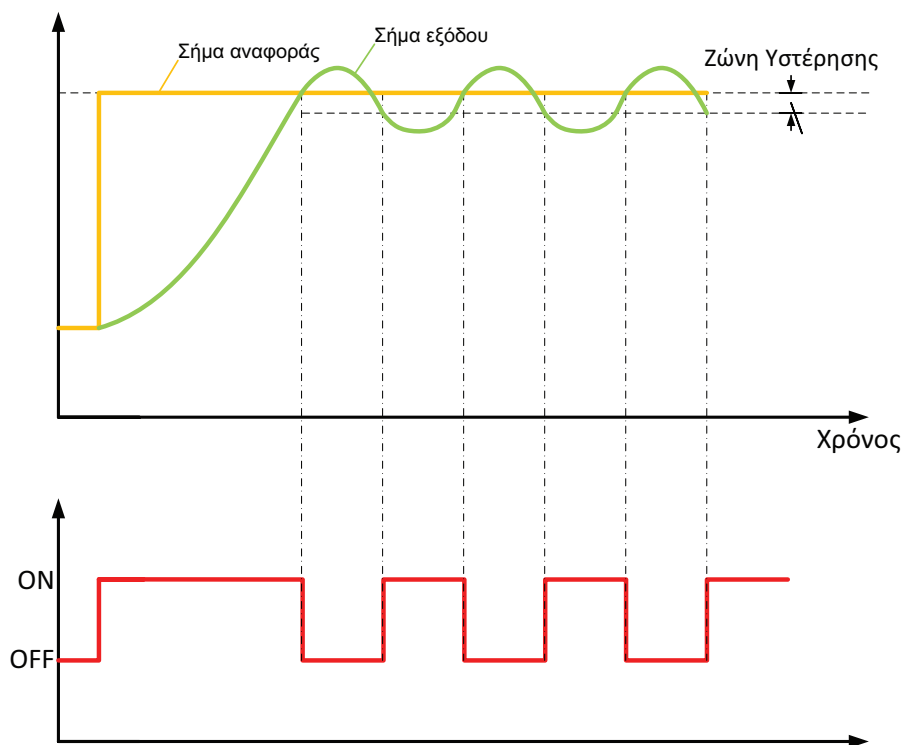
Σκοπός της άσκησης, είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση απλών ελεγκτών (ON/OFF και PID) στο περιβάλλον του λογισμικού LabVIEW. Παράλληλα, θα μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων κάθε ελεγκτή στο υπό έλεγχο σύστημα, έχοντας ως τελικό στόχο τη ρύθμιση και προσαρμογή της απόκρισης του σε επιθυμητές προδιαγραφές. Τα πειράματα θα πραγματοποιηθούν πάνω στις ήδη υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις του εργαστηρίου.

### Θεωρία

#### ON/OFF Έλεγχος

Ο ON/OFF ελεγκτής αποτελεί την πιο απλή περίπτωση ελεγκτή ανάδρασης και ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια των μη γραμμικών ελεγκτών. Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά και ως Bang-Bang ελεγκτής ή ελεγκτής υστέρησης.

Ένας ON/OFF ελεγκτής υπολογίζει το σήμα εισόδου στο σύστημα από την σχέση  $u(t) = K \text{sign}(e(t))$  όπου  $K$  είναι μια παράμετρος κέρδους,  $\text{sign}$  η συνάρτηση προσήμου και  $e(t)$  το σήμα σφάλματος ανάμεσα στην τιμή αναφοράς και στην έξοδο του συστήματος ( $e(t) = r(t) - y(t)$ ).



Σχήμα 4.1. ON/OFF ελεγκτής

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η έξοδος ενός συστήματος που υπόκειται σε ON/OFF έλεγχο. Ο ελεγκτής αρχικά ενεργοποιείται και προκαλεί αύξηση της τιμής της εξόδου. Έπειτα,

παραμένει ενεργοποιημένος μέχρις ότου η έξοδος φτάσει την τιμή αναφοράς και απενεργοποιείται όταν τη ξεπεράσει. Όταν η έξοδος μειωθεί παρακάτω από μια καθορισμένη τιμή (που μαζί με την τιμή αναφοράς ορίζουν την ζώνη υστέρησης του ελεγκτή) ο ελεγκτής ενεργοποιείται εκ νέου και η λειτουργία ενεργοποίησης-απενεργοποίησης του συνεχίζει να επαναλαμβάνεται κυκλικά. Σε άλλες υλοποιήσεις του ελεγκτή, η ζώνη υστέρησης αντικαθίσταται από μια περιοχή γύρω από το σήμα αναφοράς (*threshold*), όπου υποθέτουμε ότι αν η έξοδος εισέλθει σε αυτήν, τότε το σύστημα έχει φθάσει στη μόνιμη τιμή. Όπως καταλαβαίνουμε, η διακοπτική λειτουργία του ON/OFF ελεγκτή δεν οδηγεί σε σταθεροποίηση της εξόδου στην τιμή αναφοράς, κάτι που αποτελεί και το κύριο μειονέκτημα του.

Για να αντισταθμίσουμε το παραπάνω μειονέκτημα, στην είσοδο του συστήματος (δηλαδή την έξοδο του ελεγκτή) συνήθως προσθέτουμε έναν προαντισταθμιστή κέρδους (*prefilter*) που έχει ως στόχο να σταθεροποιήσει την έξοδο στην τιμή αναφοράς. Ο έλεγχος αυτός ονομάζεται προαντισταθμιστικός (*feedforward*) και ο όρος ελέγχου είναι ο  $u_f(t) = 1/L \cdot r(t)$ , όπου  $r(t)$  είναι το σήμα αναφοράς.

### PID Έλεγχος

Ο PID ελεγκτής ή αλλιώς ελεγκτής τριών όρων, είναι ένας αντισταθμιστής σειράς που επεμβαίνει στον απ' ευθείας κλάδο του κλειστού συστήματος και ρυθμίζει το σήμα που οδηγεί τον ενεργοποιητή σε ένα σύστημα, λαμβάνοντας υπ' όψη την απόκλιση (σφάλμα) της εισόδου από την έξοδο. Η τιμή του σφάλματος θα σταλεί στον PID Controller, ο οποίος θα υπολογίσει τόσο την παράγωγο όσο και το ολοκλήρωμα αυτού του σήματος. Το σήμα που δίνει ο ελεγκτής σαν είσοδο στο σύστημα, θα είναι ίσο με το αναλογικό κέρδος  $K_p$  επί την τιμή του σφάλματος, συν το ολοκληρωτικό κέρδος  $K_i$  επί το ολοκλήρωμα του σφάλματος, συν το διαφορικό κέρδος  $K_d$  επί την παράγωγο του σφάλματος.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Το σήμα αυτό θα σταλεί στο σύστημα προς έλεγχο και στη συνέχεια θα λάβουμε ένα νέο σήμα εξόδου. Η νέα έξοδος θα σταλεί ξανά πίσω στο αισθητήριο για να ανιχνεύσει και αυτό με τη σειρά του το νέο σήμα σφάλματος. Ο ελεγκτής θα πάρει αυτό το νέο σήμα σφάλματος και θα υπολογίσει ξανά την παράγωγο και το ολοκλήρωμα και η ίδια διαδικασία θα επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Για τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή τριών όρων έχουμε ότι:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

όπου οι διάφορες σταθερές ορίζονται σαν:

$K_p$  = Σταθερά δράσης αναλόγου ελέγχου, έχει σχέση με την απολαβή του ανοικτού βρόχου.

$K_i$  = Σταθερά δράσης ελέγχου ολοκληρώματος, έχει σχέση με τη κλίση που δημιουργεί η ολοκλήρωση.

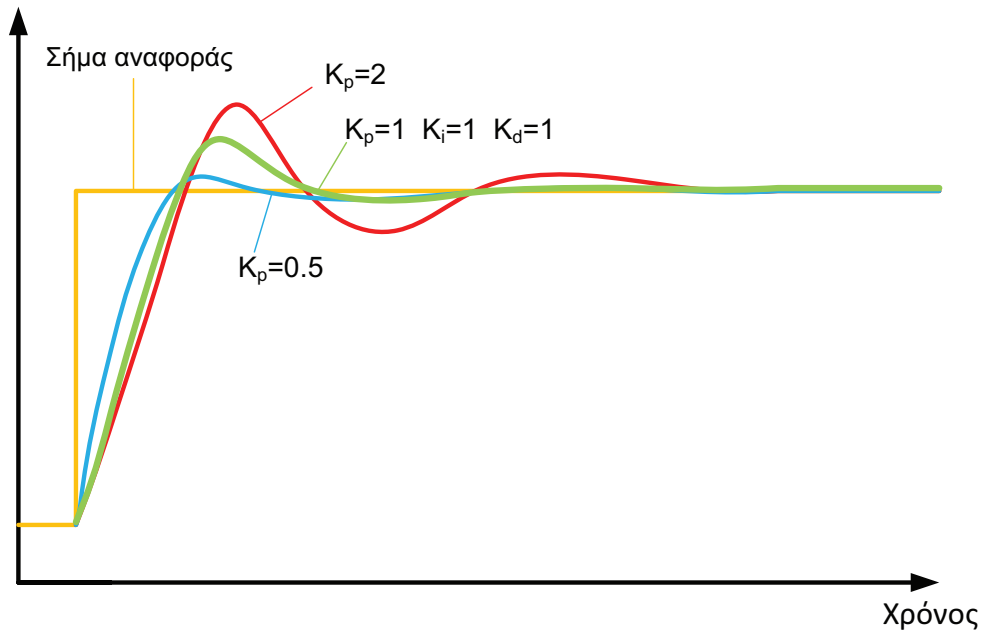
$K_d$  = Σταθερά δράσης ελέγχου παραγώγου.

$\tau_i$  = Χρόνος επαναφοράς (reset time).

$\tau_d$  = Χρόνος ρυθμού (rate time).

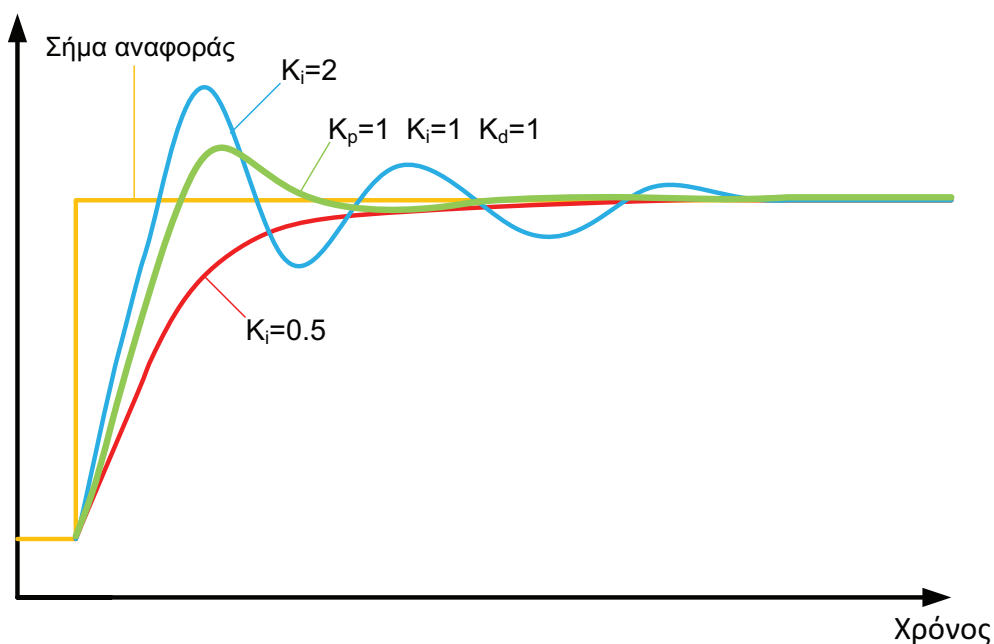
Κάθε όρος της παραπάνω συνάρτησης μεταφοράς προσφέρει και διαφορετικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα:

Η χρήση αναλογικού ελέγχου  $K_p$  έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης (κάνει το σύστημα πιο γρήγορο). Επίσης ρυθμίζει το μόνιμο σφάλμα και τείνει να το μηδενίσει αλλά ποτέ δεν το μηδενίζει, παραμένει ένα μόνιμο σφάλμα ανάλογα με το τύπο του συστήματος.



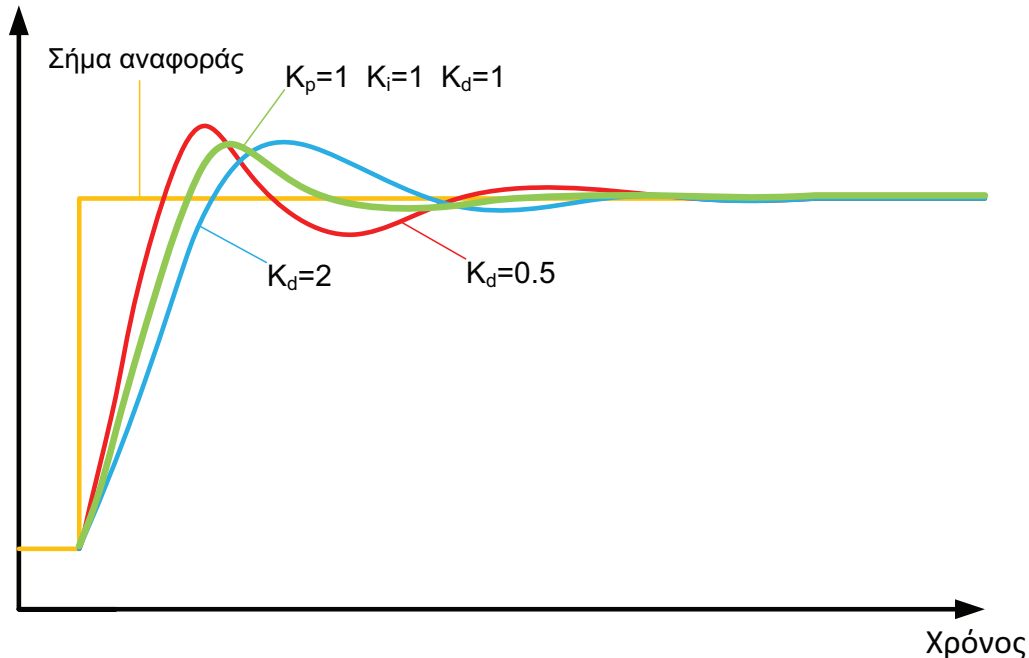
Σχήμα 4.2. Επίδραση του όρου  $K_p$

Ο έλεγχος ολοκληρώματος  $K_i/s$  αυξάνει το τύπο του συστήματος με συνέπεια να μηδενίζει το μόνιμο σφάλμα αλλά μεταβάλλει προς το χειρότερο τη μεταβατική συμπεριφορά καθώς προκαλεί την εμφάνιση ταλαντώσεων.



Σχήμα 4.3. Επίδραση του όρου  $K_i$

Ο έλεγχος παραγώγου  $K_d s$  βελτιώνει τη μεταβατική συμπεριφορά απομακρύνοντας τους επικρατούντες πόλους από τον φανταστικό άξονα, όμως χειροτερεύει την μόνιμη συμπεριφορά και καταστρέφει την ποιότητα του σήματος εισόδου που εισάγεται στο σύστημα (λόγω της παραγώγισης του θορύβου που υπάρχει στην έξοδο).



Σχήμα 4.4. Επίδραση του όρου  $K_d$

Όπως είναι φανερό και από τη συνάρτηση μεταφοράς του PID ελεγκτή στο πεδίο La Place ( $G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$ ), ο ελεγκτής αυτός δεν είναι υλοποιήσιμος. Η διακριτοποίηση του ελεγκτή δίνει μια διακριτή συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_{PID}(z^{-1}) = K_p + \frac{K_i T_s}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} + \frac{K_d}{T_s} (1 - z^{-1})$$

Για τον όρο ολοκλήρωσης χρησιμοποιήθηκε ο διγραμμικός μετασχηματισμός Tustin ενώ για τον όρο παραγώγισης χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός «προηγούμενης τιμής διαφοράς» (*backward difference*). Ουσιαστικά η επίτευξη της υλοποίησης του έγκειται στο γεγονός ότι ο όρος της παραγώγου υλοποιείται στο LabVIEW σε διακριτό χρόνο (δηλαδή ως μια εξίσωση διαφορών).

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<i>Manual Tuning</i>	Δεν απαιτείται γνώση μαθηματικής θεωρίας, on-line μέθοδος	Απαιτείται εμπειρία
<i>Ziegler-Nichols</i>	On-line μέθοδος υψηλής απόδοσης	Επιθετική ρύθμιση, παρενόχληση του ελέγχου
<i>Software Tools</i>	Προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος σε πολλές πιθανές καταστάσεις λειτουργίας	Κόστος και ανάγκη εκπαίδευσης
<i>Cohen-Coon</i>	Καλά μοντέλα επεξεργασίας	Offline μέθοδος, πολύπλοκος υπολογισμός

Πίνακας 4.1. Μέθοδοι ρύθμισης των παραμέτρων του PID ελεγκτή

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνικές ρύθμισης των παραμέτρων του ελεγκτή PID καθώς και τα κυριότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα τους. Από αυτές, η μέθοδος *Manual Tuning* και *Software Tools* ή συνδυασμός αυτών των δύο φαίνεται ως η προτιμότερη στα συστήματα ελέγχου κίνησης όπου η μη γραμμικότητα και πολυμεταβλητότητα του μοντέλου κάνει τη μαθηματική ανάλυση ευστάθειας πρακτικά αδύνατη.

Στα πλαίσια της εργαστηριακής άσκησης θα εξετάσουμε τις μεθόδους *Ziegler-Nichols* και *Manual Tuning*.

Η μέθοδος *Manual Tuning* βασίζεται στη “*trial and error*” λογική του πειραματισμού με διάφορες τριπλέτες των κερδών του PID ελεγκτή μέχρι να πετύχουμε απόκριση συστήματος που θα ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουμε, κάθε φορά, ορίσει. Όπως γίνεται αντιληπτό, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των τιμών καθώς μεγάλες τιμές στα κέρδη του ελεγκτή μπορούν να φέρουν το σύστημα στην αστάθεια αλλά και να οδηγήσουν σε περαιτέρω προβλήματα αν δεν έχουμε προνοήσει να «φράξουμε» την έξοδο του ελεγκτή μέσα στα επιτρεπτά όρια καλής λειτουργίας του συστήματος κάνοντας χρήση κατάλληλων φίλτρων.

Στη μέθοδο *Ziegler-Nichols*, ο υπολογισμός των PID-παραμέτρων εξαρτάται από το κρίσιμο κέρδος  $K_p^{critical}$  και τη συχνότητα των ταλαντώσεων  $\omega_{critical} = 2\pi/T_p^{critical}$ . Συγκεκριμένα, θέτουμε  $K_i = K_d = 0$  και αυξάνουμε το  $K_p$  μέχρι να ωθήσουμε το σύστημα σε οριακή ευστάθεια ( $K_p^{critical}$ ). Η κρίσιμη απόκριση του συστήματος είναι ένα ημιτονοειδές σήμα (με μη μηδενικό μέσο όρο) με περίοδο  $T_p^{critical}$ . Τα προβλεπόμενα όρια των παραμέτρων από τη μέθοδο *Ziegler-Nichols* παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Τύπος ελεγκτή	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	$0.5K_p^{cr}$	0	0
PI	$0.45K_p^{cr}$	$K_i \leq \frac{0.54K_p^{cr}}{T^{cr}}$	0
PID	$0.6K_p^{cr}$	$K_i \leq \frac{1.2K_p^{cr}}{T^{cr}}$	$K_d \geq \frac{0.6K_p^{cr}T^{cr}}{8}$

Πίνακας 4.2. Προβλεπόμενα όρια παραμέτρων από τη μέθοδο *Ziegler-Nichols*

Για την υλοποίηση του διακριτού PID-ελεγκτή είναι σημαντική η επιλογή όσο το δυνατόν μικρότερης περιόδου δειγματοληψίας, επειδή ο προσεγγιστικός τρόπος της διαφόρισης είναι “ασταθής” από υπολογιστικής άποψης.

## Υλοποίηση

Στο κομμάτι της υλοποίησης, καλείστε να φτιάξετε ένα εικονικό όργανο (vi) που θα υλοποιεί τους ελεγκτές που αναλύθηκαν παραπάνω (ON/OFF, P, PI και PID). Το σύστημα προς έλεγχο είναι η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου που χρησιμοποιήσατε και στο εργαστήριο 3.

Ως έτοιμο μοτίβο θα σας δοθεί το *ON-OFF & PID Template.vi* που περιέχει το κομμάτι για I/O επικοινωνία με το εξωτερικό σύστημα, το οποίο κατασκευάσατε και είδατε αναλυτικά

στο εργαστήριο 3. Τα παραπάνω στοιχεία που έχουν προστεθεί στο vi, θα αναλυθούν και κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου.

Στο έτοιμο vi, δώστε προσοχή πως η επιλογή του ελεγκτή στο *front panel* γίνεται μέσω χρήσης του *tab control* ενώ η υλοποίηση των ελεγκτών στο *block diagram* γίνεται με χρήση του *case structure*. Το *case structure* δέχεται το σήμα αναφοράς  $r$ , την έξοδο του συστήματος  $y$ , και τη συχνότητα δειγματοληψίας  $f$ , ενώ στο εσωτερικό της θα υλοποιήσετε τον εκάστοτε ελεγκτή στην αντίστοιχη κατηγορία ανάλογα με τον τύπο του.

Ως προετοιμασία για το εργαστήριο, συνίσταται να ξαναχτίσετε στο σπίτι το vi απο την αρχή, ώστε να κατανοήσετε πλήρως τη λειτουργία του. Τα *DAQmx sub-vi's*, τα οποία δεν βρίσκονται προεγκατεστημένα στο LabVIEW και είναι απαραίτητα για την υλοποίηση του vi, μπορείτε να τα κατεβάσετε απο την ιστοσελίδα της NI (<http://joule.ni.com/nidu/cds/view/p/id/2214/lang/en>). Παρ' όλα αυτά, το έτοιμο vi ανοίγει κανονικά και χωρίς τα *DAQmx*. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να πατήσετε "ignore subVI" στα warning messages που θα σας εμφανίσει στην αρχή το λογισμικό. Στη θέση των sub-vi που λείπουν, το πρόγραμμα θα τοποθετεί κενό block ('?') αλλά η μελέτη, αλλαγή και αποθήκευση του εικονικού οργάνου θα μπορεί να γίνει χωρίς περαιτέρω πρόβλημα. Αν τελικά χρησιμοποιήσετε το έτοιμο vi, μην ξεχάσετε πρώτα να το σώσετε δίνοντας του το κατάλληλο όνομα (O#A4.vi).

**ON/OFF:** Στην καρτέλα του tab control που αντιστοιχεί στον ON/OFF ελεγκτή, ορίζεται η παράμετρος κέρδους  $K$ . Να υλοποιηθεί ο παραπάνω ελεγκτής στην αντίστοιχη κατηγορία του *case structure*. Στην αντίστοιχη ταμπέλα του tab control έχει τοποθετηθεί ένας Boolean control για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του προαντισταθμιστικού (feedforward) ελέγχου. Θα πρέπει να ορίσετε κατάλληλα την υλοποίηση του ON/OFF στο block diagram ώστε να εφαρμόζεται η εκάστοτε έκδοση ανάλογα με την επιλογή του χρήστη. Θυμίζουμε πως χωρίς προαντιστάθμιση, η έξοδος του ελεγκτή (και είσοδος στο σύστημα) θα είναι  $u(t)$  ενώ με προαντιστάθμιση θα είναι  $u(t) + u_f(t) = u(t) + 1/L \cdot r(t)$ .

**PID:** Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο PID ελεγκτής δεν είναι υλοποιήσιμος, όμως πετυχαίνουμε υλοποίηση του εκμεταλλευόμενοι την εκτέλεση στο LabVIEW σε διακριτό χρόνο και υλοποίηση του όρου της διαφόρισης ως μια εξίσωση διαφορών. Στην καρτέλα του tab control που αντιστοιχεί στον PID ελεγκτή, ορίζονται οι παράμετροι αυτού.

Να υλοποιηθεί ο παραπάνω ελεγκτής στην αντίστοιχη κατηγορία του *case structure*. Πειραματιστείτε με P, PI και PID ελεγκτές δίνοντας διάφορες τιμές στα αντίστοιχα κέρδη τους (εφαρμόστε, δηλαδή, τη μέθοδο *Manual Tuning*). Στην περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε tuning του PID με *Ziegler-Nichols*, ορίστε P ελεγκτή και μεταβάλλεται το κέρδος μέχρι το σύστημα να φθάσει σε οριακή ευστάθεια. Εκτιμήστε απο το γράφημα την κρίσιμη περίοδο ταλάντωσης και στη συνέχεια υπολογίστε μέσω των προβλεπόμενων ορίων του Πίνακα 2 τα κέρδη του PID, όπως τα ορίζει η μέθοδος *Ziegler-Nichols*. Ορίστε τις τιμές αυτές και παρατηρήστε την απόκριση.

Για τις υλοποιήσεις των ελεγκτών θα σας χρειαστούν τα παρακάτω vi's τα οποία καλείστε να έχετε ήδη μελετήσει από το σπίτι.

Numeric Function	→ Sign
Comparison Function	→ Select
Analyze Function	→ Integral $x(t)$ PtByPt
Analyze Function	→ Derivative $x(t)$ PtByPt
Analyze Function	→ Square Wave PtByPt

<i>Time &amp; Dialog Function</i>	→ Merge Errors
<i>Boolean Function</i>	→ Boolean to (0,1)
<i>Comparison Function</i>	→ In Range and Coerce
<i>Cluster Function</i>	→ Unbundle by Name
<i>Numeric Function</i>	→ Reciprocal

## Ερωτήσεις

### ON/OFF Έλεγχος

- 4.1 Την παράμετρο  $K$  την ορίζουμε θετική ή αρνητική; Τι είναι αυτό που καθορίζει το πρόσημο του  $K$ ; Σε ποια από τις 2 περιπτώσεις (θετικό/ αρνητικό  $K$ ) το σύστημα γίνεται ασταθές;
- 4.2 Ποιοι περιορισμοί πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή της παραμέτρου αυτής;
- 4.3 Τι παρατηρείτε στην περίπτωση όπου  $K < r$ ; Γιατί συμβαίνει αυτό;
- 4.4 Πως επηρεάζει η παράμετρος  $K$  τον χρόνο ανόδου και την μέγιστη τιμή του εξόδου του συστήματος;
- 4.5 Αν γνωρίζαμε την συνάρτηση μεταφοράς του υπό-έλεγχου συστήματος, μπορούμε να βρούμε την συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού;
- 4.6 Ο όρος  $(1/L) r(t)$  είναι ο λεγόμενος feedforward έλεγχος. Πρακτικά πώς αντιλαμβάνεστε το ρόλο του; Παρατηρείτε αλλαγή ως προς την μέση τιμή της «ταλαντωτικής» συμπεριφορά της εξόδου του συστήματος όταν επιλεγεί εφαρμογή του feedforward όρου;
- 4.7 Στο συγκεκριμένο πείραμα, οι διαταραχές εισέρχονται στην είσοδο ή στην έξοδο του συστήματος; Είναι ικανός ο On-Off ελεγκτής να καταστείλει τις (α) επιμένουσες και (β) στιγμιαίες προσθετικές διαταραχές που εφαρμόζετε στο σύστημα;

### PID Έλεγχος

- 4.8 Πώς επιδρά η μεταβολή του  $K_p$  στη μεταβατική απόκριση του συστήματος; Μπορεί να επιτευχθεί μηδενικό μόνιμο σφάλμα στην περίπτωση αυτή; Γιατί;
- 4.9 Γίνεται το σύστημα ποτέ ασταθές στην περίπτωση του P ελεγκτή; Αν ναι, πότε; Αν όχι, γιατί;
- 4.10 Πρακτικά τι προβλήματα είναι δυνατόν να παρουσιαστούν στην περίπτωση όπου το κέρδος  $K_p$  είναι πάρα πολύ μεγάλο; Σε τι είδους ελεγκτή ανάγεται ο P ελεγκτής σε αυτήν την περίπτωση (δεδομένου ότι η δομή του παραμένει η ίδια);
- 4.11 Τι επίδραση έχει στο μόνιμο σφάλμα ο feedforward έλεγχος στην περίπτωση αυτή;
- 4.12 Είναι ικανός ο P ελεγκτής να καταστείλει τις (α) επιμένουσες και (β) στιγμιαίες προσθετικές διαταραχές που εφαρμόζετε στο σύστημα;
- 4.13 Στην περίπτωση του PID ελεγκτή, πώς επιδρά ο κάθε όρος (P, I, D) στην απόκριση του κλειστού συστήματος όσον αφορά (α) μόνιμο σφάλμα, (β) σταθερά χρόνου, (γ) υπερύψωση, (δ) χρόνο αποκατάστασης;
- 4.14 Ο PID ελεγκτής εγγυάται ευστάθεια του κλειστού συστήματος;
- 4.15 Είναι ικανός ο PID έλεγχος να καταστείλει τις (α) επιμένουσες και (β) στιγμιαίες προσθετικές διαταραχές που εφαρμόζετε στο σύστημα;
- 4.16 Συντονίστε τον PID με την μέθοδο Ziegler-Nichols. Ποιά είναι τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής σε σχέση με τη μέθοδο manual tuning; Ο συντονισμός οδήγησε σε ικανοποιητική απόκριση; Αν όχι, εξηγήστε γιατί.

**Σημείωση:** Για τη δικαιολόγηση των παραπάνω ερωτήσεων καλείστε να παραθέσετε πειραματικά αποτελέσματα (Print-Screens και ότι άλλο κρίνετε σκόπιμο) ώστε να υποστηρίξετε επαρκώς τις απαντήσεις σας.