

Βασικές γνώσεις

Μία ανασκόπηση στους μετασχηματιστές

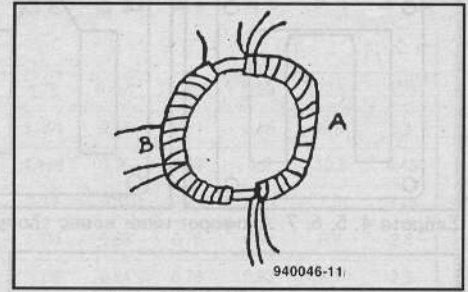
Η ανάπτυξη των μετασχηματιστών είναι στενά συνδεδεμένη με την ιστορία του εναλλασσομένου ρεύματος. Ολα ξεκίνησαν το 1820, όταν ο Δανός Hans Christian Oersted ανακάλυψε ότι όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Δέκα χρόνια αργότερα, ο Αμερικανός Φυσικός Joseph Henry, ανακάλυψε την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, την 'μετατροπή ηλεκτρισμού σε μαγνητισμό'. Προς το τέλος του 1831 ο Michael Faraday πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων με μια συσκευή η οποία αποτελείτο από ένα σιδερένιο δακτύλιο στον οποίο είχε τυλιχτεί δυο διαφορετικά σπειρώματα μονωμένου χαλκού (δείτε Σχ. 1). Συνέδεσε τους πόλους μιας μπαταρίας στο ένα σπείρωμα και περίμενε ότι θα εμφανιστεί συνεχές ρεύμα και στο άλλο. Προς μεγάλη του όμως έκπληξη, παρά τις εκατοντάδες πειράματα που έκανε, το γαλβανόμετρο που ήταν συνδεδεμένο στο δεύτερο σπείρωμα έδινε ένδειξη ροής ρεύματος μόνον την ώρα που συνέδεε ή αποσύνδεε την μπαταρία στο πρώτο σπείρωμα. Μόνον μετά το 1832, όταν ο Γάλλος κατασκευαστής οργάνων Pixii κατασκεύασε μια χειροκίνητη συσκευή παραγωγής εναλλασσομένου ρεύματος (εναλλάκτη), οι μετασχηματιστές μπήκαν στον δρόμο της μελέτης και της ανάπτυξης. Οι πρώτοι ερευνητές, εφαρμόζοντας εναλλασσόμενο ρεύμα κατά μήκος ενός αγωγού και μετρώντας την αναπτυσσόμενη τάση και το ρεύμα, ανακάλυψαν ότι η ηλεκτρική αντίσταση ενός πηνίου αλλάζει όταν εισάγεται στο εσωτερικό του μια σιδερένια ράβδος. Η ηλεκτρική αυτή αντίσταση αύξανε ακόμη περισσότερο όταν το σχήμα του εισαγόμενου σιδήρου ήταν κλειστός βρόγχος. Σημαντική επίσης επίδραση είχε και το είδος του χρησιμοποιούμενου σιδήρου, όπου τα αποτελέσματα ήταν περισσότερο εμφανές με χρήση μαλακού σιδήρου (π.χ. σίδηρος με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ο οποίος παρουσιάζει χαμηλή μόνιμη μαγνητισή). Στην συνέχεια παρατηρήθηκε ότι εάν γύρω από το σίδηρο τυλιγόταν και δεύτερο σπείρωμα μονωμένο από το πρώτο, η εφαρμογή εναλλασσομένου ρεύματος στο πρώτο σπείρωμα προκαλούσε την εμφάνιση εναλλασσομένου και στο δεύτερο, και μάλιστα εάν το δεύτερο σπείρωμα είχε περισσότερες από το πρώτο σπείρες, η αναπτυσσόμενη εναλλασσόμενη τάση ήταν ακόμη μεγαλύτερη.

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή.

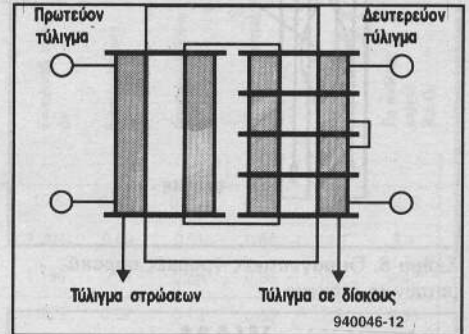
Η εισαγωγή σιδερένιου πυρήνα βελτιώνει την λειτουργία του μετασχηματιστή από δύο σκοπιές. Πρώτον, αυξάνει την συνολική ηλεκτρική αντίσταση του σπειρώματος: Το ρεύμα σε ένα σπείρωμα όπου ο πυρήνας είναι ο αέρας αυξάνει με την εφαρμογή εναλλασσομένου ρεύματος, με τετραπλάσια περίπου ταχύτητα σε σχέση με σπείρωμα στο εσωτερικό του οποίου υπάρχει πυρήνας σιδήρου. Δεύτερον, ο σίδηρος περιέχει πολλούς μικρούς μαγνήτες οι οποίοι σε κατάσταση ηρεμίας είναι έτσι τοποθετημένοι ώστε να αναιρούν ο ένας το πεδίο του άλλου. Παρουσιάζουν όμως ελευθερία κίνησης και είναι δυνατόν με την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου να προσανατολιστούν στην κατεύθυνση του πεδίου και να το ενισχύσουν. Η ενίσχυση αυτή έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερο συντελεστή αυτεπαγωγής.

Δινορεύματα

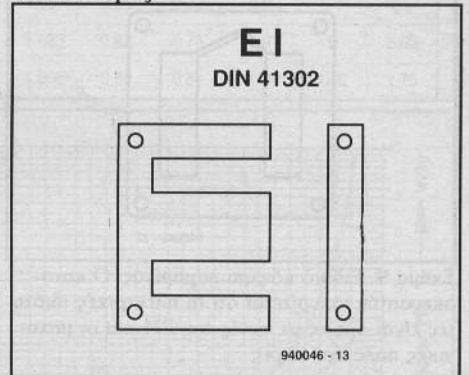
Ο σιδερένιος πυρήνας του μετασχηματιστή είναι στην ουσία ένας ηλεκτρικός αγωγός. Η εξωτερική περιφέρεια του πυρήνα σχηματίζει ένα κλειστό βρόγχο και συμπεριφέρεται ακριβώς όπως μια σπείρα του τυλίγματος. Αυτό σημαίνει με απλά λόγια ότι επάγεται τάση πάνω στον πυρήνα, και κατά συνέπεια υπάρχει και ροή ρεύματος μέσα σε αυτόν. Το σύνολο του πυρήνα αποτελείται από πολλούς τέτοιους μικρούς βρόγχους, οι οποίοι διαρρέονται από αντίστοιχα μικρά ρεύματα, τα οποία καλούνται δινορεύματα. Είναι προ-



Σχήμα 1: Από την εργασία του Faraday. Σχήμα κάποιας κατασκευής η οποία από τον Pixii κατέληξε σε μετασχηματιστή.



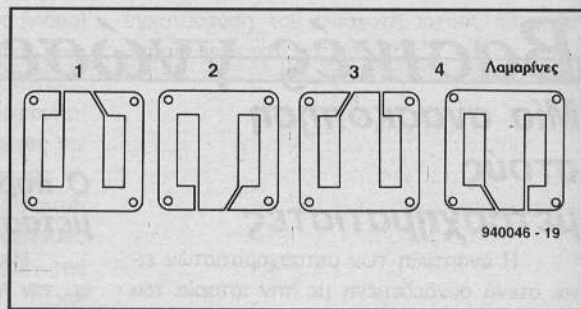
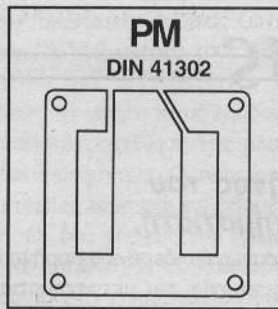
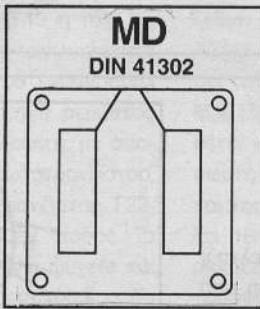
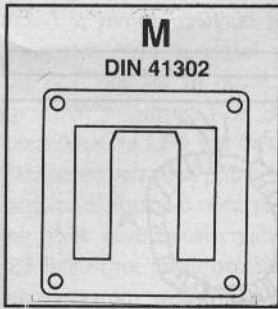
Σχήμα 2. Για μεγάλες τάσεις το τυλίγμα χωρίζεται σε τομείς.



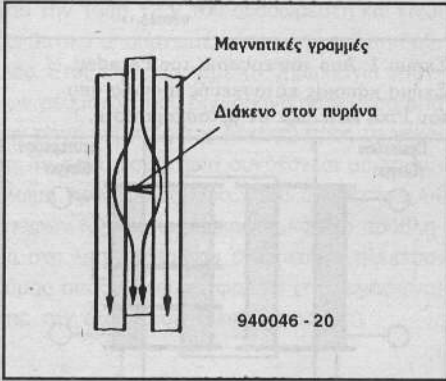
Σχήμα 3. Κατά την κοπή του ΕΙ δεν έχουμε υπόλοιπα λαμαρίνας

Μόνωση	Διάμετρος σύρματος σε χιλ.				
		0.1	0.5	1	5
Βερνίκι	απλό	0.011	0.028	0.040	0.060
	διπλό	0.021	0.045	0.065	0.100
Ναΐλον	απλό	0.05	0.06	0.07	
	διπλό	0.09	0.11	0.12	
Βαμβάκι	απλό		0.10	0.12	
	διπλό		0.16	0.22	0.40
Χαρτί	απλό		0.12	0.12	0.20
	διπλό		0.22	0.22	0.35

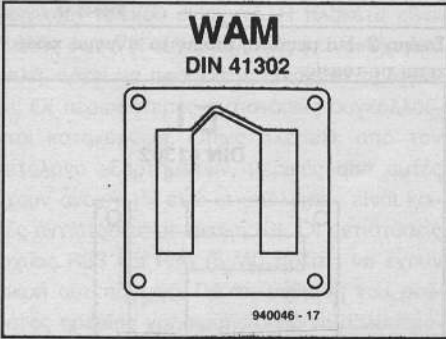
Πίνακας 1. Το πάχος διαφόρων μονωτικών σε συνάρτηση με τις διαμέτρους του σύρματος



Σχήματα 4, 5, 6, 7. Διάφοροι τύποι κοπής ελασμάτων για πυρήνες μετασχηματιστών.

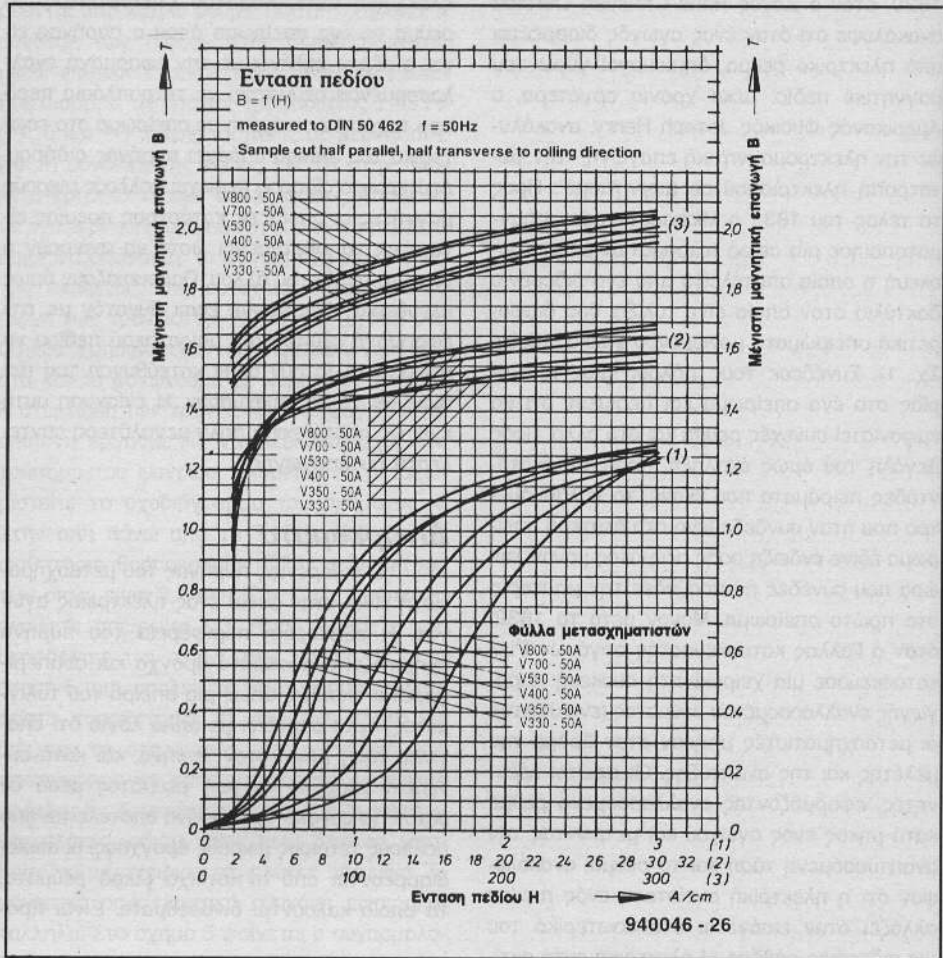


Σχήμα 8. Οι μαγνητικές γραμμές παρακάμπτον το διάκενο



Σχήμα 9. Ειδικό κόψιμο λαμαρίνας. Ο κατασκευαστής ισχυρίζεται ότι οι ηλεκτρικές ιδιότητες είναι ομοίες με αυτές του PM και οι μηχανικές πολύ καλύτερες

φανές ότι τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες ισχύος, και η αναγνώρισή τους είναι άμεση από την θερμότητα η οποία αναπτύσσεται σε ένα μετασχηματιστή την ώρα που δουλεύει. Οι απώλειες αυτές μπορούν να περιοριστούν με χρήση πυρήνων οι οποίοι δεν αποτελούνται από συμπαγή πυρήνα αλλά από διαδοχικά λεπτά ελάσματα, φύλλα σιδήρου, τα οποία είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους. Η συνολική ηλεκτρική αντίσταση των ελασμάτων μπορεί να αυξηθεί εάν τα ελάσματα αυτά δεν είναι καθαρός σίδηρος αλλά περιέχει και προσμίξεις πυριτίου. Η μόνωση μεταξύ των ελασμάτων αποτελείται από ένα απλής επίστρωσης κάλυμμα βερνικιού πάχους 6-10 μm, από ένα διπλής επίστρωσης κάλυμμα φωσφορικού άλατος πάχους 2-3 μm και από ένα κάλυμμα οξειδίου πάχους 2-3 μm. Ο τελικός συντελεστής χώρου, δηλαδή ο λόγος της ενεργούς προς την συνολική διατομή, κυμαίνεται από 0,75 (πάχος ελάσματος 0.05



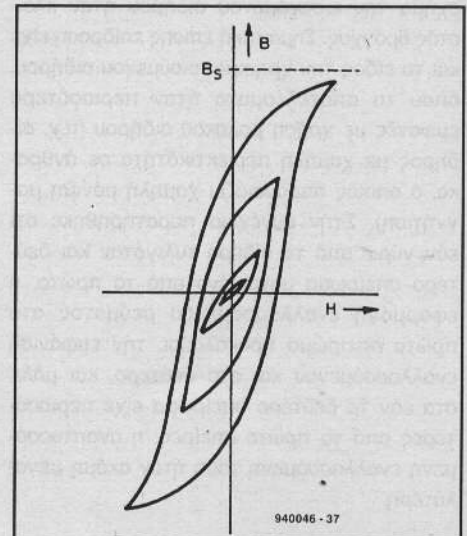
Σχήμα 10. Χαρακτηριστικές μαγνήτισης. Στο διάγραμμα έχουμε τρεις διαφορετικές περιοχές.

mm) έως 0.92 (πάχος ελάσματος 0.5 mm). Η διάμετρος μερικών συχνά χρησιμοποιούμενων συρμάτων περιέλεξων δίνεται στον πίνακα 1.

Κόρεσμός

Όσο το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον σπείρωμα αυξάνει, αυξάνει και η ένταση του δημιουργούμενου πεδίου καθώς και η μαγνήτιση του πυρήνα. Υπάρχει παρ' όλα αυτά κάποιο όριο στην αναλογική με το μέγεθος του ρεύματος, αύξηση της μαγνήτισης. Όταν φτάσουμε σε αυτό το όριο λέμε ότι ο πυρήνας έχει φτάσει στον κορεσμό και το πρωτήν

Σχήμα 11. Χαρακτηριστικές υστέρησης, για διαφορετικές εντάσεις, σε μετασχηματιστές με σιδηροπυρήνα.



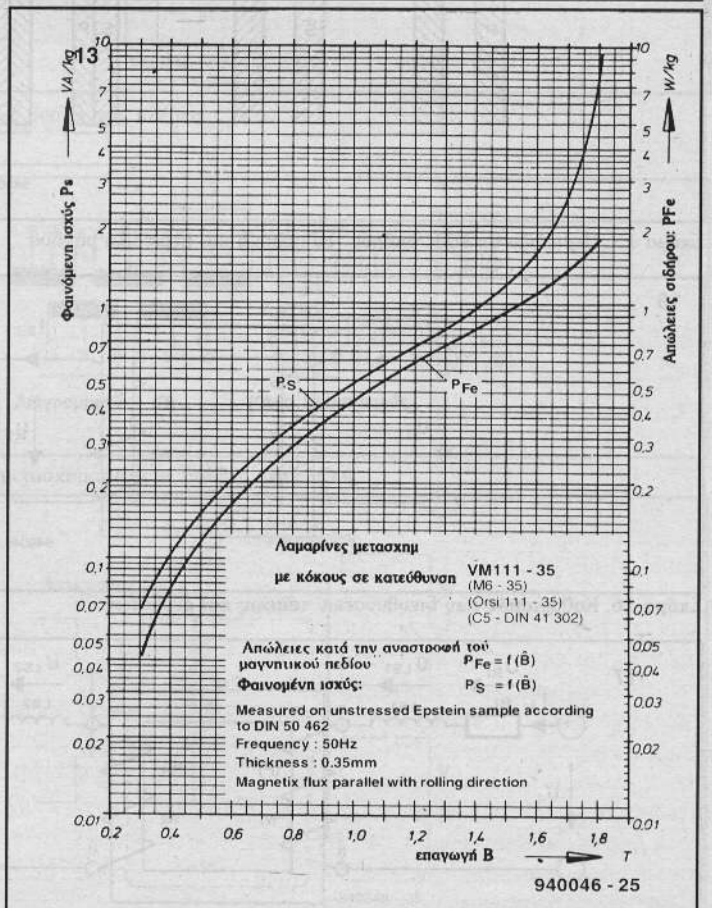
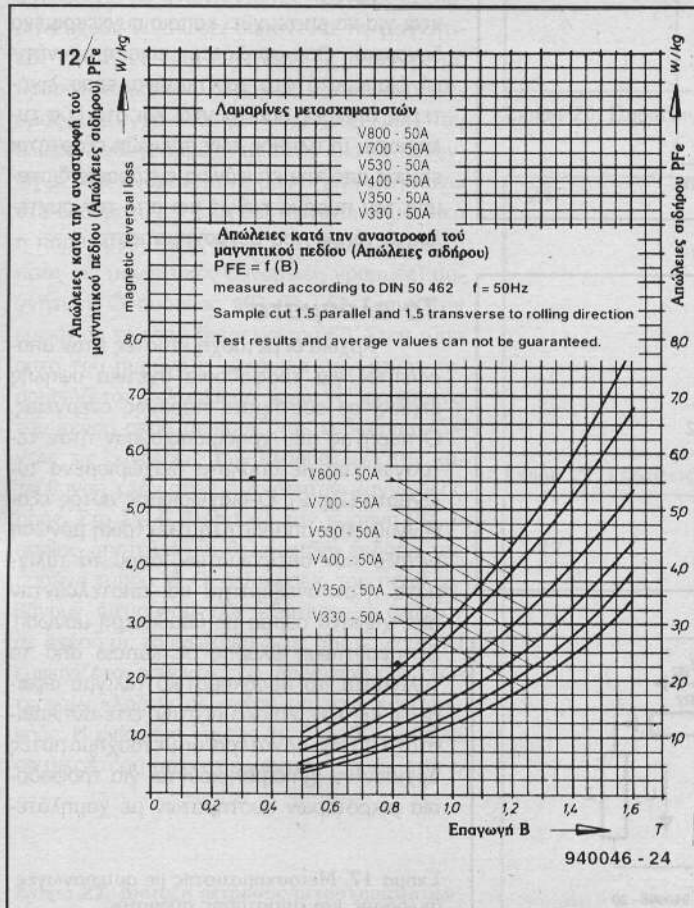
Πίνακας 2. Ηλεκτρικά χαρακτηρι-
στικά για πυρίνες M και EI.
[Λαμαρίνα τύπος V170-A50 κατά
DIN 41302. Μέρος 2 ($\eta = 0,94$)]

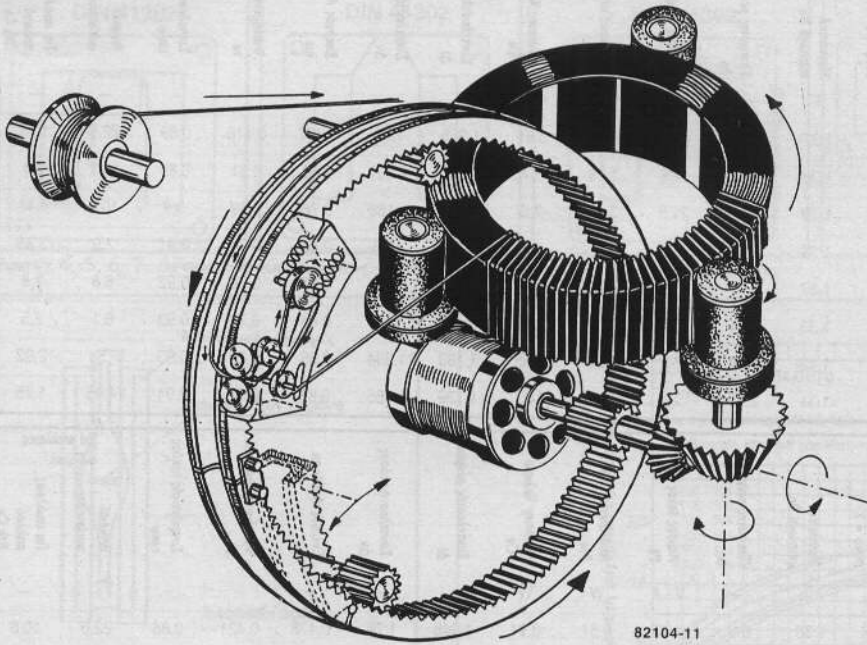
Type & size	Ισχύς διατεταμένου συνφ = 1 W	Μαγνητική επαγωγή Bn T	Πυκνότητα ρεύματος Sn —	Αερίος Ισχύς Pb V · A	Απώλειες σιδήρου PFe W	Απώλειες Χαλκού PCu W	Συντελεστής ρεύματος Δι —	Συντελεστής τάσης Δv —	Ενεργός Απόδοση ηω —	Φαινόμενη απόδοση ηφ —	Συντελεστής ισχύος cosφ —	Θερμική αντίσταση —	Για απώλειες σιδήρου PFe W	Για απώλειες χαλκού PCu W
M 42	3.94	1.37	6.7	4.31	0.68	3.81	1.365	1.76	0.467	0.416	0.89	22,6	10,8	
M 55	15.8	1.38	4.97	11.6	1.78	5.7	1.267	1.301	0.68	0.61	0.89	14,1	6,4	
M 65	34.1	1.39	4.1	21.5	3.25	7.6	1.228	1.188	0.76	0.69	0,9	10,2	4,45	
M 74	62	1.39	3.51	34.5	5.2	9.3	1.198	1.13	0.81	0.74	0,91	7,9	3,35	
M 85	a	82	1.37	3,47	43.2	6.9	1.189	1,111	0.83	0.76	0,92	6,8	2,8	
	b	108	1.33	3,31	51	9.1	1,17	1,09	0.84	0.78	0,93	6,1	2,5	
M 102	a	143	1.42	2,94	67	10.8	1,163	1,084	0.85	0.79	0,93	5	2,02	
	b	198	1.31	2,76	79	14.6	1,139	1,065	0.87	0.82	0,94	4,45	1,75	

Σχήμα 12. Απώλειες σιδήρου δια-
φόρων ειδών λαμαρίνας σε σχέση
με την μαγνητική επαγωγή. (Απώ-
λειες προερχόμενες απο την αλλα-
γή του ηλεκτρικού πεδίου).

Type & size	Ισχύς διατεταμένου συνφ = 1 W	Μαγνητική επαγωγή Bn T	Πυκνότητα ρεύματος Sn —	Αερίος Ισχύς Pb V · A	Απώλειες σιδήρου PFe W	Απώλειες Χαλκού PCu W	Συντελεστής ρεύματος Δι —	Συντελεστής τάσης Δv —	Ενεργός Απόδοση ηω —	Φαινόμενη απόδοση ηφ —	Συντελεστής ισχύος cosφ —	Θερμική αντίσταση —	Για απώλειες σιδήρου PFe W	Για απώλειες χαλκού PCu W
M 42	4.05	1.38	6.8	4.53	0.51	3.91	1.348	1.76	0.478	0.421	0.88	22,6	10,8	
M 55	16.4	1.4	5.1	12.7	1.36	6	1.262	1.301	0.69	0.61	0.88	14,1	6,4	
M 65	35.7	1.42	4.21	24.4	2.5	8	1.231	1.188	0.77	0.68	0.88	10,2	4,45	
M 74	65	1.43	3.62	40.8	4.06	9.9	1.208	1.129	0.82	0.73	0.89	7,9	3,35	
M 85	a	87	1.41	3.6	53	5.5	1.204	1.109	0.84	0.75	0.89	6,8	2,8	
	b	116	1.39	3.44	66	7.5	1.193	1.087	0.86	0.77	0,9	6,1	2,5	
M 102	a	154	1.42	3.05	86	8.7	1.184	1.083	0.87	0.78	0,9	5	2,02	
	b	215	1.39	2.87	111	12.4	1.169	1.062	0.89	0.81	0,91	4,45	1,75	

Σχήμα 13. Λαμαρίνα με κόκους
σε μια κατεύθυνση. Οι απώλειες
είναι πολύ λιγότερες.

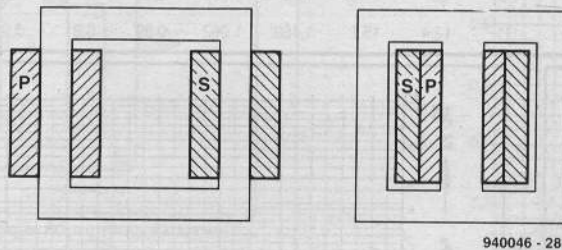




Σχήμα 14. Μηχανή περέλιξης δακτυλοειδών πυρήνων

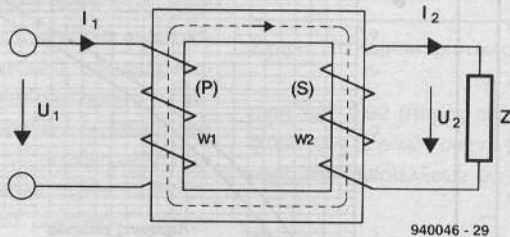
(ασθενές) πεδίο γύρω από τον μετασχηματιστή αυξάνει. Το διαχεόμενο αυτό πεδίο μπορεί στην συνέχεια να δημιουργήσει παρεμβολές σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, ενώ ελαττώνεται και η ίδια η μεταφορά ενέργειας από από το πρωτεύον προς το δευτερεύον τύλιγμα, μιας και οι δυναμικές γραμμές του δημιουργούμενου από το πρωτεύον μαγνητικού πεδίου δεν διέρχονται πλέον όλες από το δευτερεύον. Τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από το διαχεόμενο πεδίο είναι ιδιαίτερα ενοχλητικά όταν το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα βρίσκονται σχετικά μακριά το ένα από το άλλο, όπως στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πυρήνας U1. Στην περίπτωση που τα τυλίγματα βρίσκονται γειτονικά και στο ίδιο σκέλος του πυρήνα, τα προβλήματα ελαττώνονται, και τέλος ελαχιστοποιούνται όταν τα δύο τυλίγματα βρίσκονται το ένα πάνω από το άλλο, όπως συνήθως συμβαίνει στους περισσότερους μετασχηματιστές. Δυο είναι τα χαρακτηριστικά του πυρήνα που έχουν ιδιαίτερη σημασία κατά τον υπολογισμό και την σχεδίαση ενός μετασχηματιστή. Το πρώτο είναι ο βαθμός στον οποίο μπορεί να μαγνητιστεί ο πυρήνας πριν παρουσιάσει φαινόμενα κορεσμού, και το δεύτερο η μαγνητική του διαπερατότητα, ο βαθμός δηλαδή στον οποίο ενισχύει ένα εξωτερικό πεδίο. Τα μεγέθη αυτά καθορίζουν το πλήθος των σπειρωμάτων που απαιτούνται για να επιτευχθεί κάποιο συγκεκριμένο δυναμικό. Όσο υψηλότερη είναι η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα, τόσο λιγότερες σπείρες απαιτούνται και στα δύο τυλίγματα. Το πλήθος των σπειρών εξαρτάται επίσης από την επιφάνεια εγκάρσιας διατομής του πυρήνα καθώς και από τον συντελεστή τύπου του μετασχηματιστή.

15



Σχήμα 15. Περιέλιξη σε κάθε σκέλος του πυρήνα και περιέλιξη μανδύα

16



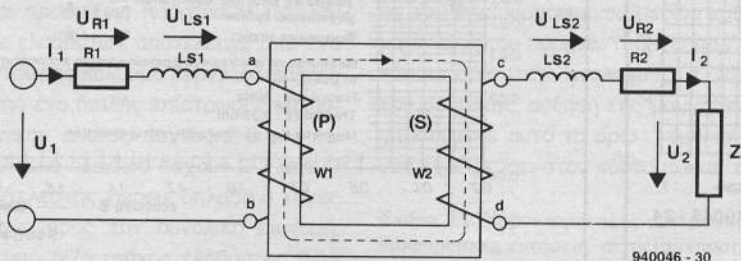
Σχήμα 16. Καθορισμός των διευθύνσεων τάσεων και ρευμάτων.

Τα ελάσματα

Αρχικά οι μετασχηματιστές ήταν απαραίτητοι για τροφοδοσία σχετικά υψηλής ισχύος, σε συστήματα παροχής ενέργειας. Ο πυρήνας που χρησιμοποιούσαν ήταν τετραγωνικός με απόλυτα διαχωρισμένα τυλίγματα (Σχ. 2). Ο διαχωρισμός αυτός εξασφάλιζε την απαραίτητη ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των σπειρωμάτων, όπου τα τυλίγματα ήταν ανεξάρτητα και αποτελούνταν από χάλκινο σύρμα με βαμβακερή μόνωση. Σε περίπτωση βλάβης σε κάποιο από τα τυλίγματα, το προβληματικό τύλιγμα αφαιρείτο και είτε επισκευαζόταν, είτε αντικαθίστατο. Όταν αργότερα οι μετασχηματιστές άρχισαν να χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία μικρότερων συστημάτων με χαμηλότε-

Σχήμα 17. Μετασχηματιστής με αυτεπαγωγές σκέδασης και αντίστασης σύρματος

17

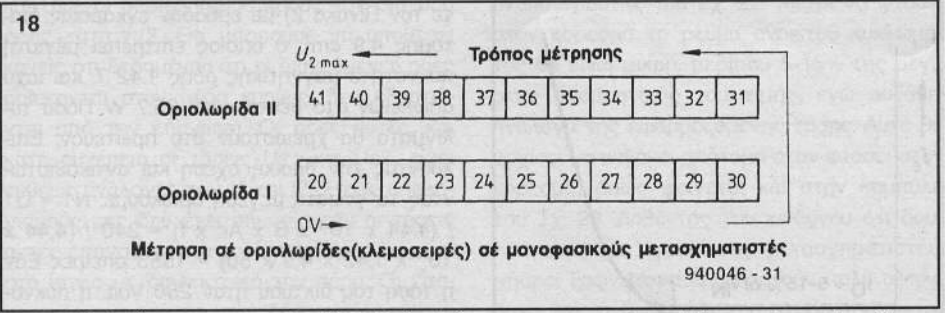


ρες απαιτήσεις ισχύος, η σχεδίαση τους τροποποιήθηκε και άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι ονομαζόμενοι "πυρήνες μανδύα" (Σχ.3). Οι πυρήνες αυτοί διακρίνονται σε υπο-κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα τους και κάποιοι από τους βασικότερους τύπους είναι οι EI, M και F. Ο τύπος EI προσφέρεται ιδιαίτερα για τύπους μετασχηματιστών που χρειάζονται ένα μικρό κενό αέρα (κάτω από 10 μm). Η τάση εξόδου τέτοιων μετασχηματιστών είναι εξαρτώμενη του φορτίου, γεγονός που τους καθιστά πραγματικά ιδανικούς για φορτιστές μπαταριών όπου το ζητούμενο είναι η σταθερότητα του ρεύματος εξόδου. Ο τύπος αυτός των μετασχηματιστών χρησιμοποιείται επίσης σε ενισχυτές ήχου. Σε μια βαθμίδα εξόδου σε τάξη A δεν κυκλοφορεί μόνον εναλλασσόμενο αλλά και συνεχές ρεύμα. Το κενό αέρος δεν επιτρέπει στο συνεχές ρεύμα να προμαγνητίζει τον πυρήνα, πράγμα που θα οδηγούσε ενδεχομένως αργότερα τον πυρήνα σε κορεσμό όταν θα άρχιζαν να κυκλοφορούν ή να αυξάνουν τα εναλλασσόμενα ρεύματα. Οι μετασχηματιστές με πυρήνα τύπου M (Σχ. 4) χρησιμοποιούνται περισσότερο σε ειδικές εφαρμογές, όπου τα ισχυρά πεδία διάχυσης θεωρείται ότι δεν δημιουργούν κανένα πρόβλημα.

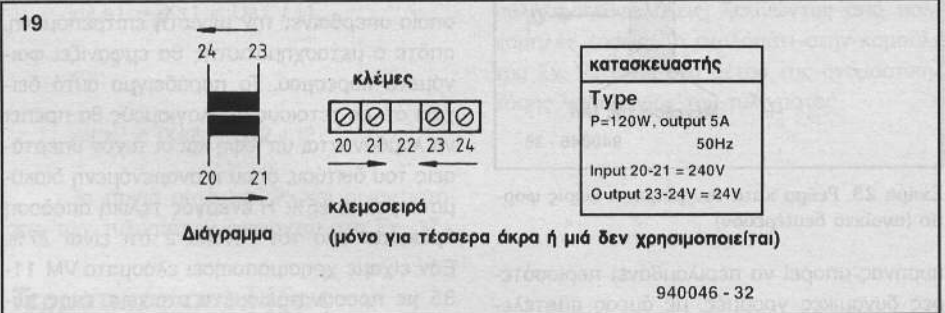
Βελτίωση της ισχύος

Ειδικά κράματα για τα ελάσματα σε συνδυασμό με αναπτυγμένες τεχνικές εξέλασης, έχουν βελτιώσει σημαντικά τις μαγνητικές ιδιότητες των πυρήνων. Σε πυρήνες με προσανατολισμένα στοιχεία, ο προσανατολισμός επιτυγχάνεται με ψυχρή εξέλαση του υλικού. Ευθυγραμμίζονται στην ίδια κατεύθυνση με την αναμενόμενη μαγνητική ροή πάνω στα ελάσματα και έτσι βελτιώνεται σημαντικά η παράλληλη - όχι όμως ή εγκάρσια (κάθετη προς τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές) μαγνήτιση. Ο πυρήνας MD (Σχ. 5), έκανε την εμφάνιση του την δεκαετία του 60. Στον τύπο αυτό του πυρήνα η εγκάρσια μαγνήτιση παρουσιάζεται βελτιωμένη, ενώ το φαινόμενο του κενού αέρα περιορίζεται, ευθυγραμμίζοντας τις συνδέσεις των ελασμάτων στην κατεύθυνση ελάχιστης πυκνότητας μαγνητικής ροής. Στο Σχ. 6 βλέπουμε τον πυρήνα PM, ο οποίος αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του πυρήνα τύπου M. Οι βελτιώσεις του περιλαμβάνουν διεύρυνση των εξωτερικών φύλλων σε σχέση με τα εσωτερικά, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ασθενέστερη μαγνήτιση των εξωτερικών κλάδων σε σχέση με τους εσωτερικούς. Η ενίσχυση επίσης των κλάδων οδηγεί σε μικρότερη μαγνητική αντίσταση και έτσι ο

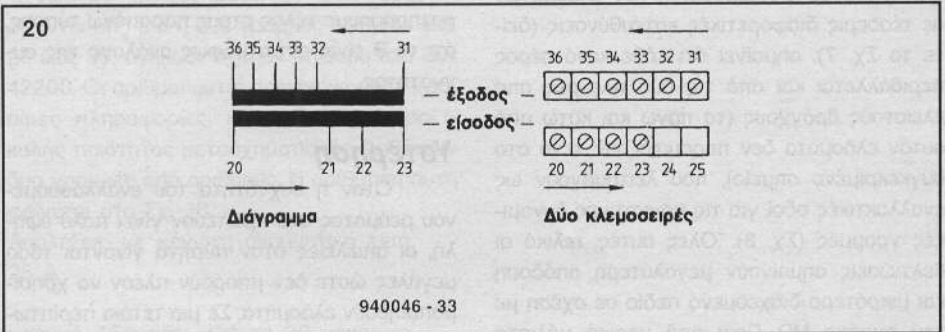
Σχήμα 22. Διάταξη μέτρησης μετασχηματιστών



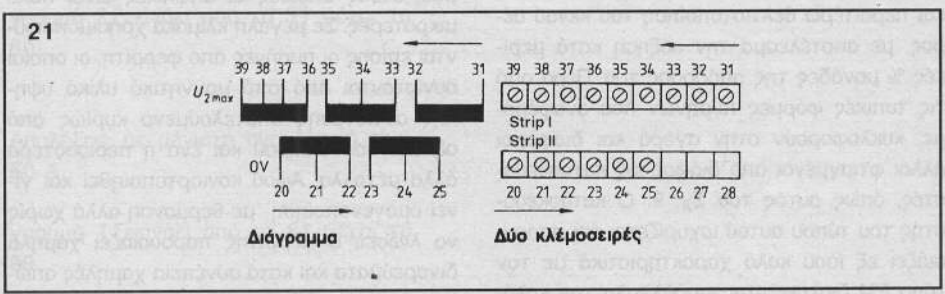
Σχήμα 18. Αρίθμηση στις οριολωρίδες (κλέμμες) ενός μετασχηματιστή για δύο σειρές οριολωρίδων.



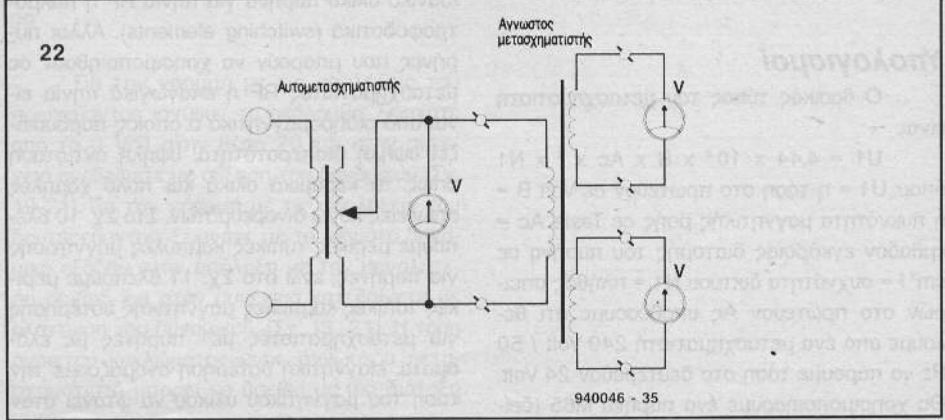
Σχήμα 19. Παράδειγμα με μια σειρά κλέμμες



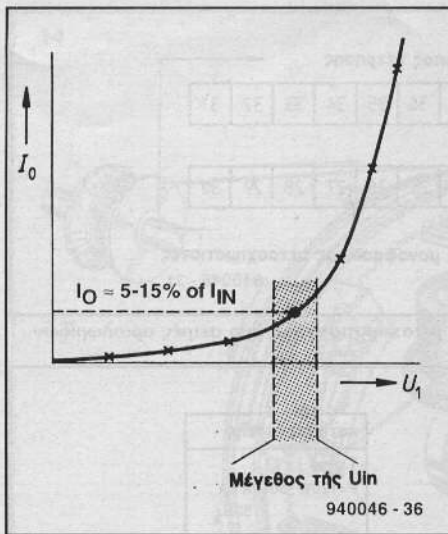
Σχήμα 20. Παράδειγμα με δύο σειρές κλέμμες.



Σχήμα 21. Ενδείξεις σε μετασχηματιστή με πολλές περιελίξεις



Σχήμα 22. Διάταξη μέτρησης μετασχηματιστών



Σχήμα 23. Ρεύμα κατά την μέτρηση χωρίς φορτίο (ανοικτό δευτερεύον)

πυρήνας μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες δυναμικές γραμμές, με άμεσο αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Πέρα από όλα αυτά η διαρρύθμιση των ελασμάτων σε τέσσερις διαφορετικές κατευθύνσεις (δείτε το Σχ. 7), σημαίνει ότι κάθε κενό αέρος περιβάλλεται και από τις δύο πλευρές από κλειστούς βρόγχους (τα πάνω και κάτω από αυτόν ελάσματα δεν παρουσιάζουν κενό στο συγκεκριμένο σημείο), που λειτουργούν ως εναλλακτικές οδοί για τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές (Σχ. 8). Όλες αυτές τελικά οι βελτιώσεις σημαίνουν μεγαλύτερη απόδοση και μικρότερο διαχεόμενο πεδίο σε σχέση με τον πυρήνα MD. Πριν από μερικά μάλιστα χρόνια, ο ίδιος πυρήνας PM βελτιώθηκε με διαμήκη διεύρυνση του παραθύρου περιέλεξης και περαιτέρω βελτιστοποίηση του κενού αέρος, με αποτέλεσμα την αύξηση κατά μερικές % μονάδες της απόδοσης του. Πέρα από τις τυπικές φόρμες πυρήνων που αναφέραμε, κυκλοφορούν στην αγορά και διάφοροι άλλοι φτιαγμένοι από διάφορους κατασκευαστές, όπως αυτός του Σχ. 9. Ο κατασκευαστής του τύπου αυτού ισχυρίζεται ότι παρουσιάζει εξ ίσου καλά χαρακτηριστικά με τον τύπο PM διατηρώντας παράλληλα την καλύτερη φυσική σταθερότητα του τύπου M.

Υπολογισμοί

Ο βασικός τύπος του μετασχηματιστή είναι:

$$U_1 = 4,44 \times 10^{-4} \times B \times A_c \times f \times N_1$$

όπου: U_1 = η τάση στο πρωτεύον σε Volt B = η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε Tesla A_c = εμβαδόν εγκάρσιας διατομής του πυρήνα σε cm^2 f = συχνότητα δικτύου N_1 = πλήθος σπειρών στο πρωτεύον A_s υποθέσουμε ότι θέλουμε από ένα μετασχηματιστή 240 Volt / 50 Hz να πάρουμε τάση στο δευτερεύον 24 Volt. Θα χρησιμοποιήσουμε ένα πυρήνα M65 (δείτε

τον Πίνακα 2) με εμβαδόν εγκάρσιας διατομής $4,9 \text{ cm}^2$, ο οποίος επιτρέπει μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής $1,42 \text{ T}$, και ισχύ απωλειών στο δευτερεύον $35,7 \text{ W}$. Πόσα τυλίγματα θα χρειαστούν στο πρωτεύον; Επιλύοντας την βασική σχέση και αντικαθιστώντας τα γνωστά μεγέθη βρίσκουμε: $N_1 = U_1 / (4,44 \times 10^{-4} \times B \times A_c \times f) = 240 / (4,44 \times 10^{-4} \times 1,42 \times 4,9 \times 50) = 1553$ σπειρές. Εάν η τάση του δικτύου ήταν 250 Volt, η πυκνότητα μαγνητικής ροής θα ήταν: $B = U_1 / (4,44 \times 10^{-4} \times N_1 \times A_c \times f) = 1,48 \text{ T}$, τιμή η οποία υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη, οπότε ο μετασχηματιστής θα εμφανίζει φαινόμενα κορεσμού. Το παράδειγμα αυτό δείχνει ότι σε τέτοιους υπολογισμούς θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη και οι τυχόν υπερτάσεις του δικτύου, όπου η αναμενόμενη διακύμανση είναι $\pm 5\%$. Η ενεργός τελική απόδοση βρίσκεται από τον Πίνακα 2 ότι είναι 77% . Εάν είχαμε χρησιμοποιήσει ελάσματα VM 11-35 με προσανατολισμένα στοιχεία, ένας πυρήνας με τις ίδιες διαστάσεις θα είχε απώλειες 43 W και τελική απόδοση 81% . Να παρατηρήσουμε τέλος στους παραπάνω τύπους, ότι το B είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας.

Υστέρηση

Όταν η συχνότητα του εναλλασσομένου ρεύματος στο πρωτεύον γίνει πολύ υψηλή, οι απώλειες στον πυρήνα γίνονται τόσο μεγάλες ώστε δεν μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν ελάσματα. Σε μια τέτοια περίπτωση τα ελάσματα αντικαθίστανται από συμπαγές πυρήνες από συμπιεσμένη σκόνη σιδήρου, στους οποίους οι απώλειες είναι πολύ μικρότερες. Σε μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιούνται επίσης οι πυρήνες από φερρίτη, οι οποίοι συνίστανται από από μαγνητικό υλικό υψηλής αντίστασης αποτελούμενο κυρίως από οξειδίο του σιδήρου και ένα ή περισσότερα άλλα μέταλλα. Αφού κονιορτοποιηθεί και γίνει ομογενοποίηση με θέρμανση αλλά χωρίς να λιώσει, ο φερρίτης παρουσιάζει χαμηλά δινορεύματα και κατά συνέπεια χαμηλές απώλειες στις ψηλές συχνότητες αποτελώντας ιδανικό υλικό πυρήνα για πηνία RF ή παλμοτροφοδοτικά (switching elements). Άλλοι πυρήνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μετασχηματιστές RF ή επαγωγικά πηνία είναι από σιδηρομαγνητικό ο οποίος παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα, υψηλή αντίσταση όπως τα κεραμικά υλικά και πολύ χαμηλές απώλειες λόγω δινορευμάτων. Στο Σχ. 10 βλέπουμε μερικές τυπικές καμπύλες μαγνήτισης για πυρήνες, ενώ στο Σχ. 11 βλέπουμε μερικές τυπικές καμπύλες μαγνητικής υστέρησης για μετασχηματιστές με πυρήνες με ελάσματα. Μαγνητική υστέρηση ονομάζουμε την τάση του μαγνητικού υλικού να φτάνει στον

κορεσμό και να διατηρεί τον μαγνητικό προσανατολισμό ακόμη και όταν το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο βρίσκεται αλλάζει πολικότητα, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ανακολουθία μεταξύ της υπάρχουσας μαγνήτισης και των μαγνητικών δυναμικών γραμμών. Το εμβαδόν του βρόγχου υστέρησης είναι ένα μέτρο των ενεργειακών απωλειών σε κάθε αλλαγή προσανατολισμού του μαγνητικού πεδίου. Στα Σχ. 12 και 13 βλέπουμε τις χαρακτηριστικές ενεργειακών απωλειών διαφόρων πυρήνων με ελάσματα στα 50 Hz. Οι απώλειες λόγω μαγνητικής υστέρησης αυξάνουν πολύ απότομα με την αύξηση της συχνότητας, και μόνον οι πυρήνες από φερρίτη παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες.

Δακτυλιοειδείς (τοροειδείς) μετασχηματιστές.

Ο πυρήνας στους δακτυλιοειδείς (ή όπως είναι γνωστότεροι τοροειδείς) μετασχηματιστές, αποτελείται από ένα μακρύ λεπτό φύλλο μετάλλου το οποίο έχει μορφοποιηθεί σε σχήμα δακτύλιου. Το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα τοποθετούνται πάνω σε αυτόν τον δακτύλιο κάνοντας χρήση μιας ειδικής τεχνικής (δείτε το Σχ. 14). Σε αυτού του τύπου τους μετασχηματιστές όλες οι δυναμικές γραμμές δείχνουν προς την ίδια κατεύθυνση. Όσο λεπτότερη είναι η λωρίδα του μαγνητικού υλικού, τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες πάνω στο σιδήρο. Για αυτόν τον λόγο οι πυρήνες αυτοί κατασκευάζονται συνήθως από πολύ λεπτά φύλλα. Είναι πραγματικό πολύ δύσκολο να σκεφτεί κανείς κάποιον καλύτερο, κλειστό μαγνητικό βρόγχο. Ενα πρόβλημα που θα μπορούσε κάποιος να σκεφτεί είναι το γεγονός ότι ο πυρήνας είναι εσωτερικός και κατά συνέπεια η απαγωγή θερμότητας δύσκολη. Αυτό όμως αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι τα τυλίγματα μπορούν πολύ εύκολα να απάγουν την παραγόμενη θερμότητα. Ο παράγοντας αυτός λαμβάνεται υπ' όψη κατά την σχεδίαση των δακτυλιοειδών μετασχηματιστών τοποθετώντας λεπτότερα σύρματα χαλκού για μεγαλύτερη απαγωγή θερμότητας. Ετσι, η αντίσταση ενός δακτυλιοειδή μετασχηματιστή είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή ενός με ελάσματα "τύπου μανδύα" στην ίδια ονομαστική ισχύ, ενώ ο τελικός όγκος του δακτυλιοειδή μετασχηματιστή είναι μικρότερος.

Λίγη θεωρία

Η βασική αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή είναι η αμοιβαία επαγωγή. το πρωτεύον και το δευτερεύον σπείρωμα του μετασχηματιστή υπόκεινται στην ίδια μαγνητική ροή. Στο Σχ. 15 βλέπουμε την βασική

οχεδίαση ενός μετασχηματιστή και στο Σχ. 16 το κυκλωματικό του διάγραμμα. Ενα εναλλασσόμενο ρεύμα στο πρωτεύον προκαλεί μια εναλλασσόμενη μαγνητική ροή μέσα στον πυρήνα. Εάν το ρεύμα είναι ημιτονοειδές και υποθέσουμε ότι η ροή είναι σε όλες τις χρονικές στιγμές ανάλογη του ρεύματος, τότε η σχέση:

$$\Phi = \Phi_m \eta \mu 2 \pi f t$$

περιγράφει την διακύμανση της ροής Φ σε συνάρτηση με τον χρόνο. Φ είναι η μαγνητική ροή την χρονική στιγμή t , Φ_m είναι η μέγιστη τιμή της ροής και f η συχνότητα εναλλαγής του ρεύματος, και κατά συνέπεια και της ροής. Η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (e.m.f.) σε κάθε κύκλο είναι:

$$\begin{aligned} U &= - (d\Phi / dt) \\ &= - [d(\Phi_m \eta \mu 2 \pi f t) / dt] \\ &= -2\pi f \Phi_m \sin 2 \pi f t. \end{aligned}$$

Η μέγιστη τιμή της επαγόμενης e.m.f., U_m , σε κάθε κύκλο εμφανίζεται όταν το συνημίτονο παίρνει την μέγιστη τιμή, όταν δηλαδή το συνημίτονο γίνεται 1, και η μέγιστη τιμή είναι τότε:

$$U_m = 2\pi f \Phi_m.$$

Η μέση ένεργος τιμή (r.m.s) αυτής της e.m.f., U_{rms} , δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} U_{rms} &= U_m / 1.41 = 2\pi f \Phi_m / 1.41 \\ &= 4,44 f \Phi_m. \end{aligned}$$

Εάν το πρωτεύον έχει N_1 σπειρές, η r.m.s. τιμή της e.m.f. στο πρωτεύον U_1 , είναι $4,44 N_1 f \Phi_m$. Με N_2 σπειρές στο δευτερεύον, η r.m.s. τιμή της e.m.f., U_2 είναι $4,44 N_2 f \Phi_m$. Ο λόγος $U_1:U_2 = N_1:N_2 = n$ είναι ο λόγος σπειρών (ή μετασχηματισμού) του μετασχηματιστή. Όταν εφαρμόζεται κάποιο φορτίο στην έξοδο του δευτερεύοντος, δημιουργείται ένα ρεύμα I_2 που διαρρέει το δευτερεύον και τείνει να αντισταθεί την μεταβολή της μαγνητικής ροής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο πρωτεύον και το ρεύμα I_1 αυξάνει. Η αύξηση αυτή ακριβώς αντισταθμίζει το φαινόμενο αντίδρασης που προκαλεί το ρεύμα στο δευτερεύον. Μέχρι στιγμής έχουμε αγνοήσει πλήρως την αντίσταση του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος καθώς και κάθε διαχεόμενο πεδίο. Στην πράξη, το πρωτεύον δημιουργεί μια διάχυση ροής Φ_{s1} , η οποία δεν φτάνει στο δευτερεύον, ενώ όμοια στο δευτερεύον δημιουργείται μια διάχυση ροής Φ_{s2} , η οποία και αυτή δεν φτάνει στο πρωτεύον. Οι ροές αυτές επάγουν τάσεις U_{s1}

και U_{s2} , οι οποίες καθυστερούν την διάχυση ροής κατά $\pi/2$. Θα μπορούσε να υποθέσει κανείς ότι δεδομένου ότι οι διαχεόμενες ροές βρίσκονται στον αέρα κυρίως, δεν εξαρτώνται από την επαγωγή. Οι ροές αυτές, και κατά συνέπεια οι τάσεις U_{s1} και U_{s2} , είναι ευθέως ανάλογες των I_1 και I_2 . Στους υπολογισμούς μας δεν έχει σημασία εάν οι τάσεις αυτές επάγονται στα τυλίγματα ή σε ξεχωριστά πηνία με διηλεκτρικό τον αέρα. Οι επαγωγικές αντιστάσεις των δύο αυτών φανταστικών πηνίων δίνονται από τους τύπους

$$j\omega L_{s1} = jX_{s1} = U_{s1} / I_1$$

και

$$j\omega L_{s2} = jX_{s2} = U_{s2} / I_2$$

Τα πηνία αυτά καθώς και οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων φαίνονται στο Σχ. 17.

Τερματικές απολήξεις

Οι απολήξεις σε οριολωρίδες (κλέμες) 'αγνώστων' μετασχηματιστών που χαρακτηρίζονται από μια ή δύο γραμμές αριθμών από 20 έως 99, ανήκουν σχεδόν σίγουρα στο DIN 42200. Οι αριθμοί αυτοί περιέχουν πολύ χρήσιμες πληροφορίες, και οι περισσότεροι - καλής ποιότητας μετασχηματιστές διαθέτουν δυο γραμμές από αριθμούς. Η αρίθμηση αυτή φαίνεται στο Σχ. 18.

Απολήξεις με μέγιστη ονομαστική τιμή 25 A

γραμμή 1: Ξεκινάει από το 20 μέχρι το 60

γραμμή 2: Ξεκινάει από το 31 μέχρι το 60

Απολήξεις με μέγιστη ονομαστική τιμή 60 A

γραμμή 1: Ξεκινάει από το 61 μέχρι το 99

γραμμή 2: Ξεκινάει από το 71 μέχρι το 99

Για την γραμμή με τις απολήξεις του πρωτεύοντος ισχύουν τα ακόλουθα: Ξεκινάτε από τα 0 Volt στην θέση 20 και στην συνέχεια ανεβαίνετε με αύξηση του δυναμικού (Σχ. 19-21). Για την γραμμή με τις απολήξεις του δευτερεύοντος: Ξεκινάτε με το μέγιστο δυναμικό εξόδου στην απόληξη με τον μεγαλύτερο αριθμό και στην συνέχεια κατεβαίνετε με ελάττωση του δυναμικού. (Σχ. 19 -21). Η τάση ανοικτού κυκλώματος ενός άγνωστου μετασχηματιστή μπορεί να βρεθεί με μια διάταξη

ανάλογη αυτής του Σχ. 22. Μέχρι να φτάσει στον κορεσμό το ρεύμα ανοικτού κυκλώματος θα είναι μικρό, περίπου 5-15% της μέγιστης ονομαστικής του τιμής, ενώ αυξάνει ανάλογα της εφαρμοζόμενης τάσης. Αυτό θα αρχίσει να αυξάνει απότομα όταν φτάσει στον κορεσμό, όπως φαίνεται και στην καμπύλη του Σχ. 23. Δοθέντος του κινδύνου ότι δουλεύοντας με άγνωστους μετασχηματιστές, μπορεί ξαφνικά να εμφανιστούν πολύ υψηλά δυναμικά, η δοκιμασία του 'άγνωστου' μετασχηματιστή θα πρέπει να διεκπεραιώνεται με πολλές προφυλάξεις, ξεκινώντας από πολύ χαμηλές τάσεις. Το σκαλοπάτι στην καμπύλη του Σχ. 23 είναι ένα μέτρο της ονομαστικής τάσης λειτουργίας του τυλίγματος.