



Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο TEI Αθήνας



Ηλεκτροτεχνία – Ηλ. Μηχανές & Εγκαταστάσεις πλοίου (Θ)

Ενότητα 8: Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές – Μηχανές Σ.Ρ.

Δ.Ν. Παγώνης
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών ΤΕ



Το περιεχόμενο του μαθήματος διατίθεται με άδεια Creative Commons εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά



Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

Βασική περιγραφή στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών

- Αποτελεί το βασικό στοιχείο **μετατροπής ενέργειας** από ηλεκτρική σε μηχανική και αντίστροφα
- Κατηγοριοποιούνται σε:
 - **Σύγχρονες** μηχανές
 - Μηχανές **συνεχούς** ρεύματος
 - Μηχανές **επαγωγής** (ή ασύγχρονες)
- Ανάλογα με την επιθυμητή μετατροπή ενέργειας λειτουργούν ως:
 - Γεννήτριες (μετατροπή κινητικής σε ηλεκτρική ενέργεια)
 - Κινητήρες (μετατροπή ηλεκτρικής σε κινητική ενέργεια)
- Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρικών μηχανών ανάλογα με το **μέγεθός** τους, την ονομαστική **ισχύ** τους (από μερικά Watt έως χιλιάδες MW), την **ηλεκτρική τροφοδοσία** τους (εναλλασσόμενο/συνεχές ρεύμα), τον αριθμό και τη διασύνδεση των **τυλιγμάτων** τους

Λειτουργία στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών

- **Λειτουργία κινητήρα**

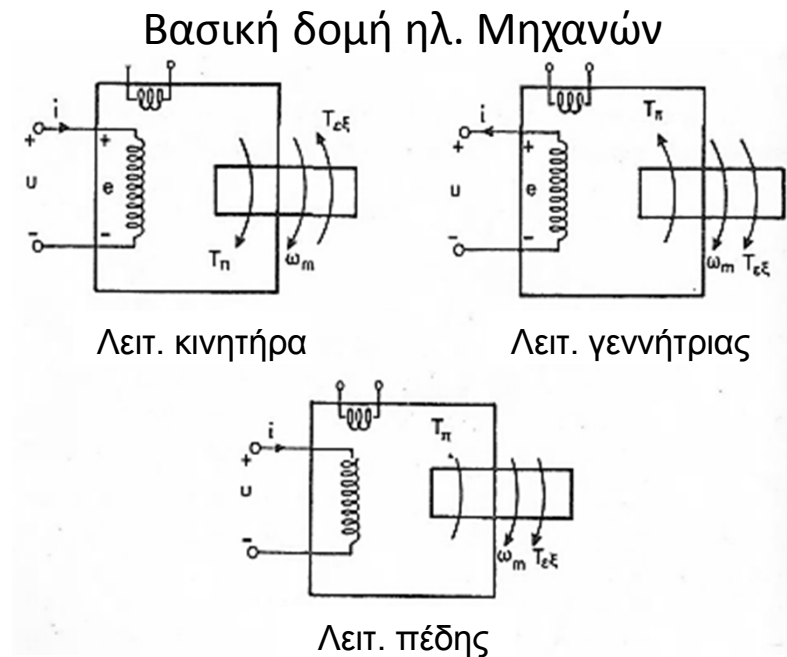
- Ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στο κύριο τύλιγμα της μηχανής (**τύλιγμα τυμπάνου** – armature winding) ενώ η μηχανική ενέργεια εξόδου αποδίδεται σε περιστρεφόμενη άτρακτο

- **Λειτουργία γεννήτριας**

- Μηχανική ενέργεια παρέχεται στην **άτρακτο** από κατάλληλη κινητήρια μηχανή και αποδίδεται με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας στους **ακροδέκτες** του κυρίου τυλίγματος (τύλιγμα τυμπάνου)

- **Λειτουργία πέδης**

- Η μηχανή τροφοδοτείται και με **μηχανική** και με **ηλεκτρική** ενέργεια. Η συνολική ενέργεια που τροφοδοτεί την μηχανή καταναλώνεται με μορφή **απωλειών**

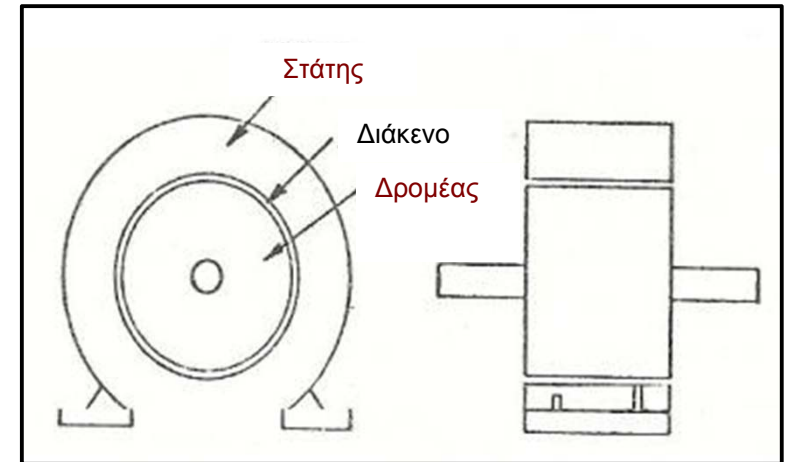


Πρωτονοτάριος Ε.Ν., Βουρνάς Κ, "Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές", Αθήνα, 1993

Βασική δομή στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών

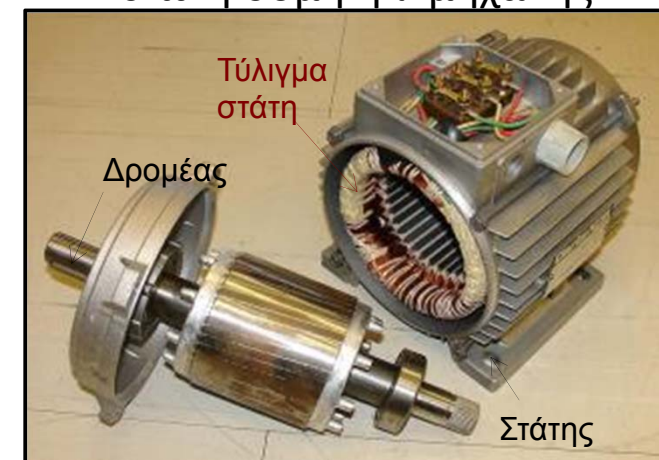
- Αποτελούνται από δύο βασικά τμήματα:
 - Το σταθερό μέρος – **Στάτης** (stator)
 - Το στρεφόμενο μέρος - **Δρομέας** (rotor)
- Οι πυρήνες των δύο τμημάτων είναι κατασκευασμένοι από **πολλαπλά ελάσματα** σιδηρομαγνητικού υλικού, ηλεκτρικά **μονωμένα** μεταξύ τους για την ελάττωση των απωλειών από τα αναπτυσσόμενα **δινορεύματα**
- Τα δύο τμήματα χωρίζονται από ένα μικρό **διάκενο** αέρα (air gap)
- Το **τύλιγμα τυμπάνου** τοποθετείται είτε στο στάτη είτε στο δρομέα ενώ στο άλλο τμήμα τοποθετείται το **τύλιγμα πεδίου** (δρα σαν κύρια πηγή μαγνητικού πεδίου)

Βασική δομή ηλ. μηχανών



[Πρωτονοτάριος Ε.Ν., Βουρνάς Κ, "Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές", Αθήνα, 1993]

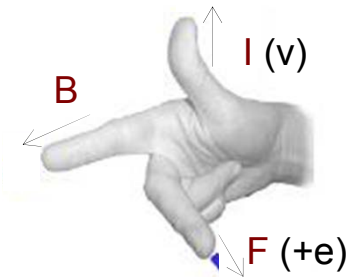
Τυπική δομή ηλ. μηχανής



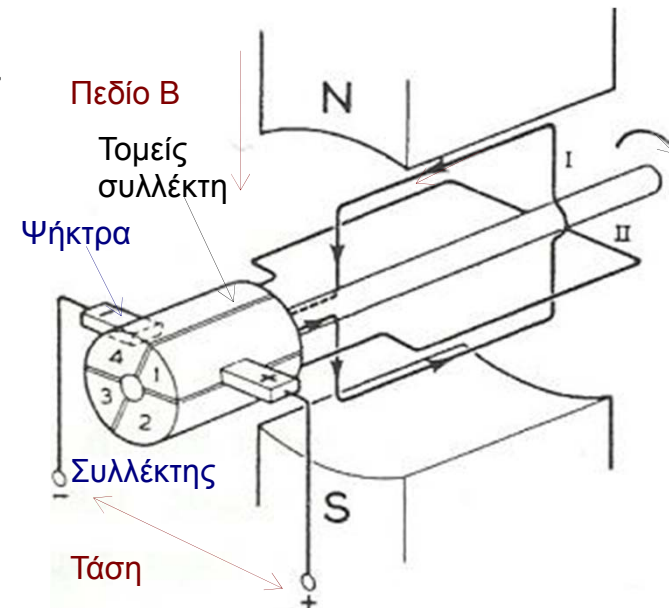
Μηχανές συνεχούς ρεύματος

- **Λειτουργία** στοιχειώδους μηχανής Σ.Ρ.
 - Με τροφοδότηση συνεχούς ρεύματος στους τομείς 1 & 3, η μηχανή λειτουργεί ως **κινητήρας** με φορά περιστροφής ωρολογιακή
 - Με διακοπή τροφοδοσίας και περιστροφή του άξονα, η μηχανή λειτουργεί ως **γεννήτρια**, αναπτύσσοντας **τάση** στους τομείς
- Ο συλλέκτης έχει ως σκοπό τη **διατήρηση της πολικότητας της τάσης** στην έξοδο (συν. ρεύμα)
- Κάθε τομέας του συλλέκτη είναι κατάλληλα ηλεκτρικά μονωμένος
- Οι πραγματικές μηχανές Σ.Ρ. έχουν πολύ μεγαλύτερο **αριθμό** βρόγχων

Κανόνας δεξιού χεριού



Στοιχειώδης μηχανή Σ.Ρ. δύο βρόγχων

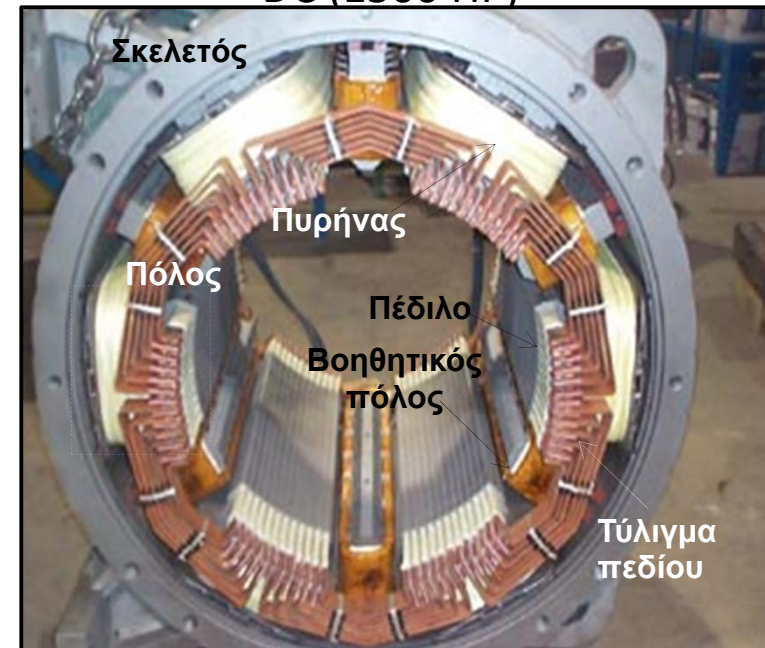


Περιγραφή ηλεκτρικών μηχανών Σ.Ρ. (1/3)

Αποτελούνται από τα βασικά τμήματα:

- **Χαλύβδινος σκελετός**
 - Αποτελεί το **εξωτερικό περίβλημα** της μηχανής πάνω στο οποίο αναπτύσσονται τα τυλίγματα διέγερσης (στάτης **πεδίου**)
- **Μαγνητικοί πόλοι**
 - Αποτελούνται από τον **πυρήνα** ο οποίος περιβάλλεται από το τύλιγμα διέγερσης και το **πέδιλο** (προέκταση του πυρήνα)
 - Κατασκευάζονται από **χαλύβδινα φύλλα**, μονωμένα μεταξύ τους για τον περιορισμό των δεινορευμάτων
 - Συνήθως, μεταξύ των κύριων πόλων υπάρχουν μικρότεροι - **βοηθητικοί πόλοι** για τον περιορισμό των σπινθηρισμών στο συλλέκτη

Χαλύβδινος σκελετός μηχανής
DC (1500 HP)



Περιγραφή ηλεκτρικών μηχανών Σ.Ρ. (2/3)

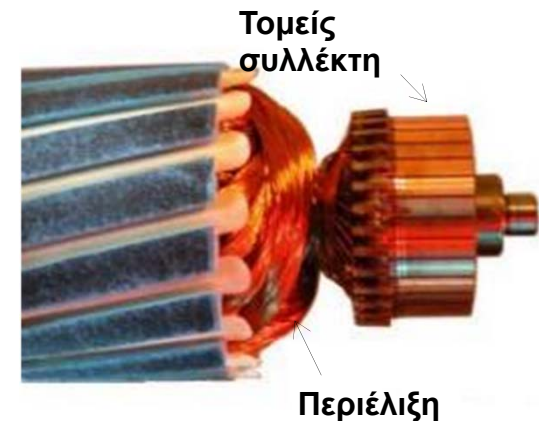
- **Επαγωγίμο**

- Αποτελείται από τον **πυρήνα** και την **περιέλιξη**
- Ο πυρήνας κατασκευάζεται από χαλύβδινα φύλλα, ενώ φέρει αυλακώσεις στις οποίες τοποθετείται η περιέλιξη (**τύλιγμα τυμπάνου**)
- Η περιέλιξη αποτελείται από έναν αριθμό **βρόγχων** με πολλές σπείρες, τα άκρα των οποίων συγκολλούνται στους τομείς του **συλλέκτη** με τέτοιο τρόπο ώστε οι βρόγχοι μεταξύ ψηκτρών αντίθετης πολικότητας να είναι συνδεδεμένοι σε σειρά

- **Συλλέκτης**

- Αποτελείται από **τομείς Cu** ηλεκτρικά **μονωμένους** μεταξύ τους, ο **αριθμός** των οποίων ισούται με τον αριθμό των αυλακώσεων. Στις γεννήτριες Σ.Ρ. η μέγιστη διαφορά τάσης μεταξύ δύο γειτονικών τομέων δεν ξεπερνά τα 15V

Επαγωγίμο μηχανής Σ.Ρ.



[Bodine Electric Co.]

Πυρήνας επαγωγίμου



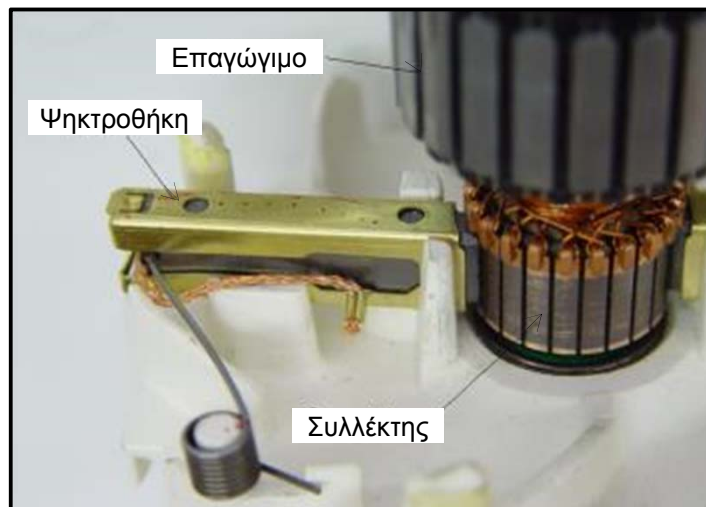
Tatsuya K. and Takashi K. IEEE Transactions on education vol 41 4 (1998)

Περιγραφή ηλεκτρικών μηχανών Σ.Ρ. (3/3)

- Ψήκτρες

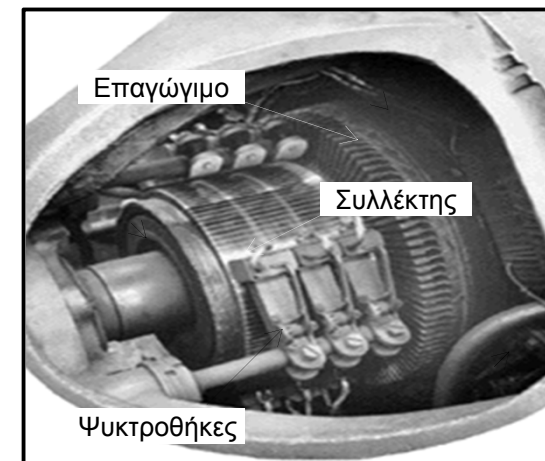
- Διασφαλίζουν την **ηλεκτρική σύνδεση** μεταξύ των τομέων του συλλέκτη και του εξωτερικού κυκλώματος τροφοδοσίας/κατανάλωσης
- Κατασκευάζονται συνήθως από μείγμα **άνθρακα και γραφίτη**
- Η κάθε μια τοποθετείται σε κατάλληλη **ψυκτροθήκη** ενώ η επαφή της με τον συλλέκτη διασφαλίζεται με κατάλληλο ελατήριο
- Οι ψυκτροθήκες **εδρεύουν** στο σκελετό της μηχανής και διακρίνονται σε θετικές / αρνητικές

Ψυκτροθήκη/ψήκτρα μικρού κινητήρα ΣΡ



submarineboat.com

Ψυκτροθήκες/ψήκτρες κινητήρα Σ.Ρ.



maintenanceworld.com

Τύποι γεννητριών Σ.Ρ.

- Μόνο σε **πολύ μικρές γεννήτριες**, το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο στο στάτη αναπτύσσεται από **μόνιμους** μαγνήτες
- Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, το τύλιγμα στους πόλους αποτελεί το τύλιγμα πεδίου (**διέγερσης**)
- Ανάλογα με τον **τρόπο σύνδεσης** του τυλίγματος πεδίου διακρίνονται σε:
 - Γεννήτριες **ξένης** διέγερσης
 - Γεννήτριες με διέγερση **σειράς**
 - Γεννήτριες **παράλληλης** διέγερσης
 - Γεννήτριες **σύνθετης** διέγερσης

Γεννήτριες ξένης διέγερσης (1/2)

- Το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται από **εξωτερική** ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης
- Υπάρχει η δυνατότητα **ακριβούς** ρύθμισης του ρεύματος διέγερσης (συνεπώς και της μαγνητικής ροής του πεδίου άρα και της τάσης εξόδου)
- Δεν χρησιμοποιούνται για κύρια παραγωγή ρεύματος αλλά σε **ειδικά** συστήματα (π.χ. σύστημα Ward-Leonard)
- Η τάση εξόδου παρουσιάζει **μείωση** καθώς το ηλεκτρικό φορτίο αυξάνεται,

$$\text{καθώς: } V = E - I_{\varepsilon\pi} \times R_{\varepsilon\pi}$$

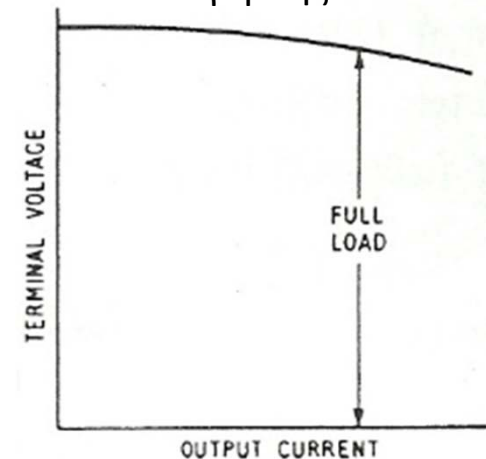
όπου: V η τάση στην έξοδο της γεννήτριας

E η ηλεκτρεγερτική δύναμη

$I_{\varepsilon\pi}$ η ένταση του ρεύματος στο επαγωγίμο

$R_{\varepsilon\pi}$ η αντίσταση του επαγωγίμου

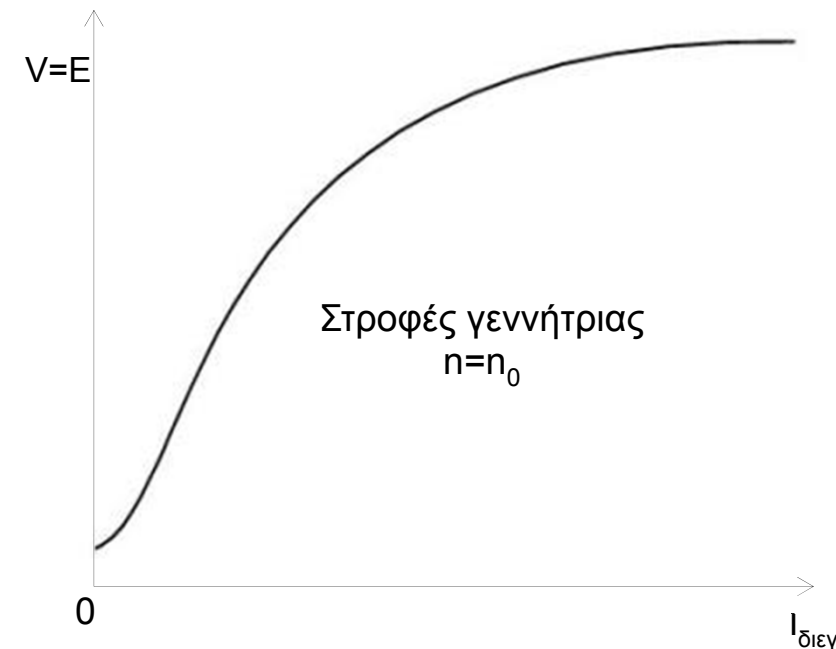
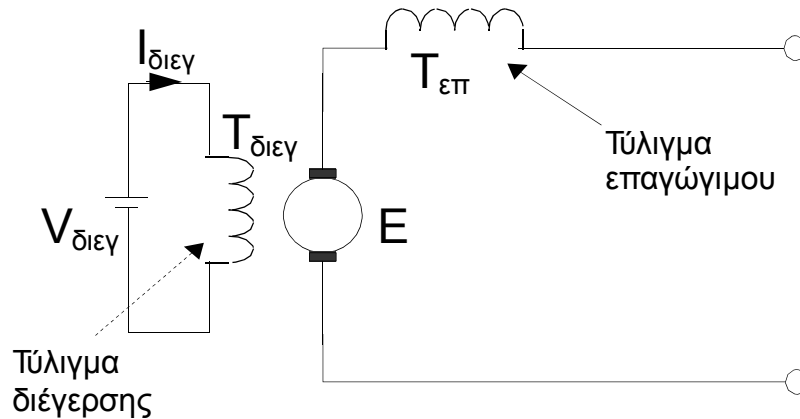
Τυπική χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας Σ.Ρ. ξένης διέγερσης



Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ.,
"Ενεργειακά συστήματα πλοίου",
Α, ΕΜΠ 2005

Γεννήτριες ξένης διέγερσης (2/2)

Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας



Τυπική χαρακτηριστική κενού γεννήτριας Σ.Ρ.

Ισχύει: $V = E - I_{\epsilon\pi} \times R_{\epsilon\pi}$

όπου: V η τάση στην έξοδο της γεννήτριας
 E η ηλεκτρεγερτική δύναμη
 $I_{\epsilon\pi}$ η ένταση του ρεύματος στο επαγωγίμο
 $R_{\epsilon\pi}$ η αντίσταση του επαγωγίμου

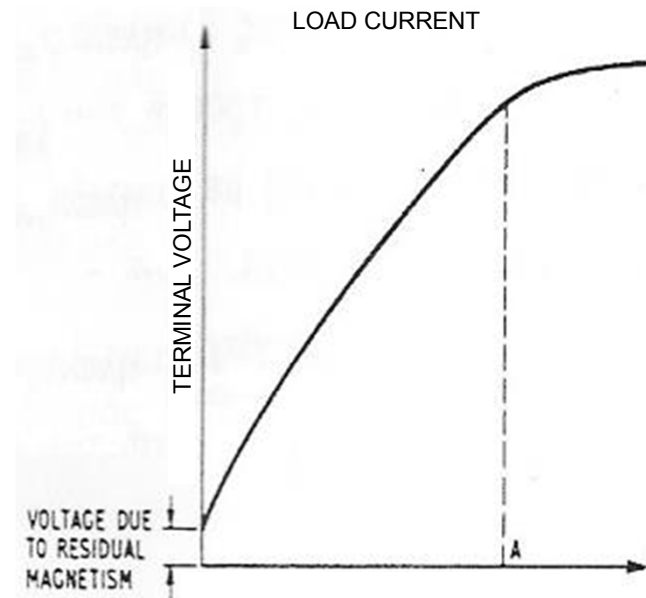
Χαρακτηριστική κενού γεννητριών Σ.Ρ.

- Ορίζεται σε **όλους** τους τύπους γεννητριών Σ.Ρ. Λαμβάνεται λειτουργώντας τη γεννήτρια με **ανεξάρτητη διέγερση χωρίς φορτίο** και μετρώντας τη μεταβολή της αναπτυσσόμενης ΗΕΔ ως προς το ρεύμα διέγερσης
- Η τάση εξόδου είναι ίση με την αναπτυσσόμενη ΗΕΔ
- Αντιστοιχεί στην **καμπύλη μαγνήτισης** της μηχανής → Ισχύει: $\frac{E}{E_0} = \frac{n}{n_0}$

Γεννήτριες διέγερσης σειράς (1/2)

- Το τύλιγμα διέγερσης είναι **συνδεδεμένο σε σειρά** με το τύλιγμα του επαγωγίμου
- Για να λειτουργήσει η γεννήτρια πρέπει να είναι **συνδεδεμένη** με το φορτίο ώστε να κλείσει το κύκλωμα μεταξύ των τυλιγμάτων διέγερσης/επαγωγίμου και φορτίου)
- Το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από το υψηλής έντασης ρεύμα φορτίου και συνεπώς πρέπει να έχει μικρό μήκος (**λίγες σπείρες**) και **μεγάλη διατομή** ώστε να παρουσιάζει μικρή ωμική αντίσταση
- Η τάση εξόδου **αυξάνεται έντονα** με το ρεύμα του φορτίου

Τυπική χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας Σ.Ρ. διέγερσης σειράς



Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ., "Ενεργειακά συστήματα πλοίου, τεύχος Α, ΕΜΠ 2005

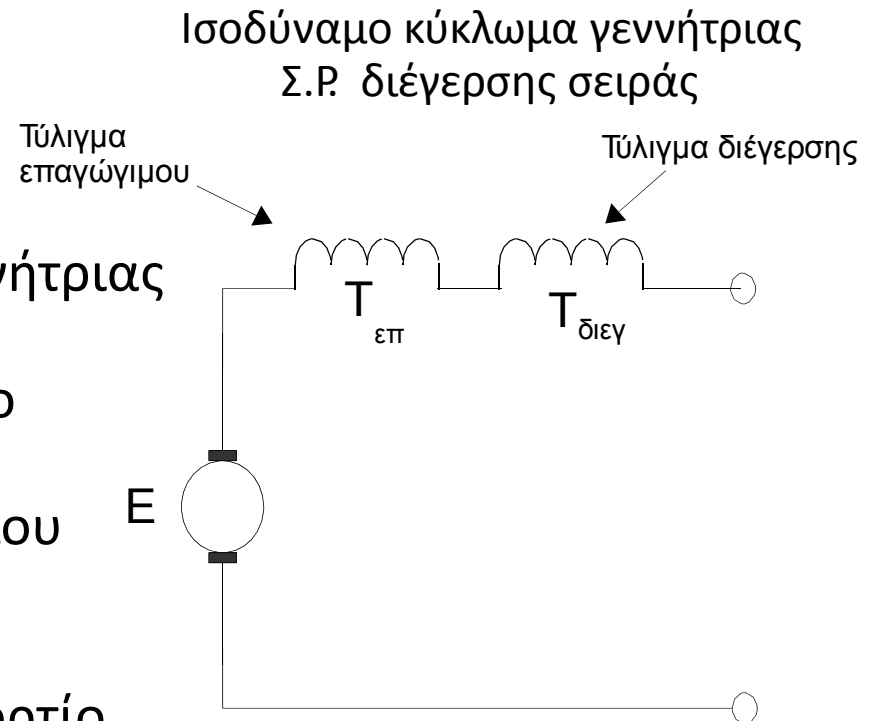
Γεννήτριες διέγερσης σειράς (2/2)

- Οι γεννήτριες διέγερσης σειράς **δεν χρησιμοποιούνται ευρέως** παρά μόνο σε ειδικές εφαρμογές (π.χ. γεννήτριες ηλεκτροσυγκολλήσεων)
- Από το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει:

$$I_{\varepsilon\pi} = I_{\delta\iota\epsilon\gamma} = I_{\phi\omicron\rho\rho\tau}$$

$$V = E - I_{\varepsilon\pi} \times (R_{\varepsilon\pi} + R_{\delta\iota\epsilon\gamma})$$

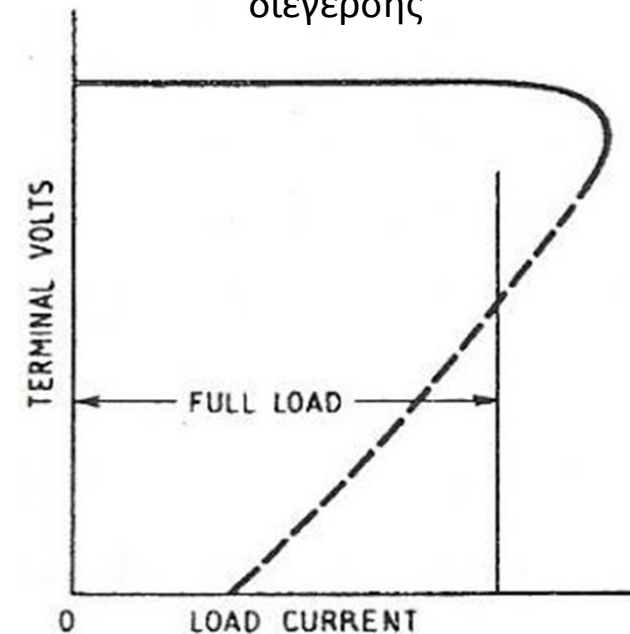
όπου: V η τάση στην έξοδο της γεννήτριας
 E η ηλεκτρεγερτική δύναμη
 $I_{\varepsilon\pi}$ η ένταση του ρεύματος στο επαγωγίμο
 $R_{\varepsilon\pi}$ η αντίσταση του επαγωγίμου
 $R_{\delta\iota\epsilon\gamma}$ η αντίσταση τυλίγματος διέγερσης
 $I_{\phi\omicron\rho\rho\tau}$ η ένταση ρεύματος στο φορτίο
 $I_{\delta\iota\epsilon\gamma}$ η ένταση ρεύματος διέγερσης



Γεννήτριες παράλληλης διέγερσης (1/2)

- Το τύλιγμα διέγερσης είναι **συνδεδεμένο παράλληλα** με το τύλιγμα του επαγωγίμου
- Η τάση εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί μέσω **μεταβλητής αντίστασης** στο κύκλωμα διέγερσης, διατηρώντας σχετικά **σταθερή** τιμή (μικρή πτώση τάσης) με αύξηση του φορτίου μέχρι την ονομαστική του τιμή (χρήση σε εφαρμογές όπως φόρτιση συσσωρευτών)
- Το ρεύμα διέγερσης **εξαρτάται** από την τάση εξόδου της γεννήτριας
- Η τάση εξόδου **μειώνεται απότομα** για μεγαλύτερες τιμές φορτίου

Τυπική χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης



Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ., "Ενεργειακά συστήματα πλοίου, τεύχος Α, ΕΜΠ 2005

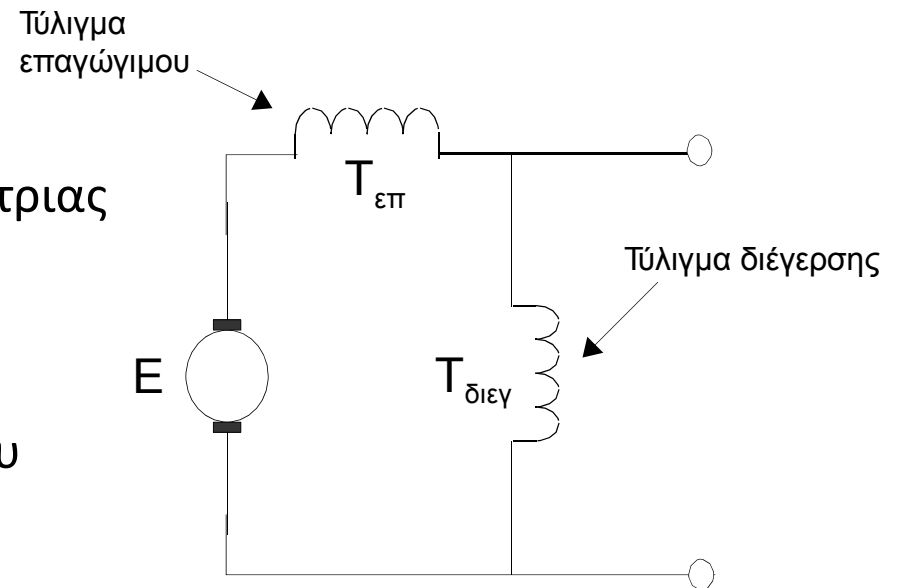
Γεννήτριες παράλληλης διέγερσης (2/2)

- **Αύξηση** του ρεύματος φορτίου οδηγεί σε **αύξηση** στο ρεύμα δρομέα, επομένως σε **πτώση τάσης** στην έξοδο
- Εξαιτίας της πτώσης τάσης στην έξοδο, το **ρεύμα διέγερσης μειώνεται** προκαλώντας μείωση στη μαγνητική ροή, άρα και επιπλέον μείωση στην τάση εξόδου
- Από το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει:

$$I_{\varepsilon\pi} = I_{\delta\iota\epsilon\gamma} + I_{\varphi\omicron\rho\rho\tau}$$
$$V = E - I_{\varepsilon\pi} \times R_{\varepsilon\pi}$$

όπου: V η τάση στην έξοδο της γεννήτριας
 E η ηλεκτρεγερτική δύναμη
 $I_{\varepsilon\pi}$ η ένταση του ρεύματος στο επαγωγίμο
 $R_{\varepsilon\pi}$ η αντίσταση του επαγωγίμου
 $R_{\delta\iota\epsilon\rho\gamma}$ η αντίσταση τυλίγματος διέγερσης
 $I_{\varphi\omicron\rho\rho\tau}$ η ένταση ρεύματος στο φορτίο
 $I_{\delta\iota\epsilon\gamma}$ η ένταση ρεύματος διέγερσης

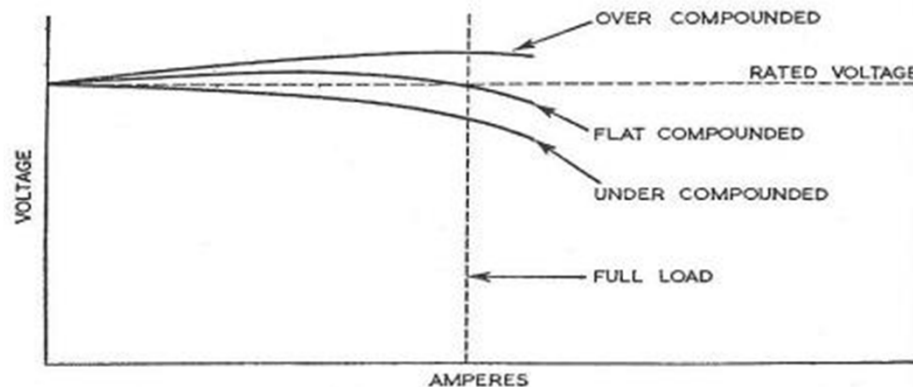
Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας
Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης



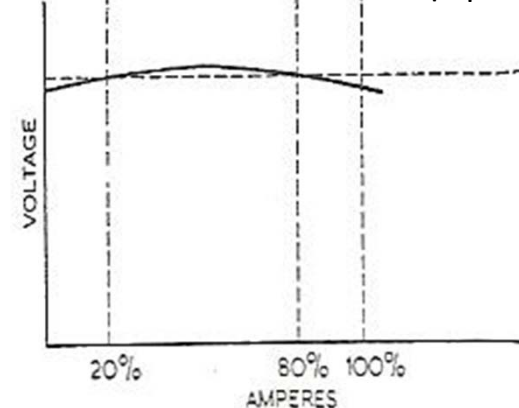
Γεννήτριες σύνθετης διέγερσης (1/2)

- Το τύλιγμα διέγερσης αποτελείται από **δύο τμήματα**. Το πρώτο συνδέεται **παράλληλα** με το τύλιγμα του επαγωγίμου ενώ το δεύτερο σε **σειρά** με αυτό
- **Αύξηση** του ρεύματος στο φορτίο, προκαλεί **αύξηση** της τάσης στο τύλιγμα διέγερσης σειράς, ενώ **μείωση** της τάσης στο παράλληλο τύλιγμα διέγερσης
- Οι γεννήτριες σύνθετης διέγερσης έχουν **ευρεία εφαρμογή** σε πλοία με εγκατάσταση Σ.Ρ. καθώς με κατάλληλο συνδυασμό των δύο τυλιγμάτων διέγερσης, η τάση τους μπορεί να διατηρηθεί **σταθερή** για μεγάλο εύρος φορτίου

Χαρακτηριστικές φορτίου γεννητριών Σ.Ρ. σύνθετης διέγερσης για διάφορους συνδυασμούς των τυλιγμάτων διέγερσης

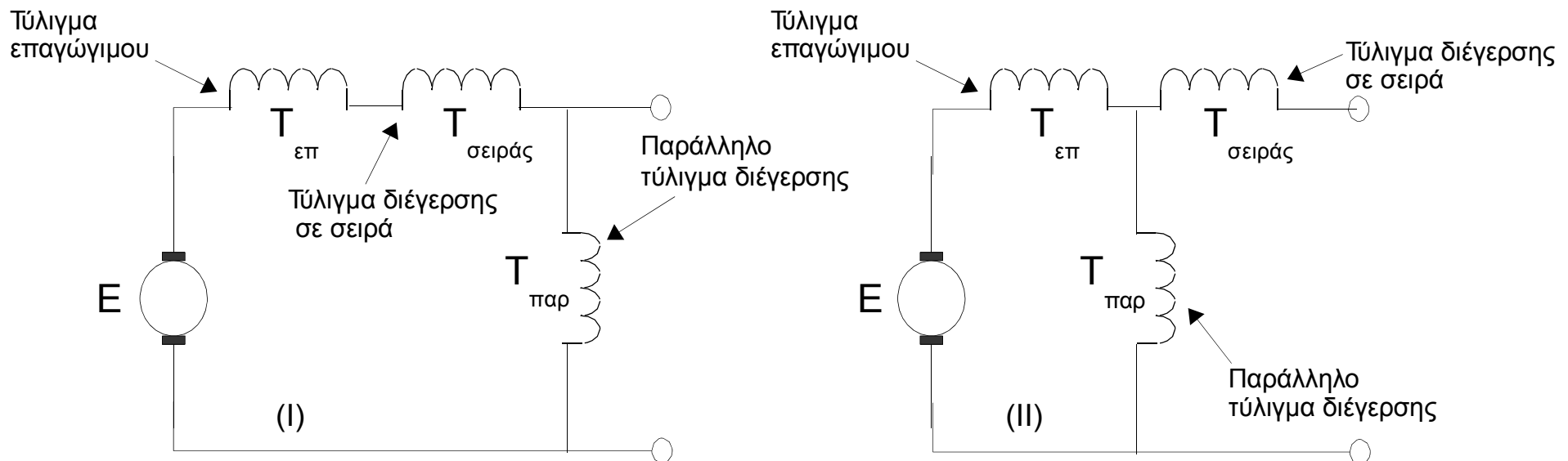


Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας Σ.Ρ. σύνθετης διέγερσης με ονομαστική τάση στο 20% και στο 80% του φορτίου



Γεννήτριες σύνθετης διέγερσης (2/2)

- Οι γεννήτριες σύνθετης διέγερσης κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη σύνδεση των δύο τμημάτων του τυλίγματος διέγερσης:
 - **Μακρά** σύνθετη διέγερση (Long shunt)
Το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από το ρεύμα του επαγωγίμου
 - **Βραχεία** σύνθετη διέγερση (Short shunt)
Το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από το ρεύμα του φορτίου



Ισοδύναμα κυκλώματα γεννητριών Σ.Ρ. σύνθετης μακράς (I) και βραχείας (II) διέγερσης

Ρύθμιση τάσης γεννητριών Σ.Ρ.

- Η τάση εξόδου της γεννήτριας Σ.Ρ. επηρεάζεται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (n), το ρεύμα στο φορτίο ($I_{\text{φορτ}}$) και το ρεύμα διέγερσης ($I_{\text{διεγ}}$) $V = V(n, I_{\text{φορτ}}, I_{\text{διεγ}})$
- Διατηρώντας δύο από τα μεγέθη σταθερά ισχύει γενικότερα:
 - Αύξηση των στροφών της γεννήτριας οδηγεί σε **αύξηση** της τάσης εξόδου
 - Αύξηση του φορτίου της, οδηγεί σε **μείωση** της τάσης εξόδου (εκτός της περίπτωσης διέγερσης σειράς)
 - Αύξηση του ρεύματος διέγερσης προκαλεί **αύξηση** στην τάση εξόδου
- Το ρεύμα διέγερσης μπορεί να μεταβληθεί μέσω κατάλληλου **ροοστάτη** διεγέρσεως, R_{δ} (εκτός της περίπτωσης διέγερσης σειράς)
- Η ταχύτητα περιστροφής του επαγωγίμου ρυθμίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του **κινητήρα** που το κινεί

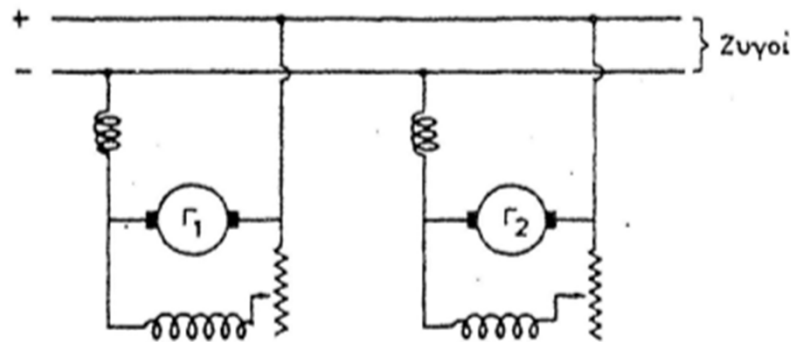
Παραλληλισμός γεννητριών Σ.Ρ. (1/2)

- Για τον παραλληλισμό δύο γεννητριών πρέπει να έχουν την ίδια **τάση** και **πολικότητα**
- Θεωρώντας δύο γεννήτριες (A & B), από τις οποίες η πρώτη (A) είναι ήδη συνδεδεμένη σε αρχικό φορτίο και η δεύτερη (B) πρέπει να συνδεθεί στο δίκτυο, η διαδικασία παραλληλισμού μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά ως:
 - Τίθεται σε λειτουργία η γεννήτρια (B)
 - Μέσω του ροοστάτη διέγερσης, **ρυθμίζεται η τάση εξόδου** της ίση ή λίγο μεγαλύτερη από την τάση των ζυγών
 - **Συνδέεται** η γεννήτρια με το δίκτυο
 - **Φορτίζεται** μέσω αύξησης του ρεύματος διέγερσης ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το φορτίο της ήδη συνδεδεμένης γεννήτριας (A) μέσω του ροοστάτη διέγερσης της

Παραλληλισμός γεννητριών Σ.Ρ. (2/2)

- Για την απόζευξη της γεννήτριας:
 - **Μειώνουμε** το φορτίο της μέχρι να μηδενισθεί, ελαττώνοντας το ρεύμα διέγερσης
 - **Αποσυνδέουμε** τη γεννήτρια από το δίκτυο
 - Τη θέτουμε **εκτός** λειτουργίας

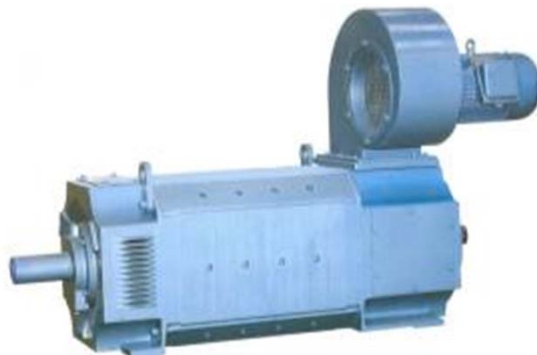
Παράλληλη σύνδεση γεννητριών
σύνθετης διέγερσης



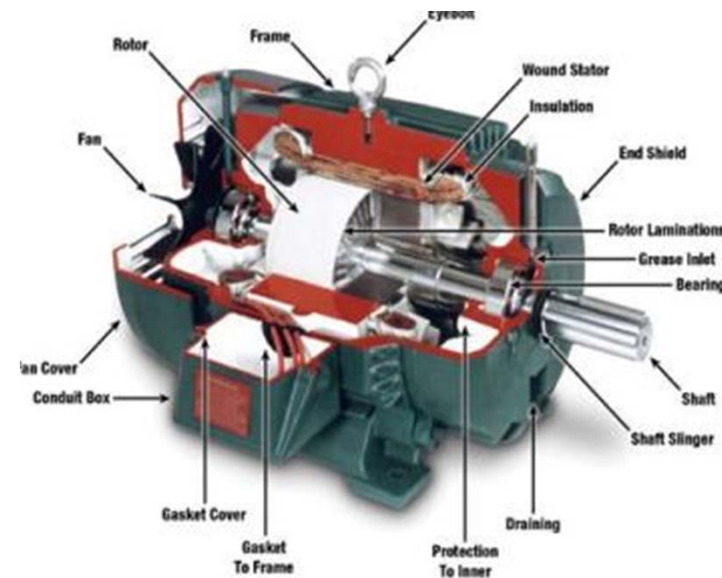
Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ., "Ενεργειακά
συστήματα πλοίου, τεύχος Α, ΕΜΠ 2005

Τύποι κινητήρων Σ.Ρ.

- Τροφοδοτώντας το **τύλιγμα του οπλισμού** σε μία γεννήτρια Σ.Ρ., με συνεχή τάση μπορεί να λειτουργήσει ως κινητήρας
- Αρκετά **διαδεδομένοι** λόγω της ευκολίας ελέγχου της **ταχύτητάς** τους και της εξαιρετικής δυναμικής συμπεριφοράς τους
- Όμοια με τις γεννήτριες Σ.Ρ., διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τον **τρόπο σύνδεσης** του τυλίγματος πεδίου:
 - Κινητήρες **ξένης** διέγερσης
 - Κινητήρες με διέγερση **σειράς**
 - Κινητήρες **παράλληλης** διέγερσης
 - Κινητήρες **σύνθετης** διέγερσης



HK Hands Industrial Co. Ltd , Z4 series



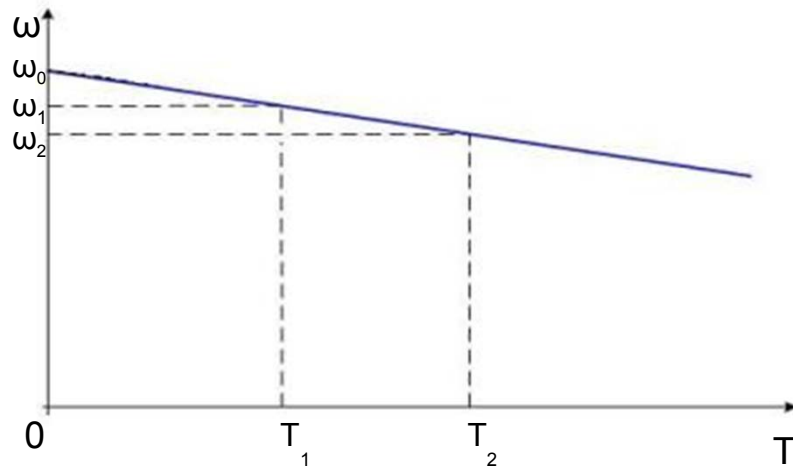
Galco industrial electronics

Κινητήρες ξένης διέγερσης (1/2)

- Το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται από **εξωτερική** ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης
- Για σταθερή τάση τροφοδοσίας του κινητήρα V και μαγνητική ροή πεδίου Φ (σταθερό ρεύμα διέγερσης) η ταχύτητα μειώνεται **γραμμικά** ($\sim 10\%$) με την αύξηση της ροπής φορτίου T (πρακτικά θεωρείται σταθερή)
- Οι κινητήρες ξένης διέγερσης χρησιμοποιούνται σε **ειδικές εφαρμογές** όπου απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας με μεγάλη ακρίβεια (π.χ. Συστήματα Ward- Leonard ή ηλεκτρική πρόωση με Σ.Ρ.)

Κινητήρες ξένης διέγερσης (2/2)

- Η αναπτυσσόμενη στρεπτική ροπή T είναι **παρόμοια** με εκείνη κινητήρα **παράλληλης** διέγερσης



Τυπική χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης με τύλιγμα αντιστάθμισης

Ισχύει γενικότερα: $T \propto \Phi_d \times I_{\varepsilon\pi}$

και $E_\alpha = K_a \times \Phi_d \times \omega_m$

όπου: E_α η αντιηλεκτρεργετική δύναμη

K_a σταθερά

επίσης: $V = E_\alpha + I_{\varepsilon\pi} \times R_{\varepsilon\pi}$ (ανεξάρτητη /παράλληλη διέγερση)

ή $V = E_\alpha + I_{\varepsilon\pi} \times (R_{\varepsilon\pi} + R_{\delta\iota\epsilon\gamma})$ (διέγερση σειράς)

επομένως: $\eta \propto \frac{V - I_{\varepsilon\pi} \times R}{\Phi_d}$

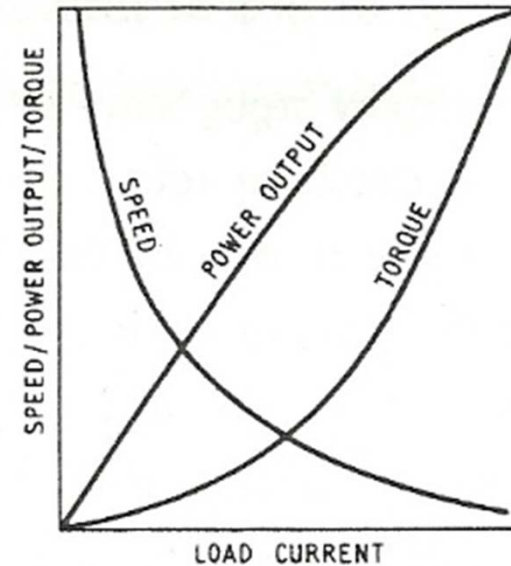
όπου: $R = R_{\varepsilon\pi}$

ή $R = R_{\varepsilon\pi} + R_{\delta\iota\epsilon\gamma}$

Κινητήρες με διέγερση σειράς

- Το τύλιγμα διέγερσης είναι **συνδεδεμένο σε σειρά** με το τύλιγμα του επαγωγίμου θεωρώντας σταθερή τάση τροφοδοσίας, η μαγνητική ροή Φ είναι ανάλογη με το ρεύμα επαγωγίμου ($\Phi_d \propto I_{\varepsilon\pi}$ αφού $I_{\varepsilon\pi} = I_{\delta\iota\epsilon\gamma}$)
- Καθώς η αναπτυσσόμενη στρεπτική ροπή T είναι ανάλογη του γινομένου: $T \propto \Phi_d \times I_{\varepsilon\pi}$ ισχύει: $T \propto (I_{\varepsilon\pi})^2$
- Η στρεπτική ροπή T έχει **υψηλή τιμή σε χαμηλές στροφές** του κινητήρα
- Οι κινητήρες διέγερσης σειράς έχουν τη **μεγαλύτερη ροπή** ανά μονάδα ρεύματος από κάθε άλλο κινητήρα Σ.Ρ.
- Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις με **υψηλή ροπή εκκινήσεως** όπως βαρούλκα, εργάτες αγκυρών, εκκινητές ΜΕΚ, γερανοί, ανελκυστήρες, συστημάτων έλξης (τρένα) κτλ.

Τυπικές χαρακτηριστικές κινητήρα
Σ.Ρ. διέγερσης σειράς

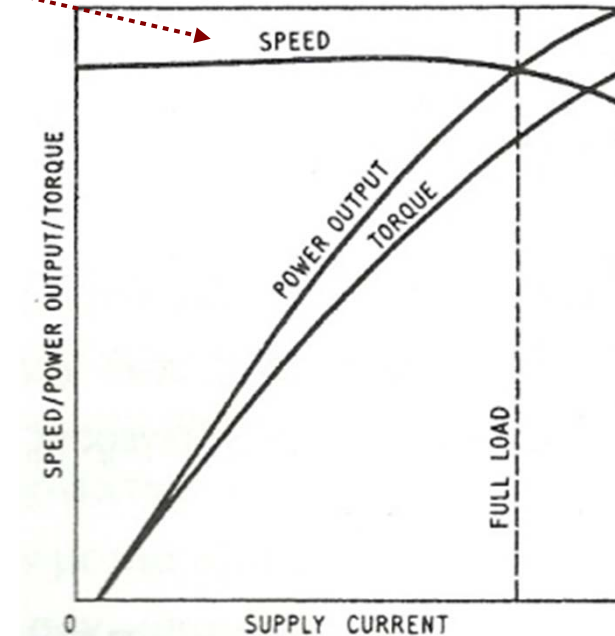


Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ.,
"Ενεργειακά συστήματα πλοίου, τεύχος
Α, ΕΜΠ 2005

Κινητήρες με παράλληλη διέγερση

- Το τύλιγμα διέγερσης είναι **συνδεδεμένο παράλληλα** με το τύλιγμα του επαγωγίμου (τροφοδοτείται από την τάση δικτύου)
- Θεωρώντας σταθερή τάση τροφοδοσίας, η μαγνητική ροή Φ_d είναι **σταθερή** (σταθερό $I_{\text{διεγ}}$), έχοντας ως αποτέλεσμα τη διατήρηση σχεδόν **σταθερής ταχύτητας**
- Η αναπτυσσόμενη στρεπτική ροπή T είναι **παρόμοια** με εκείνης κινητήρα **ανεξάρτητης** διέγερσης
- Η στρεπτική ροπή T έχει **χαμηλή τιμή σε χαμηλές στροφές** του κινητήρα
- Συνίσταται η **εκκίνησή** τους χωρίς φορτίο
- Χρησιμοποιούνται κυρίως σε φυγοκεντρικές αντλίες, ανεμιστήρες, εργαλειομηχανές κτλ.

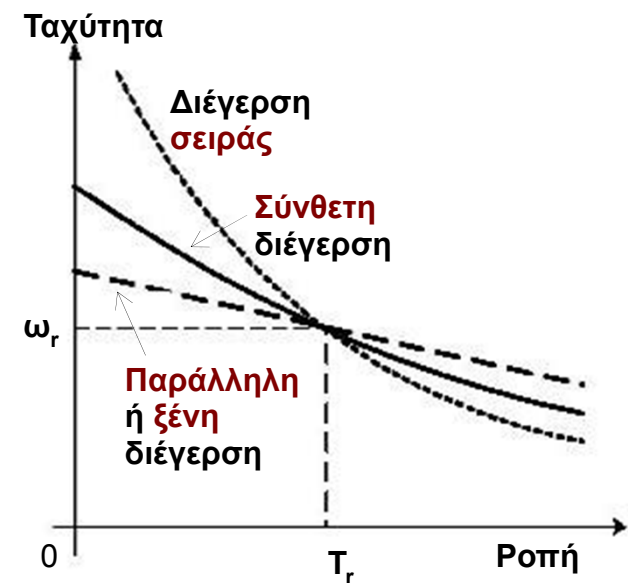
Τυπικές χαρακτηριστικές κινητήρα Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης



Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ.,
"Ενεργειακά συστήματα, πλοίου τεύχος 24
ΕΜΠ 2005

Κινητήρες σύνθετης διέγερσης

- Το τύλιγμα διέγερσης αποτελείται από **δύο τμήματα**. Το πρώτο συνδέεται **παράλληλα** με το τύλιγμα του επαγωγίμου ενώ το δεύτερο σε **σειρά** με αυτό
- Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος σειράς διακρίνονται σε:
 - **Μακράς** σύνθετης διέγερσης (Long shunt)
 - **Βραχείας** σύνθετης διέγερσης (Short shunt)
- Συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των κινητήρων παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς:
 - Μεγαλύτερη **ροπή εκκινήσεως** (σε σχέση με κινητήρες παράλληλης διέγερσης)
 - **Σταθερότητα στροφών** με μεταβολή του φορτίου (σε σχέση με κινητήρες διέγερσης σειράς)
 - Έχουν υψηλότερο **κόστος**



Εκκίνηση κινητήρων Σ.Ρ. (1/2)

- Η **περιστροφή** του επαγωγίμου μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη, προκαλεί την ανάπτυξη ηλεκτρικής τάσης (**αντιηλεκτρεγερτική δύναμη E_α**) **αντίθετη** με την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα

- Σε κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα ισχύει:

(Περίπτωση κινητήρα παράλληλης /ανεξάρτητης διέγερσης)

Στην περίπτωση γεννήτριας Σ.Ρ.: $E > V_{out}$
(αντίθετη φορά ρεύματος)

$$\rightarrow I_{\varepsilon\pi} = \frac{V - E_\alpha}{R_{\varepsilon\pi}}$$

όπου: $I_{\varepsilon\pi}$ η ένταση του ρεύματος στο επαγώγιμο

V η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα

E_α η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη

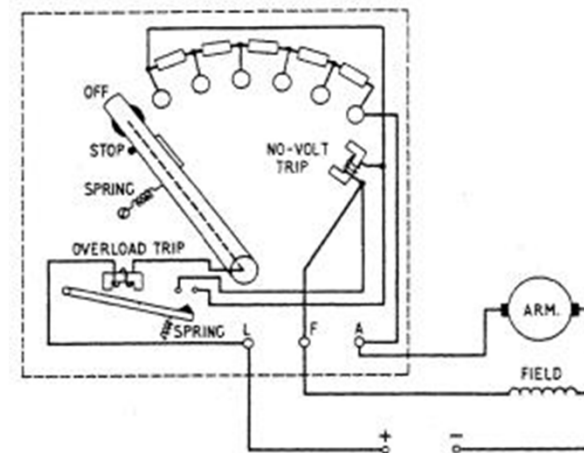
$R_{\varepsilon\pi}$ η αντίσταση του επαγωγίμου

- Στην εκκίνηση του κινητήρα η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι μηδενική, επομένως: $I_{\varepsilon\pi-εκ} = V/R_{\varepsilon\pi}$

Εκκίνηση κινητήρων Σ.Ρ. (2/2)

- Λόγω της πολύ μικρής αντίστασης του επαγωγίμου $R_{επ}$, το ρεύμα εκκίνησης είναι κατά πολύ μεγαλύτερο ($\sim \times 20$) εκείνου της κανονικής λειτουργίας με κίνδυνο **υπερθέρμανσης** και **καταστροφής** του κινητήρα
- Κατάλληλη **αντίσταση εκκίνησης** συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγίμου για τον περιορισμό του $I_{επ}$
- Όσο η **ταχύτητα** του κινητήρα αυξάνεται (επομένως αναπτύσσεται επαρκής E_{α}), η αντίσταση εκκίνησης **βραχυκυκλώνεται** σταδιακά με κατάλληλους διακόπτες

Τυπικός εκκινητής κινητήρα Σ.Ρ.



Έλεγχος ταχύτητας – αναστροφή κινητήρων Σ.Ρ.

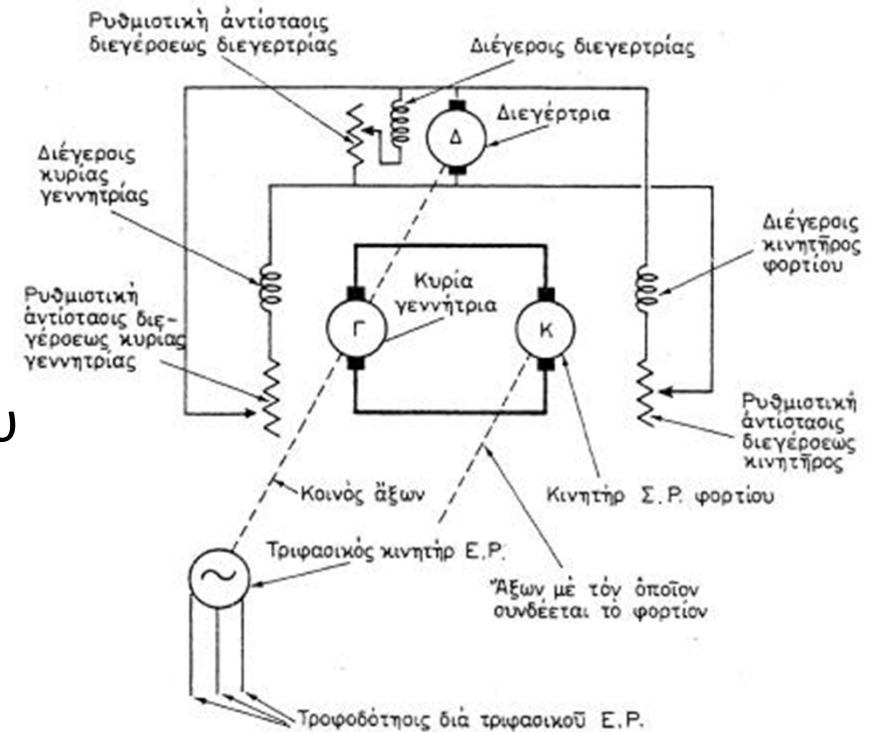
- Η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων Σ.Ρ. μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί σε **μεγάλο εύρος τιμών**, γεγονός που αποτελεί **πλεονέκτημα** των κινητήρων Σ.Ρ. έναντι των κινητήρων Ε.Ρ.
- Η ταχύτητα **αυξάνεται** με την **αύξηση** του ρεύματος του επαγωγίμου $I_{\text{επ}}$ (ή αύξηση τάσης στο τύλιγμα επαγωγίμου V), ενώ μειώνεται με **αύξηση** του ρεύματος διέγερσης $I_{\text{διεγ}}$ (ή αύξησή της τάσης στο τύλιγμα διέγερσης)
- Η ρύθμιση πραγματοποιείται μέσω της αντίστασης εκκινήσεως και τη *ρυθμιστική αντίσταση διεγέρσεως*
- **Αναστροφή** της φοράς των κινητήρων Σ.Ρ. επιτυγχάνεται μέσω αναστροφής στη **σύνδεση** του τυλίγματος διεγέρσεως, οδηγώντας σε αλλαγή στην πολικότητα των μαγνητικών **πόλων**

Σύστημα Ward-Leonard (1/2)

- **Πλεονεκτήματα** του συστήματος:
Η **συνεχής** και οικονομική ρύθμιση στροφών σε **μεγάλο εύρος τιμών**, η ικανοποιητική ροπή εκκινήσεως και η ευκολία **τηλεχειρισμού**
- **Μειονεκτήματα** του συστήματος:
Η **πολυπλοκότητά** του, ο χαμηλός βαθμός απόδοσης και το υψηλό κόστος
- Χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές όπως βαρούλκα, εργάτες άγκυρας, πηδάλια κτλ.

Σύστημα Ward-Leonard (2/2)

- Τρόπος λειτουργίας
 - Μεταβολή της **διέγερσης της κύριας γεννήτριας** οδηγεί σε μεταβολή της **τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα** V – επομένως και των στροφών του
 - Μεταβολή των στροφών του κινητήρα πραγματοποιείται επίσης μέσω μεταβολής της **διέγερσής του**
 - **Αναστροφή** του κινητήρα πραγματοποιείται μέσω αναστροφής της φοράς ρεύματος **διέγερσής του**



Τζιφάκι Α.Χ., Ηλεκτροτεχνικά εφαρμογών πλοίων, Ίδρυμα Ευγενίδου, 1980

Βασικές σχέσεις επίλυσης προβλημάτων μηχανών Σ.Ρ. (1/2)

- **Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής δρομέα** (άξονα):

$$\omega_m = 2 \times \pi \times f_m \text{ (rad/sec) όπου: } f_m \text{ η συχνότητα περιστροφής (Hz)}$$
$$f_m = \frac{n_m}{60} \text{ (Hz) } \quad n_m \text{ ο αριθμός στροφών (rpm)}$$

- **Ηλεκτρεργετική δύναμη** / αντιηλεκτρεργετική δύναμη επαγωγίμου:

$$E = E_a = K_a \times \Phi_d \times \omega_m \text{ με } K_a = \frac{P \times Z_a}{2 \times \pi \times \alpha}$$

όπου: P ο αριθμός των πόλων της μηχανής

Z_a ο συνολικός αριθμός αγωγών στο τύλιγμα του επαγωγίμου

α ο αριθμός παράλληλων κλάδων του τυλίγματος του επαγωγίμου

Φ_d η μαγνητική ροή ανά πόλο

K_a σταθερά (εξαρτάται από την κατασκευή της συγκεκριμένης μηχανής)

- **Ηλεκτρομαγνητική ισχύ:** $P_{em} = E \times I_{\varepsilon\pi} = E_a \times I_{\varepsilon\pi} \text{ (Watt)}$

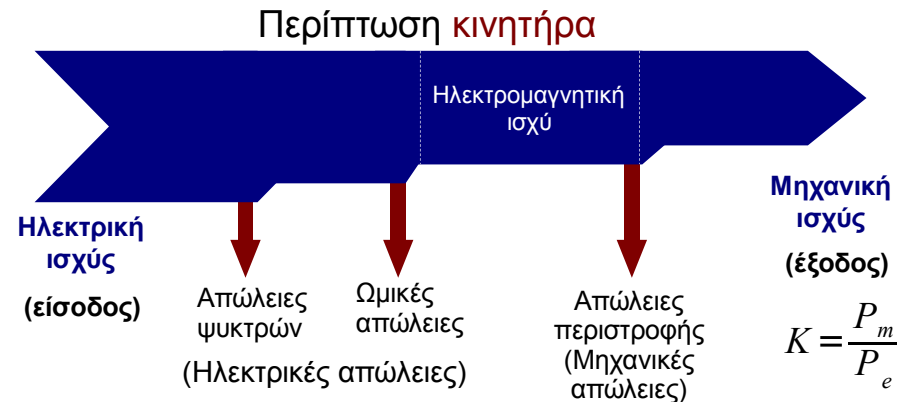
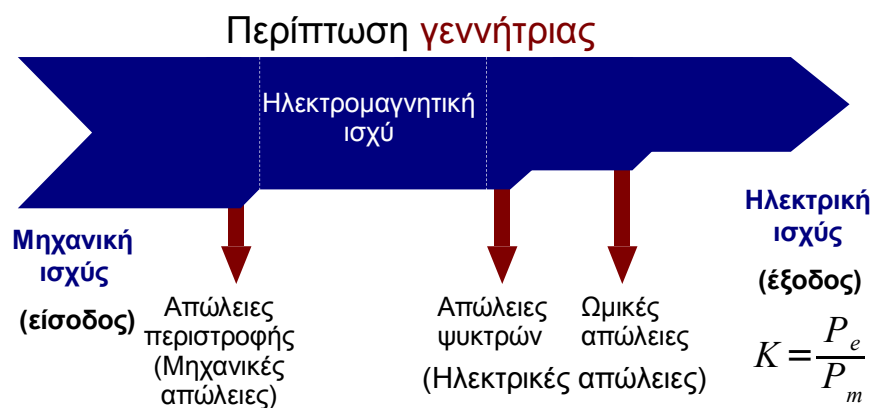
Βασικές σχέσεις επίλυσης προβλημάτων μηχανών Σ.Ρ. (2/2)

- **Ηλεκτρική ισχύ:** $P_e = V_t \times I_t (Watt)$
- **Μηχανική ισχύ:** $P_m = T_m \times \omega_m (Watt)$

όπου: V_t η τάση στους ακροδέκτες της μηχανής
 I_t το ρεύμα στους ακροδέκτες της μηχανής
 T_m η ροπή στον άξονα της μηχανής (Nm)

- **Ροή ισχύος και Βαθμός απόδοσης μηχανής:**

(Μετατροπή HP σε kW : 1 HP=0,746 kW)



Τέλος Ενότητας



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Σημειώματα

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας, Δ.Ν. Παγώνης 2014.
Δ.Ν. Παγώνης. «Ηλεκτροτεχνία – Ηλ. Μηχανές & Εγκαταστάσεις πλοίου (Θ).
Ενότητα 8: Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές – Μηχανές Σ.Ρ.». Έκδοση: 1.0.
Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: ocp.teiath.gr.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό. Οι όροι χρήσης των έργων τρίτων επεξηγούνται στη διαφάνεια «Επεξήγηση όρων χρήσης έργων τρίτων».

Τα έργα για τα οποία έχει ζητηθεί άδεια αναφέρονται στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Επεξήγηση όρων χρήσης έργων τρίτων

© Δεν επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου, παρά μόνο εάν ζητηθεί εκ νέου άδεια από το δημιουργό.

διαθέσιμο με άδεια CC-BY	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου και η δημιουργία παραγώγων αυτού με απλή αναφορά του δημιουργού.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-SA	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού, και διάθεση του έργου ή του παράγωγου αυτού με την ίδια άδεια.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-ND	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού. Δεν επιτρέπεται η δημιουργία παραγώγων του έργου.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-NC	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού. Δεν επιτρέπεται η εμπορική χρήση του έργου.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-NC-SA	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού και διάθεση του έργου ή του παράγωγου αυτού με την ίδια άδεια. Δεν επιτρέπεται η εμπορική χρήση του έργου.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-NC-ND	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού. Δεν επιτρέπεται η εμπορική χρήση του έργου και η δημιουργία παραγώγων του.
διαθέσιμο με άδεια CC0 Public Domain	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου, η δημιουργία παραγώγων αυτού και η εμπορική του χρήση, χωρίς αναφορά του δημιουργού.
διαθέσιμο ως κοινό κτήμα	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου, η δημιουργία παραγώγων αυτού και η εμπορική του χρήση, χωρίς αναφορά του δημιουργού.
χωρίς σήμανση	Συνήθως δεν επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Αθήνας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

