

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός των σημειώσεων αυτών είναι να βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση του περιεχομένου του εξαμηνιαίου μαθήματος με τίτλο «Ηλεκτροτεχνία II», όπως αυτό αναπτύσσεται στο 2ο εξάμηνο των σπουδών του τμήματος Ηλεκτρολογίας.

Το περιεχόμενο της Ηλεκτροτεχνίας ή Ηλεκτροτεχνικής επιστήμης σαν τεχνολογικού κλάδου περιλαμβάνει τις εφαρμογές της ηλεκτροτεχνίας και ηλεκτρονικής που στοχεύουν στην κάλυψη των καθημερινών αναγκών. Καλύπτει, έτσι ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο πεδίο εφαρμογών που περιλαμβάνει όλες σχεδόν τις βιοτικές και επαγγελματικές δραστηριότητες. Το περιεχόμενο της Ηλεκτροτεχνίας χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Την **τεχνολογία ισχυρών ρευμάτων ή τεχνολογία ηλεκτρικής ισχύος** και την αντίστοιχη των **ασθενών ρευμάτων ή τεχνολογία σήματος**.

1.1 Εφαρμογές τεχνολογίας ηλεκτρικής ισχύος.

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας ηλεκτρικής ισχύος περιλαμβάνουν την ηλεκτρική θέρμανση, τον φωτισμό, την κίνηση και τις εγκαταστάσεις ηλεκτροδότησης των εφαρμογών αυτών.

Η **ηλεκτρική θέρμανση** εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου συγκεκριμένα ποσά θερμότητας πρέπει να προσφερθούν σε συγκεκριμένα σημεία. Η χρησιμοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση προσφέρεται για περιπτώσεις όπου επιζητείται επακριβής έλεγχος του προσφερόμενου ποσού θερμότητας. Ηλεκτρικές θερμάστρες, ηλεκτρικές κουζίνες, ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες νερού χρήσης, φούρνοι ηλεκτρικών αντιστάσεων και μικροκυμάτων, θερμοσυσσωρευτές κλπ είναι ορισμένες από τις πιο γνωστές εφαρμογές της ηλεκτρικής θέρμανσης στο σπίτι. Βιομηχανικές εφαρμογές περιλαμβάνουν αντίστοιχες διατάξεις προθερμαντήρων, θερμαντήρων, ηλεκτρολεβήτων καθώς και πιο ειδικές διατάξεις, όπως επαγωγικοί κλίβανοι τήξης μετάλλων.

Στην περίπτωση των **εγκαταστάσεων φωτισμού** το πρόβλημα συνίσταται στην παροχή της κατάλληλης ποσότητας και είδους φωτός στην κατάλληλη περιοχή. Όλες πρακτικά οι εγκαταστάσεις φωτισμού λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια. Μια τεράστια ποικιλία λαμπτήρων προσφέρονται σήμερα στην αγορά, από μικροσκοπικές φωτοδιόδους (light-emitting diodes LEDs) έως μεγάλους λαμπτήρες προβολέων και φωτισμού δρόμων. Η τεχνολογία των λαμπτήρων εξελίσσεται συνεχώς, βελτιώνοντας κυρίως τα χαρακτηριστικά της κατανάλωσης και της διάρκειας ζωής τους.

Στις **εφαρμογές κίνησης** το ζητούμενο είναι η παροχή μηχανικής ροπής σε καθορισμένες ποσότητες και με τρόπο ώστε η όλη διαδικασία να είναι ελέγξιμη. Υπάρχει τεράστιο πλήθος διαφορετικών ηλεκτροκινητήρων. Μόνο σε μια μέση κατοικία υπάρχουν δεκάδες ηλεκτροκινητήρες, σε ηλεκτρικές κουζίνες, ανεμιστήρες, απορροφητήρες, αναδευτήρες, συστήματα αναπαραγωγής ήχου, πλυντήρια, υπολογιστές κλπ. Στη βιομηχανία εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν εφαρμογές σε αντλίες, συμπιεστές, συστήματα ελέγχου και οδήγησης βαλβίδων, κυλιόμενους ιμάντες, σπαστήρες, αναδευτήρες κλπ.

Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό των εφαρμογών ηλεκτρικής ισχύος είναι ότι απαιτούν σημαντικά ποσά ηλεκτρικής ισχύος σε αντίθεση με τις εφαρμογές ασθενών ρευμάτων.

1.2 Εφαρμογές ασθενών ρευμάτων.

Η άλλη μεγάλη κατηγορία των εφαρμογών της ηλεκτροτεχνίας, αφορά την μετάδοση, επεξεργασία και χρήση της πληροφορίας. Η ισχύς δεν είναι το κυρίαρχο χαρακτηριστικό των διαδικασιών αυτών, και οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι μικρές αλλά αρκετές ώστε να διασφαλίζουν την μη απώλεια του σήματος. Παρόλα αυτά υπάρχουν και ορισμένες εφαρμογές επεξεργασίας σήματος με υψηλές απαιτήσεις ισχύος, όπως πομποί υψηλής ισχύος, ραντάρ, βιοτεχνολογικές εφαρμογές κλπ.

Η τεχνολογία της πληροφορίας καλύπτει ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών. Είναι βολικός λοιπόν ο παραπέρα διαχωρισμός των εφαρμογών αυτών σε εφαρμογές οργάνων και αισθητηρίων, εφαρμογές επικοινωνίας, εφαρμογές επεξεργασίας πληροφοριών και εφαρμογές ελέγχου, όπως παρακάτω.

Οι **εφαρμογές οργάνων και αισθητηρίων** αφορούν τη χρήση ηλεκτρικών σημάτων για μετρήσεις μεγεθών, ενίσχυση και μετάδοση σημάτων μετρήσεων. Οι μετρήσεις μπορεί να αφορούν είτε μεγέθη μιας βιομηχανικής διαδικασίας, όπως πίεση, θερμοκρασία κλπ, είτε βιοιατρικές εφαρμογές, όπως μετρήσεις καρδιακών παλμών, πυκνότητας αίματος, μαγνητικού πεδίου κλπ. Η εξέλιξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας καθιέρωσε την ηλεκτρονική επίβλεψη (monitoring) και έλεγχο σε πλήθος βιομηχανικών και καταναλωτικών εφαρμογών.

Με τον όρο **εφαρμογές επικοινωνίας**, εννοούνται οι διάφορες μορφές τηλεφωνίας, η τεχνολογία της εκπομπής και λήψης στοιχείων, οι εφαρμογές ραδιοφωνίας, τηλεοπτικών εκπομπών και ραντάρ καθώς και η τεχνολογία των σχετικών διατάξεων. Η βασική διαδικασία των επικοινωνιών περιλαμβάνει τη δημιουργία του μηνύματος, την κατάλληλη κωδικοποίησή του, την διαμόρφωση ενός φορέα με την πληροφορία του μηνύματος, την επιλογή της τεχνολογίας διάδοσης του φορέα σε ένα μέσο και στο σημείο λήψης την αποδιαμόρφωση, αποκωδικοποίηση και αναπαραγωγή του μηνύματος. Η διαδικασία αυτή ισχύει για όλα σχεδόν τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, ανεξάρτητα εάν είναι σχεδιασμένα για επικοινωνία ανθρώπων ή μηχανών.

Οι **εφαρμογές επεξεργασίας πληροφοριών** περιλαμβάνουν την τεχνολογία του υλικού (hardware) και του λογισμικού (software) των συστημάτων επεξεργασίας πληροφοριών. Η εκτεταμένη χρήση τεχνολογιών επικοινωνίας υπολογιστών έχει καθιερώσει την εφαρμογή των δικτύων υπολογιστών είτε σε τοπικό επίπεδο είτε σε ευρύτερο (Local area networks - LANs, Wide area Networks - WANs), οδηγώντας σε νέους πιο ευέλικτους σχεδιασμούς υπολογιστικών συστημάτων. Έτσι τα παλιά συγκεντρωμένα συστήματα μεγάλων υπολογιστών (mainframes) αντικαθίστανται από τοπικούς ή απομακρυσμένους εξυπηρετητές (servers) που προσφέρουν εξελιγμένα συστήματα συσχετισμένων βάσεων δεδομένων (RDBMS) για τους πελάτες υπολογιστές (clients). Οι εξελίξεις στις τεχνικές πολυμέσων και ιδιαίτερα η ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων

συμπύεσης εικόνας και ήχου, σε συνδυασμό με την επεκτεινόμενη χρήση του διαδικτύου (Internet), επιβάλλουν νέα standards στους σχεδιασμούς των συστημάτων και των εφαρμογών.

Τέλος, οι **εφαρμογές ελέγχου** περιλαμβάνουν τις διατάξεις εκείνες οι οποίες προσφέρουν συνεχή, γρήγορη και ακριβή ρύθμιση σε διαδικασίες, όπως ένα σύστημα μηχανικών κινητών τμημάτων, μια χημική διεργασία, ένας μεταφορικός ιμάντας που λειτουργεί προγραμματισμένα.

Τα όρια των παραπάνω περιοχών εφαρμογών είναι κατά κανόνα ασαφή. Τα υπολογιστικά συστήματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές ελέγχου, ενώ σε όλα τα υπολογιστικά συστήματα περιλαμβάνονται εξελιγμένα συστήματα επικοινωνιών.

Τα ηλεκτρικά σήματα διακρίνονται επιπλέον σε **αναλογικά** και **ψηφιακά**. Αναλογικό είναι ένα ηλεκτρικό σήμα, που το πλάτος της κυματομορφής του είναι ανάλογο (ή σε αναλογία) με το αίτιο που το προκαλεί (πχ ο ήχος σαν συνάρτηση της πίεσης του αέρα, ή αντίστοιχα της έντασης του). Με ένα διαφορετικό τρόπο κωδικοποίησης, ένα τέτοιο σήμα μπορεί να έχει ψηφιακή μορφή, να αποτελείται δηλαδή από μια αλληλουχία αριθμών. Η ψηφιακή μορφή των σημάτων είναι ιδιαίτερα βολική καθώς ελαχιστοποιεί τα προβλήματα παραμόρφωσης κατά τη δημιουργία, διάδοση και αναπαραγωγή των σημάτων. Με την ελάττωση του κόστους και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των συστημάτων κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης ψηφιακών σημάτων, αλλά και την επέκταση της χρήσης υπολογιστών, η εφαρμογή των ψηφιακών σημάτων γενικεύεται.

Οι εφαρμογές ασθενών ρευμάτων χαρακτηρίζονται πολλές φορές και σαν εφαρμογές ηλεκτρονικών, επειδή σε αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως ηλεκτρονικές διατάξεις. Ο χαρακτηρισμός αυτός όμως κρίνεται αδόκιμος, καθώς ο όρος ηλεκτρονική αναφέρεται στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών διατάξεων, όπως transistors, δίοδοι κλπ και των εφαρμογών τους σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, ενώ παράλληλα πλήθος ηλεκτρονικών διατάξεων χρησιμοποιούνται πλέον και στις εφαρμογές ισχύος.

1.3 Σκοπός του μαθήματος.

Από την παραπάνω συνοπτική παρουσίαση των εφαρμογών της Ηλεκτροτεχνίας γίνεται φανερό ότι κάθε Μηχανικός, ανεξάρτητα από την ειδικότητά του, θα αντιμετωπίσει στον εργασιακό του χώρο αρκετές από αυτές.

Σε μια πρώτη αντιμετώπιση, ο τρόπος λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων και εφαρμογών φαίνεται αφηρημένος και δυσνόητος στους περισσότερους. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι ο ηλεκτρισμός δεν είναι αντιληπτός με τις αισθήσεις, εκτός από κάποιες ανώμαλες συνθήκες, όπως κεραυνός ή βραχυκύκλωμα. Έτσι, σε αντίθεση με άλλες διαδικασίες με τις οποίες ο άνθρωπος εξοικειώνεται μέσα από τις καθημερινές διαδικασίες, όπως η κίνηση, οι χημικές διεργασίες και οι κατασκευές, η μόνη επαφή του ανθρώπου με την ηλεκτρισμό, είναι συνήθως εκείνη του διακόπτη για να ανάψουν τα φώτα. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρικά φαινόμενα είναι στην πραγματικότητα πολύ πιο απλά και προβλέψιμα από πλήθος άλλα.

Σκοπός του μαθήματος αυτού είναι η συνοπτική και απλοποιημένη παρουσίαση στοιχείων που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας, τη δομή και τον τρόπο σχεδιασμού βασικών ηλεκτρικών

εγκαταστάσεων οικιακών και βιομηχανικών καταναλωτών. Ξεκινώντας από μια συνοπτική επανάληψη των βασικών ιδιοτήτων και ορισμών της ηλεκτροτεχνίας, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις εφαρμογές και τη λειτουργία τους. Έτσι δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο αντικείμενο των βιομηχανικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, καθώς και των κινδύνων από το ηλεκτρικό ρεύμα και της φιλοσοφίας των συστημάτων προστασίας ανθρώπων και συσκευών.

Στόχος του μαθήματος είναι να ευαισθητοποιήσει τους μελλοντικούς Μηχανολόγους στις εφαρμογές της Ηλεκτροτεχνίας και να δημιουργήσει τις απαραίτητες βάσεις, έτσι ώστε με κατάλληλη εμπειρία και εξειδίκευση των γνώσεων αυτών στον εργασιακό τους χώρο, να μπορούν:

- Να αντιλαμβάνονται τον τρόπο λειτουργίας και τις απαιτήσεις για συντήρηση ηλεκτρολογικών διατάξεων και εγκαταστάσεων.
- Να σχεδιάζουν και να επιλέγουν ηλεκτρολογικό εξοπλισμό για εφαρμογές ρουτίνας.
- Να αντιλαμβάνονται τον τρόπο λειτουργίας και να μπορούν να προδιαγράψουν συστήματα ελέγχου, επίβλεψης και συλλογής στοιχείων διεργασιών.
- Να μπορούν να συνεργάζονται αποδοτικότερα με τους συναδέλφους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και το τεχνικό προσωπικό που έχει την ευθύνη της λειτουργίας και συντήρησης των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων στον χώρο ευθύνης των.

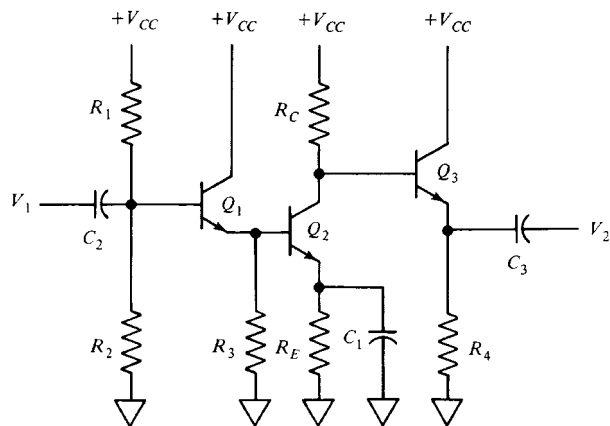
2 ΒΑΣΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Ηλεκτρικό κύκλωμα χαρακτηρίζεται ένα σύνολο ηλεκτρικών στοιχείων και συσκευών, καθώς και οι καλωδιώσεις (αγωγοί) που τα συνδέουν. Στο Σχ. 2.1 φαίνεται το **κυκλωματικό διάγραμμα** ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, ενός ενισχυτή, στο οποίο φαίνεται η φυσική καλωδιακή κατασκευή του κυκλώματος. Στο Σχ. 2.2 φαίνεται η κυκλωματική παράσταση ενός φακού τσέπης. Η σύνθετη φυσική διάταξη του Σχ. 2.2α απλοποιείται σημαντικά στην αντίστοιχη κυκλωματική της παράσταση με τη χρήση προεπιλεγμένων συμβόλων για τα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος.

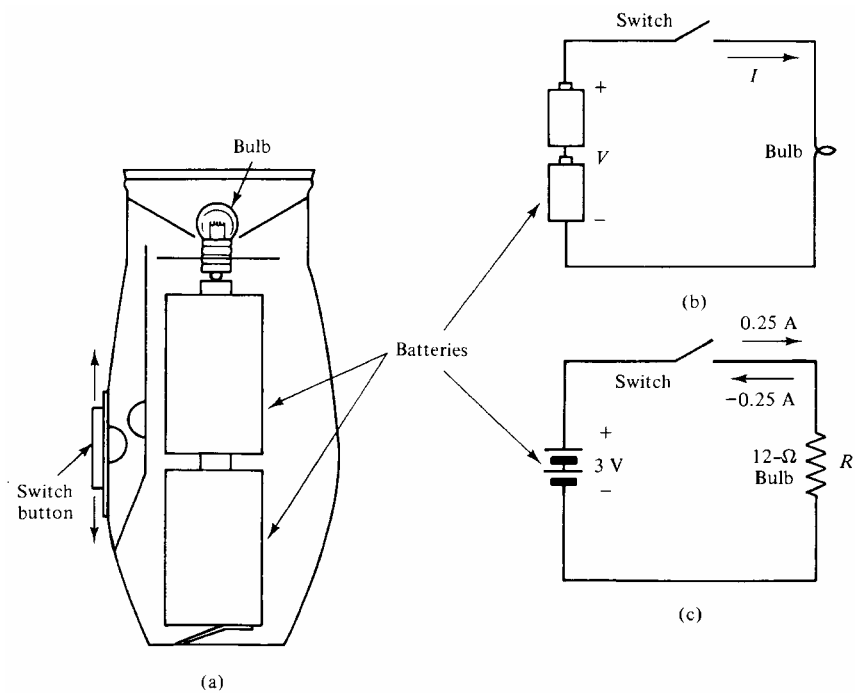
Τα ηλεκτρικά κυκλώματα διακρίνονται σε **κυκλώματα συνεχούς ρεύματος (direct current - dc)** και **κυκλώματα εναλλασσομένου ρεύματος (alternating current - ac)**. Στα πρώτα, οι τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών παραμένουν σταθερές στη διάρκεια του χρόνου και χαρακτηρίζονται σαν dc μεγέθη, ενώ στην δεύτερη κατηγορία κυκλωμάτων τα αντίστοιχα ac μεγέθη μεταβάλλονται, ημιτονοειδώς κατά κανόνα, με το χρόνο.

Ένα κύκλωμα λέγεται **κλειστό (closed circuit)** όταν υπάρχει συνέχεια στη διαδρομή όλων των επιμέρους στοιχείων του. Στην περίπτωση όπου υπάρχει κάποια διακοπή της συνέχειας αυτής, όπως πχ με το άνοιγμα του διακόπτη στο Σχ. 2.2β, τότε το κύκλωμα λέγεται **ανοικτό (open circuit)**.

Με τον όρο **κυκλωματική ανάλυση** εννοείται ο υπολογισμός της ηλεκτρικής τάσης στα άκρα και του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει κάθε επιμέρους στοιχείο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η κυκλωματική ανάλυση των κυκλωμάτων dc είναι ευκολότερη από την αντίστοιχη των κυκλωμάτων ac και για τον λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθούν σαν βάση για την ανάπτυξη των υπολοίπων εννοιών του Κεφαλαίου αυτού. Οι σχέσεις ανάμεσα στα ηλεκτρικά μεγέθη και οι νόμοι που αναπτύσσονται για κυκλώματα συνεχούς ρεύματος ισχύουν επακριβώς και για τα κυκλώματα εναλλασσομένου ρεύματος με αντικατάσταση των βαθμωτών dc μεγεθών με τα αντίστοιχα μιγαδικά ac ηλεκτρικά μεγέθη.



Σχήμα 2.1. Τυπικό διάγραμμα ηλεκτρικού κυκλώματος. Περιλαμβάνει transistors Q , αντιστάσεις και πυκνωτές και παριστάνει μια ενισχυτική διάταξη.



Σχήμα 2.2. Κυκλωματικό ισοδύναμο ενός φακού τσέπης με δύο μπαταρίες. Η σύνθετη φυσική διάταξη απλοποιείται σε ένα ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα με τη χρήση τυποποιημένων συμβόλων για κάθε ηλεκτρικό στοιχείο.

2.1 Ηλεκτρικό ρεύμα, ηλεκτρική τάση.

Η μοντελοποίηση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και συστημάτων με τη χρήση ισοδυνάμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων, επιτρέπει στο μηχανικό να έχει μια απλοποιημένη παράσταση του φυσικού συστήματος, έτσι ώστε να μπορεί να αντιληφθεί τον τρόπο λειτουργίας του και με τα αποτελέσματα της κυκλωματικής ανάλυσης να προβλέψει ποσοτικά, πώς συμπεριφέρεται το φυσικό σύστημα σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Το κυκλωματικό ισοδύναμο του φακού τσέπης του Σχ. 2.2 είναι ένα τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής. Το Σχ. 2.2α δείχνει μια φυσική τομή του φακού, κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να δείχνει την εσωτερική κατασκευή του φακού μαζί με την εξωτερική του θήκη. Τα Σχ. 2.2β και 2.2γ είναι κυκλωματικές αναπαραστάσεις του φυσικού συστήματος. Στο Σχ. 2.2β αναπαρίσταται ο δρόμος που ρέει το ρεύμα, το οποίο συμβολίζεται με I και βέλος, από τις δύο μπαταρίες στη λάμπα, μέσα από τον κλειστό διακόπτη και πίσω πάλι στις μπαταρίες. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να υλοποιηθεί στην πράξη χρησιμοποιώντας τα τρία βασικά στοιχεία, τις μπαταρίες, τη λάμπα και το διακόπτη, καθώς και μερικά κομμάτια σύρμα. Το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχ. 2.2γ χρησιμοποιεί απλά κάποια τυποποιημένα σύμβολα για την αναπαράσταση των βασικών ηλεκτρικών στοιχείων. Στο κυκλωματικό διάγραμμα αγνοούνται όλες οι μη ηλεκτρικές ιδιότητες του φυσικού συστήματος. Έτσι πληροφορίες όπως εξωτερικές διαστάσεις, βάρος, χρώμα, τύπος ανακλαστήρα κλπ δεν περιλαμβάνονται σε αυτό. Ακόμη και η αναπαράσταση των βασικών στοιχείων του συστήματος και του τρόπου της ηλεκτρικής τους διασύνδεσης είναι κατά το δυνατόν απλοποιημένες.

Το ηλεκτρικό κύκλωμα διαρρέεται από **ηλεκτρικό ρεύμα I** . Ας θεωρήσουμε το ηλεκτρικό ρεύμα σαν ροή **ηλεκτρικού φορτίου** μέσα σε έναν αγωγό. Στο κύκλωμα του 2.2γ το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει σύμφωνα με την διεύθυνση του βέλους, δηλαδή βγαίνει από τον θετικό πόλο της μπαταρίας (αυτόν με το σύμβολο +), διαρρέει την ωμική αντίσταση R , που συμβολίζει τη λάμπα, και επιστρέφει από τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας. Με την έννοια αυτή πρόκειται για μια ροή θετικών φορτίων τα οποία απωθούνται από τον θετικό πόλο της μπαταρίας και έλκονται από τον αρνητικό, διαρρέοντας στο δρόμο τους το υπόλοιπο κύκλωμα. Η φορά ροής του ρεύματος, όπως δηλώνεται με το βέλος, δείχνει τη φορά ροής των θετικών φορτίων στους αγωγούς.

Το ηλεκτρικό ρεύμα συμβολίζεται με το γράμμα I και μετριέται σε **Ampere (A)**. Μια συνηθισμένη λάμπα φωτισμού 100 W όταν ανάβει, διαρρέεται από ένα ρεύμα λίγο μικρότερο από 0,5 A. Μια ηλεκτρική εγκατάσταση σε κατοικία απορροφά μερικές δεκάδες A, ενώ οι βιομηχανικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις απορροφούν συνήθως εκατοντάδες ή και χιλιάδες A. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι λιγότερο ηλεκτροβόρα, λειτουργώντας συνήθως με χιλιοστά ή και εκατομμυριοστά του A, δικαιολογώντας με τον τρόπο αυτό το χαρακτηρισμό τους σαν κυκλώματα ασθενών ρευμάτων. Η λάμπα στο κύκλωμα του φακού του σχήματος 2.2 διαρρέεται από 0,25A ή 250 mA κατά τη λειτουργία της.

Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ροή ηλεκτρικού φορτίου μέσα από αγωγούς. Η μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου είναι το **Coulomb (C)**. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το φορτίο του ηλεκτρονίου

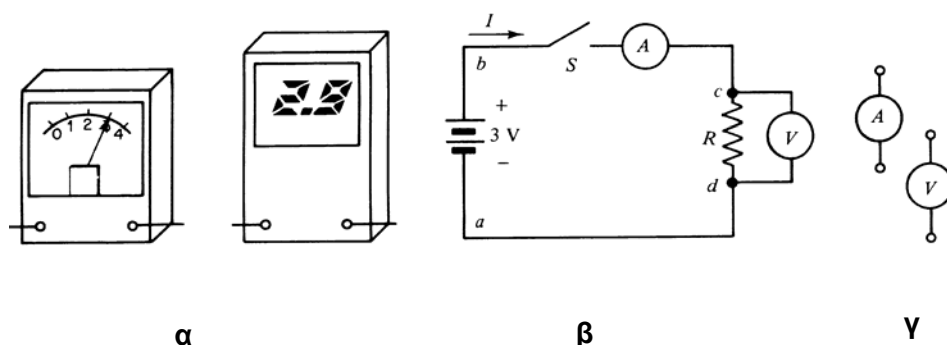
είναι $-1.6 \cdot 10^{-19}$ C. Ροή ενός Coulomb το δευτερόλεπτο είναι 1A. Άρα το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η παράγωγος στο χρόνο του ηλεκτρικού φορτίου.

Το ηλεκτρικό ρεύμα προσδιορίζεται από την έντασή του σε A και τη φορά της ροής του, όπως αυτή υποδηλώνεται με το βέλος του Σχ. 2.2γ. Η φορά αυτή είναι γνωστή και σαν **συμβατική φορά**.

Για την καλύτερη κατανόηση της φύσης και των ιδιοτήτων των ηλεκτρικών μεγεθών χρησιμοποιούνται, όπου αυτό είναι δυνατό, τα μηχανικά ισοδύναμα. Καθώς το μηχανικό σύστημα είναι απόλυτα αντιληπτό και κατανοητό με τις αισθήσεις, η αντιστοίχισή του με το ηλεκτρικό σύστημα βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση του τελευταίου. Στις σημειώσεις αυτές γίνεται συστηματικά χρήση μηχανικών αναλόγων. Έτσι, η ροή του ρεύματος σε έναν αγωγό είναι ισοδύναμη με τη ροή του νερού σε ένα σωλήνα. Το ηλεκτρικό φορτίο ισοδυναμεί με το συνολικό όγκο του νερού, ενώ το ηλεκτρικό ρεύμα με τη παροχή του νερού, δηλαδή τον όγκο που ρέει στο σωλήνα ανά δευτερόλεπτο. Η υδραυλική πίεση (ή η διαφορά υδραυλικής πίεσης), το αίτιο δηλαδή που προκαλεί τη ροή του νερού σε ένα σωλήνα είναι το υδραυλικό ανάλογο της **ηλεκτρικής τάσης ή ηλεκτρεγερτικής δύναμης ή διαφοράς δυναμικού**.

Η ηλεκτρική τάση μετριέται σε **Volts (V)**. Οι μπαταρίες του Σχ. 2.2 έχουν τάση 3V, δημιουργούν δηλαδή μια διαφορά δυναμικού 3V, ικανή να προκαλέσει ροή ρεύματος 0.25A στο κύκλωμα. Η τάση λειτουργίας του Ελληνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στα σπίτια είναι 220V.

Η τάση σαν διαφορά δυναμικού αναφέρεται σε δύο σημεία, για παράδειγμα μεταξύ των *a* και *b* στο Σχ. 2.3, που ισοδυναμούν με τους ακροδέκτες της συστοιχίας των δύο μπαταριών. Εφαρμόζοντας μια τάση ανάμεσα σε δύο σημεία, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε την πολικότητα, σε συνδυασμό με την τιμή της τάσης σε V. Η πολικότητα συμβολίζεται με τα σύμβολα +/-, ή μόνο +, που υποδηλώνει το σημείο με το υψηλότερο δυναμικό, ή με ένα βέλος που δείχνει τη φορά ανύψωσης της τάσης, δηλαδή από το - στο +.



Σχήμα 2.3. Όργανα μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών. α) Αναλογικά και ψηφιακά όργανα, β) συνδεσμολογίες αμπερομέτρων, βολτομέτρων, γ) Συμβολισμοί.

Το ηλεκτρικό ρεύμα και η τάση μπορούν να μετρηθούν με τη βοήθεια ειδικών οργάνων μέτρησης, του αμπερομέτρου και του βολτομέτρου αντίστοιχα. Τα όργανα αυτά μπορεί να είναι

αναλογικά ή ψηφιακά όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3α. Το κάθε όργανο διαθέτει δυο ακροδέκτες για κάθε κλίμακα μέτρησης, όπου ή κλίμακα καθορίζεται από τη μέγιστη τιμή του μεγέθους που μπορεί να μετρηθεί.

Για τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος σε ένα σημείο ενός κυκλώματος, έστω στον πάνω αγωγό του κυκλώματος 2.3β, το κύκλωμα πρέπει να διακοπεί στο σημείο εκείνο και το αμπερόμετρο να **παρεμβληθεί** στο κύκλωμα. Η συνδεσμολογία αυτή λέγεται και **σύνδεση σε σειρά**. Καθώς πριν την εισαγωγή του αμπερομέτρου, τα δύο σημεία ήταν συνδεδεμένα με σύρμα, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα σημεία σύνδεσης του αμπερομέτρου είναι μηδέν. Επιπλέον, η εισαγωγή του αμπερομέτρου δεν πρέπει να επηρεάσει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κυκλώματος, συνεπώς αυτό πρέπει να **ισοδυναμεί με έναν τέλειο αγωγό**.

Για τη μέτρηση της τάσης ανάμεσα σε δυο σημεία, έστω στους ακροδέκτες της λάμπας, στα σημεία c και d στο Σχ. 2.3β, οι ακροδέκτες του βολτομέτρου συνδέονται στα σημεία αυτά. Έτσι το βολτόμετρο συνδέεται **παράλληλα** με τη λάμπα, ή το ισοδύναμο ηλεκτρικό της σύμβολο, με την έννοια ότι έχουν κοινούς ακροδέκτες και προφανώς και κοινή διαφορά δυναμικού (τάση) ανάμεσα στα δύο άκρα τους. Καθώς πάλι δεν πρέπει να μεταβληθούν οι ηλεκτρικές ιδιότητες του κυκλώματος με την εισαγωγή του βολτομέτρου σε αυτό, προκύπτει ότι δεν πρέπει να περάσει κάποιο ρεύμα από αυτό, άρα το βολτόμετρο πρέπει να **ισοδυναμεί με ανοικτό κύκλωμα**.

2.2 Ηλεκτρική αντίσταση και νόμος του Ohm.

Στα κυκλωματικά ισοδύναμα του φακού, η λάμπα παριστάνεται με ένα ιδιαίτερο ηλεκτρικό σύμβολο, το οποίο δηλώνεται με το γράμμα R . Το σύμβολο αυτό είναι η **ηλεκτρική αντίσταση**. Η ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται σαν ο λόγος ανάμεσα στην διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία ενός κυκλώματος και στην ένταση του ρεύματος που διαρρέει το τμήμα αυτό του κυκλώματος. Συνεπώς:

$$R = V/I \quad (2.1)$$

Η ηλεκτρική αντίσταση μετριέται σε **Ohm (Ω)**. Έτσι μια τάση 17V εάν εφαρμοστεί στα άκρα μιας αντίστασης 10 Ω προκαλεί ένα ρεύμα 1,7A το οποίο διαρρέει την αντίσταση.

Η ηλεκτρική αντίσταση είναι μια φυσική ιδιότητα όλων των αγωγών του ηλεκτρικού ρεύματος. Φυσικά, παριστάνει την πτώση τάσης που προκαλείται όταν ένα ρεύμα διαρρέει ένα στοιχείο ενός κυκλώματος, κάτι αντίστοιχο με την πτώση πίεσης σε σωληνώσεις που μεταφέρουν νερό, λόγω τριβών, ή παρουσίας υδραυλικών εξαρτημάτων στην διαδρομή. Οι τριβές στην περίπτωση του ηλεκτρικού κυκλώματος, παριστάνουν την αντίσταση των αγωγών, ενώ τα υδραυλικά εξαρτήματα, τα συγκεντρωμένα ηλεκτρικά στοιχεία ενός κυκλώματος, όπως η λάμπα στο κύκλωμα του Σχ. 2.3β. Η αντίσταση εξαρτάται από το υλικό του αγωγού και είναι ανάλογη του μήκος του και αντίστροφα ανάλογη της διατομής του

$$R = r \frac{\ell}{S} \quad (2.1\alpha)$$

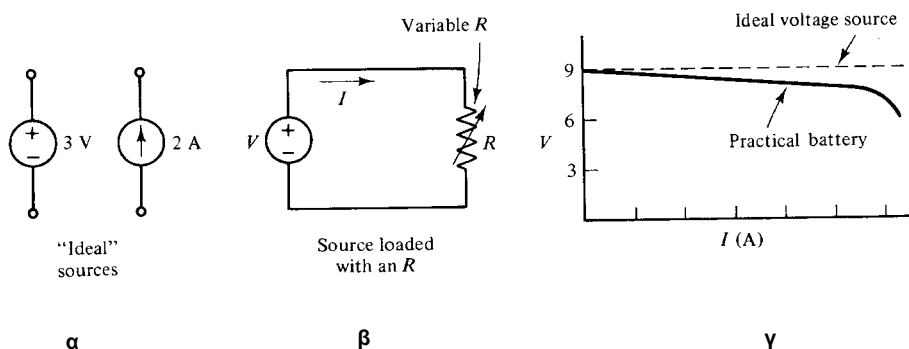
Η σχέση (2.1) εκτός από ορισμός της αντίστασης, είναι γνωστή και σαν **Νόμος του Ohm**, αποτελώντας τη βασικότερη σχέση της Ηλεκτροτεχνίας.

Ο όρος αντίσταση, εκτός από τη φυσική ιδιότητα των στοιχείων ενός κυκλώματος, όπως ορίστηκε προηγούμενα, δηλώνει και ένα συγκεκριμένο κυκλωματικό στοιχείο.

2.3 Πηγές τάσης και ρεύματος.

Δυο νέα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά στα κυκλώματα, είναι οι πηγές τάσης και οι πηγές ρεύματος. Πηγή τάσης είναι ένα στοιχείο με δύο ακροδέκτες το οποίο δημιουργεί μια σταθερή διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα σημεία που συνδέεται. Η τάση αυτή θεωρείται σταθερή ανεξάρτητα από το ρεύμα το οποίο διαρρέει την πηγή. Μια πηγή τάσης 3V μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κύκλωμα του Σχ. 2.3β στη θέση της μπαταρίας.

Στο Σχ. 2.4β φαίνεται μια πηγή τάσης V συνδεδεμένη με μια μεταβλητή αντίσταση R . καθώς η τιμή της R μεταβάλλεται θα μεταβάλλεται και το ρεύμα I του κυκλώματος σύμφωνα με τον Νόμο του Ohm της (2.1). Εάν υποθεθεί ότι η πηγή τάσης είναι μια τυπική πλακέ μπαταρία των 9V, τότε εάν $R=100\Omega$ το ρεύμα που δίνει η μπαταρία είναι 90mA (0,09A). Εάν η τιμή της R γίνει πολύ μικρή, έστω $100\mu\Omega$, τότε αναμένεται ένα ρεύμα 90kA (90.000A!!). Είναι όμως παράλογο να πιστεύει κανείς ότι το μικρό στοιχείο των 9V μπορεί να δώσει ένα τόσο τρομακτικά υψηλό ρεύμα. Στην πράξη ακόμη και ένα ρεύμα μερικών εκατοντάδων mA για ένα μικρό χρονικό διάστημα θα καταστρέψει τελείως την μπαταρία.



Σχήμα 2.4. Πηγές τάσης και έντασης. α) Συμβολισμοί, β) Κυκλωματική σύνδεση γ) Χαρακτηριστική καμπύλη V - I πραγματικής μπαταρίας.

Το παράδειγμα αυτό δείχνει ότι στην πράξη το μοντέλο της πηγής τάσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση καταστάσεων υψηλών ρευμάτων, άσχετα εάν ορίζεται ότι διατηρεί σταθερή την τάση ανεξάρτητα από το ρεύμα. Συνεπώς η προσομοίωση του Σχ. 2.4α μιας πηγής τάσης είναι **ιδανική**, με την έννοια ότι αποτελεί μια εξιδανικευμένη προσομοίωση του αντίστοιχου φυσικού στοιχείου. Μια πραγματική μπαταρία συμπεριφέρεται διαφορετικά από μια ιδανική πηγή τάσης. Το Σχ. 2.4γ δείχνει τις καμπύλες μεταβολής της τάσης σαν συνάρτηση του ρεύματος για μια ιδανική και για μια πραγματική πηγή τάσης. Παρατηρείται ότι στην πραγματική πηγή τάσης η τάση των ακροδεκτών εμφανίζει μια απότομη 'βύθιση' μετά από μια ανώτερη τιμή

ρεύματος, υποδηλώνοντας με τον τρόπο αυτό ότι το στοιχείο δεν μπορεί να λειτουργήσει πάνω από αυτό το όριο.

Η πηγή ρεύματος του Σχ. 2.4α, είναι ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών μέσα από το οποίο ρέει ένα ρεύμα σταθερής τιμής (2A στο παράδειγμα) ανεξάρτητα από την διαφορά δυναμικού των ακροδεκτών του. Στην πράξη δεν υπάρχει στοιχείο πραγματικό που να είναι πηγή ρεύματος. Σημειώνεται όμως ότι και η πηγή τάσης και η πηγή ρεύματος σε ένα κύκλωμα παράγουν ταυτόχρονα και ρεύμα και διαφορά δυναμικού. Έτσι μια πηγή ρεύματος μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλη πηγή τάσης σε συνδυασμό με κάποια αντίσταση. Γενικά η διαφορά των δύο αυτών πηγών εντοπίζεται στο στοιχείο εκείνο, τάση η ρεύμα, που διατηρείται σταθερό.

2.4 Ηλεκτρική ισχύς και ενέργεια.

Στο κύκλωμα του Σχ. 2.3β, όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η μπαταρία δίνει **ηλεκτρική ισχύ** στο κύκλωμα. Η λάμπα, που προσομοιώνεται με μια αντίσταση, απορροφά την ηλεκτρική ισχύ και την μετατρέπει σταδιακά σε θερμότητα. Έτσι χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία, μετατρέπεται σε ηλεκτρική και στη συνέχεια σε θερμική. Η μπαταρία, και κάθε πηγή τάσης ή ρεύματος, είναι λοιπόν ένα στοιχείο το οποίο μπορεί να προσδώσει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα κύκλωμα. Η ενέργεια μετριέται με **Joules** ή **Ws**. Χρησιμοποιώντας το σύμβολο E για την ενέργεια και το σύμβολο P για την ισχύ, ισχύει:

$$P = \frac{dE}{dt}, \quad E = \int P dt \quad (2.2)$$

Η ισχύς σαν ενέργεια στη μονάδα του χρόνου μετριέται σε **Watts (W)** ή στο πολλαπλάσιό της kW. Η μονάδα Joule είναι αρκετά μικρή και έτσι στις εφαρμογές της ηλεκτροτεχνίας συνηθίζεται και η χρήση της μεγαλύτερης μονάδας **βαττώριο ή κιλοβαττώριο (Wh ή kWh)** για τη μέτρηση της ενέργειας. Η μονάδα αυτή ορίζεται ως η ενέργεια που καταναλώνεται από καταναλωτή ισχύος 1 kW σε μια ώρα. Εφόσον δε 1 ώρα = 3600 s, προφανώς 1 kWh = 3600 Joule. Η σχέση που δίνει την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται σε ένα στοιχείο κυκλώματος που λειτουργεί με διαφορά δυναμικού V και διαρρέεται από ρεύμα I , ή αντίστοιχα, που παράγεται από μια πηγή τάσης V που διαρρέεται από ρεύμα I είναι,

$$P = VI \quad (2.3)$$

η οποία, στην περίπτωση καταναλωτή ισχύος με αντίσταση R , γίνεται σύμφωνα και με τον Νόμο του Ohm:

$$P = VI = V^2/R = I^2R \quad (2.4)$$

Επανερχόμενοι στο παράδειγμα του κυκλώματος του Σχ. 2.3β, εάν το ρεύμα στο κύκλωμα είναι 250mA και η τάση της μπαταρίας 3V, τότε η ισχύς που δίνει η μπαταρία στο κύκλωμα είναι:

$$3V \times 0,25A = 0,75W = 750mW$$

Αντίστοιχα η ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση θα είναι σύμφωνα με την (2.4).

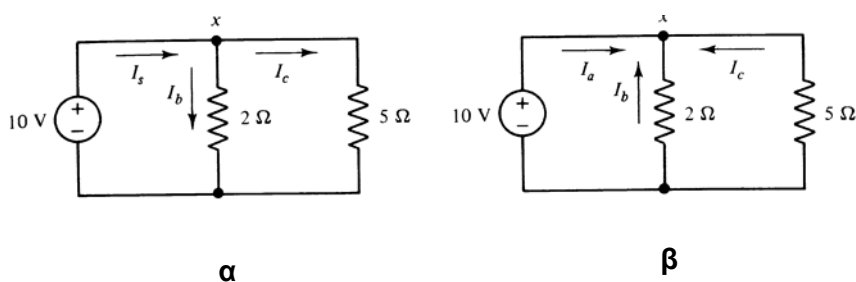
$$(0,25A)^2 \times 12\Omega = 0,75W$$

Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς, προφανώς, όλη η ισχύς που δίνει η μπαταρία καταναλώνεται αποκλειστικά από την αντίσταση. Συνεπώς ο φακός του παραδείγματός μας έχει ισχύ κάτι λιγότερο από 1 W και σε 1000 ώρες λειτουργίας θα καταναλώσει λιγότερο από 1 kWh, μια συνηθισμένη λάμπα πυράκτωσης έχει ισχύ γύρω στα 100 W και καταναλίσκει 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας σε 10 ώρες λειτουργίας ενώ ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνας του σπιτιού μας με ισχύ 4 kW καταναλώνει 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά 15λεπτο λειτουργίας. Η μέση ισχύς ενός σπιτιού είναι γύρω στα 5kW, μιας βιομηχανίας μεγαλύτερη από 200 kW φτάνοντας σε ορισμένες μεγάλες μονάδες και τις δεκάδες MW.

2.5 Νόμοι του Kirchhoff.

Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, κάθε σημείο σύνδεσης δύο ή περισσότερων αγωγών λέγεται **κόμβος**. Επιπλέον, κάθε κλειστή διαδρομή που ορίζεται από αγωγούς ενός κυκλώματος ονομάζεται **βρόχος**. Ο **πρώτος νόμος του Kirchhoff**, ή **νόμος των ρευμάτων των κόμβων**, δηλώνει ότι σε κάθε κόμβο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, το άθροισμα των εισερχομένων ρευμάτων ισούται με το αντίστοιχο των εξερχόμενων. Εξετάζοντας το κύκλωμα του Σχ. 2.5α, τα ρεύματα I_b και I_c είναι 5A και 2A αντίστοιχα, όπως προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου του Ohm. Στον κόμβο x, το ρεύμα I_s προκύπτει σύμφωνα με τον νόμο του Kirchhoff ίσο με το άθροισμα των δυο αυτών ρευμάτων, δηλαδή 7A. Εάν η φορά των ρευμάτων ορισθεί έτσι ώστε όλα να εισέρχονται (ή αντίστοιχα να εξέρχονται) στον κόμβο, τότε ο πρώτος νόμος του Kirchhoff εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$\sum I = 0 \quad (2.5)$$

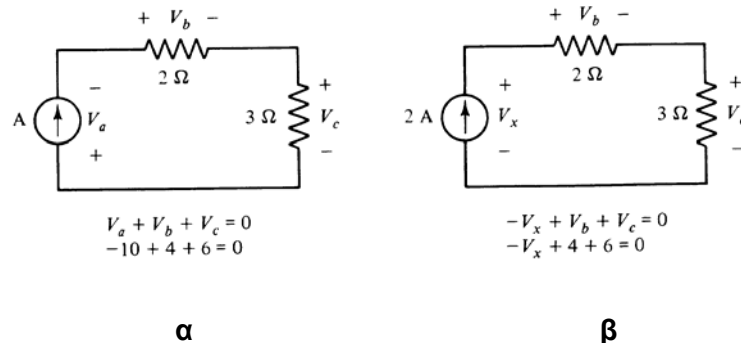


Σχήμα 2.5. Πρώτος νόμος του Kirchhoff, ή νόμος των ρευμάτων των κόμβων.

Στο Σχ. 2.5β φαίνεται η υλοποίηση της προσέγγισης αυτής με τα ρεύματα όλα να θεωρούνται ότι μπαίνουν στον κόμβο. Ο πρώτος νόμος του Kirchhoff είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση κυκλωμάτων με διακλαδώσεις και κόμβους. Στην περίπτωση της σειριακής σύνδεσης στοιχείων σε ένα κύκλωμα, ο **δεύτερος νόμος του Kirchhoff**, ή **νόμος των τάσεων των κλάδων**

προσφέρει ένα συμπληρωματικό εργαλείο ανάλυσης. Σύμφωνα με αυτόν, το άθροισμα των πτώσεων των τάσεων κατά μήκος ενός κλειστού βρόχου, είναι μηδέν, ή μαθηματικά:

$$\sum V = 0 \quad (2.6)$$



Σχήμα 2.6. Δεύτερος νόμος του Kirchhoff, ή νόμος των τάσεων των κλάδων

Θεωρώντας το Σχ. 2.6α, εάν η πηγή τροφοδοτεί το κύκλωμα με ένα ρεύμα 2Α, τότε από το νόμο του Ohm προκύπτουν οι πτώσεις τάσεις V_b και V_c , οι οποίες έχουν τιμές 4V και 6V αντίστοιχα. Ορίζοντας τις πολικότητες των τάσεων με τέτοιο τρόπο, ώστε παρατηρητής κινούμενος δεξιόστροφα να τις βλέπει όλες σαν πτώσεις τάσης, προκύπτει ότι, σύμφωνα με το νόμο των τάσεων του Kirchhoff, η τάση V_a ισούται με -10V, με την αρνητική τιμή να δηλώνει αντίθετη πολικότητα από αυτήν που αυθαίρετα επιλέχθηκε. Έτσι οι ορθές πολικότητες φαίνονται στο Σχ. 2.6β.

2.6 Σύνθεση αντιστάσεων.

Μία άμεση εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff, οδηγεί στις παρακάτω σχέσεις που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στις περιπτώσεις ανάλυσης κυκλωμάτων.

Σε περιπτώσεις αντιστάσεων συνδεδεμένων σε σειρά, αυτές μπορούν να αντικατασταθούν με μια ισοδύναμη, η τιμή της οποίας ισούται με το άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων. Δηλαδή,

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (2.7).$$

Ορίζοντας την **ηλεκτρική αγωγιμότητα** ενός στοιχείου κυκλώματος σαν το αντίστροφο της αντίστασής του, με μονάδες Ω^{-1} ή **Siemens (S)**, τότε σε περιπτώσεις αντιστάσεων συνδεδεμένων παράλληλα, αυτές μπορούν να αντικατασταθούν από μια ισοδύναμη, η αγωγιμότητα της οποίας ισούται με το άθροισμα των επιμέρους αγωγιμοτήτων, δηλαδή:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (2.8).$$

3 ΒΑΣΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

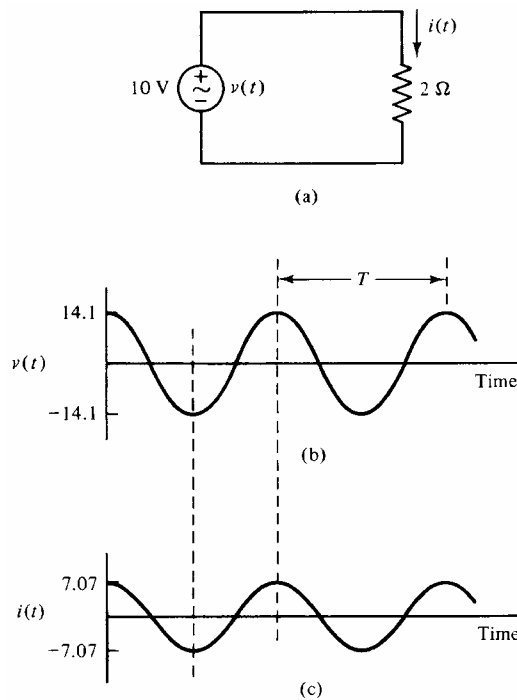
Στην ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου έγινε η παραδοχή ότι οι τάσεις και τα ρεύματα έχουν σταθερή τιμή ανεξάρτητη του χρόνου. Τα μεγέθη αυτά χαρακτηρίστηκαν σαν **συνεχείς τάσεις και ρεύματα** αντίστοιχα (**direct voltages and currents d.c.**) Στην πράξη όμως σχεδόν όλες οι ηλεκτρικές διατάξεις, είτε ισχυρών είτε ασθενών ρευμάτων, λειτουργούν με ρεύματα και τάσεις των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται σαν συνάρτηση του χρόνου. Τα μεγέθη αυτά χαρακτηρίζονται ως **εναλλασσόμενα ρεύματα ή τάσεις** (**alternating voltages, current ή a.c.**). Αν και οι γενικές αρχές της κυκλωματικής ανάλυσης και οι σχετικοί νόμοι που αναπτύχθηκαν για το συνεχές ρεύμα ισχύουν και για το εναλλασσόμενο, είναι απαραίτητη μία εμβάθυνση στη μορφή και τις ιδιότητες των εναλλασσόμενων ρευμάτων και τάσεων για την κατανόηση των ιδιοτήτων τους, τον ορισμό κάποιων νέων ηλεκτρικών μεγεθών, καθώς και τον ορισμό της επαγωγής και της χωρητικότητας.

3.1 Κυματομορφές εναλλασσόμενων ρευμάτων και τάσεων

Στο Σχ. 3.1α παρουσιάζεται ένα κύκλωμα, όπου μία αντίσταση 2Ω συνδέεται με μία πηγή χρονικά μεταβαλλόμενης τάσης 10 V . Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα, όπως προκύπτει από τον νόμο Ohm, ο οποίος ισχύει και στην περίπτωση αυτή είναι 5 A .

Η τάση της πηγής στο Σχ. 3.1α μπορεί να εμφανίζει τυχαία μεταβολή σαν συνάρτηση του χρόνου. Ιδιαίτερο όμως ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά μεγέθη τα οποία εμφανίζουν αρμονική μεταβολή, δηλαδή είναι είτε ημιτονοειδείς είτε συνημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου. Μια τέτοια τυπική κυματομορφή εναλλασσόμενης τάσης φαίνεται στο Σχ. 3.1β. Η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι ημιτονοειδής αλλά η ανάλυση που ακολουθεί ισχύει απόλυτα και για την περίπτωση των συνημιτονοειδών κυματομορφών. Η κυματομορφή της τάσης του κυκλώματος 3.1α μεταβάλλεται ανάμεσα σε 2 ακραίες τιμές $\pm 14,1\text{ V}$, 50 φορές το δευτερόλεπτο, ή με συχνότητα $f = 50\text{ Hz}$, με μηδενισμό της τιμής της 100 φορές μέσα σε ένα δευτερόλεπτο. Η μαθηματική έκφραση της κυματομορφής αυτής είναι:

$$v(t) = 14,1 \cos(2\pi f t) = 14,1 \cos(100\pi t) \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.1. Ημιτονοειδείς τάσεις και ρεύματα σε απλό ηλεκτρικό κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η τιμή 14,1 V ονομάζεται **μέγιστη τιμή (peak value)** της τάσης. Η τιμή όμως ενός εναλλασσόμενου ηλεκτρικού μεγέθους, η οποία έχει ενδιαφέρον στην ανάλυση, είναι η **ενεργή τιμή (effective value)**, η οποία, λόγω του ορισμού της, ονομάζεται και **root-mean-square (rms) τιμή**. Η ενεργή τιμή συνδέεται με την αντίστοιχη μέγιστη με τη σχέση:

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (3.2)$$

Η ενεργή τιμή της τάσης του Ελληνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο σπίτι είναι 220 V. Η ενεργή τιμή των εναλλασσόμενων ηλεκτρικών μεγεθών είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος, καθώς είναι εκείνη την οποία μετρούν τα όργανα μέτρησης και συνεπώς αυτή χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει ένα τέτοιο μέγεθος. Στο κύκλωμα του Σχ.3.1α οι τιμές των 10V και 5A είναι οι ενεργές τιμές της τάσης και έντασης αντίστοιχα.

Η **περίοδος T** ενός αρμονικά μεταβαλλόμενου μεγέθους, είναι ο χρόνος που απαιτείται για έναν πλήρη κύκλο μεταβολής του μεγέθους. Η περίοδος T συνδέεται με τη **συχνότητα f** με τη σχέση

$$T = 1/f \quad (3.3)$$

Έτσι η περίοδος τάσεων και ρευμάτων 50 Hz είναι $T = 20 \text{ ms}$. Το μέγεθος $2\pi f$ που περιλαμβάνεται στην (3.1) είναι γνωστό σαν **γωνιακή ταχύτητα ω** με μονάδες **rad/s**. Μετά τους ορισμούς αυτούς, η (3.1) μπορεί πλέον να διατυπωθεί και διαφορετικά:

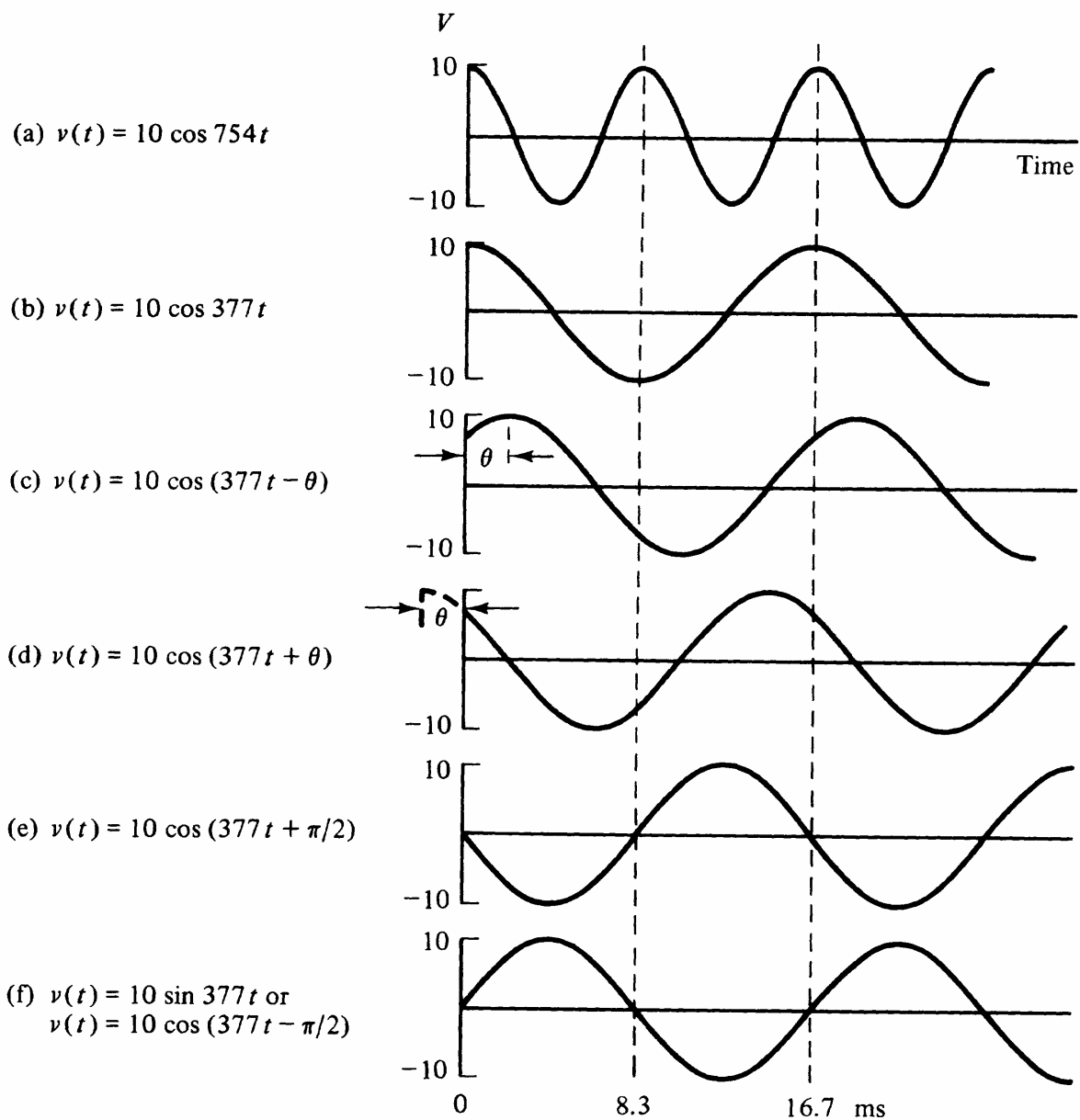
$$v(t) = V_{peak} \cos(\omega t) = \sqrt{2} V_{rms} \cos(2\pi f t) \quad (3.4)$$

Σημειώνεται ότι στη συνέχεια, κάθε αναφορά σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό μέγεθος θα αναφέρεται στις ενεργές τιμές (rms) των μεγεθών, χωρίς χρήση του αντίστοιχου δείκτη.

Έχοντας ορίσει τα μεγέθη αυτά, προκύπτει εύκολα η κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα, όπως στο Σχ. 3.1γ. Προφανώς για κάθε χρονική στιγμή, οι τάσεις και τα ρεύματα προκύπτουν με βάση τον νόμο του Ohm.

Μια πιο γενικευμένη τέλος έκφραση της τάσης $v(t)$ είναι η παρακάτω:

$$v(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \theta) \quad (3.5)$$



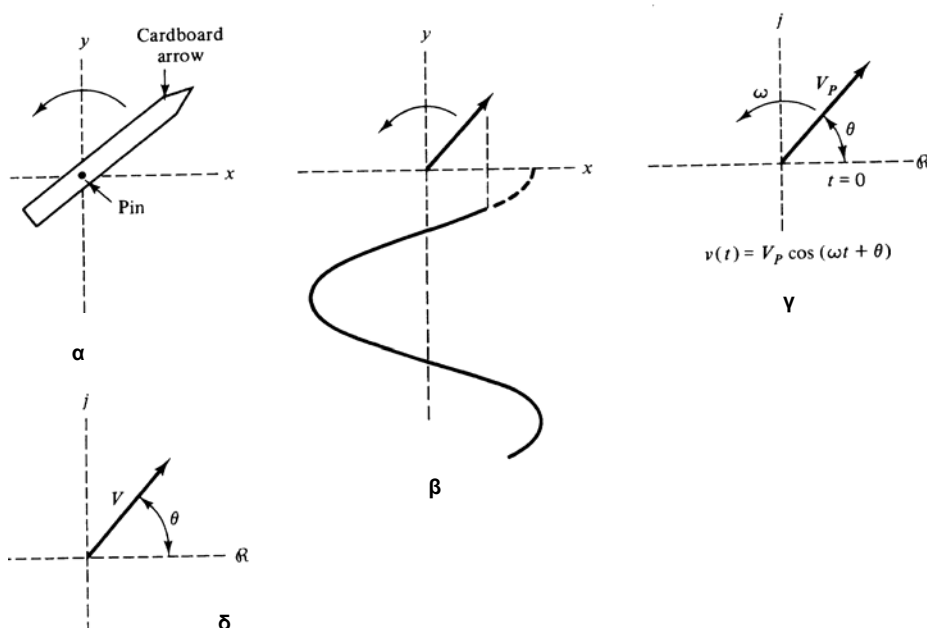
Σχήμα 3.2. Επίδραση της φασικής απόκλισης θ στην κυματομορφή της τάσης.

Η γωνία θ σε rad της (3.5) λέγεται **φασική απόκλιση** ή απλά **φάση** της τάσης $v(t)$ και η επίδραση της στην κυματομορφή είναι μία μετακίνηση της κυματομορφής της τάσης πιο δεξιά (θετική θ) ή πιο αριστερά (αρνητική θ) στον άξονα του χρόνου. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται παραστατικά στο Σχ.3.2.

3.2 Παράσταση εναλλασσομένων μεγεθών με φασικά διανύσματα (phasors)

Στην προηγούμενη ανάλυση παρουσιάστηκε η μαθηματική και η γραφική παράσταση των εναλλασσομένων μεγεθών της τάσης και του ρεύματος. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν δυο διαφορετικές και ιδιαίτερα εξυπηρετικές μορφές παράστασης εναλλασσόμενων ηλεκτρικών μεγεθών.

Αρχικά θεωρείται ένα σύστημα αξόνων και ένα διάνυσμα το οποίο μπορεί να περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στο επίπεδο των αξόνων που διέρχεται από την αρχή τους με φορά περιστροφής αντίθετα από εκείνη των δεικτών του ρολογιού, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3α. Σε κάθε χρονική στιγμή, η προβολή του άκρου του στρεφόμενου διανύσματος πάνω στον οριζόντιο άξονα μεταβάλλεται ανάμεσα στις τιμές 0 και το μήκος του διανύσματος. Εάν θεωρηθεί η γραφική παράσταση της μεταβολής του πλάτους της προβολής του διανύσματος στον οριζόντιο άξονα σαν συνάρτηση του χρόνου, τότε προκύπτει ένα ημιτονοειδές (ή αντίστοιχα συνημιτονοειδές) κύμα που εκφράζει τη χρονική μεταβολή αυτής της απλής αρμονικής κίνησης, σύμφωνα και με το Σχ. 3.3β.



Σχήμα 3.3. Παράσταση ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενων μεγεθών με φασικά διανύσματα.

Η αντιστοίχιση αυτή είναι σημαντική, καθώς επιτρέπει την παράσταση ενός αρμονικά μεταβαλλόμενου μεγέθους με ένα στρεφόμενο διάνυσμα, το οποίο καλείται και **φασικό διάνυσμα**

(phasor). Τα ονομαστικά στοιχεία του φασικού διανύσματος, δηλαδή το μέτρο του, η γωνία θ τη χρονική στιγμή $t=0$ και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω , επιτρέπουν την άμεση μαθηματική παράσταση της χρονικής μεταβολής του εναλλασσόμενου μεγέθους με την (3.5). Για την παράσταση ενός φασικού διανύσματος χρησιμοποιείται η παρακάτω μαθηματική σύμβαση

$$V_p \angle \omega t + \theta \quad (3.6)$$

όπου V_p η μέγιστη τιμή της τάσης, θ η φάση και ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του. Καθώς η συχνότητα f και η γωνιακή ταχύτητα ω ενός εναλλασσόμενου ηλεκτρικού μεγέθους, είναι στοιχεία που διατηρούν σταθερές και χαρακτηριστικές τιμές (πχ 50 Hz ή 60 Hz) δεν υπάρχει συνήθως λόγος συνεχούς αναφοράς των και συνεπώς η (3.6) μπορεί να απλοποιηθεί στη μορφή

$$V_p \angle \theta = V \sqrt{2} \angle \theta \quad (3.7)$$

Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, οι ενεργές τιμές χαρακτηρίζουν συνήθως τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη, η (3.7) μπορεί να απλοποιηθεί ακόμη παραπάνω σαν

$$\bar{V} = V \angle \theta \quad (3.8)$$

όπου $\bar{V}$ η παράσταση του φασικού διανύσματος.

Αυτή η μετατροπή της τάσης από ημιτονοειδές μέγεθος σε φασικό διάνυσμα ονομάζεται μετατροπή από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων.

Εάν τέλος θεωρηθεί ότι το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων αντικαθίσταται από ένα μιγαδικό επίπεδο με τον άξονα των πραγματικών αριθμών κατά τα x και τον άξονα των φανταστικών αριθμών κατά τα y , τότε, σύμφωνα και με το Σχ. 3.3δ, το φασικό διάνυσμα παριστάνει ένα μιγαδικό αριθμό με πραγματικό μέρος και φανταστικό μέρος που δίνονται από τις (3.9α) και (3.9β) αντίστοιχα.

$$\text{Re}(\bar{V}) = V \cos \theta \quad (3.9\alpha)$$

$$\text{Im}(\bar{V}) = V \sin \theta \quad (3.9\beta)$$

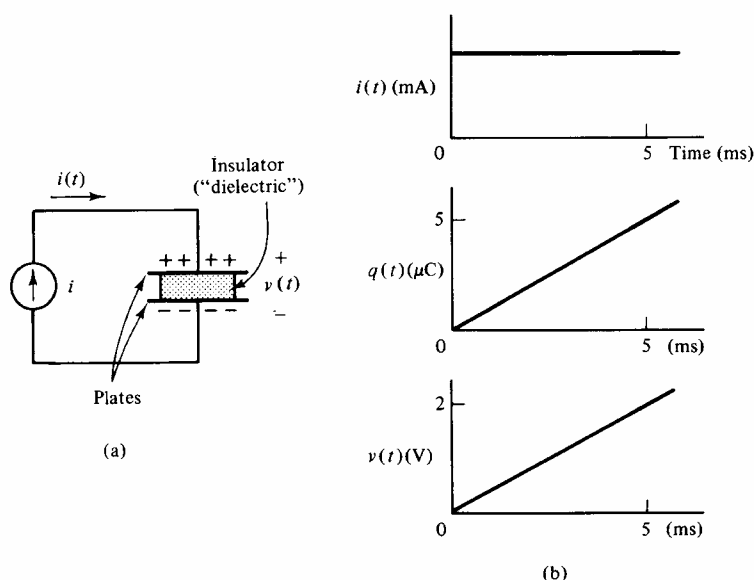
3.3 Πυκνωτές και πηνία

Στο σημείο αυτό ορίζονται δύο νέα παθητικά στοιχεία, ο πυκνωτής και το πηνίο που εμφανίζουν **χωρητικότητα C** και **αυτεπαγωγή L** αντίστοιχα. Σε αντίθεση με την ωμική αντίσταση R , που ορίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Ohm και εκφράζει μία γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση στα άκρα της και στο ρεύμα που την διαρρέει στους πυκνωτές και τα πηνία, οι τάσεις και τα ρεύματα συνδέονται με μη γραμμικές σχέσεις και επιπλέον οι ηλεκτρικές ιδιότητες των στοιχείων αυτών εξαρτώνται και από την συχνότητα της τάσης και του ρεύματος.

Ένας πυκνωτής αποτελείται φυσικά από 2 αγωγίμες πλάκες που χωρίζονται από ένα μονωτικό (διηλεκτρικό) μέσο. Το διηλεκτρικό αυτό μπορεί να είναι αέρας, όπως στην περίπτωση μεταβλητών πυκνωτών ή κάποιο συνθετικό υλικό σε λεπτά φύλλα. Ο πυκνωτής σαν ηλεκτρικό στοιχείο, εμφανίζει **χωρητικότητα (capacitance)** η οποία συμβολίζεται με C και μετριέται σε **Farads (F)** ή, πιο συνηθισμένα σε υποδιαιρέσεις του F. Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται από τις διαστάσεις του και το είδος του διηλεκτρικού και δίνεται από τη σχέση:

$$C = A \epsilon / d \quad (3.10)$$

Η παράμετρος ϵ λέγεται **διηλεκτρική σταθερά** και χαρακτηρίζει το διηλεκτρικό υλικό. Για τον αέρα έχει την τιμή $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m δηλ. ένας πυκνωτής με επιφάνεια πλακών $A = 10 \text{ cm}^2$ και απόσταση $d = 1 \text{ mm}$ θα έχει χωρητικότητα $C = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 8,85 \text{ pF}$.



Σχήμα 3.4. Πυκνωτής φορτιζόμενος από πηγή συνεχούς ρεύματος.

Εάν ένας πυκνωτής συνδεθεί στο δίκτυο, όπως στο Σχ.3.4, τότε ανάμεσα στην τάση των άκρων του και στο ρεύμα που τον διαρρέει ισχύει η σχέση

$$i = C \frac{dV}{dt} \quad (3.11\alpha)$$

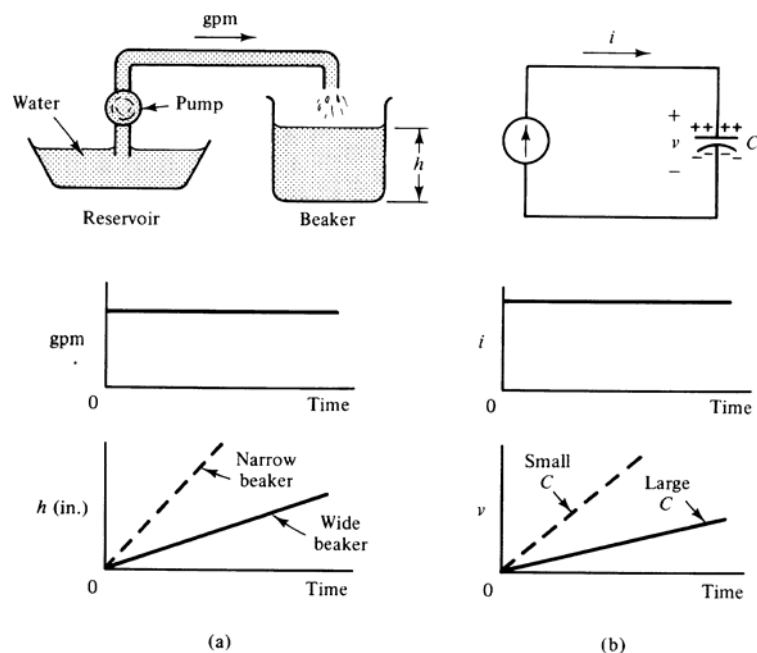
ή αντίστοιχα

$$V = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3.11\beta)$$

Ορίζοντας το **ηλεκτρικό φορτίο q** που αποθηκεύεται στον πυκνωτή από τη σχέση

$$q = CV \quad (3.12)$$

προκύπτουν οι καμπύλες του Σχ.3.4β για την περίπτωση της φόρτισης του πυκνωτή C με ένα σταθερό ρεύμα $i(t)$. Ένα μηχανικό ανάλογο της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του πυκνωτή στο προηγούμενο παράδειγμα, φαίνεται στο Σχ.3.5. Ο πυκνωτής ισοδυναμεί με το δοχείο, το οποίο γεμίζει από μία δεξαμενή (πηγή) με σταθερή παροχή (ρεύμα) με νερό (φορτίο). Έτσι το νερό (φορτίο) φθάνει σε ορισμένο ύψος (τάση) στο δοχείο (πυκνωτή). Όσο πιο στενό είναι το δοχείο (μικρή χωρητικότητα) τόσο πιο ψηλά ανεβαίνει η στάθμη (τάση) στον ίδιο χρόνο t . Εάν σταματήσει η παροχή νερού ($i = 0$) τότε, όπως προκύπτει και από την (3.11), το ύψος του νερού στο δοχείο, δηλαδή η τάση στα άκρα του πυκνωτή, παραμένει σταθερή. Τότε ο πυκνωτής λέγεται φορτισμένος. Επίσης εάν η παροχή νερού (ρεύμα) συνεχιστεί θεωρητικά για μεγάλο χρόνο, η στάθμη στο δοχείο (τάση) ξεπερνά κάποια μέγιστη επιτρεπτή τιμή με αποτέλεσμα την καταστροφή του πυκνωτή.

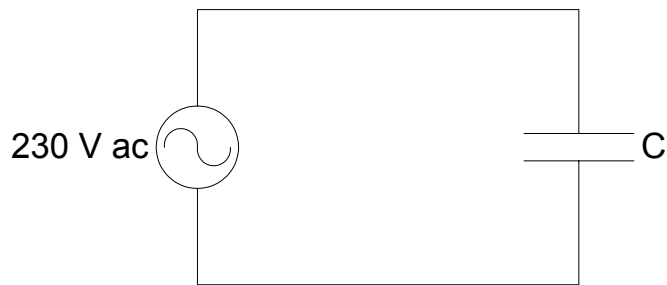


Σχήμα 3.5. Υδραυλικό ισοδύναμο της φόρτισης ενός πυκνωτή.

Από τη σχέση 3.11α προκύπτει ότι αν η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι σταθερή σαν συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή αν ο πυκνωτής συνδεθεί σε ένα κύκλωμα συνεχούς ρεύματος, τότε το ρεύμα του πυκνωτή είναι μηδέν. Άρα στο συνεχές ρεύμα ο πυκνωτής συμπεριφέρεται σαν ανοιχτός διακόπτης.

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα όμως τα πράγματα είναι διαφορετικά. Έτσι, όταν ένας πυκνωτής συνδεθεί απευθείας με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης, δεν συμπεριφέρεται ως διακόπτης. Στην περίπτωση αυτή για να αναλύσουμε το κύκλωμα του Σχ. 3.6, βολεύει να αναπαραστήσουμε όλα τα μεγέθη σε μορφή φασικού διανύσματος. Για να γίνει κάτι τέτοιο πρέπει η σχέση 3.11α να μετασχηματιστεί στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτό γίνεται ως εξής:

$$i = C \frac{dV}{dt} \Leftrightarrow \vec{i} = c(j\omega \vec{V}) \quad (3.13)$$

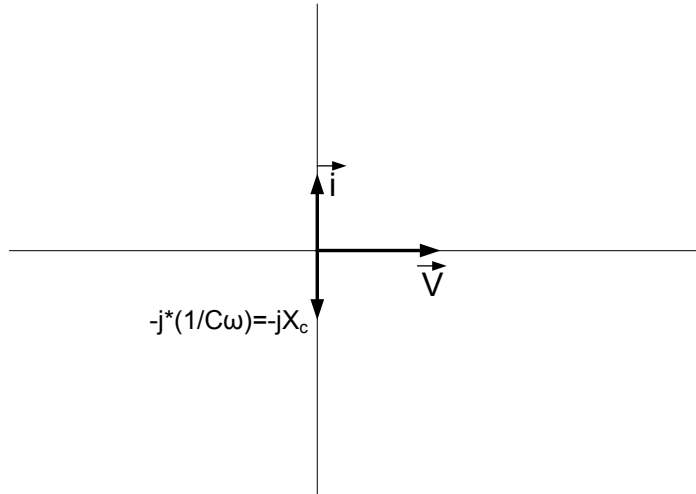


Σχήμα 3.6. Πυκνωτής στο εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η παράγωγος δηλαδή ως προς το χρόνο εισάγει στο πεδίο των συχνοτήτων τον παράγοντα $j\omega$, όπου j είναι η μιγαδική μονάδα. Αν η σχέση αυτή επιλυθεί ως προς την τάση γίνεται:

$$\vec{V} = -j \frac{1}{C\omega} \vec{i} = \frac{1}{C\omega} e^{-j90^\circ} \vec{i}, \text{ γιατί } -j = e^{-j90^\circ} \quad (3.14)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι για να υπολογίσουμε την τάση στα άκρα του πυκνωτή, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το φασικό διάνυσμα του ρεύματος με τον παράγοντα e^{-j90° και με το συντελεστή $1/(C\omega)$. Ο πρώτος πολλαπλασιασμός σημαίνει στροφή του διανύσματος του ρεύματος κατά -90 μοίρες (θυμίζουμε ότι η θετική φορά περιστροφής είναι η αντίθετη των δεικτών του ρολογιού). Ο δεύτερος σημαίνει πολλαπλασιασμό με έναν πραγματικό αριθμό που είναι η **αντίδραση** του πυκνωτή. Στο διανυσματικό διάγραμμα όλα αυτά παριστάνονται ως εξής:



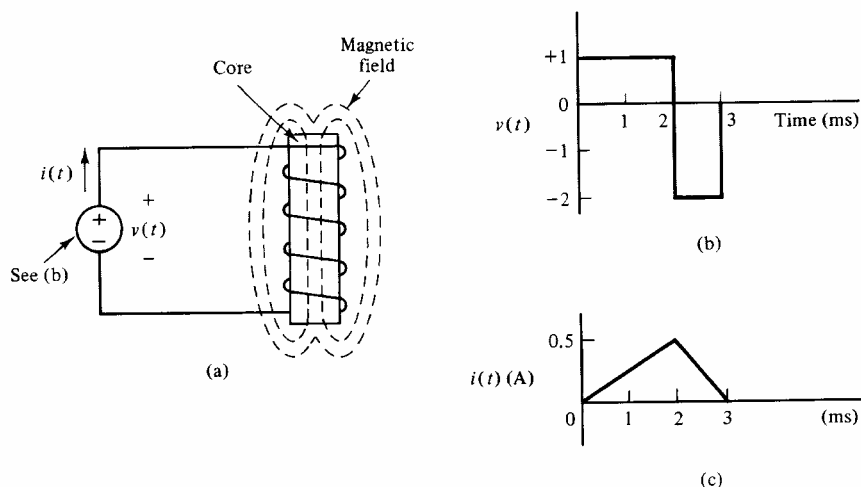
Από το διανυσματικό διάγραμμα φαίνεται ότι το ρεύμα του πυκνωτή στο πεδίο του χρόνου προπορεύεται της τάσης του κατά μία φάση 90 μοιρών.

Δηλαδή η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή στο εναλλασσόμενο ρεύμα είναι

$$Z_c = -j \frac{1}{\omega C} \quad (3.15)$$

Ένα πηνίο σχηματίζεται συνήθως από ένα κομμάτι σύρμα τυλιγμένο σωληνοειδώς. Έτσι λόγω κατασκευής εμφανίζει μία μικρή, αλλά αναπόφευκτη, ωμική αντίσταση σε αντίθεση με τον πυκνωτή. Μερικές φορές στο κέντρο του σωληνοειδούς υπάρχει ένας πυρήνας από μαλακό σίδηρο. Εάν το πηνίο συνδεθεί σε τάση, το ρεύμα που το διαρρέει δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο

στο κέντρο του πηνίου και στον αέρα γύρω από αυτό, όπως φαίνεται στο Σχ.3.7. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το πηνίο να συμπεριφέρεται σαν ένας μαγνήτης (ηλεκτρομαγνήτης).



Σχήμα 3.7. Σύνδεση πηνίου σε ηλεκτρικό κύκλωμα.

Το πηνίο εμφανίζει **επαγωγή (inductance) L** , η οποία μετριέται σε **Henry (H)**. Η επαγωγή ενός πηνίου χαρακτηρίζεται και σαν **αυτεπαγωγή (self-inductance)** σε αντιδιαστολή με την **αμοιβαία επαγωγή (mutual inductance)** που εμφανίζεται όταν 2 ή περισσότερα πηνία βρίσκονται το ένα κοντά στα άλλα. Η αυτεπαγωγή εξαρτάται από τη γεωμετρία του πηνίου, το πλήθος των σπειρών και τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του πυρήνα του.

Εάν το πηνίο συνδεθεί σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, όπως στο Σχ.3.7, τότε η τάση στα άκρα του και το ρεύμα που το διαρρέει συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (3.16\alpha)$$

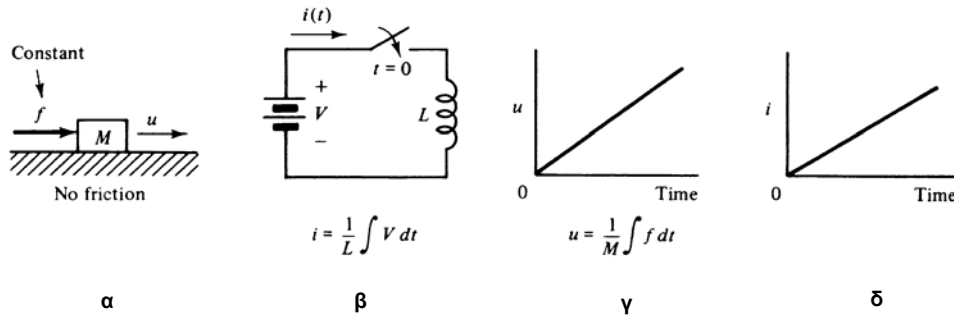
ή αντίστοιχα

$$i = \frac{1}{L} \int V dt \quad (3.16\beta)$$

Με την εφαρμογή σταθερής τάσης, το ρεύμα αρχίζει να ρέει και να αυξάνεται, δημιουργώντας ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που τέμνει τα τυλίγματα του πηνίου. Η μεταβολή αυτή του μαγνητικού πεδίου παράγει μία τάση που αντιτίθεται στην μεταβολή του ρεύματος. Έτσι το ρεύμα αυξάνεται σταδιακά σύμφωνα με το Σχ.3.7γ. Αντίστοιχα κατά την μείωση του ρεύματος, το μαγνητικό πεδίο ελαττώνεται δημιουργώντας μία τάση που αντιτίθεται σε αυτήν τη μείωση.

Ένα παραστατικό μηχανικό ανάλογο για τη λειτουργία της αυτεπαγωγής φαίνεται στο Σχ.3.8. Μία μάζα μπορεί να ολισθαίνει (χωρίς τριβές) σε ένα επίπεδο. Η μάζα (αυτεπαγωγή) ηρεμεί (μηδενικό ρεύμα) μέχρι να επιδράσει πάνω της κάποια δύναμη (τάση) για κάποιο χρονικό διάστημα t . Τότε αρχίζει να κινείται με επιτάχυνση. Εάν η δύναμη σταματήσει, η μάζα διατηρεί

θεωρητικά σταθερή ταχύτητα, αν και στην πράξη υπάρχουν αναπόφευκτες μικρές τριβές (ωμικές αντιστάσεις) που σταδιακά θα την ακινητοποιήσουν. Εάν θέλουμε να την ακινητοποιήσουμε σύντομα, πρέπει να εφαρμόσουμε μία αντίθετη δύναμη (τάση), που θα οδηγήσει στην σταδιακή ακινητοποίηση (μηδενισμό ρεύματος).



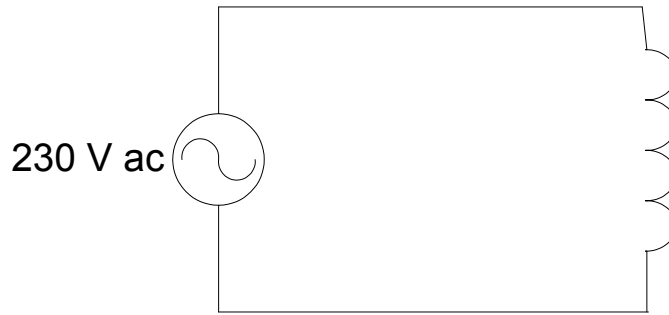
Σχήμα 3.8. Μηχανικό ισοδύναμο επαγωγής

Όπως και στην περίπτωση του πυκνωτή, από τη σχέση 3.16α φαίνεται ότι ένα συνεχές ρεύμα που διαρρέει ένα πηνίο δεν δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα άκρα του, πέρα από την πτώση τάσης στην ωμική του αντίσταση. Άρα όταν το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο είναι συνεχές, το πηνίο συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα, αν θεωρήσουμε την ωμική αντίστασή του αμελητέα. Καθώς το ρεύμα είναι ανάλογο με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται και με βάση ένα βασικό θεώρημα της ηλεκτροτεχνίας, το θεώρημα της επαλληλίας, μπορούμε να οδηγηθούμε στα παρακάτω συμπεράσματα.

Εάν ένα πηνίο βρεθεί μέσα σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, που έχει δημιουργηθεί από κάποιο άλλο πηνίο, τότε σε αυτό ρέει ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα και στα άκρα του αναπτύσσεται μια τάση. Η τάση αυτή δεν δημιουργείται από κάποια πηγή τάσης αλλά **εξ επαγωγής** από το μαγνητικό πεδίο. Η συμπεριφορά αυτή των πηνίων αποτελεί και τη βάση λειτουργίας των μετασχηματιστών, που θα εξεταστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Εάν βέβαια ένα πηνίο συνδεθεί απευθείας με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης, δεν συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα. Στην περίπτωση αυτή για να αναλύσουμε το κύκλωμα του Σχ. 3.9, βολεύει να αναπαραστήσουμε όλα τα μεγέθη σε μορφή φασικού διανύσματος. Για να γίνει κάτι τέτοιο πρέπει η σχέση 3.16α να μετασχηματιστεί στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτό γίνεται ως εξής:

$$V = L \frac{di}{dt} \Leftrightarrow \bar{V} = L(j\omega \bar{i}) \quad (3.17)$$

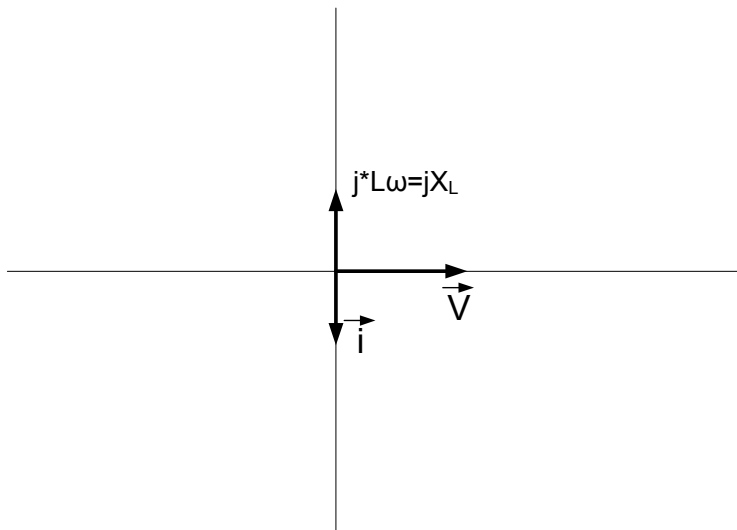


Σχήμα 3.9. Πηνίο στο εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η παράγωγος δηλαδή ως προς το χρόνο εισάγει στο πεδίο των συχνοτήτων τον παράγοντα $j\omega$, όπου j είναι η μιγαδική μονάδα. Αν η σχέση αυτή επιλυθεί ως προς την τάση γίνεται:

$$\vec{V} = jL\omega\vec{i} = L\omega e^{j90^\circ}\vec{i}, \quad j = e^{j90^\circ} \quad (3.19)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι για να υπολογίσουμε την τάση στα άκρα του πηνίου, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το φασικό διάνυσμα του ρευματος με τον παράγοντα e^{j90° και με το συντελεστή $L\omega$. Ο πρώτος πολλαπλασιασμός σημαίνει στροφή του διανύσματος της τάσης κατά 90 μοίρες (θυμίζουμε ότι θετική φορά περιστροφής είναι η αντίθετη των δεικτών του ρολογιού). Ο δεύτερος σημαίνει πολλαπλασιασμό με έναν πραγματικό αριθμό που είναι η **αντίδραση** του πηνίου. Στο διανυσματικό διάγραμμα όλα αυτά παριστάνονται ως εξής:



Από το διανυσματικό διάγραμμα φαίνεται ότι το ρεύμα του πηνίου στο πεδίο του χρόνου επιπορεύεται της τάσης του κατά μία φάση 90 μοιρών.

Δηλαδή η σύνθετη αντίσταση του πηνίου στο εναλλασσόμενο ρεύμα, αν η ωμική του αντίσταση θεωρηθεί αμελητέα είναι

$$Z_L = jL\omega \quad (3.20)$$

Αν συμπεριλάβουμε την ωμική αντίσταση, η σύνθετη αντίσταση του πηνίου είναι $R+jL\omega$.

3.4 Σύνθετη αντίσταση

Η ωμική αντίσταση εκφράζει, όπως προαναφέρθηκε, μία φυσική ιδιότητα των ηλεκτρικών αγωγών που εκφράζεται μαθηματικά από τη (2.1) και συνδέει γραμμικά τάσεις και ρεύματα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των χωρητικότητων και των αυτεπαγωγών με F και H αντίστοιχα, επιτρέπει την συσχέτιση του ρυθμού της μεταβολής των τάσεων και ρευμάτων. Δεν διευκολύνει όμως την κυκλωματική ανάλυση, καθώς εμπλέκει στιγμιαίες τιμές τάσεων και ρευμάτων, ενώ το ενδιαφέρον στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος επικεντρώνεται στις ενεργές τιμές των μεγεθών αυτών. Έτσι, ορίζεται ένα νέο μέγεθος το οποίο ονομάζεται **αντίδραση X** , μετριέται σε Ohm (Ω), όπως και η ωμική αντίσταση και δίνεται από τις σχέσεις

$$\text{Για χωρητικότητες} \quad X_c = \frac{1}{C\omega} \quad (3.21\alpha)$$

$$\text{Για αυτεπαγωγές} \quad X_L = L\omega \quad (3.21\beta)$$

όπου $\omega = 2\pi f$ η γωνιακή ταχύτητα της τάσης και του ρεύματος. Η αντίδραση ενός πηνίου ή ενός πυκνωτή, εξαρτάται λοιπόν από τη συχνότητα της τάσης και του ρεύματος σε αντίθεση με την ωμική αντίσταση που παραμένει σταθερή. Και μάλιστα η αντίδραση του πηνίου είναι ανάλογη της συχνότητας ενώ του πυκνωτή αντίστροφα ανάλογης αυτής. Έχοντας ορίσει την αντίδραση που είναι ένας πραγματικός αριθμός, ορίζεται ένα νέο μιγαδικό μέγεθος, **η σύνθετη αντίσταση ή εμπέδηση (impedance) Z** ενός στοιχείου ηλεκτρικού κυκλώματος εναλλασσόμενου ρεύματος, που αποτελείται γενικά από ωμική αντίσταση, επαγωγή και χωρητικότητα σύμφωνα με τη σχέση

$$Z = R + j(X_L - X_c) \quad (3.22)$$

Η σύνθετη αντίσταση μετριέται και αυτή σε Ohm (Ω). Το πραγματικό μέρος της είναι η ωμική αντίσταση του κυκλώματος, όμοια με εκείνη που ορίζεται από το νόμο του Ohm σε κυκλώματα συνεχούς ρεύματος και που εκφράζει φυσικά την πτώση τάσης σε ένα κύκλωμα, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα.

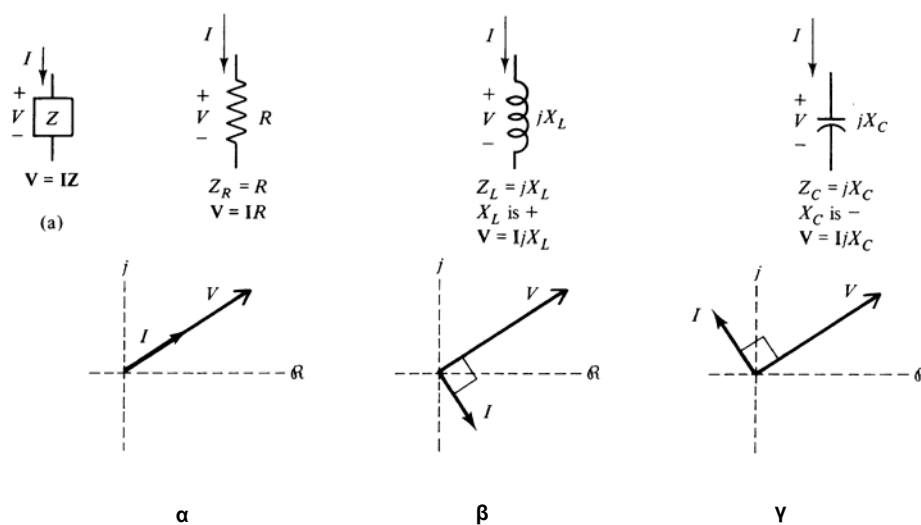
Το φανταστικό μέρος της Z , το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει μόνο τη X_L ή τη X_c ή και τις δυο, υπάρχει μόνο σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος και εκφράζει, φυσικά, τη μετατόπιση του φασικού διανύσματος του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα κατά μια γωνία φ σε σχέση με εκείνο της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, το Σχ.3.10 δείχνει τη θέση των φασικών διανυσμάτων τάσης και ρεύματος πάνω σε μία ωμική αντίσταση, σε ένα πηνίο και σε ένα πυκνωτή.

Φαίνεται ότι στην περίπτωση της ωμικής αντίστασης, το διάνυσμα του ρεύματος είναι συμφασικό με εκείνο της τάσης (Σχ.3.10α) και τα δύο στρέφονται αντίθετα από τους δείκτες του ρολογιού με γωνιακή ταχύτητα ω . Στην περίπτωση της καθαρής αυτεπαγωγής το διάνυσμα του

ρεύματος **έπεται (lag)** του διανύσματος της τάσης κατά $\pi/2$ rad ή 90 deg (Σχ. 3.10β), ενώ στην περίπτωση της χωρητικότητας (Σχ.3.10γ) το διάνυσμα του ρεύματος **προηγείται (lead)** του διανύσματος της τάσης κατά $\pi/2$ rad ή 90 deg.

Σε κάθε άλλη περίπτωση σύνθετης αντίστασης Z , το διάνυσμα του ρεύματος είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το διάνυσμα της τάσης κατά γωνία φ που δίνεται από τη σχέση

$$\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} \quad (3.16)$$



Σχήμα 3.10. Σχέσεις ρευμάτων τάσεων σε παθητικά R , L , C στοιχεία.

και έπεται ή προηγείται ανάλογα εάν υπερέχει ο επαγωγικός ή χωρητικός χαρακτήρας της Z .

Τέλος ορίζουμε ένα ακόμη μέγεθος το οποίο είναι το αντίστροφο της σύνθετης αντίστασης και λέγεται σύνθετη αγωγιμότητα ($Y=1/Z$). Έτσι η αγωγιμότητα ενός ιδανικού πηνίου είναι $1/(L\omega)$, ενός πυκνωτή $C\omega$ και της αντίστασης $1/R$.

3.5 Κυκλώματα παράλληλα και σειρές

Για τις συνδεσμολογίες αντιστάσεων ισχύουν οι νόμοι του Kirchhoff ακριβώς όπως προσδιορίζονται από τις (2.7) και (2.8), αν και η μιγαδική μορφή των Z περιπλέκει λίγο τους σχετικούς υπολογισμούς. Συγκεκριμένα:

Όταν τα ηλεκτρικά στοιχεία (αντιστάσεις, πηνία, πυκνωτές) είναι συνδεδεμένα σε σειρά, τότε η συνολική σύνθετη αντίσταση είναι το άθροισμα των σύνθετων αντιστάσεων.

$$Z_{ολ} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_v$$

Όταν τα ηλεκτρικά στοιχεία είναι συνδεδεμένα παράλληλα, τότε η συνολική σύνθετη αγωγιμότητα είναι το άθροισμα των σύνθετων αγωγιμοτήτων των στοιχείων.

$$Y_{ολ} = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n$$

Οι πράξεις φυσικά περιπλέκονται γιατί όλες οι παραπάνω οι σχέσεις αφορούν μιγαδικούς αριθμούς.

Για παράδειγμα, για την περίπτωση ενός κλάδου κυκλώματος που αποτελείται από μία ωμική αντίσταση και ένα πυκνωτή τοποθετημένα παράλληλα, η συνολική σύνθετη αγωγιμότητα είναι:

$$Y_{ολ} = Y_R + Y_C = (1/R) + (j\omega C) = G + j\omega C$$

4 Ενεργή ισχύς, άεργη ισχύς, συντελεστής ισχύος

Η ηλεκτρική ισχύς στα κυκλώματα συνεχούς ρεύματος ορίζεται σαν το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα. Τα μεγέθη αυτά όμως σε ένα κύκλωμα εναλλασσομένου ρεύματος είναι χρονικά μεταβαλλόμενα. Η ισχύς συνεπώς προκύπτει από τη σχέση.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (4.1)$$

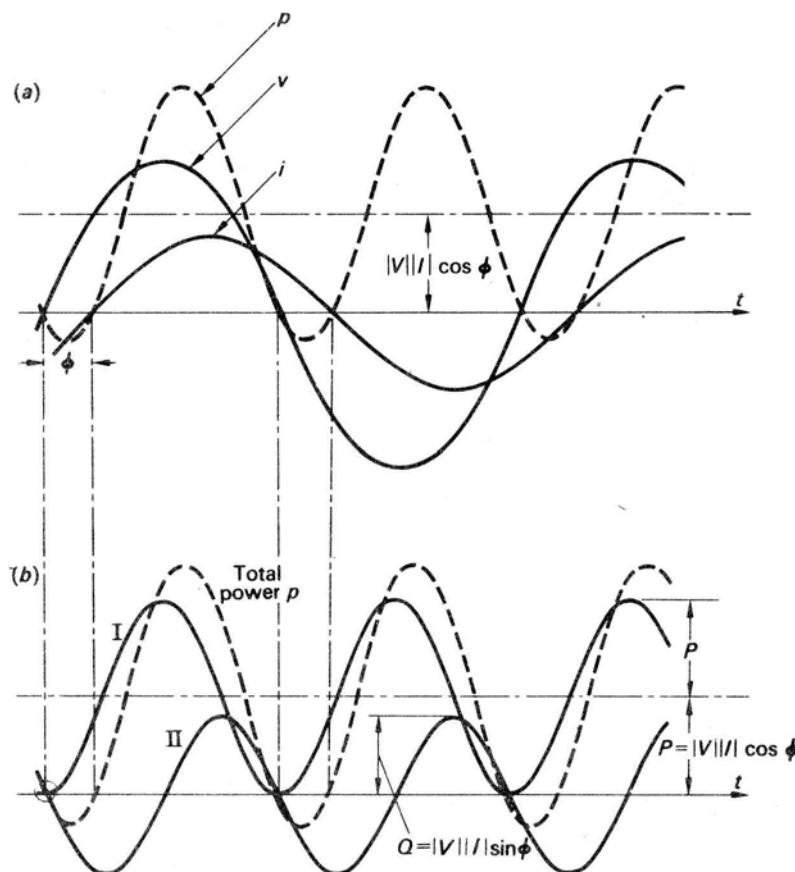
Θεωρώντας το κύκλωμα του σχήματος 3.1α, όπου μια πηγή συνδέεται με έναν καταναλωτή, έστω ότι η χρονική παράσταση της τάσης του καταναλωτή $v(t)$ και του ρεύματος $i(t)$ είναι αντίστοιχα:

$$v(t) = \sqrt{2}V_{rms} \cos(\omega t) \quad (4.2\alpha)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_{rms} \cos(\omega t - \phi) \quad (4.2\beta)$$

Η στιγμιαία τιμή της ισχύος του καταναλωτή θα δίνεται από τη (4.1) και θα είναι:

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) = 2V_{rms}I_{rms} [\cos(\omega t)\cos(\omega t - \phi)] = \\ &= V_{rms}I_{rms} [\cos \phi + \cos(2\omega t - \phi)] = V_{rms}I_{rms} \cos \phi + V_{rms}I_{rms} \cos(2\omega t - \phi) \end{aligned} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.1: Ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος. α) Στιγμιαία ισχύς, β) Καμπύλες ενεργού και άεργης ισχύος

Στο Σχήμα 4.1α φαίνεται η χρονική μεταβολή της τάσης του ρεύματος και της ισχύος σε ένα κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος. Στο σχήμα αυτό φαίνεται καθαρά, ότι, όπως προκύπτει και από τη (4.3), η ισχύς στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και μάλιστα με συχνότητα διπλάσια από εκείνη των τάσεων και των ρευμάτων. Η ισχύς αλλάζει επίσης πρόσημο, κάτι το οποίο φυσικά σημαίνει ότι για κάποιο χρονικό διάστημα ρέει έστω από την πηγή προς τον καταναλωτή, ενώ σε κάποιο άλλο χρονικό διάστημα η φορά ροής της ισχύος αντιστρέφεται. Η ταλάντωση αυτή γίνεται γύρω από μια μέση τιμή που είναι ίση με:

$$P = VI \cos \varphi \quad (4.4)$$

Η σταθερή αυτή μέση τιμή της $p(t)$ ορίζεται σαν **ενεργή ισχύς**, ή **πραγματική ισχύς**, ή απλά **ισχύς (active power, real power, power)**, είναι ένας πραγματικός αριθμός και μετριέται σε W.

Η (4.3) μπορεί επίσης να γραφεί όπως παρακάτω:

$$\begin{aligned} p(t) &= VI \cos \varphi + VI \cos(2\omega t - \varphi) = \\ &= VI \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t) + VI \sin \varphi \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (4.5)$$

Η γραφική παράσταση της (4.5) φαίνεται στο Σχ. 4.1β, όπου η συνολική ισχύς $p(t)$ έχει αναλυθεί σε δυο συνιστώσες. Η πρώτη, είναι πάντα θετική και ταλαντώνεται γύρω από μια μέση τιμή ίση με την ενεργή ισχύ P , που ορίστηκε με την (4.4). Η δεύτερη έχει μηδενική μέση τιμή και η μέγιστη τιμή της είναι:

$$Q = V I \sin \varphi \quad (4.6)$$

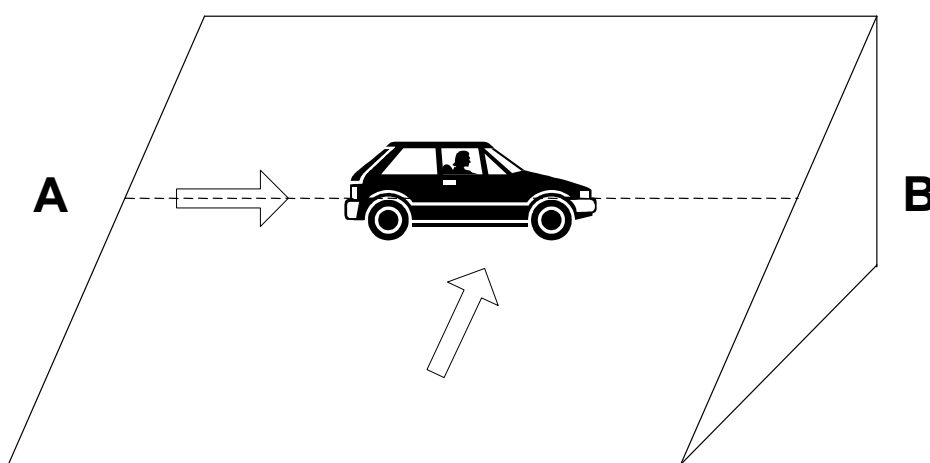
Το μέγεθος που ορίζεται με την παραπάνω σχέση ονομάζεται **άεργη ισχύς (reactive power)**. Η άεργη ισχύς έχει διαστάσεις ισχύος, είναι πραγματικός αριθμός και μετριέται σε **VAR (Volt Amper reactive)**.

Η άεργη ισχύς συνυπάρχει με την ενεργή ισχύ σχεδόν σε όλα τα συστήματα που λειτουργούν με εναλλασσόμενες τάσεις και ρεύματα, ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Δεν είναι δυνατή μετατροπή άεργου ισχύος σε ενεργή και αντίστροφα. Η άεργη ισχύς ταλαντώνεται μεταξύ της πηγής και του καταναλωτή με διπλάσια συχνότητα και με μηδενική μέση τιμή. Όπως υποδηλώνεται και από την ονομασία της, δεν παράγει έργο. Είναι, κατά κάποιο τρόπο, μια παρασιτική πλην αναπόφευκτη συνιστώσα ισχύος.

Αν θεωρήσουμε τρία κυκλώματα όπου μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοτεί ένα καθαρά ωμικό φορτίο ($\varphi=0$), μία ιδανική αυτεπαγωγή ($\varphi=90$) και έναν ιδανικό πυκνωτή ($\varphi=-90$), θα

παρατηρήσουμε ότι στο πρώτο κύκλωμα, η ισχύς, όπως προκύπτει από τη σχέση (4.5) είναι διαρκώς μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός ($V I \cos \varphi (1 + \cos 2\omega t)$). Άρα τα ωμικά φορτία μόνο καταναλώνουν ενέργεια. Από την άλλη, στα άλλα δύο κυκλώματα η ισχύς δίνεται από τον τύπο $V I \sin \varphi \sin 2\omega t$ και έχει μέση τιμή ίση με το μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι στη διάρκεια μιας ημιπεριόδου τα πηνία και οι πυκνωτές παίρνουν από την πηγή μια ποσότητα ενέργειας και στην άλλη ημιπερίοδο επιστρέφουν την ίδια ποσότητα ενέργειας στην πηγή.

Το Σχ. 4.2 δίνει ένα μηχανικό ανάλογο της ενεργού και άεργης ισχύος. Το αυτοκίνητο που βρίσκεται πάνω στο κεκλιμένο επίπεδο για να κινηθεί οριζόντια από το Α στο Β απαιτεί μια δύναμη κατά τη διεύθυνση ΑΒ. Κατά την οριζόντια μετακίνηση του αυτοκινήτου, η δύναμη αυτή παράγει ένα έργο, ισοδύναμο με μια ωφέλιμη ισχύ στη μονάδα του χρόνου.



Σχήμα 4.2: Μηχανικό ισοδύναμο για την κατανόηση της άεργης ισχύος

Για να κινηθεί όμως το όχημα οριζόντια, απαιτείται η εφαρμογή μιας επιπλέον δύναμης παράλληλα με την κεκλιμένη επιφάνεια του επιπέδου. Η δύναμη αυτή εξουδετερώνει την ομόλογη συνιστώσα του βάρους του αυτοκινήτου, μη παράγοντας έργο κατά την οριζόντια μετακίνησή του. Χωρίς όμως αυτή τη δύναμη θα ήταν αδύνατη η επιθυμητή οριζόντια μετακίνηση του αυτοκινήτου από το σημείο Α στο σημείο Β. Αντίστοιχα και η άεργη ισχύς αποτελεί το απαραίτητο εκείνο συστατικό για τη ‘συντήρηση’ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που απαιτείται έτσι ώστε η χρήσιμη ενεργή ισχύς να μεταφερθεί από μια πηγή σε έναν καταναλωτή μέσα από τους αγωγούς.

Στη συνέχεια ορίζεται ένα νέο μιγαδικό μέγεθος σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση.

$$\bar{S} = P + jQ \quad (4.7)$$

Το νέο αυτό μέγεθος, σαν μιγαδικός αριθμός, παριστάνει ένα φασικό διάνυσμα και ονομάζεται **φαινόμενη ισχύς (apparent power)**, ή και **μιγαδική ισχύς (complex power)**. Έχει

διαστάσεις ισχύος και μετريέται σε **VA (Volt-Ampere)**. Το μέτρο της φαινόμενης ισχύος δίνεται από τη σχέση.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.8)$$

Η φαινόμενη ισχύς αποτελεί μια ένδειξη των συνολικών απαιτήσεων ενός καταναλωτή τόσο σε ενεργή, όσο και σε άεργη ισχύ. Ενώ οι απαιτήσεις των καταναλωτών σε ενεργή ισχύ αποτελούν άμεση ένδειξη των ικανοτήτων παραγωγής αντίστοιχου ποσού έργου (ή αντίστοιχα κατανάλωσης ενέργειας), οι αντίστοιχες απαιτήσεις για άεργη ισχύ σχετίζονται άμεσα με τη κατασκευαστική δομή του καταναλωτή και μπορούν να εκφραστούν έμμεσα με την φαινόμενη ισχύ. Για το λόγο αυτό η φαινόμενη ισχύς χρησιμοποιείται κατά κανόνα για τη διαστασιολόγηση των ηλεκτρικών συσκευών, χαρακτηριζόμενη σαν **ονομαστική ισχύς ή ισχύς διαστασιολόγησης (nominal – rated power)**.

Εκφράζοντας την τάση και την ένταση της (4.1) με φασικά διανύσματα προκύπτει:

$$\bar{V} = V \angle 0 \quad (4.9\alpha)$$

$$\bar{I} = I \angle -\varphi \quad (4.9\beta)$$

Σχηματίζοντας το γινόμενο

$$\begin{aligned} \bar{VI}^* &= V \angle 0 \quad I \angle \varphi = VI \angle \varphi = VI \cos \varphi + jVI \sin \varphi = \\ &= P + jQ = \bar{S} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Εφόσον η ενεργή και η άεργη ισχύς αποτελούν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της φαινόμενης ισχύος αντίστοιχα, προκύπτουν οι προφανείς σχέσεις.

$$P = S \cos \varphi \Rightarrow \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (4.11\alpha)$$

$$Q = S \sin \varphi \Rightarrow \sin \varphi = \frac{Q}{S} \quad (4.11\beta)$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (4.11\gamma)$$

Ο όρος $\cos \varphi$ της (3.27α) είναι ένας καθαρός αριθμός και ονομάζεται **συντελεστής ισχύος (power factor)** ή απλά **συνημίτονο φ** . Εκφράζει, φυσικά, το ποσοστό που αντιπροσωπεύει η ενεργή ισχύς ενός καταναλωτή σε σχέση με τη φαινόμενη ισχύ του, άρα και έμμεσα σε σχέση με την αντίστοιχη άεργη ισχύ. Ο συντελεστής ισχύος είναι, από τον ορισμό του, μικρότερος ή ίσος με τη μονάδα, εκφράζοντας έτσι και την αντίστοιχη αναλογία ενεργού – φαινόμενης ισχύος.

Προφανώς όταν ο συντελεστής ισχύος είναι ίσος με τη μονάδα, η φαινόμενη ισχύς είναι ίση με την ενεργή και η αντίστοιχη άεργη ίση με μηδέν.

4.1 Φορές αναφοράς τάσεων και ρευμάτων. Ροή ισχύος.

Τα ρεύματα και οι τάσεις ορίζονται πλήρως από μια τιμή, το μέτρο τους και μια κατεύθυνση ή φορά. Το ρεύμα, οριζόμενο σαν ροή ηλεκτρονίων, κινείται στην πραγματικότητα από τον αρνητικό πόλο μιας πηγής προς τον θετικό. Η φορά αυτή είναι γνωστή στη βιβλιογραφία σαν **πραγματική φορά** του ρεύματος.

Ο προσδιορισμός πραγματική είναι αναγκαίος καθώς γύρω στον 17ο αιώνα, αυθαίρετα ορίστηκε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα σε έναν αγωγό ρέει από τον θετικό πόλο μιας πηγής προς τον αρνητικό. Η παραπάνω φορά του ρεύματος, χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα και, καθώς προέκυψε από συμφωνία μεταξύ ενδιαφερομένων, χαρακτηρίζεται σαν **συμβατική φορά** του ρεύματος.

Σχετικά με τη τάση, έχουν υιοθετηθεί δυο τρόποι προσδιορισμού της φοράς της. Είτε με ένα βέλος, είτε με χρήση των πρόσημων θετικό (+) και αρνητικό (-). Και ενώ θετικό πρόσημο σημαίνει, γενικά, σημείο με υψηλότερο δυναμικό από το ομόλογο με αρνητικό, σύγχυση επικρατεί σε σχέση με τη φορά του βέλους όπου άλλοι συγγραφείς θεωρούν ότι πρέπει να δείχνει την ανύψωση και άλλοι τον υποβιβασμό της τάσης.

Οι ισχείς είναι βαθμωτά μεγέθη. Η φορά όμως της ροής της ισχύος σε ένα κύκλωμα είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των στοιχείων εκείνων που λειτουργούν σαν **πηγές**, παράγοντας ηλεκτρική ισχύ και εκείνων που λειτουργούν σαν **φορτία**, καταναλώνοντας ηλεκτρική ισχύ.

Συνήθως το πρόσημο και συνεπώς και η φορά ροής της ισχύος καθορίζεται από τη φορά του ρεύματος και την πολικότητα της τάσης. Είναι φανερό ότι οι διαφορετικές συμβάσεις που προαναφέρθηκαν, μπορούν εύκολα να δημιουργήσουν σύγχυση στον αναγνώστη. Επιβάλλεται λοιπόν να προταχθεί ο προσδιορισμός των συμβάσεων που ακολουθούνται στη συνέχεια.

Στα ενεργειακά συστήματα, σε αντίθεση με την κυκλωματική ανάλυση, οι πηγές και τα φορτία είναι συνήθως προσδιορισμένα και διακριτά. Έτσι πηγή σε ένα ενεργειακό σύστημα μπορεί να είναι μια γεννήτρια σε ένα σταθμό παραγωγής, ένας μετασχηματιστής σε έναν υποσταθμό, ένας κόμβος του δικτύου, ένας ρευματοδότης σε ένα σπίτι. Αντίστοιχα φορτίο μπορεί να είναι ένα παθητικό κυκλωματικό στοιχείο, μια ηλεκτρική συσκευή, μια κατοικία, μια βιομηχανία ή ακόμη και μια ολόκληρη περιοχή.

Ορίζονται δυο συμβάσεις, η **σύμβαση της πηγής ή γεννήτριας** και η **σύμβαση του καταναλωτή**. Στην πρώτη, κάθε μέγεθος που βγαίνει από την πηγή προς το υπόλοιπο κύκλωμα θεωρείται θετικό και κάθε μέγεθος που μπαίνει αρνητικό. Ακριβώς τα αντίστροφα ισχύουν στη σύμβαση του καταναλωτή, όπου ότι μπαίνει είναι θετικό και ότι βγαίνει αρνητικό. Αν λοιπόν ένα στοιχείο κυκλώματος θεωρείται πηγή, τότε κατά την προηγούμενη σύμβαση, το ρεύμα και η

ηλεκτρική ισχύς, όταν εξέρχονται από το στοιχείο θεωρούνται θετικά. Αντίθετα τα εισερχόμενα μεγέθη θεωρούνται αρνητικά.

Στην περίπτωση που ένα στοιχείο κυκλώματος θεωρείται καταναλωτής, ισχύουν ακριβώς τα αντίστροφα. Έτσι, θετικά θεωρούνται το ρεύμα και η ισχύς που εισέρχονται στον καταναλωτή και απορροφούνται από αυτόν, ενώ αρνητικά αυτά που εξέρχονται από αυτόν προς το υπόλοιπο κύκλωμα. Οι παραπάνω συμβάσεις καλύπτουν επιπλέον και τις απαιτήσεις της **αρχής της διατήρησης της ενέργειας**, δηλαδή της συνεχούς ισότητας της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε ένα κύκλωμα. Προφανώς εάν ένα κυκλωματικό στοιχείο που είναι πηγή, θεωρηθεί λανθασμένα ότι είναι καταναλωτής η επίλυση του κυκλώματος θα οδηγήσει σε αρνητικά αποτελέσματα για την ισχύ και το ρεύμα, υποδηλώνοντας με τον τρόπο αυτό ότι η αρχική θεώρηση πρέπει να αντιστραφεί.

Όλες γενικά οι συμβάσεις είναι αυθαίρετες. Η πιστή όμως εφαρμογή τους στις κυκλωματικές αναλύσεις, οδηγεί σε αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία, αν μεν είναι θετικά επιβεβαιώνουν την ορθότητα των φορών που επιλέχθηκαν, στην αντίθετη δε περίπτωση υποδηλώνουν ότι πρέπει να επιλεγεί αντίστροφη φορά. Για τη φορά της τάσης στις σημειώσεις αυτές επιλέγεται η σύμβαση του βέλους που δείχνει την ανύψωση της τάσης.

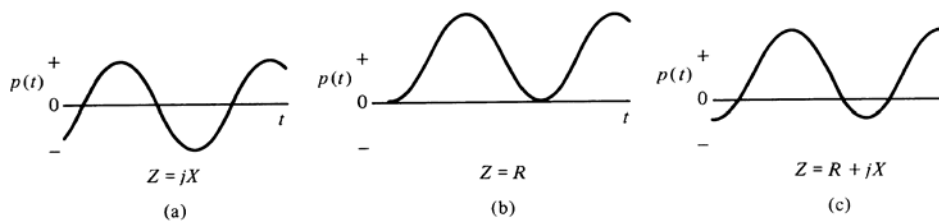
Τέλος επισημαίνεται το γεγονός, ότι ενώ σε ένα μονοφασικό κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως αυτό του Σχ. 3.1α, που αποτελείται από ένα ρευματοφόρο αγωγό (φάση) και έναν αγωγό επιστροφής (ουδέτερο), το ρεύμα θεωρείται ότι ρέει από την πηγή προς τον καταναλωτή από τον πάνω αγωγό και επιστρέφει στην πηγή από τον κάτω, δεν συμβαίνει κάτι αντίστοιχο με την ηλεκτρική ισχύ. Η ηλεκτρική ισχύς ρέει από την πηγή προς τον καταναλωτή και από τους δυο αγωγούς. Ακριβέστερα, η ηλεκτρική ενέργεια, σε αντίθεση με το ρεύμα το οποίο ρέει μέσα από τους αγωγούς, μεταφέρεται έξω από τους αγωγούς μέσα από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που τους περιβάλλει. Έτσι ο αγωγός λειτουργεί απλά σαν κυματοδηγός, κάτι σαν τη γραμμή σε ένα σιδηρόδρομο, για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η (4.4) δείχνει ότι η ενεργή ισχύς που απορροφά ένα ηλεκτρικό κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι σταθερή και εξαρτάται από τη φύση του κυκλώματος. Έτσι εάν το κύκλωμα είναι:

Ωμικό	$\varphi = 0$	$\cos\varphi = 1$	$P = VI$
Επαγωγικό	$\varphi = + 90$	$\cos\varphi = 0$	$P = 0$
Χωρητικό	$\varphi = - 90$	$\cos\varphi = 0$	$P = 0$

Άρα μόνο η παρουσία ωμικής αντίστασης προκαλεί κατανάλωση ενεργού ισχύος.

Το Σχ. 4.3 δείχνει τη χρονικά μεταβαλλόμενη ισχύ $p(t)$ για διάφορες περιπτώσεις ηλεκτρικών φορτίων. Φαίνεται παραστατικά, ότι η παρουσία αυτεπαγωγής ή χωρητικότητας προκαλεί την μετατόπιση της καμπύλης ισχύος $p(t)$, άρα και την ελάττωση της μέσης τιμής της P .



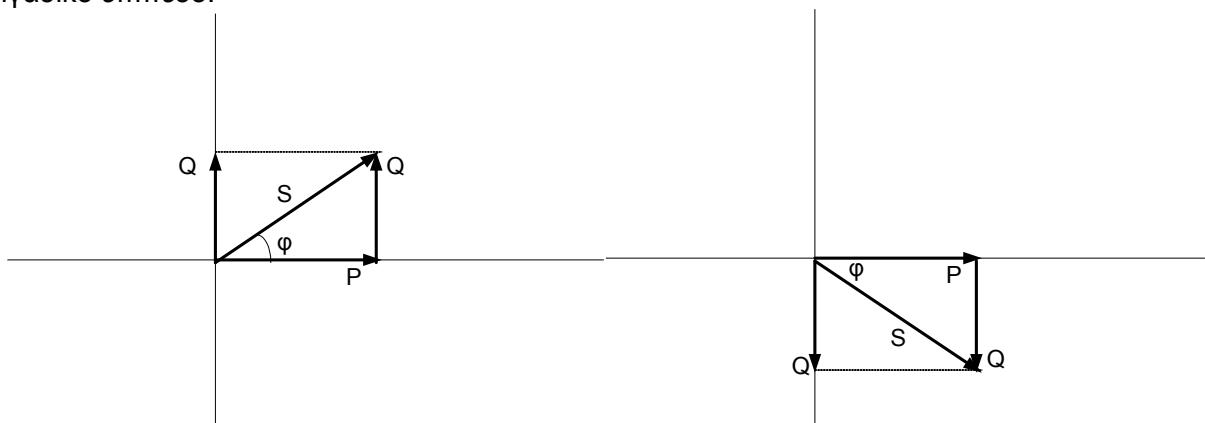
Σχήμα 4.3. Μεταβολή της ενεργού ισχύος συναρτήσει του συντελεστή ισχύος.

Η αντίστοιχη ανάλυση για τη μεταβολή της άεργης ισχύος σαν συνάρτηση της μορφής του φορτίου δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

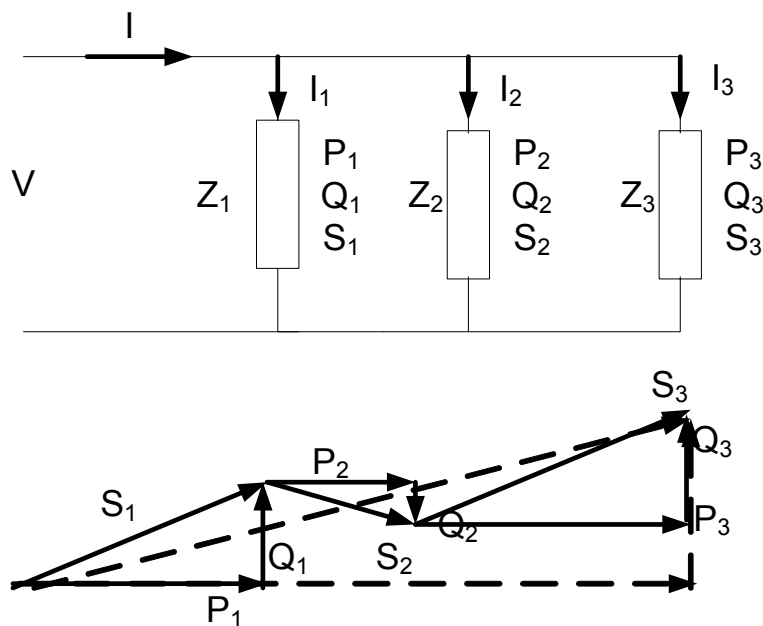
Ωμικό	$\varphi = 0$	$\sin\varphi = 0$	$Q = 0$
Επαγωγικό	$\varphi = + 90$	$\sin\varphi = 1$	$Q = VI$
Χωρητικό	$\varphi = - 90$	$\sin\varphi = -1$	$Q = - VI$

Άρα το ωμικό φορτίο δεν απορροφά (+) ούτε παράγει (-) άεργη ισχύ. Αντίθετα το καθαρά επαγωγικό φορτίο απορροφά (+) μόνο άεργη ισχύ, ενώ το καθαρά χωρητικό φορτίο παράγει (-) άεργη ισχύ, σύμφωνα με τη σύμβαση του καταναλωτή που προαναφέρθηκε. Στην παραπάνω ανάλυση θεωρήθηκε ότι η γωνία φ εκφράζει την απόκλιση του διανύσματος της τάσης από το αντίστοιχο του ρεύματος, που θεωρείται διάνυσμα αναφοράς.

Υιοθετώντας λοιπόν τις παραπάνω φορές, η φαινόμενη ισχύς μπορεί να παρασταθεί ως εξής στο μιγαδικό επίπεδο:



Το ορθογώνιο τρίγωνο που σχηματίζεται το ονομάζουμε τρίγωνο ισχύος. Το συνημίτονο της γωνίας φ είναι ο συντελεστής ισχύος. Αν ο καταναλωτής είναι επαγωγικός, το τρίγωνο είναι σαν αυτό που φαίνεται στο σχήμα, δηλαδή με την άεργο ισχύ στο θετικό τμήμα του άξονα y. Αν ο καταναλωτής είναι χωρητικός, το τρίγωνο βρίσκεται κάτω από τον οριζόντιο άξονα. Με τη βοήθεια των τριγώνων ισχύος μπορούμε εύκολα να κάνουμε την ανάλυση ενός κυκλώματος, όπως για παράδειγμα:



Στην πράξη δεν υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο που να είναι καθαρά ωμικό. Σχεδόν όλα τα φορτία (π.χ. κινητήρες) έχουν ωμική και επαγωγική συμπεριφορά, απαιτούν λοιπόν από την πηγή ενεργή και άεργη ισχύ. Και η μεν παροχή ενεργού ισχύος είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του στοιχείου και πρέπει να παραχθεί από την πηγή (πχ σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ) και να μεταφερθεί μέχρι το σημείο όπου βρίσκεται το φορτίο (εργοστάσιο). Η ταυτόχρονη παραγωγή και, κυρίως, η μεταφορά της επίσης απαραίτητης άεργης ισχύος είναι δαπανηρή, καθώς επιβαρύνει με επιπρόσθετη ένταση ρεύματος το σύστημα μεταφοράς (γραμμές, καλώδια, μετασχηματιστές) ενώ είναι δυνατή η παραγωγή της από κατάλληλα επιλεγμένες χωρητικότητες τοπικά στο σημείο του καταναλωτή. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή σαν **αντιστάθμιση (compensation)** ή **βελτίωση του συνημιτόνου ϕ** , ή συντελεστή ισχύος, καθώς το αποτέλεσμα της είναι η ενίσχυση του ωμικού χαρακτήρα του φορτίου, δηλαδή η αύξηση του $\cos\phi$ προς την μέγιστη δυνατή τιμή του. Αν επιλύσουμε τη σχέση (4.4), η οποία αναπαριστά την ενεργό ισχύ που απορροφά ένας καταναλωτής, ως προς το ρεύμα, τότε προκύπτει

$$I = \frac{P}{V \cos \phi} \quad (4.12)$$

Από τη σχέση αυτή γίνεται προφανές ότι ο όταν ο συντελεστής ισχύος γίνει ίσος με τη μονάδα, το ρεύμα που πρέπει να φτάσει στο φορτίο και να μεταφέρει την ισχύ P μειώνεται.

4.2 Υπολογισμός απαιτούμενης αντιστάθμισης – διόρθωση συντελεστή ισχύος

Έστω ότι ένας καταναλωτής απορροφά ισχύ P και άεργη ισχύ λειτουργώντας με ένα συντελεστή ισχύος $\cos\phi_1$. Η άεργη ισχύς που απορροφά είναι:

$$Q_1 = P \tan \phi_1 \quad (4.13)$$

Εάν είναι επιθυμητή η βελτίωση του συντελεστή ισχύος σε $\cos\phi_2$, ο καταναλωτής θα απορροφά

$$Q_2 = P \tan \varphi_2 \quad (4.14)$$

Η διαφορά αυτή της αέργου ισχύος,

$$Q_1 - Q_2 = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (4.15)$$

εάν είναι θετική πρέπει να δοθεί από πυκνωτές που θα συνδεθούν παράλληλα με τον καταναλωτή. Εάν η διαφορά της αέργου ισχύος (4.15) είναι αρνητική, τότε η πλεονάζουσα άεργη ισχύς πρέπει να καταναλωθεί από πηνία που θα συνδεθούν παράλληλα με τον καταναλωτή.

Ακολουθούν:
Συντονισμός,
θεωρήματα κυκλωμάτων και ισοδύναμα κυκλώματα,
τριφασικά κυκλώματα,
μαγνητικά συζευγμένα κυκλώματα-μετασχηματιστές,
τελεστικοί ενισχυτές