



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**Στοιχεία φυσικής των ηλεκτρικών
ρευμάτων
Φυσιολογικές αντιδράσεις του
ανθρώπινου οργανισμού
Είδη & επιμέρους χαρακτηριστικά
ηλεκτρικών θεραπευτικών ρευμάτων**

**Δρ Σάββας Σπανός
Επίκουρος Καθηγητής**

Βασικές Αρχές του Ηλεκτρισμού

- Ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται η κίνηση των ηλεκτρονίων που μεταφέρουν ηλεκτρικά φορτία μέσα σε αγωγούς.
- Ένταση (I) ονομάζεται το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που διέρχεται από έναν αγωγό στη μονάδα του χρόνου ($I=q/t$) ή αλλιώς ο ρυθμός με τον οποίο ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα.
(Ampere ή A - $1A=1Coulomb/1sec$ - $1 Coulomb=6,25 \times 10^{15} e^-$
Υποπολλαπλάσια: mA 1/1.000A, μA 1/1.000.000A).
- Διαφορά δυναμικού ή ηλεκτρική τάση (V) ονομάζεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να κινούνται (Volt ή V).
- Αγωγιμότητα ονομάζεται η ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα από έναν αγωγό (καλοί αγωγοί π.χ. μέταλλα, διαλύματα – μονωτές π.χ. ξύλο, γυαλί, αέρας).
- Αντίσταση (R) ενός αγωγού ονομάζεται το φυσικό μέγεθος που μας δείχνει πόσο εύκολα (ή δύσκολα) διέρχεται το ηλεκτρικό φορτίο μέσα από τη μάζα του (Ohm ή Ω) ($1\Omega =$ στήλη Hg μήκους 106,3cm, διαμέτρου 1mm, σε θερμοκρασία 0°).
- Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από: τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων του, το μήκος, τη διάμετρο, και τη θερμοκρασία του.

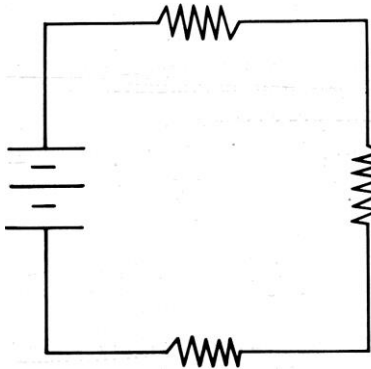
- Χωρητικότητα ενός αγωγού ονομάζεται η ικανότητά του να συγκεντρώνει ηλεκτρικό φορτίο, υπό τη μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου (πυκνωτής) ($C=q/V$, Farad ή F – $1F=1Coulomb/1Volt$).
- Επαγωγή ενός αγωγού ονομάζεται η ικανότητά του να συγκεντρώνει ηλεκτρική ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια ενός επαγωγέα (Henry ή H).

Ωμική + χωρητική + επαγωγική αντίσταση = ολική αντίσταση

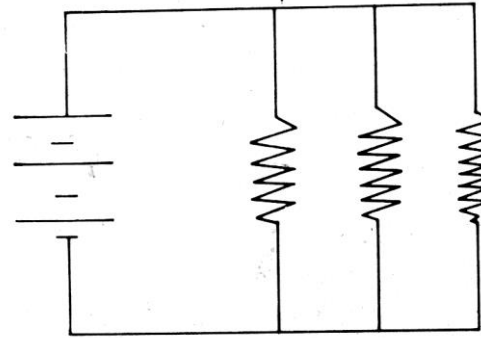
- Ηλεκτρικό κύκλωμα είναι η οδός που ακολουθεί το ηλεκτρικό ρεύμα από μια πηγή ισχύος μέσω διαφόρων στοιχείων επιστρέφοντας πάλι στην πηγή. Για ροή ηλεκτρονίων απαιτείται κλειστό κύκλωμα. Στο ανοικτό κύκλωμα δεν υφίσταται ροή ηλεκτρονίων.
- Νόμος του Ohm: η ένταση του ρεύματος που διέρχεται από έναν αγωγό ή κύκλωμα είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του κυκλώματος και αντιστρόφως ανάλογη της αντίστασης του κυκλώματος ($I=V/R$).
- Νόμος του Joule: το ποσό της θερμότητας που παράγεται, όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από έναν αγωγό, είναι ανάλογο του τετραγώνου της έντασης του ρεύματος, της αντίστασης του αγωγού και του χρόνου ροής του ρεύματος ($Q=0,24I^2Rt$, Joule ή J).

- Σύνδεση Στοιχείων κυκλώματος

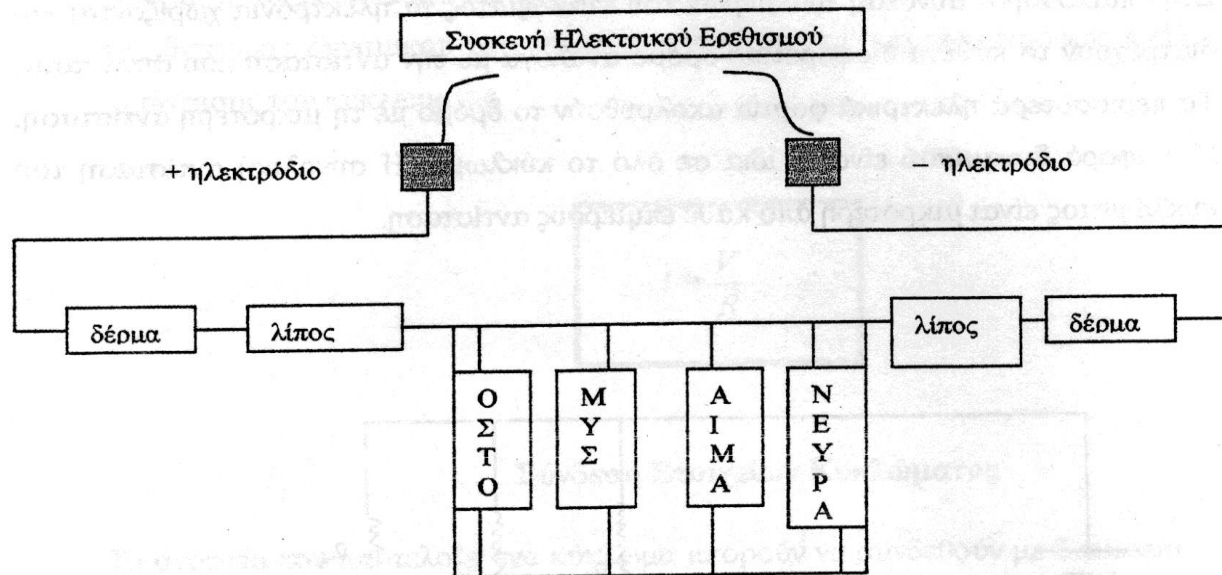
α) σύνδεση σε σειρά



β) παράλληλη σύνδεση



- Το ηλεκτρικό κύκλωμα που δημιουργείται κατά την εφαρμογή ηλεκτροθεραπευτικών μέσων συνδυάζει στοιχεία σε σειρά και παράλληλα



Ροή του Ρεύματος μέσω των ιστών

- Η επιλογή των **κατάλληλων παραμέτρων** του ηλεκτροθεραπευτικού ρεύματος είναι κριτικής σημασίας για να επιτευχθεί ο ερεθισμός συγκεκριμένου ιστού.
- Το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται μέσα από τους ιστούς με τη μεγαλύτερη αγωγιμότητα (μικρότερη αντίσταση).
- **Ιστοί με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό και ιόντα είναι οι καλύτεροι αγωγοί του ηλεκτρισμού.**

Το δέρμα αποτελείται από διάφορες στοιβάδες με διαφορετική περιεκτικότητα σε νερό και υψηλή περιεκτικότητα κερατίνης, έτσι τελικά δρα ως μονωτικό (παραγωγή θερμότητας → αγγειοδιαστολή)

Το αίμα αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από νερό και ιόντα

Ο μυϊκός ιστός αποτελείται κατά 75% από νερό (μεταβίβαση της ώσης επιμήκως παρά εγκάρσια)

Οι τένοντες έχουν μικρή περιεκτικότητα σε νερό

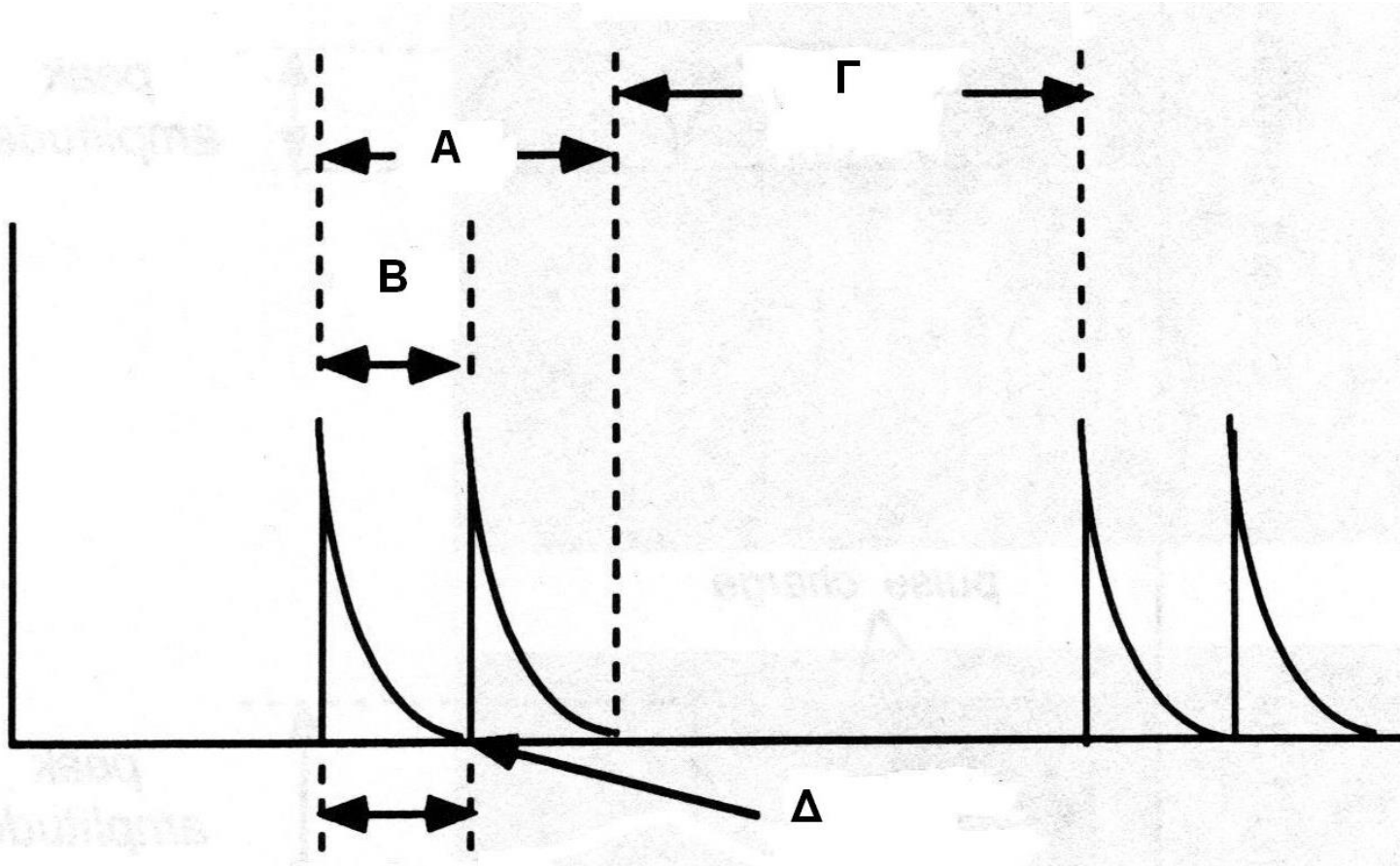
Ο λιπώδης ιστός αποτελείται κατά 14% από νερό

Η αγωγιμότητα των περιφερικών νεύρων είναι 6πλάσια από αυτή του μυϊκού ιστού (αν εξαιρέσουμε το περίβλημα λίπους και το ινώδες έλυτρο)

Τα οστά αποτελούνται κατά 5% από νερό

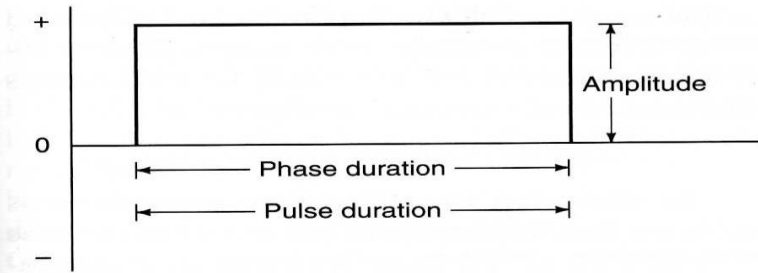
Φάσεις και Παλμοί

Παραδοσιακά παλμός η θεμελιώδης μονάδα του ηλεκτρικού ρεύματος.
Κυριολεκτικά φάση η θεμελιώδης μονάδα.

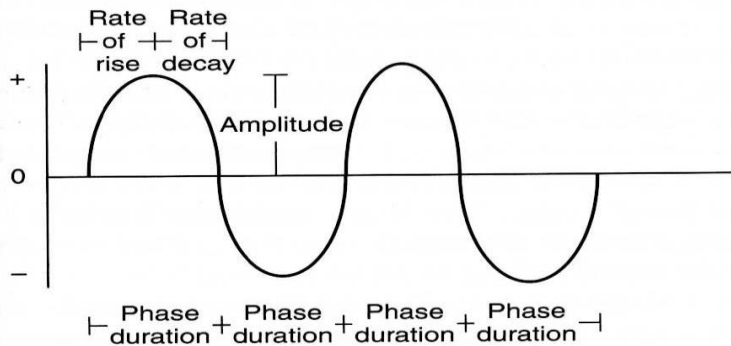


A. Παλμός, B. Φάση, Γ. Διάστημα μεταξύ παλμών, Δ. Διάστημα μεταξύ φάσεων

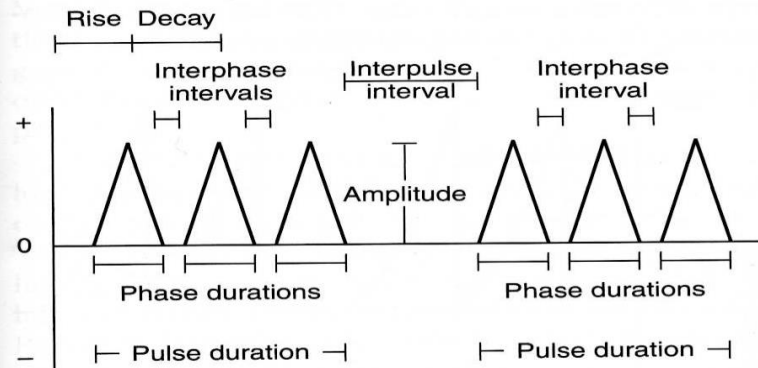
Φάσεις και Παλμοί



(a)

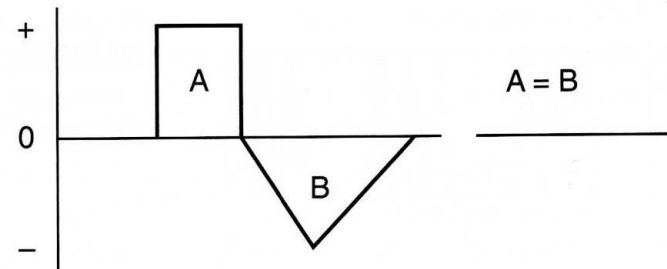


(b)

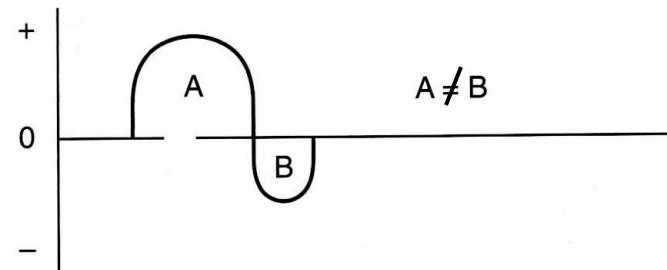


(c)

Figure 5-4 Characteristics of (a) monophasic current, (b) biphasic current, and (c) pulsatile current.



(a)

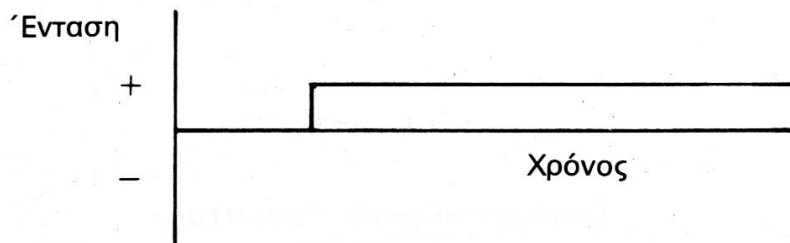


(b)

Figure 5-5 Asymmetric waveforms. (a) Balanced asymmetrical current. (b) Unbalanced asymmetrical current.

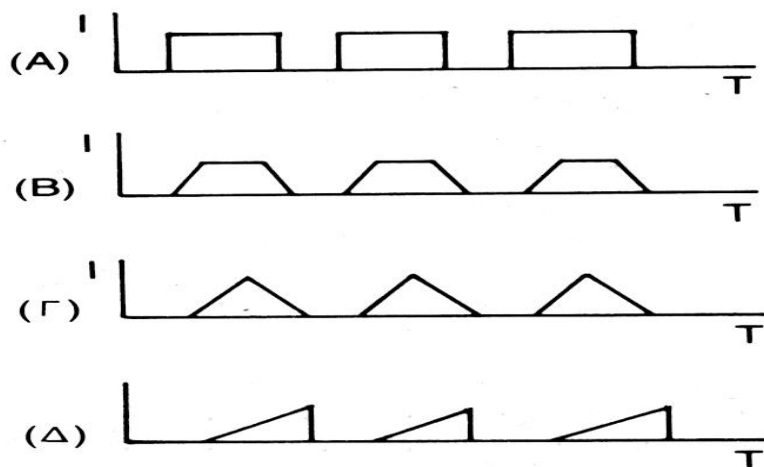
Ηλεκτροθεραπευτικά Ρεύματα

Συνεχές (DC) ή αμιγώς Γαλβανικό



Μονοφασικό
Σταθερή πολικότητα
Σταθερή ένταση

Διακοπτόμενο Συνεχές (ή παλμικό συνεχές)



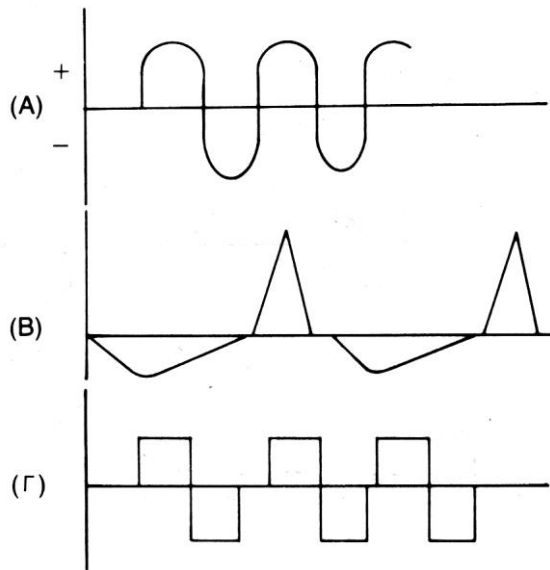
Μονοφασικό
Σταθερή πολικότητα
Μεταβαλλόμενη ένταση

I = ένταση T = χρόνος

Α. Τετραγωνική μορφή, Β. Τραπεζοειδής μορφή, Γ. Τριγωνική μορφή, Δ. Τριγωνική μορφή

Ηλεκτροθεραπευτικά Ρεύματα

Εναλλασσόμενο (AC)



Διφασικό

Μεταβαλλόμενη πολικότητα

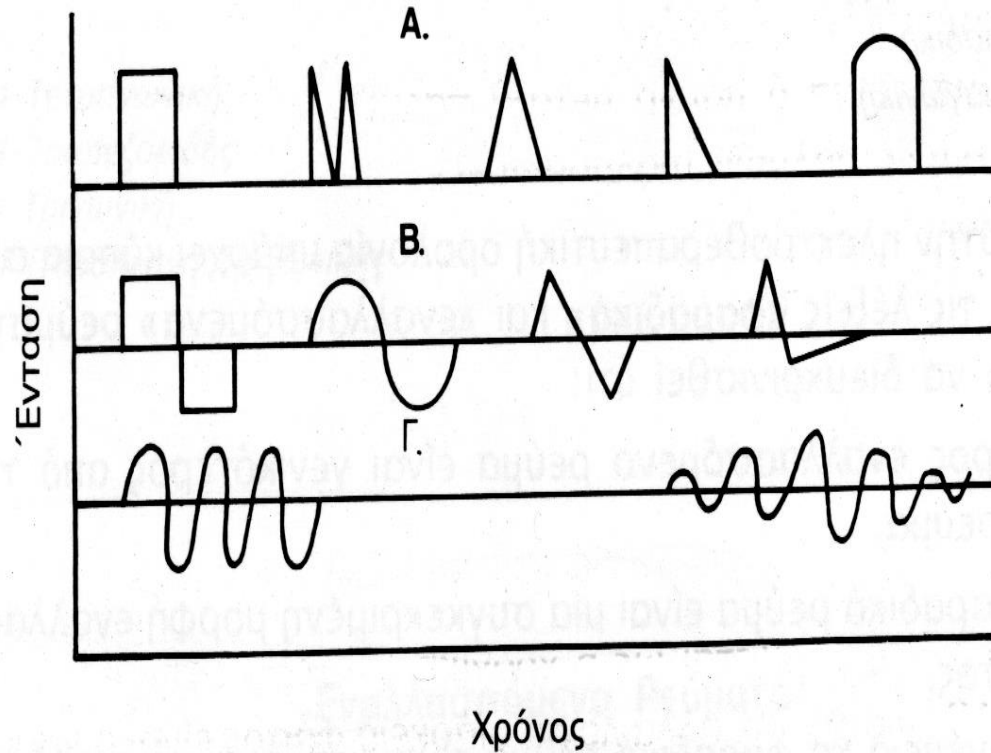
Μεταβαλλόμενη ένταση

Οι φάσεις μπορεί να είναι συμμετρικές ή ασύμμετρες

A. Ημιτονοειδής μορφή, B. Τριγωνική μορφή, Γ. Τετραγωνική μορφή

Ηλεκτροθεραπευτικά Ρεύματα

Παλμικό (ή πολυφασικό)

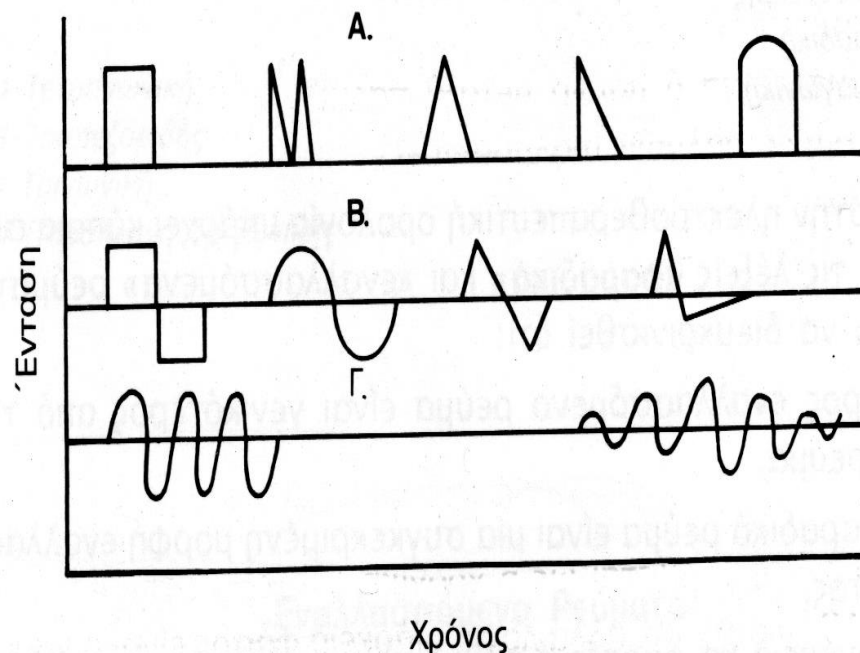


Κάθε παλμός αποτελείται από 3 ή και περισσότερες φάσεις, οι οποίες μπορεί να είναι συμμετρικές ή ασύμμετρες.

A. Μονοφασικά, B. Διφασικά, Γ. Πολυφασικά

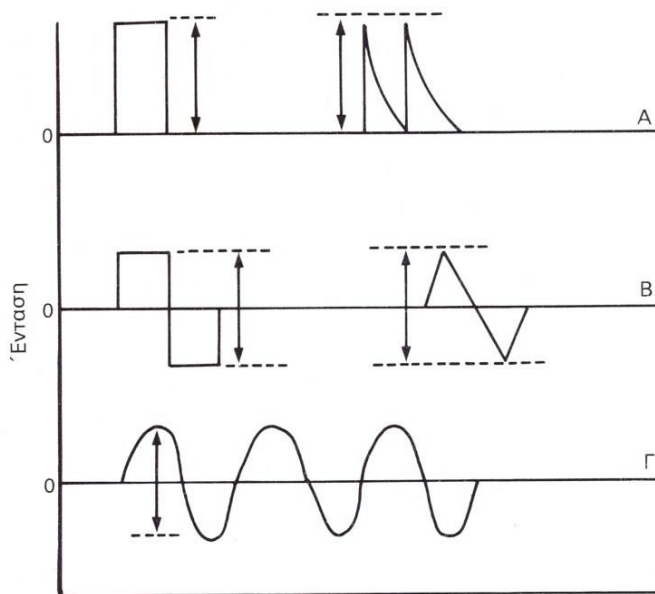
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Διάρκεια φάσης ορίζεται ως η χρονική διάρκεια στην οποία ρέει το ρεύμα σε κάθε φάση. Είναι ο χρόνος διάρκειας κάθε φάσης αρχίζοντας από το 0 και καταλήγοντας σε αυτό.
- ✓ Για τα μονοφασικά, διάρκεια παλμού και φάσης ίδια.
- ✓ Για τα διφασικά, διάρκεια κύκλου (ή παλμού) ίση με το άθροισμα της διάρκειας των δύο φάσεων.
- ✓ Διάρκεια πολυφασικού κύκλου (ή παλμού) ίση με το άθροισμα της διάρκειας των φάσεων που περιέχει.



Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

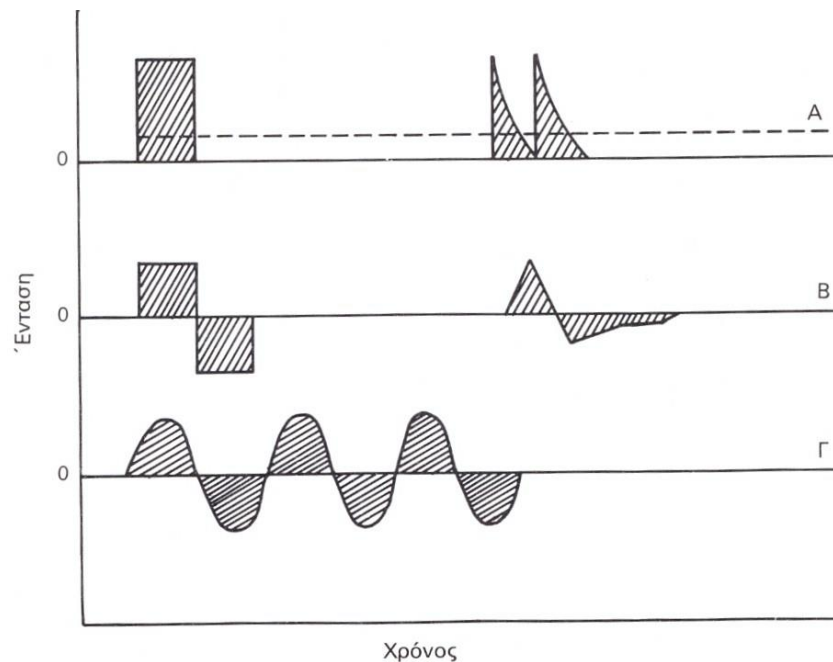
- Μέγιστη ένταση (ή πλάτος) φάσης ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της έντασης σε κάθε φάση (κορυφή έντασης).
- ✓ Στα μονοφασικά, ίδια κορυφή έντασης φάσης και παλμού.
- ✓ Στα διφασικά και πολυφασικά, μία κορυφή για κάθε φάση.
- Μέσος όρος ή μέση ένταση φάσης που χρησιμοποιείται για τα γνήσια ημιτονοειδή ρεύματα και εκφράζει το μέσο όρο έντασης του ρεύματος στην περιοχή που περικλύεται από την ημιτονοειδή καμπύλη (για τα αμιγή ημιτονοειδή 0,637 φορές η μέγιστη τιμή έντασης).



- Μέση τιμή έντασης ρεύματος (μέσος όρος) ορίζεται ως το ποσό του ρεύματος που ρέει σε ένα sec.
- ✓ Για τα συνεχή ρεύματα μέση τιμή και μέγιστη τιμή είναι ίσες.
- ✓ Για όλα τα παλμικά μέση τιμή μικρότερη της μέγιστης τιμής.

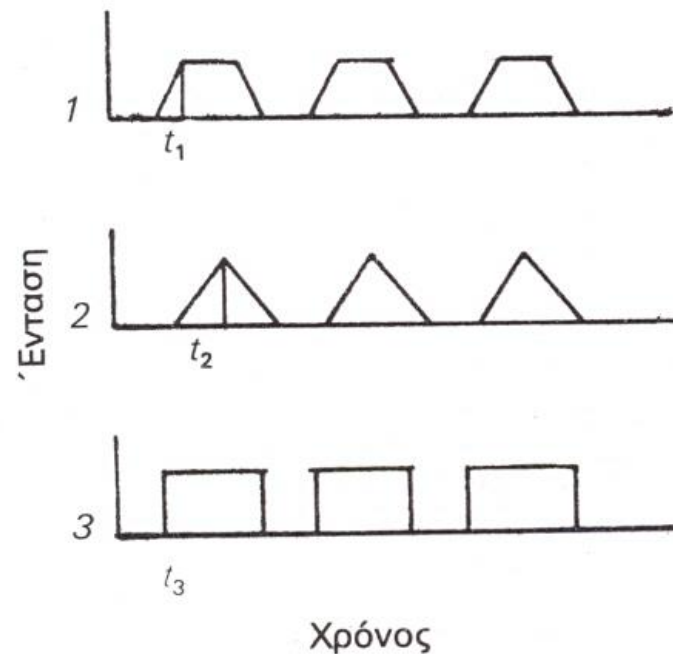
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Φορτίο φάσης ορίζεται ως η ποσότητα ηλεκτρισμού που μεταφέρει κάθε φάση παλμού (ή κύκλου) στους ιστούς (μετράται σε Coulomb ή $\mu\text{Coulomb}$).
- ✓ Στα μονοφασικά, ίδιο φορτίο φάσης και παλμού και πάντοτε >0 .
- ✓ Στα διφασικά, το φορτίο παλμού (ή κύκλου) ισούται με το άθροισμα του φορτίου των δύο φάσεων (σε συμμετρικές φάσεις το φορτίο $=0$).
- ✓ Στα πολυφασικά, το φορτίο παλμού (ή κύκλου) ισούται με το άθροισμα των φορτίων των επιμέρους φάσεων (σε συμμετρικές φάσεις ζυγού αριθμού το φορτίο $=0$).



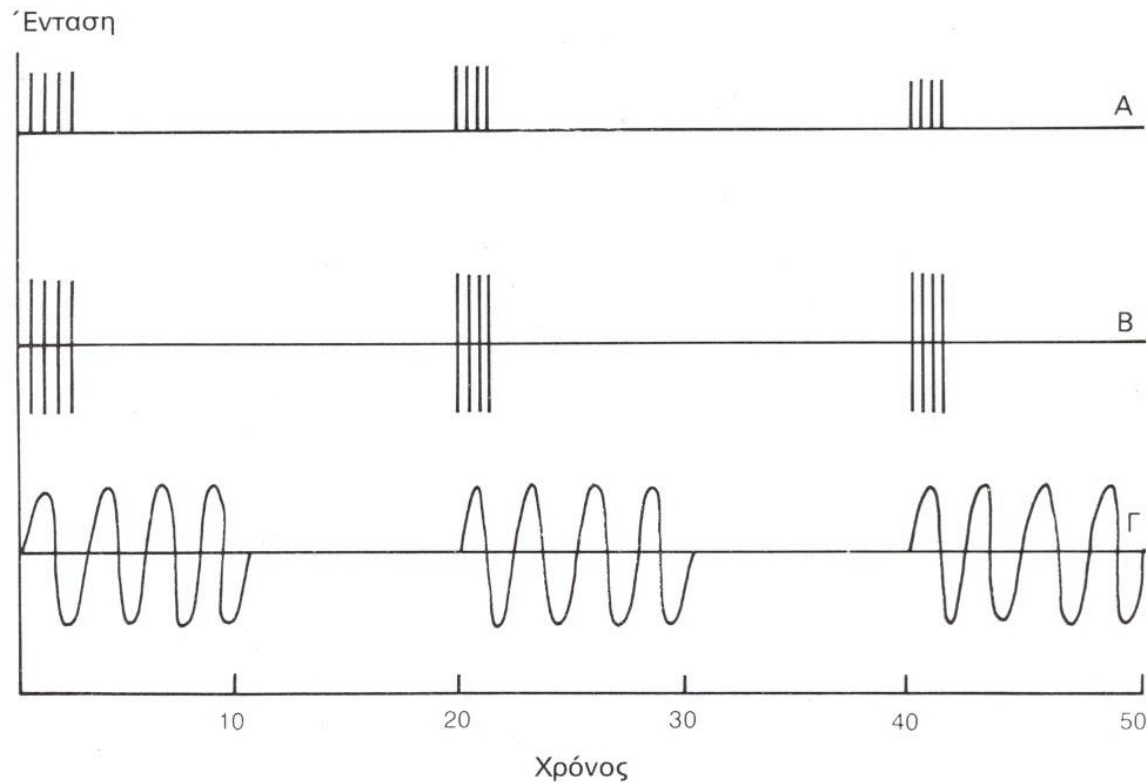
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Χρόνος ή ρυθμός ανόδου (ταχύτητα ανύψωσης φάσης) ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία τα παλμικά ρεύματα φτάνουν στην μέγιστη τιμή έντασης σε μια φάση.
- ✓ Το ίδιο για φάση και παλμό στα μονοφασικά και τα διφασικά συμμετρικά.
- ✓ Για τα διφασικά ασύμμετρα είναι προτιμότερη η ταχύτητα ανύψωσης φάσης.



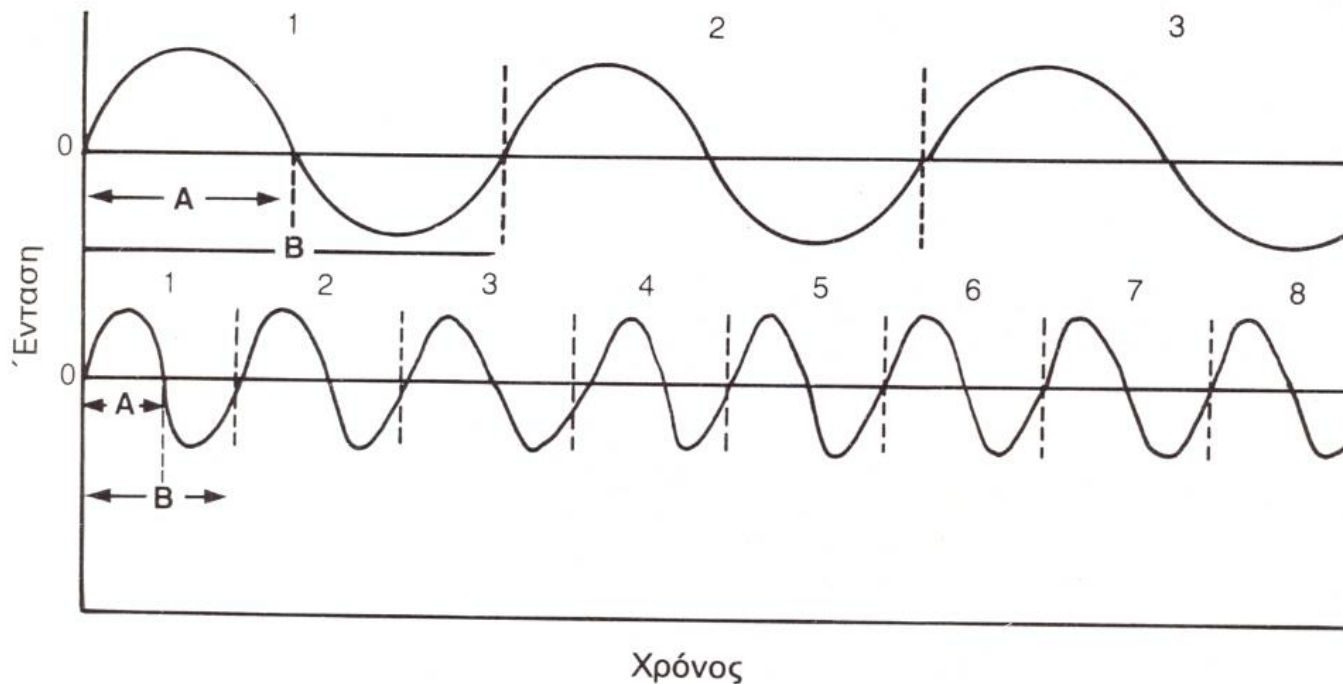
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Ριπή φάσεων (Burst) ορίζεται το σύνολο των φάσεων κάθε παλμού στα πολυφασικά (3-100 φάσεις σε κάθε παλμό).
- ✓ Στα μονοφασικά ή διφασικά μπορεί να έχουμε ριπή παλμών.
- ✓ Διάρκεια ριπής για μονοφασικά και διφασικά 1-2 msec και για τα πολυφασικά 10 msec.



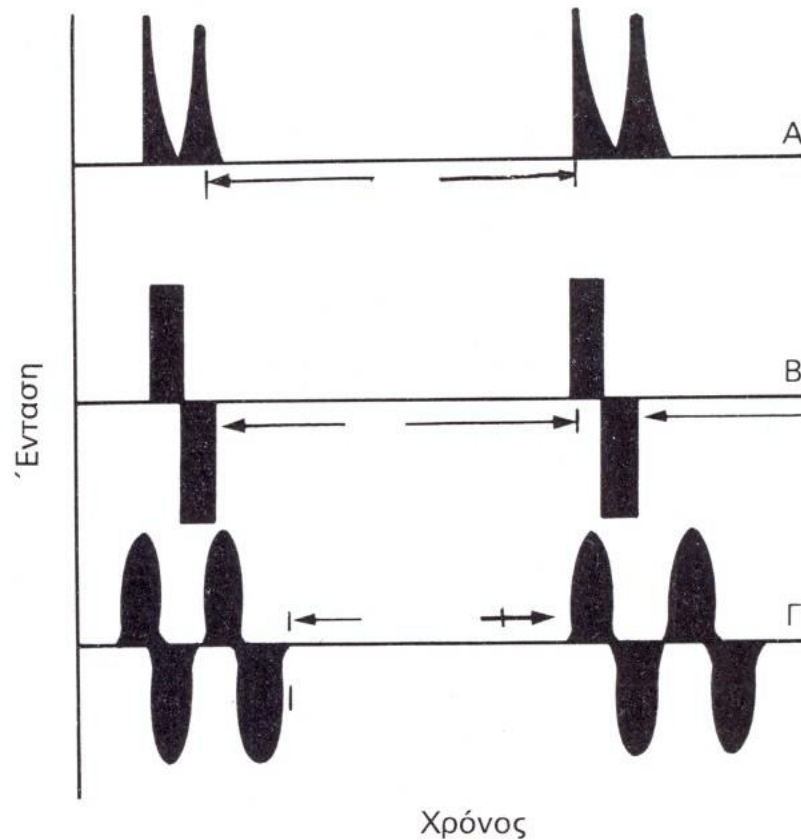
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Ρυθμός παλμών ή συχνότητα ορίζεται ως ο αριθμός παλμών (ή κύκλων) στην μονάδα του χρόνου (1 sec).
- ✓ Ερεθιστές χαμηλής συχνότητας: 40-100Hz
- ✓ Ερεθιστές μέσης συχνότητας: 2500-4000Hz
- ✓ Ερεθιστές υψηλής συχνότητας: 10000Hz



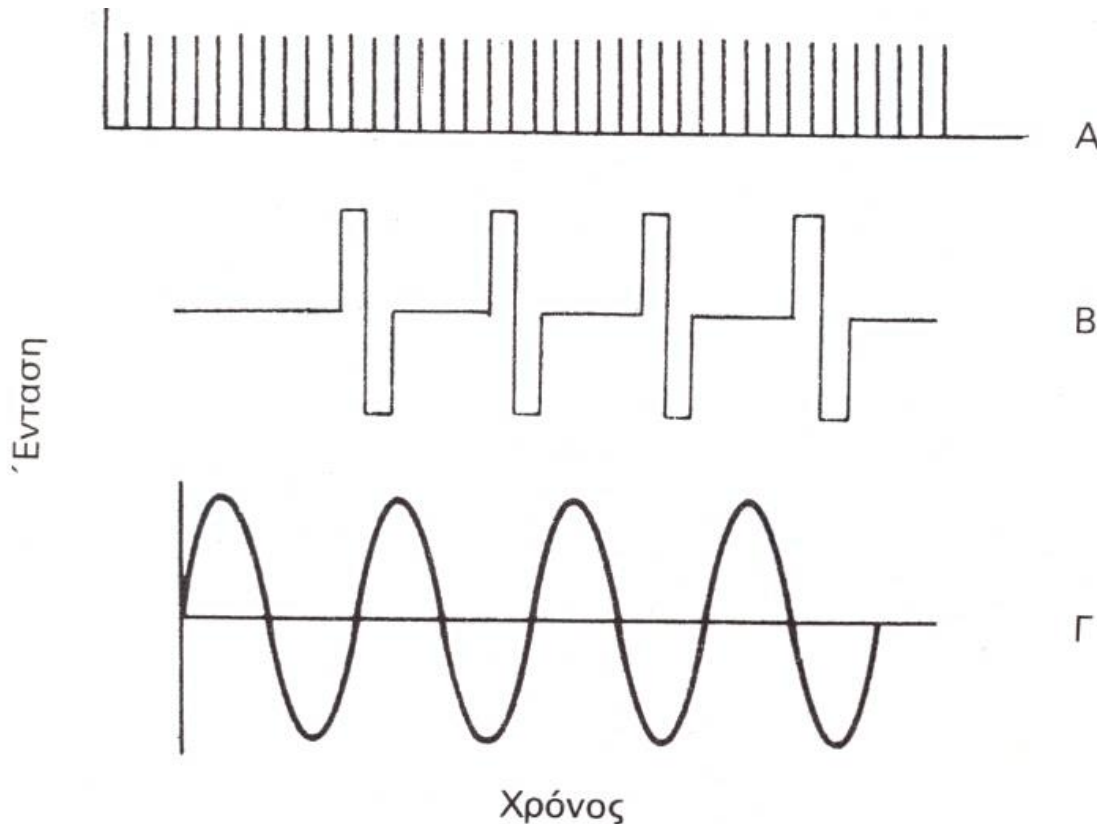
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Διάλειμμα ή παύση μεταξύ παλμών και ριπών ορίζεται ως η χρονική διάρκεια παύσης μεταξύ παλμών ή εκρήξεων (πολυφασικών παλμών ή κύκλων).



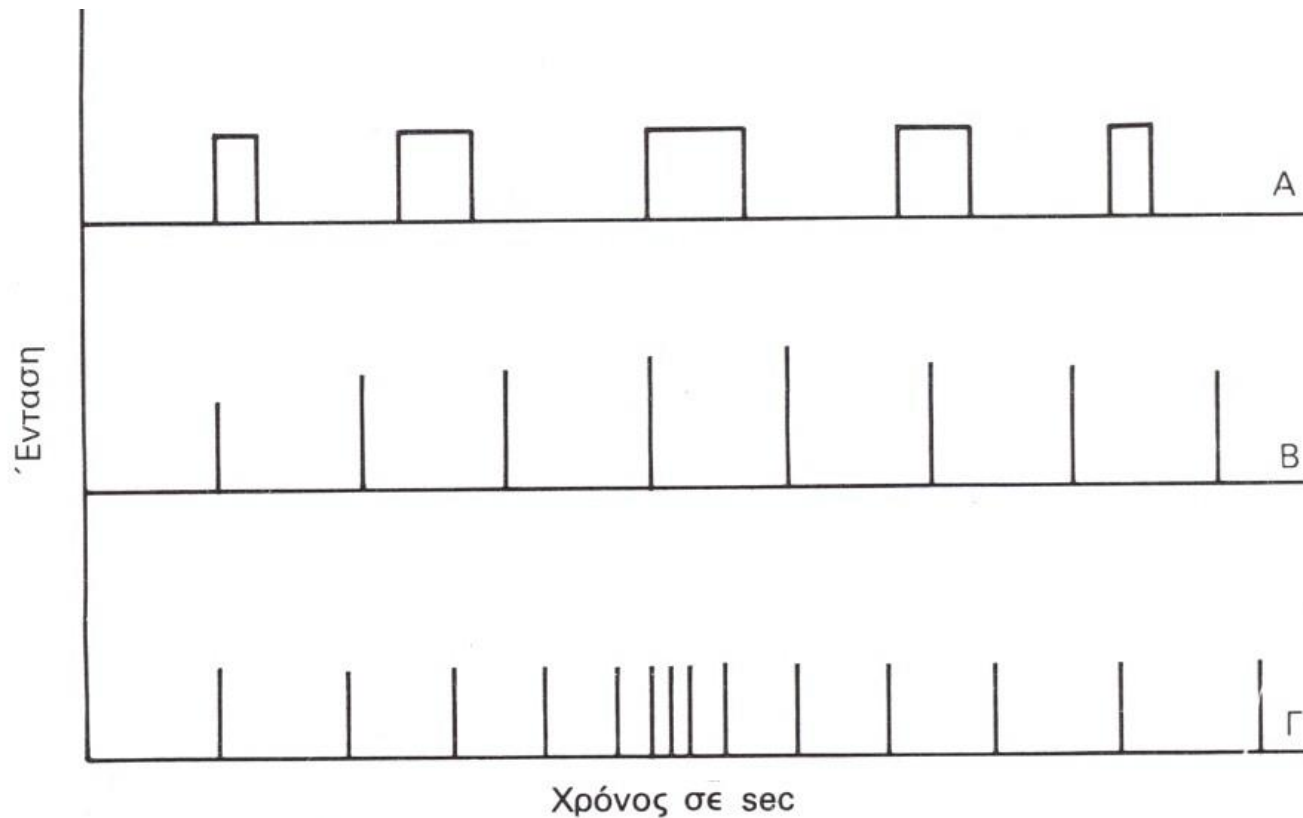
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Παλμοσειρά είναι μια σειρά από παλμούς περιλαμβάνοντας τα μεταξύ παλμών διαλείμματα (παύσεις).
- ✓ Διάρκεια παλμοσειράς από 1 έως μερικά sec.



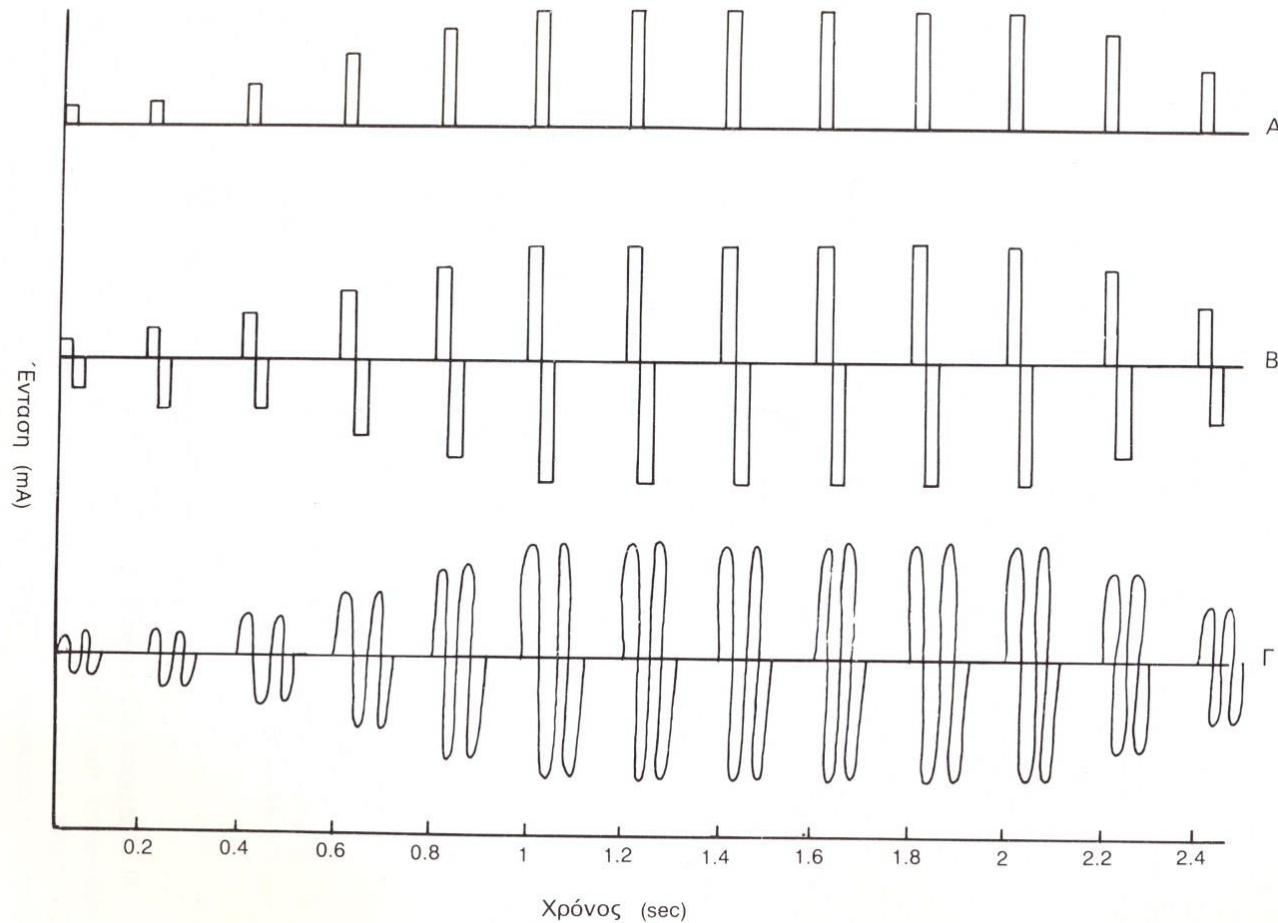
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Διαμόρφωση φάσης είναι η αυτόματη αύξηση ή ελάττωση της διάρκειας, έντασης ή συχνότητας των φάσεων.



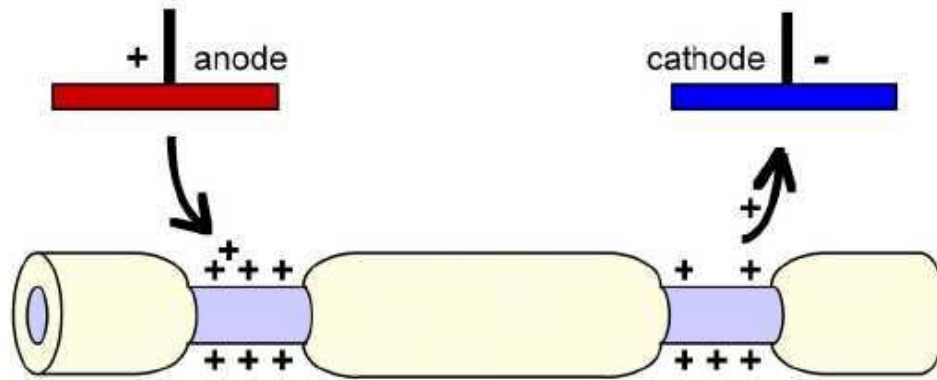
Χαρακτηριστικά φάσεων και παλμών

- Διαμόρφωση παλμοσειράς είναι η σταδιακά ανυψούμενη ή ελαττούμενη παλμοσειρά.



Ηλεκτρόδια

- Κάθοδος (αρνητικό ηλεκτρόδιο) ονομάζεται το ηλεκτρόδιο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και προσελκύει θετικά ιόντα (κυρίως Na^+ και K^+).
- Άνοδος (θετικό ηλεκτρόδιο) ονομάζεται το ηλεκτρόδιο με τη μικρότερη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και προσελκύει αρνητικά ιόντα (κυρίως Cl^-).

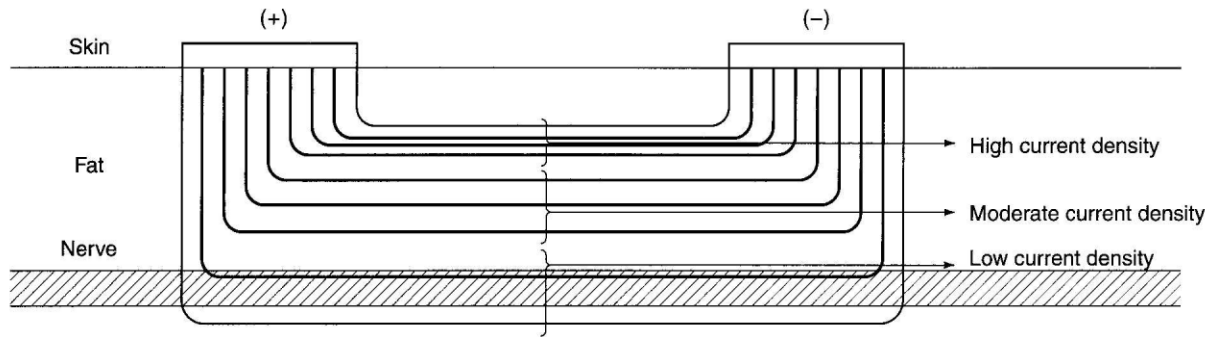


- Το αρνητικό ηλεκτρόδιο προκαλεί εκπόλωση των μεμβρανών των κυττάρων, γι'αυτό και αποκαλείται ενεργό ηλεκτρόδιο. Η μεγάλη συγκέντρωση ανιόντων κάτω από το θετικό ηλεκτρόδιο (**αδιάφορο**) τείνει να υπερπολώσει τη μεμβράνη των υποκείμενων κυττάρων, καθιστώντας τα λιγότερο ευαίσθητα σε ερεθίσματα εκπόλωσης (έτσι, για εκπόλωση απαιτείται υψηλότερη ένταση).

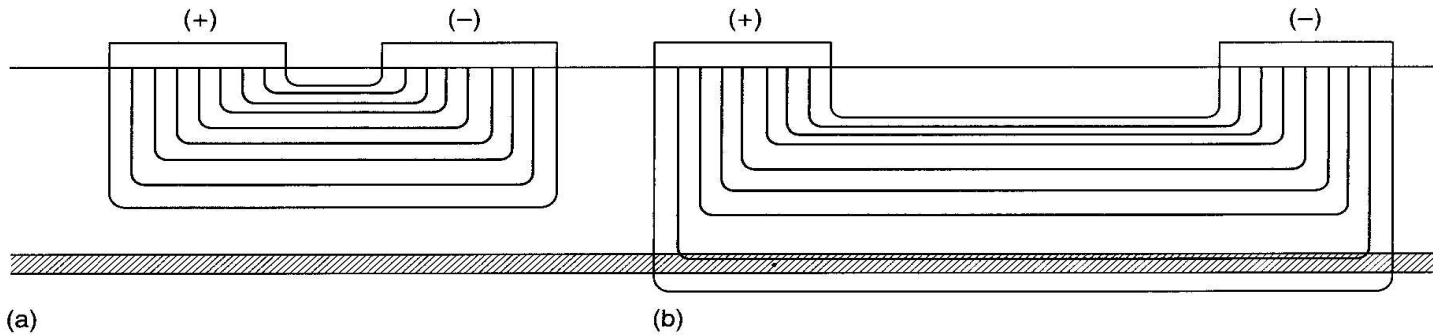
Διαστάσεις και απόσταση ηλεκτροδίων

- Οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων και η μεταξύ τους απόσταση επηρεάζουν άμεσα την *πυκνότητα* του ρεύματος (mA/cm^2).
- Όσο μικρότερες είναι οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η *πυκνότητα* του ρεύματος στην περιοχή εφαρμογής των ηλεκτροδίων.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η *πυκνότητα* του ρεύματος, τόσο *εντονότερα* είναι τα αποτελέσματα της εφαρμογής του στους ιστούς.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η *απόσταση* μεταξύ των ηλεκτροδίων, τόσο μικρότερη είναι η *πυκνότητα* του ρεύματος στους επιφανειακούς ιστούς και μεγαλύτερη στους εν τω βάθει ιστούς, μεταξύ των ηλεκτροδίων.
- Όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων, τόσο μικρότερη είναι η *αντίσταση* του δέρματος.
- Παρεμβολή αγωγίμης ουσίας, συνήθως H_2O ή διάλυμα NaCl (προτιμότερο το διάλυμα $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$ και $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ σε H_2O).

Διαστάσεις και απόσταση ηλεκτροδίων



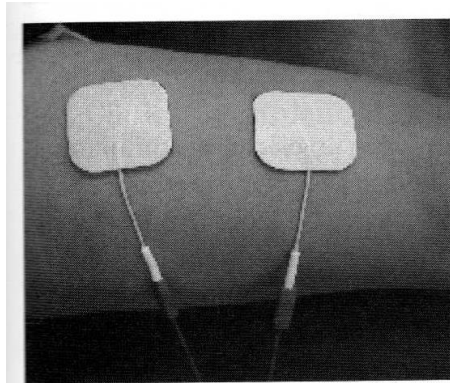
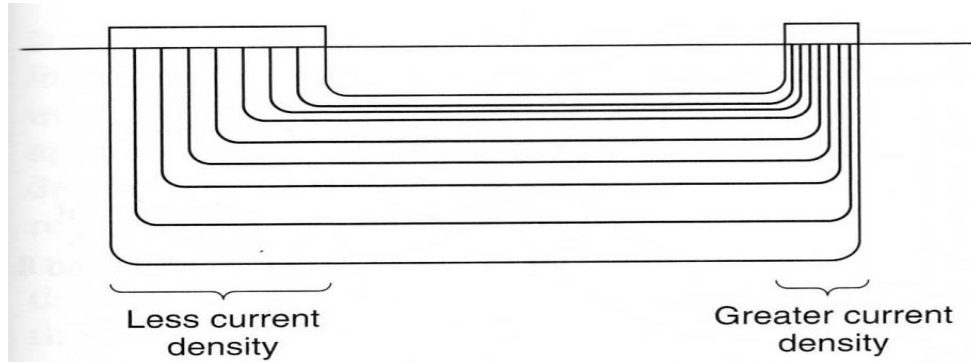
Ισομεγέθη ηλεκτρόδια τοποθετημένα κοντά το ένα στο άλλο.



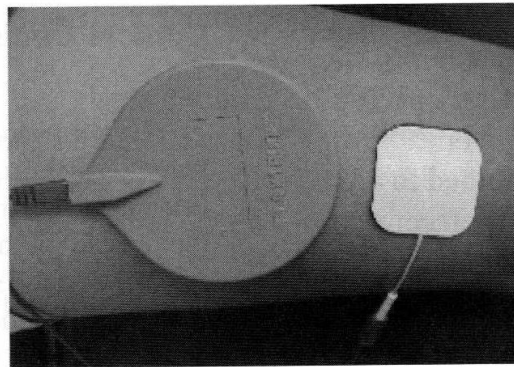
Ισομεγέθη ηλεκτρόδια τοποθετημένα πολύ κοντά μεταξύ τους προκαλούν ρεύμα υψηλής πυκνότητας στους επιφανειακούς ιστούς (a), ενώ σε μεγαλύτερη απόσταση αυξάνεται η πυκνότητα του ρεύματος στους εν τω βάθει ιστούς (b).

Διαστάσεις και απόσταση ηλεκτροδίων

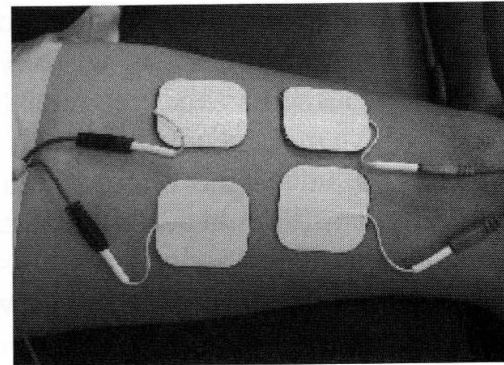
Σε περίπτωση εφαρμογής άνισων ηλεκτροδίων, μεγαλύτερη πυκνότητα του ρεύματος παρατηρείται κάτω από το μικρότερο ηλεκτρόδιο.



(a)



(b)



(c)

Μέθοδοι εφαρμογής ηλεκτροδίων: διπολική (a), μονοπολική (b), τετραπολική (c)

Ηλεκτροθεραπευτικά Ρεύματα (κλινική ονοματολογία)

- Φαραδικά (Faradic)
- Γαλβανικά (Galvanic)
- TENS – Διαδερμικός Ηλεκτρικός Νευρικός Ερεθισμός (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation)
- Υψηλής Τάσης Παλμικός Ερεθισμός (High Voltage Pulsed Stimulation ή HVPS)
- Ρωσικά (Russian)
- Παρεμβαλλόμενα (Interferential)
- Διαδυναμικά (Diadynamic)
- Λειτουργικός Ηλεκτρικός Ερεθισμός (Functional Electrical Stimulation ή FES)

Αποτελέσματα εφαρμογής ηλεκτροθεραπευτικών ρευμάτων

- Θερμικά αποτελέσματα
- Φυσικοχημικά αποτελέσματα
- Νευροφυσιολογικά αποτελέσματα

Πρακτικά, τα ηλεκτρικά θεραπευτικά ρεύματα χρησιμοποιούνται είτε για την πρόκληση μυϊκής συστολής είτε για τροποποίηση των νευρικών ώσεων του πόνου (αναλγησία), μέσω του ερεθισμού των κινητικών και των αισθητικών νευρικών οδών. Οι λειτουργίες αυτές εξαρτώνται από την σωστή επιλογή παραμέτρων.

Θερμικά αποτελέσματα

Τα παλμικά ρεύματα υψηλής και χαμηλής τάσης που χρησιμοποιούνται για ερεθισμό νεύρων και μυών, προκαλούν συνήθως ελάχιστο θερμικό αποτέλεσμα, λόγω χαμηλής μέσης τιμής έντασης (μέσος όρος έντασης ρεύματος).

Με υψίσυχνα και υψηλής τάσης ρεύματα προκύπτουν θερμικά αποτελέσματα (διαθερμίες κλπ.).

Φυσικοχημικά αποτελέσματα

- Διέλευση συνεχούς ρεύματος από διάλυμα ηλεκτρολυτών προκαλεί μεταφορά φορτισμένων ιόντων προς τον αντίθετα φορτισμένο πόλο (νόμος του Faraday – Ηλεκτρόλυση).

- Ιοντοφόρηση είναι η διείδυση φορτισμένων ιόντων φαρμακευτικών ουσιών στους ανθρώπινους ιστούς διαμέσου του δέρματος, με την βοήθεια συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος.
- Μετακίνηση αυτούσιων κολλοειδών μορίων (λιπών, πρωτεϊνών) προς την κάθοδο (-) γνωστή ως καταφόρηση.
 - Μεταφορά υγρού μέσα και έξω από τις μεμβράνες των κυττάρων γνωστή ως ηλεκτροώσμωση.

- Θετικά φορτισμένα ιόντα νατρίου (Na^+) κινούνται προς την κάθοδο (-). Εκεί κάθε κατιόν παίρνει ένα e^- και μετατρέπεται σε ουδέτερο άτομο Na. Αυτό αντιδρά με το H_2O και σχηματίζει $\text{NaOH} + \text{H}_2$ ($2\text{Na} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{NaOH} + \text{H}_2$). Η κάθοδος γίνεται αλκαλική προκαλώντας υγροποίηση των πρωτεϊνών και ελάττωση της σκληρότητας των ιστών.
- Στην άνοδο (+) συμβαίνει όξινη αντίδραση λόγω σχηματισμού HCl μετά την ουδετεροποίηση του χλωρίου (Cl^-). Η αυξημένη οξύτητα προκαλεί πήξη των πρωτεϊνών και σκλήρυνση των ιστών.
- Αυτά μόνο από συνεχή ρεύματα και όχι παλμικά.
- Μπορεί να έχει θεραπευτική αξία και ως τεχνική ονομάζεται ιατρικός γαλβανισμός.

Νευροφυσιολογικά αποτελέσματα

Από την εφαρμογή παλμικών ηλεκτρικών ρευμάτων.

Κύρια:

- Μυϊκή σύσπαση (διακοπτόμενα συνεχή, εναλλασσόμενα διαφόρων μορφών, ρωσικά, υψηλής τάσης)
- Ελάττωση πόνου (T.E.N.S., παρεμβαλλόμενα, διαδυναμικά)

Δευτερεύοντα:

- Τοπική, συνήθως επιφανειακή αγγειοδιαστολή
- Βελτίωση κυκλοφορίας
- Δευτερογενής αντίδραση ελάττωσης φλεγμονής
- Ελάττωση οιδήματος
- Επιτάχυνση επούλωσης ισχαιμικών νεκρώσεων ιστών