

Αμμές δε γ'εσσόμεθα πολλώ κάρονες
Πλούταρχος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι ένα σύστημα, που τα διάφορα μέρη του είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους έτσι ώστε να συμπεριφέρονται αυτόματα κατά ένα προκαθορισμένο επιθυμητό τρόπο.

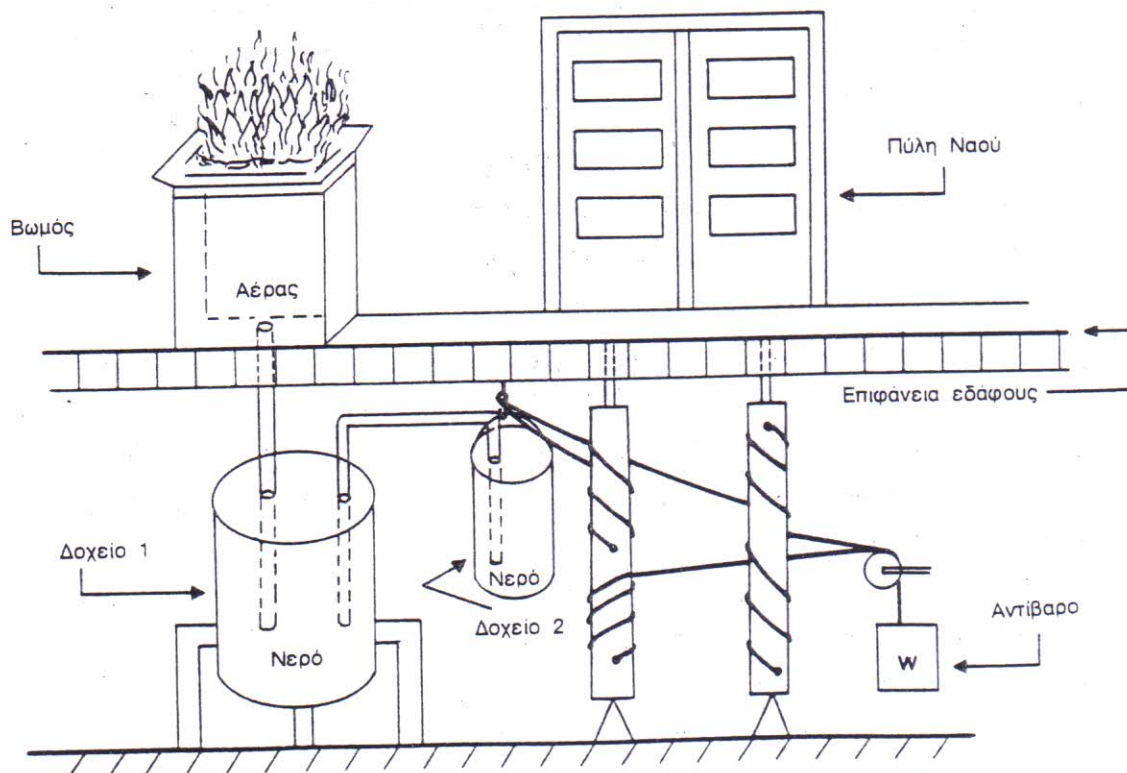
Μια προσεκτική εξέταση των διαφόρων μηχανημάτων που κατασκευάζει σήμερα ο άνθρωπος θα μας πείσει ότι σχεδόν πάντοτε τα μηχανήματα αυτά λειτουργούν, εν μέρει ή εξολοκλήρου, αυτόματα. Ως παραδείγματα αναφέρουμε το ψυγείο, το θερμοσίφωνο, το πλυντήριο ρούχων, τον υπολογιστή, τον πυρηνικό αντιδραστήρα, το ρομπότ, το διαστημόπλοιο, κ.ά. Οι διάφορες βιομηχανίες λειτουργούν επίσης, εν μέρει ή εξολοκλήρου, αυτόματα όπως π.χ. οι βιομηχανίες παραγωγής ζάχαρης, λιπάσματος, χάρτου, τσιμέντου, αυτοκινήτων, κ.λ.π. Από τα παραδείγματα αυτά βγαίνει το συμπέρασμα ότι ο αυτόματος έλεγχος είναι πολύ διαδεδομένος στον τεχνικό κόσμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας από τους κύριους σκοπούς της σύγχρονης τεχνολογίας είναι η κατά το δυνατόν μείωση της συμμετοχής του ανθρώπου στη λειτουργία των μηχανημάτων και των εργοστασίων. Η μείωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους της εργασίας, γεγονός που επιτρέπει σήμερα στον άνθρωπο να κατασκευάζει πολλά έργα και να παράγει πολλά αγαθά. Επί πλέον ο αυτόματος έλεγχος, μειώνοντας τη συμμετοχή του ανθρώπου στη διαδικασία της παραγωγής, έχει περιορίσει τις ώρες εργασίας, αυξάνοντας έτσι το διαθέσιμο χρόνο για ανάπαυση, διασκέδαση, κ.λ.π.

Ο αυτόματος έλεγχος είναι μία πρακτική που δε συναντάται μόνο στην τεχνολογία αλλά και στην οικονομία, στη διοίκηση, στις ανθρωπιστικές επιστήμες, στη βιολογία, κ.λ.π. Ειδικά δε για τη βιολογία μπορούμε να πούμε ότι, τόσο ο φυτικός όσο και ο ζωικός κόσμος, όχι μόνο κυριαρχούνται από τον αυτόματο έλεγχο, αλλά και ότι οφείλουν την ύπαρξή τους σ' αυτόν. Εξετάστε π.χ. τον άνθρωπο. Ο

άνθρωπος είναι ένα πολύπλοκο σύστημα όπου ένας μεγάλος αριθμός διαδικασιών ρυθμίζονται αυτόματα. Π.χ. η πείνα, η δίψα, η πέψη, η διατήρηση της θερμοκρασίας του σώματος, η κυκλοφορία του αίματος, η αναπνοή, η αναπαραγωγή κυττάρων, η επούλωση μιας πληγής, κ.λ.π. Η σύγχρονη επιστήμη των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου προσπαθεί, και έχει επιτύχει σε μερικές περιπτώσεις, να αντικαταστήσει μερικούς βιολογικούς μηχανισμούς. Π.χ. έχει επιτύχει να αντικαταστήσει το μέρος ενός κομμένου χεριού στο σημείο του καρπού, με ένα τεχνητό χέρι που τα δάκτυλά του μπορούν να κάνουν μερικές απλές κινήσεις αυτόματα, όπως δηλαδή συμβαίνει με το ανθρώπινο χέρι.

1.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Ο αυτόματος έλεγχος είχε επινοηθεί από την αρχαιότητα. Ένα γνωστό αρχαίο σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι ο ρυθμιστής του Ηρώνα του Αλεξανδρέως (σχήμα 1.2.1). Ο ρυθμιστής αυτός είχε σχεδιασθεί έτσι ώστε η πύλη ενός ναού άνοιγε αυτόματα όταν άναβε η φωτιά στο βωμό και έκλεινε όταν έσβυνε η φωτιά. Ο αυτοματισμός αυτός επιτυγχανόταν ως εξής: Η φωτιά ζεσταίνει τον αέρα κάτω από το βωμό, ο δε ζεστός αέρας έσπρωχνε το νερό από το δοχείο 1 στο δοχείο 2. Το δοχείο 1 παρέμενε ακίνητο, ενώ το δοχείο 2 ήταν κρεμασμένο με σχοινιά που ήταν

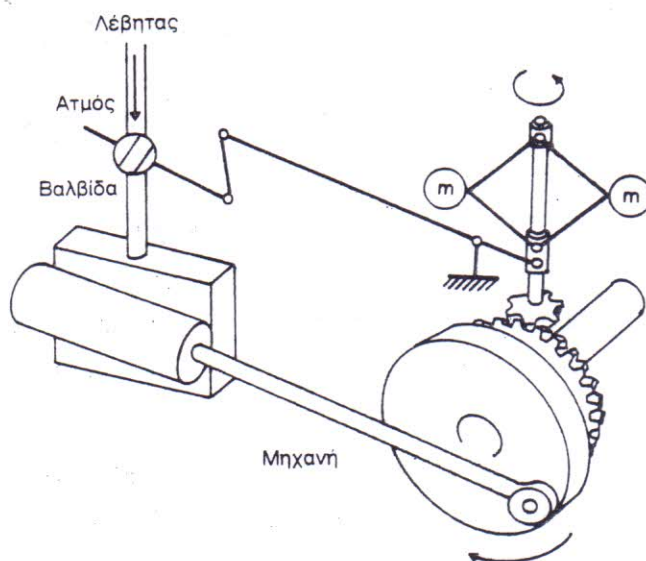


Σχήμα 1.2.1. Ο ρυθμιστής του Ηρώνα του Αλεξανδρέως.

τυλιγμένα κατάλληλα σε ένα μηχανισμό με ένα αντίβαρο W . Όταν το δοχείο 2 ήταν άδειο, ο μηχανισμός αυτός, κάτω από το βάρος του αντίβαρου, κρατούσε τη πύλη κλειστή. Όταν στο δοχείο 2 έμπαινε αρκετό νερό από το δοχείο 1, το δοχείο 2 κατέβαινε προς τα κάτω ενώ το αντίβαρο ανέβαινε προς τα πάνω, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός με τα σχοινιά να ανοίγει την πύλη. Όταν έσβηνε η φωτιά, το νερό από το δοχείο 2 επέστρεφε στο δοχείο 1 και το αντίβαρο κατέβαινε προς τα κάτω, ενώ το δοχείο 2 ανέβαινε προς τα πάνω, με αποτέλεσμα να κλείνει η πύλη. Ο ρυθμιστής αυτός χρησιμοποιείτο, κατά πάσα πιθανότητα, για να εντυπωσιάζει τους πιστούς, δεδομένου ότι το σύστημα αυτοματισμού ήταν κρυμμένο μέσα στο έδαφος.

Μέχρι τα μέσα του 18ου αιώνα, ο αυτόματος έλεγχος δεν έχει να επιδείξει αξιόλογα επιτεύγματα. Το έτος 1769, ο James Watt κατασκεύασε τον πρώτο φυγοκεντρικό ρυθμιστή ταχύτητας (σχήμα 1.2.2) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη βιομηχανία για τον αυτόματο έλεγχο ατμομηχανών. Συγκεκριμένα, ο ρυθμιστής αυτός χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της ταχύτητας της ατμομηχανής. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται ως εξής: Όταν η γωνιακή ταχύτητα της ατμομηχανής αυξάνεται, η φυγοκεντρική δύναμη σπρώχνει τις μάζες m προς τα πάνω, με αποτέλεσμα η βαλβίδα του ατμού να κλείνει. Καθώς η βαλβίδα του ατμού κλείνει, ο ατμός που μπαίνει στη μηχανή από τον λέβητα μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η γωνιακή ταχύτητα της ατμομηχανής. Και αντίστροφα, όταν η γωνιακή ταχύτητα της ατμομηχανής μειώνεται, οι μάζες κατεβαίνουν, η βαλβίδα του ατμού ανοίγει, αυξάνει ο ατμός που μπαίνει στη μηχανή, με αποτέλεσμα να αυξηθεί και η γωνιακή ταχύτητα.

Η περίοδος μέχρι το 1868 χαρακτηρίζεται ως μία περίοδος όπου ο αυτόματος έλεγχος αναπτύχθηκε αρκετά αλλά από διαίσθηση μόνο, χωρίς δηλαδή μία



Σχήμα 1.2.2. Ο φυγοκεντρικός ρυθμιστής ταχύτητας του Watt.

θεωρητική μαθηματική βάση. Το κενό αυτό συμπλήρωσαν ο Maxwell το 1868, και ο Vyshnegradskii το 1877 οι οποίοι έδωσαν τις πρώτες μαθηματικές βάσεις του αυτομάτου ελέγχου εφαρμόζοντας τα θεωρητικά (μαθηματικά) τους αποτελέσματα κυρίως στον φυγοκεντρικό ρυθμιστή του Watt. Σημαντικά επίσης ήταν και τα αποτελέσματα του Routh το 1877.

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου αναπτύχθηκαν ραγδαία τα τελευταία εξήντα χρόνια. **Σημαντικό σταθμό στην ιστορία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αποτελεί η δεκαετία του '30 κατά την οποία εμφανίσθηκαν αξιόλογα θεωρητικά και πρακτικά αποτελέσματα, όπως αυτά του Nyquist και του Black.** Τα επόμενα έτη, και κυρίως κατά τη διάρκεια του Β παγκοσμίου πολέμου και μέχρι το έτος 1957 περίπου, σημειώθηκε περαιτέρω αξιόλογη έρευνα που χαρακτηρίζεται σήμερα ως **κλασική θεωρία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.** Τα σημαντικότερα επιτεύγματα της περιόδου αυτής οφείλονται στον Nichols, στον Bode, στον Wiener και στον Evans. **Τα διάφορα επιτεύγματα από το 1957 μέχρι σήμερα έδωσαν μια νέα διάσταση και μια μεγάλη ώθηση στον αυτόματο έλεγχο και χαρακτηρίζονται ως σύγχρονη θεωρία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.** Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της τελευταίας αυτής περιόδου οφείλονται κατά κύριο λόγο στον Kalman. Σημαντική επίσης είναι η συμβολή πολλών άλλων ερευνητών, όπως π.χ. των Athans, Astrom, Bellman, Brockett, Jury, Kailath, Luenberger, Rosenbrock, Saridis, Wonham και άλλων.

Σε γενικές γραμμές, οι κύριες διαφορές μεταξύ της κλασικής και της σύγχρονης προσέγγισης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου είναι οι εξής: **Ο κλασικός έλεγχος αναφέρεται ως επί το πλείστον σε απλά συστήματα που έχουν μία είσοδο και μία έξοδο, οι δε μέθοδοι σχεδίασης είναι συνήθως γραφικές και δεν απαιτούν πολλά μαθηματικά** (όπως είναι π.χ. ο γεωμετρικός τόπος των ριζών, τα διαγράμματα Nyquist, Bode, Nichols, κ.λ.π.). Αντίθετα, **ο σύγχρονος έλεγχος αναφέρεται σε πολύπλοκα συστήματα με πολλές εισόδους και πολλές εξόδους, οι δε μέθοδοι σχεδίασης είναι ως επί το πλείστον αναλυτικές, γεγονός που απαιτεί πολλά μαθηματικά** (όπως είναι π.χ. ο χώρος κατάστασης, ο βέλτιστος και στοχαστικός έλεγχος, ο προσαρμοστικός έλεγχος, ο ψηφιακός έλεγχος, κ.λ.π.). Από πλευράς εφαρμογών, τόσο οι κλασικές, όσο και οι σύγχρονες μέθοδοι σχεδίασης, συναντώνται σε όλες σχεδόν τις μορφές της σημερινής τεχνολογίας. Είναι προφανές ότι επειδή ο κλασικός έλεγχος, σε σύγκριση με τον σύγχρονο έλεγχο, είναι σχετικά πιο εύκολος, τόσο από θεωρητικής πλευράς όσο και από πλευράς εφαρμογών, ο μηχανικός ελέγχου επιβάλλεται να ακολουθεί, σε γενικές γραμμές, την εξής τακτική: Στις περιπτώσεις που οι απαιτήσεις σχεδίασης δεν είναι μεγάλες, να εφαρμόζει τις κλασικές τεχνικές ελέγχου, ενώ στις περιπτώσεις που οι απαιτήσεις σχεδίασης είναι μεγάλες (όπως π.χ. σε ταχύτητα, σε ακρίβεια, κ.λ.π.), να εφαρμόζει τις σύγχρονες τεχνικές ελέγχου.

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου αποτελούν σήμερα μία ιδιαίτερα αξιόλογη περιοχή επιστημονικής έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης. Αυτό μπορεί να υποστηριχθεί από το γεγονός ότι ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών, σε παγκόσμια κλίμακα, ασχολείται με την προαγωγή της επιστήμης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου και την εφαρμογή της σε όσο το δυνατό περισσότερες πλευρές της ανθρώπινης δραστηριότητας. Παραδείγματα συστημάτων αυτομάτου ελέγχου που αντικατοπτρίζουν τη σύγχρονη εξέλιξη του αυτοματισμού δίνονται στο εδάφιο 1.4 του κεφαλαίου αυτού και σε πολλά άλλα κατάλληλα σημεία του συγγράμματος.

1.3 Η ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

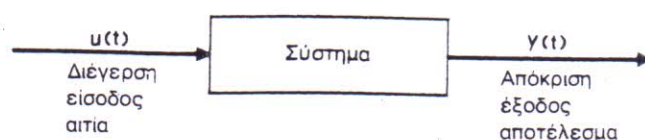
Σύστημα είναι ένα σύνολο στοιχείων τα οποία είναι κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους για να επιτελέσουν κάποιο έργο. Για να φέρει όμως ένα σύστημα σε πέρας ένα έργο θα πρέπει να του δοθεί η κατάλληλη διέγερση. Το σχήμα 1.3.1, μαζί με τη χρησιμοποιούμενη επιστημονική ορολογία και συμβολισμό, δίνει μία εποπτική εικόνα της παραπάνω έννοιας. Η απόκριση $y(t)$ καλείται επίσης και συμπεριφορά του συστήματος.

Αν συμβολίσουμε το σύστημα με τον τελεστή T , τότε η έξοδος του $y(t)$ συνδέεται με την είσοδό του $u(t)$ με τη σχέση

$$y(t) = Tu(t) \quad (1.3-1)$$

Συνήθως, κατά τη μελέτη των συστημάτων συμβαίνει να γνωρίζουμε (δηλαδή να μας δίνονται), τα δύο από τα τρία στοιχεία του τρίπτυχου {είσοδος, σύστημα, έξοδος} και να ζητείται να υπολογιστεί το τρίτο. Ετσι προκύπτουν τα εξής τρία πολύ γνωστά και βασικά προβλήματα:

1. **Το πρόβλημα της ανάλυσης.** Εδώ δίνεται η είσοδος $u(t)$ και το σύστημα T και ζητείται να υπολογιστεί η έξοδος $y(t)$.
2. **Το πρόβλημα της σύνθεσης.** Εδώ δίνεται η είσοδος $u(t)$ και η έξοδος $y(t)$ και ζητείται να σχεδιαστεί το σύστημα T .
3. **Το πρόβλημα της μέτρησης.** Εδώ δίνεται το σύστημα T και η έξοδος $y(t)$ και ζητείται να μετρηθεί η είσοδος $u(t)$.



Σχήμα 1.3.1. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος με είσοδο και έξοδο.

Το πρόβλημα της σχεδίασης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου δεν ανήκει σε κανένα από τα παραπάνω τρία προβλήματα, ορίζεται δε ως εξής:

Ορισμός 1.3.1. Η σχεδίαση ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου είναι το πρόβλημα στο οποίο δίνεται το σύστημα T και η επιθυμητή συμπεριφορά του $y(t)$ και ζητείται να βρεθεί μία είσοδος $u(t)$, τέτοια ώστε, αν αυτή εφαρμοσθεί στο σύστημα, η έξοδος του συστήματος $y(t)$ να είναι η προδιαγραφείσα επιθυμητή συμπεριφορά.

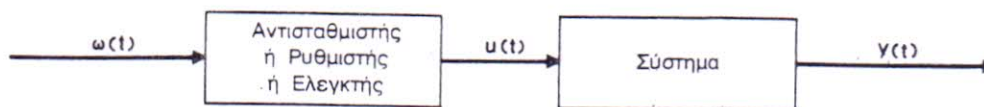
Από τον ορισμό 1.3.1 προκύπτει ότι το πρόβλημα της σχεδίασης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου είναι ένα πρόβλημα σύνθεσης ενός σήματος και συγκεκριμένα του σήματος εισόδου $u(t)$. Όπως όμως θα δείξουμε στη συνέχεια, στην πράξη, το πρόβλημα τελικά ανάγεται στη σχεδίαση ενός αντισταθμιστή (ορισμός 1.3.4).

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, στα **ανοικτά** και στα **κλειστά συστήματα**. Τα συστήματα αυτά ορίζονται ως εξής:

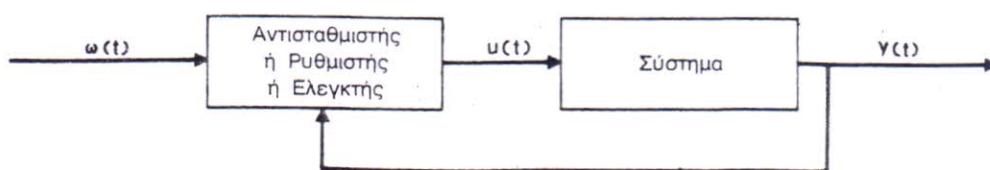
Ορισμός 1.3.2. Ανοικτό σύστημα (σχήμα 1.3.2) είναι ένα σύστημα όπου η είσοδος $u(t)$ δεν είναι συνάρτηση της εξόδου $y(t)$.

Ορισμός 1.3.3. Κλειστό σύστημα (σχήμα 1.3.3) είναι ένα σύστημα όπου η είσοδος $u(t)$ είναι συνάρτηση της εξόδου $y(t)$.

Σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου το σήμα εισόδου $u(t)$ δεν παράγεται απ'ευθείας από μία γεννήτρια, αλλά είναι η έξοδος ενός πρόσθετου συστήματος που ονομάζουμε **αντισταθμιστή ή ρυθμιστή ή ελεγκτή**. Στα ανοικτά συστήματα (σχήμα 1.3.2), ο αντισταθμιστής διεγείρεται από μία εξωτερική διέγερση $w(t)$, η οποία μπορεί να είναι το σήμα μιας γεννήτριας. Είναι δε κατασκευασμένος έτσι ώστε η έξοδος του $u(t)$ να είναι η κατάλληλη διέγερση στο υπό έλεγχο σύστημα που θα προκαλέσει την επιθυμητή έξοδο $y(t)$. Στα κλειστά συστήματα (σχήμα 1.3.3), ο αντισταθμιστής διεγείρεται και από την έξοδο $y(t)$ του υπό έλεγχο συστήματος, οπότε η $u(t)$ είναι συνάρτηση και της $y(t)$. Η λειτουργία των κλειστών και ανοικτών συστημάτων και ο ρόλος του ρυθμιστή γίνονται πιο σαφείς από τα



Σχήμα 1.3.2. Ανοικτό σύστημα.



Σχήμα 1.3.3. Κλειστό σύστημα.

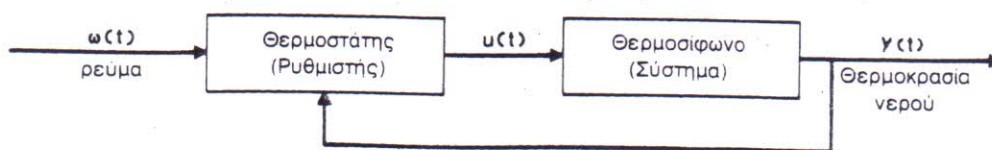
παραδείγματα που δίνουμε αμέσως παρακάτω.

Ένα εισαγωγικό παράδειγμα κλειστού συστήματος είναι το θερμοσίφωνο. Ως σύστημα εδώ εννοούμε το θερμοσίφωνο και ως έξοδο ορίζουμε τη θερμοκρασία του νερού που περιέχει το θερμοσίφωνο. Η θερμοκρασία του νερού προκαθορίζεται να κυμαίνεται από 65° έως 70° . Το νερό θερμαίνεται από έναν ηλεκτρικό αντιστάτη από τον οποίο διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ως ρυθμιστής συνήθως χρησιμοποιείται ένας θερμοστάτης που είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να ενεργεί ως διακόπτης ως εξής: Όταν η θερμοκρασία του νερού φθάσει τους 70° , ο διακόπτης ανοίγει οπότε διακόπτεται η τροφοδοσία του ηλεκτρικού ρεύματος στον αντιστάτη. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία του νερού αρχίζει να πέφτει και όταν φθάσει τους 65° ο διακόπτης κλείνει, οπότε επανέρχεται η τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος στον αντιστάτη και έτσι η θερμοκρασία του νερού αρχίζει πάλι να ανεβαίνει. Όταν η θερμοκρασία του νερού φθάσει τους 70° , ο διακόπτης ανοίγει ξανά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνέχεια, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του νερού να διατηρείται μέσα στα επιθυμητά όρια, δηλ. από 65° έως 70° .

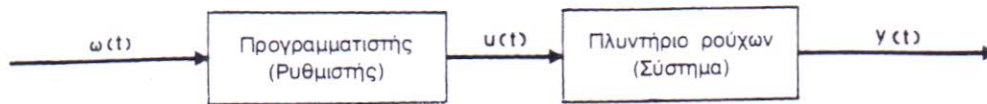
Μία προσεκτική εξέταση του παραδείγματος του θερμοσίφωνα δείχνει ότι ο ρυθμιστής, δηλαδή ο θερμοστάτης, δίνει την κατάλληλη είσοδο $u(t)$ στο θερμοσίφωνο (σχήμα 1.3.4). Η είσοδος αυτή $u(t)$ επηρεάζεται αποφασιστικά από την έξοδο $y(t)$ του θερμοσίφωνα, δηλαδή τη θερμοκρασία του νερού. Εδώ, επομένως, έχουμε ένα κλασικό παράδειγμα κλειστού συστήματος, όπου η είσοδος $u(t)$ είναι συνάρτηση της εξόδου $y(t)$.

Άλλα παραδείγματα κλειστών συστημάτων είναι το ψυγείο, ο πυρηνικός αντιδραστήρας, ο ρυθμιστής τάσης, ο ρυθμιστής θέσης, ο ρυθμιστής ταχύτητας, το τηλεκατευθυνόμενο αεροσκάφος, κ.λ.π. Όλα αυτά τα κλειστά συστήματα λειτουργούν με τις ίδιες ουσιαστικά αρχές λειτουργίας όπως εκείνες του θερμοσίφωνα που εκθέσαμε πιο πάνω.

Ένα εισαγωγικό παράδειγμα ανοικτού συστήματος είναι το πλυντήριο ρούχων (σχήμα 1.3.5). Εδώ ως ρυθμιστής χρησιμοποιείται ένας "προγραμματιστής" που θέτει το πλυντήριο σε μία σειρά από λειτουργίες, όπως αλλαγή νερού, στίψιμο ρούχων, κ.λ.π. Κατά τη διάρκεια των λειτουργιών αυτών, η έξοδος του συστήματος, δηλαδή το κατά πόσο τα ρούχα πλένονται ικανοποιητικά ή όχι, δε λαμβάνεται υπόψη. Το πλυντήριο, απλώς εκτελεί μία σειρά από εντολές, που περιέχονται στην $u(t)$ χωρίς



Σχήμα 1.3.4. Το θερμοσίφωνο ως κλειστό σύστημα ελέγχου.



Σχήμα 1.3.5. Το πλυντήριο ρούχων ως ανοικτό σύστημα ελέγχου.

να επηρεάζεται από την $y(t)$. Το πλυντήριο επομένως είναι ένα ανοικτό σύστημα. Αλλα παραδείγματα ανοικτών συστημάτων είναι η ηλεκτρική κουζίνα, το ξυπνητήρι, ο ανελκυστήρας, το σημερινό σύστημα σηματοδότησης των δρόμων των πόλεων μας, κ.λ.π.

Σημειώνεται ότι σε περιπτώσεις όπου το σύστημα δεν είναι εξολοκλήρου αυτόματο, ο άνθρωπος είναι ο ρυθμιστής ή μέρος του ρυθμιστή, όπως π.χ. στην οδήγηση, στο περπάτημα, στο μαγείρεμα, κ.λ.π. Στην οδήγηση, το αυτοκίνητο είναι το σύστημα και η έξοδος του συστήματος είναι η τροχιά ή η ταχύτητα του αυτοκινήτου. Ο οδηγός παρακολουθεί τη συμπεριφορά του αυτοκινήτου και ανάλογα ρυθμίζει τη διέγερση του συστήματος, π.χ. πατάει το γκάζι ή στρίβει το τιμόνι. Η οδήγηση, δηλαδή, έχει τη δομή ενός κλειστού συστήματος, όπου ο οδηγός είναι ο ρυθμιστής. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και όταν περπατάμε. Όταν μαγειρεύουμε, παρακολουθούμε το φαγητό και ανάλογα ρυθμίζουμε την ένταση της φωτιάς. Ο μάγειρας, στην προκειμένη περίπτωση, είναι ο ρυθμιστής του κλειστού συστήματος.

Από τα παραπάνω παραδείγματα είναι φανερό ότι τα κλειστά συστήματα διαφέρουν ουσιαστικά στην αρχή λειτουργίας τους από τα ανοικτά συστήματα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην τροφοδοσία πληροφοριών από την έξοδο στην είσοδο του συστήματος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **ανατροφοδότηση ή ανασύζευξη** και διαδραματίζει βασικότατο ρόλο στον αυτόματο έλεγχο.

Γενικά, τα κλειστά συστήματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις αυτοματισμού (ακρίβεια, ταχύτητα, κ.λ.π.) είναι μεγάλες, ενώ τα ανοικτά συστήματα χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον, σε απλές περιπτώσεις αυτοματισμού. Γιαυτό τα κλειστά συστήματα είναι, κατά κανόνα, πιο δύσκολα στη σχεδίαση και κατασκευή τους από τα ανοικτά. Αυστηρότερες συγκρίσεις μεταξύ των ανοικτών και κλειστών συστημάτων γίνονται σε διάφορα κατάλληλα σημεία της ύλης του συγγράμματος αυτού.

Η πολυπλοκότητα των αντισταθμιστών ανοικτών ή κλειστών συστημάτων αυξάνει με τις απαιτήσεις του αυτοματισμού. Ετσι έχουμε απλούς αντισταθμιστές, όπως ο θερμοστάτης και ο προγραμματιστής, αλλά έχουμε και συνθετότερους αντισταθμιστές όπως ένας υπολογιστής, που ελέγχει ένα αεροπλάνο ή ένα συγκρότημα υπολογιστών που ελέγχει από απόσταση ένα διαστημόπλοιο. Επίσης, ανάλογα με τη φύση του αυτοματισμού, ένας αντισταθμιστής μπορεί να είναι ηλεκτρονικός, ηλεκτρολογικός,

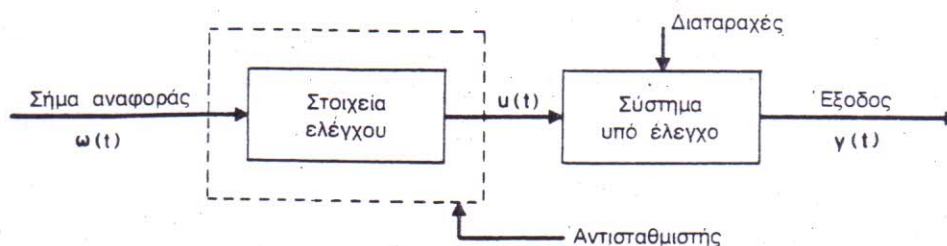
μηχανολογικός, πεπιεσμένου αέρα, υδραυλικός, κ.λ.π. ή συνδυασμός δύο ή περισσότερων από αυτούς.

Με βάση όλα τα πιο πάνω, μπορούμε τώρα να δώσουμε τον εξής ορισμό του προβλήματος της σχεδίασης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

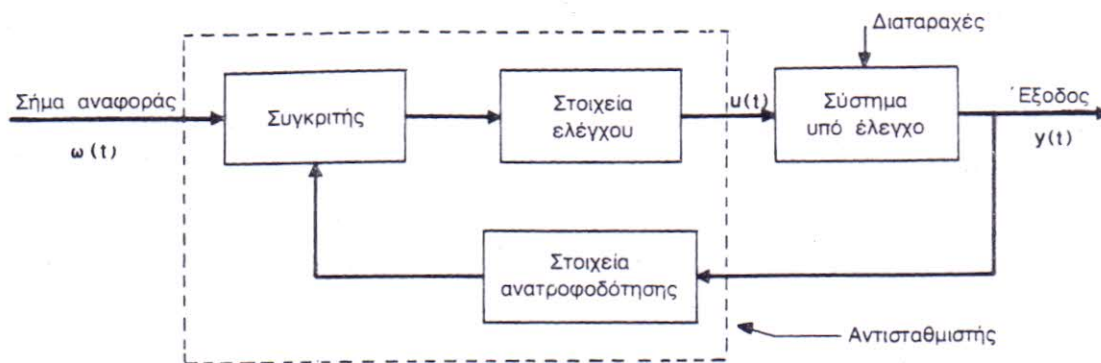
Ορισμός 1.3.4. Η σχεδίαση ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου είναι ένα πρόβλημα όπου μας δίνεται το υπό έλεγχο σύστημα T και η επιθυμητή συμπεριφορά του $y(t)$ και ζητείται να βρεθεί ένας αντισταθμιστής που η έξοδος του $u(t)$ να είναι τέτοια ώστε, αν αυτή εφαρμοσθεί στο υπό έλεγχο σύστημα, η έξοδος $y(t)$ του συστήματος να είναι η προδιαγραφείσα επιθυμητή συμπεριφορά.

Είναι φανερό ότι οι ορισμοί 1.3.1 και 1.3.4 είναι ισοδύναμοι, μόνο που ο ορισμός 1.3.4 ανταποκρίνεται περισσότερο στην πράξη. Σχετικά με τη σχεδίαση των αντισταθμιστών, αναφέρεται ότι έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην πράξη. Καθώς όμως η τεχνολογία αναπτύσσεται, νέα προβλήματα σχεδίασης εμφανίζονται τα οποία δημιουργούν νέα θέματα έρευνας και ανάπτυξης.

Κλείνοντας το παρόν εδάφιο, θα δώσουμε μια πρακτικότερη αλλά και πληρέστερη σχηματική παράσταση των ανοικτών και κλειστών συστημάτων. Στην πράξη, τα μεν ανοικτά συστήματα έχουν τη δομή του σχήματος 1.3.6, τα δε κλειστά συστήματα έχουν τη δομή του σχήματος 1.3.7. **Με τον όρο διαταραχές αναφερόμαστε στις εκάστοτε μεταβολές του περιβάλλοντος ή του υπό έλεγχο συστήματος ή άλλες αιτίες, που έχουν ως αποτέλεσμα η έξοδος του συστήματος να αποκλίνει από την επιθυμητή συμπεριφορά.** Έτσι είναι φανερό ότι όταν η έξοδος ενός ανοικτού συστήματος αποκλίνει από την επιθυμητή της μορφή (εξ αιτίας των διαταραχών ή άλλων αιτιών), το σύστημα δεν κάνει τίποτα για να την επαναφέρει στην επιθυμητή της μορφή. Αντίθετα, στο κλειστό σύστημα, όταν η έξοδος του αποκλίνει από την επιθυμητή της μορφή (εξ αιτίας των διαταραχών ή άλλων αιτιών) τότε, **χάρη στην ανατροφοδότηση**, το σύστημα και συγκεκριμένα ο αντισταθμιστής, ενεργεί έτσι ώστε η έξοδος του να επανέλθει στην επιθυμητή της μορφή.



Σχήμα 1.3.6. Σχηματικό διάγραμμα ανοικτού συστήματος.



Σχήμα 1.3.7. Σχηματικό διάγραμμα κλειστού συστήματος.

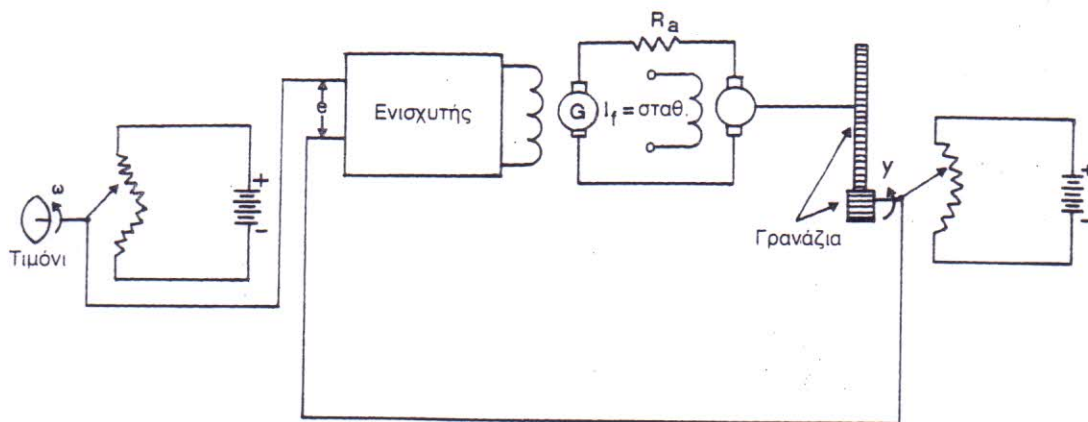
1.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Εδώ θα περιγράψουμε μερικά παραδείγματα ανοικτών και κλειστών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου συνθετότερα από εκείνα που αναφέραμε στο εδάφιο 1.3, προκειμένου να δώσουμε μία εικόνα της ευρείας χρησιμοποίησης του αυτοματισμού στην τεχνολογία σήμερα. Επιπλέον, με μερικά από τα παραδείγματα αυτά, θα έχουμε την ευκαιρία να δείξουμε ότι οι αρχές του αυτομάτου ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση και επίλυση προβλημάτων σε άλλα πεδία της επιστήμης, όπως είναι η οικονομία, η πολιτική, η κοινωνιολογία, η ιατρική και άλλα. Μερικά από τα παρακάτω παραδείγματα μελετώνται περαιτέρω στο κεφάλαιο 4, όπως επίσης και σε άλλα σημεία του συγγράμματος αυτού.

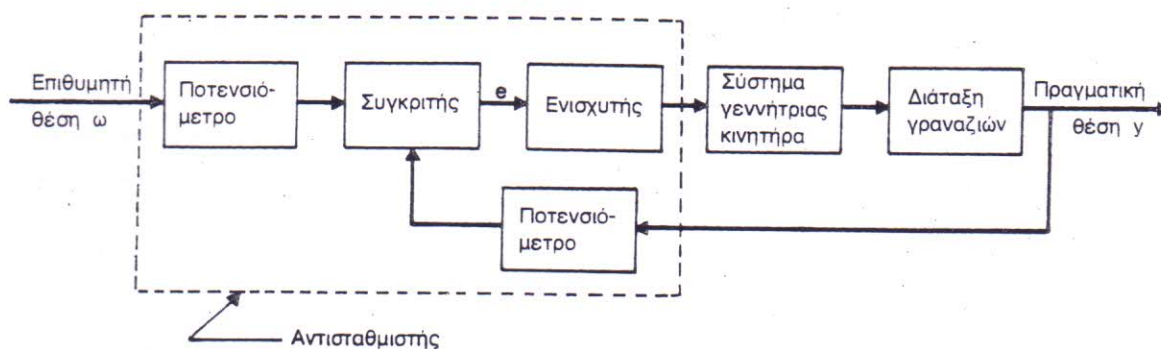
Από τα παραδείγματα που ακολουθούν θα γίνει φανερό ότι πολλά συστήματα αυτομάτου ελέγχου είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε κάποια μεταβλητή του συστήματος (όπως ηλεκτρική τάση, θέση ή ταχύτητα μιας μάζας, στάθμη ή ροή ενός υγρού, θερμοκρασία ενός θαλάμου, κ.λ.π.) να ελέγχεται αυτόματα. Σημειώνεται ότι ειδικά για την κατηγορία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, όπου γίνεται έλεγχος μηχανικής κίνησης, όπως π.χ. της θέσης ή της ταχύτητας μιας μάζας, έχει επικρατήσει ο όρος **σερβομηχανισμός**.

Παράδειγμα 1. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου θέσης

Το σύστημα αυτό (σχήμα 1.4.1) είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η γωνιακή θέση y του μικρού γριναζιού, που είναι και η έξοδος του συστήματος, να είναι ίση με την εκάστοτε γωνιακή θέση ω του τιμονιού, που είναι και η διέγερση του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Οι γωνιακές θέσεις ω και y μετατρέπονται σε τάσεις χρησιμοποιώντας μια ειδική διάταξη ποτενσιομέτρων (βλέπε §4.2.2). Η διαφορά e



(a) Εποπτική εικόνα του συστήματος ελέγχου θέσης.



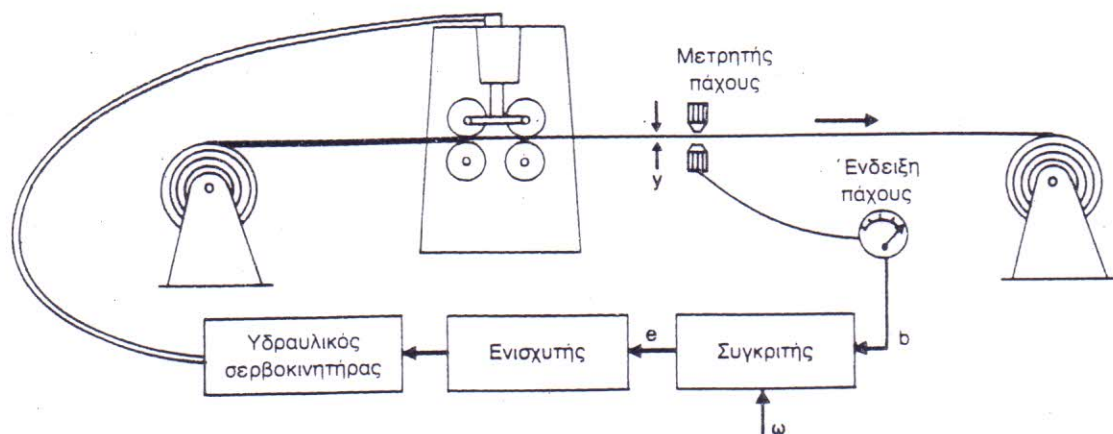
(b) Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου θέσης.

Σχήμα 1.4.1. Σύστημα ελέγχου θέσης ή σερβομηχανισμού θέσης.

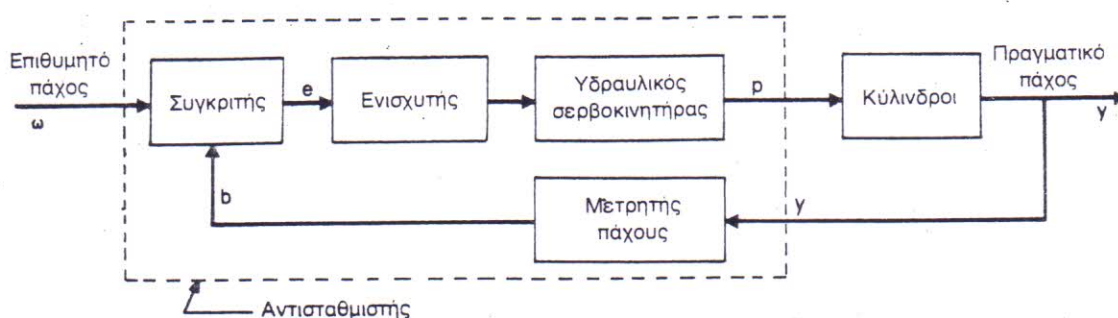
των δυο αυτών τάσεων, που ονομάζεται και **σφάλμα**, οδηγείται σε ενισχυτή, η έξοδος του οποίου διεγείρει το σύστημα γεννήτριας-κινητήρα (βλέπε § 4.2.3) με αποτέλεσμα ο κινητήρας να στρέψει το σύστημα των γραναζιών προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση, ανάλογα με το πρόσημο του σφάλματος e , με στόχο τη μείωση (και τελικά το μηδενισμό) του σφάλματος $e = \omega - y$. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα η έξοδος y να ακολουθεί την είσοδο ω , δηλαδή να είναι $y = \omega$. Στο σχήμα 1.4.1b δίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα του συστήματος, όπου φαίνεται ο ρόλος της ανατροφοδότησης και του αντισταθμιστή. Ένα παρόμοιο σύστημα περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην § 4.10.1.

Παράδειγμα 2. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου πάχους λαμαρίνας

Το σύστημα αυτό (σχήμα 1.4.2) είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε το πάχος y της λαμαρίνας, που είναι και η έξοδος του συστήματος, να παραμένει σταθερό. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Το πάχος y καθορίζεται από την πίεση p που ασκούν οι κύλινδροι πάνω στη λαμαρίνα. Η πίεση αυτή ελέγχεται από την ένδειξη b του οργάνου που μετρά το πάχος y της λαμαρίνας. Έτσι, όταν το σφάλμα $e = \omega - b \neq 0$, όπου το σήμα ω αντιπροσωπεύει το επιθυμητό πάχος, τότε ο υδραυλικός σερβοκινητήρας αυξάνει ή μειώνει την πίεση στους κύλινδρους με αποτέλεσμα το πάχος y να μικραίνει ή να μεγαλώνει, αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα το



(a) Εποπτική εικόνα του συστήματος παραγωγής λαμαρίνας.



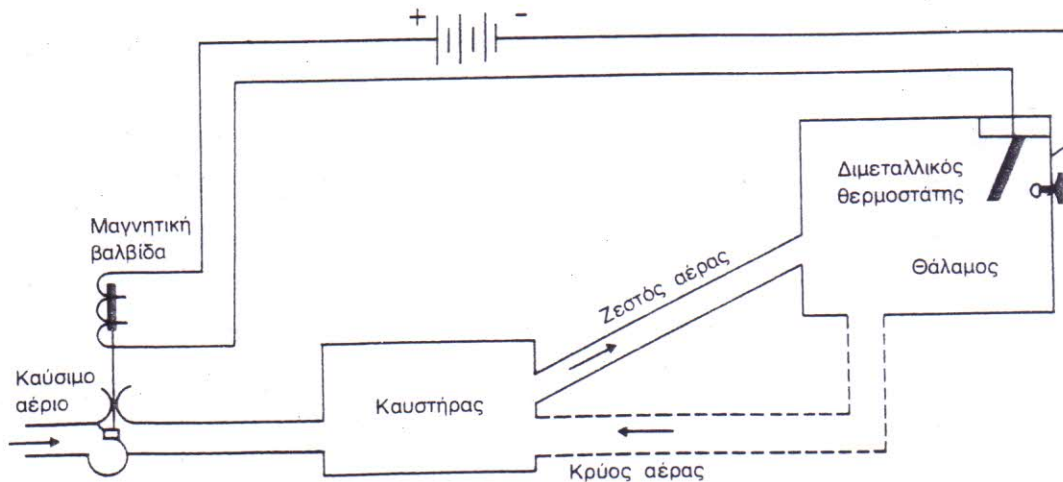
(b) Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος παραγωγής λαμαρίνας.

Σχήμα 1.4.2. Σύστημα ελέγχου πάχους λαμαρίνας.

πάχος y της λαμαρίνας να διατηρείται σταθερό και ίσο προς το επιθυμητό πάχος ω . Στο σχήμα 1.4.2b δίνεται το σχηματικό διάγραμμα του κλειστού συστήματος.

Παράδειγμα 3. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου θερμοκρασίας θαλάμου

Το σύστημα αυτό (σχήμα 1.4.3) είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η θερμοκρασία y του θαλάμου, που είναι και η έξοδος του συστήματος, να παραμένει σταθερή. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Η θερμοκρασία y του θαλάμου παρακολουθείται από το

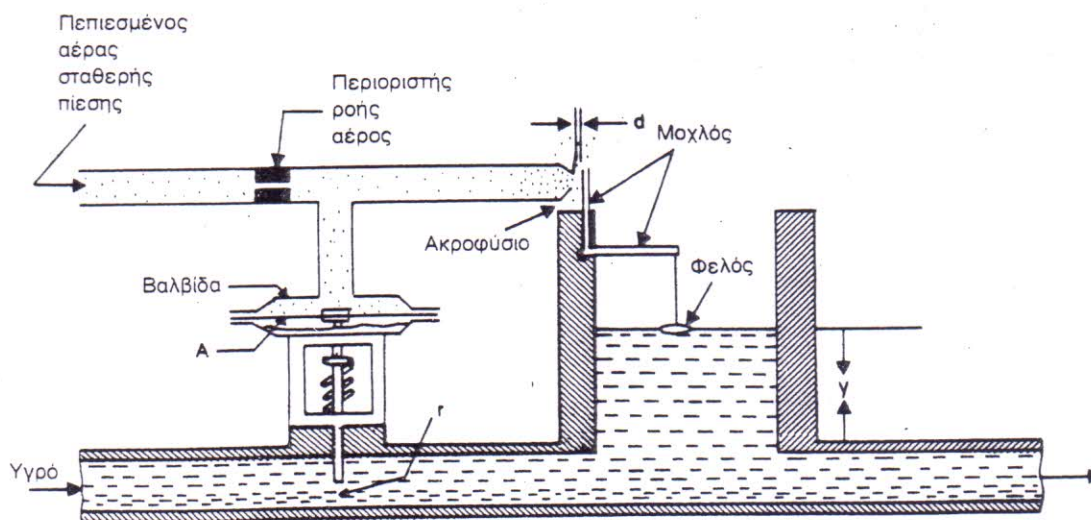


Σχήμα 1.4.3. Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας θαλάμου.

διμεταλλικό θερμοστάτη, που είναι ρυθμισμένος έτσι ώστε, όταν η θερμοκρασία γ είναι μεγαλύτερη της επιθυμητής, το κύκλωμα της μαγνητικής βαλβίδας απενεργοποιείται, η βαλβίδα κλείνει και σταματά η τροφοδοσία του αερίου καυσίμου στον καυστήρα. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία γ είναι μικρότερη της επιθυμητής, το κύκλωμα της μαγνητικής βαλβίδας ενεργοποιείται, η βαλβίδα ανοίγει και επανέρχεται η τροφοδοσία του αερίου καυσίμου στον καυστήρα. Ένα παρόμοιο σύστημα περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην § 4.8.2.

Παράδειγμα 4. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου στάθμης υγρού

Το σύστημα αυτό (σχήμα 1.4.4) χρησιμοποιείται σε χημικές και άλλες βιομηχανίες και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε το ύψος γ της επιφάνειας του υγρού να παραμένει σταθερό. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Ο φελός που επιπλέει στην επιφάνεια του υγρού είναι συνδεδεμένος με την οριζόντια επιφάνεια του μοχλού έτσι ώστε, καθώς το ύψος γ μεγαλώνει ή μικραίνει, αντίστοιχα μικραίνει ή μεγαλώνει η απόσταση d μεταξύ του ακροφυσίου και της κάθετης επιφάνειας του μοχλού. Όταν η απόσταση d μικραίνει ή μεγαλώνει, αντίστοιχα μεγαλώνει ή μικραίνει η πίεση του πεπιεσμένου αέρα στην επιφάνεια A της βαλβίδας με αποτέλεσμα να μικραίνει ή να μεγαλώνει η απόσταση r του πιστονιού της βαλβίδας από τη βάση του δοχείου. Το σύστημα του πεπιεσμένου αέρα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα με είσοδο το d και έξοδο την πίεση του πεπιεσμένου αέρα στην επιφάνεια A της βαλβίδας. Το σύστημα αυτό είναι ένας ενισχυτής πεπιεσμένου αέρα διότι ενώ οι μεταβολές στο d δεν απαιτούν μεγάλες πιέσεις, ενώ αντίθετα οι αντίστοιχες πιέσεις στην επιφάνεια A είναι πολύ μεγάλες. Επειδή, τέλος, μείωση ή αύξηση της απόστασης r αντιστοιχεί σε μείωση ή αύξηση του ύψους γ , η στάθμη του υγρού θα παραμένει σταθερή. Ένα παρόμοιο σύστημα περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην § 4.9.2.



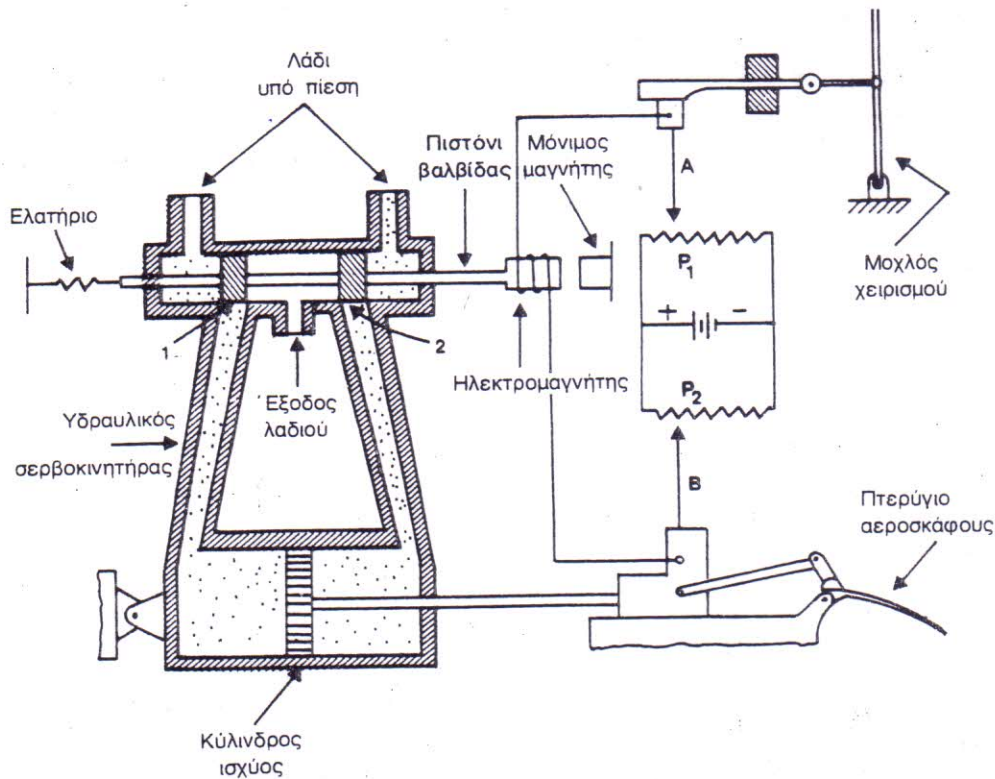
Σχήμα 1.4.4. Σύστημα ελέγχου στάθμης υγρού.

Παράδειγμα 5. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου θέσης πτερυγίων αεροσκάφους

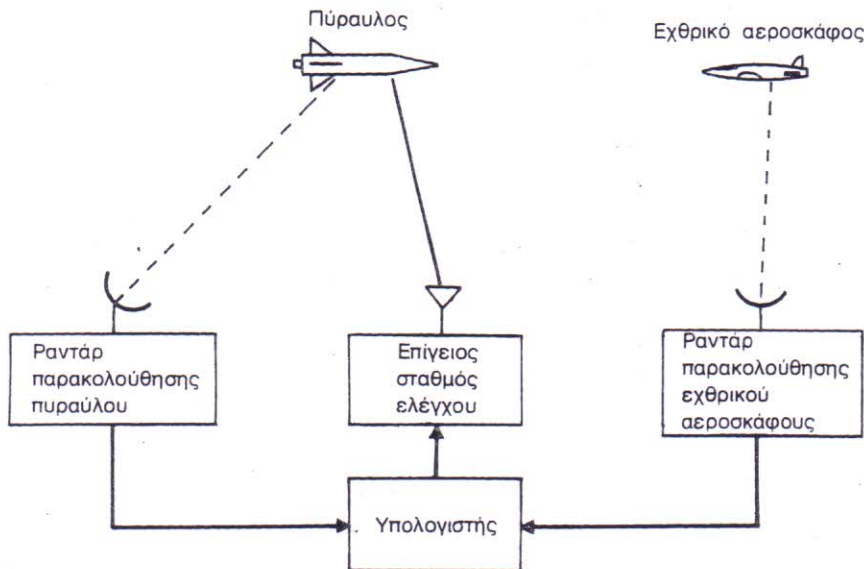
Το σύστημα αυτό (σχήμα 1.4.5) είναι ένα ανοικτό σύστημα αυτομάτου ελέγχου και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η θέση (κλίση) των πτερυγίων ενός αεροσκάφους να ελέγχεται από το μοχλό χειρισμού. Το σύστημα αυτό λειτουργεί ως εξής: Όταν ο μοχλός χειρισμού τοποθετηθεί σε μία νέα θέση, τότε και η θέση A του ποτενσιομέτρου P_1 μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και B. Η τάση αυτή ενεργοποιεί τον ηλεκτρομαγνήτη με αποτέλεσμα το πιστόνι της βαλβίδας του υδραυλικού σερβοκινητήρα (βλέπε § 4.6.2) να μετατοπισθεί. Η μετατόπιση της βαλβίδας θα επιτρέψει στο λάδι υπό πίεση να μπει μέσα στον κύλινδρο ισχύος και να σπρώξει το πιστόνι του δεξιά ή αριστερά με αποτέλεσμα και τα πτερύγια του αεροσκάφους να κινηθούν προς τα κάτω ή προς τα πάνω. Το σύστημα αυτό μπορεί να γίνει κλειστό, αρκεί η θέση των πτερυγίων να μετράται και να συγκρίνεται με την επιθυμητή θέση.

Παράδειγμα 6. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου κατεύθυνσης πυραύλου

Το σύστημα αυτό (σχήμα 1.4.6) κατευθύνει την τροχιά ενός πυραύλου έτσι ώστε να συγκρουσθεί με εχθρικό αεροσκάφος και να το καταρρίψει. Η λειτουργία του συστήματος αυτού έχει ως εξής: Τόσο ο κατευθυνόμενος πύραυλος, όσο και ο στόχος του, δηλαδή το εχθρικό αεροσκάφος, παρακολουθούνται από ένα σύστημα ραντάρ. Οι πληροφορίες από τα ραντάρ τροφοδοτούνται στον υπολογιστή που προσδιορίζει μία



Σχήμα 1.4.5. Σύστημα ελέγχου πτερυγίου αεροσκάφους.

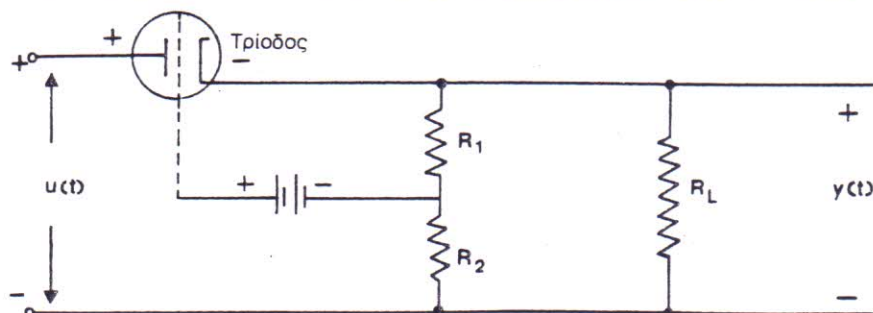


Σχήμα 1.4.6. Σύστημα ελέγχου κατεύθυνσης πυραύλου.

πιθανή τροχιά του εχθρικού αεροσκάφους. Η τροχιά αυτή μπορεί να αλλάξει προσαρμοζόμενη στα εκάστοτε νέα δεδομένα της πορείας του αεροσκάφους. Ο υπολογιστής διαρκώς συγκρίνει τις τροχιές του πυραύλου και του αεροσκάφους και ανάλογα διορθώνει την πορεία του πυραύλου έτσι ώστε να συγκρουσθεί με το αεροσκάφος. Η διόρθωση της πορείας του πυραύλου γίνεται από απόσταση με ραδιοκύματα από έναν επίγειο σταθμό ελέγχου.

Παράδειγμα 7. Ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης

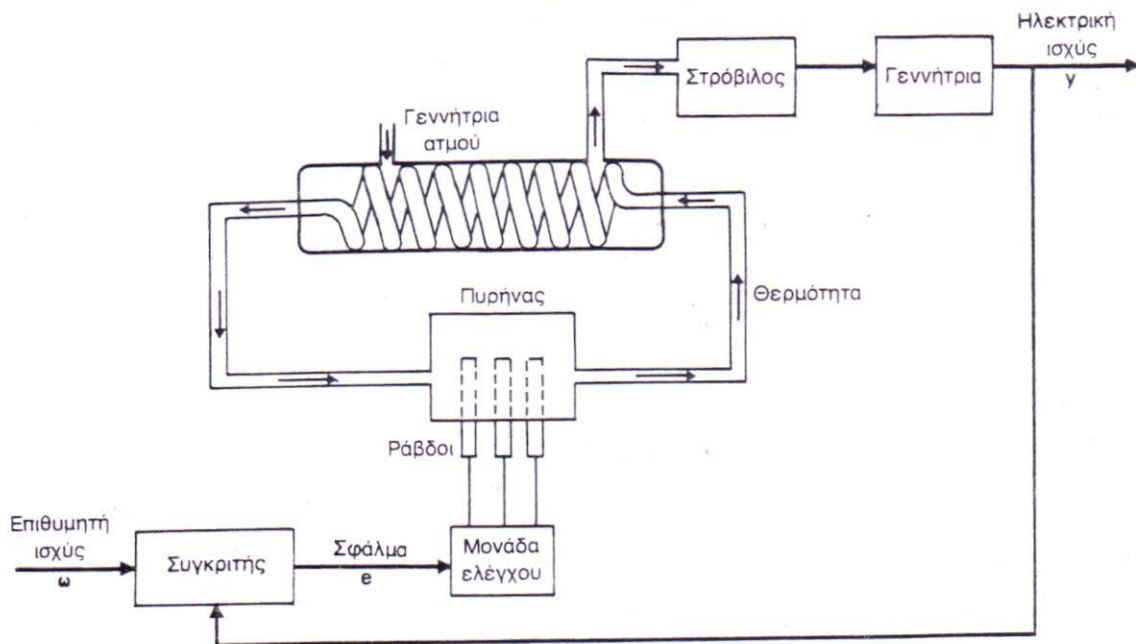
Το σύστημα αυτό (σχήμα 1.4.7) είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η τάση εξόδου $y(t)$ να παραμένει σταθερή, παρά τις μεταβολές στην τάση διέγερσης $u(t)$ και στην αντίσταση φορτίου R_L . Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Εστω π.χ. ότι η $u(t)$ ή η R_L μικραίνει. Τότε και η $y(t)$ θα μικραίνει με αποτέλεσμα και η τάση στα άκρα της R_1 να μικραίνει. Το γεγονός αυτό κάνει την εσχάρα πιο θετική οπότε αυξάνει το ρεύμα φορτίου i_L και έτσι η $y(t)$ επανέρχεται στην αρχική της τιμή. Ένα άλλο σύστημα ρύθμισης τάσης περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην § 4.3.3.



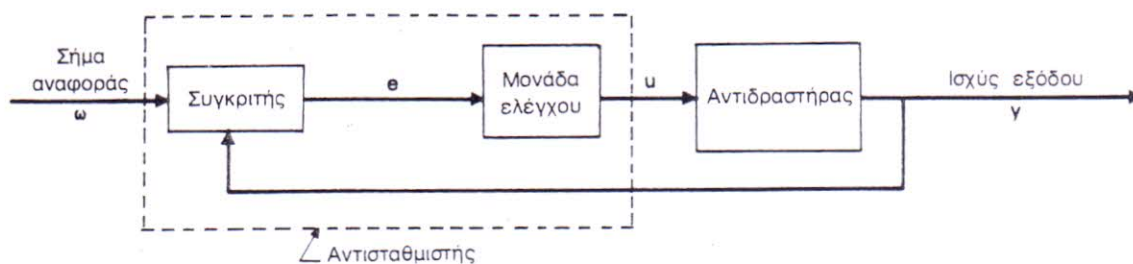
Σχήμα 1.4.7. Ρυθμιστής τάσης.

Παράδειγμα 8. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου πυρηνικού αντιδραστήρα

Ο αυτοματισμός ενός αντιδραστήρα (σχήμα 1.4.8) αποσκοπεί στη διατήρηση της ισχύος εξόδου του σε προκαθορισμένα όρια. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής: Η πυρηνική αντίδραση ελευθερώνει ενέργεια υπό μορφή θερμότητας. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός θέτει σε περιστροφική κίνηση ένα στρόβιλο και ο στρόβιλος μία γεννήτρια, η οποία παράγει την ηλεκτρική ισχύ y . Η είσοδος ω είναι ένα σήμα αναφοράς που "αντιπροσωπεύει" την επιθυμητή έξοδο. Τα δύο σήματα ω και y συγκρίνονται και η διαφορά τους $e = \omega - y$, τροφοδοτείται στη μονάδα ελέγχου. Η μονάδα αυτή αποτελείται από ειδικές ράβδους, που όταν πλησιάζουν το πυρηνικό καύσιμο η ισχύς εξόδου y μεγαλώνει και όταν απομακρύνονται από το πυρηνικό καύσιμο η ισχύς εξόδου y μικραίνει. Ετσι, όταν $y > \omega$, οπότε το σφάλμα e είναι αρνητικό, η μονάδα ελέγχου απομακρύνει τις ράβδους από το πυρηνικό καύσιμο με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου y να μικραίνει. Όταν $y < \omega$, οπότε το σφάλμα e είναι θετικό, η μονάδα ελέγχου πλησιάζει τις ράβδους στο πυρηνικό καύσιμο με αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου y να αυξάνει. Με αυτόν τον τρόπο,



(a) Εποπτική εικόνα πυρηνικού αντιδραστήρα.



(b) Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος του πυρηνικού αντιδραστήρα.

Σχήμα 1.4.8. Σύστημα ελέγχου πυρηνικού αντιδραστήρα.

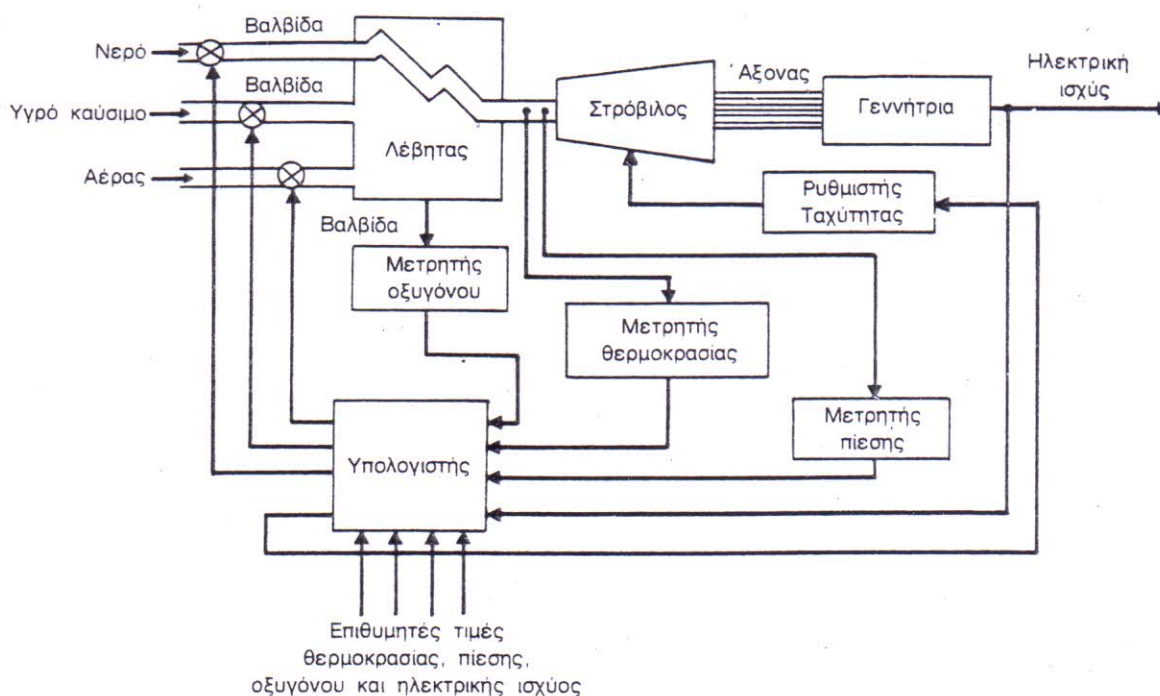
η έξοδος y διατηρείται ίση με την είσοδο w .

Παράδειγμα 9. Σύστημα αυτομάτου ελέγχου ατμοστροβιλογεννήτριας

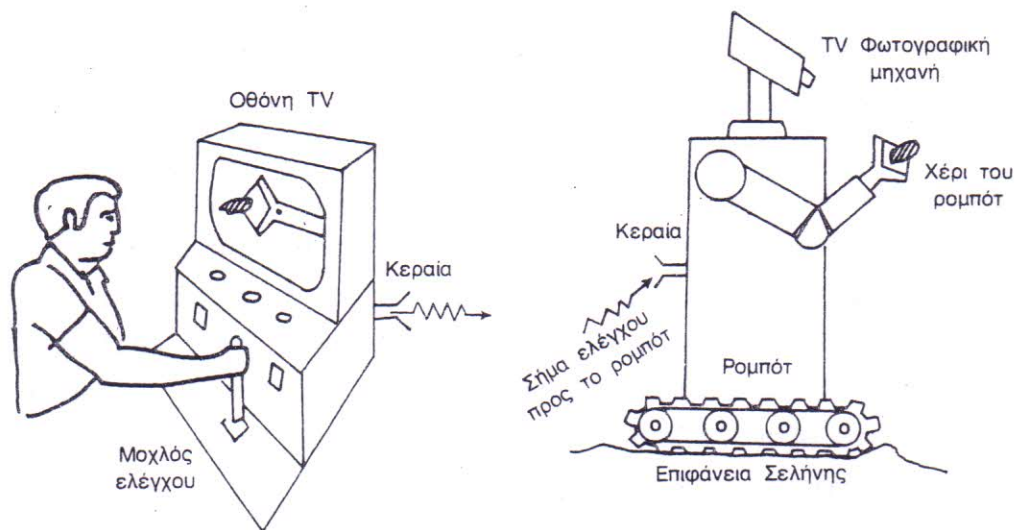
Η ατμοστροβιλογεννήτρια (σχήμα 1.4.9) λειτουργεί ως εξής: Ο ατμός που παράγεται από το λέβητα βάζει σε περιστροφική κίνηση τον άξονα του στροβίλου. Ο άξονας του στροβίλου είναι ουσιαστικά και ο ρότορας της γεννήτριας. Καθώς ο άξονας του στροβίλου στρέφεται, η γεννήτρια παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η ατμοστροβιλογεννήτρια είναι ένα σύστημα με πολλές εισόδους (νερό, υγρό καύσιμο και αέρας) και μία έξοδο (ηλεκτρική ισχύς). Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου ελέγχεται αυτόματα ως εξής: Η ισχύς εξόδου μαζί με ενδιάμεσες μεταβλητές ή καταστάσεις του συστήματος, όπως το οξυγόνο, η θερμοκρασία και η πίεση, ανατροφοδοτούνται στον υπολογιστή. Ο υπολογιστής ρυθμίζει αυτόματα την ποσότητα του νερού, του υγρού καυσίμου και του αέρα που μπαίνουν στο λέβητα και τη γωνιακή ταχύτητα του στροβίλου, ανάλογα με τις επιθυμητές και πραγματικές (μετρούμενες) τιμές της θερμοκρασίας, πίεσης, οξυγόνου και ηλεκτρικής ισχύος, έτσι ώστε η τιμή της ηλεκτρικής ισχύος να είναι η επιθυμητή.

Παράδειγμα 10. Έλεγχος ρομπότ

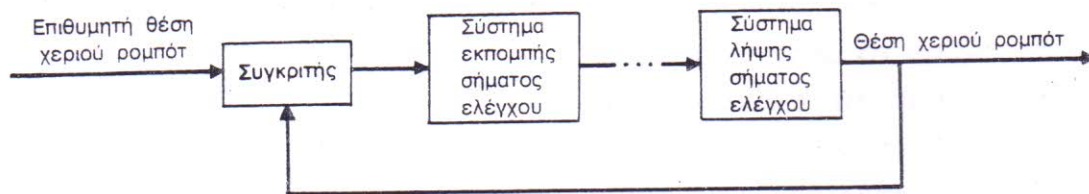
Εδώ θα εξετάσουμε ένα σύστημα που μπορεί να ελέγχει αυτόματα τις κινήσεις ενός ρομπότ από απόσταση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4.10a, ο άνθρωπος στον επίγειο σταθμό μπορεί και παρακολουθεί το ρομπότ που βρίσκεται στη Σελήνη από την οθόνη μιας συσκευής τηλεόρασης. Εστω ότι η έξοδος του συστήματος είναι η θέση του χεριού του ρομπότ και η είσοδος είναι η θέση του μοχλού που κρατά στο



Σχήμα 1.4.9. Σύστημα ελέγχου ατμοστροβιλογεννήτριας.



(a) Εποπτική εικόνα ελέγχου ρομπότ από απόσταση.



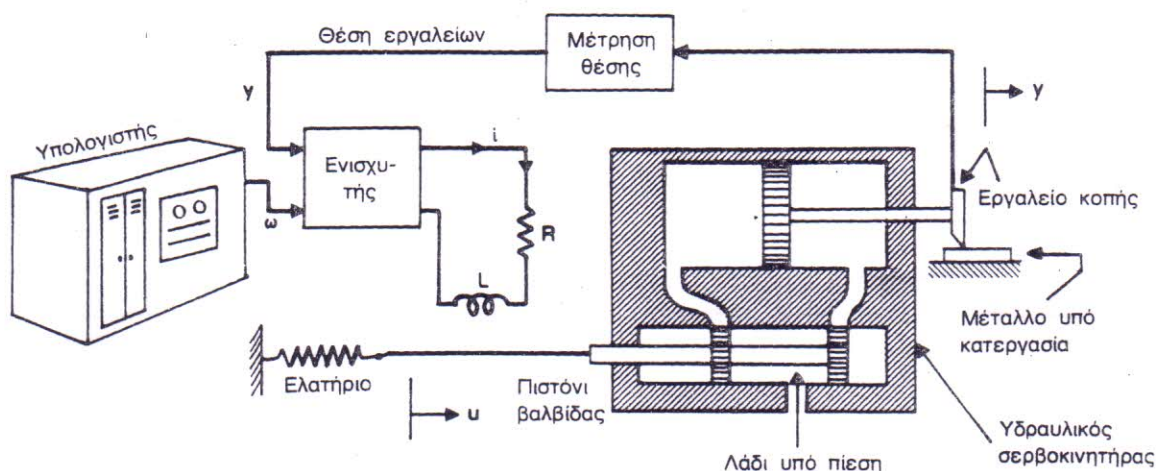
(b) Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου ρομπότ από απόσταση.

Σχήμα 1.4.10. Σύστημα ελέγχου ρομπότ από απόσταση.

χέρι του ο άνθρωπος. Τότε, ανατροφοδοτώντας την έξοδο (θέση χεριού ρομπότ) στην είσοδο, ο άνθρωπος κάνει τη σύγκριση κοιτάζοντας τη θέση του χεριού του ρομπότ στην οθόνη και ανάλογα κινεί το μοχλό ελέγχου. Στο σχήμα 1.4.10b δίνεται μία σχηματική άποψη του συστήματος του σχήματος 1.4.10a. Στην προκειμένη περίπτωση, ο άνθρωπος είναι μέρος του ρυθμιστή.

Παράδειγμα 11. Αριθμητικός έλεγχος

Ο αυτόματος έλεγχος μηχανών κοπής μετάλλων (σχήμα 1.4.11) γίνεται πολλές φορές από ένα υπολογιστή, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4.11. Συγκεκριμένα, η κίνηση του εργαλείου κοπής ρυθμίζεται από ένα πρόγραμμα υπολογιστή, για αυτό και ο έλεγχος αυτός ονομάζεται αριθμητικός. Όταν υπάρχει διαφορά μεταξύ της επιθυμητής θέσης ω και της πραγματικής θέσης γ του εργαλείου, τότε η διαφορά αυτή ενισχύεται από τον ενισχυτή με αποτέλεσμα το ρεύμα εξόδου του ενισχυτή να ενεργοποιεί το πηνίο. Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο του πηνίου δημιουργεί μια δύναμη πάνω στο πιστόνι της βαλβίδας του υδραυλικού σερβοκινητήρα και το κινεί αριστερά ή δεξιά. Οι μικρές μεταβολές στη θέση του πιστονιού αυτού ελέγχουν τη θέση του εργαλείου κοπής.



Σχήμα 1.4.11. Αριθμητικός έλεγχος μηχανής κοπής μετάλλων.

Παράδειγμα 12. Αναπηρική καρέκλα

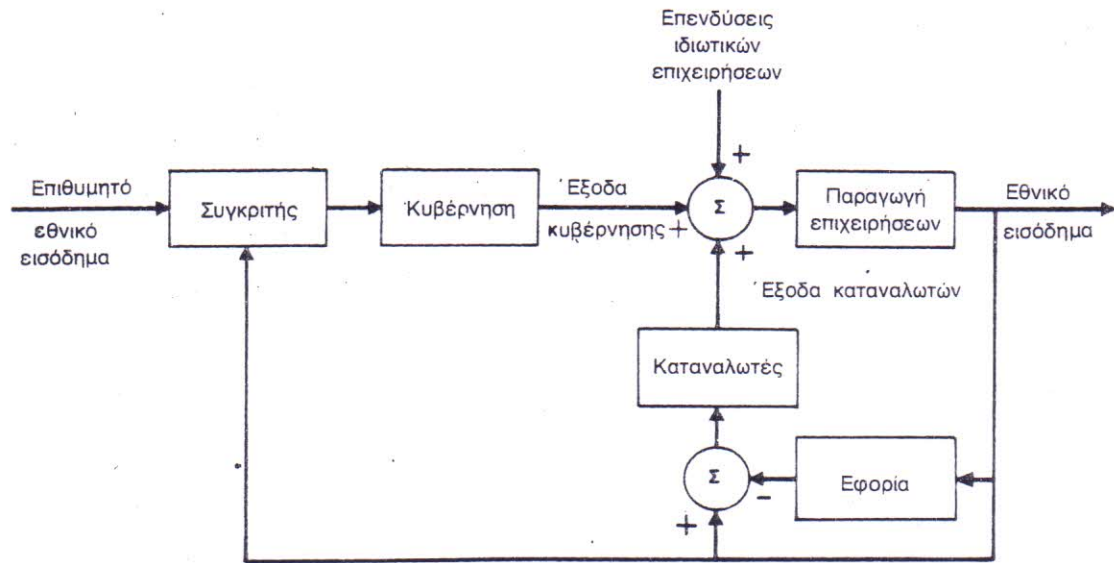
Η αυτόματη αναπηρική καρέκλα είναι σχεδιασμένη ειδικά για άτομα που είναι ανάπηρα από το λαιμό και κάτω. Αποτελείται από ένα σύστημα, το οποίο βάζει σε λειτουργία το ανάπηρο άτομο με το κεφάλι του και καθορίζει τόσο την κατεύθυνση της κίνησης όσο και την ταχύτητα της καρέκλας. Η κατεύθυνση καθορίζεται από ένα αισθητήριο όργανο που είναι τοποθετημένο σε διαστήματα 90° έτσι ώστε το άτομο να μπορεί να διαλέγει μία από τις τέσσερις κινήσεις μπρος, πίσω, αριστερά και δεξιά. Η ταχύτητα καθορίζεται από την έξοδο ενός άλλου αισθητηρίου οργάνου, που η έξοδος του είναι ανάλογη του μεγέθους της κίνησης του κεφαλιού. Εδώ, ο άνθρωπος είναι μέρος του αντισταθμιστή.

Παράδειγμα 13. Οικονομικά συστήματα

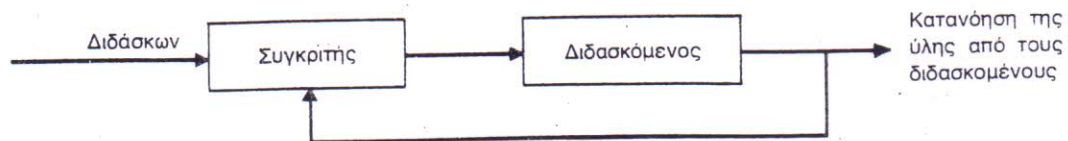
Οι έννοιες των κλειστών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου βρίσκουν εφαρμογή και στα οικονομικά συστήματα. Στο σχήμα 1.4.12 δίνεται μία σχηματική περιγραφή του εθνικού εισοδήματος υπό μορφή κλειστού συστήματος. Το σχήμα αυτό βοηθά τον οικονομολόγο στην κατανόηση των διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στο κλειστό σύστημα. Ο ρόλος της κυβέρνησης, των επιχειρήσεων και του καταναλωτή μεταβάλλονται ανάλογα με τον τρόπο διακυβέρνησης της χώρας (π.χ. καπιταλισμός, σοσιαλισμός, κ.λ.π.).

Παράδειγμα 14. Διδασκαλία

Η διαδικασία της (σωστής) διδασκαλίας έχει τη δομή ενός κλειστού συστήματος (σχήμα 1.4.13). Πράγματι, αν θεωρήσουμε ως σύστημα τους διδασκόμενους, ως εισοδο την ύλη που παρουσιάζει ο διδάσκων και ως έξοδο το βαθμό κατανόησης της ύλης από τους διδασκόμενους, τότε η διδασκαλία μπορεί να περιγραφεί με το σχηματικό διάγραμμα του σχήματος 1.4.13. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η έξοδος του συστήματος, το κατά πόσο δηλαδή οι διδασκόμενοι κατανόησαν την ύλη, ανατροφοδοτείται στην εισοδο του συστήματος, δηλαδή στο



Σχήμα 1.4.12. Σχηματικό διάγραμμα εθνικού εισοδήματος.



Σχήμα 1.4.13. Σχηματικό διάγραμμα διδασκαλίας.

διδάσκοντα. Στη συνέχεια ο διδάσκων αποφασίζει πώς θα συνεχίσει τη διδασκαλία και συγκεκριμένα προχωρεί σε επόμενη ύλη, αν οι διδασκόμενοι την κατάλαβαν, ή επαναλαμβάνει την ύλη, σε περίπτωση που δεν την κατάλαβαν. Επομένως η διδασκαλία γίνεται, ή τουλάχιστο θα πρέπει να γίνεται, κατά το πρότυπο ενός κλειστού συστήματος.

Παράδειγμα 15. Βιολογικά συστήματα

Όπως ήδη τονίσαμε στο εδάφιο 1.1, οι διάφοροι βιολογικοί οργανισμοί είναι πολυσύνθετα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, όπου ένας τεράστιος αριθμός διεργασιών ρυθμίζεται αυτόματα. Οι οργανισμοί αυτοί περιγράφονται με μαθηματικά μοντέλα βάσει των οποίων μελετάται η συμπεριφορά τους. Παραδειγματος χάριν, το μάτι, το αναπνευστικό σύστημα, το σύστημα της ανθρώπινης ομιλίας, κ.λ.π. Επίσης, κατά τον ίδιο τρόπο περιγράφουμε και μελετάμε την οικολογική ισορροπία μεταξύ δύο ειδών ζώων, όπως είναι οι αλεπούδες και οι λαγοί, την εξαπλώση μιας μεταδοτικής νόσου, κ.λ.π.

Κλείνοντας το κεφάλαιο 1 σημειώνουμε και πάλι ότι σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να εισάγουμε τον αναγνώστη στον αυτόματο έλεγχο και να αναδείξουμε το γεγονός ότι ο αυτόματος έλεγχος είναι μία περιοχή της επιστήμης και της τεχνολογίας, η οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο επωφελεία του ανθρώπου. Πρέπει όμως να τονίσουμε ότι είναι δυνατόν να υπάρξουν και αρνητικές επιπτώσεις για τον άνθρωπο από την εφαρμογή του αυτοματισμού. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε το εξής: Τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται ρομπότ τα οποία αντικαθιστούν τον άνθρωπο σε εργασίες που είναι επικίνδυνες για την υγεία του ή ακόμα και για τη ζωή του. Ένα τέτοιο επίτευγμα φυσικά, το επικροτούμε όλοι μας. Όμως η χρήση των ρομπότ επεκτείνεται και σε άλλες περιπτώσεις, όπως είναι π.χ. σε ακίνδυνες εργασίες μέσα σε εργοστάσια. Αυτό μάλιστα μπορεί να επεκταθεί σε τέτοιο βαθμό που πολλοί εργαζόμενοι να βρεθούν χωρίς δουλειά με αποτέλεσμα ο αυτόματος έλεγχος (εδώ τα ρομπότ) να προκαλέσει ανεργία, και επομένως σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις για μιά μερίδα των εργαζομένων. Σαν δεύτερο παράδειγμα αναφέρουμε την εκτεταμένη εφαρμογή του αυτοματισμού σε οπλικά συστήματα που γίνονται για την αυτοκαταστροφή μας, ενώ τα επιτεύγματα του αυτοματισμού θα μπορούσαν και θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την πρόοδο και την ειρήνη της ανθρωπότητας. Είναι φανερό, επομένως, ότι χρειάζεται προσεκτική μεθόδευση κατά την αξιοποίηση των εκάστοτε νέων επιτευγμάτων της επιστήμης του αυτόματου ελέγχου ώστε να χρησιμοποιηθούν επωφελεία όλων των ανθρώπων.

Τέλος αναφέρεται ότι υπάρχει μια πλούσια βιβλιογραφία σε εισαγωγικά συγγράμματα πάνω σε Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου. Για παραπέρα μελέτη προτείνουμε από την ξένη βιβλιογραφία τα συγγράμματα [1], [3], [4], [6] και [10], από δε την ελληνική βιβλιογραφία τα συγγράμματα [13], [14], [18], [27] - [29], [33], [35], [40] και [41].

Έχεις τα πινέλα, έχεις τα χρώματα,
ζωγράφισε τον παράδεισο και μπες μέσα
Νίκος Καζαντζάκης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο σε μερικά μαθηματικά θέματα που η γνώση τους θεωρείται απαραίτητη για τη μελέτη των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Συγκεκριμένα, το κεφάλαιο 2 αποσκοπεί στο να δημιουργήσει ένα στοιχειώδες μαθηματικό υπόβαθρο σε θέματα όπως είναι τα βασικά σήματα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, ο μετασχηματισμός Laplace και η θεωρία πινάκων.

2.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

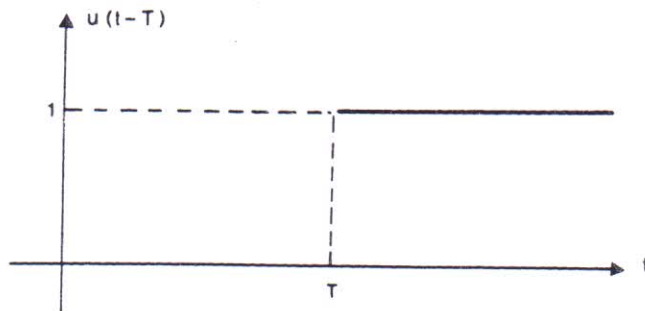
Ορισμένα σήματα έχουν ευρεία εφαρμογή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Τα σήματα αυτά είναι οι εξής συναρτήσεις: Η βηματική, η κρουστική, η συνάρτηση αναρρίχησης, η ημιτονοειδής και η εκθετική. Θα παρουσιάσουμε τις τρεις πρώτες συναρτήσεις. Οι δύο τελευταίες (ημιτονοειδής $A\sin\omega t$ και εκθετική Ae^{at}) μας είναι ήδη γνωστές.

2.2.1 Η μοναδιαία βηματική συνάρτηση

Η μοναδιαία βηματική συνάρτηση συμβολίζεται $u(t-T)$ και ορίζεται ως εξής:

$$u(t-T) = \begin{cases} 1 & \text{για } t > T \\ 0 & \text{για } t < T \\ \text{απροσδιόριστη για } t = T \end{cases} \quad (2.2-1)$$

Η γραφική παράσταση της $u(t-T)$ δίνεται στο σχήμα 2.2.1. Ο όρος **μοναδιαία** προέρχεται από το γεγονός ότι το πλάτος της $u(t-T)$, για $t > T$, είναι ίσο με τη μονάδα.



Σχήμα 2.2.1. Η μοναδιαία βηματική συνάρτηση.

Ένα φυσικό παράδειγμα μίας μοναδιαίας βηματικής συνάρτησης είναι ο διακόπτης ενός δικτύου (σχήμα 2.2.2). Είναι φανερό ότι η τάση $v_R(t)$ θα είναι

$$v_R(t) = \begin{cases} v(t) & \text{για } t > T \\ 0 & \text{για } t < T \\ \text{απροσδιόριστη} & \text{για } t = T \end{cases}$$

ή

$$v_R(t) = v(t)u(t-T)$$

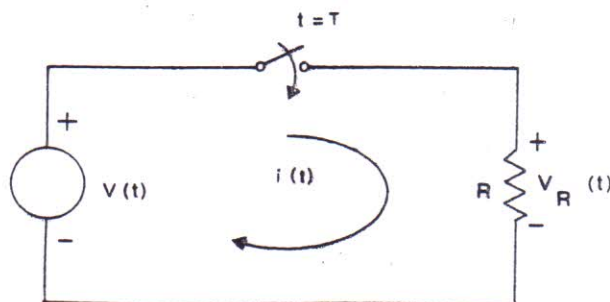
Ο ρόλος, δηλαδή, που παίζει ο διακόπτης εκφράζεται με τη συνάρτηση $u(t-T)$.

2.2.2 Η μοναδιαία κρουστική συνάρτηση

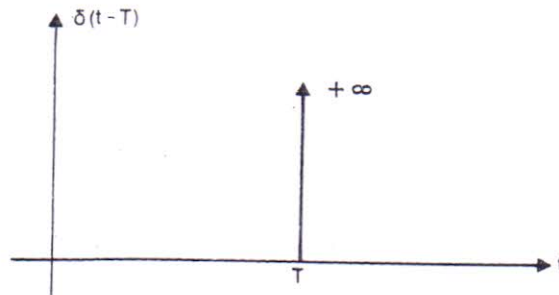
Η μοναδιαία κρουστική συνάρτηση ονομάζεται, επίσης, και συνάρτηση Dirac και συμβολίζεται $\delta(t-T)$. Ορίζεται δε ως εξής:

$$\delta(t-T) = \begin{cases} 0 & \forall t, \text{ πλην του } t=T \\ \infty & \text{για } t=T \end{cases} \quad (2.2-2)$$

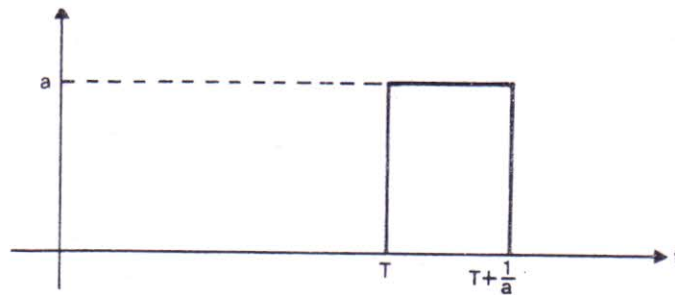
Η γραφική παράσταση της $\delta(t-T)$ δίνεται στο σχήμα 2.2.3. Ένας άλλος ορισμός της $\delta(t-T)$ είναι ο εξής: Θεωρούμε το σχήμα 2.2.4. Το εμβαδόν E του παραλληλογράμμου



Σχήμα 2.2.2. Ο διακόπτης ως μοναδιαία βηματική συνάρτηση.



Σχήμα 2.2.3. Η μοναδιαία κρουστική συνάρτηση.

Σχήμα 2.2.4. Το εμβαδόν $E=1$.

είναι $E=(1/a)a=1$. Η μοναδιαία κρουστική συνάρτηση είναι το όριο του εμβαδού E καθώς η βάση του παραλληλογράμμου $1/a$ μηδενίζεται ενώ ταυτόχρονα το ύψος του a απειρίζεται. Δηλαδή

$$\delta(t-T) = \lim_{a \rightarrow \infty} E \quad (2.2-3)$$

Από τον ορισμό (2.2-3) προκύπτει αμέσως ότι

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-T) dt = 1 \quad (2.2-4)$$

Η σχέση (2.2-4) δείχνει ότι το εμβαδόν της μοναδιαίας κρουστικής συνάρτησης είναι μονάδα (γιαυτό και λέγεται μοναδιαία).

Οι συναρτήσεις $u(t-T)$ και $\delta(t-T)$ συνδέονται με τις εξής σχέσεις:

$$\delta(t-T) = \frac{du(t-T)}{dt} \quad \text{και} \quad u(t-T) = \int_{-\infty}^t \delta(\lambda-T) d\lambda \quad (2.2-5)$$

Τέλος, μία αξιοσημείωτη ιδιότητα της $\delta(t-T)$ είναι η εξής: Εστω μια συνάρτηση $x(t)$, για την οποία $|x(t)| < \infty$. Τότε

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t-T)dt = x(T) \quad (2.2-6)$$

2.2.3 Η συνάρτηση αναρρίχησης

Η συνάρτηση αναρρίχησης συμβολίζεται $r(t-T)$ και ορίζεται ως εξής:

$$r(t-T) = \begin{cases} t-T & \text{για } t > T \\ 0 & \text{για } t \leq T \end{cases} \quad (2.2-7)$$

Η γραφική παράσταση της $r(t-T)$ δίνεται στο σχήμα 2.2.5. Είναι φανερό ότι η $u(t-T)$ και η $r(t-T)$ συνδέονται με τις σχέσεις

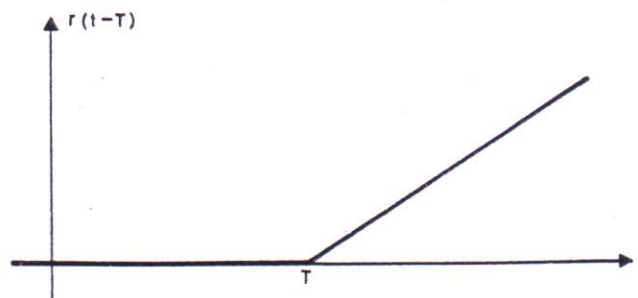
$$u(t-T) = \frac{dr(t-T)}{dt} \quad \text{και} \quad r(t-T) = \int_{-\infty}^t u(\lambda-T)d\lambda$$

2.3 Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ LAPLACE

2.3.1 Γενικά περί μετασχηματισμού Laplace

Κατά τη μελέτη και σχεδίαση των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου συμβαίνει πολλές φορές η χρησιμοποίηση ορισμένων μαθηματικών εργαλείων να καθιστά το έργο του μηχανικού ευκολότερο, τόσο στην κατανόηση των προβλημάτων που αντιμετωπίζει, όσο και στη λύση τους. Ένα τέτοιο **μαθηματικό εργαλείο είναι και ο μετασχηματισμός Laplace**. Ειδικότερα, για την κατηγορία των γραμμικών μη χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων, που αποτελεί και το κύριο θέμα του παρόντος συγγράμματος, ο **μετασχηματισμός Laplace αποτελεί βασικό μαθηματικό εργαλείο για τη μελέτη και τη σχεδίαση των συστημάτων αυτών.**

Ο ορισμός του μετασχηματισμού Laplace μιας συνάρτησης του χρόνου $f(t)$ είναι



Σχήμα 2.2.5. Η συνάρτηση αναρρίχησης.