

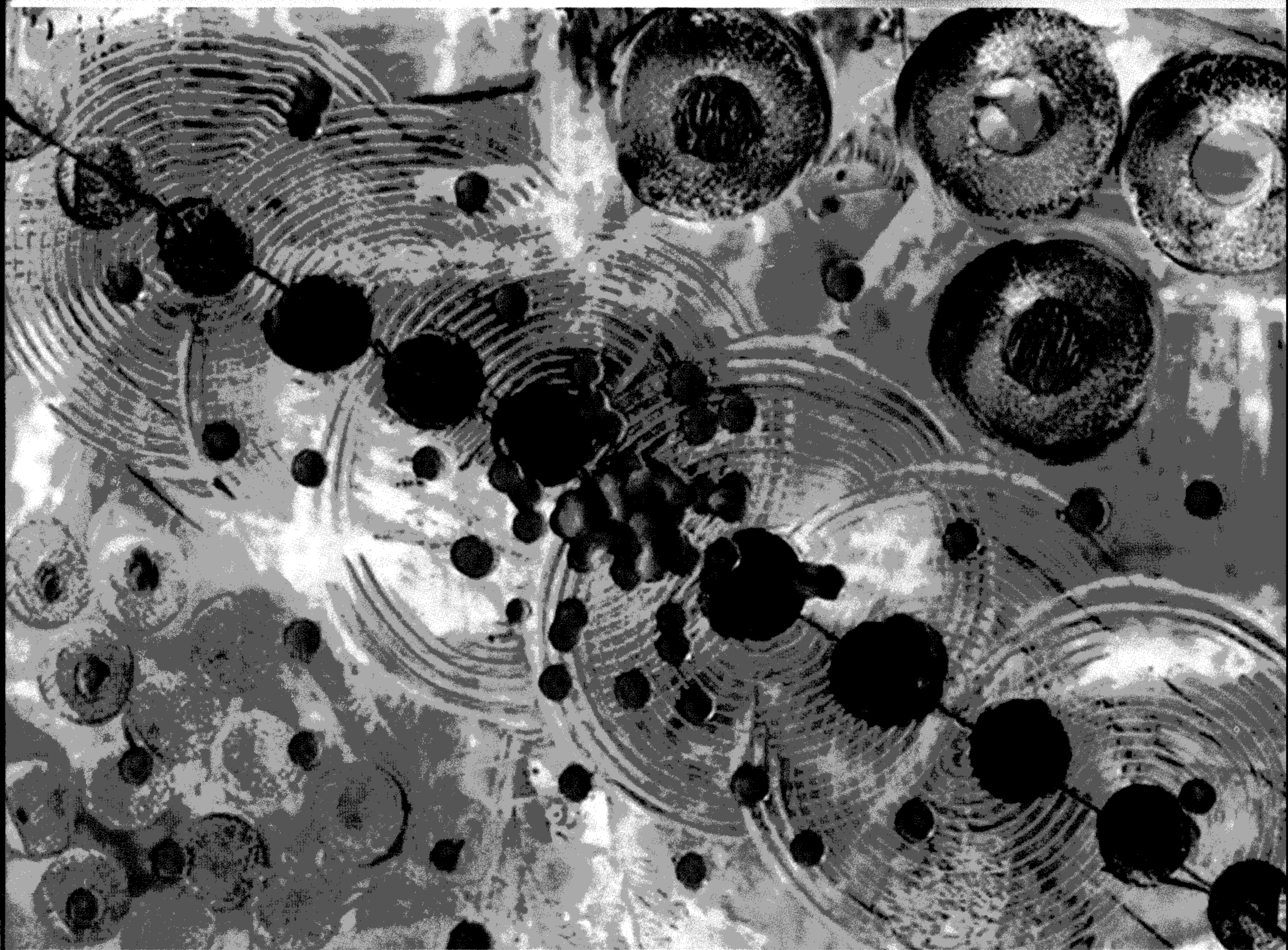
Στυλιανός Φραγκόπουλος

Ευάγγελος Βαλαμόντες

Βασική Ηλεκτροτεχνία II
5^η έκδοση

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Από το νόμο του Coulomb στις εξισώσεις Maxwell



ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Στ. Φραγκόπουλου-Ε. Βαλαμόντε:
Βασική Ηλεκτροτεχνία ΙΙ
Ηλεκτρομαγνητισμός
Από το νόμο του Coulomb
στις εξισώσεις Maxwell
5^η έκδοση, 2005

Η σχεδίαση του εξωφύλλου αυτού του βιβλίου στηρίχθηκε σε έργο με εγκαυστική ζωγραφική της Μαθηματικού Δρ. **Gudrun Ploetz**. Άλλα έργα της κ. Ploetz βρίσκονται στο Internet στη διεύθυνση:

<http://sfr.ee.teiath.gr/gpl.htm>

621.3
ΦΡΑ

ΔΩΡΕΑ

Στυλιανός Γ. Φραγκόπουλος

Διδάκτωρ Μηχανικός
Καθηγητής ΤΕΙ Αθήνας

Ευάγγελος Σ. Βαλαμόντες

Διδάκτωρ Φυσικός
Αναπλ. Καθηγητής ΤΕΙ Αθήνας

Τ.Ε.Ι. ΑΘΗΝΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
Αρ. εισ. 80348

ΒΑΣΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ ΙΙ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

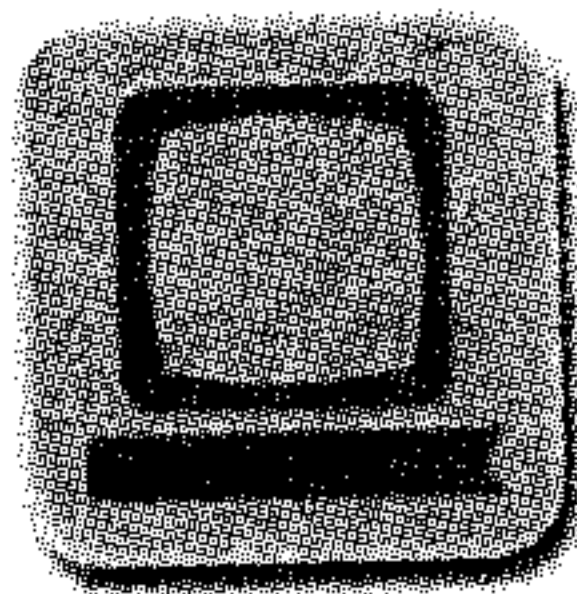
Από το νόμο του Coulomb στις εξισώσεις Maxwell

5η ΕΚΔΟΣΗ

ΑΘΗΝΑ

Κάθε γνήσιο αντίγραφο έχει την υπογραφή ενός εκ των συγγραφέων.

Έκδοση 5^η, Copyright © 2005
ISBN 960-8105-82-X



ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
Στουρνάρη 49Α, 106 82 Αθήνα
Τηλ.: 210.3845594 - Fax: 210.3808009
<http://www.newtech-publications.gr>
[email:contact@newtech-publications.gr](mailto:contact@newtech-publications.gr)

Ηλεκτρονική σελιδοποίηση - Σχεδίαση εξωφύλλου
Σκούφος Γιώργος

Απαγορεύεται η με οποιονδήποτε τρόπο ανατύπωση, καταχώρηση σε σύστημα αποθήκευσης και επανάκτησης ή μετάδοση με κάθε μορφή και μέσο (ηλεκτρονικό, μηχανικό, φωτοαντιγραφικό κ.τ.λ.) του συνόλου ή μέρους του βιβλίου αυτού, χωρίς την έγγραφη άδεια του εκδότη.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	13
ΚΕΦ. 1: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ Ι	15
1.1 Το Ηλεκτροστατικό Πεδίο (ΗΣΠ)	19
1.1.1 Ο νόμος του Coulomb	19
1.1.2 Τα διανυσματικά μεγέθη του ΗΣΠ	23
1.1.3 Η επιτρεπτότητα	28
1.1.4 Παράσταση του ΗΣΠ, πεδιακές γραμμές	31
1.2 Ολοκληρωτικά μεγέθη του ΗΣΠ	35
1.2.1 Η ηλεκτρική ροή	36
1.2.2 Ο νόμος του Gauss και το πηγαίο του ΗΣΠ	41
1.2.3 Τάση και ηλεκτρικό δυναμικό	43
1.2.4 Το αστρόβιλο του ΗΣΠ και η μονοσημαντότητα της τάσης	48
1.2.5 Το ΗΣΠ σε υλικά και σε διαχωριστικές επιφάνειες	52
1.3 Χωρητικότητα, πυκνωτής	64
1.3.1 Ο συντελεστής χωρητικότητας	64
1.3.2 Συνολική παράθεση εξισώσεων	68
1.3.3 Ο πυκνωτής ως στοιχείο του κυκλώματος	69
1.3.4 Τεχνικά στοιχεία πυκνωτών	74
1.3.5 Διάσπαση στο ΗΣΠ	77
1.4 Ενέργεια και δυνάμεις στο ΗΣΠ	78
1.4.1 Μεταβολές ενέργειας και τάσης στον πυκνωτή ..	78
1.4.2 Η ενέργεια στο ΗΣΠ με πεδιακά μεγέθη	86
1.4.3 Δυνάμεις στο ΗΣΠ	96
1.4.4 Μηχανικές τάσεις σε οριακές επιφάνειες	102
1.5 Λυμένα Προβλήματα 1ου Κεφαλαίου	112
1.6 Άλυτα Προβλήματα 1ου Κεφαλαίου	137

ΚΕΦ. 2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΙΙ	141
2.1 Το Στάσιμο Ηλεκτρικό Πεδίο (ΣΗΠ)	143
2.1.1 Πεδιακά μεγέθη του ΣΗΠ	144
2.1.2 Η αγωγιμότητα	147
2.2 Ολοκληρωτικά μεγέθη του ΣΗΠ	151
2.2.1 Τάση και ένταση	151
2.2.2 Ωμική αντίσταση	155
2.2.3 Σχέση χωρητικότητας με την αντίσταση	165
2.3 Σχέσεις και ιδιότητες στο ΣΗΠ	173
2.3.1 Τα πεδιακά μεγέθη του ΣΗΠ σε οριακές επιφάνειες	173
2.3.2 Οι νόμοι του Kirchhoff	173
2.3.3 Ισχύς και ενέργεια στο ΣΗΠ	177
2.4 Αγωγιμότητα	181
2.4.1 Το μοντέλο ενεργειακών ζωνών	181
2.4.2 Υπεραγωγιμότητα	184
2.4.3 Ηλεκτροχημικές διεργασίες	186
2.5 Προβλήματα 2ου Κεφαλαίου	189
ΚΕΦ. 3: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ Ι	191
3.1 Περιγραφή του Μαγνητικού Πεδίου (ΜΠ)	193
3.1.1 Εξάσκηση δυνάμεων στο ΜΠ	194
3.1.2 Τα πεδιακά μεγέθη του ΜΠ	197
3.1.3 Η διαπερατότητα των υλικών	202
3.1.4 Παράσταση ΜΠ με πεδιακές γραμμές	206
3.1.5 Υπέρθωση και ο νόμος των Biot-Savart	211
3.2 Ολοκληρωτικά μεγέθη του ΜΠ	227
3.2.1 Μαγνητική τάση, ηλεκτρικό ρεύμα	228
3.2.2 Ο νόμος του διαρρέυματος (Ampere)	231
3.2.3 Η μαγνητική ροή	244

3.2.4 Ο νόμος του Gauss	250
3.2.5 Αυτεπαγωγή και αλληλεπαγωγή	252
3.3 Το ΜΠ σε υλικά σώματα	259
3.3.1 Το ΜΠ σε σιδηρομαγνητικά υλικά	260
3.3.2. Υστέρηση, μαλακά και σκληρά υλικά	264
3.3.3 Φεριτικά υλικά	274
3.3.4 Το ΜΠ σε διαχωριστικές επιφάνειες	274
3.4 Μαγνητικά κυκλώματα	284
3.4.1 Παραδοχές και απλοποιήσεις	285
3.4.2 Επίλυση γραμμικών μαγνητικών κυκλωμάτων	288
3.4.3 Αναλογία μαγνητικών & ηλεκτρικών κυκλωμάτων	293
3.4.4 Μη γραμμικά μαγνητικά κυκλώματα	303
3.4.5 Μόνιμοι μαγνήτες	310
3.5 Προβλήματα 3ου Κεφαλαίου	217
ΚΕΦ. 4: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ II	321
4.1 Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής	322
4.1.1 Επαγωγή σε κινούμενους αγωγούς	323
4.1.2 Επαγωγή λόγω μεταβολής του ΜΠ	334
4.1.3 Επαγωγή σε σύνθετους βρόχους	355
4.1.4 Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή σε γενικούς χώρους	259
4.2 Αυτεπαγωγή και αλληλεπαγωγή, πηνία.	363
4.2.1 Ο συντελεστής αυτεπαγωγής L	363
4.2.2 Το πηνίο ως στοιχείο του κυκλώματος	365
4.2.3 Ο συντελεστής αλληλεπαγωγής M	370
4.2.4 Συνδέσεις πηνίων	374
4.3 Ενέργεια και δυνάμεις στο ΜΠ	374
4.3.1 Μεταβολές ρεύματος και ενέργειας στο πηνίο	378

4.3.2	Η ενέργεια στο ΜΠ με πεδιακά μεγέθη	382
4.3.3	Δυνάμεις στο ΜΠ	389
4.3.4	Μηχανικές τάσεις σε οριακές επιφάνειες	399
4.4	Απώλειες υστερήσεως και δινορρευμάτων	409
4.4.1	Απώλειες υστερήσεως	410
4.4.2	Δημιουργία δινορρευμάτων	416
4.4.3	Υπολογισμός των δινορρευμάτων	417
4.5	Μετασχηματιστής (ΜΣ)	423
4.5.1	Κυκλώματα με αλληλεπαγωγή	425
4.5.2	Ιδανικός μετασχηματιστής	437
4.5.2.1	<i>Εξιδανικεύσεις</i>	<i>438</i>
4.5.2.2	<i>Ιδανικός ΜΣ χωρίς φορτίο</i>	<i>439</i>
4.5.2.3	<i>Ιδανικός ΜΣ με φορτίο</i>	<i>441</i>
4.5.3	Τέλειος μετασχηματιστής	443
4.5.4	Μετασχηματιστής με σκέδαση	447
4.5.4.1	<i>Σκέδαση</i>	<i>447</i>
4.5.4.2	<i>Παραλλαγές του ισοδύναμου κυκλώματος</i>	<i>451</i>
4.5.4.3	<i>Συμπεριφορά του ΜΣ με σκέδαση</i>	<i>454</i>
4.5.5	Μετασχηματιστής με απώλειες χαλκού	457
4.5.5.1	<i>Οι απώλειες ισχύος στα πηνία</i>	<i>457</i>
4.5.5.2	<i>Τηλεπικοινωνιακοί ΜΣ</i>	<i>459</i>
4.5.6	Πραγματικός μετασχηματιστής	464
4.5.6.1	<i>Ο σιδηροπυρήνας</i>	<i>464</i>
4.5.6.2	<i>Μετρήσεις στον πραγματικό ΜΣ</i>	<i>467</i>
4.5.6.3	<i>Δείκτες για τον πραγματικό ΜΣ</i>	<i>473</i>
4.6	Προβλήματα 4ου Κεφαλαίου	479
 ΚΕΦ. 5: ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ . . .		484
5.1	Από τους πρωτοπόρους στον Maxwell	486

5.2	Οι εξισώσεις της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας	489
5.2.1	Γενίκευση του νόμου του διαρρέυματος	489
5.2.2	Οι εξισώσεις Maxwell	491
5.2.3	Η διαφορική μορφή των εξισώσεων Maxwell	497
5.2.3.1	Διαφορική μορφή της πρώτης εξίσωσης Maxwell (γενικευμένος νόμος του Διαρρέυματος)	497
5.2.3.2	Διαφορική μορφή της δεύτερης εξίσωσης Maxwell (νόμος της Ηλεκτρομαγνητικής Επαγωγής)	500
5.2.3.3	Διαφορική μορφή της τέταρτης εξίσωσης Maxwell (νόμος του Gauss για το ΗΣΠ)	502
5.2.3.4	Διαφορική μορφή της τρίτης εξίσωσης Maxwell (νόμος του Gauss για το ΜΠ)	506
5.2.4	Η διατήρηση του φορτίου	506
5.2.5	Άλλες εξισώσεις και συνολική παρουσίαση	507
5.3	Εισαγωγή στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα	509
ΚΕΦ. 6:	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ	517
6.1	Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια	518
6.1.1	Αρχή διατηρήσεως της ενέργειας	519
6.1.2	Το διάνυσμα Poynting	520
6.1.3	Θεώρημα της ελάχιστης ενέργειας	525
6.2	Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις	529
6.2.1	Αρχή απειροστών μετατοπίσεων	529
6.2.2	Ηλεκτρομαγνητική ορμή	531
6.3	Λυμένα Προβλήματα του Κεφαλαίου	533
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1:	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΒΟΗΘΗΜΑΤΑ	539
Π1.1	Πεδία, Συστήματα συντεταγμένων	541

Πρόλογος

Ο παρών τόμος είναι ο δεύτερος στη σειρά της **Βασικής Ηλεκτροτεχνίας** και καλύπτει τα θέματα του Ηλεκτρομαγνητισμού και συγκεκριμένα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στις διάφορες μορφές του που ενδιαφέρουν τους Τεχνικούς. Αυτό το αντικείμενο έχει μία ιδιομορφία: απαιτεί για την κατανόησή του μαθηματικές γνώσεις και συγκεκριμένα Διαφορικό και Ολοκληρωτικό Λογισμό, Διανυσματική Ανάλυση και ορισμένα άλλα θέματα της μαθηματικής επιστήμης. Έτσι, οι φοιτητές που επιθυμούν να κατανοήσουν τα θέματα του Ηλεκτρομαγνητισμού, πρέπει παράλληλα να μελετούν και τα αντίστοιχα θέματα των Μαθηματικών.

Η μεθοδολογία ανάπτυξης της Βασικής Ηλεκτροτεχνίας, θέματα της οποίας καλύπτει αυτό το βιβλίο, έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα πειραματικών διεργασιών, κυρίως όσα έχουν τεχνικό ενδιαφέρον, για να διατυπώσουμε τους διάφορους νόμους του Ηλεκτρομαγνητισμού. Με αφαίρεση προϋποθέσεων, όσον αφορά τη γεωμετρία και τα υλικά, παίρνουμε νόμους γενικότερης ισχύος, μέχρι που φθάνουμε στις εξισώσεις Maxwell. Αυτή η μέθοδος, από τα απλά στα σύνθετα, λέγεται *εμπειρική* ή *επαγωγική*. Η αντίστροφη μέθοδος, από τα σύνθετα στα απλά, η λεγόμενη *αξιωματική* ή *παραγωγική*, καλύπτεται από βιβλία της Θεωρητικής Ηλεκτρολογίας και παρουσιάζεται συνοπτικά στα κεφάλαια 5 και 6 αυτού του βιβλίου.

Από μεθοδολογικής και διδακτικής σκοπιάς έχει τεθεί και γι' αυτό το βιβλίο απ' την αρχή ο στόχος να μην καταλήξει σε φροντιστηριακό βοήθημα, με προορισμό την απομνημόνευση τύπων και λυμένων ασκήσεων. Αντίθετα, θεωρήθηκε απαραίτητο να συνοδεύονται κάθε νόμος, κάθε τύπος και κάθε μέθοδος από μια επαρκή εξήγηση για τη σημασία τους και το συσχετισμό τους με προηγούμενα θέματα και πορίσματα. Όλα αυτά βέβαια, εφόσον η εξήγηση δεν ξεφεύγει από την ευρύτερη περιοχή της Ηλεκτροτεχνίας και δεν απαιτεί μαθηματικές γνώσεις, τις οποίες δεν διαθέτουν ακόμα οι φοιτητές των πρώτων εξαμήνων.

Όλα τα συγγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη συγγραφή αυτού του τόμου, περιέχονται στο βιβλιογραφικό πίνακα και συνιστώνται στον αναγνώστη για συμπληρωματική μελέτη του Ηλεκτρομαγνητισμού. Τα σχήματα και διαγράμματα σ' αυτό το βιβλίο δημιουργήθηκαν από τους συγγραφείς, γι' αυτή την έκδοση ή προέρχονται από παλαιότερες εκδόσεις του βιβλίου.

Ελπίζουμε και με τη νέα αυτή έκδοση να υπάρξει συνδρομή των αναγνωστών, συναδέλφων εκπαιδευτικών και σπουδαστών, με διορθωτικές και βελτιωτικές παρατηρήσεις.

Αθήνα, Ιούνιος 2005

Σ.Φ. - Ε.Β.

Οι συγγραφείς:

Στ. Γ. Φραγκόπουλος: Γεννήθηκε στην Αθήνα. Σπούδασε Ηλεκτρολογία και Μαθηματικά στο Πολυτεχνείο Darmstadt/Δ.Γερμανία με ειδίκευση στη Θεωρητική Ηλεκτρολογία. Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος και Διδάκτωρ Μηχανικός, βοηθός και επιμελητής στο Πολυτεχνείο Darmstadt, επιμελητής και λέκτορας στο Ε.Μ. Πολυτεχνείο και από το 1984 μόνιμος καθηγητής στο ΤΕΙ Αθήνας. Διδάσκει θέματα *Βασικής Ηλεκτροτεχνίας, Εφαρμογές Πολυμέσων*, καθώς επίσης *Ιστορία της Τεχνικής και της Τεχνολογίας*. Έχει συγγράψει σχετικά βιβλία και έχει υλοποιήσει εκπαιδευτικές εφαρμογές με χρήση πολυμέσων (βλέπε σελίδες <http://sfr.ee.teiath.gr> στο Internet).

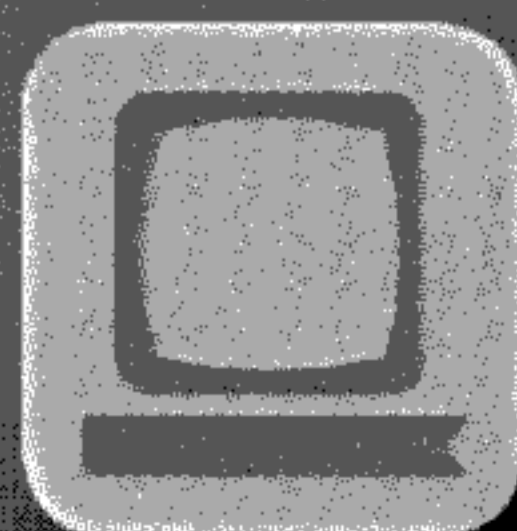
Ε. Σ. Βαλαμόντες: Γεννήθηκε στην Αθήνα. Σπούδασε Φυσική στο Πανεπιστήμιο Αθήνας. Πραγματοποίησε μεταπτυχιακές σπουδές (M.Sc.) στην Φυσική Στερεάς Κατάστασης και Διδακτορικό (Ph.D) στην Μικροηλεκτρονική. Είναι αναπληρωτής καθηγητής στο Τμήμα Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθήνας και διδάσκει θέματα *Ψηφιακών Ηλεκτρονικών, Ηλεκτρομαγνητισμού και Εφαρμογών Μικροελεγκτών*. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα εστιάζονται στους τομείς: α) Ηλεκτρονική Μικροσκοπία και Μικροανάλυση, β) Μικροσκοπία STM / AFM, γ) Κατασκευή νανοδομών με λιθογραφία και εγχάραξη σε πλάσμα, δ) Υλικά και διατάξεις για αισθητήρες.

Ο παρών τόμος είναι ο δεύτερος στη σειρά της Βασικής Ηλεκτροτεχνίας και καλύπτει τα θέματα του **Ηλεκτρομαγνητισμού**, συγκεκριμένα το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στις διάφορες μορφές του που ενδιαφέρουν τους Τεχνικούς.

Βασικός στόχος αυτού του βιβλίου είναι να εξασφαλιστεί μία τεκμηριωμένη εισαγωγή στον Ηλεκτρομαγνητισμό σε πανεπιστημιακό επίπεδο, με ταυτόχρονη ανάπτυξη της φυσικής διαίσθησης του φοιτητή και της ικανότητας του για επίλυση τεχνικών προβλημάτων.

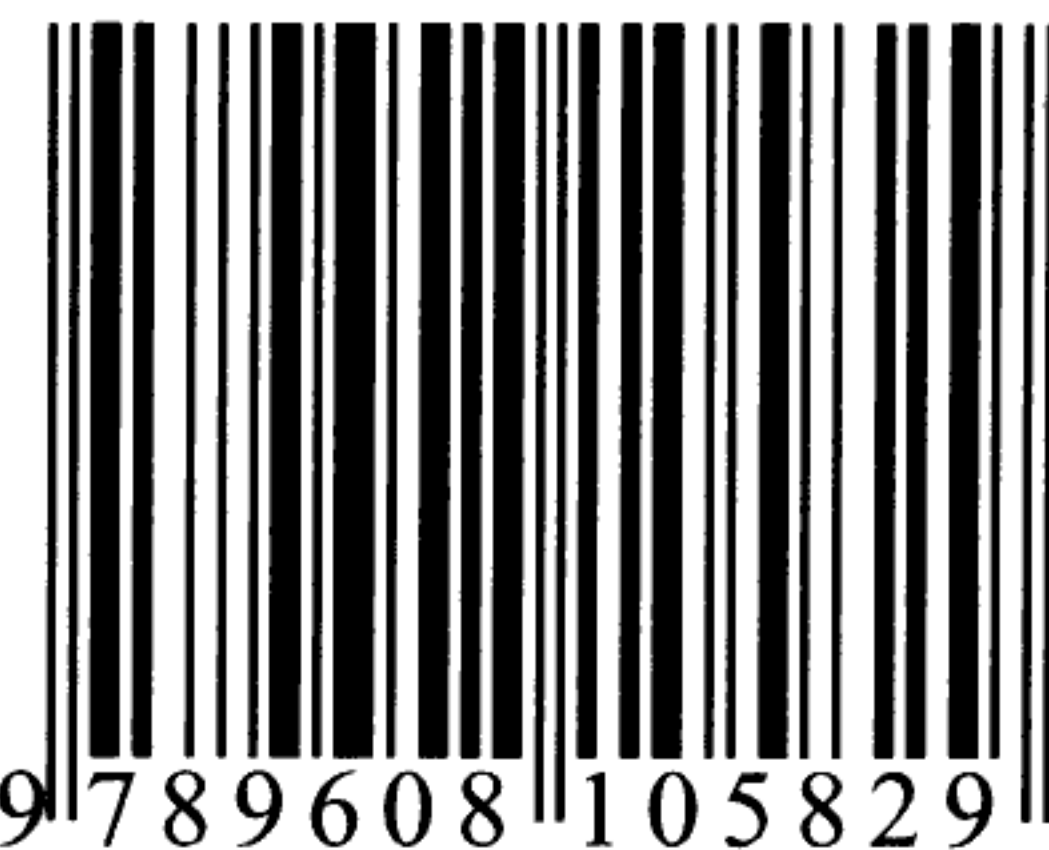
Η ύλη που περιέχεται στο παρόν βιβλίο καλύπτει τα παρακάτω επιμέρους αντικείμενα:

- Ηλεκτρικό Πεδίο.
- Μαγνητικό Πεδίο.
- Αρχές της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας.
- Ηλεκτρομαγνητική Ενέργεια και Δυνάμεις.
- Μαθηματικό Παράρτημα.



**ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΝΕΩΝ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ**

ISBN 960-8105-82-X



9 789608 105829