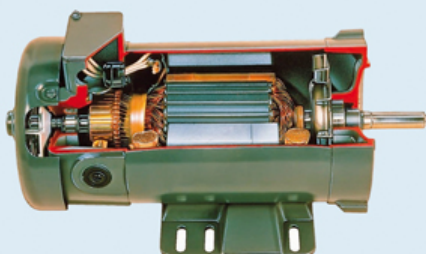
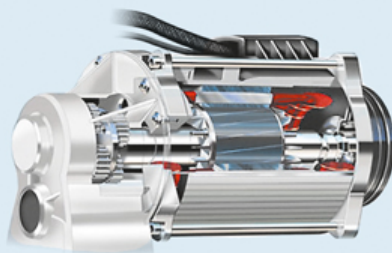


Αθανάσιος Ν. Σαφάκας
Ομότιμος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Ηλεκτρικές Μηχανές



ISBN 978-960-456-521-4

© Copyright, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Αθανάσιος Σαφάκας, Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2019

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη και του συγγραφέα κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση
Βιβλιοδεσία

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΙΚΕ

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:

Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα
Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Το παρόν βιβλίο περιλαμβάνει βασικά στοιχεία ηλεκτρομαγνητισμού, τα οποία αποτελούν τα θεμέλια της ανάλυσης των μετασχηματιστών και των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Επίσης παρατίθενται τα απαραίτητα κατασκευαστικά στοιχεία για την κατανόηση της δομής αυτών των μηχανών, χωρίς να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι η λεπτομερής περιγραφή των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών αποτελεί ένα εκτεταμένο θέμα και απαιτεί αυτοτελές συγγραφικό έργο.

Η ανάλυση της λειτουργικής συμπεριφοράς, κυρίως στη μόνιμη κατάσταση, βασίζεται στα ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα και διαχρονικά σε κάθε μελέτη των στατών και στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Αυτά τα ισοδύναμα κυκλώματα παριστάνουν τα μαθηματικά μοντέλα που αποδίδουν τις φυσικές ιδιότητες των μηχανών και συνδέονται άρρηκτα με την κατασκευαστική δομή των.

Η παραγωγή, η μεταφορά και η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω των κατάλληλων ηλεκτρικών μηχανών. Τούτο καθιστά απόλυτα προφανή την αναγκαιότητα της βαθιάς επιστημονικής και τεχνολογικής γνώσης, η οποία άρχισε να παράγεται από τα μέσα του δεκάτου ενάτου αιώνα και σημείωσε μεγάλη πρόοδο στον εικοστό αιώνα. Παρόλο που η πρόοδος σε αυτόν τον τομέα έχει φτάσει σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο, η ερευνητική εργασία συνεχίζεται και αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόκληση για τους μηχανικούς. Οι εξελίξεις στον τομέα των μαγνητικών και μονωτικών υλικών, οι νέες μέθοδοι ανάλυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η χρήση των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών και οι προηγμένες τεχνικές λογισμικού, προσφέρουν δυνατότητες βελτίωσης της κατασκευής και αύξησης των σημαντικών δεικτών, όπως είναι η αναλογία βάρους προς ισχύ.

Οι μετασχηματιστές μετασχηματίζουν την εναλλασσόμενη τάση ορισμένης στάθμης σε μία άλλη επιθυμητή στάθμη καθιστώντας δυνατή τη σύνδεση μιας πηγής με το εκάστοτε φορτίο, που πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές. Το μέγεθος των μετασχηματιστών, ανάλογα με τη μεταφερόμενη ισχύ, εκτείνεται από πολύ μικρές μέχρι εξαιρετικά μεγάλες τιμές με παράλληλη αύξηση του βαθμού απόδοσης. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται κυρίως ως μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Η διαστασιολόγησή τους εκτείνε-

ται από μερικά mW έως μερικές δεκάδες MW. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η επίτευξη της εύκολης ελεγχιμότητάς της, γεγονός που, συνήθως, την καθιστά πλεονεκτικότερη έναντι των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος.

Το βιβλίο τούτο προορίζεται πρωτίστως για τη διδασκαλία των ηλεκτρικών μηχανών σε μηχανικούς αλλά και σε κάθε άλλο επίπεδο ενδιαφερομένων, είτε σε χώρους διδασκαλίας και έρευνας, είτε σε ποικίλες εφαρμογές όπως είναι οι διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς. Το περιεχόμενό του προέρχεται από τις σημειώσεις του συγγραφέα, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την πολυετή διδασκαλία του στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Οι σημειώσεις αυτές βασίστηκαν, κυρίως, σε μερικά επιλεγμένα γερμανικά συγγράμματα, για τα οποία, μπορεί να ισχυρισθεί κανείς ότι απέκτησαν διαχρονική αξία, και πλέον αποτελούν κλασικές βιβλιογραφικές πηγές. Οι ιδέες, το σκεπτικό, τα σχήματα και οι φωτογραφίες, που προέρχονται από αυτές τις πηγές, επισημαίνονται σε κάθε βήμα του κειμένου, με ιδιαίτερη προσοχή, με αντίστοιχες παραπομπές. Η διδακτική και ερευνητική σκέψη του συγγραφέα είναι έντονα επηρεασμένες από αυτήν τη βιβλιογραφία λόγω των σπουδών του και της ερευνητικής δραστηριότητάς του στο Πανεπιστήμιο Καρλσρούης της Γερμανίας (η αρχική ονομασία ήταν «Technische Hochschule Karlsruhe» και ακολούθως ονομάστηκε «Universität Karlsruhe») κατά το χρονικό διάστημα 1961-1974. Στόχος ήταν η δημιουργία ενός συγγράμματος για τις ηλεκτρικές μηχανές χρήσιμου για διδάσκοντες και διδασκόμενους στην Ελλάδα. Με την ελπίδα ότι επετεύχθη αυτός ο στόχος, παραδίδεται το βιβλίο στους ενδιαφερόμενους αναγνώστες.

Και από τη θέση αυτή επιθυμώ να ευχαριστήσω τους συνεργάτες μου για τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους επί του κειμένου (εκφραστικές και ουσιαστικές παρατηρήσεις). Ιδιαίτερως ευχαριστώ τον διδάκτορα μηχανικό για τη γραφή του προγενέστερου κειμένου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, κ. Κωνσταντίνο Γεωργάκα όλης της ύλης. Επίσης ευχαριστώ τους συνεργάτες μου κ. Μελπομένη Τσεμπερλίδου, ηλεκτρολόγο μηχανικό και τον διδάκτορα μηχανικό κ. Ευάγγελο Μίμο, που πολύ ευγενικά προσφέρθηκαν και έγραψαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μεγάλο μέρος του κειμένου.

Πάτρα 2019

Αθανάσιος Ν. Σαφάκας

Θεμελιώδεις Έννοιες Εναλλασσόμενων Ρευμάτων

1. Ορισμοί	3
2. Μιγαδική παράσταση εναλλασσόμενων ρευμάτων	6
3. Διανυσματικό διάγραμμα	9
4. Ισχύς μονοφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος	10
5. Φυσική σημασία των διαφόρων εννοιών ισχύος	11
6. Τριφασικό ημιτονοειδές ρεύμα	15
7. Ισχύς τριφασικού ρεύματος	15
8. Ονομαστικά μεγέθη	17

Μέρος Α

Γενικές έννοιες, Μετασχηματιστές, Μηχανές συνεχούς ρεύματος

Κεφάλαιο Α.1. Εισαγωγή

A.1.1. Ο σκοπός και η εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών	21
A.1.2. Ρεύμα, Τάση, Ηλεκτρικό πεδίο	24
A.1.3. Θεμελιώδεις έννοιες του μαγνητικού πεδίου	27
A.1.4. Ο νόμος του διαρρέυματος	30
A.1.5. Μαγνητική ροή, επαγωγιμότητα	31
A.1.6. Μαγνητική ενέργεια	34
A.1.7. Ο νόμος της επαγωγής	36
A.1.8. Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις	43
A.1.8.1. Δύναμη επί ρευματοφόρου αγωγού εντός μαγνητικού πεδίου	43
A.1.8.2. Δυνάμεις επί ενός πηνίου εντός μαγνητικού πεδίου	44
A.1.8.3. Δύναμη μεταξύ δύο ηλεκτρικών αγωγών	47
A.1.8.4. Δύναμη επί ενός σιδηροπυρήνα εντός μαγνητικού πεδίου	49
A.1.9. Απώλειες ενέργειας στο σίδηρο	50
A.1.9.1. Απώλειες υστέρησης	50

A.1.9.2. Απώλειες δινορευμάτων	53
A.1.10. Σκέδαση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων	54
A.1.10.1. Ορισμός ροής σκέδασης	54
A.1.10.2. Σκέδαση δύο τυλιγμάτων	56
A.1.10.2.1. Μετασχηματιστής	58
A.1.10.2.2. Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές	59

Κεφάλαιο Α.2. Μετασχηματιστές (MT)

A.2.1. Γενικά	61
A.2.2. Βασική κατασκευή των μετασχηματιστών	62
A.2.2.1. Πυρήνας μονοφασικού μετασχηματιστή	62
A.2.2.2. Πυρήνας τριφασικού μετασχηματιστή	64
A.2.2.3. Τυλίγματα μετασχηματιστών	66
A.2.2.4. Ψύξη μετασχηματιστών	68
A.2.3. Εξισώσεις τάσεων και ισοδύναμα κυκλώματα του μονοφασικού μετασχηματιστή	72
A.2.4. Λειτουργία του μετασχηματιστή	76
A.2.4.1. Λειτουργία εν κενώ	76
A.2.4.2. Λειτουργία μετασχηματιστή σε βραχυκύκλωμα	79
A.2.4.3. Λειτουργία μετασχηματιστή υπό φορτίο	81
A.2.4.4. Μεταβολή της τάσης μετασχηματιστή υπό φορτίο	83
A.2.4.5. Απώλειες και βαθμός απόδοσης μονοφασικού μετασχηματιστή	86
A.2.4.6. Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών	87
A.2.4.7. Ισχύς μετασχηματιστή ως συνάρτηση του όγκου	90
A.2.4.8. Αυτομετασχηματιστής (AMT)	92
A.2.4.9. Μετασχηματιστής ρεύματος	97
A.2.5. Τριφασικός μετασχηματιστής	99
A.2.5.1. Ομάδες συνδεσμολογίας μετασχηματιστών	99
A.2.5.2. Χρησιμοποίηση των συνδεσμολογιών	104
A. A. Αστέρας	104
B. Τρίγωνο	105
Γ. Τεθλασμένος αστέρας	105
A.2.5.3. Φόρτιση τριφασικού μετασχηματιστή	106
A.2.5.4. Ρεύματα πρωτεύοντος κατά τη φόρτιση του δευτερεύοντος με δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο σύστημα	107
A.2.5.5. Φόρτιση με σύστημα μηδενικής φάσης	109

A.2.5.6. Ρεύμα μαγνήτισης	111
A. Μονοφασικός μετασχηματιστής	111
B. Τριφασικός Μετασχηματιστής	112
A.2.6. Μεταβατικά φαινόμενα μετασχηματιστή	113
A.2.6.1. Σύνδεση ενός μετασχηματιστή χωρίς φορτίο με το δίκτυο	113
A.2.6.2. Ρεύμα βραχυκύκλωσης	115
A.2.7. Θόρυβος μετασχηματιστών	119
A.2.8. Υπολογισμός της σκέδασης μετασχηματιστών	120
A.2.9. Το διευρυμένο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή	125
A.2.9.1. Μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων	125
A.2.9.2. Μονοφασικός μετασχηματιστής με τρία τυλίγματα	131
A.2.10. Θέρμανση μετασχηματιστή	133
A.2.11. Ειδικά θέματα μετασχηματιστών	137
A.2.11.1 Γενικές επισημάνσεις	137
A.2.11.2. Μετασχηματιστές μέγιστης ισχύος	138
A.2.11.3. Μετασχηματιστές μέσης τάσης	140
A.2.11.4 Μετασχηματιστές χαμηλής τάσης και χαμηλής ισχύος	141
A.2.11.5. Μετασχηματιστές μέτρησης υψηλών τάσεων ή υψηλών ρευμάτων	143

Κεφάλαιο A.3. Μηχανές συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.)

A.3.1. Βασική κατασκευή	145
A.3.2. Παραγωγή συνεχούς τάσης	153
A.3.3. Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος	156
A.3.3.1. Βασικές έννοιες	156
A.3.3.2. Βροχοτύλιγμα	163
A.3.3.3. Ισοδυναμικές συνδέσεις βροχοτυλιγμάτων	168
A.3.3.4. Κυματοτύλιγμα	170
A.3.3.5. Ισοδυναμικές συνδέσεις κυματοτυλιγματος	172
A.3.3.6. Χρησιμοποίηση βροχοτυλιγμάτων και κυματοτυλιγμάτων	173
A.3.4. Τάση εξ επαγωγής, τάση στους ακροδέκτες, ρευματικό στρώμα και ηλεκτρομαγνητική ροπή	173
A.3.4.1. Τάση εξ επαγωγής	173
A.3.4.2. Τάση στους ακροδέκτες	175
A.3.4.3. Ρευματικό στρώμα	176
A.3.4.4 Ηλεκτρομαγνητική ροπή	177
A.3.5. Αντίδραση τυμπάνου	178

A.3.5.1. Επίδραση του πεδίου του τυμπάνου επί του πεδίου των πόλων ...	178
A.3.5.2. Καμπύλη ολικού μαγνητικού πεδίου	181
A.3.5.3. Χαρακτηριστική εν κενώ, υπό φορτίο, μαγνητικό κύκλωμα	185
A.3.5.4. Αντίδραση τυμπάνου κατά τη μετατόπιση των ψηκτρών	188
A.3.5.5 Επακόλουθα της αντίδρασης του τυμπάνου	191
A.3.5.6. Εξουδετέρωση της αντίδρασης του τυμπάνου	193
A.3.5.6.1. Βοηθητικοί πόλοι	193
A.3.5.6.2. Τύλιγμα αντιστάθμισης	194
A.3.5.6.3. Άλλες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της αντίδρασης του τυμπάνου	196
A.3.6. Αναστροφή ρεύματος τυμπάνου	197
A.3.6.1. Χρονική συνάρτηση ρεύματος κατά την αναστροφή του ρεύματος τυμπάνου	197
A.3.6.2. Δυνατότητες επηρεασμού του φαινομένου της αναστροφής του ρεύματος τυμπάνου	204
A.3.6.3. Σπινθηρισμοί μηχανών Σ.Ρ.	209
A.3.7. Μόνιμη λειτουργία μηχανών Σ.Ρ.	210
A.3.7.1. Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος	210
A.3.7.1.1. Γεννήτρια Σ.Ρ. ξένης διέγερσης	210
A.3.7.1.2. Γεννήτρια Σ.Ρ. παράλληλης διέγερσης	211
A.3.7.1.3. Γεννήτρια Σ.Ρ. με διέγερση σε σειρά	216
A.3.7.1.4. Γεννήτρια Σ.Ρ. διπλής διέγερσης	217
A.3.7.2. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος	219
A.3.7.2.1. Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας – ηλεκτρομαγνητικής ροπής	219
A.3.7.2.2. Μηχανές Σ.Ρ. ξένης ή παράλληλης διέγερσης	220
A.3.7.2.3. Μηχανές με διέγερση σε σειρά	221
A.3.7.2.4. Μηχανές διπλής διέγερσης	222
A.3.7.2.5. Ρύθμιση των στροφών μηχανών Σ.Ρ.	223
A.3.7.2.5.1 Ρύθμιση μέσω της τάσης του τυμπάνου U_T	223
A.3.7.2.5.2. Ρύθμιση μέσω της μαγνητικής ροής Φ	224
A.3.7.2.5.3. Ρύθμιση μέσω της αντίστασης του τυμπάνου R_T	225
A.3.7.2.6. Σύστημα Ward-Leonard, για τη ρύθμιση του αριθμού στροφών μηχανής Σ.Ρ.	226
A.3.7.2.7. Βασικές διατάξεις ηλεκτρικών μετατροπών ισχύος για τη ρύθμιση των στροφών κινητήρων Σ.Ρ.	228
1. Μονοφασικός μετατροπέας	229
2. Τριφασικός μετατροπέας	229

A.3.8.	Πέδηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος	232
A.3.8.1.	Πέδηση με την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας	232
A.3.8.2.	Πέδηση με ωμική αντίσταση	232
A.3.8.3.	Πέδηση με αλλαγή της πολικότητας της τάσης του τυμπάνου	233
A.3.9.	Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος	234
Βιβλιογραφία Ηλεκτρικών Μηχανών Μέρους Α		238

Ασκήσεις: Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Α

A.	Προβλήματα προς λύση	245
B.	Υποδειγματικές λύσεις	256
Γ.	Υποδειγματικές ασκήσεις γραπτής εξέτασης	263

Μέρος Β

Ασύγχρονες μηχανές, Σύγχρονες Μηχανές

Κεφάλαιο Β.1. Ασύγχρονες μηχανές (Α.Μ.)

B.1.1.	Βασικές αρχές κατασκευής Α.Μ.	269
B.1.2.	Τυλίγματα Α.Μ.	274
B.1.2.1.	Τυλίγματα μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος	274
B.1.2.2.	Τυλίγματα με μεταβλητό αριθμό πόλων	280
B.1.3.	Βασικές αρχές λειτουργίας Α.Μ.	281
B.1.4.	Μαγνητικά πεδία Α.Μ.	284
B.1.4.1.	Δημιουργία στρεφομένων πεδίων	284
B.1.4.2.	Στρεφόμενο πεδίο ενός τριφασικού τυλίγματος	285
B.1.4.3.	Υπολογισμός του ρευματικού στρώματος	290
B.1.4.3.1.	Ρευματικό στρώμα μιας φάσης	290
B.1.4.3.2.	Στρεφόμενο ρευματικό στρώμα	292
B.1.4.4.	Υπολογισμός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου	292
B.1.5.	Λειτουργία Ασύγχρονης Μηχανής	294
B.1.5.1.	Συχνότητα και ολίσθηση	294
B.1.5.2.	Τάση, ρεύμα και αριθμός στροφών του δρομέα	296
B.1.5.3.	Εξισώσεις τάσεων Α.Μ. και ισοδύναμο κύκλωμα	297
B.1.6.	Κατανομή ισχύος Α.Μ. και ηλεκτρομαγνητική ροπή	300
B.1.6.1.	Διάγραμμα ισχύος κατά Sankey	300

B.1.6.2. Ισολογισμός ισχύος Α.Μ.	302
B.1.6.3. Υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής	304
B.1.6.4. Διερεύνηση της μαθηματικής παράστασης της ηλεκτρομα- γνητικής ροπής	305
B.1.6.5. Ροπή M_e για $r_s = 0$	307
B.1.6.6. Διαγράμματα ροπής, ρεύματος, ισχύος	309
B.1.7. Εκκίνηση, σταθερή κινητική κατάσταση, ευστάθεια ενός ασύγχρονου κινητήρα	312
B.1.8. Μέθοδοι εκκίνησης Α.Μ.	316
B.1.8.1. Χρόνος εκκίνησης	316
B.1.8.2. Θερμική ενέργεια κατά την εκκίνηση	317
B.1.8.3. Εκκίνηση Α.Μ. με δακτυλιοφόρο δρομέα	318
B.1.8.4. Εκκίνηση Α.Μ. με τη μέθοδο «αστέρας - τρίγωνο»	319
B.1.8.5. Εκκίνηση Α.Μ. μέσω ενός μετασχηματιστή	320
B.1.8.6. Εκκίνηση με μια αντίσταση στον στάτη ή με μονοφασικό αυτομετασχηματιστή	321
B.1.8.7. Εκκίνηση Α.Μ. μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος	321
B.1.9. Η ασύγχρονη μηχανή ως μετασχηματιστής	325
B.1.10. Γεωμετρικός τύπος των ρευμάτων Α.Μ.	327
B.1.11. Μόνιμη λειτουργία Α.Μ. με βραχυκυκλωμένο δρομέα	332
B.1.11.1. Βασική θεωρία	332
B.1.11.2. Εκμετάλλευση του επιδερμικού φαινομένου στις Α.Μ. με κλωβό	336
B.1.12. Ανώτερες αρμονικές του μαγνητικού πεδίου και επιδράσεις αυτών επί της λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής	339
B.1.12.1. Θεμελιώδεις νόμοι των ανώτερων αρμονικών	339
B.1.12.2. Ροπές ανώτερων αρμονικών	342
α) Ασύγχρονες ανώτερες ροπές	343
β) Σύγχρονες ανώτερες ροπές	344
γ) Δυνάμεις ανώτερων αρμονικών	345
B.1.12.3. Αντιμετώπιση των ανωτέρων αρμονικών	346

Κεφάλαιο Β.2. Σύγχρονες Μηχανές (Σ.Μ.)

B.2.1. Βασικά κατασκευαστικά στοιχεία	349
B.2.2. Ψύξη Σ.Μ.	356
B.2.3. Διέγερση Σ.Μ.	359
B.2.4. Σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα (κατανεμημένο τύλιγμα)	363

B.2.4.1. Καμπύλη πεδίου και χαρακτηριστική εν κενώ	364
B.2.4.2. Εξισώσεις Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα, ισοδύναμο κύκλωμα, διανυσματικό διάγραμμα	367
B.2.4.3. Ηλεκτρομαγνητική ροπή Σ.Μ.	373
B.2.4.4. Σημασία της πολικής γωνίας θ , ή γωνίας φορτίου, ή γωνίας ισχύος	378
B.2.4.5. Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας Σ.Μ.	380
B.2.4.6. Φόρτιση της Σ.Μ. παραλληλισμένης με το δίκτυο	382
B.2.4.7. Γεωμετρικός τόπος του ρεύματος \vec{I}_S	386
B.2.4.8. Αντίδραση τυμπάνου και ρεύμα μαγνήτισης	388
B.2.4.9. Μεταβολή της τάσης της σύγχρονης γεννήτριας	393
B.2.4.10. Βραχυκύκλωμα Σ.Μ.	394
B.2.4.10.1. Γενική περιγραφή	394
B.2.4.10.2. Μόνιμο τριπολικό βραχυκύκλωμα	395
B.2.4.10.3. Αναλογία «κενού - βραχυκυκλώματος»	396
B.2.4.10.4. Κρουστικό βραχυκύκλωμα	398
B.2.4.11. Χαρακτηριστική αέργου φόρτισης ($\cos\varphi=0$)	399
B.2.4.12. Χαρακτηριστικές φόρτισης Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα	403
B.2.5. Σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους	406
B.2.5.1. Διαμερισμός της διαρροής του στάτη	407
B.2.5.2. Προσδιορισμός των επαγωγισιμάτων στους άξονες d, q μιας Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	412
B.2.5.3. Εξίσωση τάσεων και διανυσματικό διάγραμμα Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	415
B.2.5.4. Σύγχρονες επαγωγικές αντιστάσεις Σ.Μ. με έκτυπους πόλους ...	422
B.2.5.5. Ηλεκτρομαγνητική ροπή Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	424
B.2.5.6. Κρουστικό ρεύμα βραχυκυλώματος στις Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	426
B.2.5.7. Γεωμετρικός τόπος του ρεύματος \vec{I}_S μίας Σ.Μ. με έκτυπους πόλους	434
B.2.6. Ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις των σύγχρονων μηχανών	437
B.2.6.1. Στατική ροπή συγχρονισμού	437
B.2.6.2. Στατική ευστάθεια	438
B.2.6.3. Δυναμική ευστάθεια	439
B.2.6.4. Εξίσωση κίνησης του ζεύγους Σ.Μ. και κινητήριας μηχανής	441
B.2.6.5. Ελεύθερες ταλαντώσεις	445
B.2.6.6. Εξαναγκασμένες ταλαντώσεις Σ.Μ.	447
B.2.6.7. Ταλαντώσεις ισχύος	452

B.2.7. Εκκίνηση και παραλληλισμός Σ.Μ.	455
B.2.7.1. Ασύγχρονη εκκίνηση	455
B.2.7.2. Εκκίνηση με τη βοήθεια ενός κινητήρα	456
B.2.7.3. Εκκίνηση με μεταβλητή συχνότητα	456
B.2.7.4. Συγχρονισμός με το δίκτυο	456
B.2.8. Χαρακτηριστικά κατασκευαστικά στοιχεία	458

Κεφάλαιο Β.3. Μονοφασικές Μηχανές

B.3.1. Μονοφασική σύγχρονη μηχανή	463
B.3.2. Μονοφασική ασύγχρονη μηχανή	465
B.3.2.1. Αρχές λειτουργίας	465
B.3.2.2. Εκκίνηση μονοφασικών ασύγχρονων κινητήρων	469
B.3.2.3. Μονοφασικοί κινητήρες με πυκνωτές	472

Βιβλιογραφία Ηλεκτρικών Μηχανών Μέρους Β	475
--	-----

Ασκήσεις: Ηλεκτρικές Μηχανές - Μέρος Β

A. Προβλήματα προς λύση	483
B. Υποδειγματικές λύσεις	491

Ευρετήριο όρων	505
----------------------------	-----