

**Πειραματικές Ασκήσεις
Process Control Technology PCT-100**



BYTRONIC
Educational Technology

Επιμέλεια:

Ελένη Παπάζογλου

(Μηχ/γος Μηχ/κος)

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝ. ΕΠΕ

ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ 101

111 44 – ΑΘΗΝΑ

ΤΗΛ: 210-20.10.384

ΦΑΞ: 210-20.15.054

email: webmaster@eds.gr

<http://www.eds.gr>

s/n: _____

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | <u>Σελίδα</u> |
|---|---------------|
| Άσκηση 1 Αναλογικός έλεγχος P. | 3 |
| Άσκηση 2 Αναλογικός και Ολοκληρωτικός έλεγχος PI. | 6 |
| Άσκηση 3 Κορεσμός και Windup. | 9 |
| Άσκηση 4 Έλεγχος τριών όρων ή PID. | 10 |
| Άσκηση 5 Συντονισμός Ziegler / Nichols. | 12 |
| Άσκηση 6 Έλεγχος θερμοκρασίας. | 15 |
| Άσκηση 7: Έλεγχος στάθμης υγρών. | 17 |
| Άσκηση 8 Έλεγχος ανοικτού βρόχου. | 20 |
| Άσκηση 9 Bode Plots. | 22 |
| Άσκηση 10 Μοντέλο βρόχου ροής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Caldwell. | 24 |
| Άσκηση 11 Μοντέλο βρόχου ροής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Sundaresan. | 27 |
| Άσκηση 12 Έλεγχος πίεσης. | 29 |
| Άσκηση 13 Σχεδιασμός ελεγκτή για βρόχο ροής PCT-100. | 33 |
| Άσκηση 14 Εισαγωγή στην οργάνωση. | 34 |
| Άσκηση 15 Εισαγωγή στην εύρεση βλαβών. | 35 |
| Παραρτήματα | 37 |

ΠΡΟΣΟΧΗ

**Προτού ξεκινήσετε τα πειράματα, βεβαιωθείτε
ότι η βαλβίδα εξαέρωσης στην κορυφή της
δεξαμενής διεργασίας είναι ΑΝΟΙΧΤΗ.**

**Η βαλβίδα πρέπει να είναι κλειστή
μόνο όταν διεξάγονται πειράματα πίεσης**

Άσκηση 1 Αναλογικός έλεγχος P

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, απενεργοποιήστε τον έλεγχο I και D, ορίστε τα SP και PG όπως στον παρακάτω πίνακα και καταγράψτε τα αποτελέσματα, ώστε να εφαρμόσετε τον «αναλογικό έλεγχο μόνο» της ροής με τα ακόλουθα ζεύγη τιμών SP και PG. Καταγράψτε τις τιμές σταθερού ρυθμού ροής σε λίτρα / λεπτό στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1), αφού οι αρχικές ταλαντώσεις έχουν εξαληφθεί.

| SP (l/min) | PG | Σταθερή ροή | SP (l/min) | PG | Σταθερή ροή |
|------------|------|-------------|------------|-----|-------------|
| 2.0 | 0.5 | | 0.6 | 1.0 | |
| 2.0 | 1.0 | | 1.0 | 1.0 | |
| 2.0 | 1.5 | | 1.4 | 1.0 | |
| 2.0 | 2.0 | | 1.8 | 1.0 | |
| 2.0 | 4.0 | | 2.2 | 1.0 | |
| 2.0 | 6.0 | | 2.6 | 1.0 | |
| 2.0 | 8.0 | | 3.0 | 1.0 | |
| 2.0 | 10.0 | | 3.4 | 1.0 | |

Πίνακας 1.1

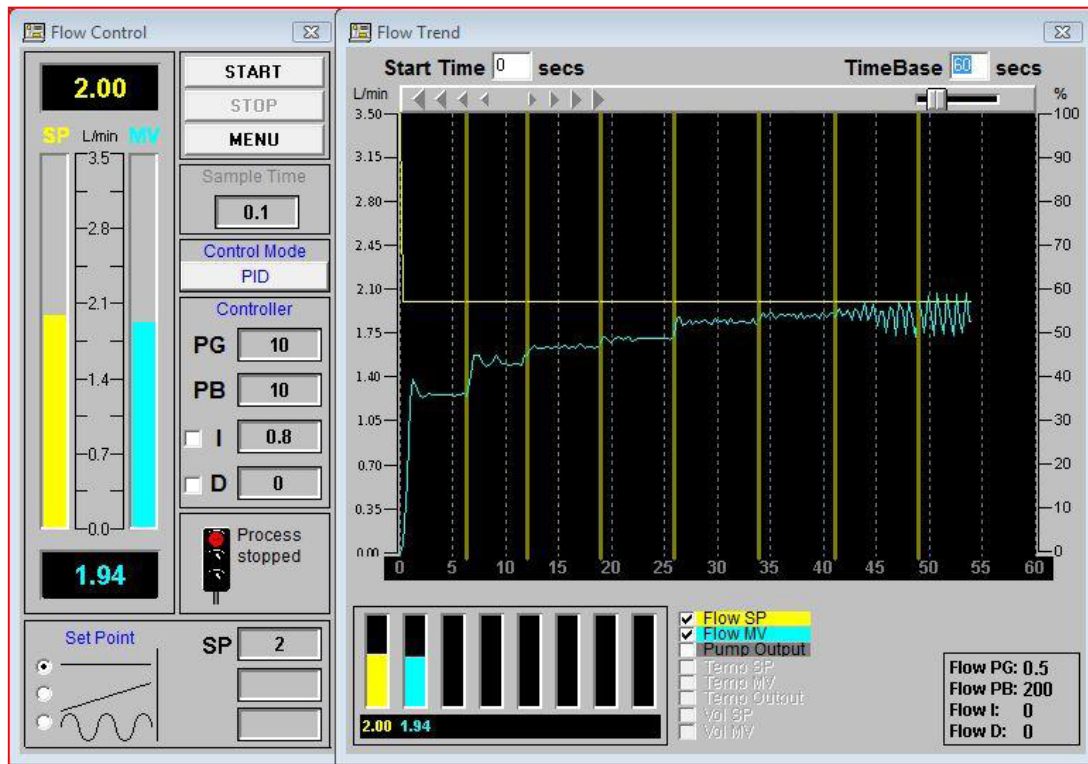


Ποια συμπεράσματα σχετικά με τη φύση του «αναλογικού μόνο ελέγχου» μπορούν να αντληθούν από τις παρατηρήσεις σας;

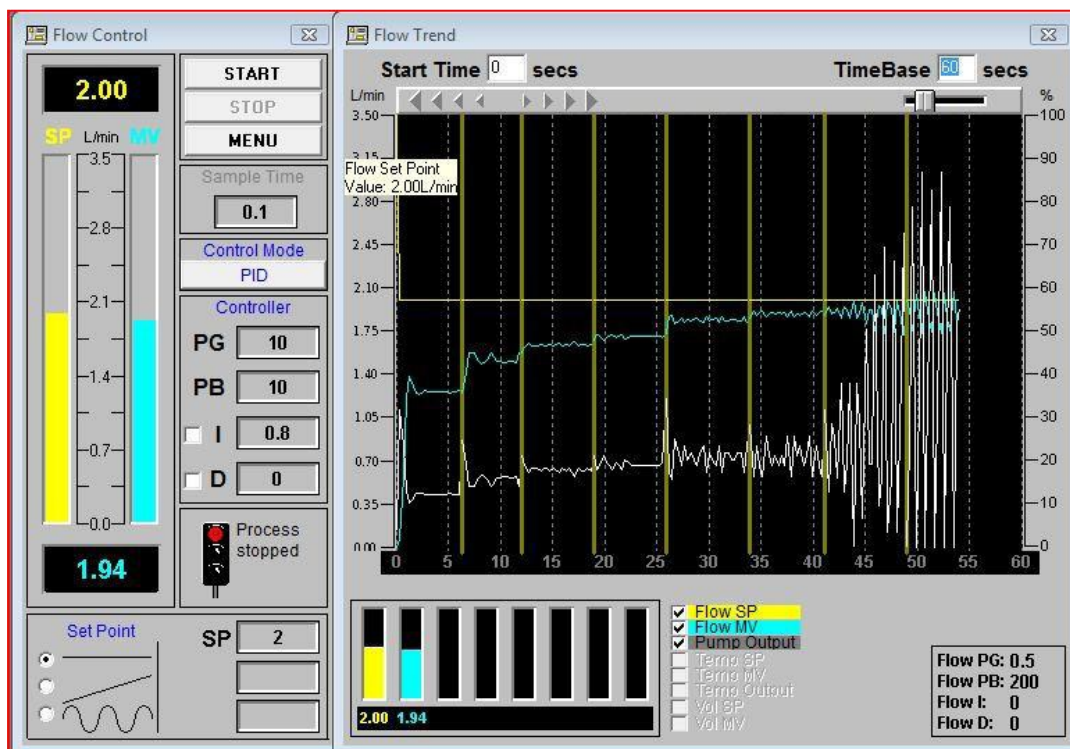
Θα πρέπει να είστε σε θέση να διαπιστώσετε, ότι για ένα δεδομένο SP, η τελική τιμή 'σταθερής κατάστασης' αυξάνεται όσο αυξάνει η PG. Ωστόσο, δεν υπάρχει τιμή PG για την οποία η τιμή σταθερής κατάστασης είναι ακριβώς ίση με την τιμή SP, διότι με αναλογικό έλεγχο πάντα υπάρχει κάποιο σφάλμα. Καθώς αυξάνεται η PG, υπάρχει επίσης αύξηση του μεγέθους και της διάρκειας των αρχικών ταλαντώσεων και αν η PG είναι πολύ υψηλή, πολλά συστήματα θα ταλαντώνονται συνεχώς και ποτέ δεν θα καταλήξουν σε σταθερή κατάσταση.

Για έναν αναλογικό ελεγκτή με δεδομένη τιμή PG, παρόλο που δεν επιτυγχάνεται ποτέ το σημείο ρύθμισης SP, η προκύπτουσα τιμή σταθερής κατάστασης αυξάνει καθώς αυξάνεται το σημείο ρύθμισης. Αυτό αποδεικνύει, ότι είναι εφικτό να χρησιμοποιείτε απλούστερο αναλογικό έλεγχο μόνο, ρυθμίζοντας το SP κατά κατάλληλο ποσό υψηλότερο από την πραγματική επιθυμητή τιμή, αποτελεσματικά, «ξεγελώντας» τον ελεγκτή. Αυτή η στρατηγική μπορεί να είναι αποδεκτή σε μια κατάσταση, όπου το σημείο ρύθμισης δεν πρόκειται να αλλάξει καθόλου ή όπου οι εξωτερικές διαταραχές είναι ελάχιστες, αλλά εάν καμία από αυτές τις συνθήκες δεν είναι αληθινή, απαιτείται γενικά ένας πιο εξελιγμένος ελεγκτής. Για να αποδειχθεί αυτό, διεξάγετε ένα πείραμα με PG = 1 και SP = 3, που σημαίνει ότι πρέπει πραγματικά να διαπιστώσετε μια τιμή σταθερής κατάστασης 1 λίτρου / λεπτό εάν αυτή είναι η πραγματικά επιθυμητή τιμή και δεν υπάρχουν διαταραχές. Θα πρέπει επίσης να παρατηρήσετε ότι το ίχνος εξόδου ελέγχου (λευκό) βρίσκεται κοντά στη μέγιστη τιμή, ώστε να υπάρχει αρκετό περιθώριο για την έξοδο ελέγχου, αλλά ο απλός αναλογικός ελεγκτής δεν είναι σε θέση να το φθάσει. Μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα πειραματισμού με αυτόν τον τρόπο, είναι πιθανό να παρατηρήσουμε ότι ένας αναλογικός μόνο ελεγκτής είναι ανεπαρκής όταν οι εξωτερικές διαταραχές επηρεάζουν τη διαδικασία!

Τα παρακάτω γραφήματα (Γράφημα 1.2 και 1.3) προέρχονται από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 1.1).

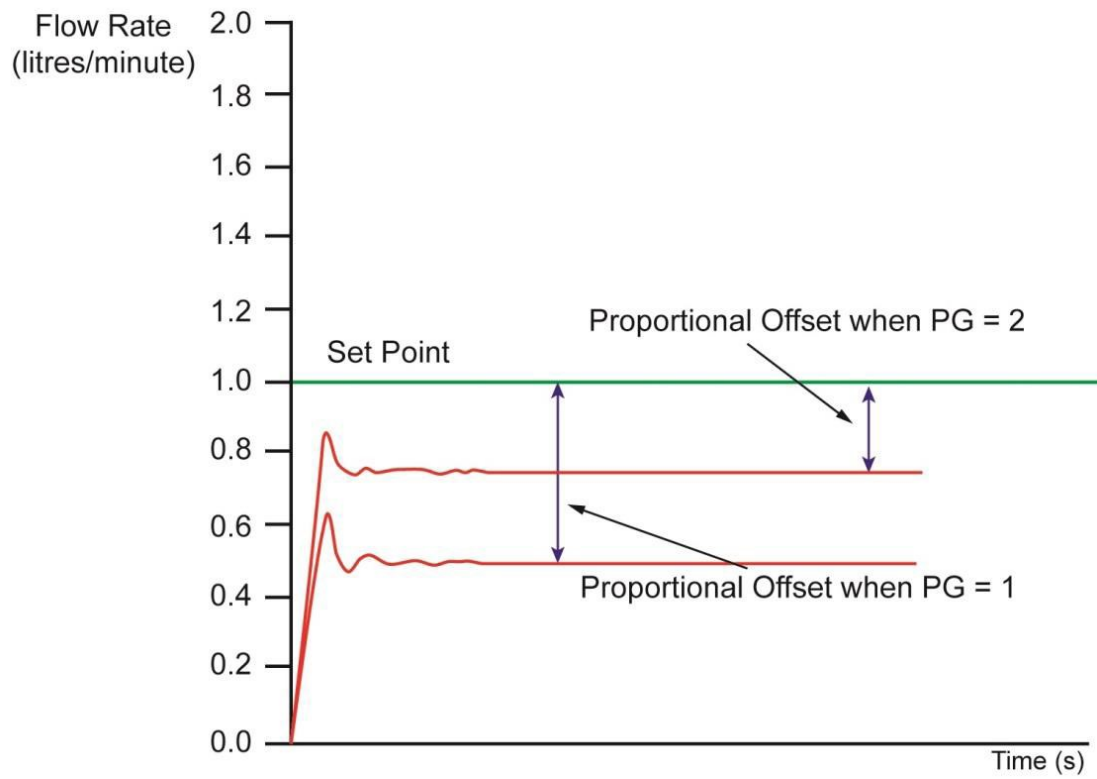


(Γράφημα 1.2) Αναλογικός μόνο έλεγχος με αλλαγή σε PG.



(Γράφημα 1.3) Αναλογικός μόνο έλεγχος με αλλαγή στο SP

Το ακόλουθο διάγραμμα (Διάγραμμα 1.4) απεικονίζει την αναλογική μετατόπιση (*proportional offset*) η οποία συχνά συναντάται όταν χρησιμοποιούνται αναλογικοί μόνο ελεγκτές.



(Διάγραμμα 1.4)

Άσκηση 2 Αναλογικός και Ολοκληρωτικός έλεγχος PI

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, απενεργοποιείτε τα I και D, ορίστε SP και PG όπως στον παρακάτω πίνακα. Ξεκινήστε ένα πείραμα ελέγχου ροής χρησιμοποιώντας αρχικά μόνο αναλογικό έλεγχο. Στη συνέχεια προσθέστε ένα στοιχείο ολοκληρωμένης δράσης. Επαναλάβετε αυτή τη διαδικασία αρκετές φορές και κάθε φορά αυξήστε την ποσότητα της ολοκληρωμένης δράσης σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 2.1). Για να απενεργοποιήσετε τελείως την ολοκληρωμένη ενέργεια, μπορείτε είτε να αφαιρέσετε το ✓ από το λευκό πλαίσιο αριστερά του όρου I, είτε μπορείτε να το αφήσετε και να ορίσετε τον όρο I στο 999. (Σημειώστε ότι το ποσό της ολοκληρωμένης δράσης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς τον ολοκληρωμένο χρόνο δράσης, όπως καθορίζεται στο λογισμικό και στον παρακάτω πίνακα). Καταγράψτε την τελική τιμή ροής σταθερής κατάστασης (εάν η ροή πραγματικά αποκαθίσταται) και τις κύριες παρατηρήσεις σας ως προς τη φύση της απόκρισης.

| SP (l/min) | PG | I | Σταθερή κατάσταση | Παρατηρήσεις |
|------------|-----|-----|-------------------|--------------|
| 2.0 | 1.0 | 999 | | |
| 2.0 | 1.0 | 100 | | |
| 2.0 | 1.0 | 50 | | |
| 2.0 | 1.0 | 10 | | |
| 2.0 | 1.0 | 3 | | |
| 2.0 | 1.0 | 1 | | |
| 2.0 | 1.0 | 0.5 | | |
| 2.0 | 1.0 | 0.2 | | |
| 2.0 | 1.0 | 0.1 | | |

(Πίνακας 2.1).



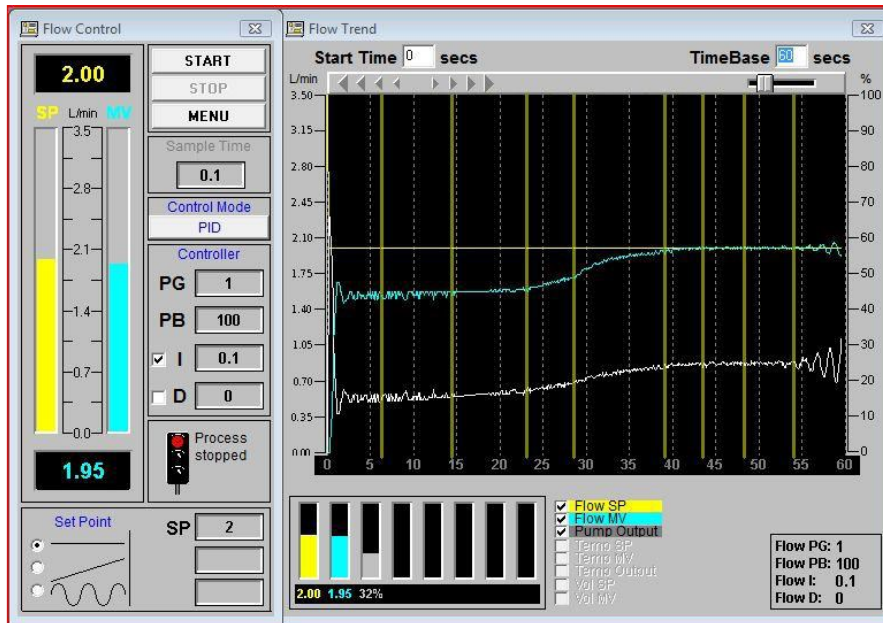
Ποια συμπεράσματα σχετικά με τις επιπτώσεις μιας ολοκληρωμένης δράσης στη φύση ενός «ελεγκτή PI» μπορούν να αντληθούν από τις παρατηρήσεις σας;

Όπως και στην Άσκηση 1, ένας ελεγκτής χωρίς ολοκληρωμένη δράση ($I = 999$) χαρακτηρίζεται από μια απόκριση, η οποία παρουσιάζει μια σταθερή διαφορά μεταξύ του SP και της πραγματικής σταθερής κατάστασης της διαδικασίας. Αυτό αναφέρεται ως «αναλογική μετατόπιση». Όταν προστίθεται σχετικά μικρή ποσότητα ολοκληρωμένης δράσης ($I = 100, 50, 10$) ο ρυθμός ροής αυξάνεται ομαλά και παράγει ένα ίχνος που είναι παρόμοιο με την καμπύλη φόρτισης πυκνωτή. Η ολοκληρωμένη ενέργεια λαμβάνει υπόψη το πρόσφατο ιστορικό του σφάλματος, ενώ η αναλογική δράση αντιδρά μόνο στην τρέχουσα τιμή του σφάλματος. Ο έλεγχος PI μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικός αν οι όροι επιλέγονται κατάλληλα και για το PCT-100 με $I = 3$, η απόκριση είναι γρήγορη με μικρή ή καθόλου ταλάντωση. Η αύξηση της ολοκληρωμένης δράσης πάνω από εκείνη που είναι κατάλληλη για ένα δεδομένο σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια και πιθανότητα μεγάλων ταλαντώσεων στην τιμή της μεταβλητής της διαδικασίας.

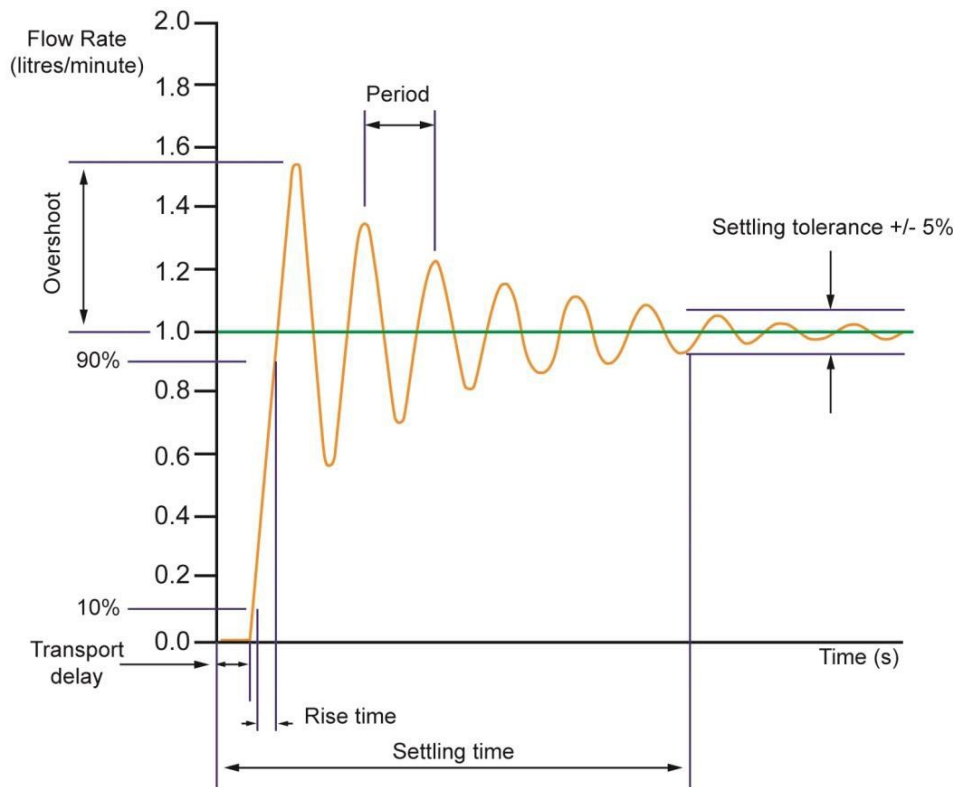
Με τον χρόνο δράσης που έχει ρυθμιστεί σε περίπου 0.2 δευτερόλεπτα η απόκριση είναι «ελαφρώς αποσβενόμενη» που σημαίνει, ότι ενώ ο βρόγχος ελέγχου δεν είναι ασταθής,

δηλαδή συνεχές μεγάλο πλάτος ή / και αυξανόμενες ταλαντώσεις, ο ελεγκτής δεν είναι βέλτιστα «συντονισμένος» για κρίσιμη ή σχεδόν κρίσιμη απόσβεση.

Για τον βρόχο ροής PCT-100 ο βέλτιστος συντονισμός του PI ελεγκτή απαιτεί συνήθως ένα χρόνο δράσης περίπου 1 δευτερόλεπτο αν $PG = 1$. Η ελαφρώς αποσβεσμένη απόκριση είναι μια ενδιαφέρουσα μελέτη και είναι σημαντική επειδή ορισμένα συστήματα σχεδιάζονται σκόπιμα για ελαφρά απόσβεση. Το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2.2) απεικονίζει διάφορους σημαντικούς όρους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως για να περιγράψουν τις καμπύλες απόκρισης του συστήματος. Οι ορισμοί που ακολουθούν το διάγραμμα μπορούν εξίσου να εφαρμοστούν σε συστήματα ανοιχτού ή κλειστού βρόχου.



(Εικόνα 2.2) Έλεγχος PI με αλλαγή στο I



(Διάγραμμα 2.3)

Υπέρβαση (*Overshoot*) είναι το μέγιστο ποσό με το οποίο η απόκριση υπερβαίνει την τελική τιμή σταθερής κατάστασης της μεταβλητής διαδικασίας. Μερικές φορές εκφράζεται ως ποσοστό της τελικής τιμής σταθερής κατάστασης.

Χρόνος ανόδου (*Rise time*) είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί η απόκριση από το 10% της τελικής σταθερής κατάστασης σε 90% της τελικής σταθερής κατάστασης.

Χρόνος αποκατάστασης (*Settling time*) είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η απόκριση στην τελική τιμή σταθερής κατάστασης, εντός συγκεκριμένης ανοχής. Το παραπάνω διάγραμμα (Διάγραμμα 2.3) απεικονίζει το χρόνο καθίζησης για ανοχή 5%.

Περίοδος (*period*) είναι η διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ταλάντωσης. Ως εκ τούτου, μπορεί να μετρηθεί ως το διάστημα μεταξύ εναλλακτικών διασταυρώσεων της τελικής τιμής σταθερής κατάστασης ή του διαστήματος μεταξύ διαδοχικών κορυφών ή διαδοχικών κοιλοτήτων στην καμπύλη απόκρισης.

Συχνότητα (*Frequency*) είναι το αντίστροφο της περιόδου, δηλ. ο αριθμός κύκλων ανά δευτερόλεπτο που εκφράζεται σε Hertz (Hz). Μερικές φορές η συχνότητα εκφράζεται σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο και η σχέση μεταξύ των δύο μονάδων είναι ότι τα ακτίνια ανά δευτερόλεπτο ισούνται με το 2πλάσιο της συχνότητας σε Hertz.

Καθυστερήση Μεταφοράς (*Transport delay*) είναι η περίοδος κατά την οποία δεν υπάρχει μεταβολή στη μεταβλητή της διαδικασίας μετά από μια βηματική αλλαγή στην καθορισμένη τιμή.

Άσκηση 3 Κορεσμός και Windup

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, αφαιρέστε το ✓ από το D και εκτελέστε ένα πείραμα ελέγχου ροής χρησιμοποιώντας τον έλεγχο PI με $P = 1$ και $I = 3$. Αυτά είναι κοντά στις βέλτιστες ρυθμίσεις και εάν κάνετε αλλαγές στο SP, τόσο προς τα επάνω όσο και προς τα κάτω, θα δείτε ότι η απόκριση είναι γρήγορη και χωρίς υπερβολική ταλάντωση.



Γιατί συμβαίνει αυτό το φαινόμενο;

Αυτό το φαινόμενο, το οποίο ονομάζεται 'integral windup', οφείλεται στο γεγονός ότι ο ολοκληρωτικός όρος μέσα στον ελεγκτή PI παράγει ένα στοιχείο της εξόδου ελέγχου το οποίο βασίζεται στο πρόσφατο ιστορικό του σφάλματος.

Αν κοιτάξετε προσεκτικά το γράφημα θα δείτε ότι η περιοχή μεταξύ του κυανού ίχνους και του SP (που μετράται από τη στιγμή που η βαλβίδα ήταν κλειστή μέχρι το άνοιγμά της) ισούται με την περιοχή μεταξύ του κυανού ίχνους και του SP (μετρούμενη από τη στιγμή που η βαλβίδα ανοίχτηκε μέχρις ότου ο ρυθμός ροής έφθασε και πάλι στο SP).

Σε πιο περίπλοκους βιομηχανικούς ελεγκτές υπάρχει συχνά ένα χαρακτηριστικό που ονομάζεται 'antireset windup' το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξάλειψη αυτού του προβλήματος έτσι ώστε μετά από ένα επεισόδιο κορεσμού η μεταβλητή διαδικασίας θα επιστραφεί στο SP μόλις το επιτρέπει η φυσική του υλικού.

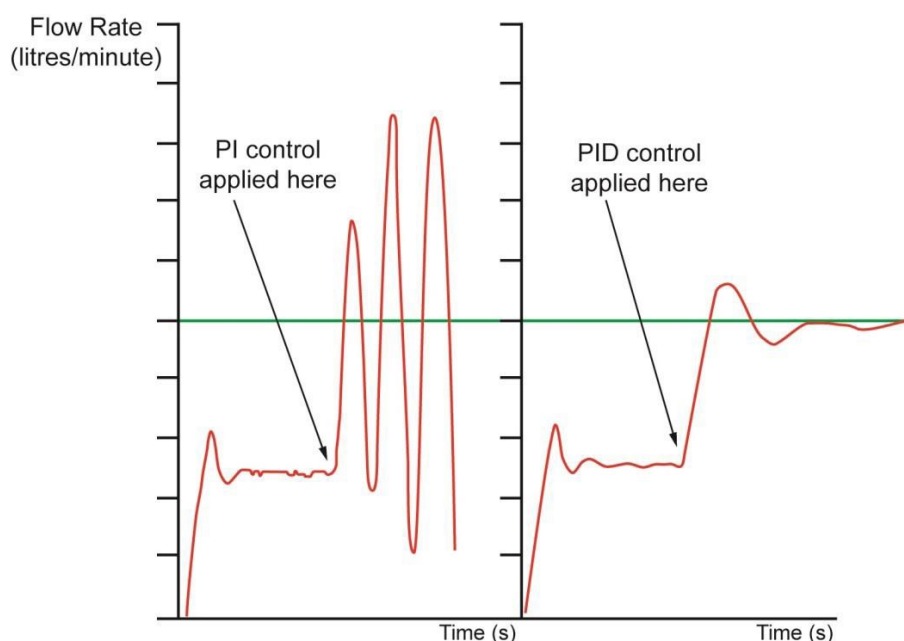
Στη βιομηχανία, ο κορεσμός μπορεί να συμβεί επειδή ένας ενεργοποιητής (η αντλία στην περίπτωση μας) δεν είναι αρκετά ισχυρός ή οι σωλήνες είναι πολύ μικροί ή τα συσσωρευμένα ιζήματα έχουν μειώσει την πραγματική διάμετρο του σωλήνα σε κάποιο σημείο του κυκλώματος.

Άσκηση 4 Έλεγχος τριών όρων ή PID

Σε αυτήν την άσκηση θα διερευνήσετε την επίδραση του παραγοντικού όρου. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, εκτελέστε ένα πείραμα ροής με $SP = 1$, $PG = 1$ με οι όροι I και D απενεργοποιημένα. Μετά από μερικά δευτερόλεπτα ορίστε $I = 0.35$. Το αποτέλεσμα θα είναι παρόμοιο με αυτό που παρατηρείται στην άσκηση 2, μια αναλογική μετατόπιση με μόνιμες ταλαντώσεις μόλις προστεθεί ο όρος I. Πάρα πολύ ολοκληρωμένη δράση προστέθηκε στον ελεγκτή!

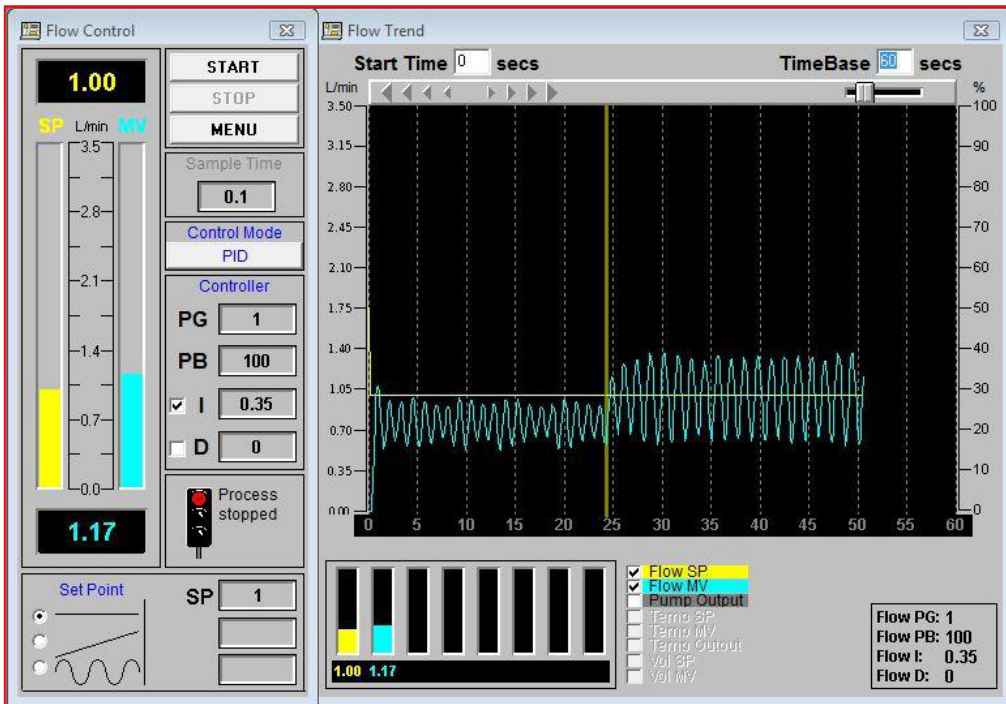
Για την εξάλειψη της ταλάντωσης θα μπορούσαμε απλά να μειώσουμε τον όρο I αυξάνοντάς τον σε 1, αλλά θα ήταν χρήσιμο αν μπορούσαμε να διατηρήσουμε την ταχεία απόκριση που παρέχει η μεγαλύτερη ολοκληρωμένη δράση χωρίς να οδηγεί το σύστημα σε ασταθείς ταλαντώσεις. Αν και αυτό δεν είναι πάντα εφικτό με έναν ελεγκτή PI, ένας ελεγκτής PID είναι συνήθως ικανός να εξαλείψει την αστάθεια και να παρέχει μια γρήγορη απόκριση.

Εκτελέστε ένα άλλο πείραμα με τις ίδιες αρχικές ρυθμίσεις και μετά από μερικά δευτερόλεπτα προσθέστε τον ίδιο ακέραιο όρο των 0.35 και όρο D 1 δευτερολέπτου. Μετά την αρχική αιφνίδια άνοδο το ίχνος ροής αρχικά ταλαντώνεται, αλλά υπάρχει μια ομαλή απόσβεση του πλάτους και σύντομα μεταβαίνει στο SP. Μια λίγο περισσότερη δράση της παραγώγου θα βελτιώσει την απόκριση, δοκιμάστε $D=1.9$ δευτερόλεπτα για να το αποδείξετε αυτό. Το παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 4.1) συνοψίζει τα φαινόμενα που θα έπρεπε να έχετε παρατηρήσει.

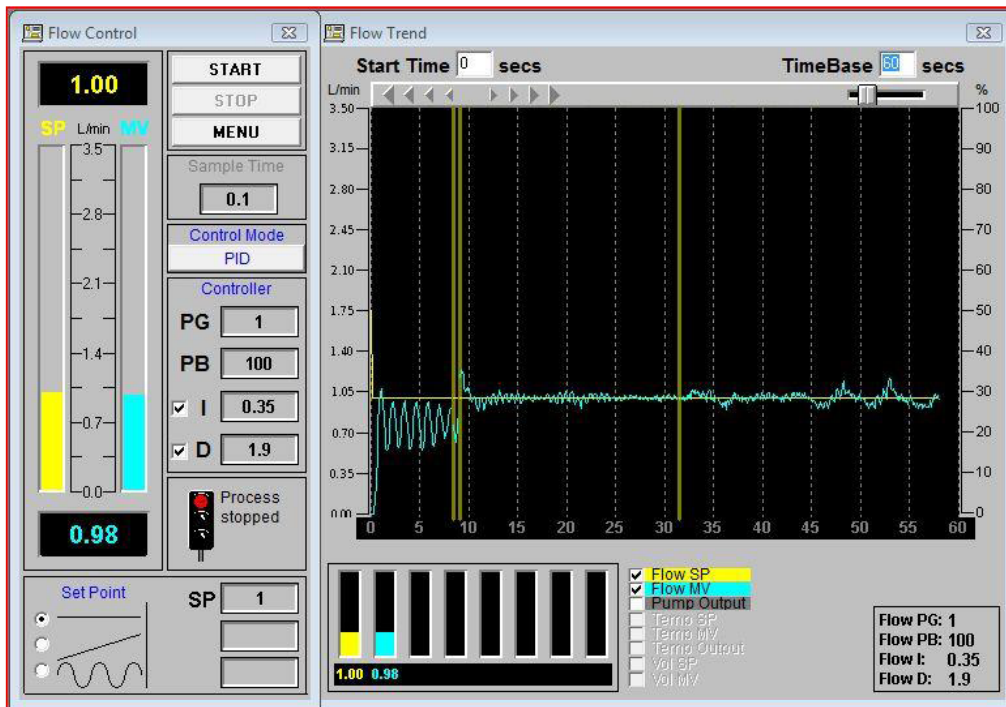


(Διάγραμμα 4.1)

Προσέξτε ότι παρά τα οφέλη, η D δράση μπορεί να προκαλέσει επιζήμιες επιπτώσεις σε ορισμένες περιπτώσεις, ιδιαίτερα εάν υπάρχει σημαντικός «θόρυβος» υψηλής συχνότητας στη μετρηθείσα τιμή και συνεπώς σφάλμα. Η δράση D μπορεί να ενισχύσει δραματικά αυτόν το θόρυβο και να υποβαθμίσει την απόδοση του ελεγκτή.



Αναλογικός έλεγχος με προσθήκη I

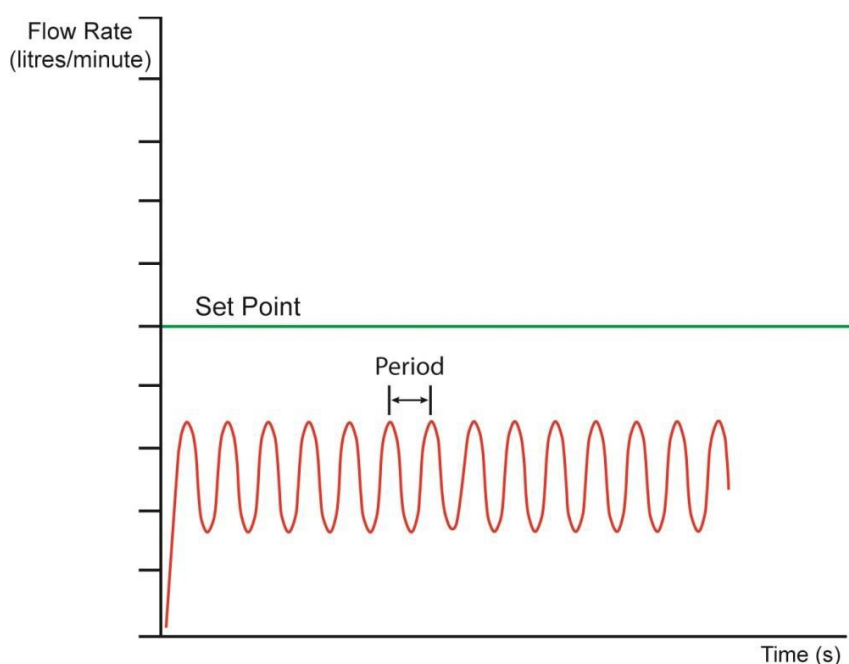


Αναλογικό έλεγχο με προσθήκη I και D

Άσκηση 5 Συντονισμός Ziegler / Nichols

Πώς επιλέγουμε τις κατάλληλες τιμές των P, I και D για οποιαδήποτε δεδομένη διαδικασία; Η διαδικασία να θέτουμε απλώς αριθμούς σε έναν ελεγκτή PID, μπορεί να είναι αποδεκτή για πολύ μικρά συστήματα, αλλά αν προσπαθείτε να δημιουργήσετε έναν αλγόριθμο ελέγχου για μια μεγάλη βιομηχανική διεργασία, τότε αυτό δεν είναι μια πολύ καλή στρατηγική! Αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να είναι χρονοβόρα, πράγμα που θα μπορούσε να προκαλέσει οικονομικές απώλειες λόγω του χρόνου διακοπής της εγκατάστασης. Η προσέγγιση αυτή μπορεί επίσης να προκαλέσει βλάβη στους ενεργοποιητές ή στους αισθητήρες, εάν πρόκειται να τους οδηγήσει πέρα από το προβλεπόμενο εύρος τιμών λειτουργίας τους. Απαιτείται λοιπόν μία πιο επιστημονική προσέγγιση για την εξεύρεση εύλογου συνόλου όρων PID.

Ο συντονισμός Ziegler / Nichols είναι μια δημοφιλής ημι-εμπειρική μέθοδος λήψης προσεγγιστικών τιμών PID που μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς σε πολλούς διαφορετικούς τύπους διεργασιών. Η μέθοδος παρέχει ένα λογικό σημείο εκκίνησης και ο έμπειρος μηχανικός μπορεί να επιθυμεί να προσαρμόσει ελαφρώς τους υπολογιζόμενους όρους PID για να βελτιώσει τη φύση της απόκρισης. Υπάρχουν δύο τεχνικές που η πρώτη ονομάζεται "μέθοδος συνεχούς κύκλου" και υποθέτει ότι το σύστημα κλειστού βρόχου μπορεί να γίνει για να ταλαντώνεται μόνιμα με ένα μόνο αναλογικό ελεγκτή, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο γράφημα (Γράφημα 5.1).



(Γράφημα 5.1)

Η μέθοδος συνεχούς κύκλου απαιτεί το κέρδος (απολαβή) ενός αναλογικού μόνο ελεγκτή να αυξηθεί σε μικρή ποσότητα κάθε φορά μέχρι να εμφανισθούν μόνιμες ταλαντώσεις. Σε αυτό το σημείο καταγράφεται η τιμή του κέρδους (k_p) μαζί με την περίοδο της προκύπτουσας ταλάντωσης (T). Οι συνιστώμενοι ελεγκτές δύο και τριών όρων δίνονται στη συνέχεια από τις σχέσεις:

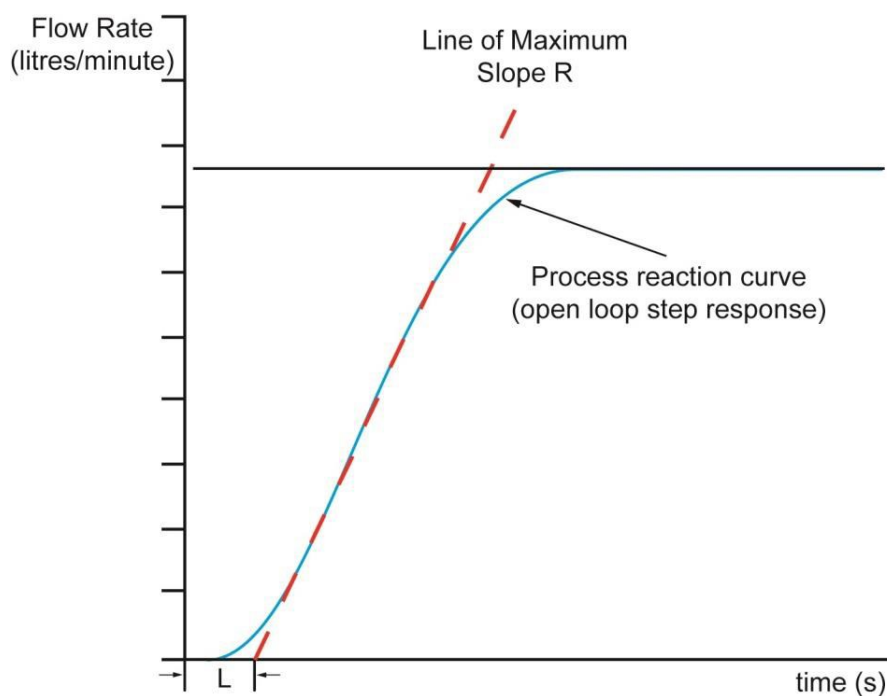
| | | | | |
|------|-----------------|-----|-----------|--------------|
| PI: | $P_G = 0.45k_p$ | IAT | $= 0.83T$ | |
| PID: | $P_G = 0.6k_p$ | IAT | $= 0.5T$ | DAT = 0.125T |

Για την εφαρμογή της μεθόδου, προσθέστε νερό στην κάτω δεξαμενή μέχρι το επάνω όριο της (max Level). Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, εκτελέστε κάποια πειράματα ροής παρόμοια με εκείνα της άσκησης 1 με $SP = 1$. Αυξήστε την τιμή PG από 1.0 σε περίπου 3.5, αρχικά σε βήματα των 0.5. Προσπαθήστε να υπολογίσετε την χαμηλότερη τιμή PG που παράγει μόνιμες ταλαντώσεις στο ρυθμό ροής. Μπορεί να χρειαστεί να ρυθμίσετε την τιμή PG κατά 0.1 ή 0.2 όταν πλησιάζετε αυτό το «αναλογικό κέρδος». Καταγράψτε την τιμή PG (k_p) μαζί με την περίοδο της ταλάντωσης (T) και χρησιμοποιήστε τις στις εκφράσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω για τους αλγόριθμους PI και PID. Εφαρμόστε αυτούς τους αλγόριθμους ελέγχου στη προσομοίωση ροής και σημειώστε τις παρατηρήσεις σας στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2).

| Algorithm | Παρατηρήσεις |
|-----------|--------------|
| PI | |
| PID | |

(Πίνακας 5.2).

Η δεύτερη τεχνική συντονισμού του Ziegler / Nichols που ονομάζεται "μέθοδος καμπύλης αντίδρασης διεργασίας" απαιτεί την παραγωγή μίας καμπύλης απόκρισης βαθμίδας ανοικτού βρόχου που δείχνει μετρήσιμη «καθυστέρηση μεταφοράς» ή «νεκρό χρόνο». Η καθυστέρηση μεταφοράς είναι η περίοδος κατά την οποία δεν υπάρχει μεταβολή στη μεταβλητή της διαδικασίας, αφού η έξοδος του ελεγκτή έχει αυξηθεί ή μειωθεί. Το παρακάτω γράφημα (Γράφημα 5.3) δείχνει μία τυπική καμπύλη αντίδρασης διεργασίας.



(Γράφημα 5.3)

Η μέθοδος καμπύλης αντίδρασης διεργασίας απαιτεί την απόκριση βαθμίδας ανοικτού βρόχου του συστήματος όπως αποκτάται παραπάνω. Από αυτό το γράφημα σημειώνεται η μέγιστη κλίση (R) και η καθυστέρηση μεταφοράς (L). Η είσοδος βαθμίδας που εκφράζεται ως κλάσμα της συνολικής περιοχής εισόδου (Δu) απαιτείται επίσης. Στο τμήμα ανοικτού

βρόχου του λογισμικού PCT-100 το κλάσμα εισόδου βαθμίδας Δu υπολογίζεται πολύ εύκολα, δεδομένου ότι η βαθμίδα εισόδου στην αντλία καθορίζεται ως ποσοστό. Όταν η είσοδος είναι 50%, $\Delta u = 0.5$, όταν η είσοδος είναι 70%, $\Delta u = 0.7$ και ούτω καθεξής. Οι συνιστώμενοι ελεγκτές δύο και τριών όρων υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$\text{PI: } PG = 0.9\Delta u / RL \text{ IAT} = 3.3L$$

$$\text{PID: } PG = 1.2\Delta u / RL \text{ IAT} = 2L \quad \text{DAT} = 0.5L$$

Επιλέξτε την επιλογή "Ανοικτό βρόχο" από το κύριο μενού και εκτελέστε προσομοίωση ανοικτού βρόχου με είσοδο βημάτων στην αντλία 80%. Εκτιμήστε τις τιμές των R και L από το προκύπτον γράφημα και καταγράψτε τις με την τιμή Δu (0.8 σε αυτή την περίπτωση). Χρησιμοποιήστε αυτές τις τιμές στις εκφράσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω για τους αλγόριθμους PI και PID. Εφαρμόστε αυτούς τους αλγόριθμους ελέγχου στην προσομοίωση ροής και σημειώστε τις παρατηρήσεις σας στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.4).

| Algorithm | Παρατηρήσεις |
|-----------|--------------|
| PI | |
| PID | |

(Πίνακας 5.4)



Ποια είναι η γνώμη σας, νομίζετε ότι οι αλγόριθμοι PI και PID που προέρχονται από τη μέθοδο συνεχούς κύκλου ή εκείνοι που προέρχονται από τη μέθοδο καμπύλης αντίδρασης διεργασίας έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα; Στις διεργασίες υπάρχουν μερικές φορές συστάσεις ως προς το εάν πρέπει να ξεκινήσετε με μία ή την άλλη τεχνική.

Αποτελέσματα από Ziegler – Nichols:

- SP=1
- Μόνιμες ταλαντώσεις για P=4
- Εφαρμογή Ziegler – Nichols με P=2, I=0.8, D=0.125

Άσκηση 6 Έλεγχος θερμοκρασίας

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, εκτελέστε διάφορα πειράματα ελέγχου θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας τον έλεγχο PI με τις ακόλουθες παραμέτρους. Καταγράψτε τις τελικές θερμοκρασίες σταθερής κατάστασης του νερού στη δεξαμενή διεργασίας και τις κύριες παρατηρήσεις σας ως προς τη φύση της απόκρισης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.1). Θα χρειαστεί να περιμένετε για περίπου τρία λεπτά σε ορισμένες περιπτώσεις.

| Starting Point | SP | PG | I | Τελικές θερμοκρασίες σταθερής κατάστασης | Παρατηρήσεις |
|----------------|------|-----|-----|--|--------------|
| 20°C | 30°C | 10 | 999 | | |
| 20°C | 30°C | 10 | 100 | | |
| 20°C | 30°C | 10 | 10 | | |
| 20°C | 30°C | 10 | 1 | | |
| 20°C | 30°C | 100 | 999 | | |
| 20°C | 30°C | 100 | 100 | | |
| 20°C | 30°C | 100 | 10 | | |
| 20°C | 30°C | 100 | 1 | | |

(Πίνακας 6.1)



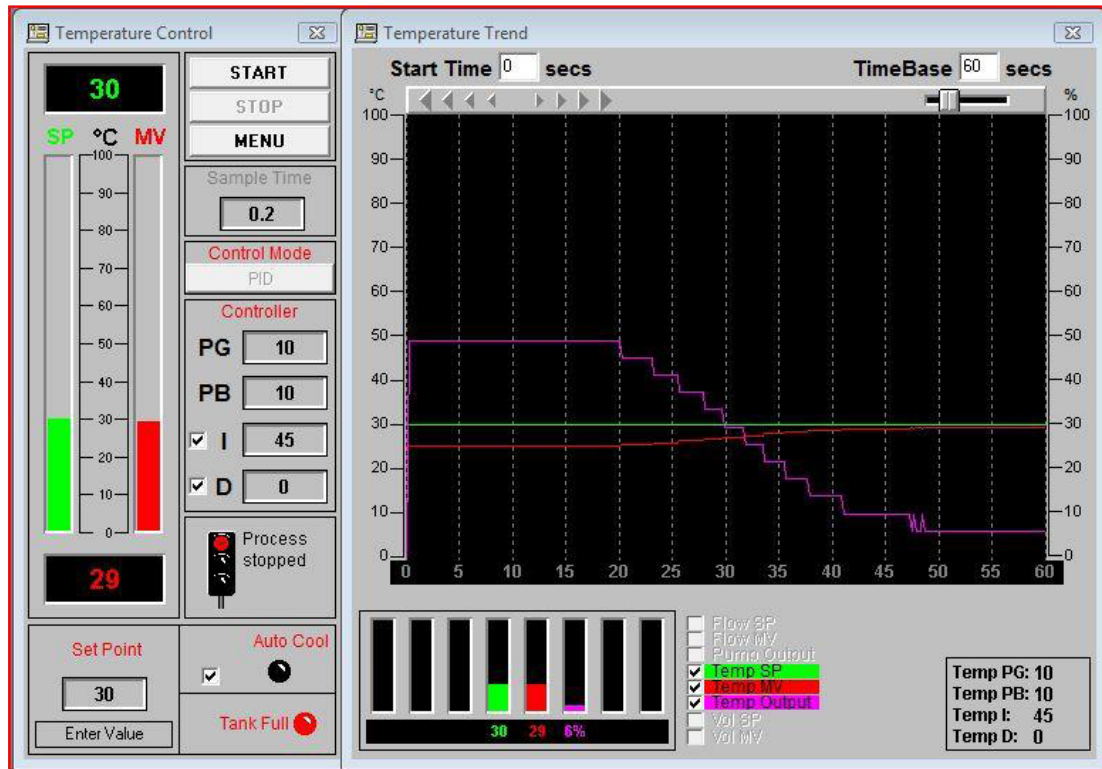
Ποια συμπεράσματα μπορούν να διατυπωθούν σχετικά με τη φύση του ελέγχου θερμοκρασίας και τις απαντήσεις που παράγονται;

Ο έλεγχος θερμοκρασίας παρουσιάζει ένα ριζικά διαφορετικό σενάριο απ' ό,τι ο έλεγχος ροής. Έχει πολύ μεγαλύτερη υστέρηση, δηλ. είναι πολύ πιο αργή η διεργασία και η απαίτησή της για ένα ενσωματωμένο στοιχείο εντός του ελεγκτή είναι επίσης αρκετά διαφορετικό απ' ό,τι στον έλεγχο ροής. Ο έλεγχος θερμοκρασίας έχει ένα στοιχείο ολοκληρωτικής ενέργειας «ενσωματωμένο» λόγω της θερμοχωρητικότητας του νερού στη δεξαμενή διεργασίας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η θερμοκρασία τελικά φθάνει στο σημείο ρύθμισης, ακόμη και χωρίς ενσωματωμένο όρο I στον ελεγκτή!

Για να κατανοήσετε αυτό το ζήτημα, εξετάστε το ακόλουθο επιχείρημα. Τι συμβαίνει με την παροχή όταν η αντλία είναι απενεργοποιημένη; Ο ρυθμός ροής μειώνεται αμέσως στο μηδέν. Τι συμβαίνει με τη θερμοκρασία του νερού όταν ο θερμομαντήρας είναι απενεργοποιημένος; Η θερμοκρασία του δεν πέφτει αμέσως στο μηδέν. στην πραγματικότητα η θερμοκρασία του νερού μειώνεται πολύ αργά λόγω φυσικών διεργασιών όπως η εξάτμιση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο δεν είναι αποδεκτή οποιαδήποτε αρχική υπέρβαση, μόλις υπερθερμανθεί. Το νερό στη δεξαμενή επεξεργασίας δεν μπορεί να ψυχθεί με βίαιο τρόπο.

Η θερμοχωρητικότητα του υγρού σε μια δεξαμενή διεργασίας βιομηχανικής κατάστασης θα παράσχει επίσης ένα «ελεύθερο» ολοκληρωτικό αποτέλεσμα αλλά συνήθως χρειάζεται να προστεθεί κάποια ολοκληρωμένη ενέργεια στον ελεγκτή για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόκριση. Εάν η δεξαμενή ήταν μερικώς μονωμένη και η θερμοκρασία SP ήταν πολύ υψηλή τότε θα χρειαζόταν πιο ολοκληρωμένη δράση από ότι εάν η δεξαμενή ήταν καλά μονωμένη και το SP χαμηλότερο.

Ο έλεγχος θερμοκρασίας στο PCT-100 δεν μπορεί να γίνει ασταθής (δεν θα ταλαντώνεται). Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι δυνατή η χρήση της μεθόδου Ziegler / Nichols για τον προσδιορισμό των τιμών PID. Δοκιμάστε τη μέθοδο καμπύλης αντίδρασης διεργασίας θεωρώντας, ότι η καθυστέρηση μεταφοράς μπορεί να μην είναι ευδιάκριτη στο προκύπτον γράφημα. Απαιτεί εκτίμηση της καθυστέρησης όπως υποδεικνύεται στο δεύτερο διάγραμμα (Γράφημα 5.3) της άσκησης 5.



Έλεγχος PID

Άσκηση 7: Έλεγχος στάθμης υγρών

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, εκτελέστε ένα σύνολο πειραμάτων ελέγχου στάθμης υγρού που ξεκινά με άδεια δεξαμενή και χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 7.1) παραμέτρων ως οδηγό. Βεβαιωθείτε ότι η λειτουργία αυτόματης αποστράγγισης είναι απενεργοποιημένη και απενεργοποιήστε τη δράση παραγωγού. Καταγράψτε την ενδεχόμενη στάθμη "σταθερής κατάστασης" του νερού στη δεξαμενή διεργασίας και τις κύριες παρατηρήσεις σας ως προς τη φύση της απόκρισης στον παρακάτω πίνακα.

| SP | PG | I | Steady State | Observations |
|----|----|-----|--------------|--------------|
| 30 | 5 | 999 | | |
| 30 | 5 | 600 | | |
| 30 | 5 | 300 | | |
| 30 | 5 | 100 | | |
| 30 | 5 | 10 | | |
| 30 | 5 | 1 | | |



- Ποια συμπεράσματα σχετικά με τη φύση αυτών των πειραμάτων στάθμης υγρού προκύπτουν από τις παρατηρήσεις σας;

Η καλύτερη απόκριση επιτεύχθηκε από τον αναλογικό ελεγκτή (δηλ. όταν $I = 999$) και αυτό φαίνεται να μην συμφωνεί με τα όσα μελετήθηκαν στον έλεγχο του ρυθμού ροής στα προηγούμενα πειράματα. Κανονικά έπρεπε να αναμένουμε μια 'αναλογική μετατόπιση' όταν χρησιμοποιούμε έναν αναλογικό ελεγκτή.

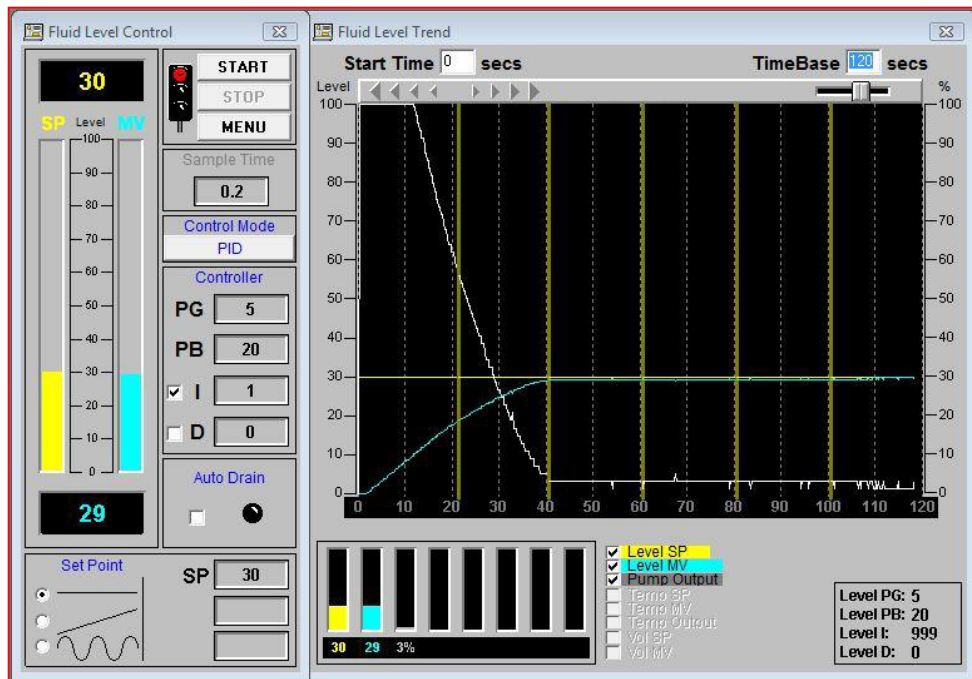


- Γιατί δεν υπάρχει τέτοια μετατόπιση στο συγκεκριμένο παράδειγμα;
- Γιατί δεν υπάρχει προφανώς καμία ανάγκη ενός ολοκληρωμένου όρου μέσα στον αλγόριθμο ο οποίος ελέγχει την αντλία που χρησιμοποιείται για την αύξηση του υγρού στο επιθυμητό επίπεδο;
- Ποιο είναι το αποτέλεσμα της αύξησης της PG στον αναλογικό ελεγκτή;

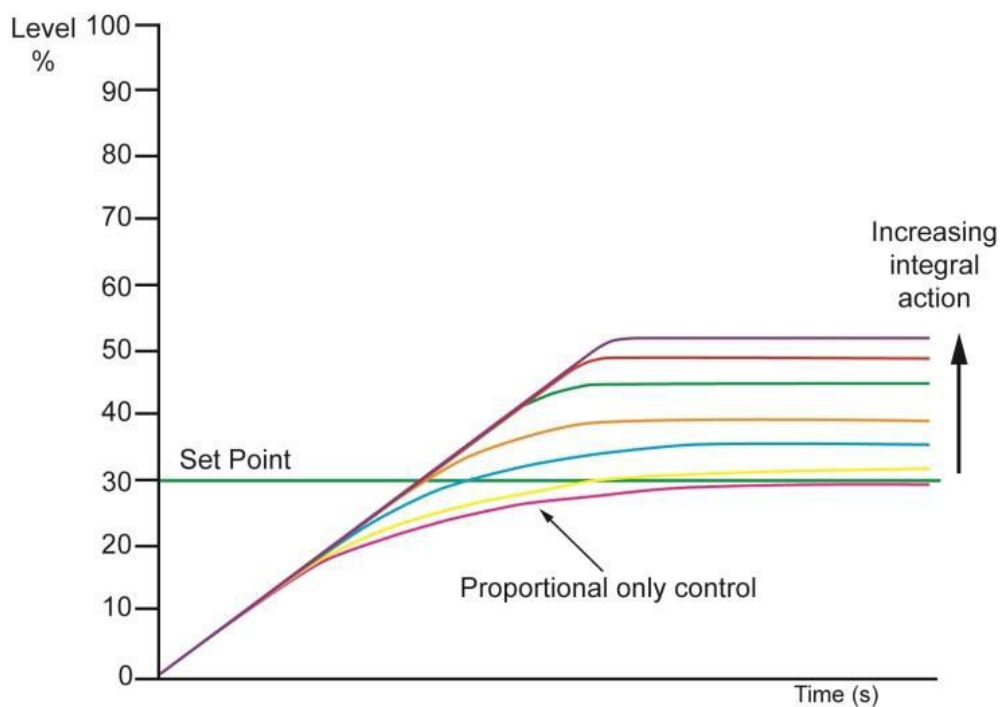
Αυτά τα ερωτήματα μπορούν να οδηγήσουν σε μια κατανόηση της θεμελιώδους φύσης του ελέγχου στάθμης όταν εφαρμόζεται με την άντληση υγρού σε μια κλειστή δεξαμενή. Αυτός ο τρόπος προσέγγισης για τον έλεγχο στάθμης δεν είναι μοναδικός, πολλές βιομηχανικές και άλλες διαδικασίες, ρυθμίζουν το επίπεδο ελέγχοντας τον ρυθμό με τον οποίο το υγρό ρέει σε ένα κλειστό δοχείο.

Μπορούμε να δούμε την αποτελεσματικότητα ενός απλού ελεγκτή στάθμης. Ο ρυθμός με τον οποίο ρέει το νερό κάτω από την πίεση του δικτύου στη δεξαμενή καθορίζεται από τη δράση της βαλβίδας. Η βαλβίδα κλείνει σταδιακά με τη δράση της αυξανόμενης στάθμης νερού καθώς ο πλωτήρας ανυψώνει το μοχλό που συνδέεται με αυτή. Ο «βαθμός ανοίγματος» της βαλβίδας είναι ανάλογος της διαφοράς μεταξύ της επιθυμητής στάθμης και της πραγματικής στάθμης. Μόλις τελειώσει η εισροή νερού, η δεξαμενή είναι γεμάτη στο επιθυμητό επίπεδο, που καθορίζεται από τη γεωμετρία του συγκροτήματος πλωτήρα / μοχλού. Στο PCT-100 ο αναλογικός ελεγκτής μετακινεί τη στάθμη μέχρι το επιθυμητό

σημείο ρύθμισης ομαλά και στη συνέχεια η αντλία διακόπτει τη λειτουργία της. Χωρίς αυτόματη αποστράγγιση ένα υψηλό PG μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση.



Έλεγχος PI με αλλαγή στο I



(Γράφημα 7.2)

Το παραπάνω γράφημα (Γράφημα 7.2) απεικονίζει αποκρίσεις στάθμης υγρού που λαμβάνονται από το PCT-100 (με PG = 5 σε κάθε περίπτωση), στο ίδιο σύστημα αξόνων. Είναι σαφές ότι υπάρχει μια προοδευτική αύξηση σε αυτό που θα μπορούσαμε να

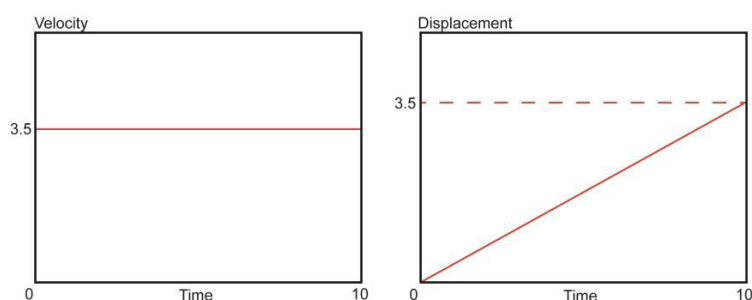
ονομάσουμε ένα ολοκληρωμένο αποτέλεσμα αντιστάθμισης καθώς αυξάνεται το μέγεθος της ολοκληρωμένης δράσης.



- Πώς μπορούμε να αντιληφθούμε αυτό το φαινόμενο;
- Γιατί δεν υπάρχει αναλογική αντιστάθμιση;
- Γιατί δεν είναι απαραίτητος ένας ολοκληρωτικός όρος στον ελεγκτή;
- Γιατί οι ολοκληρωτικοί όροι δημιουργούν μετατοπίσεις σε αυτό το είδος ελέγχου στάθμης;

Η εξήγηση είναι ότι από τη φύση της η ίδια η διαδικασία παρέχει ένα στοιχείο ολοκληρωμένης δράσης λόγω της ογκομετρικής χωρητικότητας της δεξαμενής. Λέγεται ότι έχει έναν «ελεύθερο ολοκληρωτή» στη συνάρτηση μεταφοράς, δηλαδή ένας όρος $1 / s$ στο μετασχηματισμό Laplace. Εξετάστε τον έλεγχο της ροής, κάποια έξοδος στην αντλία είναι απαραίτητη εάν υπάρχει ροή ρευστού, εάν η αντλία είναι απενεργοποιημένη τότε δεν μπορεί να υπάρξει ροή. Με τον έλεγχο στάθμης υπάρχει πάντα μία ορισμένη στάθμη νερού όταν η αντλία είναι απενεργοποιημένη και εάν η αντλία λειτουργεί, τότε η στάθμη θα είναι πάντα αυξανόμενη.

Η ολοκληρωμένη ενέργεια σε έναν ελεγκτή PI (ή PID) λαμβάνει υπόψη το πρόσφατο ιστορικό του σφάλματος, προσθέτοντας τα σφάλματα για ένα σταθερό αριθμό «πρόσφατων» δειγμάτων και συμβάλλοντας σε μια συνιστώσα της εξόδου του ελεγκτή, η οποία είναι ανάλογη προς αυτό το άθροισμα. Με την κατάσταση ελέγχου στάθμης η ογκομετρική χωρητικότητα της δεξαμενής «ενσωματώνει» συνεχώς την εισερχόμενη ροή που οδηγεί σε ένα αυξανόμενο βάθος υγρού. Αυτό το εγγενές χαρακτηριστικό είναι ανάλογο με την οικεία ενσωμάτωση της ταχύτητας για να επιτευχθεί η μετατόπιση:



Στο πείραμα ελέγχου στάθμης η πραγματική στάθμη νερού είναι το ολοκλήρωμα του ρυθμού ροής μέσα στη δεξαμενή. Επομένως, ακόμη και με ένα αναλογικό μόνο ρυθμιστή ροής, υπάρχουν τόσο αναλογικές όσο και ολοκληρωτικές ενέργειες εντός του κλειστού βρόχου που σχηματίζεται από τον ελεγκτή και τη διαδικασία. Ως αποτέλεσμα αυτού του εγγενούς ολοκληρωμένου αποτελέσματος δεν θα υπάρξει ποτέ αναλογική μετατόπιση και ένας ολοκληρωτικός όρος στον αλγόριθμο ελέγχου θα είναι εντελώς περιττός. Οποιοσδήποτε ολοκληρωτικός όρος που προστίθεται είτε δεν παράγει ορατό αποτέλεσμα, αν είναι πολύ μικρός, είτε το προαναφερθέν φαινόμενο μετατόπισης επειδή διατηρεί την έξοδο ελέγχου στην αντλία υψηλότερη για περισσότερο από όσο απαιτείται. Αυτό το σενάριο ελέγχου στάθμης είναι μη γραμμικό δεδομένου ότι η στάθμη του νερού μπορεί να

αυξηθεί με τον έλεγχο της αντλίας αλλά, ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο, η στάθμη δεν μπορεί να μειωθεί με οποιαδήποτε χρήση της αντλίας. Μόλις επιτευχθεί μία συγκεκριμένη στάθμη, ακόμα και όταν η αντλία είναι απενεργοποιημένη, δεν μπορεί να μειωθεί. Ο μόνος τρόπος για να χαμηλώσετε τη στάθμη είναι να ανοίξετε μία από τις βαλβίδες αποστράγγισης.

Άσκηση 8 Έλεγχος ανοικτού βρόχου

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό PCT-100, εκτελέστε ένα σύνολο πειραμάτων ανοικτού βρόχου χρησιμοποιώντας ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου με $\text{Min} = 30\%$ και $\text{Max} = 80\%$ για την κίνηση της αντλίας. Μεταβάλλετε την περίοδο μεταξύ 0,5 και 20 δευτερολέπτων. Καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας σχετικά με τη φύση της απάντησης στον παρακάτω πίνακα(Πίνακας 8.1).

| Period (s) | Observations |
|------------|--------------|
| 0.5 | |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |
| 7.5 | |
| 10 | |
| 15 | |
| 20 | |

(Πίνακας 8.1)



- Ποια συμπεράσματα μπορούν να συναχθούν σχετικά με τη φύση των παραγόμενων απαντήσεων ανοικτού βρόχου;

Θα παρατηρήσετε, ότι η έξοδος από το σύστημα, δηλ. η τιμή μέτρησης ροής (κυανό ίχνος) είναι ένα ημιτονοειδές κύμα που έχει πάντα την ίδια χρονική περίοδο με την είσοδο στο σύστημα, δηλ. Το σήμα που οδηγεί την αντλία (λευκό ίχνος). Ένα από τα χαρακτηριστικά κάθε γραμμικού συστήματος είναι ότι το προκύπτον σήμα (εξόδου) έχει πάντα την ίδια κυματομορφή με το σήμα οδήγησης (εισόδου). Εάν, για την ίδια περίοδο, το πλάτος της εισόδου λέγεται διπλασιασμένο ή μειωμένο κατά το ήμισυ τότε το πλάτος της εξόδου θα διπλασιαστεί ή θα μειωθεί κατά το ήμισυ ανάλογα.

Ανάλογο της εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται σε μια αντίσταση. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα θα περάσει μέσα από την αντίσταση η οποία θα έχει ακριβώς την ίδια συχνότητα (και κατά συνέπεια την περίοδο) ως κυματομορφή τάσης. Το εύρος αυτού του εναλλασσόμενου ρεύματος θα είναι γενικά διαφορετικό από αυτό της τάσης αλλά θα έχει πάντα την ίδια κυματομορφή και συχνότητα. Οι κυματομορφές θα είναι επίσης "σε φάση", δηλαδή οι κορυφές και οι κοιλότητες θα συμπίπτουν πάντοτε. Εάν ο αντιστάτης αντικατασταθεί από έναν πυκνωτή τότε το εναλλασσόμενο ρεύμα θα είχε την ίδια κυματομορφή και συχνότητα αλλά αυτή τη φορά θα ήταν «εκτός φάσης» με το εναλλασσόμενο ρεύμα καθώς και με διαφορετικό εύρος. Αν ο πυκνωτής αντικατασταθεί από μια μη γραμμική συσκευή όπως μια δίοδος, τότε το ρεύμα δεν θα ταιριάζει πλέον με την τάση από την άποψη της κυματομορφής ή της συχνότητάς του. (δηλαδή στην περίπτωση πλήρους κύματος διόρθωσης).

Θα πρέπει επίσης να δούμε ότι ο λόγος του πλάτους της εισόδου με το πλάτος της εξόδου (που αναφέρεται ως «κέρδος»), ποικίλει μεταξύ των πειραμάτων και ότι οι κορυφές και οι κοιλότητες των δύο ίχνων ποτέ δεν συμπίπτουν ακριβώς. Τα ίχνη είναι «εκτός φάσης» ή χωρίζονται με «γωνία φάσης». Σε χαμηλότερες συχνότητες, οι κορυφές και οι κοιλότητες

τείνουν προς σύμπτωση, αλλά σε υψηλότερες συχνότητες διαχωρίζονται δραματικά. Στις υψηλότερες συχνότητες (~ 1 Hertz) τα ίχνη εισόδου και εξόδου μπορούν να φανεί ότι είναι «αντιφασικά», δηλ. Οι κορυφές της εισόδου συμβαίνουν περίπου στον ίδιο χρόνο με τις κοιλότητες της εξόδου και αντίστροφα. Αυτές οι παρατηρήσεις οδηγούν στην έννοια της «απόκρισης συχνότητας». Η απόκριση συχνότητας ενός συστήματος συνοψίζεται με τη μορφή εξειδικευμένων γραφημάτων κέρδους έναντι συχνότητας και γωνίας φάσης έναντι συχνότητας. Αυτά είναι λογαριθμικά σχεδιασμένα και αποκαλούνται "κέρδος Bode και διαγράμματα φάσης".