

## HY-121: Ηλεκτρονικά Κυκλώματα

Γιώργος Δημητρακόπουλος

### Βασικές Αρχές Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων

#### Ηλεκτρικό ρεύμα

Το ρεύμα είναι αποτέλεσμα της κίνησης των ηλεκτρονίων. Το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου  $q_e$  είναι ίσο με  $-1.602 \times 10^{-19}$  C (C – Coulomb - μονάδα μέτρησης φορτίου). Αντίστοιχα τα πρωτόνια φέρουν θετικό φορτίο και ίσο με  $+1.602 \times 10^{-19}$  C. Η θετική φορά του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό θεωρούμε ότι ορίζεται από την κατεύθυνση των θετικά φορτισμένων σωματιδίων. Είναι αντίθετη δηλαδή της πραγματικής κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων που είναι αρνητικά φορτισμένα.

#### Ένταση ρεύματος

Η ένταση του ρεύματος ορίζεται ως ο ρυθμός αλλαγής του φορτίου στη μονάδα του χρόνου. Η μονάδα μέτρησης της έντασης του ρεύματος είναι το Ampere (A). Για μια δεδομένη μεταβολή του φορτίου  $\Delta Q$  στη μονάδα του χρόνου το ρεύμα  $I$  ισούται με

$$I = \frac{\Delta Q}{Dt}$$

#### Διαφορά δυναμικού

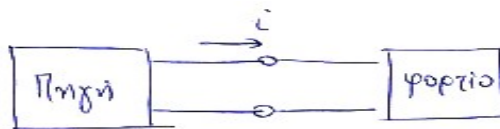
Για να κινηθούν τα ηλεκτρόνια απαιτείται η παραγωγή κάποιου έργου. Ο λόγος της ενέργειας που δαπανάται για να μεταφερθεί μια στοιχειώδης μονάδα φορτίου μεταξύ δύο σημείων A και B ονομάζεται διαφορά δυναμικού (ή τάση) μεταξύ των A και B και συμβολίζεται ως  $V_{AB}$ .

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{\text{Energy}}{Q}$$

Το πρόσημο της διαφοράς δυναμικού υποδηλώνει αν η ενέργεια δαπανάται ή προσφέρεται στα φορτισμένα σωματίδια. Η μονάδα μέτρησης της διαφοράς δυναμικού είναι το Volt (V).

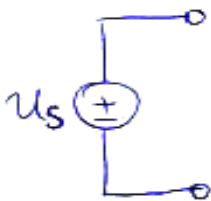
#### Ηλεκτρικές πηγές

Για να προσφέρουμε την απαιτούμενη ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία ροής ρεύματος σε έναν αγωγό χρειαζόμαστε κάποιας μορφής ηλεκτρική πηγή. Οι πηγές μετατρέπουν μια άλλη μορφή ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι ηλεκτρικές πηγές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Στις πηγές τάσης και στις πηγές ρεύματος. Αρχικά θα αναφερθούμε στις ιδανικές και ανεξάρτητες πηγές τάσης και ρεύματος.



Η πηγή μεταφέρει ενέργεια προς το φορτίο (load)<sup>1</sup>.

#### Ιδανική πηγή τάσης

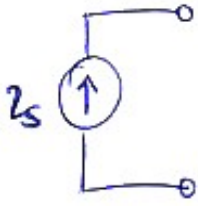


Η ιδανική πηγή τάσης παρέχει την καθορισμένη διαφορά δυναμικού  $u_s$  μεταξύ των ακροδεκτών της ανεξάρτητα από το ρεύμα που τη διαρρέει. Το ποσό του ρεύματος καθορίζεται από τα στοιχεία που συνδέονται στα άκρα της. Σε αυτή τη φάση θεωρούμε πως η πηγή είναι χρονικά αμετάβλητη (η τάση στα άκρα της δε μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου).

Κάνουμε την απλή σύμβαση πως η φορά του ρεύματος που διαρρέει την πηγή δείχνει από τον αρνητικό προς το θετικό πόλο της πηγής.

<sup>1</sup> Με τον όρο φορτίο εννοούμε ένα στοιχείο το οποίο καταναλώνει ενέργεια και δεν πρέπει να συγχέεται με το φορτίο των σωματιδίων.

## Ιδανική πηγή ρεύματος



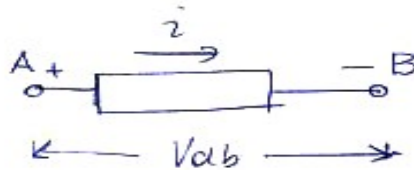
Η ιδανική πηγή ρεύματος παρέχει την καθορισμένη ένταση ρεύματος  $i_s$  στο κύκλωμα στο οποίο θα συνδεθεί ανεξάρτητα από τη διαφορά δυναμικού που θα αναπτυχθεί στα άκρα της. Η τιμή της τάσης που θα αναπτυχθεί στα άκρα της πηγής ρεύματος καθορίζεται από τα στοιχεία που συνδέονται στα άκρα της. Και σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε πως η πηγή είναι χρονικά αμετάβλητη.

Η φορά του βέλους καθορίζει τη φορά του ρεύματος που παράγει η πηγή.

## Ισχύς

Η ενέργεια που δαπανάται στη μονάδα του χρόνου καλείται ισχύς  $P$  (power) και μετριέται σε Watt.

Για ένα οποιοδήποτε στοιχείο η ισχύς που προσφέρει ή καταναλώνει είναι ίση με το γινόμενο της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του και της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει απλά από τον ορισμό της ισχύος, της διαφοράς δυναμικού και της έντασης του ρεύματος ως εξής:

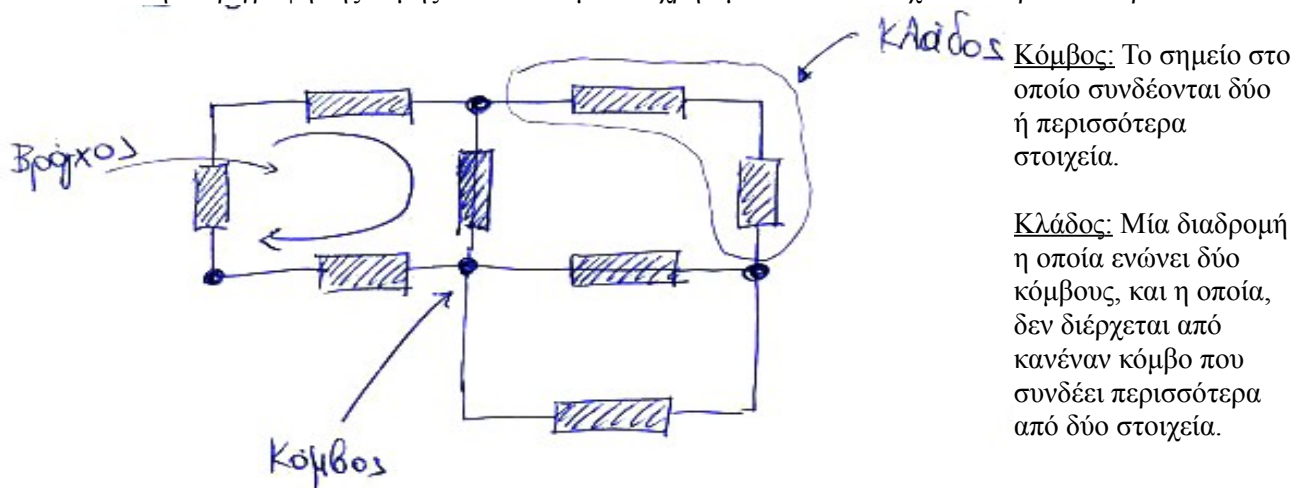


$$P = \frac{\text{Energy}}{\text{Time}} = \frac{\text{Energy}}{\Delta Q} \cdot \frac{\Delta Q}{\text{Time}} = V_{AB} \cdot I$$

Τα ενεργά στοιχεία προσφέρουν ισχύ ενώ τα παθητικά στοιχεία καταναλώνουν ισχύ. Η ισχύς που δαπανάται θεωρούμε πως είναι πάντα θετική. Όταν ένα στοιχείο παράγει έργο τότε τα φορτία κινούνται από χαμηλότερο σε υψηλότερο δυναμικό. Αντίθετα σε ένα παθητικό στοιχείο τα φορτία κινούνται από το υψηλότερο στο χαμηλότερο δυναμικό.

## Ηλεκτρικά κυκλώματα

Τα διάφορα στοιχεία μπορούν να συνδεθούν με πολλούς τρόπους. Η σύνδεση τους πραγματοποιείται με αγωγούς (ιδανικά καλώδια). Το σύνολο που προκύπτει από τις συνδέσεις αυτές ονομάζεται *κύκλωμα* ή *δίκτυο*. Για την περιγραφή της δομής των κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται συχνά οι παρακάτω όροι:



**Κόμβος:** Το σημείο στο οποίο συνδέονται δύο ή περισσότερα στοιχεία.

**Κλάδος:** Μία διαδρομή η οποία ενώνει δύο κόμβους, και η οποία, δεν διέρχεται από κανέναν κόμβο που συνδέει περισσότερα από δύο στοιχεία.

**Βρόχος:** Μία διαδρομή που ο αρχικός και ο τελικός της κόμβος ταυτίζονται, δηλαδή καταλήγει στον κόμβο από τον οποίο ξεκινά.

**Απλός βρόχος:** Ένας βρόχος ο οποίος δεν περιλαμβάνει στο εσωτερικό του άλλους βρόχους.

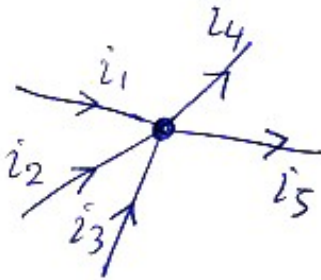
Οι τάσεις (δυναμικά) στους κόμβους του κυκλώματος εκφράζονται ως προς έναν κόμβο αναφοράς. Ο κόμβος αναφοράς σημειώνεται με το σύμβολο της γείωσης και θεωρούμε πως το δυναμικό του είναι 0. Ουσιαστικά η τάση σε κάθε κόμβο είναι η διαφορά δυναμικού του κόμβου από το δυναμικό του κόμβου αναφοράς. Η επιλογή του κόμβου αναφοράς σε ένα κύκλωμα μπορεί να γίνει αυθαίρετα.

Η ανάλυση ενός κυκλώματος περιλαμβάνει την εύρεση των τιμών των ρευμάτων που διαρρέουν όλους τους κλάδους του κυκλώματος και των τάσεων που εμφανίζονται στα άκρα των στοιχείων του κυκλώματος.

## **Νόμοι του Kirchoff**

Οι τάσεις και τα ρεύματα που εμφανίζονται σε ένα κύκλωμα διέπονται από κάποιους κανόνες οι οποίοι περιγράφονται από τους Νόμους του Kirchoff.

### Νόμος ρευμάτων του Kirchoff (Kirchoff's Current Law – KCL)



Το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων που καταλήγουν σε έναν κόμβο είναι 0. Θεωρούμε πως τα ρεύματα που εισέρχονται στον κόμβο έχουν θετικό πρόσημο (+) ενώ αυτά που εξέρχονται έχουν αρνητικό πρόσημο (-).

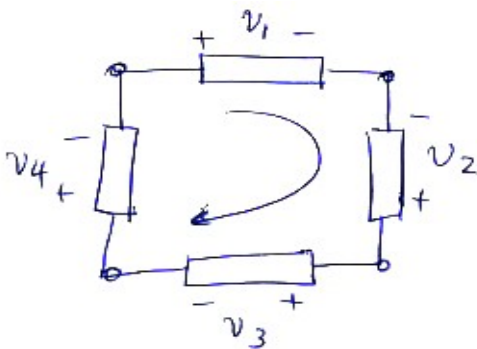
$$\sum i_k = 0$$

Ισοδύναμα μπορούμε να πούμε πως το άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε έναν κόμβο είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων που φεύγουν από ένα κόμβο. Για το παράδειγμα μας

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_4 + i_5$$

Αυτό που εκφράζει ο KCL είναι ότι στα συγκεντρωμένα κυκλώματα δεν είναι δυνατόν να υπάρχει συγκέντρωση φορτίου σε έναν κόμβο αλλά ούτε και δημιουργία φορτίου. Σε αντίθετη περίπτωση θα παραβιαζόταν η θεμελιώδης Αρχή Διατήρησης του Φορτίου.

### Νόμος τάσεων του Kirchoff (Kirchoff's Voltage Law – KVL)



Το άθροισμα των τάσεων  $u_k$  στα άκρα όλων των στοιχείων του κυκλώματος που συμμετέχουν σε ένα βρόγχο είναι 0.

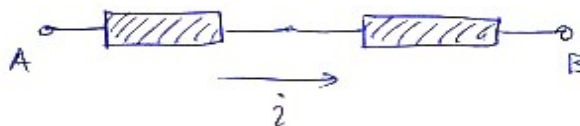
$$\sum u_k = 0$$

Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τον KVL χρειάζεται να ορίσουμε για το βρόγχο μια φορά αναφοράς. (Στο παράδειγμα η φορά αναφοράς σημειώνεται με τη φορά του βέλους μέσα στο βρόγχο). Τότε θεωρούμε θετικές τις τάσεις των κλάδων που συμπίπτουν με τη φορά αναφοράς και αρνητικές τις υπόλοιπες.

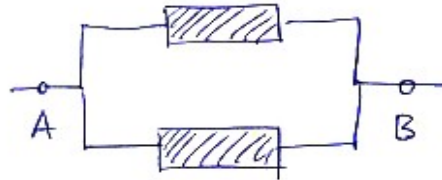
Για το παράδειγμα έχουμε:  $u_2 - u_3 - u_4 - u_1 = 0$

## **Σύνδεση παράλληλα και σε σειρά**

Οι απλούστερες μορφές σύνδεσης των κυκλωματικών στοιχείων είναι δύο: Η σύνδεση σε σειρά και η παράλληλη σύνδεση. Δύο στοιχεία είναι συνδεδεμένα σε σειρά εφόσον βρίσκονται πάνω στον ίδιο κλάδο και επομένως διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.

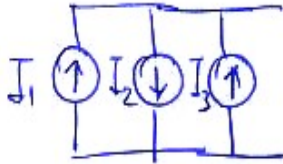


Δύο στοιχεία είναι συνδεδεμένα παράλληλα όταν οι ακροδέκτες όλων των στοιχείων καταλήγουν στους ίδιους κόμβους. Έτσι, η τάση στα άκρα όλων των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα παράλληλα είναι ίδια.



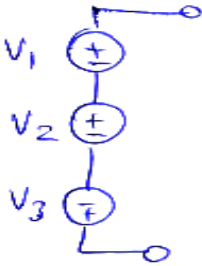
### Παράλληλη και σε σειρά σύνδεση ιδανικών πηγών

Στην περίπτωση των ιδανικών πηγών τάσης και ρεύματος τίθενται κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά την σε σειρά ή την παράλληλη σύνδεση τους.



Δύο ή περισσότερες ιδανικές πηγές ρεύματος μπορούν να συνδεθούν παράλληλα. Το τελικό ρεύμα που προσφέρεται στο υπόλοιπο κύκλωμα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων των πηγών ρεύματος (άμεσο αποτέλεσμα του KCL).

Δύο ή περισσότερες ιδανικές πηγές ρεύματος μπορούν να συνδεθούν σε σειρά αλλά το τελικό ρεύμα του κλάδου θα καθορίζεται από μόνο μία πηγή. Για ιδανικές πηγές ρεύματος η σύνδεση δεν είναι εφικτή εκτός αν όλες οι πηγές παρέχουν ακριβώς την ίδια ένταση ρεύματος.



Δύο ή περισσότερες ιδανικές πηγές τάσης μπορούν να συνδεθούν σε σειρά. Η τελική διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται στα άκρα της σύνδεσης είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων των πηγών τάσης (άμεσο αποτέλεσμα του KVL).

Δύο ή περισσότερες ιδανικές πηγές τάσης μπορούν να συνδεθούν παράλληλα αλλά η τάση στα άκρα τους θα καθορίζεται από μόνο μία πηγή. Για ιδανικές πηγές τάσης η σύνδεση δεν είναι εφικτή εκτός αν όλες οι πηγές παρέχουν στα άκρα τους ακριβώς την ίδια διαφορά δυναμικού.

### Χαρακτηριστικές Ρεύματος – Τάσης (I-V)

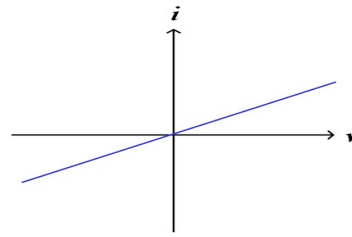
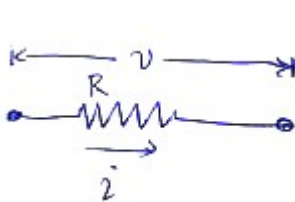
Κάθε στοιχείο μπορεί να περιγραφεί από την αντίστοιχη γραφική παράσταση του ρεύματος που το διαρρέει συναρτήσει της τάσης στα άκρα του. Το διάγραμμα που προκύπτει από όλες τις δυνατές τιμές ονομάζεται χαρακτηριστική I-V. Οι χαρακτηριστικές I-V μπορεί να είναι είτε γραμμικές είτε μη-γραμμικές.



### Ωμική αντίσταση και ο νόμος του Ohm

Ως αντίσταση χαρακτηρίζεται η ιδιότητα των υλικών να μην επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος. Στην απλούστερη περίπτωση η ιδιότητα των υλικών αναπαρίσταται με το κυκλωματικό στοιχείο που καλείται ωμική αντίσταση. Για την ωμική αντίσταση (ή απλά αντίσταση) η χαρακτηριστική I-V είναι γραμμική. Έτσι η τάση στα άκρα της αντίστασης δίνεται από το νόμο του Ohm και ισούται με το γινόμενο της έντασης του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση επί την τιμή της.

$$V = I R$$

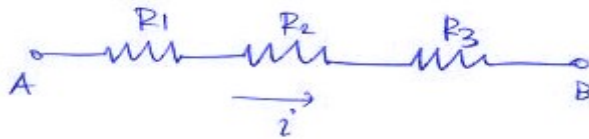


Με τον όρο αγωγιμότητα ορίζουμε την ευκολία με την οποία μπορεί να περάσει το ρεύμα από κάποιο υλικό. Η αγωγιμότητα συνήθως συμβολίζεται με  $G$ , μετριέται σε Siemens και είναι το αντίστροφο της αντίστασης:

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

### Σε σειρά σύνδεση αντιστάσεων

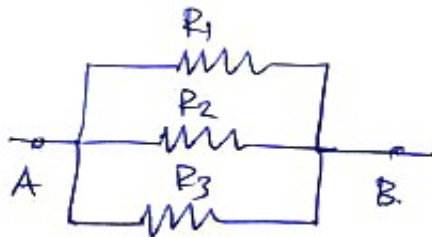
Μπορούμε να συνδέσουμε περισσότερες από μία αντιστάσεις σε σειρά. Σε αυτή την περίπτωση όλες οι αντιστάσεις θα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα  $i$ .



Έτσι από τον KVL προκύπτει ότι  $V_{AB} = V_A - V_B = V_1 + V_2 + V_3$ . Για την κάθε αντίσταση ο νόμος του Ohm μας λέει ότι η πτώση τάσης στα άκρα της  $V_i$  ισούται με  $I \dot{R}_i$ . Επομένως η διαφορά δυναμικού στα άκρα A και B είναι ίση με  $V_{AB} = I \dot{R}_1 + I \dot{R}_2 + I \dot{R}_3$ . Από αυτή τη σχέση προκύπτει ότι οι τρεις αντιστάσεις σε σειρά μπορούν να αντικατασταθούν από μία ισοδύναμη αντίσταση  $R_{eq}$  ( $V_{AB} = I \dot{R}_{eq}$ ) η τιμή της οποίας είναι το άθροισμα των αντιστάσεων.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

### Παράλληλη σύνδεση αντιστάσεων



Περισσότερες από μία αντιστάσεις μπορούν να συνδεθούν παράλληλα. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά δυναμικού στα άκρα των αντιστάσεων είναι ίδια.

Από τον KCL προκύπτει ότι  $I = I_1 + I_2 + I_3$ . Κάθε ρεύμα  $I_k$  μπορεί να εκφραστεί ως  $I_k = V_{AB} / R_k$ . Επομένως το συνολικό ρεύμα  $I$  είναι ίσο με

$$I = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} + \frac{V_{AB}}{R_3} = V_{AB} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = V_{AB} \frac{i}{R_{eq}}$$

Κατά συνέπεια προκύπτει ότι η τιμή της ισοδύναμης αντίστασης στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης είναι ίση με

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Ισοδύναμα μπορούμε να πούμε για τις 3 αντιστάσεις του παραδείγματος μας πως η *ισοδύναμη αγωγιμότητα* 3 παράλληλα συνδεδεμένων αντιστάσεων είναι ίση με το άθροισμα των αγωγιμοτήτων των αντιστάσεων.

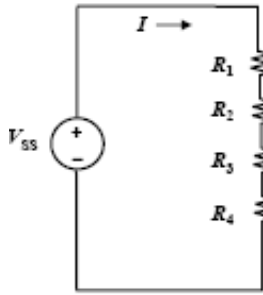
$$G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3$$

Με άλλα λόγια η παράλληλη και η σε σειρά σύνδεση αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο αν εναλλάξουμε τη χρήση των αντιστάσεων με αυτή των αγωγιμοτήτων. Οι παράλληλες αντιστάσεις συνηθίζεται να συμβολίζονται ως  $R_1 || R_2 || R_3$ .

### Διαιρέτης τάσης

Ο διαιρέτης τάσης είναι ένας απλός τρόπος για τη δημιουργία ενδιάμεσων τιμών τάσεων οι οποίες απαιτούνται σε διάφορα σημεία ενός μεγαλύτερου κυκλώματος. Θεωρούμε πως η μόνη τάση που έχουμε

στη διαθεση μας είναι η VSS η οποία παράγεται από μια ιδανική πηγή τάσης.

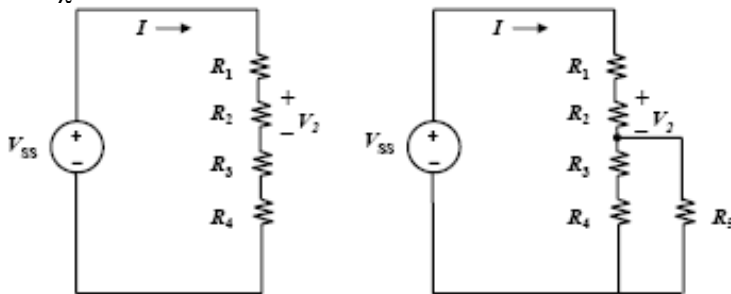


Για να δημιουργήσουμε ενδιάμεσες τιμές χρησιμοποιούμε ένα σύνολο αντιστάσεων συνδεδεμένων σε σειρά και εκμεταλλευόμαστε την τιμή της τάσης στα άκρα της κάθε αντίστασης. Στο παράδειγμα μας η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το βρόγχο είναι  $I = V_{ss}/(R_1 + R_2 + R_3)$ . Έτσι η τάση στα άκρα της κάθε αντίστασης είναι ίση με

$$V_1 = \frac{R_1}{I} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} V_{ss} \quad V_2 = \frac{R_2}{I} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V_{ss} \quad V_3 = \frac{R_3}{I} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_{ss}$$

Έτσι στη γενική περίπτωση διαλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των αντιστάσεων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους λόγους  $R_j / \sum R_i$  που προκύπτουν ώστε να πάρουμε ένα οποιοδήποτε υπο-πολλαπλάσιο της τάσης Vss.

Οι σχέσεις που περιγράφουν το διαιρέτη τάσης ισχύουν μόνο στην περίπτωση που δεν έχουμε τίποτε άλλο συνδεδεμένο στους ενδιάμεσους κόμβους του κυκλώματος (στους κόμβους μεταξύ των σε σειρά αντιστάσεων). Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, όπως φαίνεται στο παράδειγμα, οι προηγούμενες σχέσεις δεν ισχύουν.

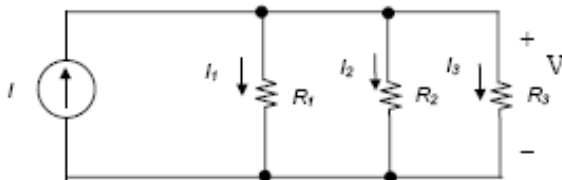


$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} V_{ss}$$

$$V_2' \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} V_{ss}$$

## Διαιρέτης ρεύματος

Κατ' αντιστοιχία με το διαιρέτη τάσης αν χρησιμοποιήσουμε μια πηγή ρεύματος παράλληλα με κάποιες αντιστάσεις μπορούμε να δημιουργήσουμε ρεύματα τα οποία είναι υπο-πολλαπλάσια του ρεύματος της πηγής.



Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που προέκυψαν για την παράλληλη σύνδεση αντιστάσεων, για το παράδειγμα προκύπτει ότι τα ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  δίνονται από τις σχέσεις.

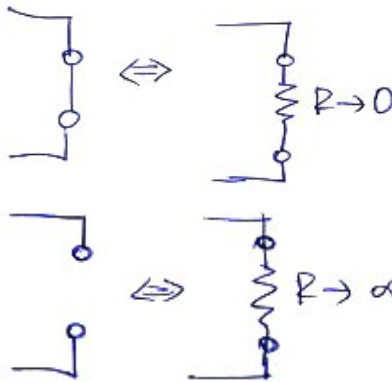
$$I_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2 + G_3} I \quad I_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2 + G_3} I \quad I_3 = \frac{G_3}{G_1 + G_2 + G_3} I$$

Θυμίζουμε ότι  $G_i = 1/R_i$ . Έτσι στη γενική περίπτωση διαλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των αντιστάσεων (αγωγιμοτήτων αντίστοιχα) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους λόγους  $G_j / \sum G_i$  που προκύπτουν ώστε να πάρουμε ένα οποιοδήποτε υπο-πολλαπλάσιο του ρεύματος  $I$ .



## Βραχυκύκλωμα - Ανοιχτοκύκλωμα

Μια ιδιαίτερη περίπτωση των κυκλωματικών στοιχείων θεωρούνται τα βραχυκυκλώματα και τα ανοιχτοκυκλώματα.



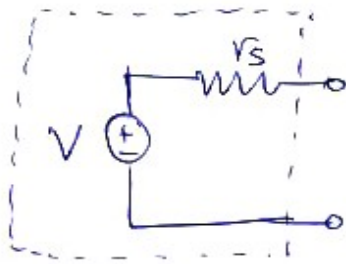
Στην περίπτωση του βραχυκλώματος η διαφορά δυναμικού στα άκρα του είναι 0 και επομένως διαρρέεται από το μέγιστο δυνατό ρεύμα. Είναι ισοδύναμο με μία αντίσταση η τιμή της οποίας τείνει στο 0.

Αντίθετα στην περίπτωση του ανοιχτοκυκλώματος δεν έχουμε ροή ρεύματος και η τάση του καθορίζεται από το υπόλοιπο κύκλωμα το οποίο είναι συνδεδεμένο. Το ανοιχτοκύκλωμα είναι ισοδύναμο με μία αντίσταση η τιμής της οποίας τείνει στο άπειρο.

## Πραγματικές πηγές τάσης και ρεύματος

Οι ιδανικές πηγές τάσης και ρεύματος που εξετάσαμε μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα απλά μας βοηθούν σημαντικά στην ανάλυση των κυκλωμάτων. Στην περίπτωση που θέλουμε να συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς τα μη ιδανικά χαρακτηριστικά των πραγματικών πηγών τάσης και ρεύματος χρησιμοποιούμε κάποια γραμμικά μοντέλα.

### Πραγματική πηγή τάσης

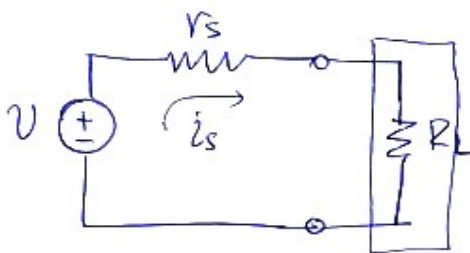


Η πραγματική πηγή τάσης  $V$  αναπαρίσταται σαν μια ιδανική πηγή τάσης  $V$  η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά με μία αντίσταση  $r_s$ . Η αντίσταση  $r_s$  ονομάζεται εσωτερική αντίσταση της πηγής τάσης και προκαλεί μια επιπλέον πτώση τάσης στα άκρα της πραγματικής πηγής. Έτσι η πραγματική πηγή τάσης καταλήγει να προσφέρει μια τάση η οποία είναι μικρότερη της ονομαστικής  $V$ .

Η τάση στα άκρα της πραγματικής πηγής τάσης (αυτή που φαίνεται στα άκρα της αντίστασης  $R_L$  στο 2ο σχήμα) όπως προκύπτει από τη σχέση του διαιρέτη τάσης είναι ίση με

$$V_L = \frac{R_L}{r_s + R_L} V$$

Για να πλησιάζει όσον το δυνατόν περισσότερο η τιμή  $V_L$  την ονομαστική τάση  $V$  θέλουμε η τιμή της εσωτερικής αντίστασης  $r_s$  να τείνει στο 0.



$$\lim_{r_s \rightarrow 0} V_L = V$$

Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης καθορίζει επίσης το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να "προσφέρει" η πηγή τάσης. Το ρεύμα που φεύγει από την πραγματική πηγή τάσης είναι ίσο με

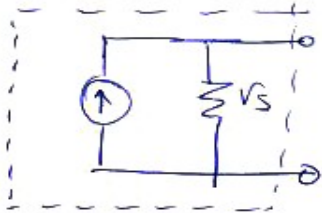
$$i_s = \frac{V}{r_s + R_L}$$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εμφανίζεται όταν η τιμή της αντίστασης  $R_L$  τείνει στο 0 (δηλαδή η αντίσταση μοιάζει με βραχυκύκλωμα). Τότε το ρεύμα  $i_s$  παίρνει τη μέγιστη τιμή του η οποία είναι ίση με:

$$i_{s \max} = \lim_{R_L \rightarrow 0} i_s = \lim_{R_L \rightarrow 0} \frac{V}{r_s + R_L} = \frac{V}{r_s}$$

Επομένως και πάλι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για να μπόρεσει η πραγματική πηγή τάσης να προσφέρει όσον το δυνατόν περισσότερο ρεύμα στο φορτίο πρέπει η εσωτερική της αντίσταση να είναι πολύ κοντά στο μηδέν. (Η μέγιστη τιμή του  $i_s$  οδηγείται σε αυτή την περίπτωση στο άπειρο).

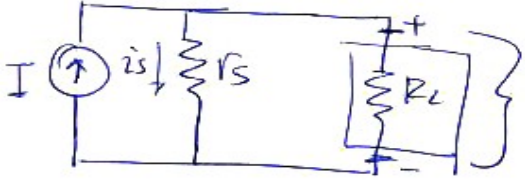
Πραγματική πηγή ρεύματος



Η πραγματική πηγή ρεύματος  $I$  αναπαρίσταται σαν μια ιδανική πηγή ρεύματος  $I$  η οποία είναι συνδεδεμένη παράλληλα με μία αντίσταση  $r_s$ . Η αντίσταση  $r_s$  ονομάζεται εσωτερική αντίσταση της πηγής ρεύματος και “κλέβει” ένα μέρος του ρεύματος  $I$  που προορίζεται για το φορτίο.

Όπως προκύπτει από τις απλές σχέσεις του διαιρέτη ρεύματος, το ρεύμα που τελικά φτάνει στο φορτίο είναι ίσο με

$$I_L = \frac{G_L}{G_s + G_L} I$$



Για να πλησιάζει η τιμή του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο  $I_L$  την ονομαστική τιμή του ρεύματος  $I$  θέλουμε η εσωτερική αγωγιμότητα  $G_s$  να τείνει στο 0.

$$\lim_{G_s \rightarrow 0} I_L = I$$

Εφόσον η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της αντίστασης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η πηγή ρεύματος προσφέρει το ρεύμα της στο φορτίο με τον καλύτερο δυνατό τρόπο όταν η τιμή της εσωτερικής αντίστασης  $r_s$  τείνει στο άπειρο. Όταν η τιμή της εσωτερικής αντίστασης απειρίζεται τότε ουσιαστικά συμπεριφέρεται σαν ανοιχτοκύκλωμα μη επιτρέποντας τη ροή ρεύματος από αυτόν τον κλάδο με αποτέλεσμα όλο το ρεύμα της πηγής να πηγαίνει στο φορτίο.

Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης καθορίζει επίσης τη μέγιστη τάση που μπορεί να “προσφέρει” η πηγή ρεύματος. Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της πραγματικής πηγής ρεύματος είναι ίση με

$$v_s = \frac{I}{G_s + G_L}$$

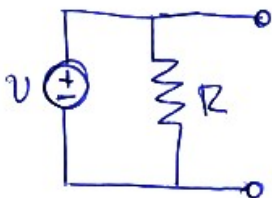
Η μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίζεται όταν η τιμή της αντίστασης  $R_L$  τείνει στο άπειρο (δηλαδή το φορτίο έχει αντικατασταθεί από ανοιχτοκύκλωμα.). Σε αυτήν την περίπτωση η αγωγιμότητα του φορτίου τείνει στο 0 με αποτέλεσμα

$$v_{smax} = \lim_{G_L \rightarrow 0} v_s = \lim_{R_L \rightarrow \infty} \frac{I}{G_s + G_L} = \frac{I}{G_s} = I r_s$$

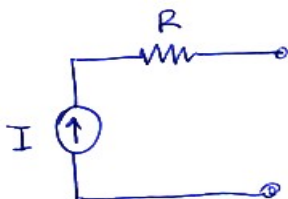
Επομένως και πάλι καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως για να έχουμε τη μέγιστη δυνατή τάση στα άκρα της πηγής ρεύματος πρέπει η εσωτερική της αντίσταση να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη.

Ειδικές περιπτώσεις

Η σύνδεση των αντιστάσεων με τις ιδανικές πηγές τάσης και ρεύματος μπορεί να εμφανιστεί και με ακόμη δύο τρόπους οι οποίοι δε συνεισφέρουν τίποτα ουσιαστικό στη λειτουργία του κυκλώματος. Καλό είναι οι συνδέσεις αυτές να ανακαλύπτονται σύντομα και να αφαιρούνται από το κύκλωμα απλοποιώντας την ανάλυση του.



Σύνδεση αντίστασης παράλληλα με ιδανική πηγή τάσης: Στην περίπτωση αυτή είναι προφανές πως η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι πάντα ίση με την τάση που προσφέρει η πηγή και δεν επηρεάζεται από οποιοδήποτε άλλο κύκλωμα και να συνδεθεί στα άκρα A και B. Επομένως η αντίσταση μπορεί να αφαιρεθεί χωρίς να αλλάξει η λειτουργία του κυκλώματος.



Σύνδεση αντίστασης σε σειρά με πηγή ρεύματος: Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα που διαρρέει τον κλάδο καθορίζεται αποκλειστικά την πηγή ρεύματος, με αποτέλεσμα η αντίσταση να μπορεί να αφαιρεθεί από το κύκλωμα.

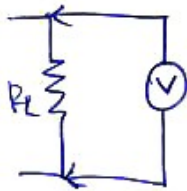


## Αμπερόμετρο – Βολτόμετρο

Για την πειραματική μέτρηση της τάσης στα άκρα ενός στοιχείου και του ρεύματος που το διαρρέει χρησιμοποιούνται δύο ευρέως γνωστές συσκευές μέτρησης. Το αμπερόμετρο που μετρά την ένταση του ρεύματος και το βολτόμετρο που μετρά την διαφορά δυναμικού.



Σύνδεση αμπερόμετρου: Το αμπερόμετρο συνδέεται πάντα σε σειρά με το στοιχείο του οποίου το ρεύμα θέλουμε να μετρήσουμε.



Σύνδεση βολτόμετρου: Το αμπερόμετρο συνδέεται πάντα παράλληλα με το στοιχείο του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του.