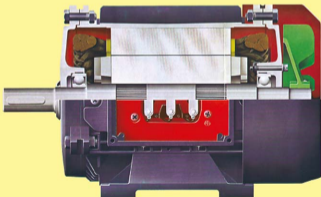


ΓΙΑΝΝΗ ΞΥΠΤΕΡΑ

# ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΤΟΜΟΣ Ι

ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ  
ΚΑΙ ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό αποτελεί μια εισαγωγή στις Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος και στις Ασύγχρονες Μηχανές και γράφτηκε με βάση τα περιεχόμενα των μαθημάτων που διδάσκονται οι φοιτητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Α.Π.Θ. Σε μερικά κεφάλαια υπερκαλύπτει την ύλη των αντιστοίχων διαλέξεων.

Η προσέγγιση της ύλης επιλέχθηκε με γνώμονα όχι μόνο τη δημιουργία μιας ικανοποιητικής θεωρητικής υποδομής αλλά και την κατανόηση των φυσικών φαινομένων και την καλύτερη αφομοίωση των βασικών νόμων συμπεριφοράς των Ηλεκτρικών Μηχανών με προοπτική την αξιοποίησή της μεταδιδόμενης γνώσης από τους μέλλοντες Μηχανικούς μας στις εφαρμογές. Με το ίδιο πνεύμα έγιναν και οι κατασκευαστικές περιγραφές.

Έχει αποδειχθεί ότι οι ΜΣΡ, που πραγματεύονται στο Α' ΜΕΡΟΣ, εκτός από τη μεγάλη σπουδαιότητα που έχουν στις ηλεκτρικές κινήσεις ελεγχόμενης περιστροφικής ταχύτητας, αποτελούν από την άποψη της διδασκαλίας μια πολύτιμη, σχεδόν "εκ των ουκ άνευ" εισαγωγή στη γνώση των Ηλεκτρικών Μηχανών εν γένει. Για το λόγο αυτό καταβλήθηκε προσπάθεια να μελετηθούν στο γενικότερο πλαίσιο της νομοτέλειας που διέπει τη λειτουργία των Ηλεκτρικών Μηχανών και να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα (Αρχή λειτουργίας, Λειτουργία γεννήτριας - κινητήρα, Εκκίνηση, Πέδηση).

Οι βασικοί νόμοι της αρχής λειτουργίας της γεννήτριας και του κινητήρα του κεφ. 1 ισχύουν σε όλες τις ΗΜ, ενώ η κατασκευαστική περιγραφή του κεφ. 2 αφορά ειδικά στις ΜΣΡ. Το κεφ. 7 αναφέρεται κυρίως σε εφαρμογές της Ηλεκτρικής Κίνησης. Στο κεφ. 9 εξετάζονται οι κυριότερες περιπτώσεις των μεταβατικών φαινομένων με μετασχηματισμό Laplace. Ορισμένες λεπτομέρειες ή εμβαθύνσεις (όπως π.χ. στο κεφ. 8 για τις Απώλειες αλλά και σε πολλά κεφάλαια του Β' ΜΕΡΟΥΣ) προσορίζονται κυρίως για τους φοιτητές του Ενεργειακού κύκλου σπουδών.

Το Β' ΜΕΡΟΣ πραγματεύεται τις Ασύγχρονες Μηχανές που αποτελούν τη σπονδυλική στήλη της Ηλεκτρικής Κίνησης.

Το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευαστικής περιγραφής του κεφ. 1 αφορά σε όλες τις Ηλεκτρικές Μηχανές. Το κεφ. 2 (Το μαγνητικό πεδίο) αφορά γενικά στις τριφασικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος, σύγχρονες, ασύγχρονες ή και με συλλέκτη. Το ίδιο ισχύει και για το κεφ. 3 (Περιελίξεις), μεγάλο μέρος του οποίου ισχύει για όλες τις Ηλεκτρικές Μηχανές.

Στο κεφ. 4 επιχειρείται η φυσική κατανόηση των φαινομένων με ελαχιστοποιημένη μαθηματική ανάλυση, ενώ στο κεφ. 5 γίνεται μια εκτενέστερη θεωρητική - μαθηματική πραγμάτευση της στάσιμης κατάστασης και της εκκίνησης της Ασύγχρονης Μηχανής Δακτυλιοφόρου Δρομέα, που ισχύει βασικά και για τον Βραχυκυκλωμένο Δρομέα, τις ιδιαιτερότητες του οποίου πραγματεύεται το κεφ. 6.

Ιδιαίτερη σημασία έχει για τις εφαρμογές το κεφ. 7 (Εκκίνηση) καθώς και το κεφ. 8 (Έλεγχος της περιστροφικής ταχύτητας) στο οποίο περιέχεται και η θεωρία της συμπεριφοράς του Ασύγχρονου Ηλεκτροκινητήρα, η περιστροφική ταχύτητα του οποίου ελέγχεται από Μετατροπείς Συχνότητας (Inverters).

Μερικά από τα σχήματα και τις φωτογραφίες είναι παρμένα από τη βιβλιογραφία και από τις εταιρίες ΕΛΛΑΣ ΕΛΕΚΤΡΙΚ, ΚΗΜ, ΑΒΒ, ΑΕΓ, SIEMENS και ΗΕΕΜΑΦ.

Στις διορθώσεις των κειμένων συνέβαλαν οι συνεργάτες του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών, κύριοι Στέλιος Θεοδωρόπουλος και Χρήστος Μαδεμλής καθώς και ο κύριος Βασίλης Χατζηαθανασίου.

Η γραφή του πρώτου κειμένου υπό μορφή σημειώσεων έγινε από τις κυρίες Νίκη Σωτίδου και Ελισάβετ Κοιλιαράκη και η σχεδίαση των Σχημάτων και η γραφιστική επιμέλεια από την κυρία Κατερίνα Παλούρα.

Την έκδοση ανέλαβε ο οίκος "Εκδόσεις Ζήτη". Ο κ. Νίκος Ζήτης είχε την όλη επιμέλεια.

Θεομές ευχαριστίες σε όλους τους ανωτέρω που συνέβαλαν στην έκδοση του βιβλίου αυτού καθώς και στο Α.Π.Θ, την Ελληνική Πολιτεία και τον Άγνωστο Έλληνα Φορολογούμενο.

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 1992

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΜΕΡΟΣ Α΄

### ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

<b>1. Αρχή λειτουργίας.....</b>	<b>13</b>
1.1. Εισαγωγή.....	13
1.2. Οι βασικοί νόμοι.....	14
1.3. Στρεφόμενη μηχανή.....	17
1.3.1. Λειτουργία γεννήτριας.....	17
1.3.2. Λειτουργία κινητήρα.....	19
1.3.3. Συμβολικά σχήματα και φορά περιστροφής.....	20
<b>2. Κατασκευή.....</b>	<b>23</b>
2.1. Ο στάτης.....	23
2.2. Ο δρομέας.....	25
2.3. Η περιέλιξη του δρομέα.....	28
2.3.1. Βροχοειδής περιέλιξη.....	30
2.3.2. Κυματοειδής περιέλιξη.....	33
2.3.3. Σύγκριση βροχοειδούς και κυματοειδούς περιέλιξης.....	34
<b>3. Μαγνητικά πεδία.....</b>	<b>35</b>
3.1. Διέγερση και αντίδραση.....	35
3.1.1. Πεδίο διέγερσης.....	35
3.1.2. Επαγωγή τάσης.....	36
3.1.3. Ροπή στρέψης.....	38
3.1.4. Πεδίο αντίδρασης.....	38
3.1.4.1. Στρώμα ρεύματος.....	38
3.1.4.2. ΜΕΔ και μαγνητικό πεδίο του δρομέα.....	40
3.1.4.3. Αντίδραση.....	43
3.1.5. Περιέλιξη αντιστάθμισης.....	45
3.2. Μετάβαση.....	46
3.2.1. Το φαινόμενο της μετάβασης.....	46
3.2.2. Αντιμετώπιση των προβλημάτων της μετάβασης.....	51
3.2.2.1. Βοηθητικοί πόλοι.....	51
3.2.2.2. Μετατόπιση των ψηφιδωτών.....	52
3.2.2.3. Περιέλιξη αντιστάθμισης.....	54

<b>4. Λειτουργία γεννήτριας</b> .....	55
4.1. Χαρακτηριστική κενού.....	55
4.1.1. Υπολογισμός .....	55
4.1.2. Μέτρηση .....	56
4.2. Γεννήτρια ξένης διέγερσης .....	58
4.3. Γεννήτρια παράλληλης διέγερσης.....	60
4.4. Αυτοδιέγερση.....	64
4.5. Γεννήτρια διέγερσης σειράς.....	65
4.6. Γεννήτρια σύνθετης διέγερσης (Compound) .....	67
<b>5. Λειτουργία κινητήρα</b> .....	69
5.1. Κινητήρας ξένης ή παράλληλης διέγερσης.....	69
5.2. Κινητήρας διέγερσης σειράς.....	73
5.3. Κινητήρας σύνθετης διέγερσης (Compound).....	75
5.4. Εκκίνηση κινητήρων ΣΡ.....	76
5.4.1. Εκκίνηση κινητήρων ΣΡ ξ.δ. και π.δ.....	76
5.4.2. Εκκίνηση κινητήρων ΣΡ δ.σ. ....	80
<b>6. Έλεγχος της περιστροφικής ταχύτητας</b> .....	82
6.1. Μεταβολή της τάσης τυμπάνου .....	82
6.2. Μεταβολή της διέγερσης .....	83
6.2.1. Κινητήρας ξ.δ. και π.δ.....	83
6.2.2. Κινητήρας δ.σ.....	84
6.3. Εξωτερική αντίσταση στο κύκλωμα του τυμπάνου.....	85
6.3.1. Κινητήρας ξ.δ. και π.δ.....	85
6.3.2. Κινητήρας δ.σ.....	86
6.4. Ζεύγος Ward - Leonard.....	87
<b>7. Πέδηση σε ηλεκτρικές κινήσεις</b> .....	89
7.1. Ωφέλιμη πέδηση .....	90
7.2. Πέδηση με αντίσταση .....	91
7.3. Πέδηση με αλλαγή πολικότητας.....	93
7.4. Συγκριτική παράθεση των ειδών λειτουργίας.....	94
<b>8. Απώλειες και βαθμός απόδοσης</b> .....	97
8.1. Απώλειες.....	97
8.1.1. Απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες.....	98
8.1.2. Απώλειες χαλκού.....	100
8.1.3. Απώλειες τριβών .....	101
8.2. Μέτρηση του βαθμού απόδοσης.....	102
8.2.1. Άμεση μέθοδος.....	102
8.2.2. Έμμεση μέθοδος.....	103
8.3. Κάλυψη των απωλειών σιδήρου.....	104

<b>9. Δυναμική συμπεριφορά.....</b>	<b>107</b>
9.1. Γενικά.....	107
9.2. Βραχυκύκλωμα γεννήτριας .....	108
9.2.1. Βραχυκύκλωμα γεννήτριας ξ.δ.....	109
9.2.2. Βραχυκύκλωμα γεννήτριας π.δ.....	109
9.3. Μεταβολή φορτίου κινητήρα π.δ. χωρίς απόσβεση.....	112
9.3.1. Κινητήρας π.δ. χωρίς απόσβεση.....	112
9.3.2. Κινητήρας π.δ. με απόσβεση.....	119

## ΜΕΡΟΣ Β΄

### ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

<b>1. Εισαγωγή - Κατασκευαστική περιγραφή.....</b>	<b>123</b>
<b>2. Το μαγνητικό πεδίο.....</b>	<b>134</b>
2.1. Γενικά.....	134
2.2. Περιέλιξη μιας φάσης.....	135
2.2.1. Στόμα ρεύματος.....	135
2.2.2. Μαγνητεγερτική Δύναμη - Επαγωγή.....	138
2.2.3. Ανάλυση Fourier - Αρμονικές ΜΕΔ.....	140
2.2.4. Αρμονικές επαγωγής - Συντελεστές ζώνης.....	141
2.3. Τριφασική περιέλιξη.....	145
2.3.1. Στρεφόμενο στόμα ρεύματος.....	145
2.3.2. Στρεφόμενη ΜΕΔ - Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο .....	148
2.3.3. Διπλή στρώση - Βράχυνση .....	152
2.4. Ακριβής υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου.....	156
<b>3. Περιελίξεις.....</b>	<b>159</b>
3.1. Κατασκευές περιελίξεων .....	159
3.1.1. Συρματοπεριέλιξη.....	160
3.1.2. Περιέλιξη διαμορφωμένων σπειρών.....	162
3.1.3. Τραβηχτή περιέλιξη.....	163
3.1.4. Βραχυκυκλωμένος κλωβός .....	164
3.2. Μόνωση περιελίξεων .....	164
3.2.1. Προδιαγραφές.....	164
3.2.2. Μονωτικά υλικά.....	168
3.3. Σχεδιασμός τριφασικών περιελίξεων ΕΡ.....	170
3.3.1. Απλή στρώση.....	170
3.3.2. Διπλή στρώση.....	177
3.4. Περιελίξεις ράβδων.....	181
3.5. Συμπληρωματικά για το σχεδιασμό και την κατασκευή.....	182
3.6. Παράδειγμα σχεδιασμού περιέλιξης .....	185

<b>4. Αρχή λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής</b> .....	187
4.1. Γενικά.....	187
4.2. Εκκίνηση και λειτουργία ασύγχρονου ηλεκτροκινητήρα .....	194
4.3. Λειτουργία γεννήτριας .....	196
4.4. Διανυσματικά διαγράμματα.....	197
<b>5. Ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα</b> .....	200
5.1. Πεπλεγμένες ροές, Επαγωγιμότητες.....	200
5.1.1. Εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία και στροφερόμενο μαγνητικό πεδίο.....	201
5.1.2. Μαγνητική ζεύξη των φάσεων.....	202
5.1.3. Συνολική πεπλεγμένη ροή μιας φάσης .....	209
5.2. Οι εξισώσεις των τάσεων.....	210
5.2.1. Γενική περίπτωση .....	210
5.2.2. Στάσιμη κατάσταση.....	216
5.3. Ισοδύναμα κυκλώματα και υπολογισμοί.....	219
5.3.1. Ο διχασμός της ισχύος διακένου. Ροπή στρέψης.....	221
5.3.2. Ισολογισμός ισχύων, ροπές.....	225
5.3.3. Υπολογισμός με το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα.....	226
5.3.4. Υπολογισμός με το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα. Διε- ρεύνηση .....	227
5.3.5. Εκκίνηση και έλεγχος στροφών με τη βοήθεια εξωτερικών αντι- στάσεων.....	233
5.3.6. Πολύ απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα.....	238
5.3.7. Η ολίσθηση συναρτήσει της ροπής και της ισχύος.....	240
5.4. Το κυκλικό διάγραμμα (κύκλος Ossana).....	242
5.4.1. Γενική περίπτωση .....	242
5.4.2. Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα.....	244
5.4.3. Χρησιμοποίηση της μεθόδου του κυκλικού διαγράμματος. Ακρίβεια.....	249
<b>6. Ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού</b> .....	251
6.1. Απλός κλωβός.....	251
6.1.1. Γενικά.....	251
6.1.2. Τα φασικά μεγέθη του δρομέα.....	253
6.1.3. Σχέσεις μεταφοράς .....	255
6.1.4. Εκκίνηση. Το επιδερμικό φαινόμενο .....	257
6.2. Διπλός κλώβος.....	260
<b>7. Εκκίνηση</b> .....	264
7.1. Γενικά.....	264
7.2. Θεωμότητα εκκίνησης.....	265
7.2.1. Εκκίνηση κενού .....	265
7.2.2. Εκκίνηση με φορτίο.....	267

7.3. Χρόνος εκκίνησης.....	269
7.4. Σύγκριση επαγωγικών κινητήρων-Μηχανές εργασίες .....	270
7.5. Μέθοδοι εκκίνησης επαγωγικού ηλεκτροκινητήρα.....	272
7.5.1. Εκκίνηση επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα .....	272
7.5.1.1. Κατευθείαν εκκίνηση .....	272
7.5.1.2. Εκκίνηση Αστέρα/Τριγώνου.....	272
7.5.1.3. Εκκίνηση με αντίσταση .....	275
7.5.1.4. Εκκίνηση με Αυτομετασχηματιστή.....	275
7.5.1.5. Περιέλιξη με ενδιάμεσες λήψεις.....	277
7.5.1.6. Κλωβός με υψηλές ράβδους και διπλός κλωβός.....	278
7.5.1.7. Εκκίνηση με μετατροπέα τάσης και συχνότητας.....	278
7.5.2. Εκκίνηση επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.....	278
7.5.3. Σύγκριση των μεθόδων εκκίνησης.....	281
<b>8. Έλεγχος της περιστροφικής ταχύτητας.....</b>	<b>283</b>
8.1. Γενικά.....	283
8.2. Αλλαγή αριθμού πόλων.....	285
8.2.1. Δύο ξεχωριστές περιελίξεις.....	285
8.2.2. Μια περιέλιξη με αλλαγή συνδεσμολογίας .....	286
8.2.2.1 Περιελίξεις Dahlander.....	286
8.2.2.2 Περιελίξεις PAM .....	291
8.3. Μετατροπή της συχνότητας του στάτη με ηλεκτρονικά ισχύος .....	296
8.3.1. Γενικά.....	296
8.3.2. Μείωση της συχνότητας αναλογικά με την τάση.....	299
8.3.2.1. Ροπή ανατροπής .....	299
8.3.2.2. Ροπή και ρεύμα συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας.....	301
8.3.2.3. Ροπή και ρεύμα συναρτήσει της ολίσθησης.....	302
8.3.2.4. Ροπή και ρεύμα συναρτήσει της συχνότητας.....	302
8.3.2.5. Μέγιστη ισχύς συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας .....	306
8.3.3 Αύξηση της συχνότητας με σταθερή τάση.....	310
8.4. Μεταβολή της ολίσθησης σε ΑΜΔΔ.....	313
8.4.1. Εξωτερικές αντιστάσεις στο κύκλωμα του δρομέα .....	313
8.4.2. Μετατροπέας συχνότητας στο κύκλωμα του δρομέα .....	315
Βιβλιογραφία.....	319
Παράρτημα Ι.....	323
Παράρτημα ΙΙ.....	328
Παράρτημα ΙΙΙ.....	331
Παράρτημα ΙV .....	334



## ΜΕΡΟΣ Α΄

# ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

- 1. Αρχή λειτουργίας*
- 2. Κατασκευή*
- 3. Μαγνητικά πεδία*
- 4. Λειτουργία γεννήτριας*
- 5. Λειτουργία κινητήρα*
- 6. Έλεγχος της περιστροφικής ταχύτητας*
- 7. Πέδηση σε ηλεκτρικές κινήσεις*
- 8. Απώλειες και βαθμός απόδοσης*
- 9. Δυναμική συμπεριφορά*

# 1. Αρχή λειτουργίας

## 1.1. Εισαγωγή

Η μηχανή συνεχούς ρεύματος η οποία κατασκευάστηκε ως γεννήτρια από τον Γάλλο Hippolyte Pixii το 1832, ήταν ο πρώτος μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας. Είχε βέβαια προηγηθεί η ανακάλυψη του νόμου της επαγωγής από τον Faraday που βασίστηκε στα πειράματα των Oersted και Ampere (1820). Ο ίδιος κατασκεύασε το 1832 και μια απλή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, της οποίας όμως η εφαρμογή δεν ήταν γνωστή. Η μηχανή του Pixii είχε συλλέκτη δύο τομέων για την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης των αγωγών. Η ανορθωμένη αυτή τάση είχε πολύ μεγάλη κυμάτωση.

Από τους σπουδαιότερους σταθμούς στην εξέλιξη των ΜΣΡ είναι η κατασκευή από τον Werner von Siemens το 1856 γεννήτριας ΣΡ με περιέλιξη τυμπάνου τοποθετημένη μέσα στα αυλάκια του δρομέα (επαγωγικό τύμπανο) και με συλλέκτη δύο τομέων.

Ο Pacinotti κατασκεύασε το 1860 τη μηχανή με τον επαγωγικό δακτύλιο και συλλέκτη με πολλούς τομείς την οποία εκμεταλλεύθηκε εμπορικά ο Gramme (1870). Η μηχανή αυτή είχε το πλεονέκτημα της μικρής κυμάτωσης της ανορθωμένης τάσης της αλλά εγκαταλείφθηκε σύντομα λόγω των μεγάλων τεχνολογικών και οικονομικών μειονεκτημάτων της δακτυλιοειδούς της περιέλιξης.

Τελικά επεκράτησε ο τύπος της ΜΣΡ του F.v. Hefner-Alteneck (1872) με περιέλιξη τυμπάνου και συλλέκτη με πολλούς τομείς.

Αργότερα η ΜΣΡ αντικαταστάθηκε στις περισσότερες εφαρμογές από τις ΜΕΡ, κατέχει όμως ένα σημαντικό μέρος στην ηλεκτρική κίνηση πολύ μικρών, μικρών, μεσαίων και μεγάλων ισχύων (μέχρι 8 MW). Ηλεκτροκινητήρες ΣΡ χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές κινήσεις με έλεγχο της περιστροφικής ταχύτητας (π.χ. μεταφορικές εγκαταστάσεις, εργαλειομηχανές, τροχιοδρομικά οχήματα) και είναι αναντικατάστατες σε κινήσεις τέτοιου ελέγχου υψηλών απαιτήσεων (π.χ. έλαστρα). Η τροφοδότηση με ηλεκτρονικά ισχύος

τελειοποίησε πολλές από αυτές τις εφαρμογές. Οι εφαρμογές της ΜΣΡ ως γεννήτριας είναι πολύ περιορισμένες, η γνώση όμως των βασικών αρχών του μηχανισμού λειτουργίας της, λόγω της εποπτικότητάς της που οφείλεται στην απουσία αυτεπαγωγών στη στάσιμη κατάσταση, προσφέρει μια πολύτιμη υποδομή για τη μελέτη των Ηλεκτρικών Μηχανών εν γένει.

## 1.2. Οι βασικοί νόμοι

Οι βασικοί νόμοι που διέπουν την λειτουργία των Ηλεκτρικών Μηχανών είναι:

### α) Ο νόμος της επαγωγής τάσης

Σε ευθύγραμμο αγωγό που βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  κάθετα ως προς το πεδίο αυτό και κινείται με την ταχύτητα  $v$ , επάγεται τάση (ΗΕΔ), η οποία μπορεί να υπολογισθεί με ένα νοητό ηλεκτρικό πεδίο που έχει ένταση

$$\vec{E}_L = \vec{v} \times \vec{B} \quad [\text{V/m}] \quad (1.1)$$

το οποίο αντιστοιχεί στην δύναμη Laplace (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι 5). Το "πεδίο" αυτό προκαλεί με την μετατόπιση των ηλεκτρονίων συσσώρευση των θετικών φορτίων στο άκρο Α1 και των αρνητικών στο Α2 (Σχ. 1.2). Η αντίστοιχη ΗΕΔ για αγωγό μήκους  $l$  και ταχύτητα κάθετη προς το μαγνητικό πεδίο είναι

$$E = l v B \quad [\text{V}] \quad (1.2)$$

Η διάταξη του Σχ. 1.1α και του Σχ. 1.1β εφόσον το κύκλωμα είναι ανοιχτό αποτελεί μια **γεννήτρια** που λειτουργεί στο κενό και έχει στα άκρα της την τάση  $E$ .

### β) Ο νόμος της ανάπτυξης δύναμης Laplace

Σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό μήκους  $l$  που βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  και διαρρέεται από το ρεύμα  $I$ , εξασκείται δύναμη κατά Laplace

$$\vec{F} = l \vec{I} \times \vec{B} \quad (1.3)$$

Το διάνυσμα  $\vec{I}$  είναι γεωμετρικό διάνυσμα (δεν έχει καμιά σχέση με τα

διανύσματα χρόνου των μιγαδικών μεγεθών (phasors)) και έχει τη φορά του ρεύματος. Εάν ο αγωγός είναι κάθετα τοποθετημένος ως προς το πεδίο  $\vec{B}$ , η απόλυτη τιμή της δύναμης είναι

$$F = l I B \quad (1.3\alpha)$$

Η διάταξη του Σχ. 1.1β και του Σχ. 1.2β είναι **κινητήρας** που λειτουργεί στο κενό εφόσον δεν έχει μηχανικό φορτίο, δηλαδή δύναμη φόρτισης αντίθετη της  $F$ .

### Ισοδύναμο κύκλωμα

Εάν το κύκλωμα του αγωγού της διάταξης γεννήτριας κλείσει (**φορτισθεί**) με την αντίσταση  $R$  (Σχ. 1.2α) θα κυκλοφορήσει προφανώς ρεύμα κατά τη φορά του πεδίου  $\vec{E}_L$ . Η τάση βέβαια  $U$  στα άκρα είναι μικρότερη της επαγόμενης τάσης  $E$  κατά  $R_a I$ :

$$U = E - R_a I \quad (1.4)$$

όπου  $R_a$  η εσωτερική αντίσταση του αγωγού.

Η σχέση αυτή οδηγεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 1.3α.

Τώρα όμως έχουμε ρευματοφόρο αγωγό σε μαγνητικό πεδίο, άρα ανάπτυξη δύναμης  $\vec{F} = l \vec{I} \times \vec{B}$  κατά Laplace. Η δύναμη αυτή, όπως προκύπτει από το εξωτερικό γινόμενο, έχει φορά αντίθετη της ταχύτητας του αγωγού  $\vec{v}$ , η οποία ήταν και η αρχική γενεσιουργός αιτία (νόμος του Lenz).

Στη διάταξη κινητήρα (Σχ.1.2β) η δύναμη Laplace  $\vec{F}$  μετακινεί κατά τη φορά της τον αγωγό που αναπτύσσει ταχύτητα  $v$ . Τώρα όμως έχουμε κινούμενο αγωγό σε μαγνητικό πεδίο στον οποίο επάγεται σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής η τάση  $E$  στα άκρα του αγωγού. Η αντι-ΗΕΔ αυτή είναι αντίθετη της τάσης  $U$ , δηλαδή της αρχικής γενεσιουργού αιτίας που προκάλεσε το ρεύμα  $I$  (νόμος του Lenz). Επομένως έχουμε

$$U = R_a I + E \quad (1.5)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 1.3β.

Περιληπτικά μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι στη λειτουργία γεννήτριας το πρωτογενές φαινόμενο είναι η επαγωγή ΗΕΔ (τάσης) και δευτερογενές η ανάπτυξη δύναμης, ενώ στη λειτουργία κινητήρα το πρωτογενές φαινόμενο είναι η ανάπτυξη δύναμης και δευτερογενές η επαγωγή αντί-ΗΕΔ. Στις στρεφόμενες μηχανές στη θέση του μεγέθους της "δύναμης" προτιμάται η χρησιμοποίηση του μεγέθους της "εσωτερικής ροπής".

### 1.3. Στρεφόμενη μηχανή

#### 1.3.1. Λειτουργία γεννήτριας

Η μηχανή ΣΡ του σχ. 1.4 είναι διπολική με δύο μόνο αυλάκια στα οποία είναι τοποθετημένο ένα έλιγμα, τα άκρα του οποίου καταλήγουν σε δύο τομείς του συλλέκτη. Οι τομείς ολισθαίνουν πάνω στις ακίνητες ψήκτρες A1, A2. Στο Σχ. 1.5 φαίνεται σχηματικά η δομή αυτής της μηχανής. Ο στάτης έχει μόνιμους μαγνήτες που αποτελούν και το κύριο μαγνητικό πεδίο (πεδίο διέγερσης). Κατασκευαστική περιγραφή θα γίνει στο κεφ. 2.

#### *Σχήμα 1.5.*

Στη λειτουργία γεννήτριας (Σχ. 1.4α και Σχ. 1.7β) η περιστροφική ταχύτητα  $n$  προκαλείται από την εξωτερική μηχανική ροπή  $T_{εξ}$  ανυψωτικού μηχανήματος που κατεβάζει ένα βάρος. Όταν οι αγωγοί του ελίγματος κινούνται στο δεδομένο μαγνητικό πεδίο των πόλων επάγεται στα άκρα τους η τάση  $E_a$  και επομένως στα άκρα του ελίγματος και στις ψήκτρες A1, A2 παρουσιάζεται η τάση  $2E_a$ .

#### *Σχήμα 1.6.*

Όταν οι περιστρεφόμενοι αγωγοί βρίσκονται στα κενά μεταξύ των πόλων

όπου δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, η επαγόμενη τάση είναι μηδέν. Θέτομε την αρχή του τόξου  $\theta$  με φορά προς τα δεξιά, στη μέση του αριστερού κενού μεταξύ των πόλων του Σχ. 1.4.

Η φορά της μαγνητικής επαγωγής από το δρομέα στο στάτη είναι η συμβατική θετική φορά της επαγωγής. Η μαγνητική επαγωγή κατά μήκος του διακένου φαίνεται στο Σχ. 1.6α, ενώ η επαγόμενη εναλλασσόμενη τάση (διακεκομμένη γραμμή) στο Σχ.1.6β. Εύκολα φαίνεται ότι η ψήκτρα A1 μέσω του αριστερού τομέα του συλλέκτη βρίσκεται πάντα σε επαφή με το άκρο του εκάστοτε κάτω ευρισκόμενου αγωγού, στο οποίο συσσωρεύονται τα θετικά φορτία. Επομένως η ψήκτρα A1 είναι πάντα ο θετικός πόλος της περιέλιξης του δρομέα και η ψήκτρα A2 αντίστοιχα ο αρνητικός. Ο συλλέκτης λοιπόν **ανορθώνει** την εναλλασσόμενη τάση της περιέλιξης του δρομέα (μηχανικός ανορθωτής). Η ανορθωμένη τάση βέβαια (πλήρης γραμμή) είναι ΣΡ με την έννοια ότι δεν αλλάζει η πολικότητά της, δεν είναι όμως χρονικά σταθερή. Η μέση τιμή της είναι  $E$ . Οι πραγματικές μηχανές ΣΡ έχουν πολλά αυλάκια με πολλούς αγωγούς, οι τάσεις των οποίων αθροιζόμενες δίνουν μια τάση στις ψήκτρες με μικρή **κυμάτωση** (υποκεφ. 3.1.2).

Εάν τα δύο άκρα του ελίγματος συνδεθούν με δύο δακτυλίους ολίσθησης οι οποίοι ολισθαίνουν πάνω στις ψήκτρες, η τάση των ψήκτρων είναι εναλλασσόμενη και η διάταξη αποτελεί γεννήτρια ΕΡ (Σχ. 1.7α)

### Σχήμα 1.7

Εάν το κύκλωμα του δρομέα με τα άκρα A1, A2 είναι ανοιχτό (**λειτουργία κενού**), δεν κυκλοφορεί ρεύμα στο δρομέα, δεν αναπτύσσονται δυνάμεις Laplace και η εσωτερική ή ροπή  $T_m$  είναι μηδέν. Η εξωτερική ροπή  $T_{\xi}$  είναι ίση με τη ροπή τριβών  $T_{\tau 0}$  της μηχανής (λόγω των τριβών του συλλέκτη, των εδράνων και του αέρα), έτσι ώστε το άθροισμα των ροπών στο δρομέα είναι μηδέν και η περιστροφική ταχύτητα  $n$  σταθερή. Στο ιδανικό κενό έχουμε  $T_{\tau 0}=0$  και  $T_m=0$ .

Εάν το κύκλωμα του δρομέα κλείσει με την αντίσταση φόρτισης (**λειτουργία φόρτισης**) κυκλοφορεί ρεύμα στους αγωγούς του. Έχουμε λοιπόν ρευματοφόρους αγωγούς σε μαγνητικό πεδίο, πάνω στους οποίους αναπτύσσονται δυνάμεις Laplace, εφαπτομενικές ως προς την επιφάνεια του δρομέα. Οι δυνάμεις αυτές δημιουργούν τη ροπή της μηχανής (εσωτερική ροπή, αντιροπή)  $T_m$  που είναι αντίθετη της εξωτερικής ροπής κίνησης:

$$T_{εξ} = T_m + T_{τ0} \quad (1.6)$$

Η μηχανή κίνησης (εδώ διάταξη τροχαλίας με βάρος) κινεί τη γεννήτρια με τη μηχανική ισχύ

$$P = \omega_m T_{εξ} \quad (1.7)$$

όπου  $\omega_m$  η γωνιακή ταχύτητα.

Η γεννήτρια δίνει την ηλεκτρική ισχύ

$$P_1 = U I \quad (1.8)$$

ενώ η διαφορά  $\Sigma P = P - P_1$  αποτελεί το σύνολο των απωλειών της. Στη γενική περίπτωση μεταβλητής ταχύτητας (π.χ. επιβράδυνση ή επιτάχυνση) η συνισταμένη ροή στον άξονα είναι

$$T_{επ} = T_{εξ} - (T_{τ0} + T_m)$$

και σύμφωνα με το νόμο του Newton για περιστρεφόμενες μάζες

$$T_{επ} = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

όπου  $J$  [kg m<sup>2</sup>] η ροπή αδράνειας όλων των περιστροφομένων μαζών. Η ροπή

$$T = T_{τ0} + T_m$$

είναι η συνισταμένη ροπή (αντιροπή) της γεννήτριας. Για αμελητέες τριβές η **T ταυτίζεται με την  $T_m$** .

### 1.3.2. Λειτουργία κινητήρα

Η παραπάνω ηλεκτρική μηχανή  $\Sigma P$ , με την ίδια πολικότητα ψηκτρών και την ίδια φορά του μαγνητικού πεδίου, όταν λειτουργήσει ως κινητήρας (Σχ. 1.4 β) παίρνει από την πηγή τροφοδότησης την ηλεκτρική ισχύ  $P_1 = UI$  και την μετατρέπει στη μηχανική ισχύ

$$P_m = \omega_m T_m \quad (1.9)$$

Έστω ότι ο δρομέας της μηχανής βρίσκεται σε ηρεμία όταν τον τροφοδοτήσουμε από την πηγή ΣΡ τάσης  $U$ . Αρχικά θα κυκλοφορήσει το ρεύμα εκκίνησης

$$I_S = \frac{U}{R_\alpha} \quad (1.10)$$

όπου  $R_\alpha$  η αντίσταση της περιέλιξης του δρομέα. Επί των ρευματοφόρων αγωγών αναπτύσσονται δυνάμεις Laplace που προκαλούν την εσωτερική ροπή  $T_m$  η οποία θέτει σε κίνηση το δρομέα της μηχανής. Με δεδομένη την πολικότητα του μαγνητικού πεδίου και την πολικότητα των ψηκτρών που καθορίζει τη φορά του ρεύματος προκύπτει από τη σχέση (1.3) δεξιόστροφη εσωτερική ροπή. Η ροπή αυτή είναι τώρα η κινούσα ροπή και περιστρέφει τη μηχανή κατά τη φορά της. Όταν αρχίσει να περιστρέφεται ο δρομέας, επάγεται κατά τα προηγούμενα η αντί-ΗΕΔ  $E$  στην περιέλιξη του και το ρεύμα μειώνεται όπως προκύπτει από την (1.5):

$$I = \frac{U-E}{R_\alpha} \quad (1.11)$$

Εάν ο άξονας της μηχανής περιστρέφεται ελεύθερα (δεν είναι συμπλεγμένος με μηχανήμα εργασίας), η ροπή φόρτισης στον άξονα είναι μηδέν και έχουμε **λειτουργία κενού**. Η εσωτερική ροπή καλύπτει βέβαια τη ροπή τριβών ( $T_m=T_{TQ}$ ). Στο ιδανικό κενό είναι  $T_m=T_{TQ}=0$ .

Στην περίπτωση φόρτισης του ηλεκτροκινητήρα με τη ροπή φόρτισης  $T_{E\xi}$  του μηχανήματος εργασίας (π.χ. του ανυψωτικού του Σχ. 1.4β), έχουμε

$$T_m=T_{E\xi}+T_{TQ} \quad (1.12)$$

Η περιστροφική ταχύτητα είναι σταθερή.

Στη γενική περίπτωση μεταβλητής περιστροφικής ταχύτητας η συνισταμένη ροπή στον άξονα είναι

$$T_{E\pi} = T_m - (T_{TQ} + T_{E\xi})$$

Η ροπή

$$T = T_m - T_{TQ}$$

Είναι η συνισταμένη ροπή του κινητήρα (ωφέλιμη ροπή) η οποία στην περίπτωση αμελητέων τριβών **ταυτίζεται με τη  $T_m$** .

### 1.3.3. Συμβολικά σχήματα και φορά περιστροφής

Η περιέλιξη της μηχανής του Σχ. 1.4 είναι δεξιόστροφη (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ)



και γι αυτήν ισχύει η αντιστοίχιση της φοράς των μεγεθών που αναφέραμε. Σε περιπτώσεις που δεν φαίνεται ή δεν αναφέρεται η φορά της περιέλιξης, θεωρείται ότι είναι δεξιόστροφη.

Η γεννήτρια ΣΡ του Σχ. 1.4α συμβολίζεται και όπως δείχνει το Σχ. 1.8.

### *Σχήμα 1.8.*

Το κατακόρυφο διάνυσμα (διάνυσμα ρεύματος) μέσα στον κύκλο του Σχ. 1.8δ συμβολίζει τη ρευματοφόρο περιέλιξη του δρομέα και έχει τη φορά του μαγνητικού πεδίου που διεγείρεται από αυτή. Το οριζόντιο διάνυσμα συμβολίζει το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Ανάλογα είναι τα συμβολικά σχήματα για τον κινητήρα.

Ο εύκολος καθορισμός της φοράς της αναπτυσσόμενης εσωτερικής ροπής  $T_m$ , εάν είναι γνωστή η πολικότητα της τάσης και η φορά του μαγνητικού πεδίου, επιτυγχάνεται με τον εξής κανόνα: "**Η φορά** της εσωτερικής ροπής είναι αυτή κατά την οποία πρέπει να στραφεί κατά το συντομότερο δρόμο το διάνυσμα του ρεύματος προς το διάνυσμα της μαγνητικής ροής".

Η φορά περιστροφής, η οποία σημειώνεται στα σχήματα, είναι στο μεν κινητήρα η ίδια με τη φορά της εσωτερικής ροπής, στη δε γεννήτρια αντίθετη.

Η εξήγηση του κανόνα αυτού βρίσκεται στα προηγούμενα, μπορεί όμως να δοθεί και με τη βοήθεια των Σχ. 1.9γ και Σχ. 1.9δ: Η ρευματοφόρος περιέ-

### *Σχήμα 1.9.*

λιξη του δρομέα αντικαθίσταται με μαγνήτη που συμβολίζει το μαγνητικό της πεδίο. Η έλξη των δυο μαγνητών δίνει τη φορά της αναπτυσσόμενης εσωτερικής ροπής.

Εάν είναι γνωστή η φορά περιστροφής και η φορά του μαγνητικού πεδίου, η **πολικότητα** της τάσης βρίσκεται, εάν περιστραφεί το διάνυσμα της μαγνητικής ροής κατά  $\pi/2$  κατά τη φορά περιστροφής της μηχανής είτε είναι γεννήτρια είτε κινητήρας: Το βέλος του διανύσματος δείχνει τότε το θετικό πόλο.