

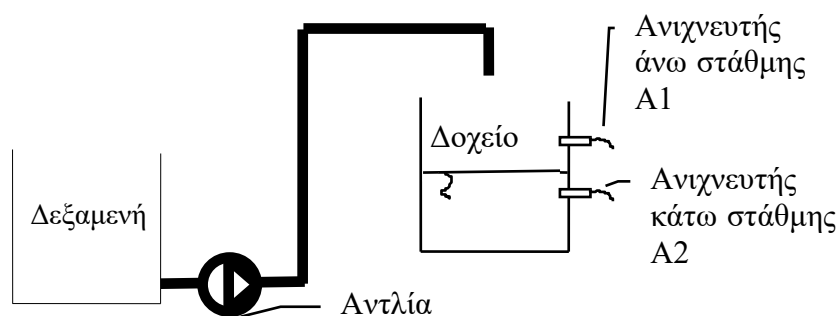
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (ΡΥΘΜΙΣΗΣ)

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

ΓΕΝΙΚΑ

Ένα από τα χαρακτηριστικά των αυτοματισμών που μέχρι τώρα διαπραγματευτήκαμε, είναι το ότι οι μονάδες ελέγχου που χρησιμοποιήσαμε έχουν όπως λέμε δύο διακριτές καταστάσεις : «**Ανοικτό - κλειστό**» (ON/OFF) για την περίπτωση ρελέ και ηλεκτροβαλβίδων ή «**βλέπω - δεν βλέπω**» για την περίπτωση των ανιχνευτών προσέγγισης. Τα αντίστοιχα αυτόματα συστήματα λειτουργούν και αυτά με «ανοίγματα - κλεισίματα», πράγμα που είναι συνήθως το ζητούμενο : Όταν π.χ. το κιβώτιο φτάσει στην άκρη του ταινιόδρομου πρέπει να εκταθεί ο κύλινδρος και να το βγάλει έξω. Η λειτουργία του κυλίνδρου «έκταση - επαναφορά» είναι μια λειτουργία μεταξύ δύο θέσεων - είναι δηλαδή μια ON-OFF λειτουργία που απαιτεί ελάχιστη 'πληροφορία' για να πραγματοποιηθεί, μόλις 1 bit όπως έχουμε αναλύσει - που είναι παρ' όλα αυτά απόλυτα ικανοποιητική για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στο παράδειγμα ελέγχου της στάθμης δοχείου που επίσης διαπραγματευτήκαμε, μπορούμε να θυμηθούμε ότι με ένα πάρα πολύ απλό αυτοματισμό μπορούσαμε να κάνουμε την **στάθμη** του δοχείου να βρίσκεται πάντα **μεταξύ δύο θέσεων** : της θέσης του άνω ανιχνευτή και της θέσης του κάτω ανιχνευτή (Σχήμα 1).

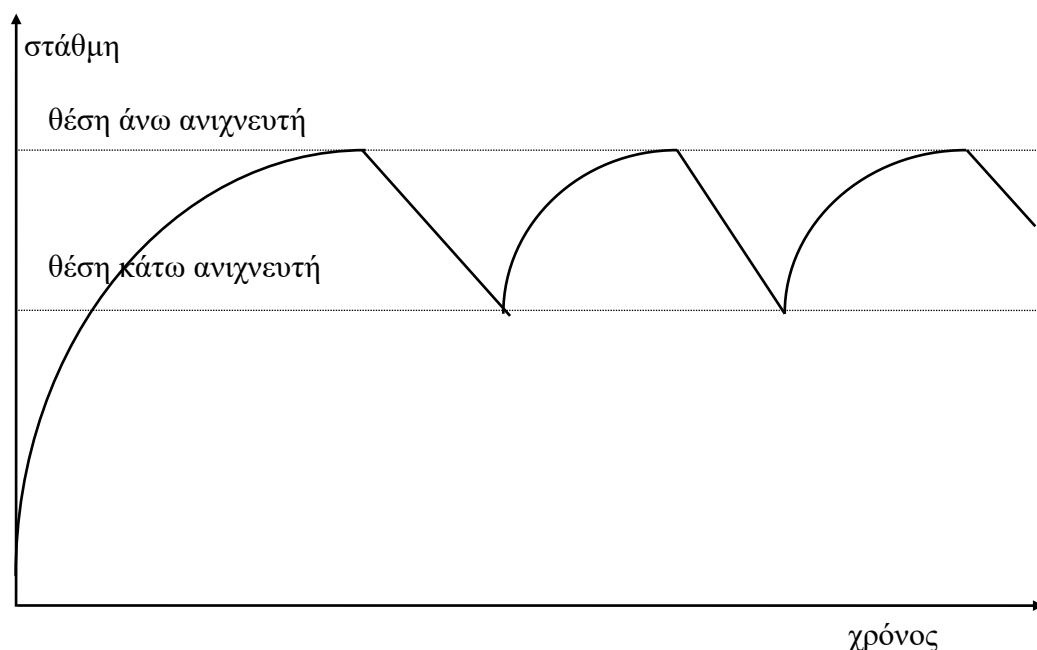


Σχήμα 1

Αν είναι επιθυμητό η στάθμη του δοχείου να διατηρείται όσο γίνεται σταθερή (σε πολλές εφαρμογές απαιτείται μια τέτοιου είδους ρύθμιση), μπορεί ίσως κανείς να σκεφθεί να πλησιάσει κοντά τους δύο ανιχνευτές: Τον ένα λίγο πιο ψηλά και τον άλλο λίγο πιο χαμηλά από την επιθυμητή στάθμη. Τότε η στάθμη του υγρού στο δοχείο θα μεταβάλλεται όπως στο Σχήμα 2. Μόλις το υγρό φτάσει την κάτω στάθμη ξεκινά η αντλία και μόλις φτάσει στην πάνω η αντλία σταματά. Η στάθμη δηλαδή του υγρού στο δοχείο ταλαντώνεται μεταξύ δύο ορίων.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

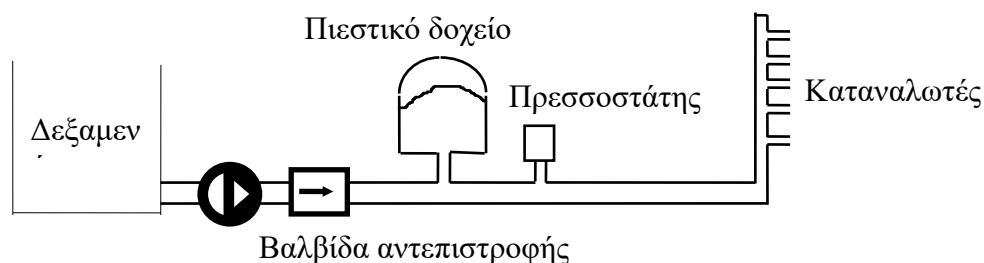
Προκειμένου να πετύχει κανείς όσο το δυνατόν ακριβέστερο έλεγχο της στάθμης πρέπει να μειώσει το εύρος μεταξύ των ορίων. Αυτό με την σειρά του



Σχήμα 6.2

έχει ως συνέπεια την αύξηση του αριθμού των ανοιγμάτων - κλεισιμάτων της αντλίας στη μονάδα του χρόνου. Το τελευταίο δεν μπορεί να γίνεται όμως όσο συχνά θέλουμε: Εκτός του άμεσου κινδύνου να καεί ο κινητήρας της αντλίας λόγω υπερθέρμανσης, θα έχουμε και ταχύτατη φθορά του ρελέ της αντλίας.

Ένα άλλο παράδειγμα **ελέγχου δύο θέσεων**, είναι ο έλεγχος πίεσης σε ένα υδροδοτικό ή πυροσβεστικό δίκτυο. Όπως σχηματικά φαίνεται στο Σχήμα 3, ο **πρεσοστάτης** που επιτηρεί την πίεση στην αρχή του δικτύου, ρυθμίζεται έτσι που να ενεργοποιεί το ρελέ εκκίνησης της αντλίας όταν η πίεση πέσει κάτω από ένα (ρυθμιζόμενο) κάτω όριο, να απενεργοποιεί δε το ρελέ (σταματάει την αντλία) όταν η πίεση ανέβει πάνω από ένα (επίσης ρυθμιζόμενο) άνω όριο. Η διακύμανση



Σχήμα 3

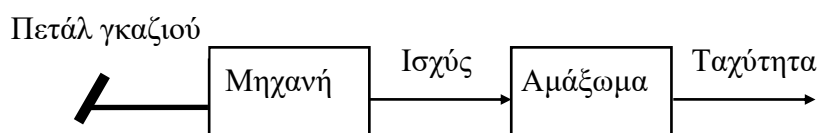
βέβαια της πίεσης στο δίκτυο παρουσιάζει εικόνα ανάλογη της διακύμανσης της στάθμης του υγρού στο προηγούμενο παράδειγμα.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Στα παραπάνω συστήματα επιχειρούμε στην ουσία να κάνουμε **ρύθμιση** μιας ποσότητας - της **στάθμης του υγρού** στο δοχείο στην μία περίπτωση, της **πίεσης** στο δίκτυο την άλλη - χρησιμοποιώντας αυτό που ονομάζουμε έλεγχο δύο θέσεων ή ON-OFF έλεγχο. Είδαμε δε ότι υπάρχουν όρια στη ρύθμιση που μπορούμε να πετύχουμε: Ούτε την στάθμη ούτε την πίεση μπορούμε να ρυθμίσομε έτσι που να **παραμένει ακριβώς σε μια επιθυμητή τιμή**.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Προκειμένου να οδηγηθούμε ομαλά στη κατανόηση της λειτουργίας μίας άλλης κατηγορίας συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, αυτών δηλαδή που ο έλεγχος ασκείται επί συνεχούς βάσεως, θα χρησιμοποιήσομε ένα παράδειγμα από την καθημερινή εμπειρία. Στο Σχήμα 4, εντελώς διαγραμματικά, φαίνεται το σύστημα ρύθμισης της ταχύτητας ενός αυτοκινήτου :



Σχήμα 4

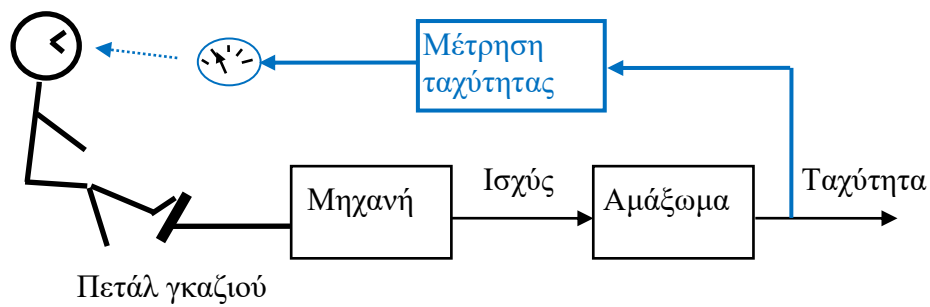
Ο οδηγός επενεργεί στο πετάλ του γκαζιού για να αυξήσει ή να μειώσει την ταχύτητα. Το πετάλ μπορεί να πάρει άπειρες στην ουσία ενδιάμεσες θέσεις μεταξύ δύο ακραίων, άρα ο **έλεγχος** μπορεί να είναι μια **συνεχής διαδικασία** δηλαδή η ρύθμιση μπορεί να είναι πολύ ομαλή. Φανταζόσαστε τη περίπτωση που το πετάλ είχε μόνο δύο θέσεις : τελείως ανοικτό ή τελείως κλειστό !!?

Το παραπάνω σχήμα δεν περιγράφει ακριβώς αυτό που συμβαίνει με τους περισσότερους (τους καλούς) οδηγούς. Ένας τέτοιος οδηγός **παρακολουθεί** τακτικά την ταχύτητα του αυτοκινήτου με την βοήθεια του οργάνου ένδειξης και **διορθώνει** ανάλογα: Αν η ταχύτητα ξεπερνά την **επιθυμητή τιμή** τότε μειώνει το γκάζι και αντίστροφα. Το όλο σύστημα φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 5.

Το σύστημα του Σχήματος 4 αντιπροσωπεύει μια σειρά οδηγούς: Αυτούς που άπαξ και η ταχύτητα φτάσει μια τιμή ‘ξεχνούν’ να κοιτάζουν το όργανο ένδειξης. Η ταχύτητα παραμένει όμως τότε σταθερή; Το πεντάλ βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση, αλλά επειδή το αυτοκίνητο αντιμετωπίζει **μεταβαλλόμενα φορτία** - ανηφόρα, κατηφόρα, άνεμο - η ταχύτητα αλλάζει ανάλογα. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ένα **σύστημα ελέγχου** (ταχύτητας εν προκειμένω) **ανοικτού βρόχου**.

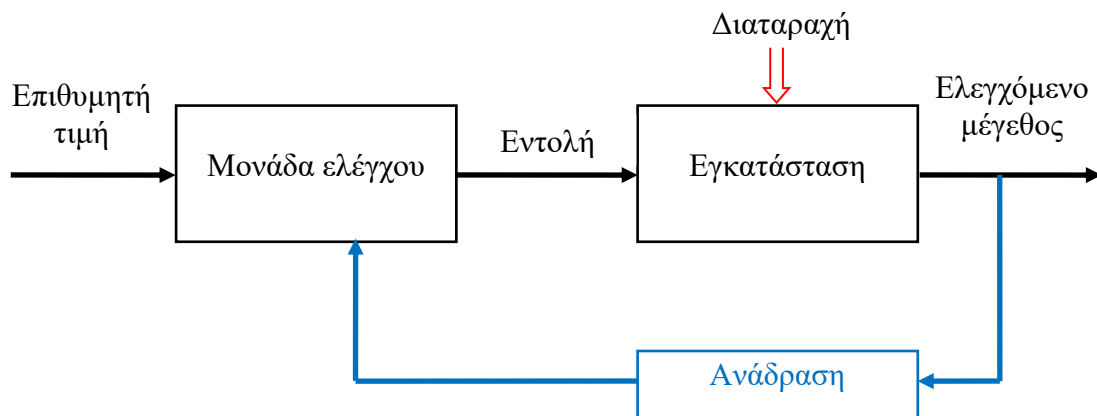
Αντιθέτως στο σύστημα του Σχήματος 5, η πληροφορία για το μέγεθος της ταχύτητας **επανατροφοδοτείται** και χρησιμοποιείται από τον οδηγό για την καλή ρύθμιση της. Σχηματίζεται κατ’ αυτό τον τρόπο ένας **κλειστός βρόχος** και για τον λόγο αυτό τα συστήματα αυτά ονομάζονται **συστήματα κλειστού βρόχου**. Η πληροφορία για την τιμή της ταχύτητας που χρησιμοποιείται από το σύστημα για την καλή του ρύθμιση ονομάζεται **ανάδραση**.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ



Σχήμα 5

Μπορούμε να πούμε τώρα ότι το γενικό σχήμα κάθε συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου, είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6

Η μονάδα ελέγχου παρακολουθεί συνεχώς την **πραγματική τιμή** του ελεγχόμενου μεγέθους με την βοήθεια της ανάδρασης. Εδώ απαιτούνται αισθητήρια όργανα διότι προφανώς πρόκειται για **διαδικασία μέτρησης**. Η πραγματική τιμή συγκρίνεται με την **επιθυμητή τιμή** του ελεγχόμενου μεγέθους και στη συνέχεια δίδεται κατάλληλη **εντολή διόρθωσης** στην εγκατάσταση. Η μονάδα ελέγχου μπορεί να είναι **μηχανική** (σπάνιο πλέον), **ηλεκτρονική** (λιγότερο σπάνιο) ή κάποιος **τύπος Η/Υ** (μοντέρνο κι σύνηθες πλέον).

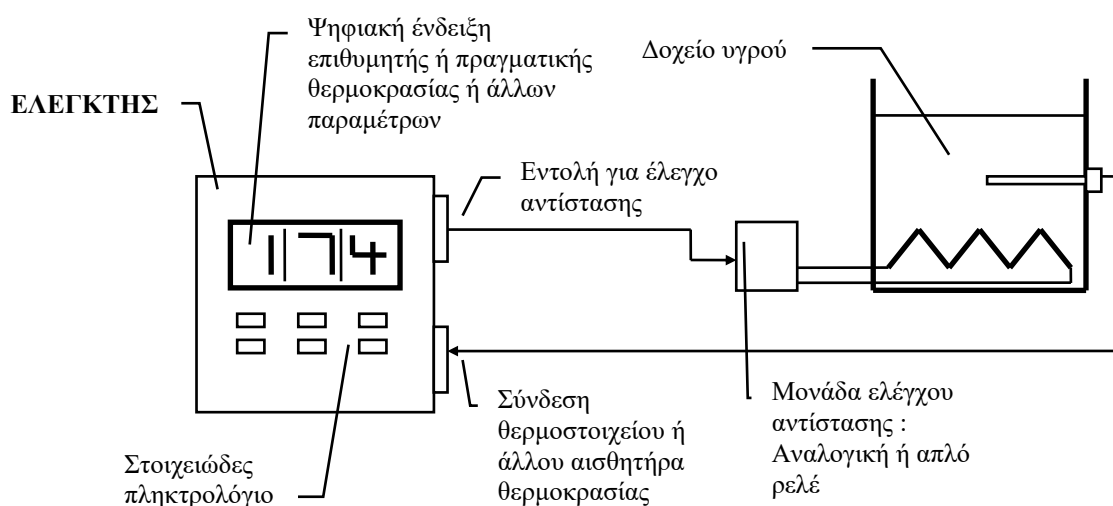
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Έλεγχος θερμοκρασίας

Πρόκειται για το πλέον διαδεδομένο σύστημα κλειστού βρόχου. Το συναντά κανείς κατά κόρο σε μηχανές, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις αλλά και στα κτίρια. Είναι επίσης, μάλλον το ευκολότερο να υλοποιηθεί και ρυθμισθεί.

Στο σχήμα 7, φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα ρύθμισης θερμοκρασίας δοχείου που περιέχει κάποιο υγρό. Χρησιμοποιείται θερμαντική αντίσταση και κάποια μονάδα ελέγχου της ροής ισχύος προς την αντίσταση. Η μονάδα αυτή μπορεί να είναι ένα απλό ρελέ που ανοιγοκλείνει κατάλληλα ή μια συσκευή με ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος (τρανζίστορ ή θυρίστορ). Απαιτείται βεβαίως αισθητήρας θερμοκρασίας.

Για την υλοποίηση του ελέγχου, υπάρχουν διαθέσιμοι ελεγκτές σε μεγάλη ποικιλία. Οι εν λόγω **ελεγκτές θερμοκρασίας**, «κλείνουν» ουσιαστικά τον βρόχο ελέγχου όπως φαίνεται στο σχήμα. Διαθέτουν δηλαδή είσοδο για σύνδεση του αισθητήρα και έξοδο για έλεγχο της μονάδας ισχύος της αντίστασης.



Σχήμα 7



Οι ελεγκτές αυτοί διαθέτουν ένα μικροελεγκτή ο οποίος είναι προγραμματισμένος να υλοποιεί κάποια ή κάποιες μεθόδους ελέγχου. Διαθέτουν επίσης μικρή οθόνη για ένδειξη επιθυμητής ή πραγματικής θερμοκρασίας και άλλων παραμέτρων καθώς και στοιχειώδες πληκτρολόγιο για εισαγωγή επιθυμητής θερμοκρασίας και παραμέτρων ρύθμισης.

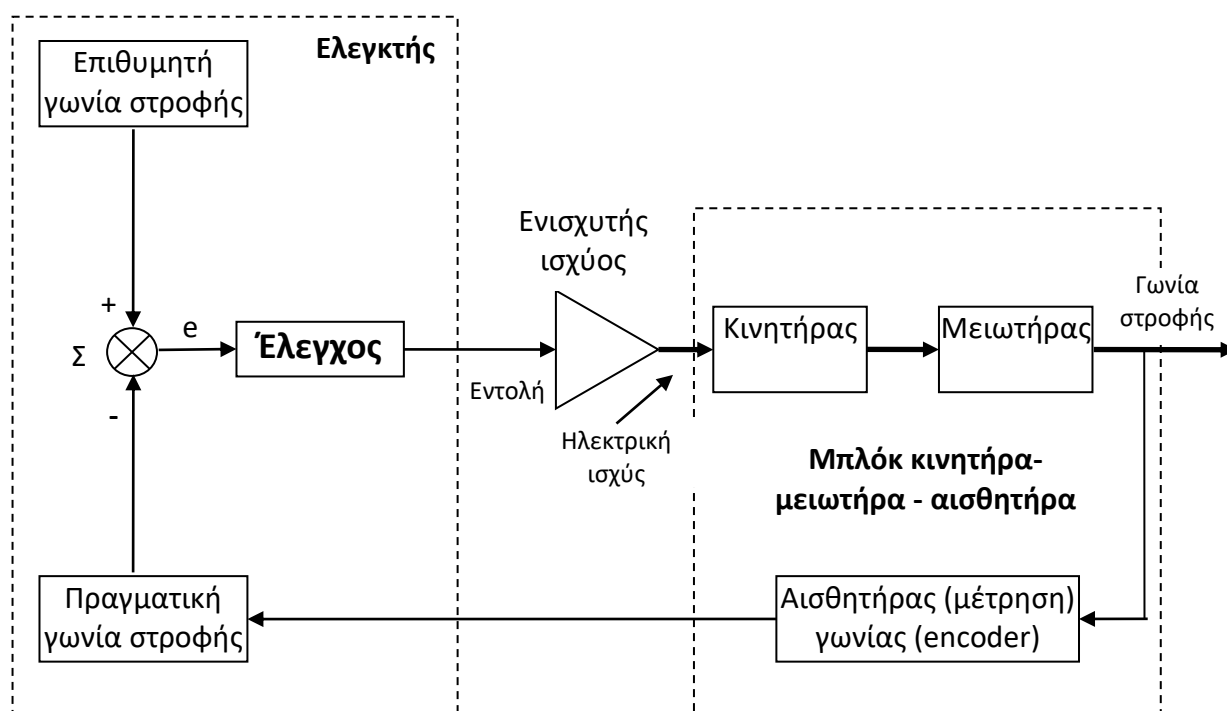
Ο έλεγχος μπορεί να υλοποιηθεί και με την βοήθεια οποιουδήποτε γενικής χρήσης H/Y. Πολύ συνηθισμένο στην βιομηχανία είναι να χρησιμοποιείται κάποιο PLC για έλεγχο θερμοκρασιών σε διάφορα σημεία μια παραγωγικής διαδικασίας.

Σερβοσυστήματα

Σερβοσύστημα είναι ένα σύστημα που είναι σε θέση να ελέγχει μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση. Διαθέτουν :

- Επενεργητή για την «παραγωγή» της μετατόπισης
- Αισθητήρα για την μέτρηση της μετατόπισης
- Μονάδα που ελέγχει την ροή ισχύος προς τον επενεργητή
- Ελεγκτή

Στην πλέον συνηθισμένη τους μορφή (σχήμα 8) ο επενεργητής είναι ηλεκτρικός κινητήρας με ενσωματωμένο μειωτήρα και κωδικοποιητή γωνιακής θέσης (encoder), η μονάδα ισχύος, ενισχυτής ισχύος εν προκειμένω, αποτελείται από ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος και φυσικά υπάρχει κατάλληλος ελεγκτής ο οποίος είναι σε θέση, προγραμματιζόμενος, να υλοποιήσει πολλές μεθόδους ελέγχου.



Σχήμα 8

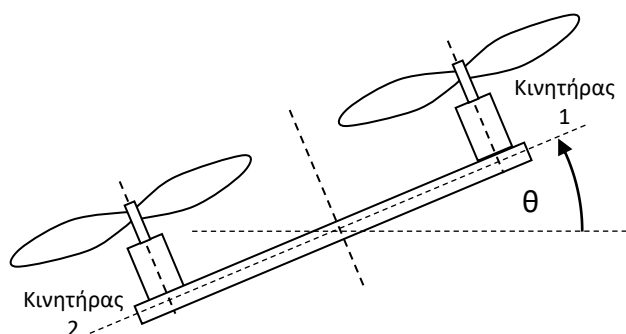
Τα σεβοσυστήματα αποτελούν τον πυρήνα κάθε ρομποτικού συστήματος και κάθε μηχανής αριθμητικού ελέγχου (CNC). Χρησιμοποιούνται επίσης ευρύτατα σε πλήθος αυτόματων μηχανών παντός τύπου στις οποίες είναι επιθυμητό να ελέγχεται με ακρίβεια κάποια ή κάποιες κινήσεις.

Μικρό ιπτάμενο όχημα (drone)



υπάρχουν διαθέσιμα. Οι ίδιες ως άνω τεχνολογίες ωθούν και την ανάπτυξη μεγαλύτερων ιπτάμενων οχημάτων μεγέθους μικρού αυτοκινήτου που δεν έχουν απαγορευτικό κόστος.

Φυσικά, τα ιπτάμενα αυτά οχήματα **χρειάζονται απαραίτητως ένα καλό σύστημα ελέγχου**. Το σύστημα αυτό πρέπει να ελέγχει τους ηλεκτρικούς κινητήρες κατά τρόπο που το όχημα να μπορεί να αιωρείται σε οριζόντια θέση, πράγμα καθόλου



Τα μικρού μεγέθους ιπτάμενα οχήματα και ειδικά η κατηγορία των τετρακόπτερων (quadcopters) έχουν γίνει πολύ φθηνά και αξιόπιστα τα τελευταία χρόνια. Η «άνθηση» αυτή οφείλεται αφ' ενός στις καλύτερες μπαταρίες που απαιτούνται για την κίνηση των ηλεκτρικών κινητήρων και αφ' ετέρου στα γυροσκόπια χαμηλού κόστους και καλής αξιοπιστίας που υπάρχουν διαθέσιμα. Οι ίδιες ως άνω τεχνολογίες ωθούν και την ανάπτυξη μεγαλύτερων ιπτάμενων οχημάτων μεγέθους μικρού αυτοκινήτου που δεν έχουν απαγορευτικό κόστος.

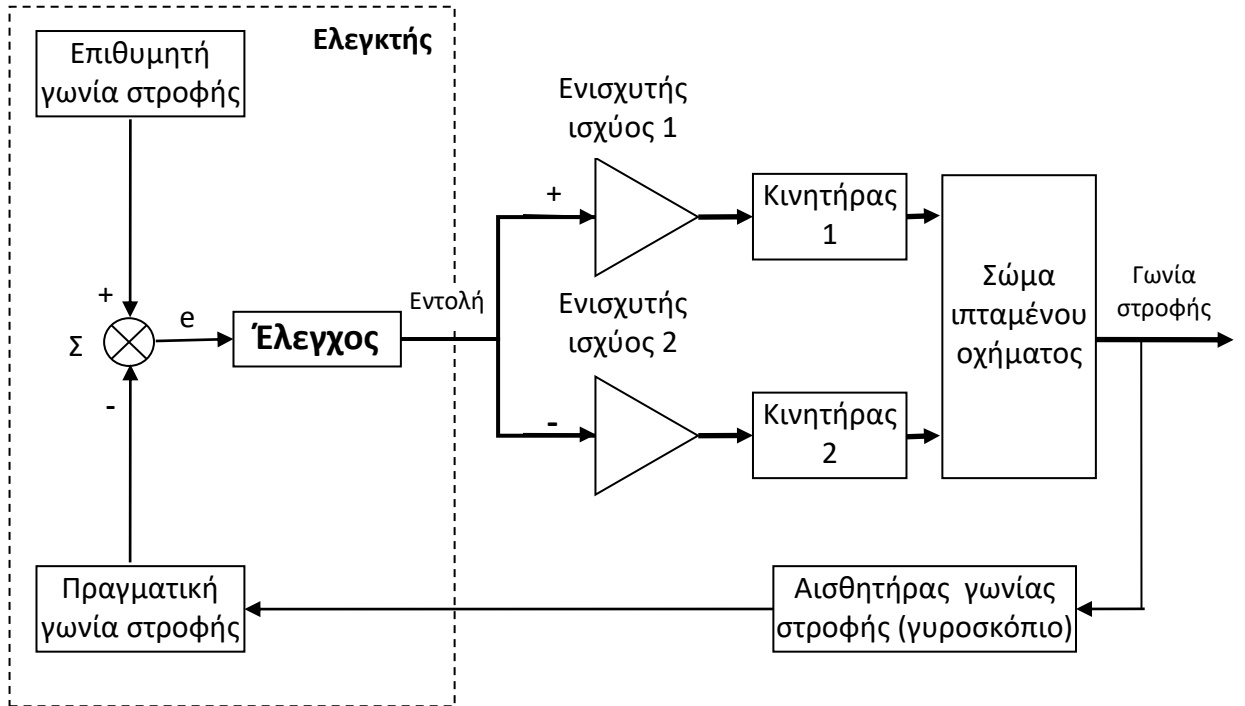
Φυσικά, τα ιπτάμενα αυτά οχήματα **χρειάζονται απαραίτητως ένα καλό σύστημα ελέγχου**. Το σύστημα αυτό πρέπει να ελέγχει τους ηλεκτρικούς κινητήρες κατά τρόπο που το όχημα να μπορεί να αιωρείται σε οριζόντια θέση, πράγμα καθόλου αυτονόητο αν σκεφτεί κανείς ότι το βάρος δεν μπορεί να είναι ποτέ «ισοκατανεμημένο» αλλά και τον άνεμο, που μπορεί να τείνει να το αναποδογυρίσει.

Γενικότερα, το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να είναι σε θέση να διατηρήσει το όχημα σε οποιαδήποτε επιθυμητή από τις τρεις γωνίες που είναι ικανό να περιστραφεί ένα στερεό σώμα. Στο διπλανό σχήμα, φαίνεται μια από τις τρεις αυτές γωνίες

σε ένα τετρακόπτερο, ένα όχημα δηλαδή με τέσσερις προπέλες και τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς κινητήρες. Στο σχήμα φαίνεται μόνο το ζευγάρι εκείνο των κινητήρων που είναι ικανό να επηρεάσει την γωνία θ . Εύκολα καταλαβαίνει κανείς, ότι αν ο κινητήρας 1 κινηθεί με μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα από τον 2, τότε η γωνία θα αυξηθεί.

Στο σχήμα 9, φαίνεται ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου και για τους δύο κινητήρες το οποίο είναι σε θέση να ελέγξει την γωνία στροφής θ . Το μέγεθος αυτό πρέπει να μετριέται συνεχώς και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται κατάλληλο γυροσκόπιο ενσωματωμένο στο σώμα της κατασκευής. Ο ελεγκτής υλοποιεί την απαραίτητη μέθοδο ελέγχου και «παράγει» την εντολή προς τους κινητήρες. Παρατηρείστε εδώ, ότι πρόκειται για μια «διαφορική εντολή». Ένα σήμα δηλαδή που όσο αυξάνει την εντολή στον ένα κινητήρα, τόσο την μειώνει στον άλλο. Αυτό είναι απαραίτητο και για άλλο λόγο. Μπορείτε να φαντασθείτε για ποιόν;

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ



Σχήμα 9

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΡΙΩΝ ΟΡΩΝ : ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ – ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΟΣ - ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα μας απασχολήσει το τι κάνει η μονάδα ελέγχου. Τι είδους δράσεις αναλαμβάνει προκειμένου να **διατηρεί το ελεγχόμενο μέγεθος όσο γίνεται πλησιέστερα στην επιθυμητή τιμή** ανεξάρτητα από απρόβλεπτες αλλαγές στο περιβάλλον ή την ίδια την εγκατάσταση. Τις απρόβλεπτες αυτές μεταβολές τόσο σε μέγεθος όσο και σε διάρκεια ονομάζονται στην ορολογία των συστημάτων ελέγχου **διαταραχές**.

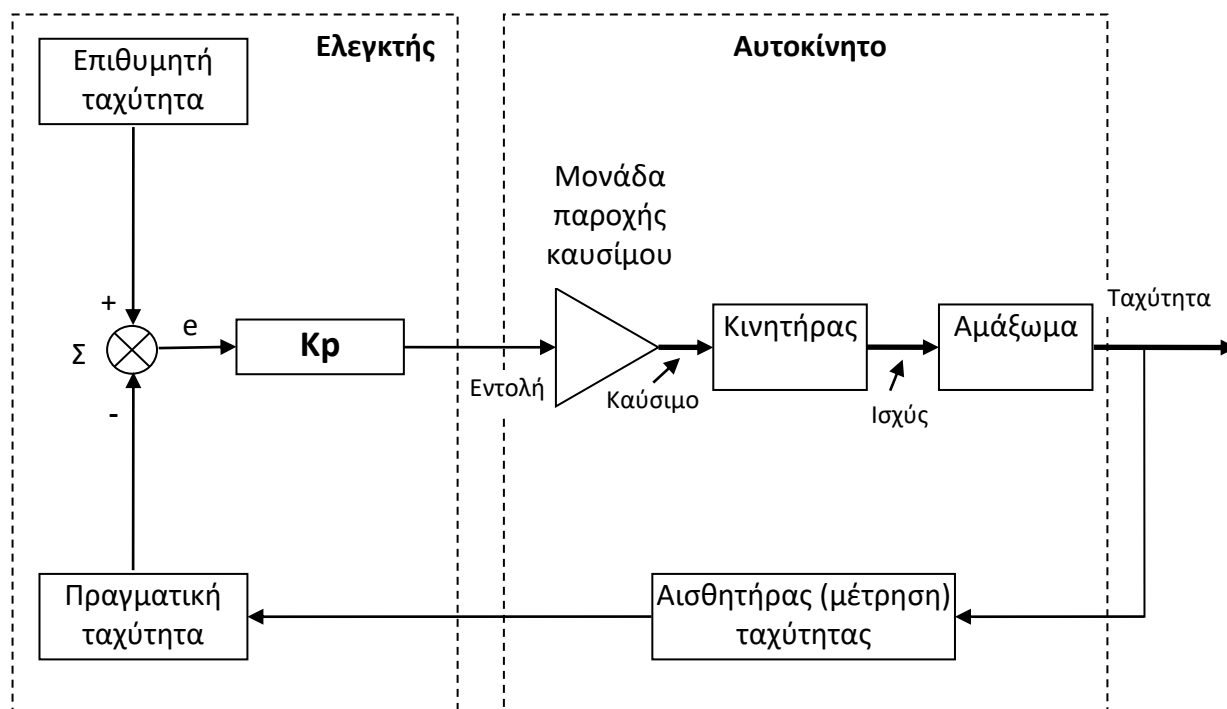
Στα χρόνια πριν την ύπαρξη των Η/Υ υπήρχαν συστήματα αυτομάτου ελέγχου, που δούλευαν πολύ καλά μάλιστα. Είχαν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό συγκεκριμένες **δράσεις ελέγχου** - που υποδείχθηκαν βασικά από μαθηματική ανάλυση της συμπεριφοράς των αυτομάτων συστημάτων - και που μπορούσαν εύκολα να υλοποιηθούν από στοιχεία τόσο μηχανικά όσο και κυρίως ηλεκτρονικά. Ο πλέον δημοφιλής τρόπος ελέγχου που χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα - υλοποιούμενος από Η/Υ - είναι ο λεγόμενος **έλεγχος τριών όρων : Αναλογικός - Ολοκληρωτικός - Διαφορικός**.

Θα προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε την λειτουργία των τριών αυτών όρων, στο παράδειγμα του (αυτομάτου πλέον) ελέγχου ταχύτητας αυτοκινήτου (cruise control), με το οποίο ξεκινήσαμε.

1. Αναλογικός έλεγχος (Proportional Control)

Στο σχήμα 10, φαίνεται το αυτοκίνητο σε αναπαράσταση «κουτιών» (blocks), λειτουργικών μονάδων δηλαδή συνδεδεμένων μεταξύ τους. Μια τέτοια αναπαράσταση, που θα την λέμε «μπλόκ διάγραμμα», μας είναι χρήσιμη στην ανάλυση των Συστημάτων Ελέγχου. Φαίνεται επίσης σχεδιασμένος με τον ίδιο τρόπο, ένας Ελεγκτής (Controller). Ο εν λόγω ελεγκτής είναι ένας Η/Υ κατάλληλης μορφής, συνήθως κάποιος μικροελεγκτής.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ



Σχήμα 10

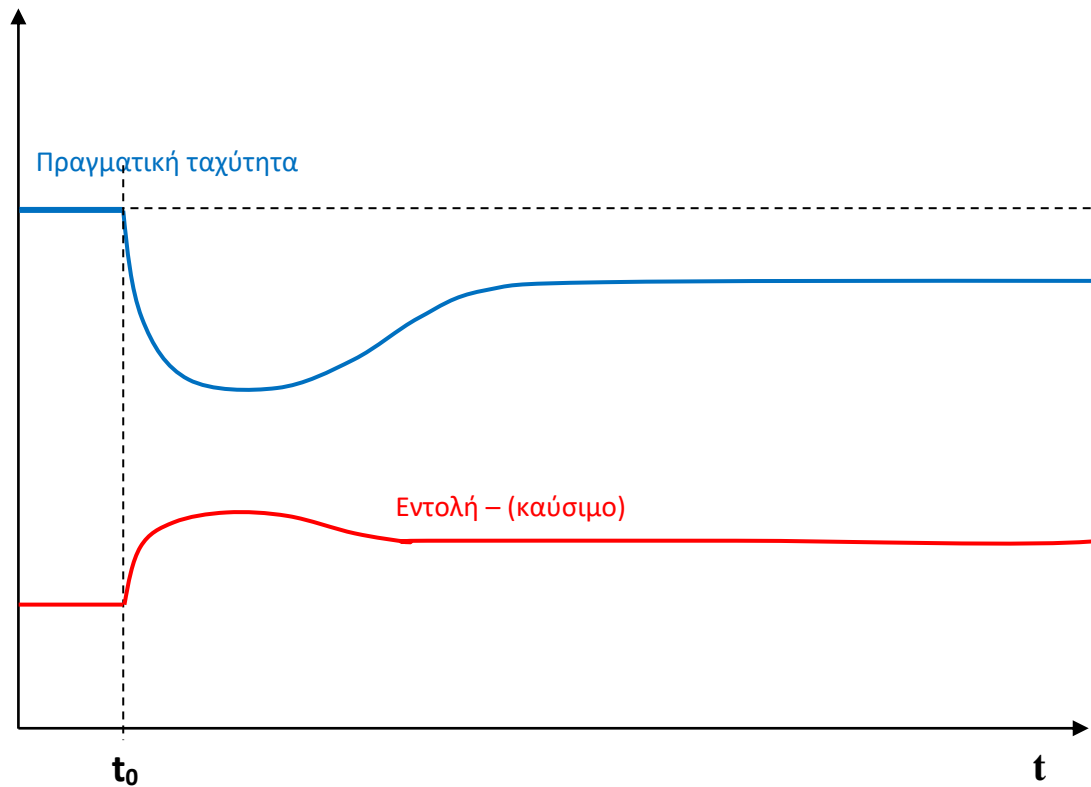
Ο συγκεκριμένος ελεγκτής, όπως και κάθε ελεγκτής που υλοποιεί σύστημα κλειστού βρόχου, εκτελεί τις παρακάτω εργασίες :

- **Παρακολουθεί «συνεχώς»** το μέγεθος που επιθυμεί να ρυθμίσει – στο παράδειγμά μας την ταχύτητα του αυτοκινήτου
- Το **συγκρίνει με την επιθυμητή τιμή** του μεγέθους αυτού
- **Επεξεργάζεται** τις πληροφορίες αυτές και
- Παράγει την κατάλληλη **Εντολή προς την εγκατάσταση**, ώστε αυτή να αντιδράσει κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ελεγχόμενο μέγεθος να αποκτήσει όσο γίνεται γρηγορότερα την επιθυμητή τιμή.

Ο αναλογικός ελεγκτής ή αλλιώς η αναλογική δράση ελέγχου, το μόνο που κάνει είναι να **πολλαπλασιάζει την τιμή του σφάλματος** (την διαφορά δηλαδή της επιθυμητής από την πραγματική τιμή) **με κάποιον αριθμό K_p** , που θα ονομάζομε **κέρδος** του αναλογικού ελεγκτή. Η εντολή προς την εγκατάσταση είναι το αποτέλεσμα αυτού του πολλαπλασιασμού. Η ιδέα είναι απλή : Όσο περισσότερο απέχει το επιθυμητό αποτέλεσμα από το πραγματικό, όσο πιο μεγάλο είναι δηλαδή το σφάλμα, τόσο πιο μεγάλη εντολή πρέπει να φτάσει στην εγκατάσταση για να διορθώσει το σφάλμα αυτό. Στην περίπτωση μας, όσο πιο πολύ απέχει η επιθυμητή ταχύτητα από την πραγματική, τόσο περισσότερα καύσιμα πρέπει να φτάσει στην μηχανή. Έστω τώρα ότι η ταχύτητά του αυτοκινήτου ελέγχεται με τον παραπάνω τρόπο. Έστω ακόμη, ότι αυτό κινείται με μια κάποια ταχύτητα και την χρονική στιγμή t_0 ο δρόμος γίνεται ανηφορικός. Τότε φυσικά η ταχύτητα θα αρχίσει να μειώνεται. Αυτό θα γίνει αμέσως αντιληπτό από τον ελεγκτή μέσω της ανάδρασης, οπότε το σφάλμα θα αυξηθεί και κατά συνέπεια η εντολή – καύσιμα προς την μηχανή.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Στο σχήμα 11, φαίνονται ποιοτικά αυτές οι μεταβολές.



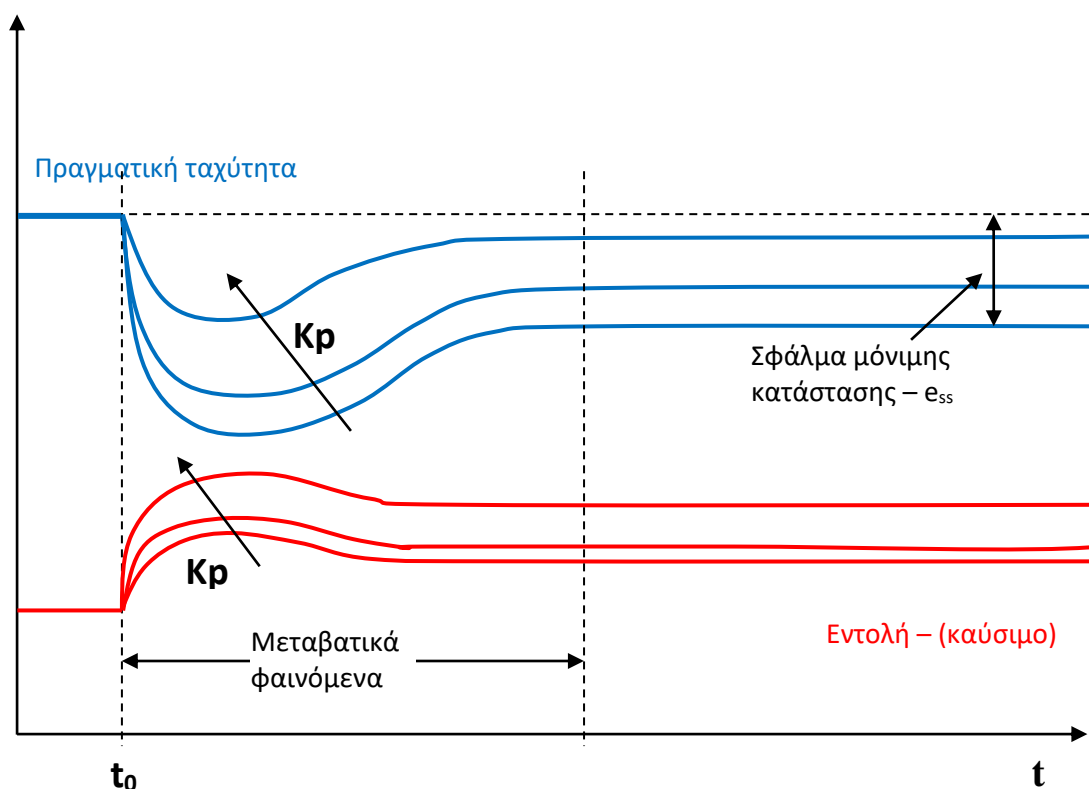
Σχήμα 11

Ο ελεγκτής δηλαδή, αντιλήφθηκε την πτώση της ταχύτητας και αντέδρασε σωστά. Μπορεί κανείς εύκολα να καταλάβει, ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός K_p , τόσο η εντολή θα είναι μεγαλύτερη για τις ίδιες τιμές του σφάλματος. Αυτό σημαίνει πρακτικά, ότι μικρή απόκλιση από την επιθυμητή τιμή θα δημιουργεί **μεγάλη εντολή**, θα κάνει δηλαδή το όλο σύστημα να **αντιδρά γρήγορα**.

Στο Σχήμα 12, φαίνονται ποιοτικά και πάλι αυτές οι διαφορετικές «συμπεριφορές» αναλόγως της τιμής του κέρδους K_p .

Ας δούμε τώρα κάτι επίσης σημαντικό: Ας υποθέσουμε ότι το αυτοκίνητο συνεχίζει να ανεβαίνει την ίδια ανηφόρα. Η ταχύτητά του, με την βοήθεια του συστήματος κλειστού βρόχου, θα βρει μια νέα τιμή και θα παραμείνει σ' αυτήν. Αυτή η νέα τιμή θα είναι όση και πριν την ανηφόρα; Με την συγκεκριμένη δράση ελέγχου, τον απλό δηλαδή αναλογικό έλεγχο, η απάντηση είναι ΟΧΙ. Θα υπάρχει πάντα αυτό που ονομάζομαι **σφάλμα μόνιμης κατάστασης (steady state error - e_{ss})**, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Αυτό μπορεί να το καταλάβει κανείς κοιτάζοντας το μπλόκ διάγραμμα : Αν η επιθυμητή τιμή γίνει ίση με την πραγματική, τότε το σφάλμα γίνεται μηδέν, άρα και η εντολή μηδέν, άρα και το καύσιμο προς τον κινητήρα μηδενίζεται. Δηλαδή το αυτοκίνητο κινείται στην ανηφόρα χωρίς καύσιμο : ΑΤΟΠΟ!



Σχήμα 12

Δυστυχώς δηλαδή, με τον συγκεκριμένο τύπο ελέγχου, μας χρειάζεται πάντα κάποιο σφάλμα. Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε προς το παρόν, είναι ότι **όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος K_p τόσο μικρότερο είναι αυτό το σφάλμα**.

2. Αναλογικός + Ολοκληρωτικός Έλεγχος (Proportional + Integral Control)

Από την ανάλυση της δράσης του αναλογικού ελέγχου προέκυψε το συμπέρασμα ότι η ρύθμιση της ελεγχόμενης ποσότητας δεν είναι και τόσο καλή αφού για τα περισσότερα συστήματα - εκτός μιας κατηγορίας¹ - υπάρχει **σφάλμα μόνιμης κατάστασης**. Σε πολλά συστήματα αυτομάτου ελέγχου, έστω και μικρό τέτοιο σφάλμα είναι ανεπιθύμητο. Γι' αυτό το λόγο κυρίως υπάρχει η ολοκληρωτική δράση ελέγχου ή **ολοκληρωτικός έλεγχος**, ο οποίος έχει την ιδιότητα να **καταστέλλει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης στο μηδέν**. Ο ολοκληρωτικός έλεγχος δεν εφαρμόζεται ποτέ από μόνος του, αλλά σε συνδυασμό τουλάχιστον με τον αναλογικό.

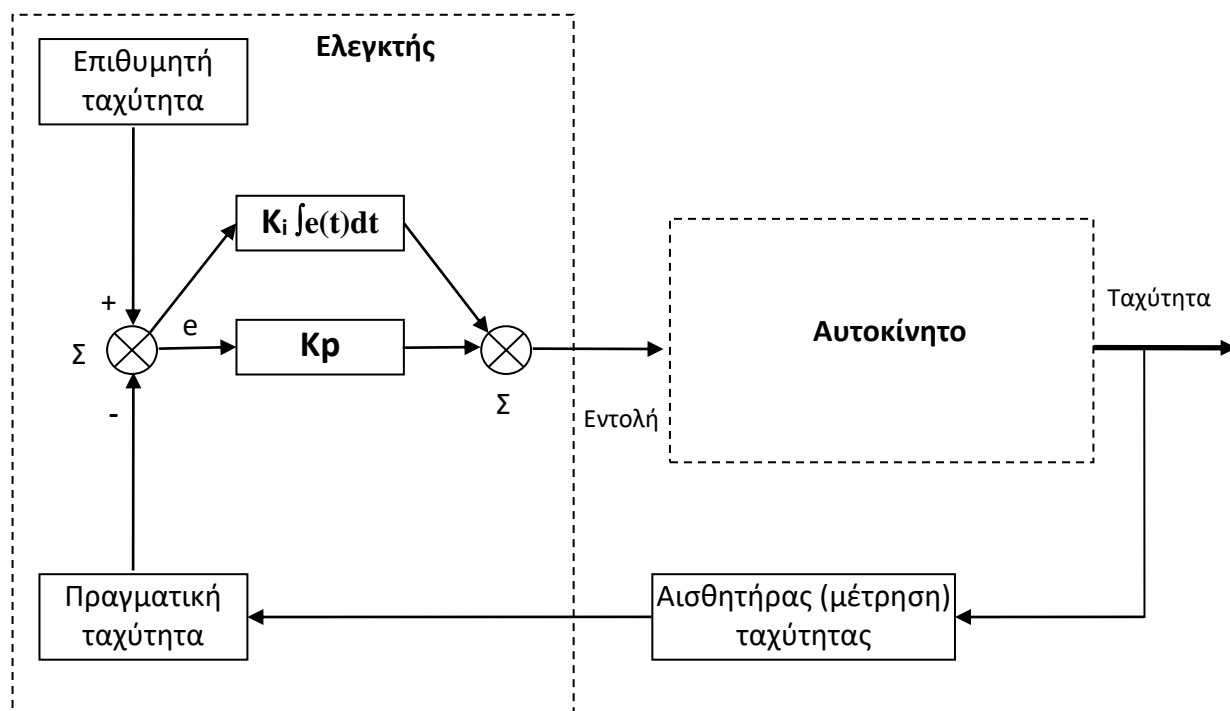
Η ολοκληρωτική δράση ελέγχου δημιουργεί μια **εντολή η οποία είναι ανάλογη του ολοκληρώματος του σφάλματος**. Ο συντελεστής αναλογίας K_i ονομάζεται κέρδος του ολοκληρωτικού όρου. Η εντολή αυτή προστίθεται σε αυτή

¹ Ένα σύστημα ελέγχου γωνιακής θέσης π.χ. που δεν αντιμετωπίζει σταθερά φορτία δεν έχει σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

που δημιουργεί η αναλογική ή η οποιαδήποτε άλλη δράση ελέγχου, ώστε να προκύψει η συνολική εντολή ρύθμισης.

$$\text{Εντολή} = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt$$

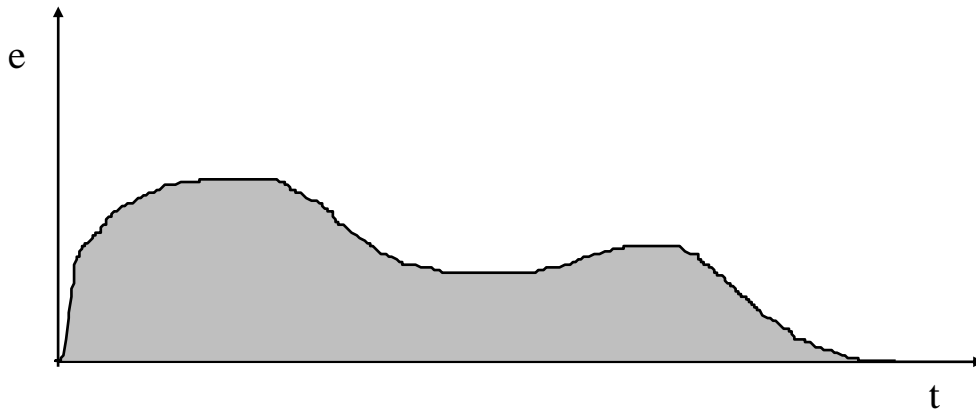


Σχήμα 13

Πως θα δράσει τώρα ο νέος αυτός ολοκληρωτικός όρος; Μπορούμε να θυμηθούμε από τα μαθηματικά, ότι το ολοκλήρωμα μίας συνάρτησης, εν προκειμένω της συνάρτησης του σφάλματος (συνάρτηση του χρόνου), είναι το εμβαδόν μεταξύ της καμπύλης της γραφικής παράστασης της συνάρτησης και του άξονα της ανεξάρτητης μεταβλητής. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει, ότι παρεχόμενου του χρόνου το εμβαδόν θα αυξάνει², εκτός αν το σφάλμα γίνει κάποια στιγμή μηδέν, οπότε σταθεροποιείται – σχήμα 14.

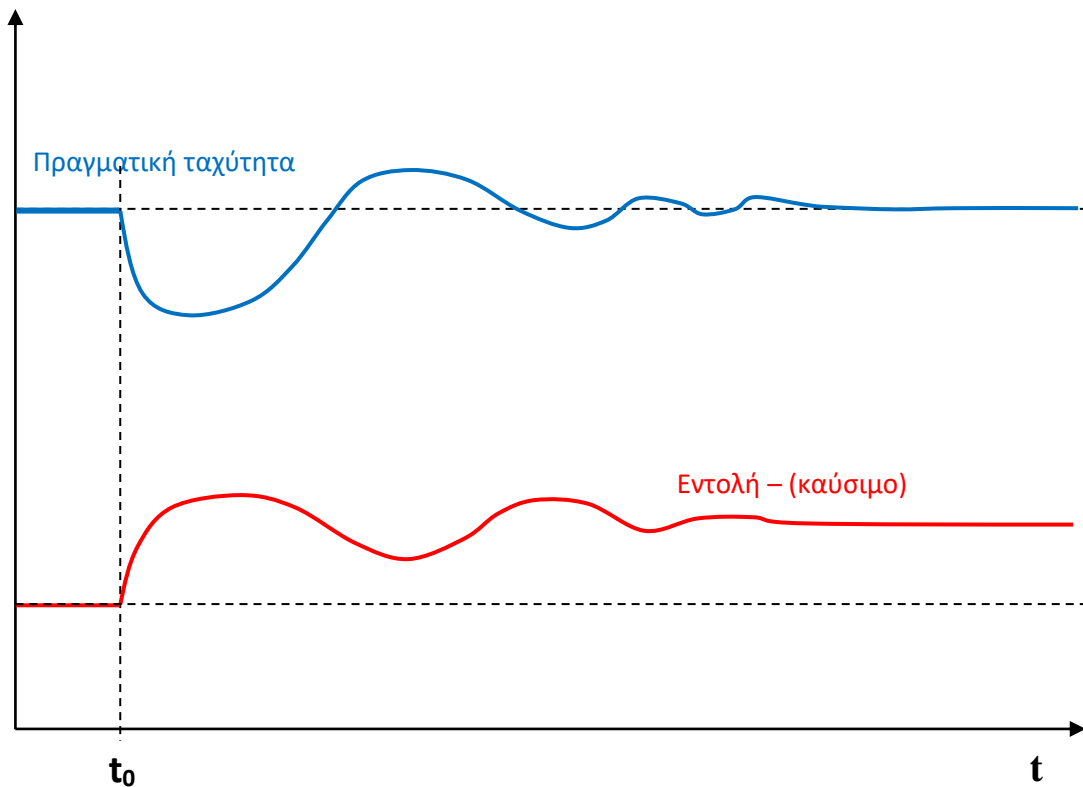
² Υπάρχει και η ειδική περίπτωση βέβαια το σφάλμα να κάνει αρμονική ταλάντωση, οπότε το εμβαδόν αυξομειώνεται συνεχώς. Πάντως αυτή είναι μια κατάσταση έτσι κι αλλιώς ανεπιθύμητη : σύστημα ταλαντωτικό.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ



Σχήμα 14

Ας υποθέσουμε τώρα ότι ζητούμε από το σύστημα μια επιθυμητή ταχύτητα και ότι αυτό, μετά το μεταβατικό φαινόμενο, βρίσκει μια κατάσταση ισορροπίας. Στη κατάσταση αυτή ούτε η πραγματική τιμή μεταβάλλεται άρα ούτε και το σφάλμα ούτε και η εντολή προς την εγκατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι και το ολοκλήρωμα έχει πάρει μια σταθερή τιμή, άρα σύμφωνα με τα παραπάνω **το σφάλμα είναι αναγκαστικά μηδέν (Σχήμα 15)! Σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα των όποιων διαταραχών.**



Σχήμα 15

Η εισαγωγή του ολοκληρωτικού όρου, λύνει βεβαίως το πρόβλημα του σφάλματος μόνιμης κατάστασης - αφού το κάνει πάντα μηδέν - αλλά συνήθως **επιδεινώνει την κατάσταση από την άποψη της ευστάθειας - το σύστημα δηλαδή**

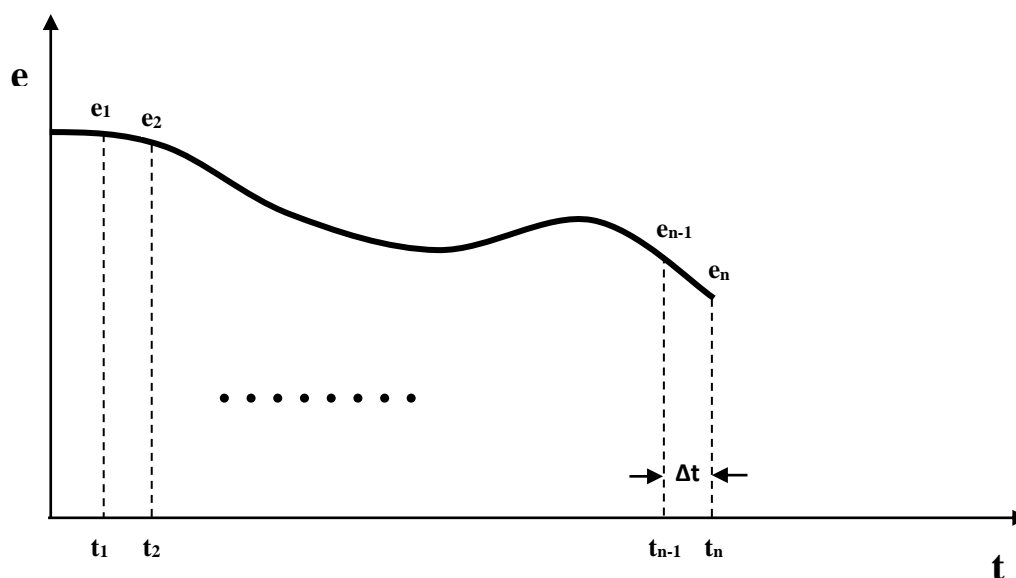
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

είναι τώρα πιο πιθανόν να οδηγηθεί σε ταλαντώσεις – Σχήμα 15. Έτσι τώρα πρέπει σχεδόν πάντα να μειώνεται το κέρδος K_r του αναλογικού όρου.

Για την σωστή λειτουργία του συστήματος ελέγχου, πρέπει τώρα να επιλεγεί κατάλληλα το ζευγάρι των παραμέτρων (αριθμών) K_r και K_i . Θα δούμε αργότερα μεθόδους να κάνει κανείς κάτι τέτοιο με συστηματικό τρόπο. Προς το παρόν πρέπει να κάνουμε την παρατήρηση, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος K_i , τόσο πιο γρήγορα «αναπτύσσεται» η εντολή του ολοκληρωτικού όρου και άρα το σύστημα «καταστέλλει» το σφάλμα μόνιμης κατάστασης γρήγορα. Γρήγορη αντίδραση όμως, μπορεί και πάλι να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις.

Αριθμητικός υπολογισμός του ολοκληρώματος

Για την υλοποίηση του ελέγχου, όπως έχει αναφερθεί, χρησιμοποιείται κάποιου είδους Η/Υ. Η εντολή προς το σύστημα υπολογίζεται και ανανεώνεται κάθε Δt mseconds. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται **χρόνος δειγματοληψίας και ελέγχου**. Γενικά, όσο μικρότερος είναι ο χρόνος αυτός, τόσο καλύτερα. Με την σημερινή στάθμη της τεχνολογίας των Η/Υ αυτός ο χρόνος μπορεί να γίνει πάρα πολύ μικρός. Για τα μηχανικά συστήματα που μας ενδιαφέρουν, αν το Δt είναι της τάξης του 1 msecond είναι υπερ-επαρκές.



Σχήμα 16

Το (ορισμένο) ολοκλήρωμα του σφάλματος από χρόνο t_{n-1} μέχρι χρόνο t_n είναι περίπου ίσο με το εμβαδόν του σχετικού τραπεζίου (Σχήμα 16) :

$$(e_{n-1} + e_n) \Delta t / 2$$

Το ολοκλήρωμα από την έναρξη του ελέγχου μέχρι τον χρόνο t_n (n -οστή περίοδος ελέγχου), δίδεται από τον αναδρομικό τύπο :

$$I_n = I_{n-1} + (e_{n-1} + e_n) \Delta t / 2$$

Ο Ελεγκτής (που μην ξεχνάμε είναι Η/Υ), γνωρίζει την τιμή του σφάλματος e_n την τρέχουσα χρονική στιγμή, έχει κρατήσει στην μνήμη και την τιμή e_{n-1} (σφάλμα την

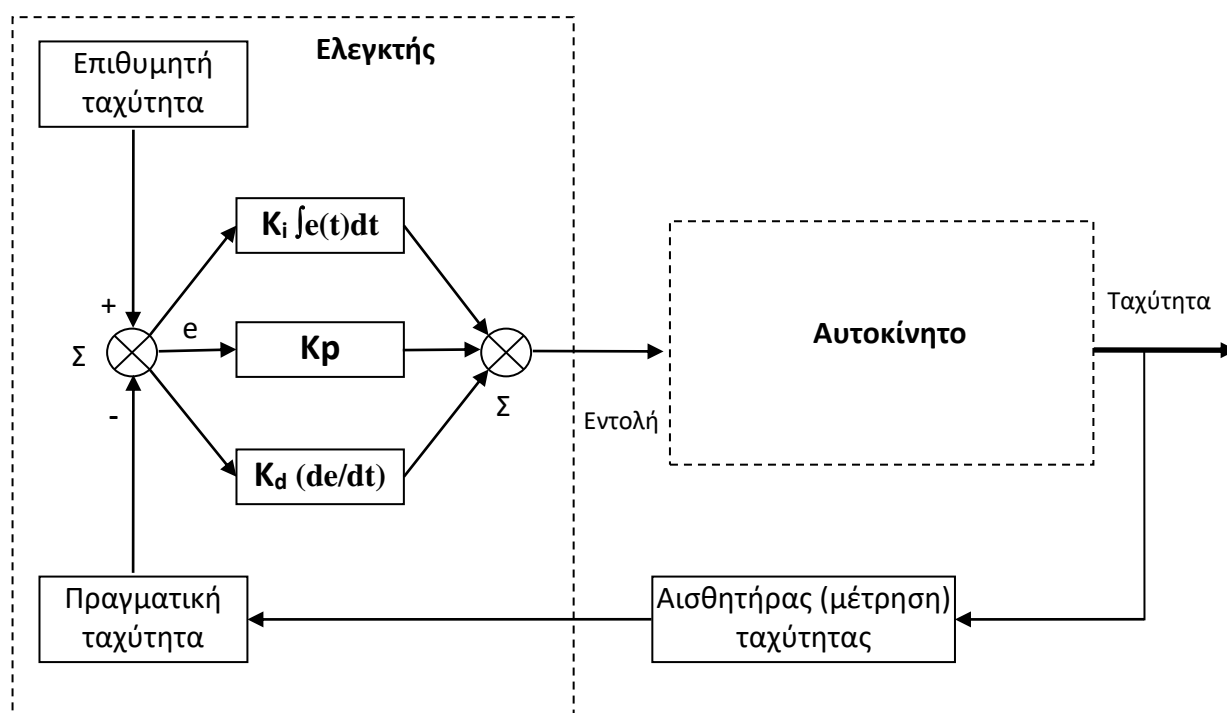
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

προηγούμενη χρονική στιγμή), οπότε υπολογίζει την ποσότητα $(e_{n-1} + e_n) \Delta t / 2$. Στην συνέχεια, με την βοήθεια του αναδρομικού τύπου, υπολογίζει το I_n ανά πάσα χρονική στιγμή – όταν ξεκινά ο έλεγχος $I_0 = 0$.

3. Διαφορικός έλεγχος – (Derivative Control)

Θεωρώντας τον αναλογικό ως τον βασικό τύπο ελέγχου, όπως αναλύσαμε στα προηγούμενα, ολοκληρωτικός έλεγχος μπορεί να προστεθεί προκειμένου να εξαλειφθεί το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Όπως όμως αναφέρθηκε, αυτό μπορεί να αποβεί σε βάρος της ευστάθειας του συστήματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν επιθυμούμε γρήγορη απόκριση σε είσοδο ή γρήγορη καταστολή των διαταραχών - δηλαδή μεγάλο κέρδος - τότε πιθανόν το σύστημα να οδηγηθεί σε ταλαντώσεις, πράγμα παντελώς ανεπιθύμητο.

Ένας τρίτος τύπος ελέγχου εφαρμόζεται επιπρόσθετα σ' αυτή την περίπτωση προκειμένου να βελτιωθεί η ευστάθεια του συστήματος: Ο **διαφορικός έλεγχος**. Η εντολή που παράγει ο συγκεκριμένος τύπος ελέγχου είναι **ανάλογη της παραγώγου του σφάλματος στον χρόνο**. Ο συντελεστής αναλογίας K_d , ονομάζεται **κέρδος του διαφορικού όρου**.



Σχήμα 17

Αντιλαμβάνεται κανένας ότι ο διαφορικός έλεγχος έχει την ιδιότητα να λαμβάνει υπ' όψη μεταβολές του σφάλματος. Όταν δηλαδή το σφάλμα μεταβάλλεται με ταχύ ρυθμό, ο ελεγκτής δίδει "μεγάλη" εντολή, έτσι που η εγκατάσταση να ρυθμισθεί γρήγορα. Τελικά βέβαια ο διαφορικός έλεγχος βελτιώνει την ευστάθεια του συστήματος. Έτσι επιτρέπει στο αναλογικό κέρδος να πάρει μεγαλύτερες τιμές (από το αν υπήρχε μόνο αναλογικός έλεγχος) και έτσι να αυξηθεί η ταχύτητα απόκρισης.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

Ο διαφορικός έλεγχος έχει το **μειονέκτημα** ότι **ενισχύει το θόρυβο** όταν αυτός υπάρχει στο σήμα του σφάλματος. Αυτό μπορεί να αποβεί καταστροφικό για ένα σύστημα ελέγχου. Γι' αυτό πρέπει να αποφεύγεται όταν τα σήματα στο σύστημα έχουν θόρυβο.

Αριθμητικός υπολογισμός της παραγώγου

Μια προσέγγιση 1^{ης} τάξης της παραγώγου της συνάρτησης σφάλματος την χρονική στιγμή t_n (Σχήμα 16) δίδεται από τον τύπο :

$$(de/dt)_n = (e_n - e_{n-1}) / \Delta t$$

4. Αναλογικός – Ολοκληρωτικός – Διαφορικός Έλεγχος (P.I.D. Control)

Αναλύσαμε στα προηγούμενα ότι κάθε τύπος ελέγχου συνεισφέρει κατά συγκεκριμένο τρόπο στην συμπεριφορά ενός συστήματος. Ο ελεγκτής ο οποίος είναι σε θέση να συνδυάσει και τις τρεις βασικές αυτές μορφές ελέγχου, ονομάζεται **αναλογικός - ολοκληρωτικός - διαφορικός ελεγκτής (P.I.D. Controller)**. Χρησιμοποιείται συνήθως στις εγκαταστάσεις που υπόκεινται σε ξαφνικές και μεγάλες διαταραχές, εκεί δηλαδή που δεν θα επαρκούσε ελεγκτής δύο όρων.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει συνοπτικά την **επίδραση μια αύξησης των παραμέτρων των τριών όρων**, δηλαδή των τιμών K_p , K_i , K_d , σε τρία βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος ελέγχου: Στην ταχύτητα με την οποία αντιδρά, στην τάση του να κάνει ταλαντώσεις και στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

Παράμετρος	«Ταχύτητα αντίδρασης»	Ταλαντωτική συμπεριφορά (ευστάθεια)	Σφάλμα μόνιμης κατάστασης
K_p ↑	Αυξάνει	Χειροτερεύει	Μειώνεται
K_i ↑	Αυξάνει	Χειροτερεύει	Εξαλείφεται
K_d ↑	Ελάχιστη επίδραση	Βελτιώνεται	Ελάχιστη επίδραση

Ρύθμιση του P.I.D. ελεγκτή ονομάζουμε την **διαδικασία επιλογής των παραμέτρων των τριών όρων**.

Απ' ευθείας εύρεση των καταλλήλων τιμών είναι γενικά δύσκολη υπόθεση. Στη φάση του σχεδιασμού του συστήματος, συνήθως χρησιμοποιούνται τεχνικές προσομοίωσης της εγκατάστασης με τη βοήθεια του υπολογιστή. Αυτό σημαίνει ότι φτιάχνεται, αν είναι δυνατόν, κάποιο μαθηματικό μοντέλο της εγκατάστασης και στη συνέχεια με τη βοήθεια δοκιμών επιλέγονται εκείνες οι τιμές των σταθερών του P.I.D. ελεγκτή που δίδουν ικανοποιητική δυναμική συμπεριφορά στο σύστημα - μοντέλο.

Αν είναι δυνατή η εύρεση μαθηματικού μοντέλου για το σύστημα τότε μπορούν να εφαρμοσθούν και καθαρά **μαθηματικές μέθοδοι ανάλυσης και στη συνέχεια σχεδιασμού** του συστήματος. Για το σκοπό αυτό υπάρχει η πολύ κομψή **Θεωρία των Συστημάτων Ελέγχου**. Με τις ευρεθείσες κατά τον ένα ή τον άλλο τρόπο τιμές των παραμέτρων γίνεται στη συνέχεια η **αρχική ρύθμιση** του ελεγκτή στην πραγματική εγκατάσταση. Η **τελική ρύθμιση (fine tuning)** θα ακολουθήσει

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ

όταν η εγκατάσταση τεθεί σε λειτουργία, έτσι που να δίδει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Η μέθοδος Ziegler – Nickols για την ρύθμιση του PID ελεγκτή

Πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να υπάρξει μαθηματικό μοντέλο της εγκατάστασης, με την βοήθεια του οποίου να γίνει η ρύθμιση του PID. Επίσης, σε κάποιες εγκαταστάσεις που αντιδρούν αργά, δεν είναι και εντελώς απαραίτητο να υπάρχει ένα τέτοιο μοντέλο. Μπορεί κανείς τότε να ακολουθήσει κάποιες «ευριστικές» μεθόδους. Η πιο γνωστή από αυτές είναι η μέθοδος Ziegler – Nickols. Η διαδικασία ρύθμισης είναι η ακόλουθη :

Στον PID ελεγκτή, συνδεδεμένο με την πραγματική εγκατάσταση, θέτει κανείς $K_i = K_d = 0$ και αυξάνει σταδιακά τις τιμές του K_p , ξεκινώντας από πολύ μικρές, μέχρι να παρατηρήσει (μη φθίνουσες ουσιαστικά) ταλαντώσεις. Έστω ότι η τιμή του κέρδους αυτού είναι K_u και η περίοδος των ταλαντώσεων T_u . Τότε, μια καλή ρύθμιση των όρων του PID, είναι η παρακάτω :

Μέθοδος ελέγχου	K_p	K_i	K_d
P	0.50 K_u	-	-
PI	0.45 K_u	0.54 K_u/T_u	-
PID	0.60 K_u	1.20 K_u/T_u	3 $K_u T_u/40$