

9.2 Ισοδύναμα Κυκλώματα Μονοφασικών Μ/Σ

A. Από το σχ. 9.1 έχουμε για ιδανικό Μ/Σ τη βασική σχέση:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} = n \quad 9.1$$

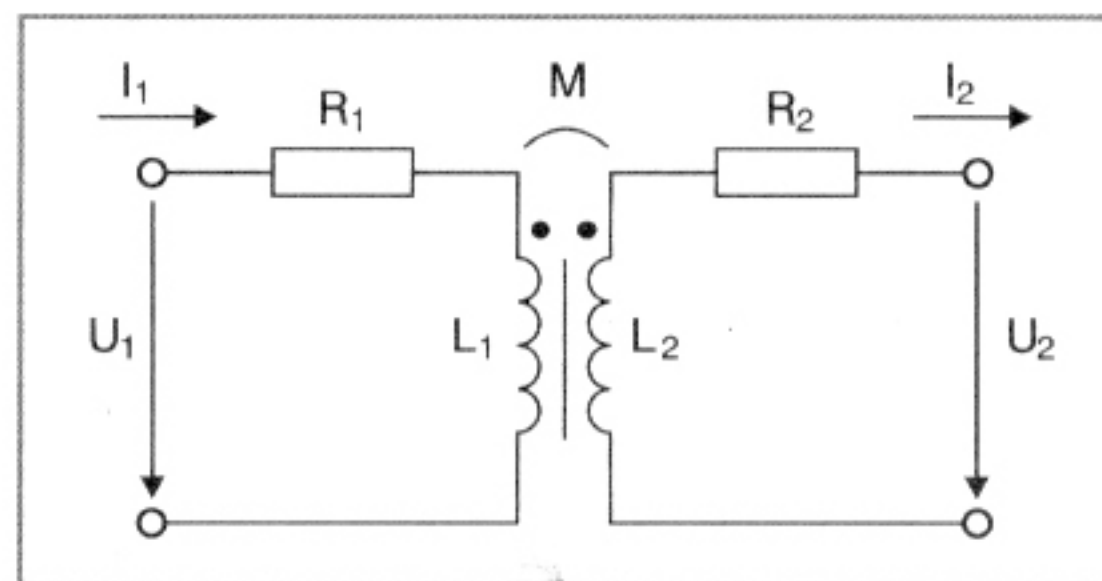
όπου $Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$, $Z_2 = \frac{U_2}{I_2}$ και $n =$ συντελεστής ή λόγος μετασχηματισμού.

Στο σχ. 9.3 δίνεται το κύκλωμα ενός Μ/Σ που αντιστοιχεί στο σχ. 9.1, όπου R_1 , R_2 οι ομικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων και M η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ πρωτεύοντος-δευτερεύοντος (δες τόμο Α σελ. 178). Αυτό το κύκλωμα ισχύει για ημιτονοειδή ρεύματα και τάσεις και εφόσον δεχτούμε ομοιογενή μαγνητικά πεδία στα δύο σκέλη του μαγνητικού κυκλώματος του σιδηροπυρήνα. Από το σχ. 9.3 έχουμε:

$$U_1 = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega M'I_2 \quad 9.2\alpha$$

$$U'_2 = j\omega M'I_1 - (j\omega L'_2 + R'_2)I'_2 \quad 9.2\beta$$

Σχήμα 9.3



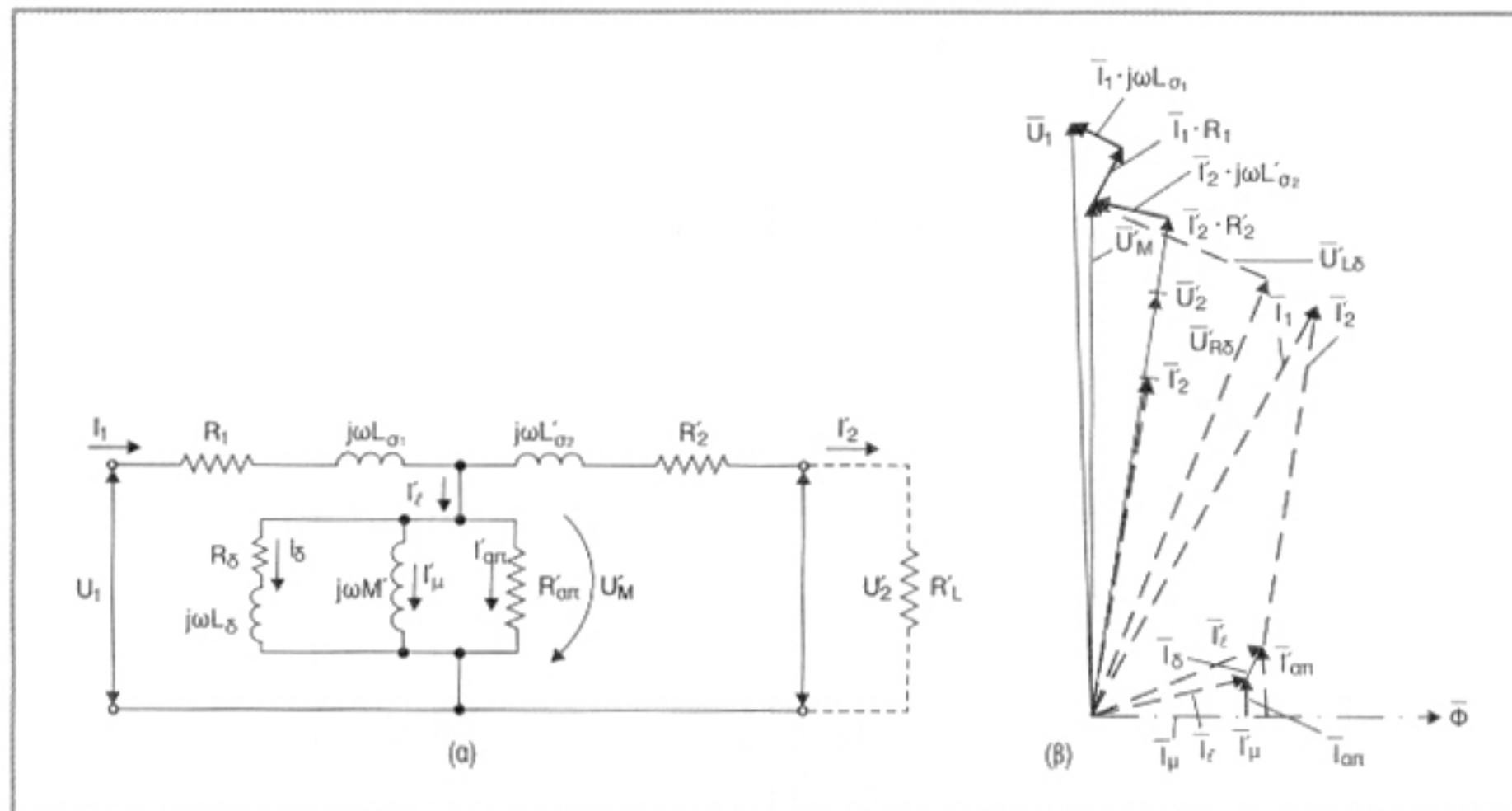
Οι σχέσεις 9.2α,β περιλαμβάνουν μεγέθη ανοιγμένα στο πρωτεύον (αυτά με τόνο), δηλαδή μετασχηματίζονται σε συνάρτηση με το n . Τα μεγέθη του πρωτεύοντος δεν μετασχηματίζονται, μόνο του δευτερεύοντος. Τα ανοιγμένα μεγέθη μεταβάλλονται ως εξής: οι τάσεις πολλαπλασιάζονται επί n , τα φορτία R και L πολλαπλασιάζονται επί n^2 και τα ρεύματα διαιρούνται δια n . Έτσι, έχουμε: $I'_2 = I_2/n$, $U'_2 = n \cdot U_2$, $L'_2 = n^2 \cdot L_2$, $R'_2 = n^2 \cdot R_2$ και $M' = n \cdot M$. Στις ίδιες σχέσεις – εξισώσεις τετραπόλου – παρατηρούμε

ότι απαλείφεται ο συντελεστής μετασχηματισμού n , ο οποίος μπορεί να ληφθεί κατά βούληση πραγματικός (στην περίπτωση μας) ή μιγαδικός. Μπορούμε λοιπόν κατά βούληση να σχεδιάσουμε πολλά ισοδύναμα κυκλώματα, αρκεί να πληρούν τις παραπάνω σχέσεις τετραπόλου.

Γνωρίζουμε ότι ένα τετράπολο είναι αντιστρεπτό όταν αποτελείται μόνο από στοιχεία R , L , C , M και ισχύει $Z_{12} = -Z_{21}$ ή $Y_{12} = -Y_{21}$. Στους M/Σ ισχύουν και οι δύο προϋποθέσεις, διότι το ισοδύναμό του αποτελείται από παθητικά στοιχεία και ισχύει (από τις σχέσεις 9.2α,β) $j\omega M' = -j\omega M'$. Άρα οι M/Σ είναι αντιστρεπτά τετράπολα.

Μετά από όλα αυτά μπορούμε να σχεδιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα τύπου T ενός M/Σ με απώλειες για τις χαμηλές συχνότητες (παραλείπονται οι παρασιτικές χωρητικότητες), δηλαδή ενός πραγματικού M/Σ . Στο σχ. 9.4α δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα και στο 9.4β το διανυσματικό διάγραμμα ενός M/Σ με απώλειες και ομικό φορτίο.

Σχήμα 9.4α-β



Αναλυτικά:

Καταρχήν οι αυτεπαγωγές των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αποτελούνται από δύο μέρη: την αυτεπαγωγή που χαρακτηρίζει τη μαγνητική ροή στον πυρήνα σιδήρου M και δεύτερο την αυτεπαγωγή που χαρακτηρίζει τη μαγνητική ροή, η οποία συζευγμένη με ένα μέρος του πηνίου κατανέμεται εκτός του πυρήνος σιδήρου L_σ (αυτεπαγωγή σκέδασης). Αμφότερες οι αυτεπαγωγές $L_{\sigma 1} + M'$ και $L_{\sigma 2} + M'$ συνδέονται σε σειρά, διότι οι δύο μαγνητικές ροές επάγουν τάσεις των οποίων το άθροισμα δίνει την ολική επαγόμενη τάση. Οι αντιστάσεις τυλιγμάτων R_1

και R'_2 συνδέονται σε σειρά με την ολική αυτεπαγωγή, διότι δι' αυτών των αντιστάσεων η ολική τάση διασπάται σε δύο πτώσεις τάσεων. Η $R'_{\text{απ}}$ συνδέεται παράλληλα με την αυτεπαγωγή M' , διότι εμφανίζεται ένα συμπληρωματικό ρεύμα $\bar{I}'_{\text{απ}}$. Τέλος ένα άλλο συμπληρωματικό ρεύμα εμφανίζεται λόγω της μεταβολής της ροής στο σίδηρο, δηλαδή το \bar{I}'_{δ} διαμέσου των R_{δ}, L_{δ} παράλληλα συνδεδεμένων στην αυτεπαγωγή M' (R_{δ}, L_{δ} σε σειρά). Το \bar{I}'_{δ} είναι αυτό των δινορευμάτων ή eddy ή Foucault, που σχηματίζει αντίθετες αμπεροστροφές. Επειδή μόνο η ροή στον πυρήνα σιδήρου είναι η αιτία – λόγω απωλειών επαναμαγνήτισης – της δημιουργούμενης θερμότητας, η $R'_{\text{απ}}$ χαρακτηρίζει τις θερμικές απώλειες.

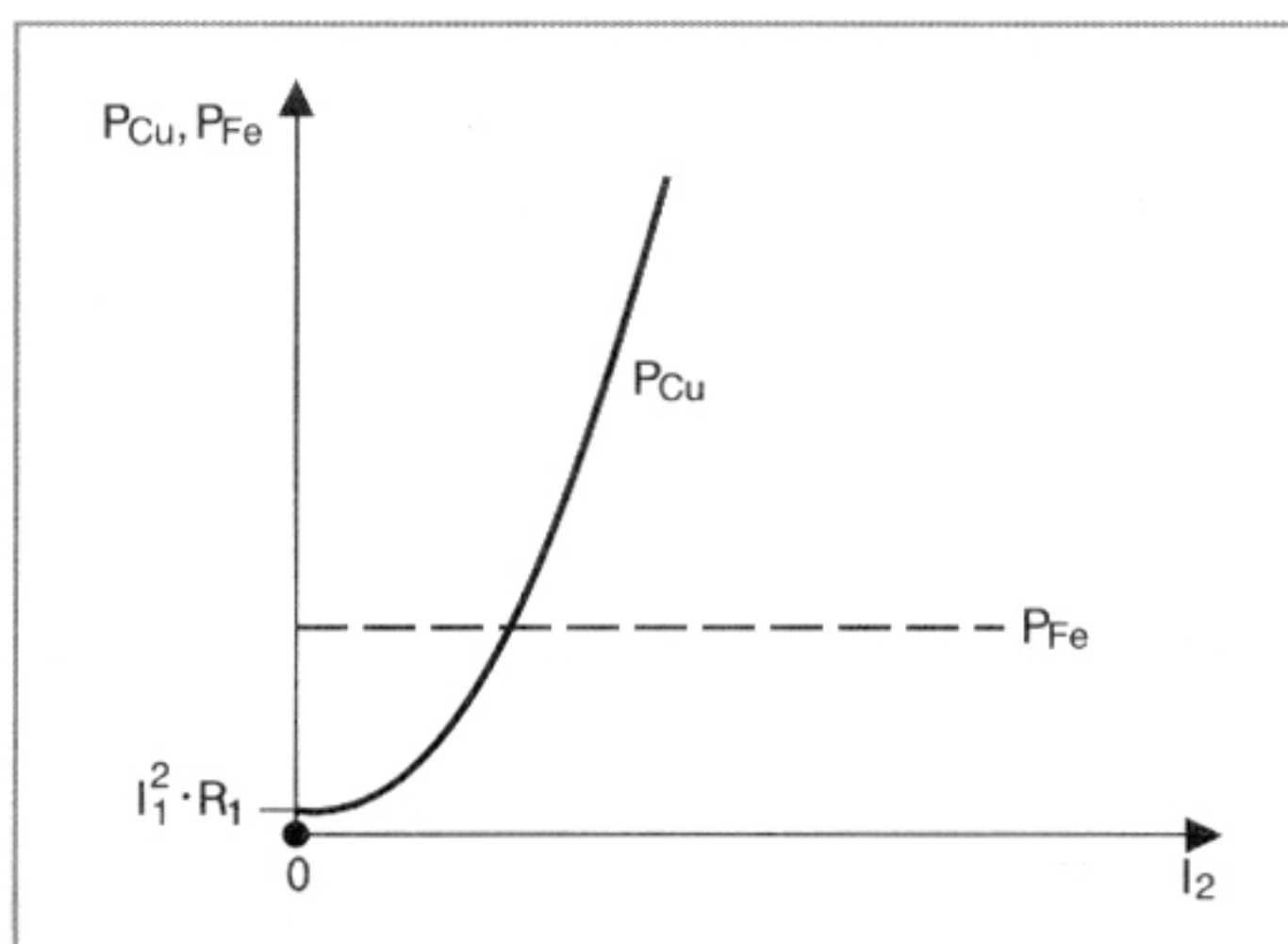
Παρατηρούμε τώρα το διάγραμμα του σχ. 9.4β και βλέπουμε ότι το $\bar{I}'_{\text{απ}}$ είναι σε φάση με την τάση \bar{U}'_M (διανύσματα παράλληλα), ενώ είναι σε προπορία ως προς το \bar{I}_{μ} (διανύσματα κάθετα $\bar{I}'_{\text{απ}} \perp \bar{I}_{\mu}$). Το διανυσματικό τους άθροισμα $\bar{I}'_{\text{απ}} + \bar{I}_{\mu} = \bar{I}_{\beta}$ είναι το ρεύμα τής εν κενώ λειτουργίας του M/Σ και για $\bar{I}'_2 = 0$ τότε $\bar{I}_{\beta} = \bar{I}_1$. Πρακτικά στην εν κενώ λειτουργία υπάρχει μόνο η δράση του πρωτεύοντος και η αντίσταση πυρήνα καθορίζεται από την αμοιβαία επαγωγή \bar{M} . Επίσης, η μαγνητική ροή $\bar{\Phi}$ είναι σε φάση με το ρεύμα μαγνήτισης \bar{I}_{μ} (διανύσματα παράλληλα). Λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες δινορευμάτων, το ρεύμα \bar{I}_{δ} είναι σε φάση με την $\bar{U}'_{R_{\delta}}$ και πρέπει να ισχύει $\bar{U}'_{R_{\delta}} + \bar{U}'_{L_{\delta}} = \bar{U}'_M$. Το \bar{I}_{δ} αυξάνει το \bar{I}_{μ} σε \bar{I}'_{μ} και το $\bar{I}'_{\text{απ}}$ σε $\bar{I}'_{\text{απ}}$. Έτσι, το ρεύμα τής εν κενώ λειτουργίας του M/Σ αυξάνει σε \bar{I}'_{β} . Το ρεύμα \bar{I}'_2 είναι σε φάση με την \bar{U}'_2 διότι έχουμε ομικό φορτίο. Με μετάθεση του \bar{I}'_2 στο υπάρχον \bar{I}'_{β} βρίσκουμε το \bar{I}'_1 . Το $\bar{I}'_1 \cdot R_1$ είναι σε φάση με το \bar{I}'_1 και το $\bar{I}'_1 \cdot j\omega L_{\sigma_1} \perp \bar{I}'_1$. Το $\bar{I}'_2 \cdot R'_2$ είναι σε φάση με το \bar{I}'_2 και το $\bar{I}'_2 \cdot j\omega L'_{\sigma_2} \perp \bar{I}'_2$. Ισχύει $\bar{U}'_M = \bar{U}'_2 + \bar{I}'_2 (R'_2 + j\omega L'_{\sigma_2})$ και $\bar{I}'_{\mu} \perp \bar{U}'_M$. Τέλος, έχουμε $\bar{U}'_1 = \bar{U}'_M + \bar{I}'_1 (R_1 + j\omega L_{\sigma_1})$ και επειδή η \bar{U}'_1 προπορεύεται του

\bar{I}'_1 συμπεραίνουμε ότι με ομικό φορτίο το πρωτεύον φορτίζεται επαγωγικά. Αντίστοιχα, με επαγωγική φόρτιση του δευτερεύοντος το φορτίο έχει τάση μικρότερη από αυτή που του αντιστοιχεί από το συντελεστή μετασχηματισμού, ενώ με χωρητική φόρτιση η τάση του φορτίου θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που του αντιστοιχεί. Αποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερη σύζευξη ($k = \sqrt{k_1 \cdot k_2}$) υπάρχει μεταξύ των δύο τυλιγμάτων ενός M/Σ , τόσο αυτός προσεγγίζει τον ιδανικό M/Σ . Φυσικά

το αντίθετο ισχύει για τη σκέδαση, αφού εξ ορισμού ο συντελεστής σκέδασης είναι $\sigma = 1 - k^2$ και πρακτικά $\sigma \leq 1\%$.

Οι απώλειες χαλκού $P_{Cu} \approx 2I_2^2 \cdot R_2$ αυξάνονται με το ρεύμα φορτίου ανάλογα προς n^2 , ενώ οι απώλειες σιδήρου $P_{Fe} \approx \frac{U_1^2}{R_{\text{απ}}}$ είναι ανεξάρτητες από το φορτίο. Αυτά φαίνονται καλύτερα στο σχ. 9.5.

Σχήμα 9.5



Έστω ότι πραγματικός Μ/Σ συνδέεται με γεννήτρια ημιτονικής τάσης εσωτερικής αντίστασης R_i . Το εύρος ζώνης του Μ/Σ καθορίζεται από τις f_L και f_H στα -3dB και είναι $BW = f_H - f_L$. Ισχύουν δε οι σχέσεις:

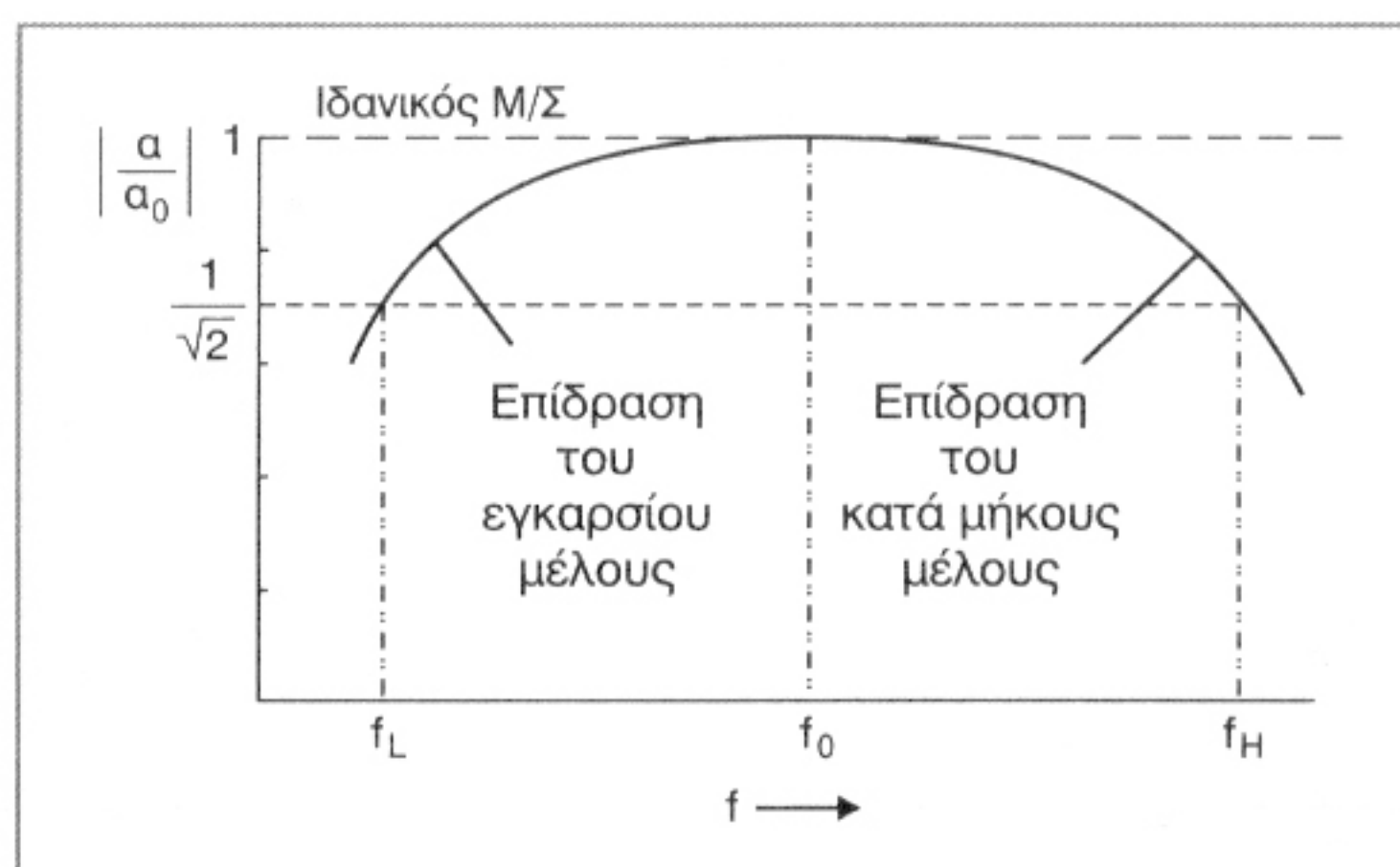
$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\frac{L_1}{R_1} + \frac{L_2}{R_2}} \right) (\text{Hz}) \quad 9.3$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sigma} \left(\frac{R_i}{L_1} + \frac{R_L}{L_2} \right) (\text{Hz}) \quad \text{για } k \approx 1 \quad 9.4$$

όπου L_1, L_2 οι αυτεπαγωγές πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα και R_L η αντίσταση φορτίου.

Είναι φανερό ότι αν οι R_i και R_L είναι διαφορετικές μεταξύ τους, τότε σε δεδομένο M/Σ η μικρότερη αντίσταση καθορίζει την f_L και η μεγαλύτερη την f_H . Για δεδομένες R_i , R_L και για κατά το δυνατόν μικρότερη f_L πρέπει οι L_1 , L_2 να έχουν τις υψηλότερες δυνατές τιμές. Τώρα για συγκεκριμένη f_L και για να πάρει η f_H την υψηλότερη τιμή πρέπει να ελαττωθεί το σ κατά το δυνατόν. Άρα, οι απαιτήσεις για μικρή f_L και μεγάλη f_H αντιφάσκουν μεταξύ τους. Αυτά δίνονται στο σχ. 9.6.

Σχήμα 9.6



B. Ο αυτομετασχηματιστής (AM/Σ) ή μετασχηματιστής με ένα τύλιγμα, αποτελείται ουσιαστικά από ένα πηνίο που χρησιμοποιείται και ως πρωτεύον και ως δευτερεύον, μέρος βέβαια του πρωτεύοντος χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και ως δευτερεύον τύλιγμα.

Στον AM/Σ step-up αντίθετα το τύλιγμα του πρωτεύοντος είναι μέρος του όλου τυλίγματος, δηλαδή του δευτερεύοντος. Στο σχ. 9.7α δίνεται AM/Σ υποβιβασμού τάσης (step-down) και στο σχ. 9.7β ένας ανύψωσης τάσης (step-up). Για το ιδανικό AM/Σ ισχύει η σχέση 9.1. Στον step-down ισχύει $I_{BΓ} = I_2 - I_1$, ενώ στον step-up $I_{BΓ} = I_1 - I_2$. Παρατηρούμε επίσης ότι στον πρώτο το ρεύμα $I_{BΓ}$ είναι ομόρροπο με το I_2 και αντίρροπο με το I_1 , ενώ στο δεύτερο ισχύει το αντίθετο. Το $n \geq 1$ στον step-down και $n \leq 1$ στον step-up.

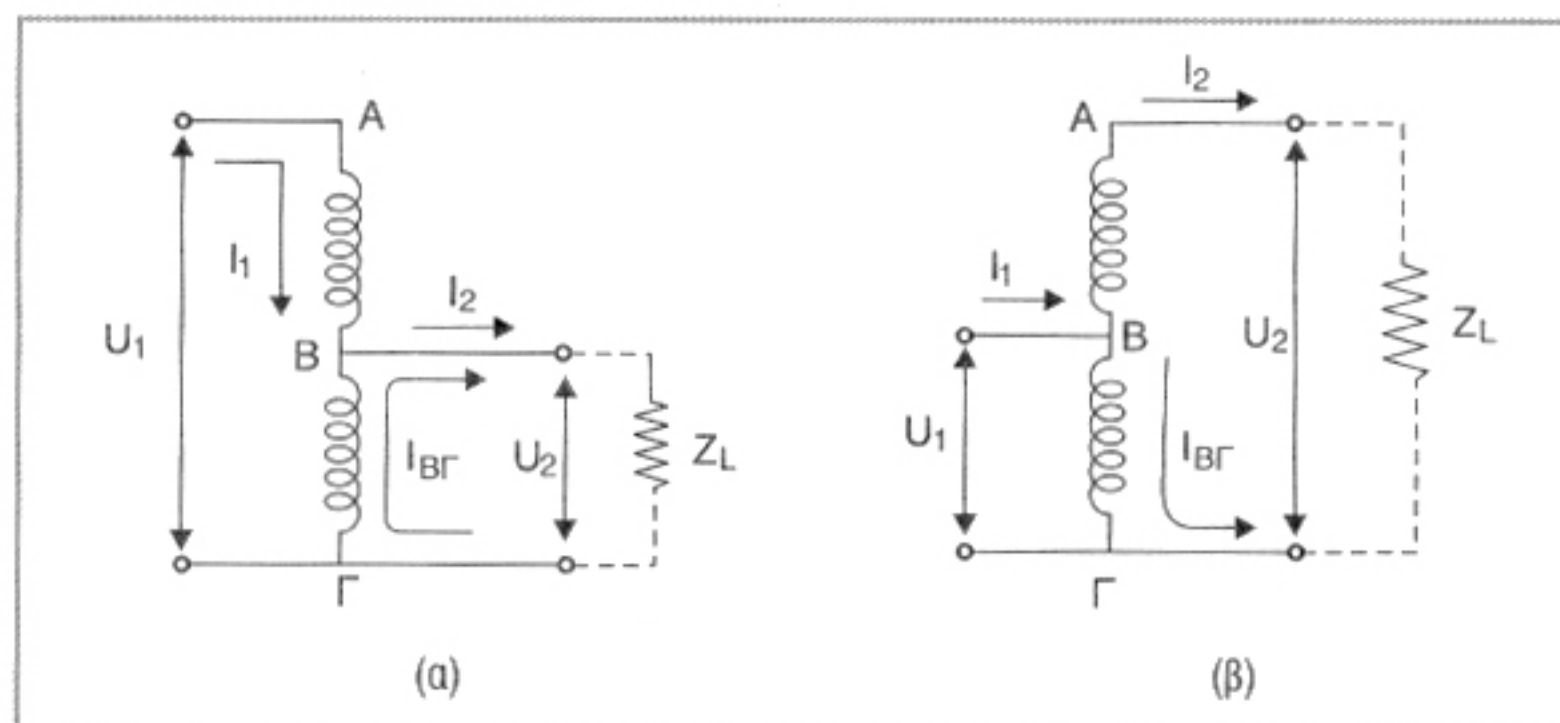
Ορίζουμε ως συντελεστή αναγωγής a το λόγο P'_2/P_2 όπου P'_2 η πραγματική φαινόμενη ισχύς του δευτερεύοντος $P'_2 = U_2(I_2 - I_1)$ και P_2 η φαινόμενη ισχύς που περιλαμβάνει το δευτερεύον $P_2 = U_2 I_2$, για AM/Σ step-down χωρίς απώλειες. Έτσι, έχουμε:

$$\alpha = \frac{P'_2}{P_2} = \frac{U_2(I_2 - I_1)}{U_2 \cdot I_2} = \frac{I_2 - I_1}{I_2} = 1 - n = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad 9.5$$

και για AM/Σ step-up αντίστοιχα:

$$\alpha = \frac{P'_2}{P_2} = \frac{U_1(I_1 - I_2)}{U_1 \cdot I_1} = \frac{I_1 - I_2}{I_1} = 1 - \frac{1}{n} = \frac{U_2 - U_1}{U_2} \quad 9.6$$

Σχήμα 9.7



Από τη σύγκριση του AM/Σ με ένα Μ/Σ των ιδίων χαρακτηριστικών προκύπτει ότι: 1) ο AM/Σ παρουσιάζει μικρότερες απώλειες σιδήρου από τον Μ/Σ, διότι στον AM/Σ έχουμε οικονομία σιδηρομαγνητικού υλικού, 2) παρουσιάζει μικρότερες απώλειες χαλκού, αφού το κοινό τύλιγμα διαρρέεται από τη διαφορά των I_1 και I_2 και 3) ως συνέπεια των προηγούμενων, έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης εξαρτώμενος βέβαια από το συντελεστή n (συνήθεις τιμές του $n=1\sim 2$ για AM/Σ step-down και $n=0.5\sim 1$ για έναν step-up). Βασικό του μειονέκτημα η έλλειψη ηλεκτρικής μόνωσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η χρήση του στις σχετικά χαμηλές τάσεις.

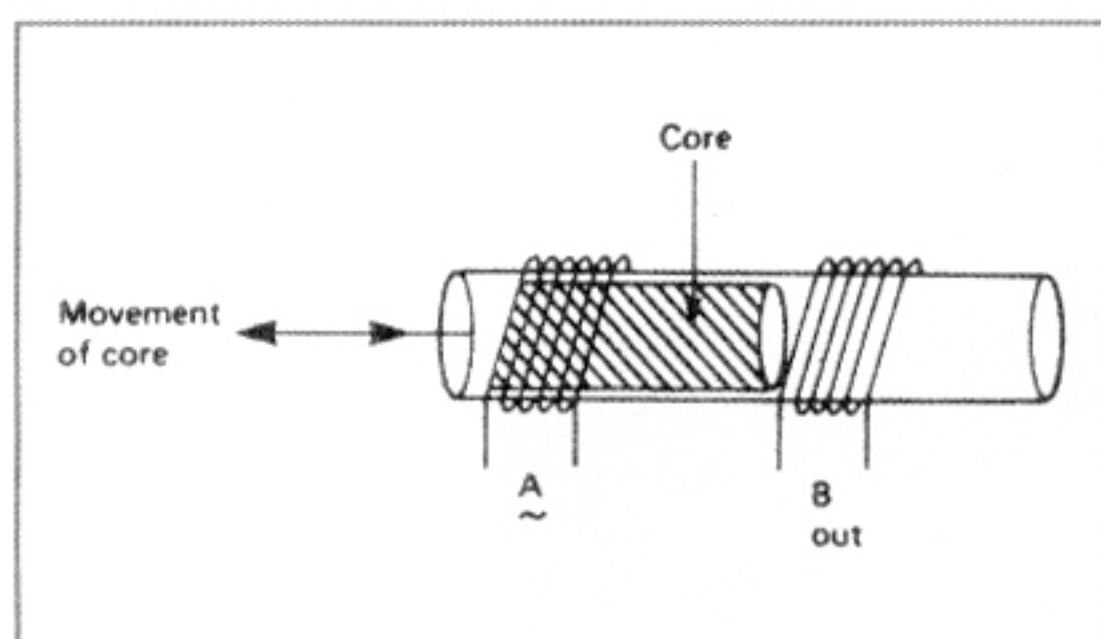
Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη συνδεσμολογία του AM/Σ, έτσι ώστε να αποφευχθεί η σύνδεση του γειωμένου άκρου του φορτίου στη φάση του δικτύου. Γι' αυτό πρέπει πρώτα να γίνεται αναγνώριση των πόλων του δικτύου.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του AM/Σ είναι το ίδιο με αυτό του Μ/Σ του σχ. 9.4α, με τη διαφορά ότι όλες οι παράμετροι, εκτός του R'_L , πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή αναγωγής α , για step-down και step-up αντίστοιχα.

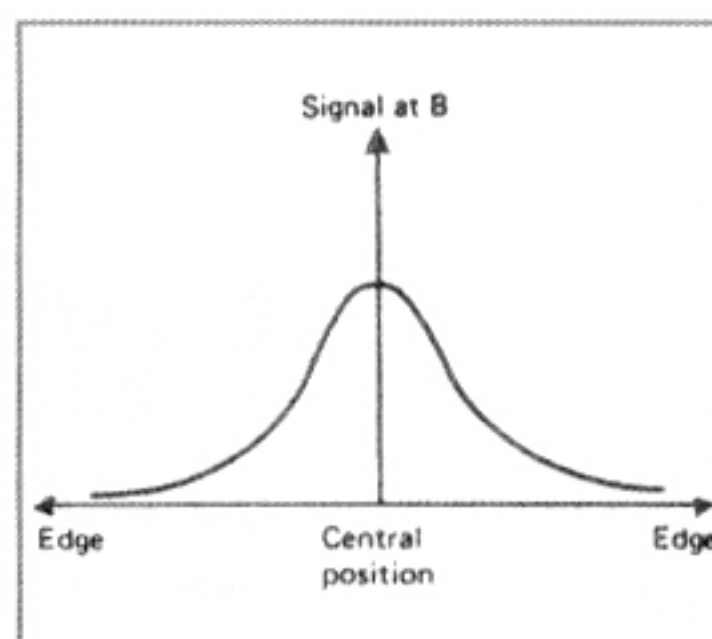
9.4.3.2 Ειδικών εφαρμογών

- A. Διαφορικός Μ/Σ: Στο σχ. 9.18α φαίνεται ένας επαγωγικός αισθητήρας γραμμικής κίνησης. Όταν εφαρμόζεται AC σήμα στο ένα πηνίο, τότε το μέγεθος και η φάση του σήματος στο άλλο πηνίο εξαρτάται από τη θέση του σιδηροπυρήνα μεταξύ των δύο πηνίων. Το μέγεθος του σήματος εξόδου μεταβάλλεται όπως στο σχ. 9.18β, είναι δε μέγιστο σε περισσότερες από μια θέσεις του πυρήνα. Αυτό είναι μειονέκτημα· επιπλέον, η καμπύλη της τάσης εξόδου δεν είναι ποτέ ανάλογη προς την απόσταση του πυρήνα μεταξύ των δύο πηνίων.

Σχήμα 9.18α



Σχήμα 9.18β



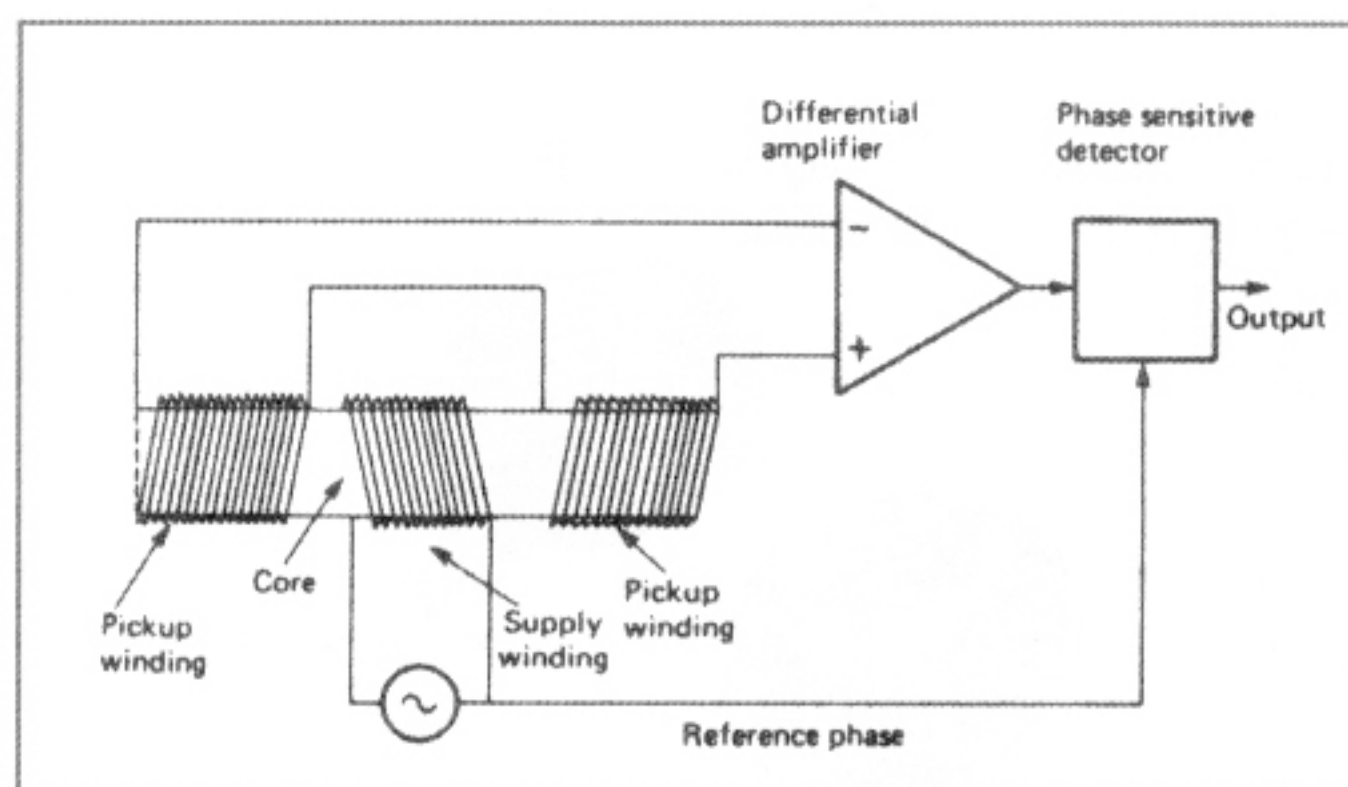
Μια εξέλιξη του επαγωγικού αισθητήρα είναι ο γραμμικά μεταβαλλόμενος διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT) Linear Variable Differential Transformer, που είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος αισθητήρας απόστασης από μερικά mm ως κάποια cm.

Στο σχ. 9.18γ το εξάρτημα βασίζεται σε τρία σταθερά πηνία εκ των οποίων το ένα τροφοδοτείται με σήμα AC. Τα άλλα δύο πηνία συνδέονται σ' ένα φωρατή φάσης διαμέσου ενός διαφορικού ενισχυτή. Όταν ο σιδηροπυρήνας κινείται στον άξονα των πηνίων, η έξοδος του φωρατή είναι ανάλογη προς την απόσταση του σιδηροπυρήνα από το ένα άκρο (τέρμα) των πηνίων· η αναλογία αυτή είναι γραμμική.

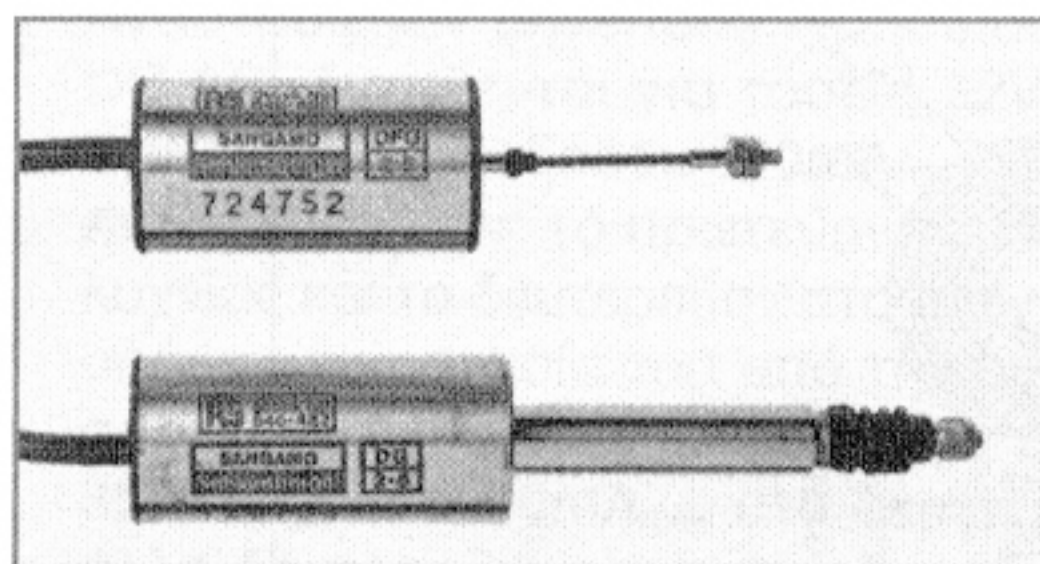
Πλεονεκτήματά του είναι η καλή ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ σιδηροπυρήνα και πηνίων, το μεγάλο σήμα εξόδου των πηνίων, η καλή λειτουργία του σε συνθήκες shock δονήσεων και υπερβολικής κίνησης του σιδηροπυρήνα κ.ά.

Στο εμπόριο διατίθενται LVDTs με τροφοδοσία AC και DC. Οι τύποι DC περιλαμβάνουν έναν ταλαντωτή για να παρέχει AC τάση στο πηνίο (τυπική τιμή 5KHz). Οι LVDTs μικρού μήκους χρησιμοποιούνται για αποστάσεις ($\pm 1 \sim \pm 5$)mm και οι μεγάλοι μήκους για αποστάσεις έως ± 62 mm. Στο σχ. 9.18δ φαίνεται ένας LVDT μινιατούρα DC τύπου.

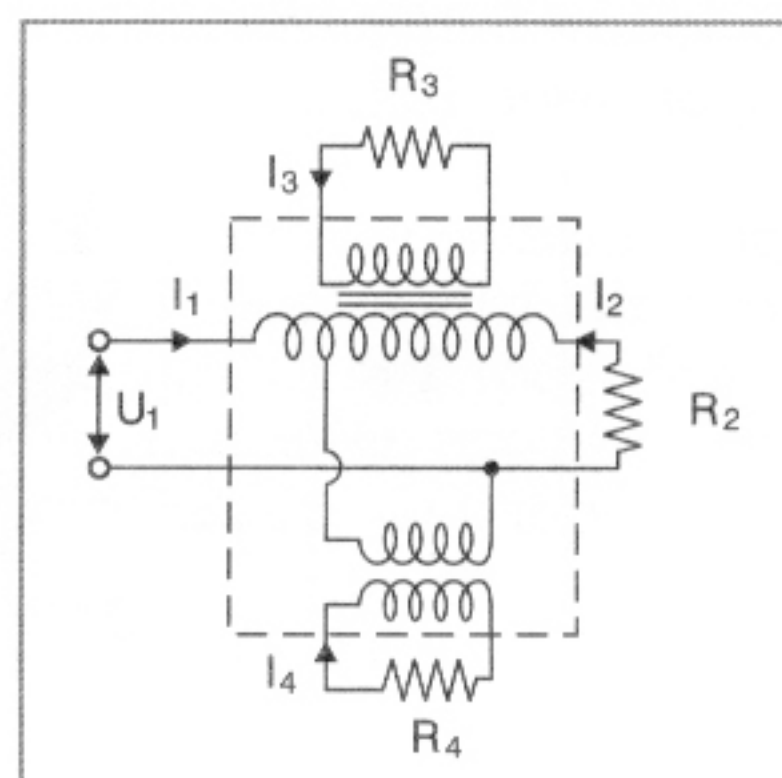
Σχήμα 9.18γ



Σχήμα 9.18δ



Σχήμα 9.18ε



Ο διαφορικός Μ/Σ χρησιμοποιείται και για τη μετατροπή δισύρματων τηλεφωνικών γραμμών σε τετρασύρματες και αντιστρόφως. Αυτό φαίνεται στο σχ. 9.18ε στο οποίο η είσοδος και η έξοδος των δύο κατευθύνσεων συνδέονται στις απέναντι θύρες του Μ/Σ, έτσι ώστε να μην υπάρχει διαρροή μεταξύ τους. Αν $R_2=R_3=R_4$ ίσες με αντίσταση

τερματισμού θύρας 1, τότε $P_3 = P_4 = \frac{P_1}{2}$ και ισχύει $I_1 + I_2 = \sqrt{2} I_4$ και $I_1 - I_2 = \sqrt{2} I_3$.

Β. Οι περιστρεφόμενοι Μ/Σ χρησιμοποιούνται π.χ. στην περιστρεφόμενη μαγνητική κεφαλή των video και τοποθετούνται μεταξύ του ρότορα και του στάτη για να μεταφέρουν το σήμα που συλλέγεται από την κεφαλή στον ενισχυτή του στάτη· χρησιμοποιούν φερρίτη υψηλής ποιότητας και αξιοπιστίας και σχεδιάζονται για να παρουσιάζουν μικρή

απόκλιση αυτεπαγωγής μεταξύ των καναλιών. Στο σχ. 9.19 δίνονται τα πηνία στάτη και ρότορα τεσσάρων καναλιών.

Σχήμα 9.19

