

Όνοματεπώνυμο:	
Αριθμός Μητρώου:	Υπογραφή
Εξάμηνο:	

## Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικών Συστημάτων Μετατροπής Ενέργειας

### 3η Εργαστηριακή Άσκηση: Εύρεση χαρακτηριστικής και συντελεστή απόδοσης κινητήρα συνεχούς ρεύματος

---

#### 3.1 Σκοπός του πειράματος

Αντικείμενο του πειράματος είναι η λήψη κατάλληλων μετρήσεων με σκοπό τη χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής – στροφών κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Επίσης, για τον ίδιο κινητήρα απαιτείται η εύρεση του συντελεστή απόδοσης με βάση τις μετρήσεις αυτές.

#### 3.2 Ηλεκτρομηχανικές διατάξεις συνεχούς ρεύματος

##### A. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)

Οι κινητήρες ΣΡ μετατρέπουν ηλεκτρική ισχύ σε μορφή συνεχούς τάσης και ρεύματος σε μηχανική ισχύ. Όταν ένας κινητήρας ΣΡ συνδεθεί με τροφοδοσία συνεχούς τάσης  $v_k$  τότε τα τυλίγματα του δρομέα (τυμπάνου) διαρρέονται από σχετικά μεγάλο ρεύμα  $i_a$ , λόγω της μικρής αντίστασής τους. Επιπλέον, επειδή διαρρέονται από ρεύμα και κινούνται μέσα σε μαγνητικό πεδίο σε αυτά αναπτύσσονται δυνάμεις Lorentz. Κάτω από την επίδραση αυτών των δυνάμεων, ο δρομέας περιστρέφεται και μεταφέρει ροπή, με αποτέλεσμα την παραγωγή μηχανικής ισχύος στην έξοδό του.

Για κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα δίνεται από τη σχέση,

$$T = K_T i_a \quad (3-1)$$

όπου,

$$K_T = \frac{ZP\Phi}{2a\pi} = K_\omega \Phi \quad (3-2)$$

όπου  $Z$  είναι ο αριθμός των συνολικών αγωγών στο δρομέα,  $P$  είναι ο αριθμός των πόλων,  $a$  είναι ο αριθμός των παράλληλων αγωγών και  $\Phi$  είναι η μέση μαγνητική ροή ανά πόλο. Η παράμετρος  $K_T$  ονομάζεται **σταθερά ροπής** του κινητήρα και είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για

κινητήρες όπου η ροή ανά πόλο είναι σταθερή.

Η περιστροφή του δρομέα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση τάσης από επαγωγή, δηλαδή της **αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΑΗΕΔ)**. Η επαγόμενη ΑΗΕΔ έχει πολικότητα αντίθετη από αυτή της τάσης τροφοδοσίας, και τείνει να αντισταθμίσει την αιτία που προκάλεσε την κίνηση, δηλαδή δρα σαν να έχουν συνδεθεί δύο συσσωρευτές με τέτοιο τρόπο, ώστε ο ένας να μάχεται τον άλλο. Το μέτρο της τάσης αυτής δίνεται από την εξίσωση,

$$e_a = K_\omega \Phi \omega = K_T \omega \quad (3-3)$$

όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Η ΑΗΕΔ καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ από το ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα, επειδή το ρεύμα εισέρχεται από το θετικό ακροδέκτη. Η ισχύς αυτή υπολογίζεται από τη σχέση,

$$p_a = e_a i_a \quad (3-4)$$

και μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση,

$$e_a i_a = T \omega \quad (3-5)$$

Η ροπή στην έξοδο του κινητήρα και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μπορούν να γραφούν σε μητρική μορφή,

$$\begin{bmatrix} \omega \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_T^{-1} & 0 \\ 0 & K_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_a \\ i_a \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Η ροπή που εμφανίζουν οι κατασκευαστές κινητήρων στα φύλλα προδιαγραφών είναι η μηχανική ροπή στην άτρακτο (όχι η ηλεκτρομαγνητική ροπή). Αυτή προσδιορίζεται από την εξίσωση,

$$T_{μηχ} = K_T i_a - T_\tau = K_T i_a - K_T i_\tau \quad (3-7)$$

όπου  $i_\tau$  είναι το ρεύμα των τυλιγμάτων του τυμπάνου που απορροφά ο κινητήρας για να υπερνικήσει τις ίδιες μηχανικές τριβές  $T_\tau$ . Επομένως, οι μηχανικές απώλειες δίνονται από την,

$$p_{a,μηχ} = (K_T i_\tau) \omega_{μηχ} \quad (3-8)$$

Ο προσδιορισμός του ρεύματος  $i_\tau$  επιτυγχάνεται πειραματικά, με βάση τη σχέση,

$$i_\tau = i_0 + k_1 \omega + k_2 \omega^2 \quad (3-9)$$

όπου  $i_0$  είναι το ρεύμα που αντιστοιχεί στη ροπή λόγω τριβής Coulomb και  $k_1$ ,  $k_2$  είναι σταθεροί συντελεστές, οι οποίοι σχετίζονται με τις απώλειες λόγω τριβών στα έδρανα και τις απώλειες λόγω αεροδυναμικών αντιστάσεων του ανεμιστήρα αντίστοιχα. Το ρεύμα  $i_0$  προσδιορίζεται πειραματικά και δίνεται εδώ ως  $i_0 = 0,038 \text{ A}$ . Επιπλέον, για λόγους απλούστευσης, ο συντελεστής  $k_2$  μπορεί να ληφθεί μηδενικός ( $k_2 = 0$ ). Συνεπώς, η Εξ. (3-9) μπορεί να γραφεί πιο απλά ως,

$$i_\tau = i_\tau(\omega) = i_0 + k_1 \omega \quad (3-10)$$

Ο συντελεστής  $k_1$  υπολογίζεται ως η κλίση της ευθείας που περιγράφεται από την Εξ. (3-10) και

υπολογίζεται από στοιχεία του ονομαστικού σημείου λειτουργίας, θέτοντας  $i_\tau = i_{\tau,ov}(\omega_{ov})$ .

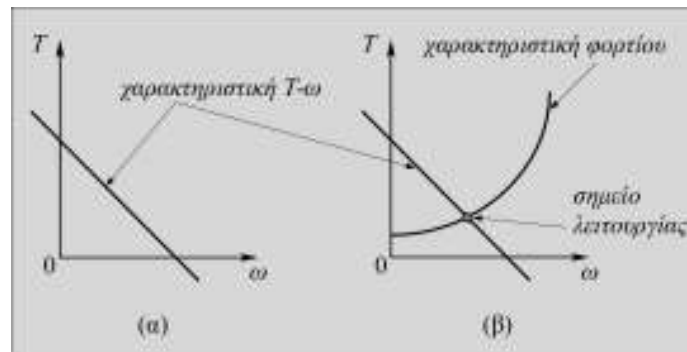
Για την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές καμπύλες. Η πλέον σημαντική καμπύλη για ένα κινητήρα είναι αυτή της ροπής – στροφών. Αυτή η χαρακτηριστική των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι μια ευθεία γραμμή και για τη χάραξη τους θεωρητικά χρειαζόμαστε δύο σημεία, βλ. Σχ. 3-1. Η χαρακτηριστική ροπής στροφών που συνδέει την ηλεκτρομαγνητική ροπή με τις στροφές του κινητήρα είναι η,

$$T(\omega) = \frac{K_T}{R_a} v_k - \frac{K_T^2}{R_a} \omega \quad (3-11)$$

Εναλλακτικά, η ίδια σχέση γράφεται και ως,

$$\omega(T) = \frac{1}{K_T} v_k - \frac{R_a}{K_T^2} T \quad (3-12)$$

όπου  $v_k$  είναι η DC τάση του κινητήρα και  $R_a$  η αντίσταση των τυλιγμάτων του τυμπάνου του κινητήρα.



**Σχήμα 3-1.** (α) Χαρακτηριστική T-ω κινητήρων ΣΡ. (β) Χαρακτηριστική κινητήρα ΣΡ, φορτίου & σημείο λειτουργίας.

## B. Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)

Σε αντίθεση με τους κινητήρες, οι γεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική, σταθερής τάσης. Η μετατροπή αυτή γίνεται με παρόμοιο τρόπο όπως και στους κινητήρες αλλά με αντίστροφη φορά. Οι εξισώσεις που αφορούν στις γεννήτριες ΣΡ μπορούν να προκύψουν εύκολα, με ανάλογη μελέτη, όπως αυτή στους κινητήρες ΣΡ, βλ. Εξ. (3-1) έως και (3-12), πλην της Εξ. (3-7) που εδώ γίνεται,

$$T_{μηχ} = K_T i_a + T_\tau \quad (3-13)$$

όπου  $i_a$  το ρεύμα που αποδίδει η γεννήτρια και  $T_\tau$  η ροπή τριβών της γεννήτριας.

### 3.3 Μετρήσεις

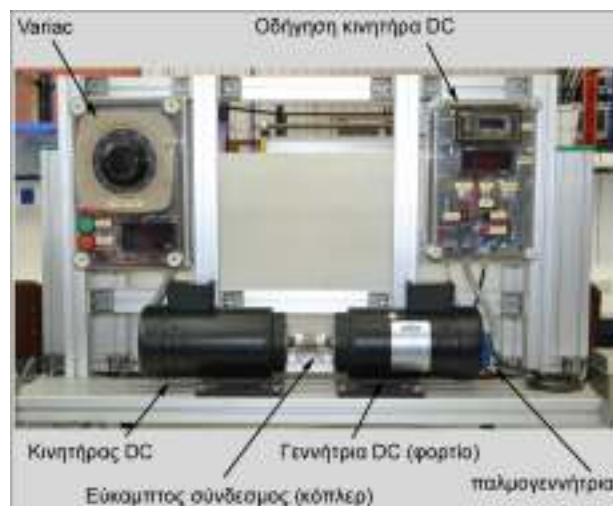
Η ηλεκτρομηχανική διάταξη, βλ. Σχ. 3-2, από όπου θα ληφθούν οι μετρήσεις αποτελείται από τα εξής:

- Ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη.
- Μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη ½ Hp.

- Μονοφασικό ανορθωτή τεσσάρων τεταρτημορίων DF8P-10.
- Μια παλμογεννήτρια (encoder).
- Ένα Variac (μεταβλητό μετασχηματιστή) με ανορθωτή τάσης.

Για την πειραματική διάταξη του Σχ. 3-2, ζητείται να υπολογιστεί και να σχεδιαστεί γραφικά η μεταβολή της **ηλεκτρομαγνητικής** ροπής του κινητήρα σε συνάρτηση με τις στροφές του. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει ο DC κινητήρας να οδηγεί ένα μεταβλητό φορτίο. Η μεταβολή της τιμής του φορτίου που κινεί ο κινητήρας θα επιφέρει μεταβολή και στη ροπή του κινητήρα. Συνεπώς, η ζητούμενη χαρακτηριστική ροπής – στροφών του κινητήρα θα χαραχθεί με βάση τις μεταβολές της τιμής του φορτίου του κινητήρα. Εδώ, το μεταβλητό φορτίο είναι μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία *κατασκευαστικά είναι ίδια μηχανή με τον κινητήρα*.

Η εύρεση της χαρακτηριστικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής – στροφών του κινητήρα βασίζεται στην εξής διαδικασία: αρχικά, ο κινητήρας τροφοδοτείται από τον Variac με μία σταθερή τάση εισόδου. Τότε, η γεννήτρια (φορτίο) στρέφεται και παράγει συνεχές ρεύμα στην έξοδό της. Στη συνέχεια, μεταβάλλοντας σταδιακά το ρεύμα που αποδίδει η γεννήτρια με χρήση της οδήγησης τεσσάρων τεταρτημορίων (4-quadrant drive), μεταβάλλονται οι στροφές του κινητήρα. Το εύρος της τιμής του ρεύματος στα τυλίγματα της γεννήτριας είναι τέτοιο ώστε η αρχική τιμή των στροφών του κινητήρα να είναι αυτή των στροφών του σε κενό φορτίο και η τελική τιμή των στροφών του κινητήρα να είναι αυτή των στροφών του στο σημείο ανατροπής του (μέγιστη ροπή). Όσο αυξάνεται το παραγόμενο ρεύμα στα τυλίγματα της γεννήτριας, τόσο αυξάνεται τελικά η τιμή του φορτίου του κινητήρα και κατά συνέπεια αυξάνεται και η ροπή του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, δηλαδή ο κινητήρας μεταπηδά σε επόμενο σημείο λειτουργίας του. Το πείραμα επαναλαμβάνεται όσες φορές υποδειχθεί. Οι μετρήσεις αυτές καταγράφονται στον Πιν. 3-1 και οι χαρακτηριστικές σχεδιάζονται στο Σχ. 3-3. Επιπλέον, ζητούνται ο υπολογισμός της σταθεράς ροπής του κινητήρα καθώς και η ροπή των μηχανικών τριβών στις ονομαστικές στροφές του κινητήρα. Τέλος, ζητείται να σχεδιαστεί σε διάγραμμα η μεταβολή του βαθμού απόδοσης του κινητήρα σε συνάρτηση με τη μηχανική ροπή εξόδου του για τις μετρήσεις που αντιστοιχούν στην πρώτη τιμή τάσης εισόδου του κινητήρα, βλ. Σχ. 3-4.



**Σχήμα 3-2.** Η πειραματική διάταξη της τρίτης εργαστηριακής άσκησης.

**Πίνακας 3-1.** Μετρήσεις για την εύρεση της χαρακτηριστικής ροπής – στροφών κινητήρα DC.

α/α	τάση κινητήρα =		τάση κινητήρα =		τάση κινητήρα =	
	ρεύμα τυλιγμάτων γεννήτριας (A)	σ.α.λ. (rpm)	ρεύμα τυλιγμάτων γεννήτριας (A)	σ.α.λ. (rpm)	ρεύμα τυλιγμάτων γεννήτριας (A)	σ.α.λ. (rpm)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

1. Η μηχανική ροπή του κινητήρα (ροπή στον άξονα) για τη διάταξη του Σχ. 3-2, υπολογίζεται σύμφωνα με την,

$$T_{μηχ} = K_T i_a + K_T i_t \quad (3-14)$$

όπου  $i_a$  είναι το ρεύμα που μετρήσατε και  $i_t$  το ρεύμα που προσδιορίζεται από την Εξ. (3-10). Εξηγήστε (με χρήση εξισώσεων) για ποιο λόγο δεν πρέπει να χρησιμοποιήσετε την Εξ. (3-7), αλλά την Εξ. (3-13) ή την Εξ. (3-14).

2. Βρείτε το ρεύμα  $i_{τ,ov}$  που απορροφά ο κινητήρας στις ονομαστικές του στροφές, για να υπερνικήσει τις μηχανικές τριβές. (βλ. πίνακα του κατασκευαστή, πεδίο *Performance*).

$$i_{τ,ov} =$$

3. Δώστε τη σχέση προσδιορισμού του συντελεστή  $k_1$  της Εξ. (3-10) και υπολογίστε τον.

$$k_1 =$$

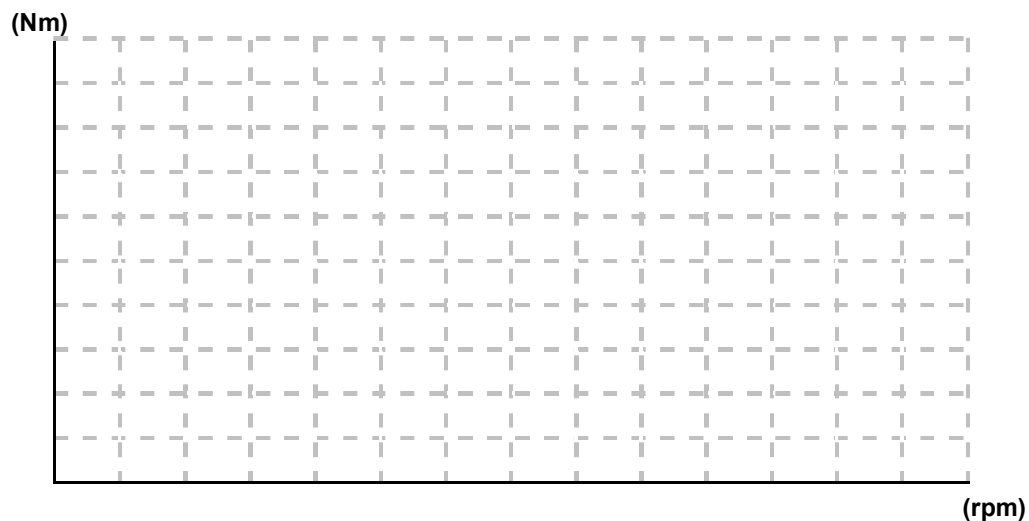
4. Γράψτε τη σχέση προσδιορισμού της σταθεράς ροπής των μηχανών και υπολογίστε την.

$$K_T =$$

5. Δώστε τη σχέση προσδιορισμού της ροπής των μηχανικών τριβών στις ονομαστικές στροφές του κινητήρα και υπολογίστε την.

$$T_{τ,ov} =$$

6. Χαράξτε τη χαρακτηριστική ροπής – στροφών του *κινητήρα* για τις τρεις διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας του.



**Σχήμα 3-3.** Χάραξη της χαρακτηριστικής ροπής – στροφών κινητήρα για διάφορες τάσεις λειτουργίας.

7. Εξηγήστε ποιά/ ποιές παραδοχές κάνατε κατά τη χάραξη των χαρακτηριστικών.

---

---

---

8. Προσδιορίστε την αντίσταση των τυλιγμάτων του τυμπάνου του κινητήρα,  $R_a$ ; Γράψτε τη σχέση προσδιορισμού της και υπολογίστε την.

$$R_a =$$

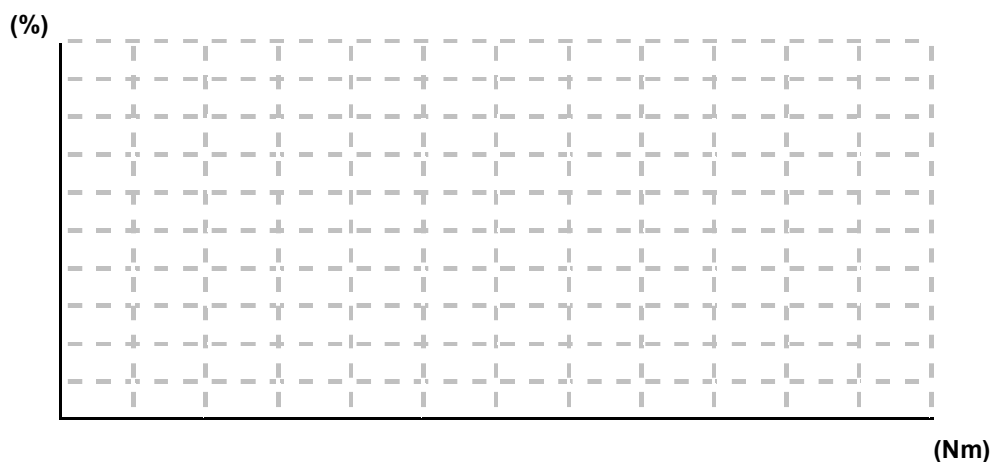
9. Γράψτε τη σχέση/ τις σχέσεις από τις οποίες υπολογίζεται το ρεύμα τυλιγμάτων τυμπάνου του κινητήρα,  $i_{\alpha,\kappa}$ . Στη συνέχεια, γράψτε τη σχέση προσδιορισμού του ως συνάρτηση των ρευμάτων  $i_r$  και του ρεύματος των τυλιγμάτων τυμπάνου της γεννήτριας,  $i_{\alpha,\gamma}$ .

$$i_{\alpha,\kappa} =$$

10. Γράψτε τη σχέση υπολογισμού του βαθμού απόδοσης (β.α.) του κινητήρα.

$$\eta_\kappa =$$

11. Χαράξτε το β.α. του κινητήρα ως συνάρτηση της μηχανικής ροπής στον άξονα, **για την πρώτη τιμή τάσης** τροφοδοσίας του.



**Σχήμα 3-4.** Χάραξη της μεταβολής του βαθμού απόδοσης ως συνάρτηση της μηχανικής ροπής του κινητήρα για την πρώτη τιμή τάσης τροφοδοσίας.

**Σημείωση:** Για τη χάραξη των διαγραμμάτων συμπληρώστε τους Πίνακες 3-2, 3-3, 3-4, για τις 3 διαφορετικές τιμές τάσεις του κινητήρα.

**Πίνακας 3-2.** Μετρήσεις για την πρώτη τιμή τάσης του κινητήρα.

τάση κινητήρα =									
α/α	$i_{a,\gamma}$ (A)	$n$ (rpm)	$\omega =$ (rad/s)	$i_{\tau} =$ (A)	$T_{\gamma} =$ (Nm)	$T_{\kappa} =$ (Nm)	$T_{\mu\eta\chi} =$ (Nm)	$i_{a,\kappa} =$ (A)	$\eta_{\kappa} =$ (%)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									



Πίνακας 3-3. Μετρήσεις για τη δεύτερη τιμή τάσης του κινητήρα.

τάση κινητήρα =									
α/α	$i_{a,\gamma}$ (A)	$n$ (rpm)	$\omega =$ (rad/s)	$i_{\tau} =$ (A)	$T_{\gamma} =$ (Nm)	$T_{\kappa} =$ (Nm)	$T_{\mu\eta\chi} =$ (Nm)	$i_{a,\kappa} =$ (A)	$\eta_{\kappa} =$ (%)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									

Πίνακας 3-4. Μετρήσεις για την τρίτη τιμή τάσης του κινητήρα.

τάση κινητήρα =									
α/α	$i_{a,\gamma}$ (A)	$n$ (rpm)	$\omega =$ (rad/s)	$i_{\tau} =$ (A)	$T_{\gamma} =$ (Nm)	$T_{\kappa} =$ (Nm)	$T_{\mu\eta\chi} =$ (Nm)	$i_{a,\kappa} =$ (A)	$\eta_{\kappa} =$ (%)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									