ΚΕΦΑΛΑΙΟ **1**

ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ

- **Ορισμοί και βασικά μεγέθη**
- **Ηλεκτρικό κύκλωμα και στοιχεία κυκλώματος**
- **Νόμοι του Kirchhoff**
- **Διατήρηση της ισχύος**
- **Μετρήσεις**
- **Πολικότητα τάσης και φορά ρεύματος**
- **Ασφάλειες και ασφαλειοδιακόπτες**
- **Γείωση κυκλώματος**
- **Μέση και ενεργός τιμή περιοδικής συνάρτησης**

Σ. Χατζηβασιλείου, Ι. Κυπριανίδης

1. ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΝΟΜΟΙ

Το περιεχόμενο αυτού του βιβλίου αναφέρεται στην ανάλυση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και την πειραματική επιβεβαίωση τους. Λέγοντας ηλεκτρικό κύκλωμα εννοούμε μια συνδεσμολογία ορισμένων βασικών ηλεκτρικών στοιχείων. Κάθε στοιχείο διαρρέεται από κάποιο ρεύμα, ενώ στα άκρα του αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού *(τάση)*. Κύριος στόχος της ανάλυσης ενός ηλεκτρικού κυκλώματος είναι ο προσδιορισμός των τάσεων και των ρευμάτων στα στοιχεία, έτσι ώστε να ικανοποιούνται ορισμένοι νόμοι *(νόμοι του Kirchhoff, νόμος του Ohm),* όπως επίσης και ο προσδιορισμός των σχέσεων μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων των διαφόρων στοιχείων.

Στο βιβλίο αναπτύσσονται και μελετώνται οι μέθοδοι ανάλυσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και με τη βοήθεια και των πειραματικών ασκήσεων γίνεται η προσπάθεια να ολοκληρωθεί η κατανόηση βασικών λειτουργιών τους.

1.1. Ορισμοί και βασικά μεγέθη

1.1.1. Φορτίο

Τα φαινόμενα που μελετάμε στα ηλεκτρικά κυκλώματα και τα πρώτα μεγέθη που αναφέραμε, τάση και ένταση ρεύματος, έχουν ως αφετηρία την ύπαρξη και την κίνηση φορτίων στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Τα φορτία αυτά είναι ηλεκτρόνια σθένους των μεταλλικών αγωγών που συνδέουν τα ηλεκτρικά στοιχεία μεταξύ τους. Μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου στο σύστημα SI είναι το coulomb (C). Το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι ίσο με -1.6×10^{-19} C.

1.1.2. Διαφορά δυναμικού ή τάση V, υ

Το δυναμικό σ' ένα σημείο του ηλεκτρικού πεδίου εκφράζει τη δυναμική ενέργεια που έχει η μονάδα του θετικού φορτίου, όταν αυτή βρίσκεται στο σημείο αυτό του χώρου, όταν ως σημείο αναφοράς πάρουμε το άπειρο.

Η διαφορά δυναμικού ή τάση μεταξύ δύο σημείων μετριέται από το έργο που απαιτείται για να μεταφερθεί η μονάδα του θετικού φορτίου από το ένα σημείο στο άλλο. Μονάδα μέτρησης της διαφοράς δυναμικού στο σύστημα

SI είναι το volt (V).

Τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων Α και Β, συνήθως, τη συμβολίζουμε V_{AB} ή υ_{AB}. Αντίθετα, όταν πρόκειται να συμβολίσουμε το δυναμικό σ' ένα σημείο Α ή στα άκρα ενός στοιχείου Α, γράφουμε V_A ή υ_A.

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό η διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός π.χ. αντιστάτη είναι:

$$\upsilon_R = \frac{w}{q}$$

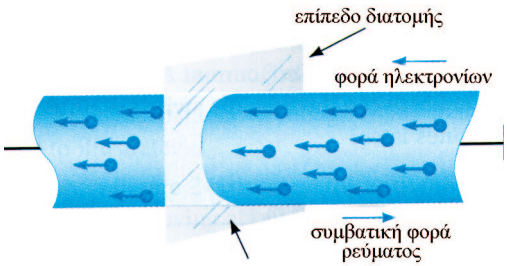
όπου w το έργο που απαιτείται για τη μεταφορά του φορτίου q διαμέσου του αντιστάτη. Εφ' όσον η μέση ταχύτητα του q είναι η ίδια πριν και μετά τη διέλευση από τον αντιστάτη, το έργο αυτό θα πρέπει να έχει αποδοθεί κάπου και στο παράδειγμα μας, του αντιστάτη, έχει μετατραπεί σε θερμότητα.

Τις απαραίτητες διαφορές δυναμικού σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα εξασφαλίζουν οι ηλεκτρικές πηγές τάσης.

1.1.3. Ηλεκτρικό ρεύμα

Όταν σ' ένα αγώγιμο μέσο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του κινούνται με την επίδραση μιας διαφοράς δυναμικού προς μία κατεύθυνση, λέμε ότι ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Ως φορά του ρεύματος στον αγωγό ορίζεται κατά συνθήκη η φορά των θετικών φορτίων καθώς κινούνται από το υψηλότερο (+) προς το χαμηλότερο (–) δυναμικό, δηλαδή η φορά η αντίθετη από τη φορά κίνησης των ηλεκτρονίων, όπως δείχνει το σχ. 1.1 (συμβατική φορά του ρεύματος).



Σχήμα 1.1

Το ηλεκτρικό ρεύμα στους μεταλλικούς αγωγούς, όπου μοναδικοί φορείς είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τους *(ηλεκτρόνια αγωγιμότητας),* ονομάζεται **ρεύμα αγωγιμότητας.**

Σε άλλες κατηγορίες αγωγών *(κυρίως υγρών ή αερίων)* οι φορείς είναι ιόντα θετικά ή αρνητικά και το ρεύμα ονομάζεται **ρεύμα μεταφοράς.**

Ένα τρίτο είδος είναι το **ρεύμα μετατόπισης** που οφείλεται σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Κοινή χαρακτηριστική ιδιότητα των παραπάνω ρευμάτων είναι η δημιουργία μαγνητικού πεδίου.

Εμείς θα ασχοληθούμε με το ρεύμα αγωγιμότητας.

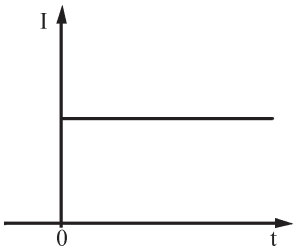
1.1.3α. Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος I, i

Ως ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ορίζεται το ηλεκτρικό φορτίο που διέρχεται από μια διατομή ενός αγωγού, κάθετη στο διάνυσμα της ταχύτητας των φορέων, στη μονάδα του χρόνου δηλαδή

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \tag{1.1}$$

Μονάδα μέτρησης της έντασης του ρεύματος στο σύστημα SI είναι το ampere (A).

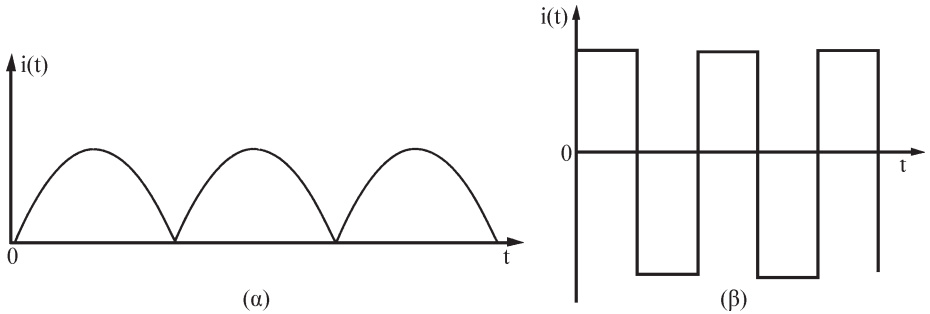
Αν η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος κάθε χρονική στιγμή είναι η ίδια (Σχ. 1.2), τότε το ρεύμα λέγεται συνεχές, Direct Current (DC).



Σχήμα 1.2

Αν η ένταση μεταβάλλεται με το χρόνο, τότε το ηλεκτρικό ρεύμα λέγεται μεταβαλλόμενο. Στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

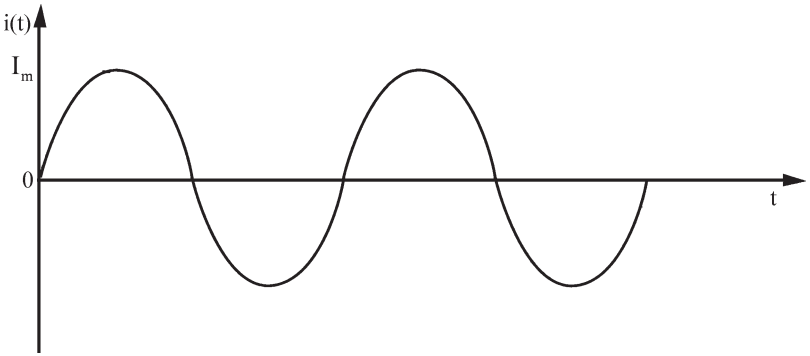
α. Το ρεύμα μεταβάλλεται με το χρόνο όχι όμως και η φορά του, (Σχ. 1.3 (α)). Δηλαδή έχουμε μέσα στον αγωγό μια φορά κίνησης των ηλεκτρονίων, π.χ. το ανορθωμένο ρεύμα.



Σχήμα 1.3

β. Το ρεύμα μεταβάλλεται με το χρόνο καθώς και η φορά του (Σχ. 1.3 (β)). Έχουμε δηλαδή εναλλαγή της φοράς κίνησης των ηλεκτρονίων μέσα στον αγωγό.

Μία ξεχωριστή κατηγορία μεταβαλλόμενου ρεύματος μεταβλητής φοράς είναι και το εναλλασσόμενο ρεύμα (Σχ. 1.4) *Alternating Current (AC)* που θα μελετηθεί παρακάτω.



Σχήμα 1.4

1.1.4. Ισχύς και ενέργεια

Η ηλεκτρική ισχύς είναι η απορροφόμενη ή αποδιδόμενη ενέργεια στη μονάδα του χρόνου σ' ένα τμήμα αγώγιμου μέσου.

Από τον ορισμό της διαφοράς δυναμικού, η ενέργεια που θα αποδοθεί σ' ένα αγώγιμο μέσο, π.χ. αντιστάτη, θα είναι:

$$w = q\upsilon_R$$

Το φορτίο που διέρχεται σε χρόνο t είναι:

$$q = it$$

Άρα η ενέργεια που αποδίδεται είναι:

$$w = it\upsilon_R \tag{1.2}$$

και σύμφωνα με τον ορισμό

$$p = \frac{dw}{dt} = i\upsilon \tag{1.3}$$

Η ισχύς λοιπόν ισούται με το γινόμενο της διαφοράς δυναμικού υ στα άκρα του αγώγιμου μέσου επί την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που προκαλείται από αυτή τη διαφορά δυναμικού.

Όταν η ισχύς είναι περιοδική συνάρτηση του χρόνου, p(t), με περίοδο T, ορίζουμε ως μέση ισχύ την παράσταση

$$P_{av} = P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt \tag{1.4}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό της συμβατικής φοράς του ηλεκτρικού ρεύματος, θετική ισχύς σημαίνει απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας από το φορτίο και αρνητική ισχύς σημαίνει προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας σ' αυτό.

Η ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδεται στο χρονικό διάστημα t_2-t_1 δίνεται από τη σχέση

$$w = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt$$

Μονάδα μέτρησης της απορροφόμενης ή αποδιδόμενης ισχύος στο σύστημα SI είναι το watt (W).

1.2. Ηλεκτρικό κύκλωμα και στοιχεία κυκλώματος

Ηλεκτρικό κύκλωμα ονομάζουμε μία διάταξη στην οποία κυκλοφορεί το ηλεκτρικό ρεύμα. Στην πράξη ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από διάφορα στοιχεία, όπως γεννήτριες, αντιστάτες, πυκνωτές, πηνία, κ.λ.π. που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με αγωγούς με οποιονδήποτε τρόπο.

Τα στοιχεία του κυκλώματος έχουν ηλεκτρικές ιδιότητες, όπως αντίσταση, χωρητικότητα, αυτεπαγωγή, κ.λ.π. Η κατανομή των ρευμάτων στο κύκλωμα καθορίζεται από τις ιδιότητες των στοιχείων του και τον τρόπο σύνδεσης τους. Τα στοιχεία ενός κυκλώματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

α. Σ' αυτά που παρέχουν ενέργεια στο κύκλωμα και ονομάζονται **πηγές.**

β. Σ' αυτά που καταναλίσκουν ή αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και ονομάζονται **παθητικά στοιχεία.**

Τα παθητικά στοιχεία παρουσιάζουν διάφορες ιδιότητες. Εάν η ενέργεια καταναλίσκεται, π.χ. μετατρέπεται σε θερμότητα, τότε το στοιχείο παρουσιάζει αντίσταση. Εάν η ενέργεια αποθηκεύεται ως ενέργεια μαγνητικού πεδίου, τότε παρουσιάζει αυτεπαγωγή. Εάν η ενέργεια αποθηκεύεται ως ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου, τότε παρουσιάζει χωρητικότητα.

Σ' ένα πραγματικό κύκλωμα είναι αδύνατο τα στοιχεία του να έχουν μόνο μία ιδιότητα, π.χ. μόνο χωρητικότητα ή μόνο αντίσταση. Ένα πηνίο παρουσιάζει εκτός από αυτεπαγωγή και κάποια αντίσταση. Ακόμη και ο καλύτερος αγωγός έχει μία μικρή αντίσταση, κάποια αυτεπαγωγή και κάποια χωρητικότητα κατανεμημένες σε όλο το μήκος του. Ο ακριβής υπολογισμός ενός τέτοιου κυκλώματος είναι πρακτικά αδύνατος. Παρατηρούμε όμως ότι ορισμένοι παράγοντες έχουν αμελητέα επίδραση στην συμπεριφορά του κυκλώματος, π.χ. η αυτεπαγωγή και η χωρητικότητα των καλωδίων έχουν σημαντική επίδραση μόνο για ρεύματα πολύ υψηλής συχνότητας, ενώ στις συνηθισμένες περιπτώσεις μπορούν να παραλείπονται. Στους υπολογισμούς, ένα πραγματικό στοιχείο που παρουσιάζει πολλές ιδιότητες ταυτόχρονα, μπορεί ν' αντικατασταθεί, κατά προσέγγιση, μ' ένα συνδυασμό από ιδανικά στοιχεία, δηλαδή στοιχεία που το καθένα έχει μία μόνο ιδιότητα. Παραλείποντας τους αμελητέους παράγοντες και αντικαθιστώντας τα πολύπλοκα στοιχεία με ιδανικά, προσεγγίζουμε το πραγματικό κύκλωμα με ένα απλούστερο εξιδανικευμένο κύκλωμα, που ο υπολογισμός του είναι ευκολότερος. Το εξιδανικευμένο κύκλωμα ονομάζεται **πρότυπο** του πραγματικού.

1.2.1. Πηγές τάσης και πηγές έντασης

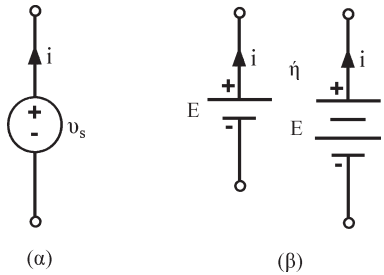
Με τον όρο **"πηγή"** *(source)* εννοούμε μια συσκευή, που είναι ικανή να προσφέρει στο κύκλωμα ηλεκτρική ενέργεια. Πρακτικά οι πηγές μπορούν να περιγραφούν ως συσκευές, που προσφέρουν στο κύκλωμα τάση ή ένταση ρεύματος σταθερή *(ή χρονικά μεταβαλλόμενη με σταθερό πλάτος).*

Οι πηγές τάσης και έντασης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στις ανεξάρτητες πηγές και στις εξαρτημένες. Όταν λέμε ότι μια πηγή είναι **"ανεξάρτητη"**, εννοούμε ότι είναι ανεξάρτητη από οποιαδήποτε άλλη τάση ή ρεύμα, που υπάρχει στο κύκλωμα, με το οποίο η πηγή είναι συνδεμένη. Μια πηγή λέμε ότι είναι **"εξαρτημένη"**, όταν εξαρτάται από μια τάση ή κάποιο ρεύμα κάπου στο κύκλωμα.

1.2.1.1. Ιδανική ανεξάρτητη πηγή τάσης

Η ιδανική ανεξάρτητη πηγή τάσης είναι ένα στοιχείο κυκλώματος, που η τιμή της τάσης υ_s στα άκρα του είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα i, που το διαρρέει. Το γραφικό της σύμβολο φαίνεται στο σχ. 1.5α, όπου έχει σημειωθεί και η πολικότητά της.

Ο πιο κοινός τύπος πηγής τάσης συνεχούς ρεύματος είναι η μπαταρία. Από τους πιο απλούς τύπους που χρησιμοποιούν οι φορητές συσκευές μέχρι τις πιο σύνθετες, οι μπαταρίες είναι στοιχεία δύο ακροδεκτών, και δίνουν σταθερή τάση Ε στο κύκλωμα, εκ των οποίων ο ένας έχει θετικό δυναμικό και ο άλλος αρνητικό. Το σύμβολο της μπαταρίας φαίνεται στο σχ. 1.5β.

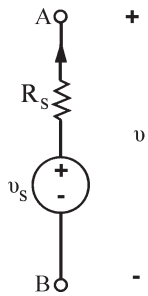


Σχήμα 1.5

1.2.1.2. Πραγματική ανεξάρτητη πηγή τάσης

Σύμφωνα με τον ορισμό, που δώσαμε προηγουμένως η ιδανική ανεξάρτητη πηγή τάσης έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Ως ιδανικό στοιχείο, είναι αδύνατο να υπάρξει στη πράξη, επειδή θα μπορούσε να δώσει άπειρο ποσό ενέργειας.

Η πραγματική πηγή τάσης είναι ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών που αποτελείται από μια ανεξάρτητη πηγή τάσης ιδανική και έναν αντιστάτη σε σειρά (σχ. 1.6). Η τάση υ στους ακροδέκτες Α, Β δίνεται από τη σχέση



Σχήμα 1.6

$$\upsilon = \upsilon_s - iR_s$$

1.2.1.3. Ιδανική ανεξάρτητη πηγή ρεύματος

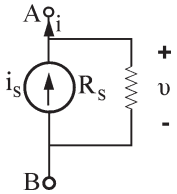
Είναι ένα στοιχείο κυκλώματος, που η τιμή της έντασης του ρεύματος, που δίνει στο εξωτερικό κύκλωμα, είναι ανεξάρτητη από την τάση στα άκρα του.

Το γραφικό της σύμβολο φαίνεται στο σχ. 1.7.

Σχήμα 1.7

1.2.1.4. Πραγματική ανεξάρτητη πηγή ρεύματος

Η πραγματική πηγή ρεύματος είναι ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών, που αποτελείται από τον παράλληλο συνδυασμό μιας ιδανικής ανεξάρτητης πηγής ρεύματος και ενός αντιστάτη (σχ. 1.8).



Σχήμα 1.8

Η ένταση του ρεύματος i στους ακροδέκτες A, B της πηγής θα δίνεται από τη σχέση

$$i = i_s - \frac{\upsilon}{R_s}$$

1.2.1.5. Ιδανική εξαρτημένη (ή ελεγχόμενη) πηγή τάσης

Η ιδανική εξαρτημένη *(ή ελεγχόμενη)* πηγή τάσης είναι μια πηγή, της οποίας η τάση στους ακροδέκτες προσδιορίζεται από κάποια τάση ή κάποιο ρεύμα, που υπάρχει σε κάποιο άλλο σημείο του κυκλώματος. Έτσι μπορούμε να έχουμε εξαρτημένη πηγή τάσης, είτε ελεγχόμενη από τάση υ_x, είτε ελεγχόμενη από ρεύμα i_x.

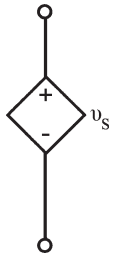
Το γραφικό σύμβολο μιας εξαρτημένης πηγής τάσης φαίνεται στο σχ. 1.9. Για τη τάση στους ακροδέκτες της πηγής θα ισχύει

$$\upsilon_s = \mu\upsilon_x,$$

ή

$$\upsilon_s = \rho i_x$$

όπου μ και ρ είναι αριθμητικές σταθερές. Η μ είναι αδιάστατη, ενώ η ρ έχει διαστάσεις αντίστασης.



Σχήμα 1.9

1.2.1.6. Ιδανική εξαρτημένη (ή ελεγχόμενη) πηγή έντασης

Η ιδανική εξαρτημένη πηγή έντασης είναι μια πηγή, που το ρεύμα στα άκρα της προσδιορίζεται είτε από μία τάση, είτε από ένα ρεύμα σε κάποιον άλλο κλάδο του κυκλώματος. Έτσι η εξαρτημένη πηγή έντασης μπορεί να ελέγχεται είτε από τάση υ_x, είτε από ρεύμα i_x. Το γραφικό σύμβολο μιας εξαρτημένης πηγής έντασης φαίνεται στο σχ. 1.10, ενώ ισχύουν

$$i_s = \beta\upsilon_x$$

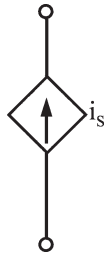
ή

$$i_s = \alpha i_x$$

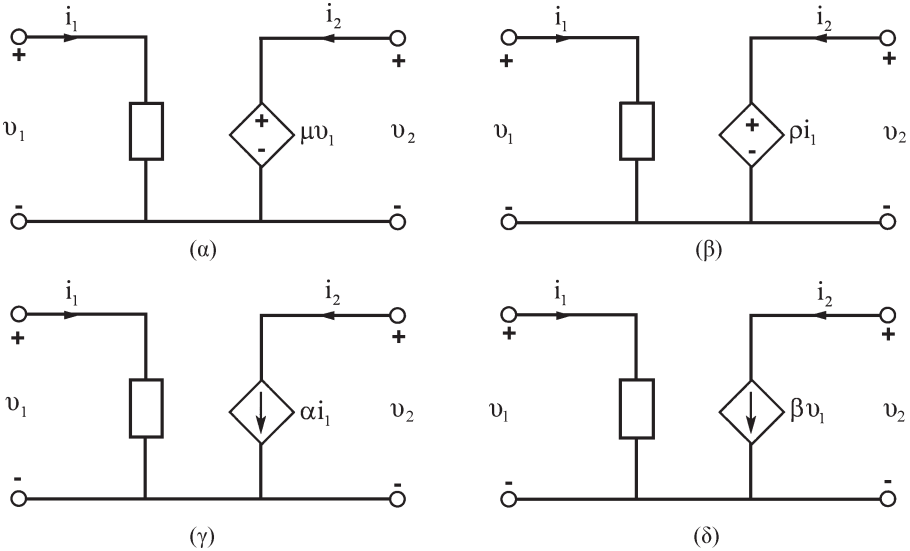
όπου οι α και β είναι αριθμητικές σταθερές. Η α έχει διαστάσεις αγωγιμότητας, ενώ η β είναι αδιάστατη.

Οι εξαρτημένες ή ελεγχόμενες πηγές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην κατασκευή των προτύπων των μη γραμμικών ηλεκτρονικών στοιχείων, όπως το transistor, το transistor με φαινόμενο πεδίου (FET), οι ηλεκτρονικές λυχνίες.

Στο σχ. 1.11 δίνονται σχηματικά οι τέσσερεις τύποι ελεγχόμενων πηγών με πιο γενικευμένη μορφή.



Σχήμα 1.10



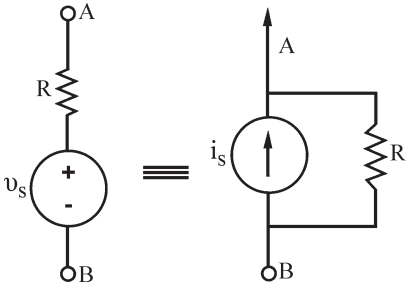
Σχήμα 1.11. (α) πηγή τάσης ελεγχόμενη από τάση **(β)** πηγή τάσης ελεγχόμενη από ένταση **(γ)** πηγή ένταση ελεγχόμενη από ένταση **(δ)** πηγή ένταση ελεγχόμενη από τάση.

Συμπερασματικά θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι ανεξάρτητες πηγές είναι οι είσοδοι *(διεγέρσεις)* των κυκλωμάτων, ενώ οι εξαρτημένες πηγές παριστάνουν τη σύζευξη ανάμεσα σε διαφόρους κλάδους ενός κυκλώματος.

1.2.1.7. Ισοδυναμία ανεξάρτητων πηγών τάσης και έντασης

Αποδεικνύεται ότι μια πραγματική ανεξάρτητη πηγή τάσης και μια πραγματική ανεξάρτητη πηγή έντασης είναι μεταξύ τους ισοδύναμες (σχ. 1.12), εφόσον ισχύει

$$\upsilon_s = i_s \cdot R \tag{1.6}$$



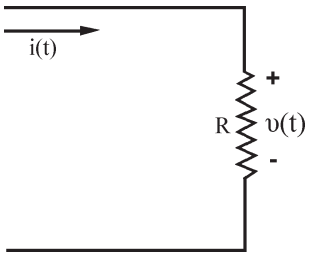
Σχήμα 1.12

1.2.2. Αντίσταση

Η διαφορά δυναμικού υ(t) στα άκρα ενός στοιχείου που έχει την ιδιότητα της αντίστασης είναι ανάλογη προς το ρεύμα i(t) που το διαρρέει (σχ. 1.13), δηλαδή

$$\upsilon(t) = R\, i(t) \tag{1.7}$$

Αυτή είναι η διατύπωση του νόμου του Ohm.



Σχήμα 1.13

Η σταθερή R ονομάζεται συντελεστής αντίστασης ή απλά αντίσταση του αντιστάτη, εκφράζεται σε ohm = volt/ampère και συμβολίζεται με το Ω.

Το αντίστροφο της αντίστασης ονομάζεται αγωγιμότητα.

$$G = \frac{1}{R}$$

Μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας είναι το siemens (S).

Τα πραγματικά στοιχεία που κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η αντίσταση ονομάζονται **αντιστάτες.**

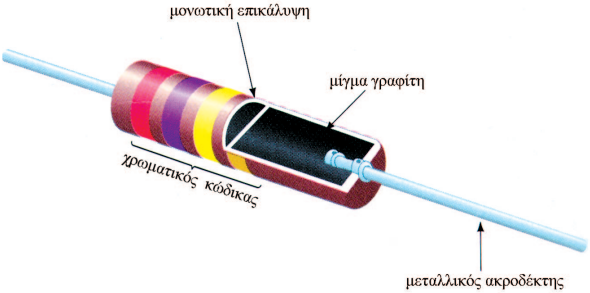
Κάθε αντιστάτης χαρακτηρίζεται από την τιμή της αντίστασης του και τη μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύ στην οποία αντέχει. Επειδή ο αντιστάτης μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική, η θερμοκρασία του ανεβαίνει και όταν η θερμική ισχύς ξεπεράσει κάποιο όριο ο αντιστάτης καταστρέφεται. Το όριο της

αντοχής του εκφράζεται σε watts καταναλισκομένης ηλεκτρικής ισχύος. Π.χ. αντιστάτης 820 Ω, 5 W μπορεί να αντέξει σε μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος

$$\sqrt{\frac{5}{820}} = 0.078\,\mathrm{A}$$

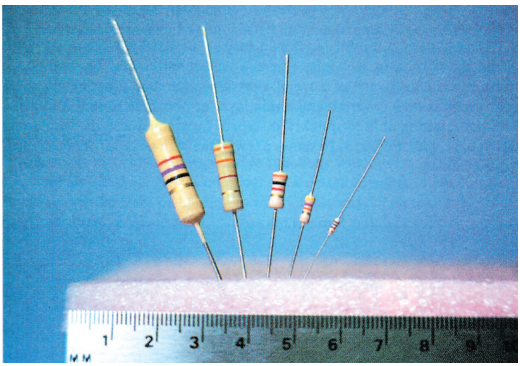
Αντιστάτες υπάρχουν σταθεροί και μεταβλητοί.

α. Σταθεροί: Έχουν σταθερή τιμή αντίστασης. Το σχήμα τους είναι κυλινδρικό και καταλήγουν σε ακροδέκτες για τη σύνδεση τους στο κύκλωμα. Κατασκευάζονται είτε από μίγμα γραφίτη και αδρανούς υλικού (σχ.1.14), είτε από σύρμα μικρής αγωγιμότητας. Οι αντιστάτες από γραφίτη έχουν μικρό όγκο και καλύπτουν πολύ ευρεία περιοχή τιμών αντίστασης από μερικά Ω μέχρι μερικά ΜΩ.



Σχήμα 1.14. Δομή αντιστατών άνθρακα.

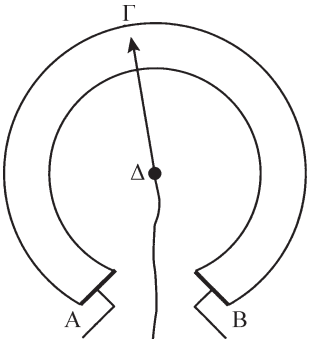
Τα όρια ισχύος τους κυμαίνονται από μερικά δέκατα του W μέχρι μερικά W και διακρίνονται από το μέγεθος (σχ. 1.15). Οι αντιστάτες από σύρμα είναι ογκωδέστεροι, καλύπτουν σχετικά μικρή περιοχή τιμών, από μερικά Ω μέχρι μερικές εκατοντάδες Ω, αντέχουν όμως σε μεγαλύτερες τιμές ισχύος από τους αντιστάτες γραφίτη. Οι κοινοί αντιστάτες σύρματος παρουσιάζουν αυξημένη



Σχήμα 1.15. Πραγματικό μέγεθος αντιστατών άνθρακα (2 W, 1 W, 0.5 W, 0.25 W, 0.125 W).

αυτεπαγωγή λόγω των σπειρών του σύρματος και χρησιμοποιούνται μόνο για ρεύματα χαμηλής συχνότητας.

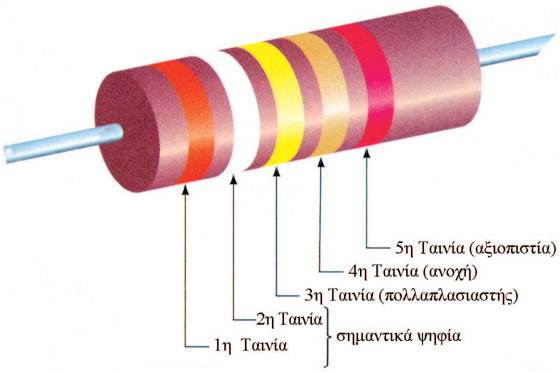
β. Μεταβλητοί: Η τιμή της αντίστασης τους μπορεί να ρυθμιστεί εξωτερικά. Αποτελούνται συνήθως από ένα στοιχείο αντίστασης ΑΒ (Σχ.1.16) κυκλικού σχήματος πάνω στο οποίο ολισθαίνει ένας δρομέας ΓΔ. Η τιμή της αντίστασης μεταξύ των ακροδεκτών ΑΔ εξαρτάται από το μήκος του τόξου ΑΓ. Η όλη διάταξη είναι κλεισμένη σ' ένα κουτί απ' όπου προεξέχουν οι ακροδέκτες Α, Β, Δ και ο άξονας του δρομέα.



Σχήμα 1.16

1.2.2.1. Χρωματικός κώδικας των αντιστατών

Η τιμή της αντίστασης ενός σταθερού αντιστάτη γράφεται συνήθως με τη μορφή ενός συνδυασμού χρωμάτων ως εξής: Επάνω στο κυλινδρικό σώμα του αντιστάτη υπάρχουν 5 ταινίες χρωμάτων (Σχ. 1.17). Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε κάποιον αριθμό, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.



Σχήμα 1.17

Πίνακας 1.1. Χρωματικός Κώδικας Αντιστατών

Χρώμα	1η Ταινία	2η Ταινία	3η Ταινία Πολλαπλασιαστής	4η Ταινία Ανοχή	5η Ταινία Αξιοπιστία
Μαύρο	0	0	10^0		
Καφέ	1	1	10^1		
Κόκκινο	2	2	10^2		1%
Πορτοκαλλί	3	3	10^3		0.1%
Κίτρινο	4	4	10^4		0.01%
Πράσινο	5	5	10^5		0.001%
Μπλε	6	6	10^6		
Μωβ	7	7	10^7		
Γκρι	8	8			
Λευκό	9	9			
Χρυσό			0.1	5%	
Ασημί			0.01	10%	
Χωρίς χρώμα				20%	

Η τιμή της αντίστασης R βρίσκεται ως εξής: Έστω ότι οι τρεις πρώτες ταινίες, αρχίζοντας από την ταινία την πλησιέστερη στην άκρη, αντιστοιχούν στους αριθμούς α, β, γ. Τότε

$R = (\alpha \times 10 + \beta) \times 10^{\gamma}\ \Omega$

Δηλαδή. Η πρώτη ταινία αφορά το πρώτο ψηφίο της τιμής της, η δεύτερη ταινία αφορά το δεύτερο ψηφίο και η τρίτη τον αριθμό των μηδενικών που ακολουθούν. Η τέταρτη ταινία δείχνει την **ανοχή** της αντίστασης, δηλαδή το σφάλμα *"επί τοις εκατόν"* που μπορεί να υπάρχει μεταξύ της αναγραφόμενης τιμής και της πραγματικής τιμής της αντίστασης. Αν η τέταρτη ταινία λείπει, σημαίνει ότι η ανοχή του αντιστάτη είναι 20%.

Π.χ. Έστω ότι οι ταινίες έχουν κατά σειρά τα χρώματα:

α. Κίτρινο, μώβ, μαύρο, χρυσό $\Rightarrow$ $R = 47 \pm 5\%\ \Omega$

β. Πράσινο, μπλε, πορτοκαλί, ασημένιο $\Rightarrow$ $R = 56000 \pm 10\%\ \Omega$

γ. Καφέ, μαύρο, κόκκινο $\Rightarrow$ $R = 1000 \pm 20\%\ \Omega$

Η πέμπτη ταινία αντιστοιχεί στην **αξιοπιστία** του αντιστάτη. Η αξιοπιστία

είναι μια στατιστική ένδειξη, η οποία δίνει την επί τοις εκατό πιθανότητα η τιμή του αντιστάτη να αντιστοιχεί στα όρια της τιμής που προσδιορίζεται μετά από 1000 ώρες λειτουργίας.

Ένας εύκολος μνημονικός κανόνας για να θυμόμαστε τον κώδικα των χρωμάτων είναι ο παρακάτω. Μεταξύ του μαύρου και του άσπρου γράφουμε τα έξι βασικά χρώματα της ίριδος αρχίζοντας από το κόκκινο και καταλήγοντας στο μωβ. Γνωρίζουμε ότι ο συνδυασμός μαύρου και κόκκινου μας δίνει το καφέ χρώμα που το τοποθετούμε μεταξύ μαύρου και κόκκινου και ο συνδυασμός μαύρου και άσπρου μας δίνει το γκρίζο που το τοποθετούμε μεταξύ μωβ και άσπρου. Τέλος αριθμούμε τη σειρά των χρωμάτων αρχίζοντας από το μηδέν.

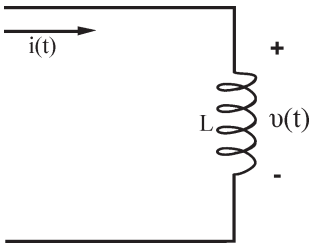
1.2.3. Αυτεπαγωγή L

Όταν ένα κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα έντασης i(t) τότε γύρω από το κύκλωμα δημιουργείται μαγνητική ροή Φ, η οποία είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος

$$\Phi(t) = Li(t) \tag{1.8}$$

Κάθε μεταβολή του ρεύματος i(t) προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής ροής Φ, η οποία δημιουργεί τάση υ(t) από επαγωγή στα άκρα του κυκλώματος (σχ. 1.18). Η τιμή της τάσης υ(t) εξαρτάται από την ταχύτητα μεταβολής της ροής.

$$\upsilon(t) = \frac{d}{dt}(Li) \tag{1.9}$$



Σχήμα 1.18

Ο συντελεστής L εξαρτάται από τη γεωμετρία του κυκλώματος και τον συντελεστή διαπερατότητας του περιβάλλοντος μέσου. Όταν ο συντελεστής L είναι σταθερός, τότε:

$$\upsilon(t) = L\frac{di}{dt} \tag{1.10}$$

Ο συντελεστής L ονομάζεται συντελεστής αυτεπαγωγής ή απλά αυτεπαγωγή του κυκλώματος και μονάδα μέτρησής του στο σύστημα SI είναι το henry (H), δηλαδή, 1 henry = (1 volt)×(1 s)/(1 ampere). Δηλαδή η αυτεπαγωγή ενός κυκλώματος είναι 1 H, αν στο κύκλωμα αυτό επάγεται τάση 1 V, όταν το ρεύμα μεταβάλλεται κατά 1 A σε 1 s.

Η αυτεπαγωγή ενός κυκλώματος μπορεί να παρομοιαστεί με την αδράνεια ενός μηχανικού συστήματος. Η δύναμη (τάση υ) που χρειάζεται για να μεταβληθεί η ποσότητα κίνησης (μαγνητική ροή Li) ενός αδρανούς σώματος ισούται με την ταχύτητα μεταβολής της ποσότητας κίνησης.

Το πηνίο είναι μία διάταξη που σκοπός της είναι η δημιουργία αυτεπαγωγής στο κύκλωμα. Τα πηνία κατασκευάζονται από σύρμα αγώγιμο με μόνωση στην επιφάνεια του, που τυλίγεται γύρω από κυλινδρική βάση από μονωτικό υλικό. Η αυτεπαγωγή ενός ευθύγραμμου πηνίου, του οποίου το μήκος είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο του είναι:

$$L = \mu\frac{N^2A}{\ell} \quad (H) \tag{1.11}$$

όπου μ ο συντελεστής της μαγνητικής διαπερατότητας του περιβάλλοντος μέσου.

N ο αριθμός των σπειρών του πηνίου

A η διατομή του πηνίου

ℓ το μήκος του πηνίου.

Για την αύξηση της αυτεπαγωγής ενός πηνίου τοποθετείται στο εσωτερικό του κατά μήκος του άξονα πυρήνας από μαγνητικό υλικό με υψηλό συντελεστή διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο ή φερρίτη.

Τα πηνία εκτός από αυτεπαγωγή παρουσιάζουν και μικρή χωρητικότητα λόγω της ηλεκτροστατικής επίδρασης των σπειρών μεταξύ τους. Τα πηνία με πυρήνα παρουσιάζουν και αντίσταση λόγω απωλειών ενέργειας μέσα στον πυρήνα. Οι απώλειες είναι συνήθως τόσο μεγαλύτερες όσο και η μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι ταχύτερη *(ρεύματα υψηλής συχνότητας)*.

Η αυτεπαγωγή των πυρήνων με αέρα *(χωρίς πυρήνα)* κυμαίνεται από μερικά μH μέχρι μερικές δεκάδες mH. Για τα πηνία με πυρήνα κυμαίνεται από μερικά H μέχρι μερικές εκατοντάδες H.

1.2.4. Χωρητικότητα C

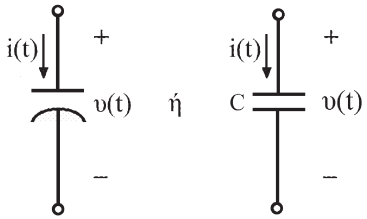
Όταν μεταξύ δύο μονωμένων αγωγών υπάρχει **πλήρης ηλεκτροστατική επίδραση**, τότε η προσθήκη φορτίου q στον ένα αγωγό θα δημιουργήσει φορτίο –q στο δεύτερο με αποτέλεσμα τη εμφάνιση μίας διαφοράς δυναμικού υ μεταξύ τους, ενώ ισχύει

$$q = C\upsilon \tag{1.12}$$

Το σύστημα των δύο αγωγών ονομάζεται **πυκνωτής** και η ιδιότητα τους αυτή ονομάζεται χωρητικότητα. Η σταθερή C στην εξ.(1.12) ονομάζεται συντελεστής χωρητικότητας ή απλά χωρητικότητα. Από τη μαθηματική σχέση (1.12) προκύπτει η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας στο σύστημα SI που είναι το farad (F). Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι 1F, όταν αποθηκεύεται στους οπλισμούς του φορτίο ίσο με 1C, ενώ η διαφορά δυναμικού μεταξύ τους είναι ίση με 1V. Επειδή το farad είναι πολύ μεγάλη μονάδα, συνήθως χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσιά του, μF (10^{-6}F), nF(10^{-9}F), και pF(10^{-12}F).

Όταν η τάση υ μεταβάλλεται χρονικά, τότε ο πυκνωτής διαρρέεται από ρεύμα i (σχ. 1.19) και ισχύει

$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{d\upsilon}{dt} \tag{1.13}$$



Σχήμα 1.19

Ο πυκνωτής μπορεί να θεωρηθεί ως μία δεξαμενή που αποθηκεύει φορτίο, όταν η στάθμη–δυναμικό ανεβαίνει, και αδειάζει το φορτίο της, όταν η στάθμη κατεβαίνει.

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή που αποτελείται από δύο παράλληλες αγώγιμες επιφάνειες μεταξύ των οποίων υπάρχει μονωτικό υλικό δίνεται από τη σχέση

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (F) \tag{1.14}$$

όπου ε_o η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού
ε_r η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού
A το εμβαδόν της κάθε επιφάνειας
d η απόσταση μεταξύ των επιφανειών.

Όταν ο πυκνωτής είναι συνδεμένος σε κύκλωμα, δεν αφήνει να περάσει το συνεχές ρεύμα (DC), δηλαδή συμπεριφέρεται ως διακόπτης, ενώ αντίθετα αφήνει να περάσει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC).

Οι πυκνωτές κατασκευάζονται από φύλλα αγωγού που χωρίζονται μεταξύ τους από ένα λεπτό στρώμα διηλεκτρικού. Χρησιμοποιούνται διάφορα είδη διηλεκτρικών, όπως αέρας, ειδικά πλαστικά, κεραμικά υλικά, οξείδια κ.ά. Επειδή όλα τα διηλεκτρικά, άλλο περισσότερο και άλλο λιγότερο, παρουσιάζουν απώλειες ιδίως στα ρεύματα υψηλής συχνότητας, μπορούμε να θεωρήσουμε, ότι ένας πυκνωτής εκτός από χωρητικότητα έχει και κάποια αντίσταση.

Το καλύτερο διηλεκτρικό είναι ο αέρας, όμως οι πυκνωτές με αέρα είναι ογκώδεις και χρησιμοποιούνται μόνο σε κυκλώματα στα οποία απαιτούνται πυκνωτές υψηλής ποιότητας.

Υπάρχουν πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας και μεταβλητής χωρητικότητας.

α. Σταθεροί πυκνωτές: Οι πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας έχουν σχήμα κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο και καταλήγουν σε δύο ακροδέκτες για τη σύνδεση τους στο κύκλωμα.

Υπάρχει μία κατηγορία σταθερών πυκνωτών που ονομάζονται χημικοί ή ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές. Το διηλεκτρικό τους είναι λεπτό στρώμα οξειδίου, το οποίο σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια του οπλισμού από κάποιο διάλυμα ηλεκτρολύτη που τοποθετείται μέσα στον πυκνωτή. Το πλεονέκτημα τους είναι η υψηλή τιμή της χωρητικότητας που παρουσιάζουν λόγω του πολύ λεπτού πάχους του οξειδίου. Μειονέκτημα τους είναι η πολικότητά τους, δηλαδή ότι ο ένας οπλισμός του πυκνωτή πρέπει να βρίσκεται πάντοτε σε υψηλότερο δυναμικό από τον άλλο, γιατί διαφορετικά ο πυκνωτής καταστρέφεται.

β. Μεταβλητοί πυκνωτές: Οι μεταβλητής χωρητικότητας πυκνωτές αποτελούνται από πλάκες αγωγών με διηλεκτρικό τον αέρα, ενώ η μεταβολή της χωρητικότητας γίνεται με ρύθμιση της σχετικής θέσης των πλακών. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων πυκνωτών, πυκνωτές που ανά πάσα στιγμή μπορεί να ρυθμιστεί η χωρητικότητα τους *(ραδιόφωνο)* και άλλοι που η χωρητικότητα τους ρυθμίζεται μία φορά για πάντα.

Επάνω σε κάθε πυκνωτή αναγράφεται η τιμή της χωρητικότητας του και η μέγιστη τάση στην οποία αντέχει. Οι χωρητικότητες των μη ηλεκτρολυτικών

πυκνωτών κυμαίνονται από μερικά pF μέχρι μερικά μF και η μέγιστη τάση τους από μερικές εκατοντάδες V μέχρι μερικές δεκάδες V. Οι χωρητικότητες των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών κυμαίνονται από μερικά μF μέχρι μερικές χιλιάδες μF, ενώ η μέγιστη τάση τους από μερικές εκατοντάδες V μέχρι μερικά V.

1.3. Νόμοι του Kirchhoff

Εκτός από τον νόμο του Ohm στην ανάλυση των κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται και οι γνωστοί νόμοι του Kirchhoff, που τους πρωτοδιατύπωσε το 1848.

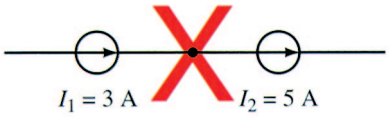
1.3.1. Νόμος των ρευμάτων

Ο νόμος αυτός είναι αποτέλεσμα του νόμου της **συνέχειας** και διατυπώνεται ως εξής: "σε κάθε κόμβο ενός κυκλώματος το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων είναι ίσο με μηδέν".

$$\sum i = 0$$

Αυτό σημαίνει, ότι στους κόμβους δεν έχουμε συσσώρευση φορτίων. Στην εξίσωση αυτή οι εντάσεις των ρευμάτων που απομακρύνονται από τον κόμβο λαμβάνονται συμβατικά θετικές, ενώ οι εντάσεις των ρευμάτων που προσέρχονται στον κόμβο αρνητικές.

Να επισημάνουμε, ότι δύο ανεξάρτητες πηγές έντασης, με διαφορετική τιμή έντασης, δεν είναι δυνατό να συνδεθούν σε σειρά, επειδή παραβιάζεται ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff (σχ. 1.20).



Σχήμα 1.20

1.3.2. Νόμος των τάσεων

Ο νόμος αυτός είναι αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης της ενέργειας και διατυπώνεται ως εξής: *"κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής σ'ένα κύκλωμα το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων είναι ίσο με μηδέν"*

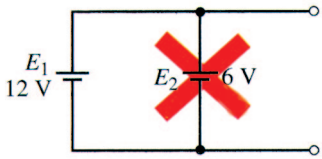
$$\sum E + \sum (iR) = 0 \tag{1.15}$$

ή αλλιώς: *"κατά μήκος ενός κλειστού κυκλώματος η συνολική ανύψωση της τάσης, που δημιουργούν οι πηγές στο κύκλωμα είναι ίση με τη συνολική πτώση της τάσης, που οφείλεται στις αντιστάσεις".*

$$\sum E = \sum (iR) \tag{1.16}$$

Οι εξισώσεις (1.15) και (1.16) ισχύουν με την προϋπόθεση ότι στο κύκλωμα περιλαμβάνονται μόνο ηλεκτρικές πηγές και ωμικές αντιστάσεις. Όταν στο κύκλωμα περιλαμβάνονται και αποδέκτες (π.χ. βολτόμετρο, κινητήρας) οι εξισώσεις (1.15) και (1.16) διατυπώνονται διαφορετικά.

Να επισημάνουμε, ότι δύο ανεξάρτητες πηγές τάσης, με διαφορετική τιμή τάσης στους πόλους τους, δεν είναι δυνατό να συνδεθούν παράλληλα, επειδή παραβιάζεται ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff (σχ. 1.21).



Σχήμα 1.21

Κατά την εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchhoff ακολουθούμε την εξής σειρά:

α) Καθορίζουμε στο κύκλωμα μία φορά κατά την οποία θα το διατρέξουμε. Ο καθορισμός αυτός γίνεται αυθαίρετα.

β) Για το σχηματισμό του αλγεβρικού αθροίσματος $\sum E$ παίρνουμε θετικές τις ΗΕΔ εκείνων των πηγών, που τις διερχόμαστε από το αρνητικό προς τον θετικό πόλο τους, και αρνητικές τις ΗΕΔ εκείνων των πηγών, που τις διερχόμαστε από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο τους.

γ) Για το σχηματισμό του αθροίσματος $\sum (iR)$ στην εξ. (1.15) παίρνουμε αρνητικές τις εντάσεις εκείνων των ρευμάτων, που έχουν τη φορά κατά την οποία διατρέχουμε το κύκλωμα και θετικές τις εντάσεις εκείνων των ρευμάτων, που έχουν φορά αντίθετη προς τη φορά κατά την οποία διατρέχουμε το κύκλωμα. Στην εξ. (1.16) θετικές είναι οι εντάσεις των ρευμάτων, που έχουν τη φορά κατά την οποία διατρέχουμε το κύκλωμα και αρνητικές οι αντίθετες.

1.3.3. Επίλυση κυκλωμάτων συνεχούς ρεύματος με τους κανόνες του Kirchhoff

Επίλυση ενός κυκλώματος συνεχούς ρεύματος είναι ο προσδιορισμός των αγνώστων μεγεθών σ' ένα κύκλωμα, που μπορούν να είναι εντάσεις ρευμάτων, τάσεις, αντιστάσεις ή ΗΕΔ πηγών.

Για την επίλυση ενός κυκλώματος συνεχούς ρεύματος ακολουθούμε την εξής σειρά:

α) Σημειώνουμε αυθαίρετα τις φορές των ρευμάτων στους κλάδους.

β) Σχηματίζουμε με βάση το νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff (n-1) εξισώσεις, όπου n είναι το πλήθος των κόμβων του κυκλώματος.

γ) Σχηματίζουμε τις υπόλοιπες εξισώσεις, που χρειάζονται για τη λύση του προβλήματος, με βάση το νόμο των τάσεων του Kirchhoff. Από κάθε απλό βρόχο σχηματίζουμε μία εξίσωση. Δε σχηματίζουμε εξίσωση από το βρόχο, που δίνουν δύο απλοί συνεχόμενοι βρόχοι, εφόσον σχηματίζουμε εξίσωση για τον καθένα χωριστά.

δ) Λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων που σχηματίσαμε υπολογίζουμε τα άγνωστα στοιχεία.

ε) Αν από τη λύση του συστήματος προκύψουν μία ή περισσότερες αρνητικές εντάσεις ρευμάτων, τα αντίστοιχα ρεύματα έχουν φορά αντίθετη από αυτήν, που αρχικά σημειώσαμε αυθαίρετα στο κύκλωμα.

1.3.4. Διαφορά δυναμικού δύο σημείων

Η διαφορά δυναμικού $V_A - V_B$ μεταξύ δύο σημείων Α και Β ενός κυκλώματος (σχ. 1.22) δίνεται από την εξίσωση

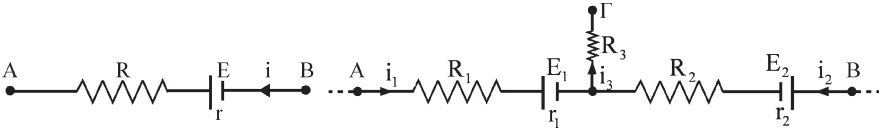
$$V_A - V_B = \sum E + \sum (iR) \tag{1.17}$$

Για το σχηματισμό αυτής της εξίσωσης διατρέχουμε το δρόμο ΑΒ με φορά από το Α προς το Β και παίρνουμε:

α) θετικές τις ΗΕΔ των πηγών, που τις διερχόμαστε από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο τους και αρνητικές τις αντίθετες,

β) θετικές τις εντάσεις των ρευμάτων, που έχουν τη φορά της κίνησης μας και αρνητικές τις αντίθετες.

Θα πρέπει να προσέξουμε εδώ ότι τα πρόσημα των ΗΕΔ των πηγών εδώ τα παίρνουμε αντίθετα απ' ό,τι στη παράγραφο 1.3.2.



$$V_A - V_B = E - i(R + r)$$

(α)

$$V_A - V_B = E_1 - E_2 + i_1(R_1 + r_1) - i_2(R_2 + r_2)$$
$$V_A - V_\Gamma = E_1 + i_1(R_1 + r_1) + i_3 R_3$$

(β)

Σχήμα 1.22

1.4. Διατήρηση της ισχύος

Το ηλεκτρικό κύκλωμα, θεωρείται ότι είναι ένα κλειστό σύστημα ως προς την ενέργεια, δηλαδή, το άθροισμα των ενεργειών που προσφέρονται ή αποτίθενται σε όλα τα στοιχεία ενός κυκλώματος οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι ίσο με μηδέν

$$\sum_{\text{όλα τα στοιχεία}} w_i = 0$$

Εάν διαφορίσουμε την προηγούμενη σχέση ως προς το χρόνο παίρνουμε το άθροισμα των ισχύων $\sum p_i$ σε κάθε στοιχείο i του κυκλώματος, οπότε

$$\sum_{\text{όλα τα στοιχεία}} p_i = \sum_{\text{όλα τα στοιχεία}} \upsilon_i i_i = 0 \qquad (1.18)$$

ισχύει δηλαδή ο νόμος της διατήρησης της ισχύος σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Η διατύπωση της σχέσης (1.18) αναφέρεται και ως θεώρημα του Tellegen.

Ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff, ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff και ο νόμος διατήρησης της ισχύος δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Ο τρίτος νόμος μπορεί να προκύψει από τους άλλους δύο.

1.5. Μετρήσεις

Μέτρηση είναι η σύγκριση του μετρουμένου μεγέθους προς τη μονάδα του.

Η κατάσταση ενός κυκλώματος που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα χαρακτηρίζεται από:

α. Την ένταση του ρεύματος στους διάφορους κλάδους του κυκλώματος.

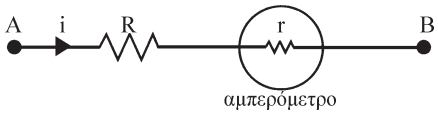
β. Τη διαφορά δυναμικού ή τάση μεταξύ των σημείων του κυκλώματος. Όργανα που μετρούν την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σ' ένα κύκλωμα είναι τα αμπερόμετρα. Αντίστοιχα τα βολτόμετρα μετρούν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων ενός κυκλώματος. Εκτός από τα παραπάνω υπάρχουν και όργανα που μετρούν άλλα ηλεκτρικά μεγέθη όπως π.χ. ηλεκτρική αντίσταση, ισχύ, αυτεπαγωγή, κ.λ.π.

1.5.1. Μετρήσεις έντασης με αμπερόμετρο

Μεταξύ δύο σημείων Α και Β κλάδου κυκλώματος υπάρχει μία διαφορά δυναμικού V. Υπό την επίδραση του δυναμικού αυτού ο κλάδος διαρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα εντάσεως i.

Την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος τη μετρούμε με τα αμπερόμετρα.

Τα αμπερόμετρα συνδέονται πάντοτε σε σειρά με το μετρούμενο κύκλωμα. (Σχ.1.23).



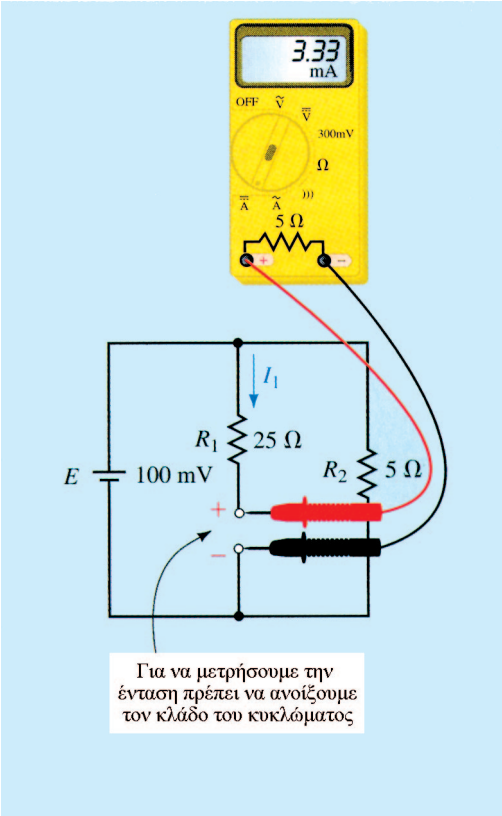
Σχήμα 1.23

Η σύνδεση του αμπερομέτρου στο κύκλωμα γίνεται ως εξής:

α. Διακόπτουμε την πηγή τροφοδοσίας του κυκλώματος.

β. Διαλέγουμε ένα όργανο με περιοχή μέτρησης κατάλληλη για την τιμή που προβλέπεται να έχει η ένταση που θα μετρήσουμε. Εάν η ένταση είναι τελείως άγνωστη διαλέγουμε ένα όργανο με πολύ μεγάλη περιοχή.

γ. Διακόπτουμε το κύκλωμα στο σημείο μέτρησης και συνδέουμε το αμπερόμετρο. Στις μετρήσεις DC προσέχουμε ώστε το όργανο να συνδεθεί κατά τη σωστή φορά του ρεύματος (σχ. 1.24).



Σχήμα 1.24

δ. Τροφοδοτούμε το κύκλωμα με ρεύμα και κάνουμε τη μέτρηση.

ε. Εάν η περιοχή λειτουργίας ή η σύνδεση του οργάνου είναι λανθασμένη, τότε επαναλαμβάνουμε τις ενέργειες αυτές από την αρχή, διαλέγοντας την κατάλληλη περιοχή και κάνοντας σωστά τη σύνδεση.

1.5.1.1. Εσωτερική αντίσταση αμπερομέτρου

Όλα τα όργανα μέτρησης για να μετατρέψουν τα ηλεκτρικά μεγέθη, τάση ή ένταση, σε ενδείξεις άλλης μορφής καταναλίσκουν ενέργεια. Την ενέργεια αυτή, ή μέρος της, την απορροφούν από το κύκλωμα που μετρούν και έτσι αλλοιώνουν την πραγματική κατάσταση του. Ο βαθμός της αλλοίωσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος και την ευαισθησία του οργάνου. Ένα όργανο μέτρησης είναι τόσο πιο ευαίσθητο, όσο λιγότερη ενέργεια

απορροφά από το κύκλωμα, στο οποίο παρεμβάλλεται. Εάν i είναι το ρεύμα που περνά από ένα αμπερόμετρο, τότε η ισχύς p που καταναλίσκεται από το όργανο είναι:

$$p = i^2 r$$

Ο συντελεστής r έχει διαστάσεις ωμικής αντίστασης και ονομάζεται εσωτερική αντίσταση του οργάνου.

Επιθυμούμε η ισχύς να έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή ώστε να καταναλίσκεται η ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Η εσωτερική αντίσταση r λοιπόν ενός αμπερομέτρου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη σε σύγκριση με την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος στο σημείο σύνδεσης.

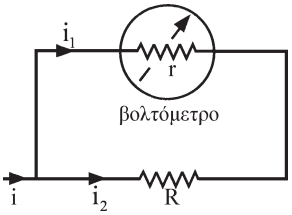
Ως **ιδανικό** χαρακτηρίζεται το αμπερόμετρο που έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Πραγματικά, κατάλληλο για κάποια συγκεκριμένη μέτρηση θεωρείται εκείνο το αμπερόμετρο που η εσωτερική του αντίσταση είναι αμελητέα σε σχέση με την αντίστοιχη του κλάδου εκείνου του κυκλώματος, στον οποίο αυτό παρεμβάλλεται.

1.5.2. Μετρήσεις τάσης με βολτόμετρο

Όταν ένας κλάδος ΑΒ ενός κυκλώματος διαρρέται από ρεύμα υπάρχει μία διαφορά δυναμικού ή τάση μεταξύ των σημείων Α και Β του κλάδου αυτού.

Τη διαφορά δυναμικού τη μετρούμε με τα βολτόμετρα.

Τα βολτόμετρα συνδέονται πάντα παράλληλα προς το μετρούμενο κύκλωμα ή κλάδο κυκλώματος (σχ. 1.25).



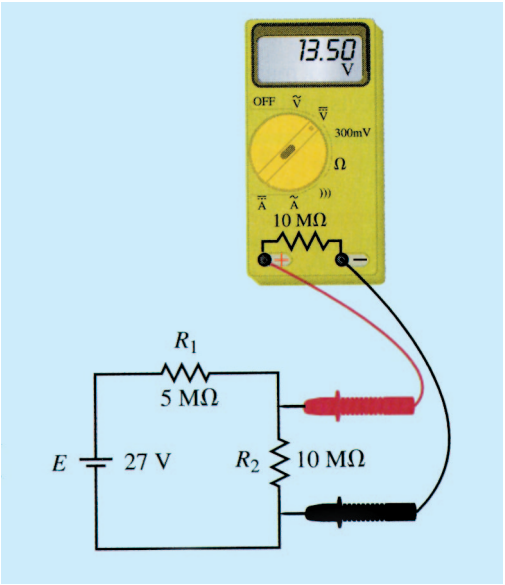
Σχήμα 1.25

Η σύνδεση του βολτομέτρου στο κύκλωμα γίνεται ως εξής:

α. Διακόπτουμε την πηγή τροφοδοσίας του κυκλώματος.

β. Διαλέγουμε ένα όργανο με περιοχή μέτρησης κατάλληλη για την τιμή που προβλέπεται να έχει η τάση. Εάν η τάση είναι τελείως άγνωστη διαλέγουμε ένα όργανο με πολύ μεγάλη περιοχή μέτρησης.

γ. Συνδέουμε τα άκρα του βολτομέτρου στα προς μέτρηση σημεία του κυκλώματος. Στις μετρήσεις DC προσέχουμε την ορθή πολικότητα του οργάνου (σχ. 1.26).



Σχήμα 1.26

δ. Τροφοδοτούμε το κύκλωμα και κάνουμε τη μέτρηση.

ε. Εάν η περιοχή μέτρησης ή η πολικότητα είναι λανθασμένη, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία απ' την αρχή με την κατάλληλη περιοχή μέτρησης και την ορθή πολικότητα.

1.5.2.1. Εσωτερική αντίσταση βολτομέτρου

Όπως είπαμε προηγουμένως, ένα όργανο για να λειτουργήσει πρέπει να απορροφήσει ενέργεια από το κύκλωμα στο οποίο παρεμβάλλεται, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η κατάσταση του κυκλώματος.

Στην περίπτωση ενός βολτομέτρου, εάν υ είναι η τάση στα άκρα του, η ισχύς που καταναλίσκεται στο όργανο είναι:

$$p = \frac{\upsilon^2}{r}$$

Ο συντελεστής r έχει διαστάσεις ωμικής αντίστασης και ονομάζεται εσω-

τερική αντίσταση του βολτομέτρου.

Επιθυμούμε στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής r να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή, ώστε η καταναλισκόμενη ισχύς να είναι ελάχιστη. Η εσωτερική αντίσταση λοιπόν των βολτομέτρων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σε σύγκριση με την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος στα σημεία σύνδεσης.

Η εσωτερική αντίσταση ενός κοινού βολτομέτρου με διάφορες κλίμακες είναι διαφορετική σε κάθε μία από αυτές. Συνήθως δίνεται ο συντελεστής Ω/V που είναι σταθερός για το όργανο και κυμαίνεται από 2000 έως 30000 Ω/V. Ένα βολτόμετρο με συντελεστή 5000 Ω/V παρουσιάζει στην κλίμακα των 15 V εσωτερική αντίσταση

$$r = 5000\frac{\Omega}{V}\times 15V = 75000\Omega,$$

ενώ στην κλίμακα των 150V παρουσιάζει εσωτερική αντίσταση δεκαπλάσια.

$$r = 5000\frac{\Omega}{V}\times 150V = 750000\Omega\,.$$

Υπάρχει συνεπώς μεγάλος κίνδυνος λάθους μέτρησης, κυρίως όταν μετράμε με κοινό βολτόμετρο μικρές τιμές τάσης σε αντιστάτες που έχουν μεγάλη τιμή αντίστασης. Ο παράλληλος συνδυασμός της εσωτερικής αντίστασης του βολτομέτρου με τη μεγάλη αντίσταση του κλάδου του κυκλώματος που μετράμε, θα δώσει διαφορετική τιμή στην ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος με αποτέλεσμα να αλλοιωθεί η πραγματική τιμή της τάσης που μετρά το βολτόμετρο. Το θέμα αυτό θα το εξετάσουμε αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

1.5.3. Μετρήσεις αντίστασης με ωμόμετρο

Η τιμή της αντίστασης ενός αντιστάτη μετριέται με ωμόμετρο.

Παλαιότερα η ωμομέτρηση γινόταν με αμπερόμετρο που η κλίμακα του ήταν βαθμολογημένη απ' ευθείας σε μονάδες αντίστασης. Σήμερα γίνεται με τα ηλεκτρονικά πολύμετρα, αλλά η φιλοσοφία της μέτρησης παραμένει πρακτικά η ίδια.

Για να μετρήσουμε την τιμή αντίστασης ενός άγνωστου αντιστάτη εργαζόμαστε ως εξής:

α. **Απομονώνουμε** τον αντιστάτη από το κύκλωμα.

β. Επιλέγουμε πάνω στο όργανο περιοχή μέτρησης κατάλληλη για την τιμή που προβλέπεται να έχει ο αντιστάτης.

γ. Βραχυκυκλώνουμε τους ακροδέκτες και ρυθμίζουμε το μηδέν του οργά-

νου *(σε μερικά πολύμετρα γίνεται ρύθμιση του απείρου αφήνοντας ελεύθερους τους δύο ακροδέκτες)* με το ειδικό γι' αυτή τη ρύθμιση ποτενσιόμετρο.

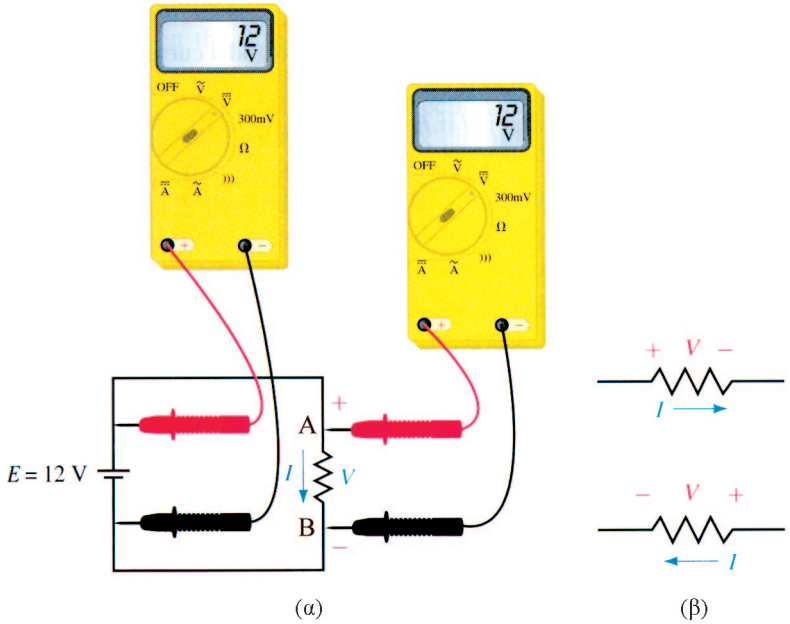
δ. Κάνουμε τη μέτρηση.

ε. Εάν η περιοχή λειτουργίας είναι ακατάλληλη, τότε επαναλαμβάνουμε από την αρχή τις παραπάνω εργασίες, διαλέγοντας την κατάλληλη περιοχή μέτρησης και ρυθμίζοντας ξανά το μηδέν *(ή το άπειρο)* της κλίμακας του οργάνου.

Στα σύγχρονα ψηφιακά πολύμετρα, η ρύθμιση του μηδενός, η επιλογή της περιοχής λειτουργίας και μέτρησης γίνεται **αυτόματα**.

1.6. Πολικότητα τάσης και φορά ρεύματος. Μια δεύτερη ματιά.

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε πιο συγκεκριμένα τη σχέση τάσης και ρεύματος στα στοιχεία του κυκλώματος. Το βασικό στοιχείο που πρέπει να κατανοήσουμε είναι, ότι η τάση και η ένταση του ρεύματος είναι μεγέθη **προσανατολισμένα** και υπάρχει μια απλή σχέση μεταξύ της φοράς του ρεύματος και της πολικότητας της τάσης. Αυτό φαίνεται στο σχ.1.27(α), όπου η πολικό-

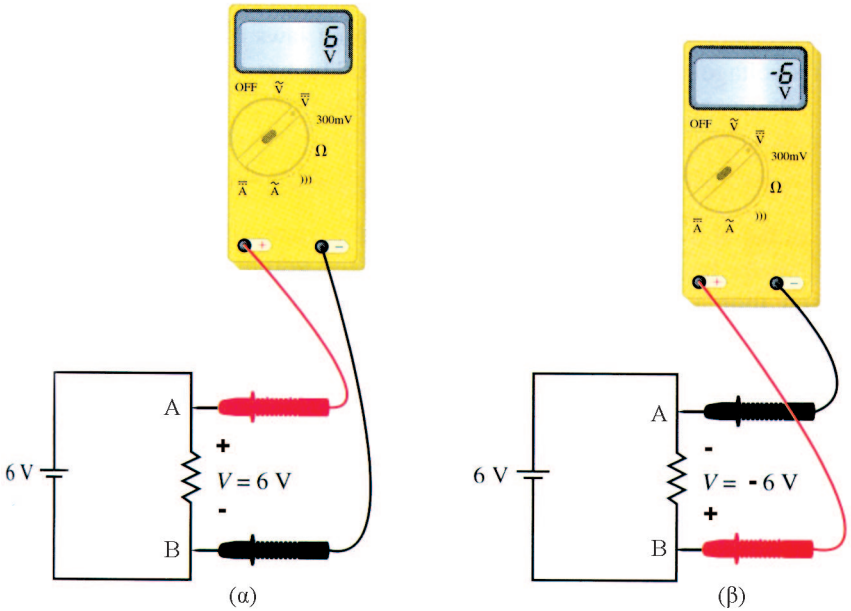


Σχήμα 1.27. Η σύμβαση για την πολικότητα της τάσης. Τοποθετούμε το πρόσημο + για την τάση V στο σημείο εισόδου του ρεύματος στον αντιστάτη, όπως φαίνεται από το βέλος. (α) Ορισμός της σύμβασης. (β) Παραδείγματα.

τητα της τάσης V είναι προφανής, επειδή ο αντιστάτης συνδέεται απευθείας στην πηγή τάσης. Το σημείο σύνδεσης A του αντιστάτη στο θετικό πόλο της πηγής είναι θετικό σε σχέση με το άλλο άκρο του, B, που συνδέεται στον αρνητικό πόλο της πηγής και, όπως δείχνουν τα βολτόμετρα, V = E = 12 V.

Θεωρώντας τώρα τη συμβατική φορά του ρεύματος, αυτή δηλώνεται από την κατεύθυνση του βέλους. Το ρεύμα εισέρχεται στον αντιστάτη από το σημείο υψηλότερου δυναμικού, όπως φαίνεται στο σχ. 1.27(α). Η παρατήρηση αυτή μπορεί να γενικευτεί για κάθε τάση σε οποιοδήποτε κύκλωμα : "Το βέλος του ρεύματος εισέρχεται σε ένα αντιστάτη από τον ακροδέκτη υψηλότερου δυναμικού".

Η σύμβαση της πολικότητας της τάσης έχει μια βαθύτερη σημασία. Όπως έχουμε αναφέρει, η τάση ορίζεται ως η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων. Έτσι, όταν σε κάποιο σημείο A τοποθετούμε το πρόσημο + και σε κάποιο άλλο σημείο B το πρόσημο –, αυτό σημαίνει ότι θεωρούμε τη διαφορά δυναμικού του σημείου A ως προς το σημείο B. Στο σχ.1.28(α) V = 6 volts σημαίνει ότι το σημείο A έχει δυναμικό 6 V μεγαλύτερο από το δυναμικό του σημείου B. Τοποθετώντας τον κόκκινο ακροδέκτη του βολτομέτρου στο σημείο A και το μαύρο στο σημείο B, το βολτόμετρο θα δείξει +6 V.



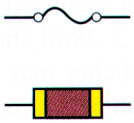
Σχήμα 1.28. Δύο τρόποι μέτρησης της ίδιας τάσης.

Στο κύκλωμα του σχήματος 1.28(β) έχουμε τοποθετήσει το πρόσημο + στο σημείο Β, γεγονός που σημαίνει ότι ενδιαφερόμαστε για τη διαφορά δυναμικού του σημείου Β ως προς το Α. Εφόσον το δυναμικό του Β είναι κατά 6 V μικρότερο από αυτό του Α, η διαφορά δυναμικού θα είναι V = –6 volts και το βολτόμετρο θα δείξει –6 V, επειδή έχουμε αντιστρέψει τη σύνδεση των ακροδεκτών του, ο κόκκινος είναι συνδεμένος στο Β, ενώ ο μαύρος στο Α.

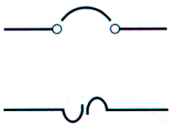
Είναι σημαντικό να αντιληφθούμε, ότι η τάση στα άκρα του αντιστάτη R **δεν έχει αλλάξει**. Αυτό που έχει αλλάξει είναι ο τρόπος θεώρησής της, καθώς και ο τρόπος σύνδεσης του βολτομέτρου για τη μέτρησή της. Εφόσον λοιπόν η πραγματική τάση είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις (α) και (β), αυτές είναι μεταξύ τους ισοδύναμες.

1.7. Ασφάλειες και ασφαλειοδιακόπτες

Οι ασφάλειες και οι ασφαλειοδιακόπτες χρησιμοποιούνται για να προστατεύουν μηχανήματα και ηλεκτρικές συσκευές από πιθανή ροή υπερβολικού ρεύματος. Αν στο σπίτι μας, για παράδειγμα, συνδέσουμε πολλές συσκευές σε ένα ρευματοδότη (πρίζα), η ασφάλεια ή ο ασφαλειοδιακόπτης στον ηλεκτρικό πίνακα "καίγεται" ή "πέφτει". Το κύκλωμα τότε "ανοίγει" και σταματά η ροή του ρεύματος, για να προστατευτούν οι συσκευές και η εγκατάσταση. Σε κάθε ασφάλεια και ασφαλειοδιακόπτη αναγράφεται η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της έντασης του ρεύματος. Όταν το ρεύμα υπερβεί αυτήν τη τιμή, η ασφάλεια ή ο ασφαλειοδιακόπτης "καίγεται" ή "πέφτει" αντίστοιχα. Στο σχ. 1.29(α) φαίνεται το σύμβολο της ασφάλειας και στο σχ. 1.29(β) το σύμβολο του ασφαλειοδιακόπτη.



(α) σύμβολο ασφάλειας

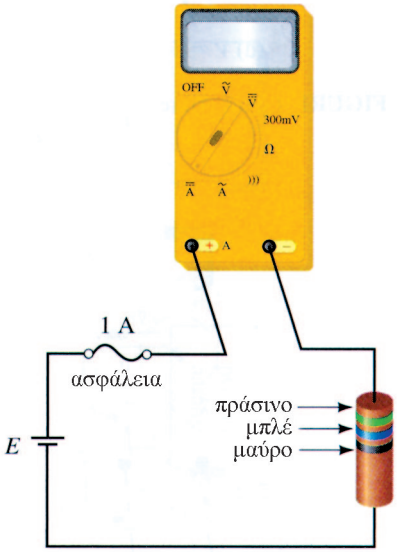


(β) σύμβολο ασφαλειοδιακόπτη

Σχήμα 1.29

Άσκηση εφαρμογής 1.1: Για το κύκλωμα του σχ. 1.30, (α) αν E = 28 V, ποιά είναι η ένδειξη του αμπερομέτρου; (β) Αν E = 312 V, ποιά είναι η ένδειξη του αμπερομέτρου;

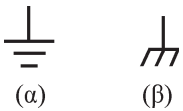
Άσκηση εφαρμογής 1.2: Για το κύκλωμα του σχ. 1.30, αν ο αντιστάτης αντικατασταθεί με ένα άλλο που φέρει κατά σειρά τις έγχρωμες ταινίες, κόκκινη, κόκκινη και μαύρη, για ποιά τιμή τάσης περιμένουμε να "καεί" η ασφάλεια;



Σχήμα 1.30

1.8. Γείωση κυκλώματος

Ίσως μία από τις ελλειπέστερα κατανοημένες έννοιες στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι αυτή της **γείωσης**. Η ελλειπής αυτή κατανόηση οδηγεί σε πολλά προβλήματα, όταν τα κυκλώματα σχεδιάζονται και ανα-

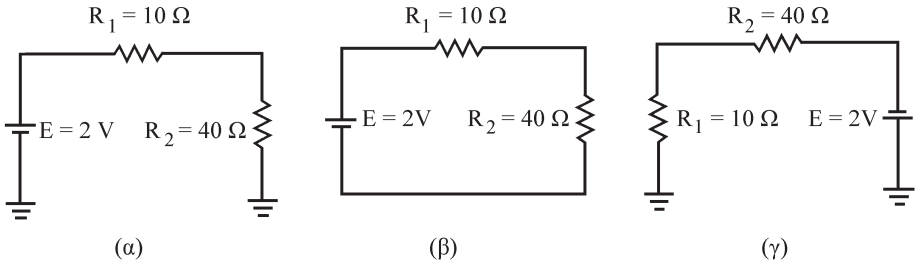


Σχήμα 1.31. (α) Γείωση ή αναφορά κυκλώματος, (β) γείωση σασί μιας συσκευής.

λύονται. Το σύμβολο της γείωσης ενός κυκλώματος φαίνεται στο σχ.1.31(α), ενώ στο σχ.1.31(β) φαίνεται το συμβολο της γείωσης του σασί (chassis) μιας

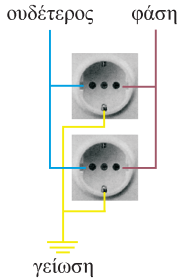
συσκευής.

Αν θελήσουμε να δώσουμε ένα απλό ορισμό, η γείωση είναι απλά ένα **τυχαίο ηλεκτρικό σημείο αναφοράς** ή **κοινό σημείο** σε ένα κύκλωμα. Χρησιμοποιώντας το σύμβολο της γείωσης με αυτό το τρόπο, μπορούμε να σχεδιάσουμε πιο απλά ένα κύκλωμα. Όταν το σύμβολο της γείωσης χρησιμοποιείται τυχαία για να δηλώσει ένα σημείο αναφοράς, μπορούμε να σχεδιάσουμε το διάγραμμα του κυκλώματος, έχοντας συνδέσει όλα τα γειωμένα σημεία στον ίδιο κόμβο ή να χρησιμοποιήσουμε κάποιο εντελώς διαφορετικό σημείο αναφοράς. Τα κυκλώματα του σχ.1.32 είναι εντελώς ισοδύναμα, αν και τα κυκλώματα 1.32(α) και 1.32(γ) χρησιμοποιούν διαφορετικά σημεία αναφοράς.



Σχήμα 1.32

Το σύμβολο της γείωσης έχει μεγαλύτερη σημασία στην καθημερινή πράξη, επειδή το μεταλλικό σασί μιάς συσκευής συνδέεται στη γείωση του εσωτερικού κυκλώματος. Μια τέτοια γείωση αναφέρεται ως **γείωση του σασί** και το σύμβολό της φαίνεται στο σχ.1.31(β). Για να προλάβουμε την περίπτωση ηλεκτροπληξίας, η γείωση του σασί συνδέεται με τη γη μέσω του καλωδίου τροφοδοσίας και του ηλεκτρικού ρευματοδότη (πρίζας), όπως φαίνεται στο σχ.1.33. Σε περίπτωση βλάβης του κυκλώματος, το σασί θα κατευθύνει το ρεύμα στη γείωση καίγοντας την εσωτερική ασφάλεια της συσκευής ή "ρίχνοντας" την ασφάλεια του ηλεκτρικού πίνακα της εγκατάστασης, για να προστατεύσει τη συσκευή ή τον ανύποπτο χειριστή της. Όταν το κύκλωμα συνδέεται με τη γη, τότε το σύμβολο της γείωσης παύει να είναι ένα **τυχαίο** σημείο σύνδεσης, και γίνεται πολύ **συγκεκριμένο** για όλους τους υπολογισμούς μας.



Σχήμα 1.33. Σύνδεση πρίζας με τη γη.

1.9. Μέση και ενεργός τιμή περιοδικής συνάρτησης

Η μαθηματική ανάλυση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων συνήθως ασχολείται με περιοδικές συναρτήσεις τάσης υ(t), έντασης i(t), ισχύος p(t), κ.λ.π.

Περιοδική είναι εκείνη η συνάρτηση f(t) με περίοδο T για την οποία ισχύει η σχέση

$$f(t) = f(t + nT)$$

όπου n ακέραιος.

Μια περιοδική συνάρτηση f(t) με περίοδο T αναλύεται υπό ορισμένες προϋποθέσεις σε σειρά Fourier.

$$f(t) = \frac{1}{2}\alpha_0 + \sum_{k=1}^{\infty}\alpha_k \cos t\omega t + \sum_{k=1}^{\infty}\beta_k \sin k\omega t \qquad (1.19)$$

όπου

$$\alpha_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos k\omega t dt,$$

$$\beta_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin k\omega t dt \qquad (1.20)$$

και

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Η περιοδική συνάρτηση f(t) με περίοδο T έχει μία μέση τιμή $F_{\alpha\nu}$ που δίνεται από τη σχέση

$$F_{\alpha\nu} = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt \qquad (1.21)$$

Η ενεργός τιμή ή τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγώνου F_{rms} μιας περιοδικής συνάρτησης f(t) περιόδου T δίνεται από τη σχέση

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(f\left(t\right)\right)^2 dt} \tag{1.22}$$

Η περιοδική συνάρτηση

$$f\left(t\right) = \alpha_0 + \left(\alpha_1 \cos \omega t + \alpha_2 \cos 2\omega t + ...\right) + \left(\beta_1 \sin \omega t + \beta_2 \sin 2\omega t + ...\right) \tag{1.23}$$

έχει ενεργό τιμή

$$F_{rms} = \sqrt{\alpha_0^2 + \frac{1}{2}\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + ...\right) + \frac{1}{2}\left(\beta_1^2 + \beta_2^2 + ...\right)} \tag{1.23}$$

Οι ενεργές τιμές των συναρτήσεων y(t) = αcosωt και x(t) = βsinωt είναι αντίστοιχα:

$$Y_{rms} = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \quad \text{και} \quad X_{rms} = \frac{\beta}{\sqrt{2}} \tag{1.24}$$