



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ηλεκτρικές Μηχανές Ι

## Ενότητα 3: Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Επ. Καθηγήτρια Τζόγια Χ. Καππάτου

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και  
Τεχνολογίας Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

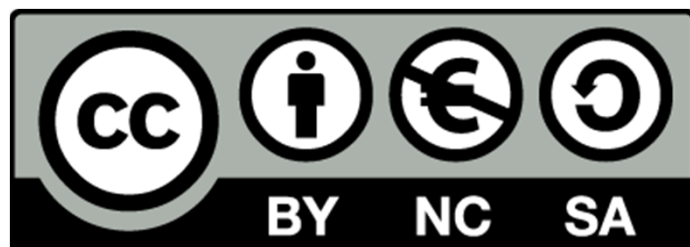


ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα

## *Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ)*

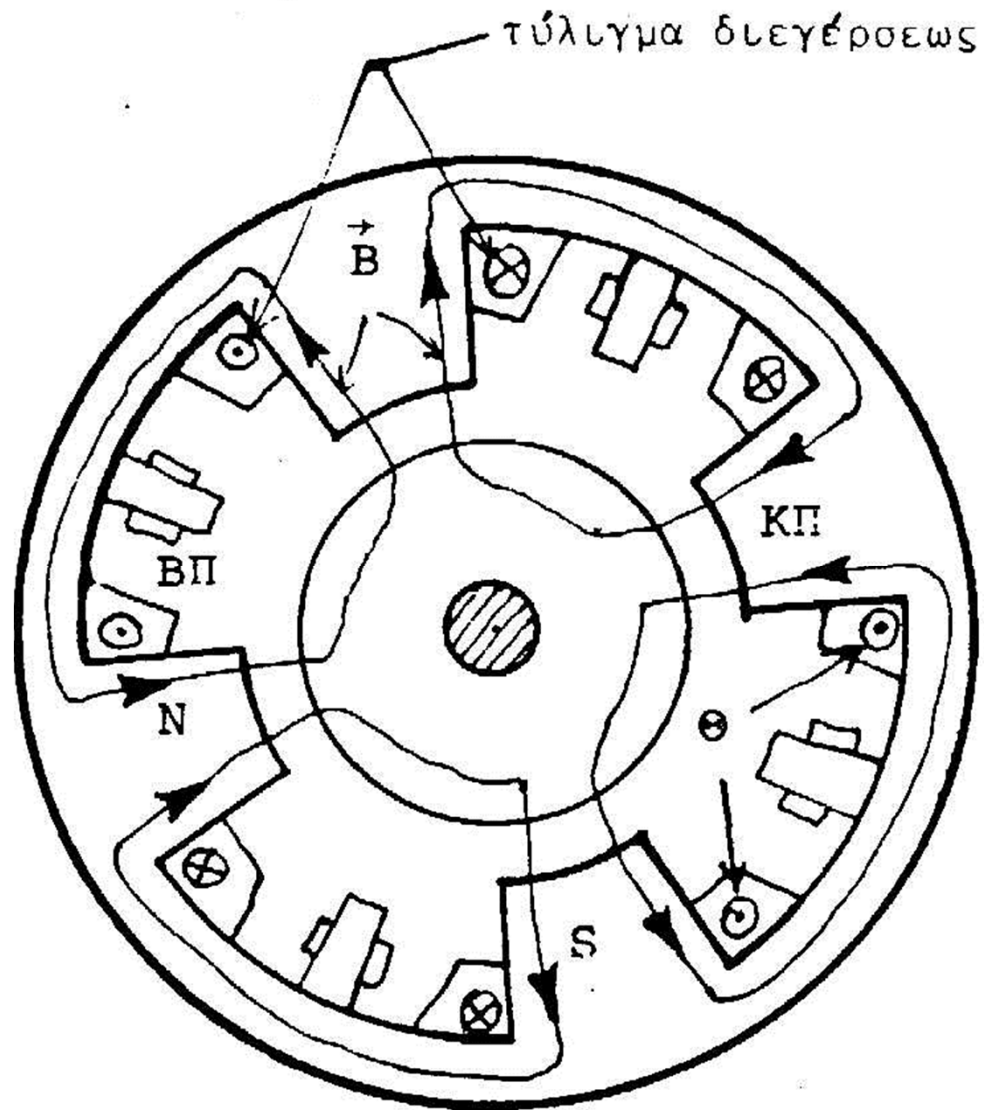
- *Βασική Κατασκευή*
- *Παραγωγή συνεχούς τάσης*
- *Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος*
- *Τάσεις εξ επαγωγής, τάση στους ακροδέκτες, ρευματικό στρώμα και ηλεκτρομαγνητική ροπή*



## **3.1 Βασική κατασκευή**

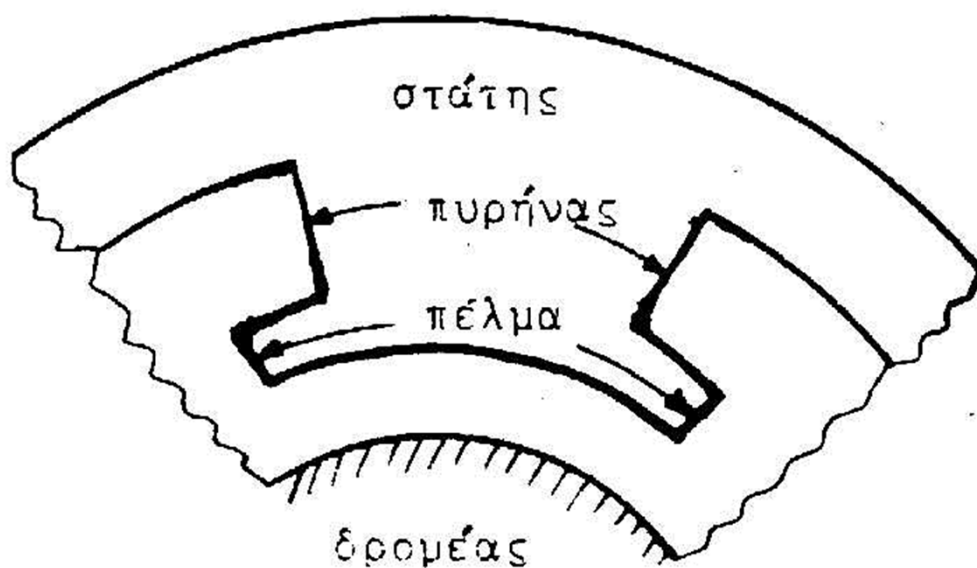
Η μηχανή συνεχούς ρεύματος αποτελείται από δυο βασικά μέρη:

- **Στάτη**: Ο ηλεκτρομαγνήτης διεγέρσεως βρίσκεται επί του εξωτερικού ακίνητου μέρους που λέγεται στάτης.
- **Δρομέας**: Το επαγωγικό τύμπανο μαζί με τον συλλέκτη βρίσκεται επάνω στο δρομέα και περιστρέφεται μαζί με αυτόν.



**Σχήμα 3.3.** Τετραπολική μηχανή με βοηθητικούς πόλους ΒΠ.

Ο πόλος αποτελείται από τον πυρήνα και το μέρος το οποίο βρίσκεται απέναντι από τον δρομέα και λέγεται πέλμα.



Σχήμα 3.4. Πόλος μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Για μεγάλη ισχύ και χαμηλό αριθμό στροφών κατασκευάζουμε μηχανές με περισσότερους από τέσσερις πόλους φθάνοντας έως 24 πόλους.

- Ο αριθμός των πόλων εξαρτάται από τη γωνιακή ταχύτητα και την ισχύ, η οποία βασικά προκύπτει ως γινόμενο της ροπής επί την ταχύτητα.
  - Οι πόλοι δεν βρίσκονται υπό την επίδραση εναλλασσόμενης μαγνητίσεως, επομένως μπορούν να κατασκευαστούν από μαζικό σίδηρο (χυτοσίδηρος, χυτοχάλυβας) επειδή δεν υπάρχουν δινορεύματα.
  - Αντίθετα στο πέλμα εμφανίζονται δινορεύματα λόγω των αυλακώσεων του δρομέα.
- Το διάκενο μεταξύ πέλματος και δρομέα δεν είναι σταθερό, αλλά παρουσιάζει μικρές κυματώσεις!!!

### Δινορεύματα

Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου προκαλεί τάσεις εξ επαγωγής και συνεπώς δινορεύματα εντός του πέλματος.

Για να εμποδίσουμε τη δημιουργία αυτών, κατασκευάζουμε τα πέλματα από λεπτά ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους.

## **Βοηθητικοί πόλοι**

Κατά κανόνα τοποθετούνται μεταξύ των κυρίων πόλων και οι βοηθητικοί πόλοι. Αυτοί έχουν ως σκοπό να επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο στην ουδέτερη ζώνη κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να εμποδίζουμε τους σπινθηρισμούς των ψηκτρών, οι οποίοι είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε βραχυκύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου.

## **Αυλακώσεις Δρομέα**

Ο δρομέας και ειδικότερα το επαγωγικό τύμπανο φέρει αυλακώσεις, εντός των οποίων τοποθετούνται τα τυλίγματα για την δημιουργία της τάσης εξ επαγωγής. Οι αυλακώσεις εξασφαλίζουν τα τυλίγματα από μηχανικής άποψης κατά την περιστροφή - αποφυγή των συνεπειών των φυγοκεντρικών δυνάμεων - και επιτρέπουν να μην έχουμε μεγάλο διάκενο αέρα, που θα σήμαινε μικρότερη μαγνητική ένταση για ορισμένο ρεύμα διέγερσης.

## Ελάσματα Τυμπάνου

Για να εμποδίσουμε τα δινορεύματα εντός του σιδήρου του τυμπάνου, τα οποία οφείλονται στο γεγονός ότι ο δρομέας περιστρέφεται εντός του σταθερού μαγνητικού πεδίου, το κατασκευάζουμε από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους με λεπτό στρώμα από λακ ή από χαρτί.

- Εάν η διέγερση της μηχανής πρέπει να μεταβάλλεται χρονικά όπως συμβαίνει κατά τον έλεγχο της, το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται και προκαλεί δινορρεύματα στα ζυγώματα. Γι' αυτό στην περίπτωση αυτή κατασκευάζονται και τα ζυγώματα από ελάσματα.

## Συλλέκτης

Τομείς από χαλκό μονωμένοι μεταξύ τους. Με τους τομείς συνδέεται το τύλιγμα τυμπάνου.

## Σύστημα Ψηκτρών

Με τον συλλέκτη έρχονται συνεχώς σε επαφή οι ψήκτρες, οι οποίες συνίστανται από κάρβουνο ή γραφίτη ή από μίγμα των δύο και τοποθετούνται επί μιας γέφυρας στο στάτη, όπου πιεζόμενες από ένα ελατήριο εφάπτονται με την επιφάνεια ολίσθησης.

Ο αριθμός των ψηκτρών είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων.

Οι ψήκτρες της ίδιας πολικότητας συνδέονται με την βοήθεια ενός δακτυλίου, οι δε δακτύλιοι συνδέονται με χάλκινους αγωγούς με τους ακροδέκτες της μηχανής.



**Σχήμα 3.5.** *Στάτης μηχανής συνεχούς ρεύματος χωρίς τα τυλίγματα (πρόκειται για ειδική μηχανή με διαιρούμενο στάτη σε δύο τμήματα).*

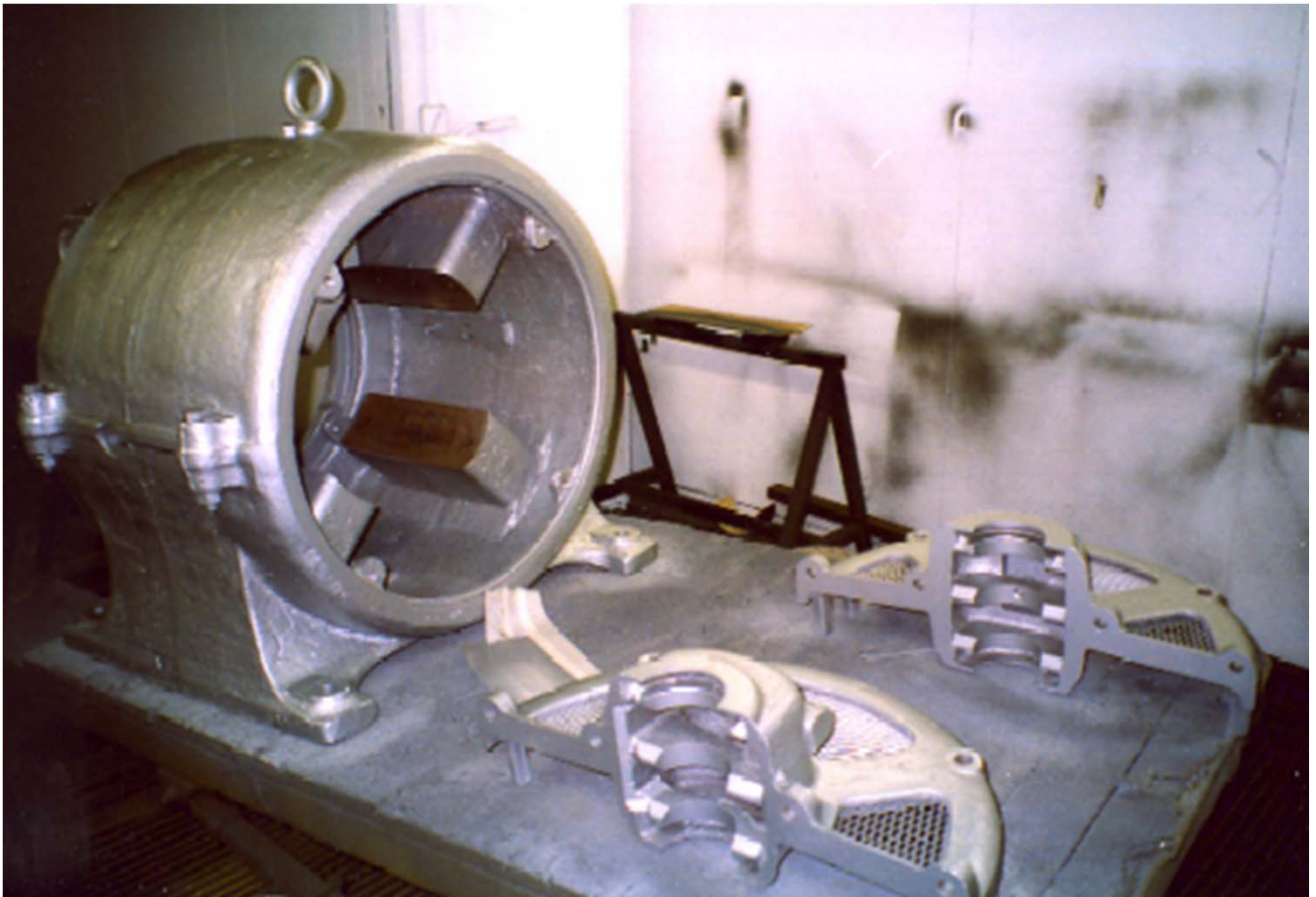




**Σχήμα 3.6.** Τα πέλματα των πόλων.

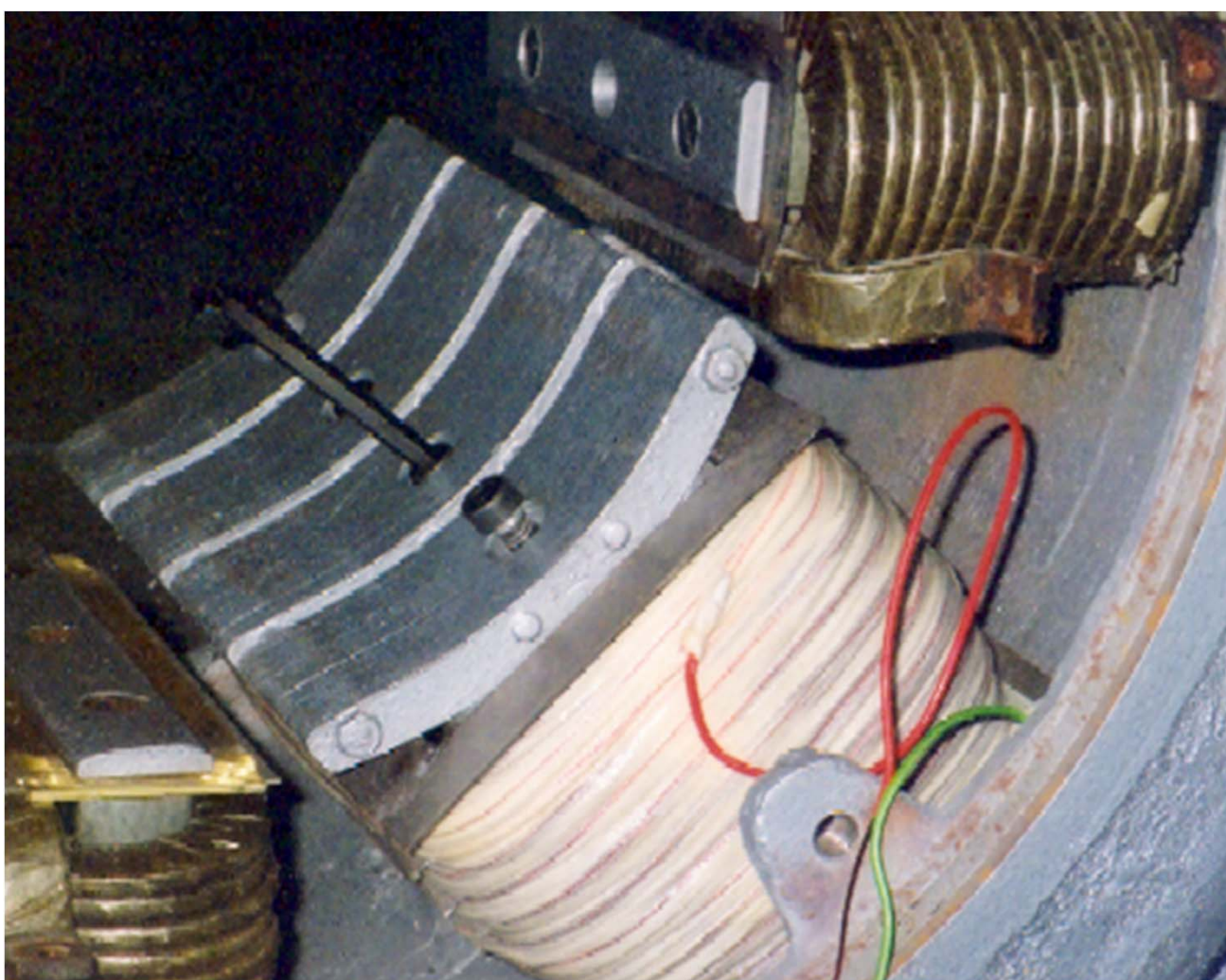


**Σχήμα 3.10.** Δρομέας μηχανής συνεχούς ρεύματος.

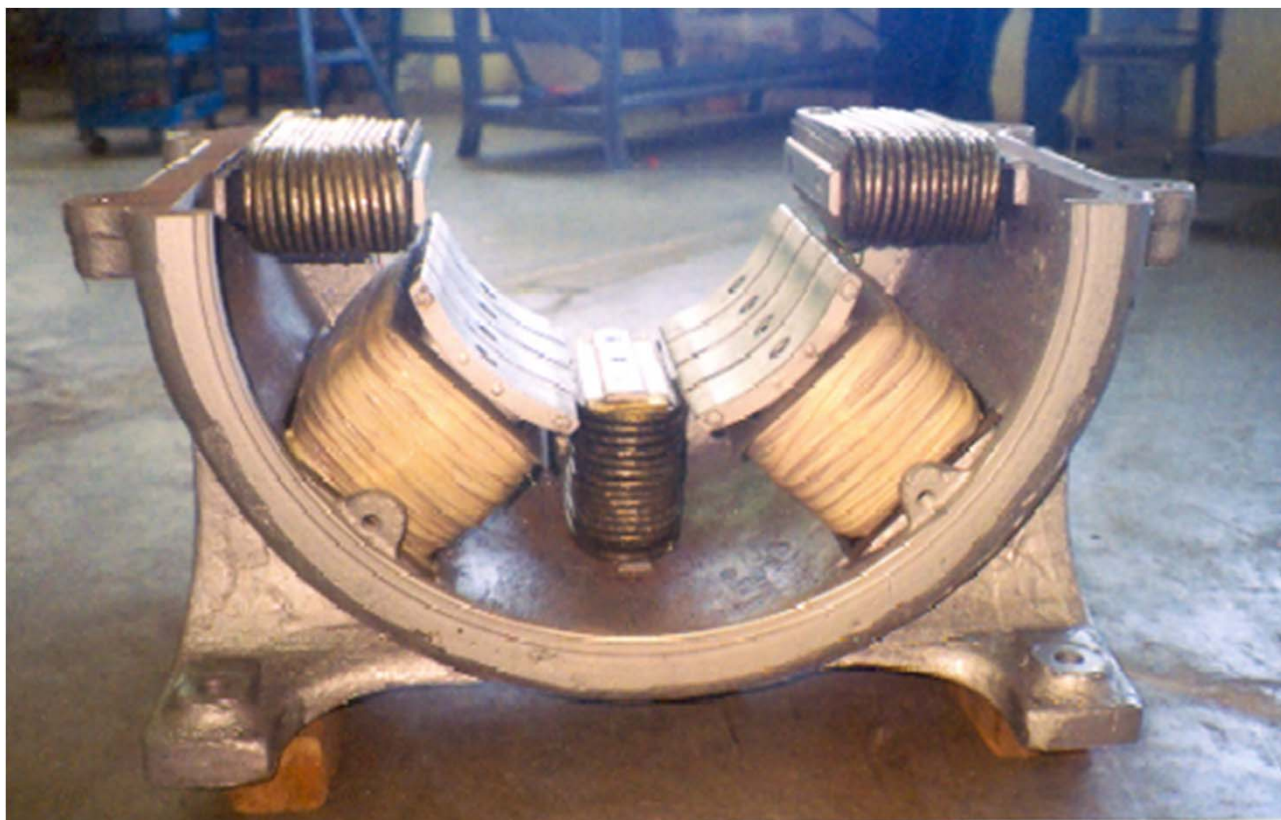


**Σχήμα 3.11.** Ο στάτης και τμήματα αυτού μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.





**Σχήμα 3.12.** Τοποθέτηση του πέλματος στον κύριο πόλο μηχανής Σ.Ρ.



**Σχήμα 3.13.** *Τυλίγματα και πέλματα τοποθετημένα στους πόλους μηχανής Σ.Ρ.*





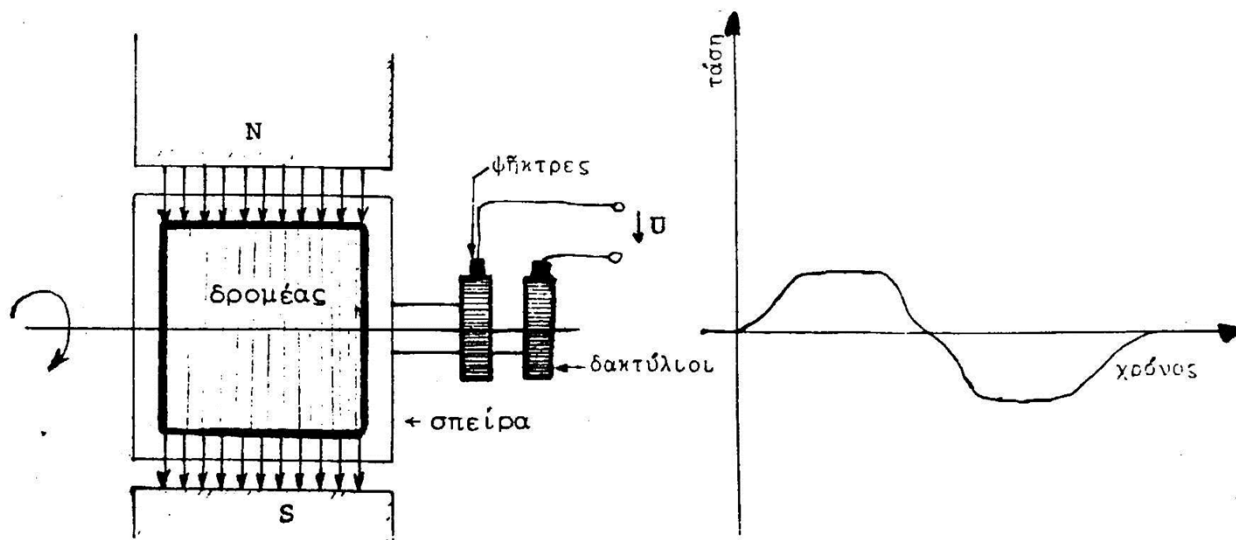
**Σχήμα 3.16.** Ο δρομέας τοποθετημένος εντός του στάτη.

## 3.2 Παραγωγή συνεχούς τάσεως

Ως γνωστό (σχέση 3.1) η τάση η οποία δημιουργείται σε έναν αγωγό κατά την κίνηση αυτού σχετικά προς ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο  $B$  δίνεται από τη σχέση:

$$U = vBl \quad (3.1)$$

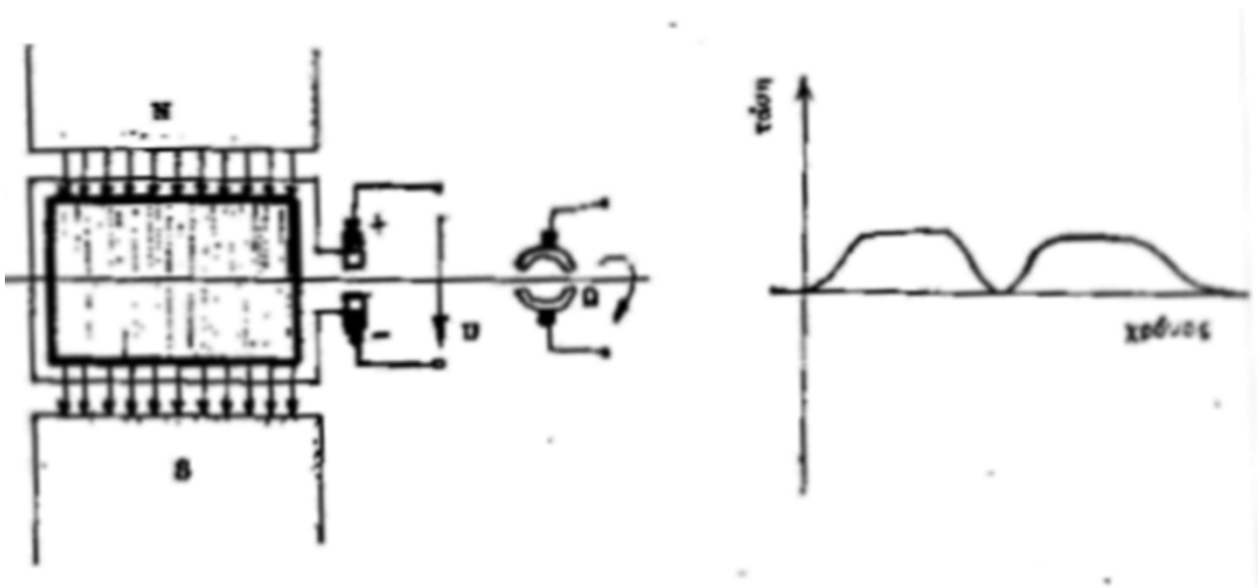
$U$ = τάση,  $B$ =ένταση μαγνητικού πεδίου,  $v$ =ταχύτητα αγωγού,  $l$ =ενεργό μήκος αγωγού, δηλαδή μήκος αγωγού που βρίσκεται υπό την επίδραση του πεδίου. Η σχέση αυτή ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι, ο αγωγός βρίσκεται κάθετα προς τις δυναμικές γραμμές και η ταχύτητα είναι κάθετη τόσο προς τον αγωγό όσο και προς τις μαγνητικές γραμμές.



Σχήμα 3.20.

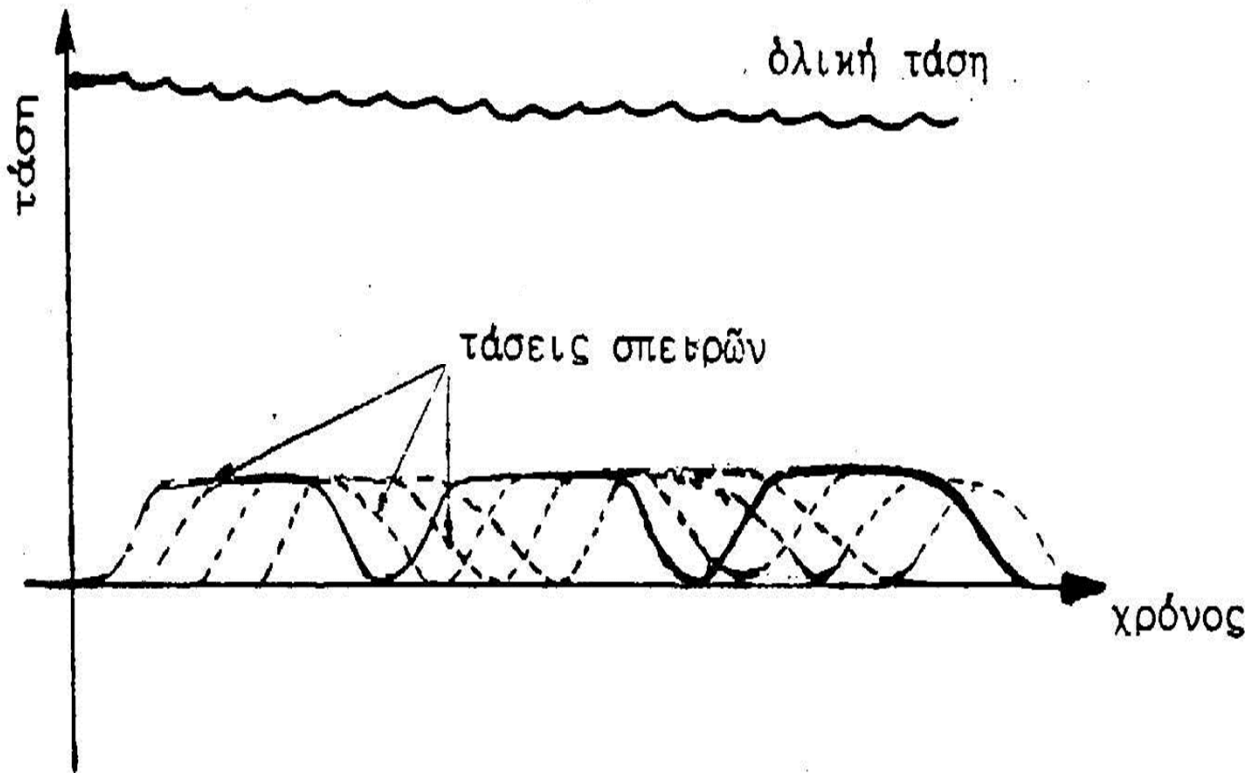
Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης δια της περιστροφής ενός δρομέα με μία σπείρα μέσα στο πεδίο ενός μαγνήτη, η οποία συνδέεται με τις ψήκτρες μέσω δύο δακτυλίων.

## Παραγωγή συνεχούς τάσεως με σύστημα ψηκτρών συλλέκτη



**Σχήμα 3.21.** Παραγωγή συνεχούς τάσεως δι' ανορθώσεως της επαγωγικής τάσης κατά μήκος της σπείρας μέσω ενός συλλέκτη με δύο τομείς.





**Σχήμα 3.22.** Συνεχής τάση δι' αθροίσεως των τάσεων περισσότερων σπειρών τοποθετημένων σε διαφορετικές αυλακώσεις.

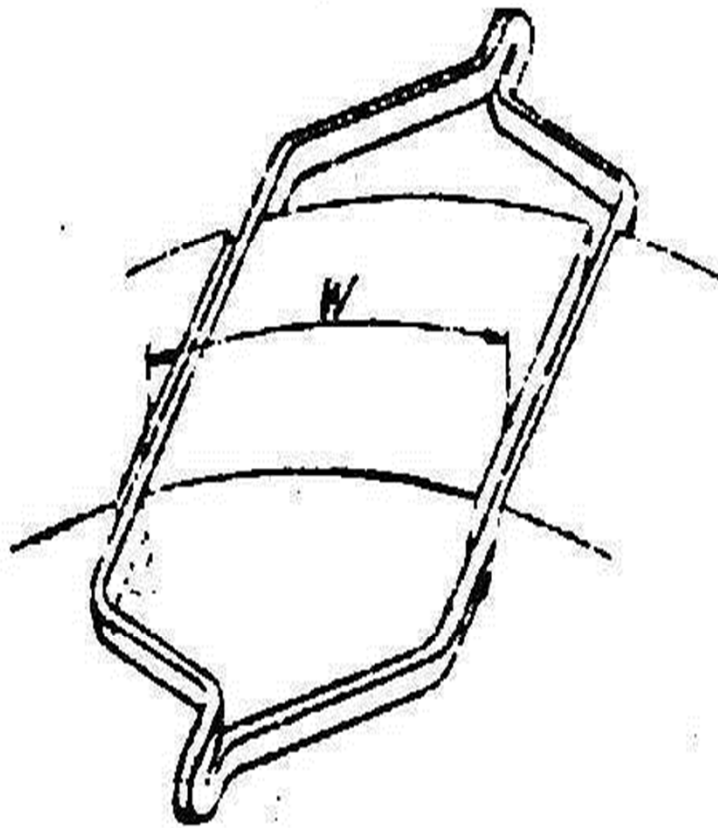
## **3.3 Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος**

### **3.3.1 Γενικές έννοιες**

Τα τυλίγματα των μηχανών Σ.Ρ., όπως και κάθε άλλης ηλεκτρικής μηχανής, είναι ένα από τα σημαντικότερα τμήματα αυτής. Επομένως είναι αυτονόητη η σκοπιμότητα να γίνει αναφορά στα βασικά τους θέματα.

Τα τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος αποτελούνται από πηνία του ιδίου αριθμού σπειρών και της ίδιας μορφής, τα οποία τοποθετούνται στις αυλακώσεις και η συνδεσμολογία μεταξύ τους γίνεται κατά ορισμένους τρόπους που θα αναφέρουμε παρακάτω.

Στο σχήμα 3.24 βλέπουμε ένα πηνίο (ή ομάδα) ενός τυλίγματος με διπλή στρώση, το οποίο έχει πλάτος  $w$ .

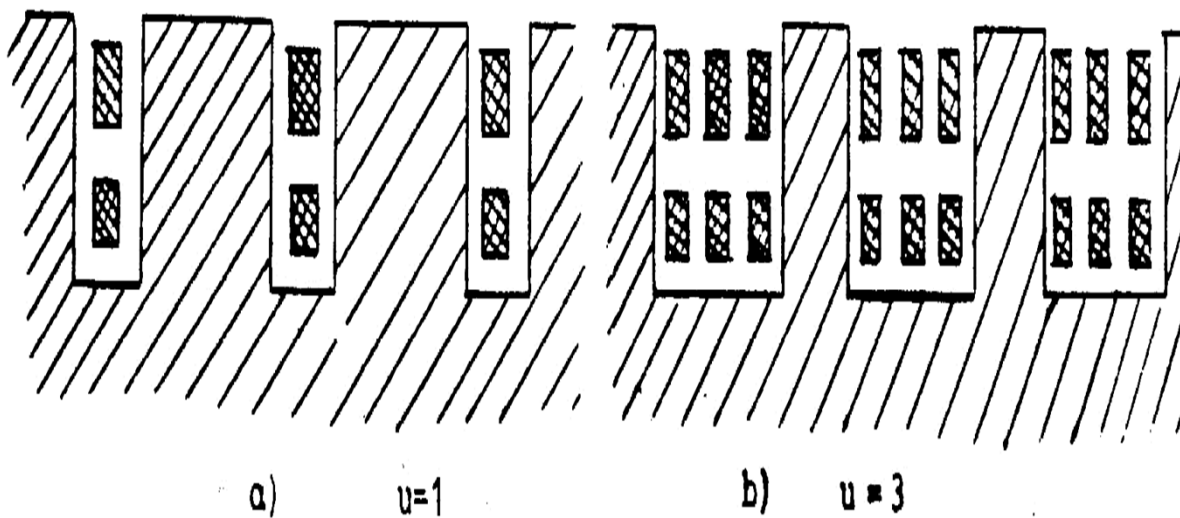


**Σχήμα 3.24.** Πηνίο τυλίγματος με διπλή στρώση

Εάν ο λόγος του αριθμού των τομέων  $K$  προς τον αριθμό των αυλάκων  $N$  είναι ακέραιος και μεγαλύτερος της μονάδας

$$\frac{K}{N} = u = \text{ακέραιος}, \quad (3.2)$$

τότε υπάρχουν σε κάθε αύλακα  $u$  πλευρές πηνίων η μία παράπλευρα της άλλης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.25b.



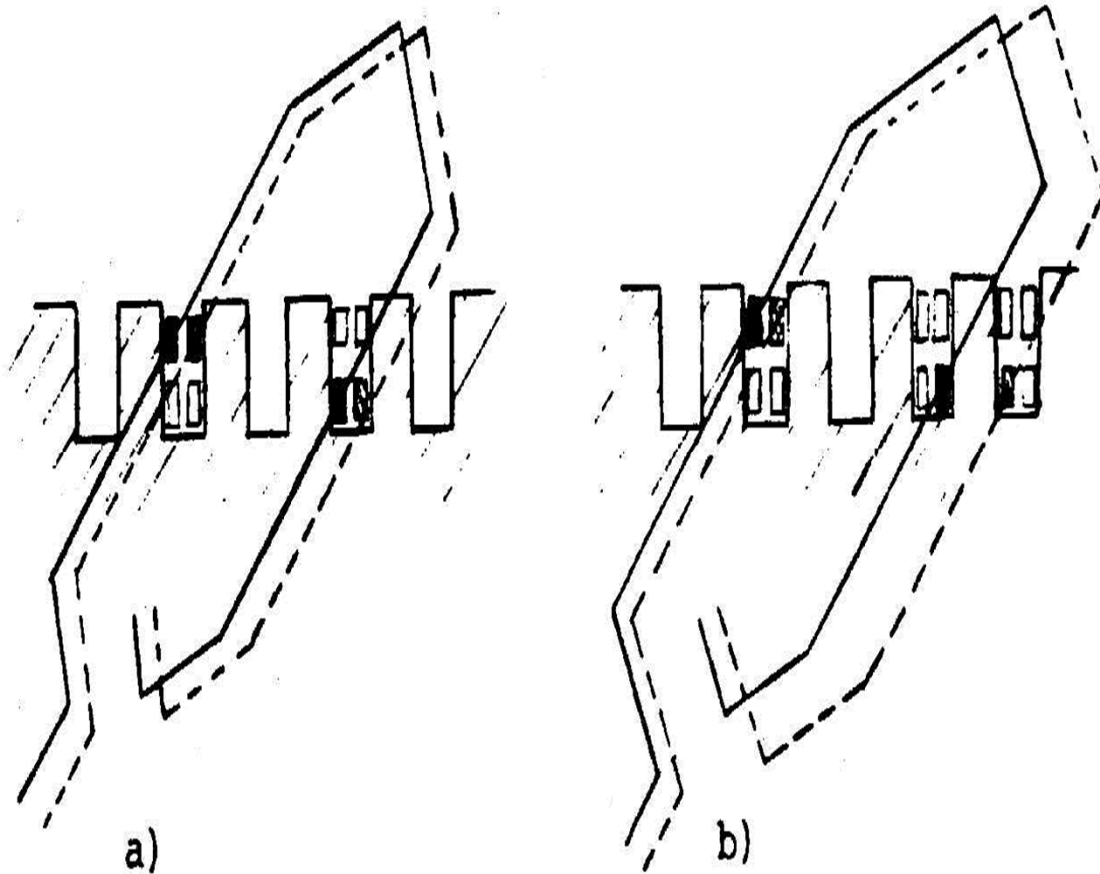
Σχήμα 3.25. Τύλιγμα διπλής στρώσεως με  $u=1$  και  $u=3$

Εάν  $K=N$ , τότε υπάρχουν τόσες ομάδες όσοι είναι οι τομείς, οπότε σε κάθε αύλακα μπαίνουν δύο πλευρές που ανήκουν σε διαφορετικά πηνία και η μία βρίσκεται επάνω από την άλλη.

Η απόσταση  $w$  του τόξου επί της περιφέρειας του δρομέα μεταξύ των δύο πλευρών ενός πηνίου λέγεται **πλάτος αυτού**. Εάν το πλάτος  $w$  είναι ίσο με το **πολικό βήμα  $\tau$**  δηλαδή με το τόξο, το οποίο ορίζεται μεταξύ των αξόνων δύο διαδοχικών πόλων, τότε αναπτύσσεται επί του πηνίου η **μέγιστη τάση εξ επαγωγής** κατά την περιστροφή του δρομέα

Πηνία τέτοιας μορφής ονομάζονται **διαμετρικά**, διότι στη μηχανή με δύο πόλους, η ευθεία γραμμή η οποία ενώνει τις πλευρές ενός πηνίου με πλάτος  $w=\tau$  είναι ίση με τη διάμετρο του δρομέα.

Υπάρχουν τυλίγματα στα οποία το πλάτος ενός πηνίου είναι μικρότερο ( $w<\tau$ ) ή μεγαλύτερο ( $w>\tau$ ) του πολικού βήματος, δηλαδή μία ευθεία μεταξύ των πλευρών του πηνίου αποτελεί μία χορδή στη διπολική μηχανή. Τυλίγματα αυτής της μορφής ονομάζονται **τυλίγματα χορδής**. Το χαρακτηριστικό των τυλιγμάτων αυτών είναι η **μειωμένη εκμετάλλευση** καθενός πηνίου όσον αφορά την παραγωγή τάσεως εξ επαγωγής.

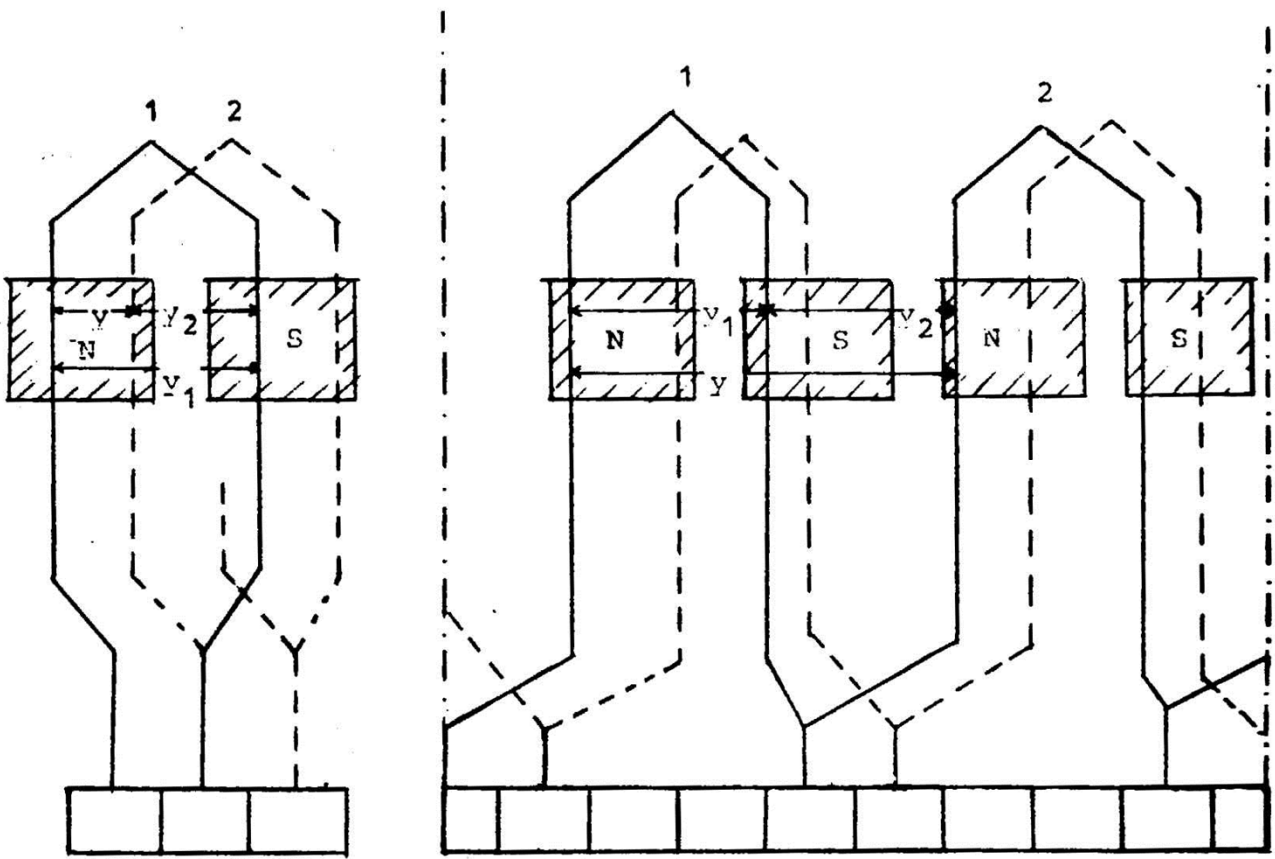


**Σχήμα 3.26.**

Δύο τύποι τυλιγμάτων.

a) Κανονικό.

b) Βαθμωτό.



**Σχήμα 3.27.**

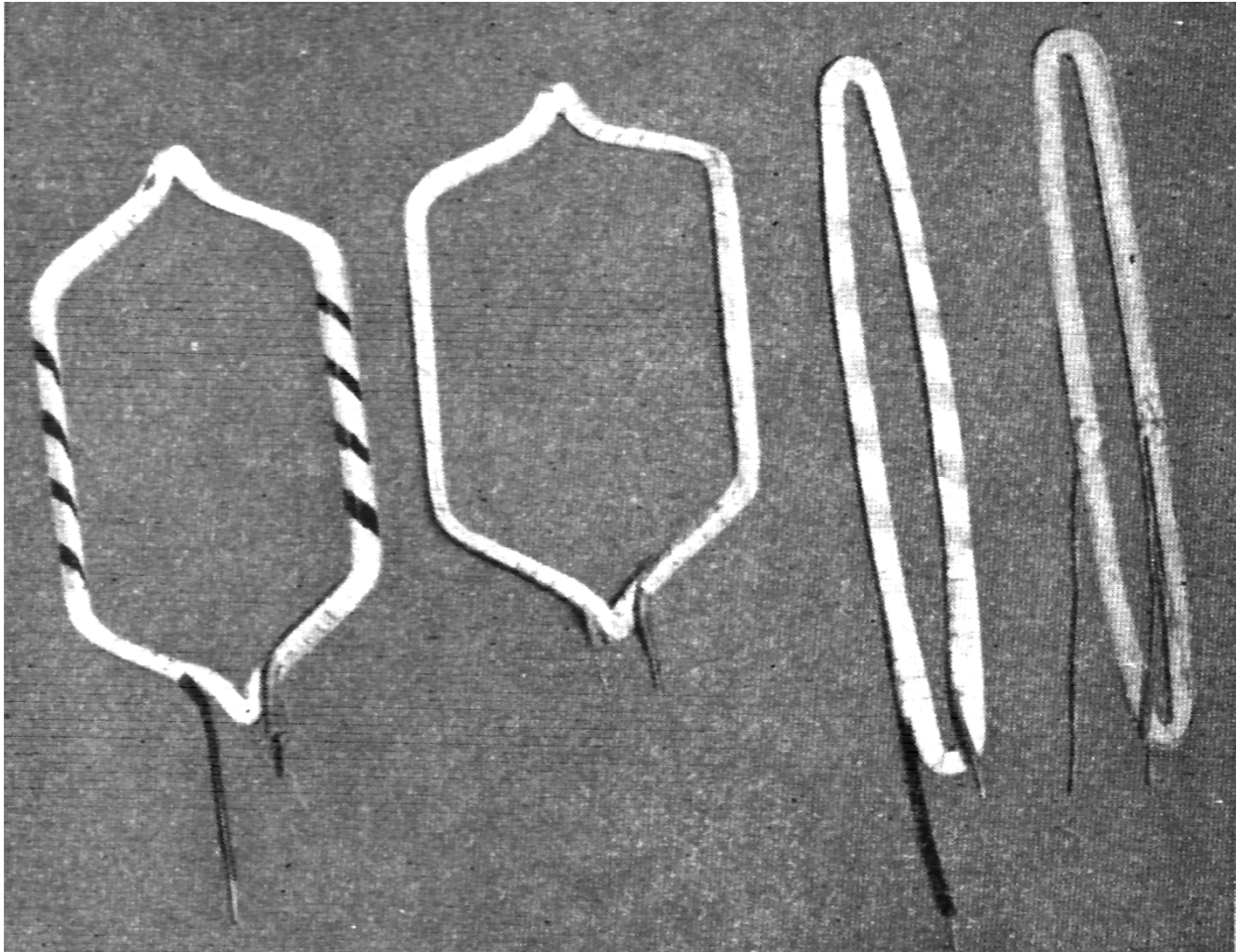
a) Βροχοτύλιγμα  
 b) Κυματοτύλιγμα τετραπολικής μηχανής.

Το βήμα τυλίγματος  $y$  το οποίο ορίζεται ως ο αριθμός των στοιχείων που συναντάμε, όταν ξεκινήσουμε από την πρώτη πλευρά ενός πηνίου μέχρι να συναντήσουμε την πρώτη πλευρά του αμέσως επόμενου πηνίου.

$$y = y_1 - y_2, \text{ για βροχοτυλίγματα} \quad (3.3)$$

$$y = y_1 + y_2, \text{ για κυματοτυλίγματα} \quad (3.4)$$

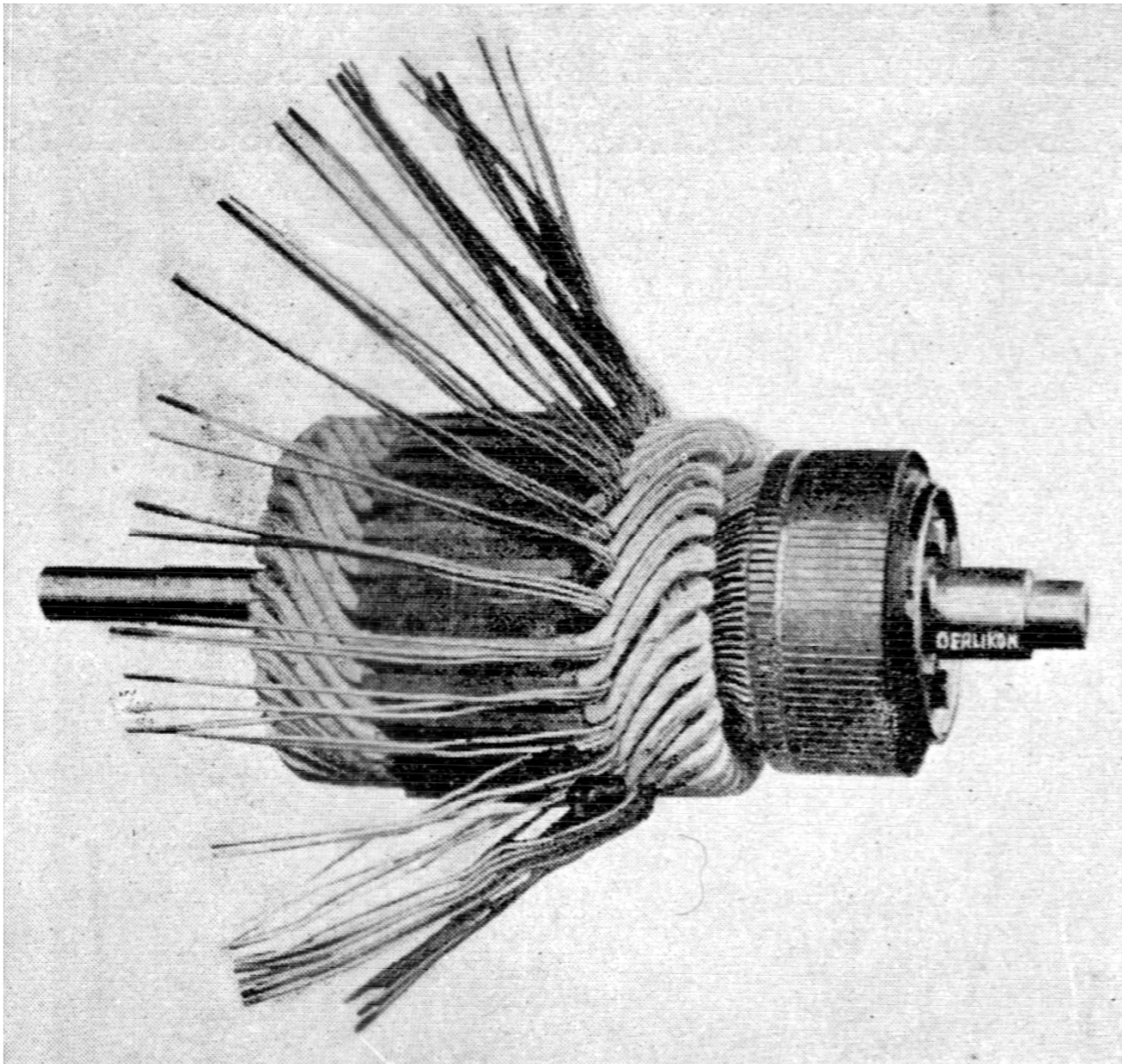
Οι αριθμοί  $y$ ,  $y_1$  και  $y_2$  πρέπει να είναι ακέραιοι και θετικοί.



Στάδια κατασκευής μιας ομάδας με πολλές σπείρες για ένα τύμπανο με τον ίδιο αριθμό ομάδων και αυλακώσεων (Siemens).

**Σχήμα 3.28 :** Εικόνες από την κατασκευή τυλιγμάτων μηχανών συνεχούς ρεύματος.





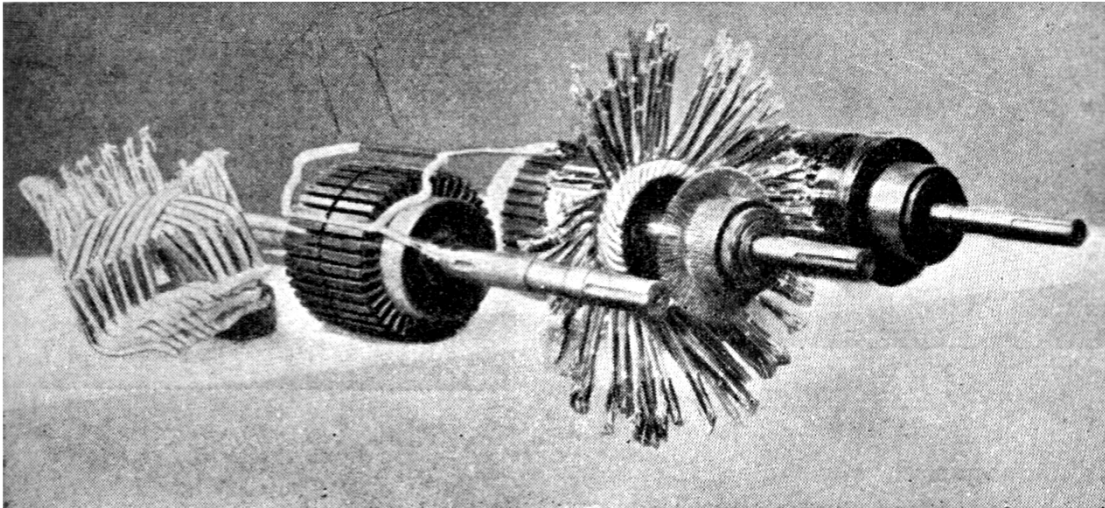
Τύλιγμα τυμπάνου συνδεδεμένο κατά το ήμισυ με τον συλλέκτη (Oerlikon).

**Σχήμα 3.29 :** Εικόνες από την κατασκευή τυλιγμάτων μηχανών συνεχούς ρεύματος.

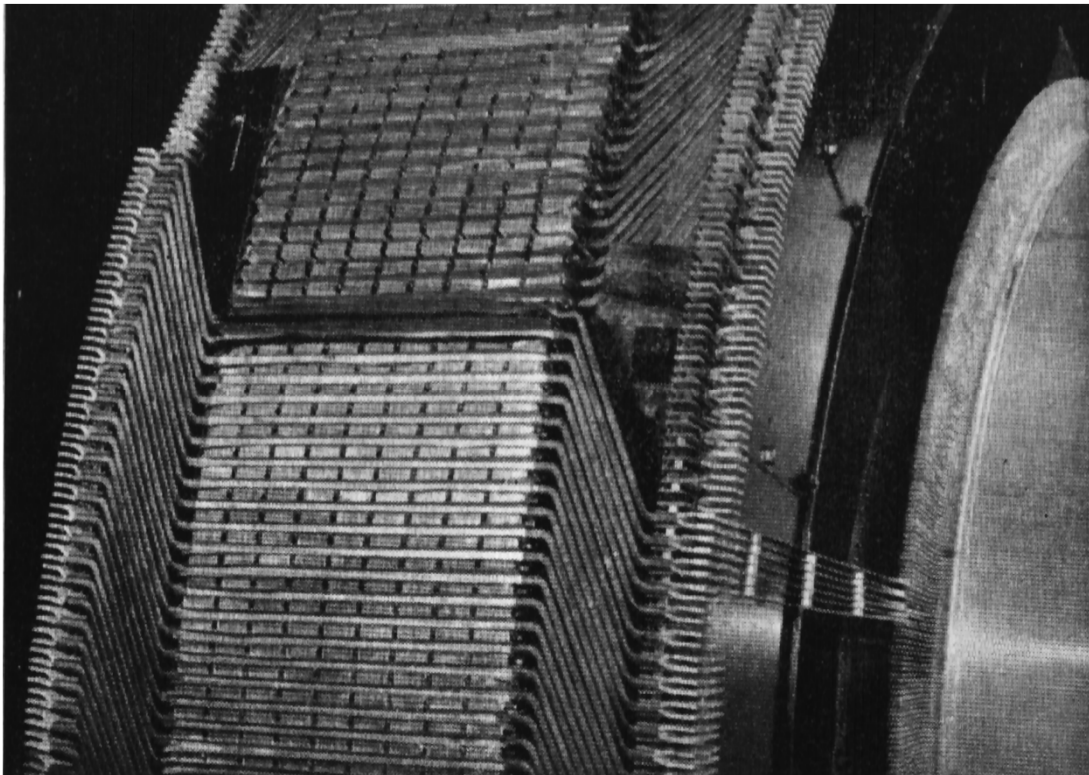


Τύμπανο με κυματοτύλιγμα (Westinghouse).

**Σχήμα 3.30 :** Εικόνες από την κατασκευή τυλιγμάτων μηχανών συνεχούς ρεύματος.

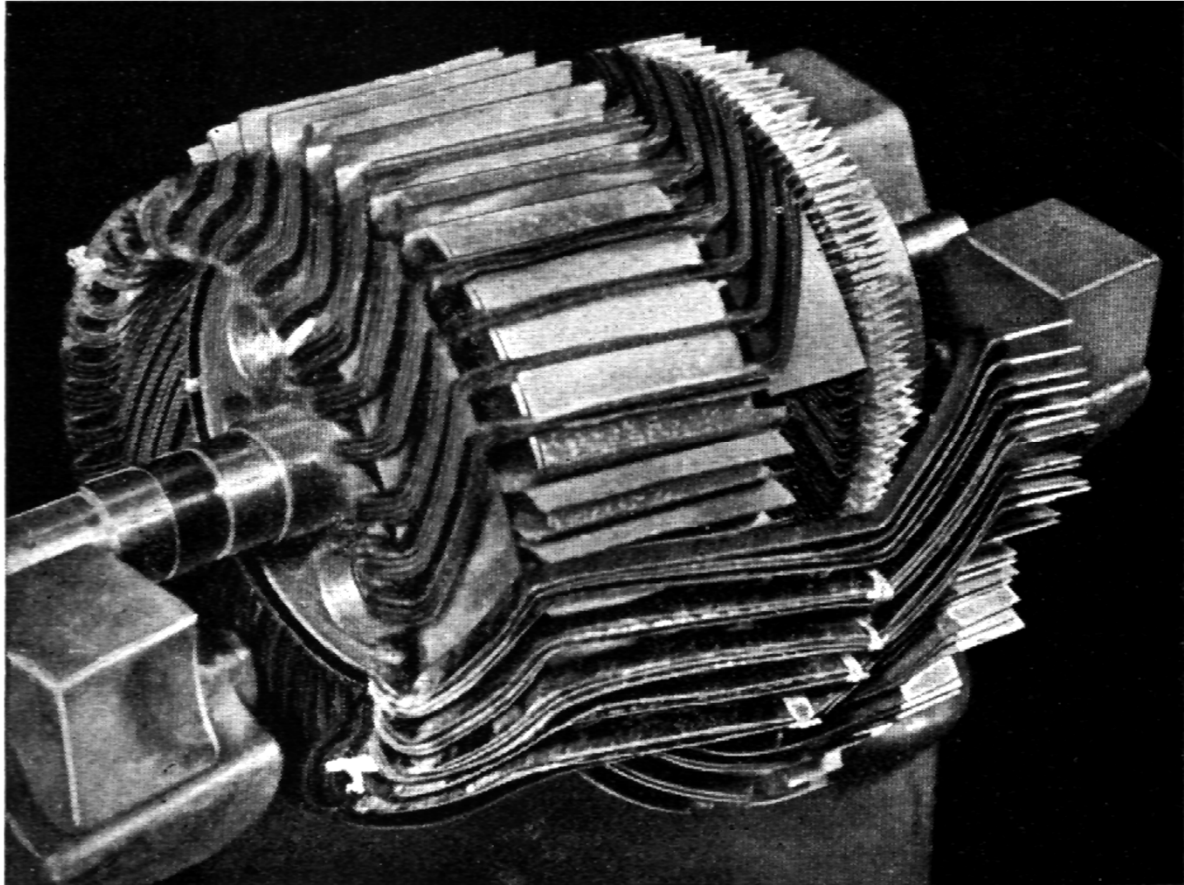


Στάδια κατασκευής του τυμπάνου μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος [Alsthom].



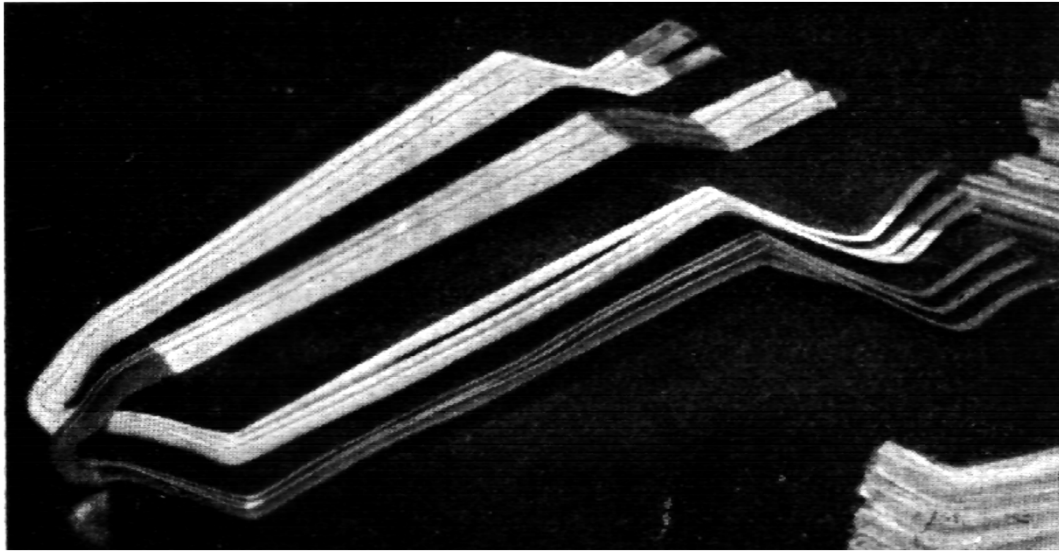
Τοποθέτηση ενός κυματοτυλίγματος στο τύμπανο μιας μεγάλης μηχανής Σ.Ρ. (Siemens).

**Σχήμα 3.31 :** Εικόνες από την κατασκευή τυλιγμάτων μηχανών Σ.Ρ..

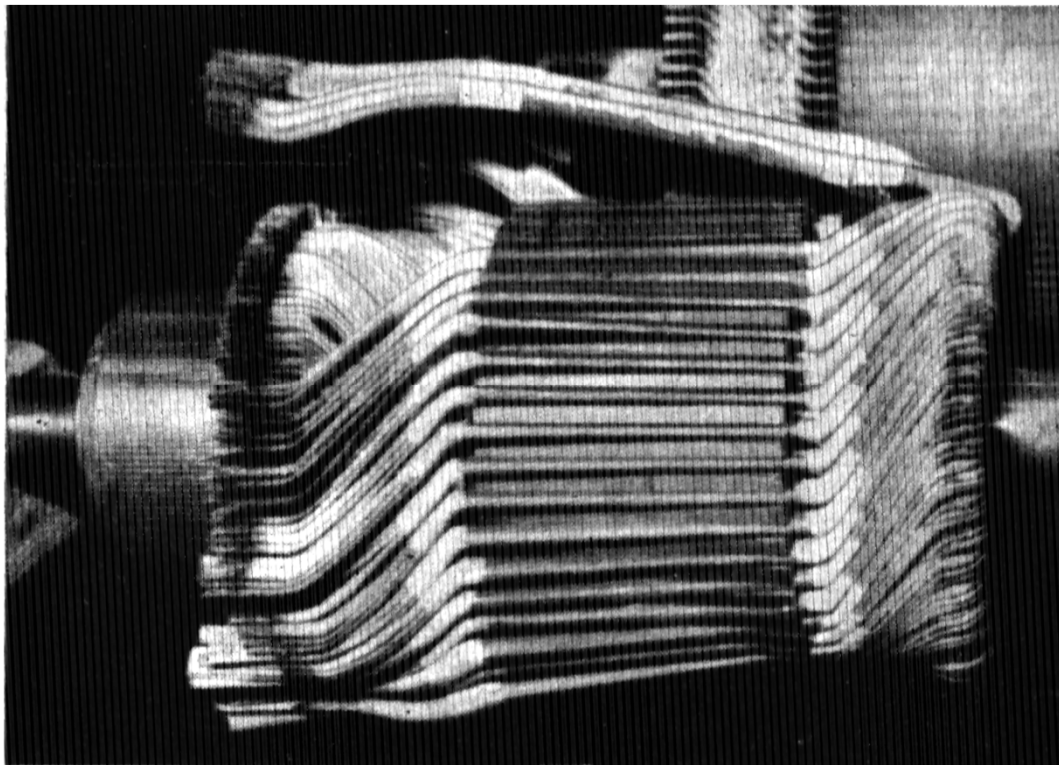


Τοποθέτηση ενός κυματοτυλίσματος με 2×4 μπάρες σε κάθετη αυλάκωση και 148 ομάδες σε 37 αυλα-κώσεις (ΑΕΓ).

**Σχήμα 3.32 :** Εικόνες από την κατασκευή τυλιγμάτων μηχανών Σ.Ρ..



a



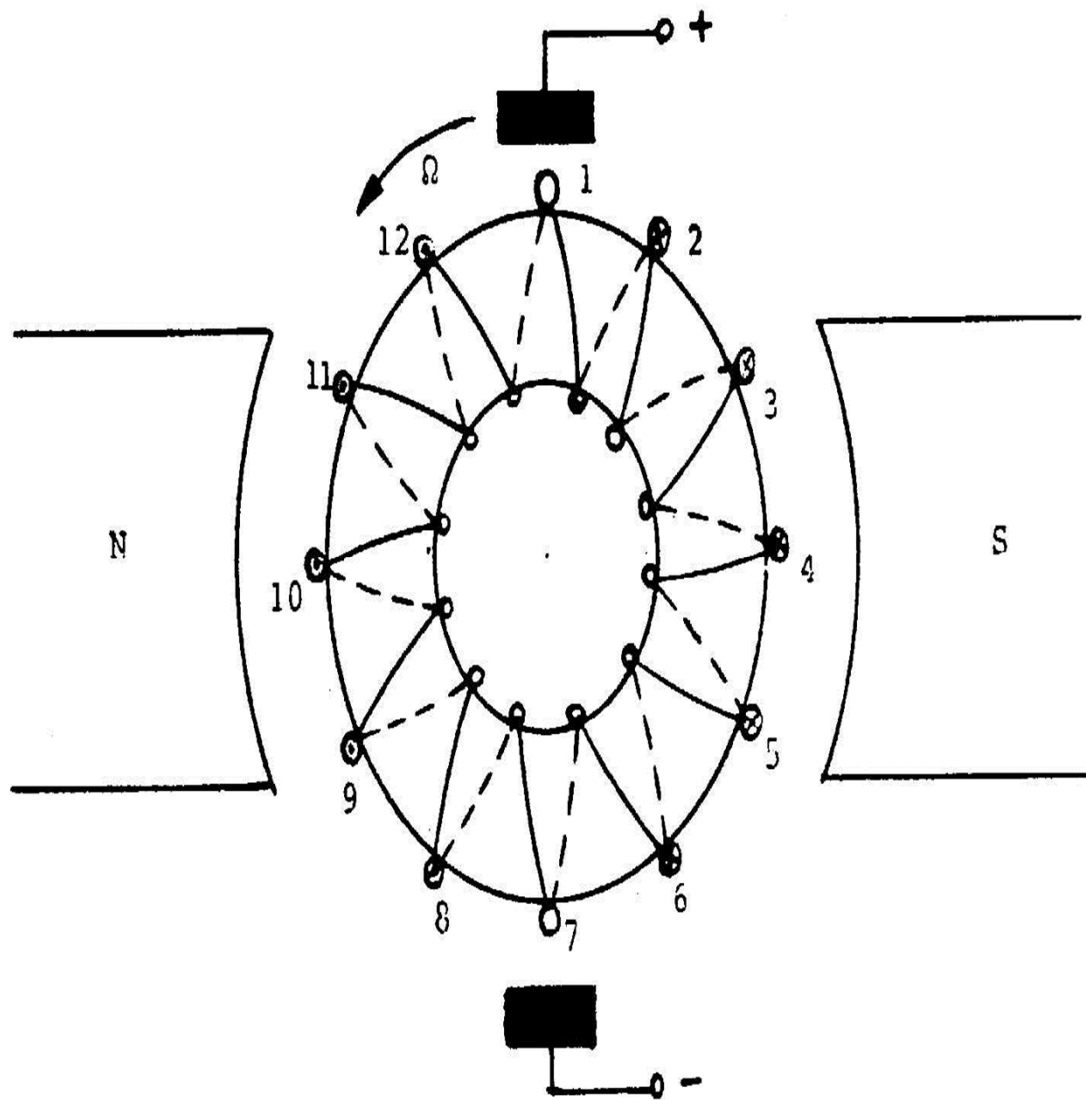
b

Τύμπανο με μπάρες 110V (Garbe, Lahmeyer & Co.) Ομάδες σε διάφορα στάδια διαμορφώσεως. Ημιτελές τύμπανο.

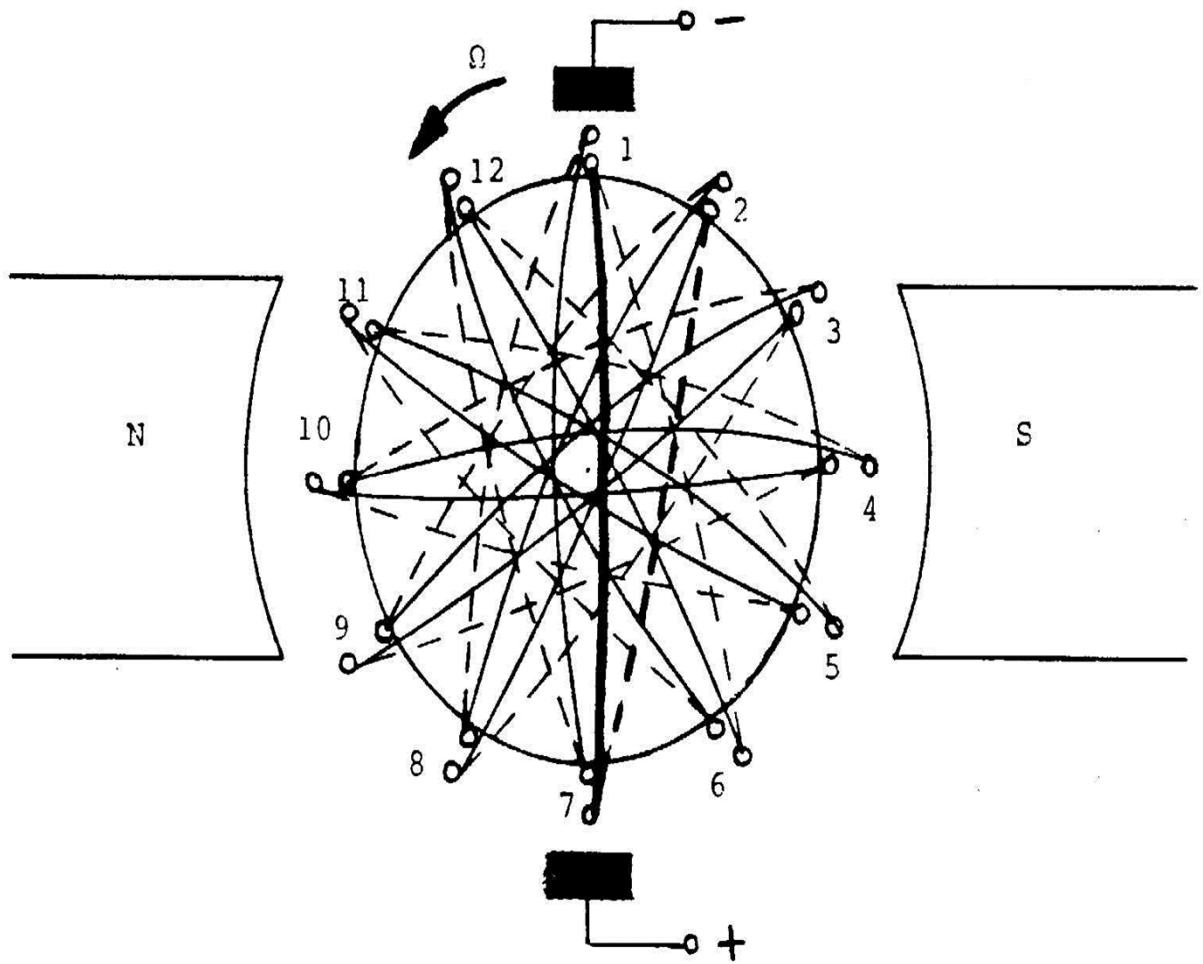
**Σχήμα 3.33 .** Εικόνες από την κατασκευή τυλιγμάτων μηχανών Σ.Ρ..



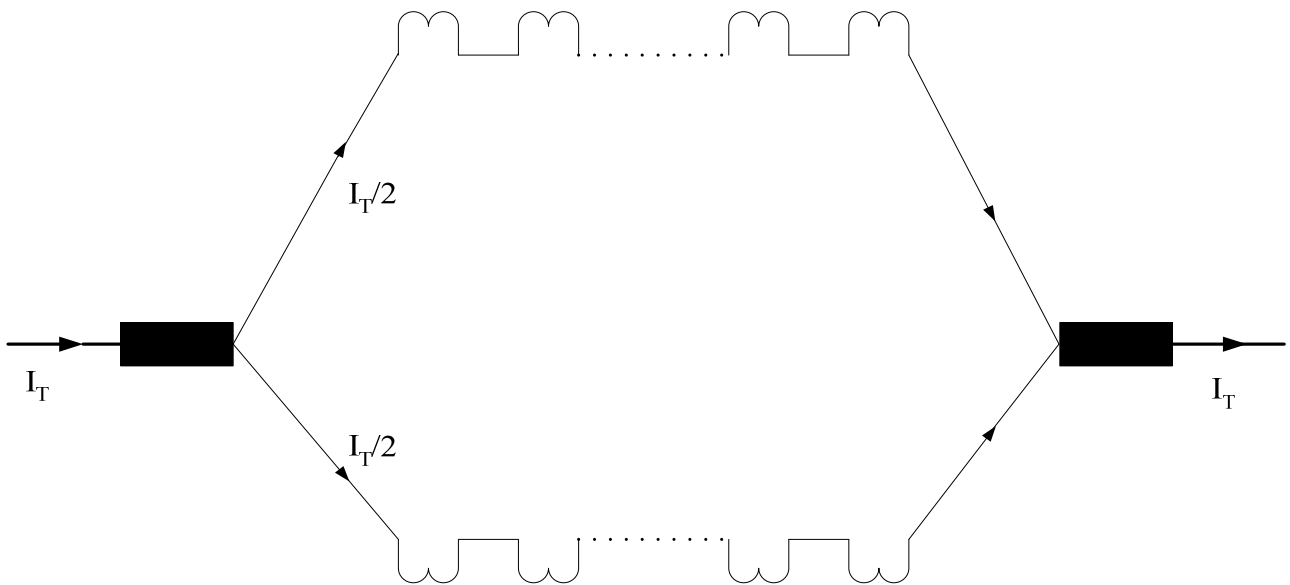
### 3.3.2 Βροχοτύλιγμα



Σχήμα 3.34. Δακτυλιοειδές τύλιγμα.



Σχήμα 3.35. Διαμετρικό βροχοτύλιγμα.



**Σχήμα 3.35.α.** Σχηματική παράσταση των παραλλήλων κλάδων του τυλίγματος μιας μηχανής Σ.Ρ.

Το ρεύμα του τυμπάνου  $I_T$  διακλαδίζεται σε ίσα ρεύματα στους παραλλήλους κλάδους

$$(I_{T\text{κλάδου}} = \frac{I_T}{2a}, \quad a = \text{αριθμός ζευγών}$$

παραλλήλων κλάδων).

Υπάρχουν και πολλαπλά τυλίγματα, όπου το συνολικό τύλιγμα αποτελείται από δύο, τρία, κ.ο.κ. ανεξάρτητα απλά τυλίγματα, τα οποία τοποθετούνται στις αυλακώσεις του ιδίου τυμπάνου και συνδέονται με τους τομείς του ιδίου συλλέκτης.



Τα απλά κυματοτυλίγματα έχουν πάντοτε δύο παραλλήλους κλάδους ανεξάρτητα από τον αριθμό των πόλων της μηχανής και συνεπώς από τον αριθμό των ψηκτρών αυτής.

Οι ψήκτρες χωρίζουν το τύλιγμα σε παράλληλους κλάδους, καθ' όσον το ρεύμα μέσω αυτών χωρίζεται σε δύο μέρη ακολουθώντας παράλληλες κατευθύνσεις, μέχρι να εξέλθει από την άλλη ψήκτρα. Στα τυλίγματα των σχημάτων (3.34) και (3.35) έχουμε δύο παράλληλους κλάδους, διότι επιλέξαμε δύο ψήκτρες. Οι αριθμοί των ψηκτρών τόσο στα βροχοτυλίγματα όσο και στα κυματοτυλίγματα είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων της μηχανής.

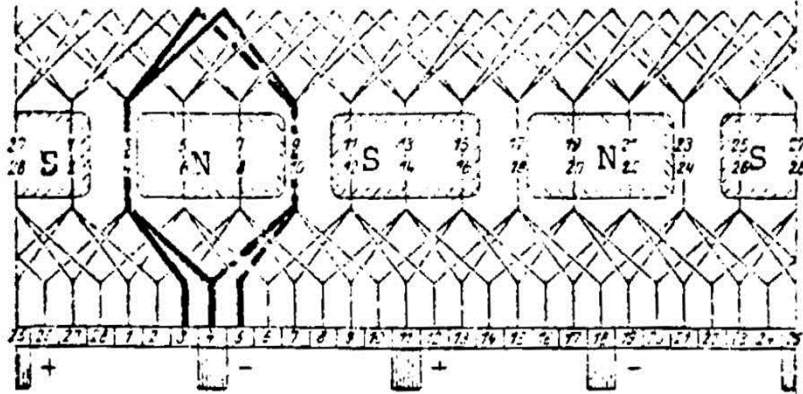
Οι ψήκτρες της ίδιας πολικότητας συνδέονται μεταξύ τους, ώστε ο αριθμός των παράλληλων κλάδων να είναι ανάλογος του αριθμού των πόλων. Οι αριθμοί αυτοί είναι ίσοι, εάν πρόκειται περί του απλού τυλίγματος, στο οποίο γειτονικά πηνία ενώνονται μεταξύ τους, οπότε ισχύει  $2a=2p$ , όπου  $2a =$  αριθμός των παράλληλων κλάδων και  $2p =$  αριθμός των πόλων.

Εάν μεταξύ των συνδεδεμένων πηνίων αφήσουμε  $m-1$  πηνία επί της περιφέρειας του δρομέα, τότε παίρνουμε ένα τύλιγμα με βήμα  $y = m$  και λέμε ότι έχουμε διπλό ( $m=2$ ) ή τριπλό ( $m=3$ ) κ.ό.κ τύλιγμα. Στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των παραλλήλων κλάδων προκύπτει από τη σχέση:

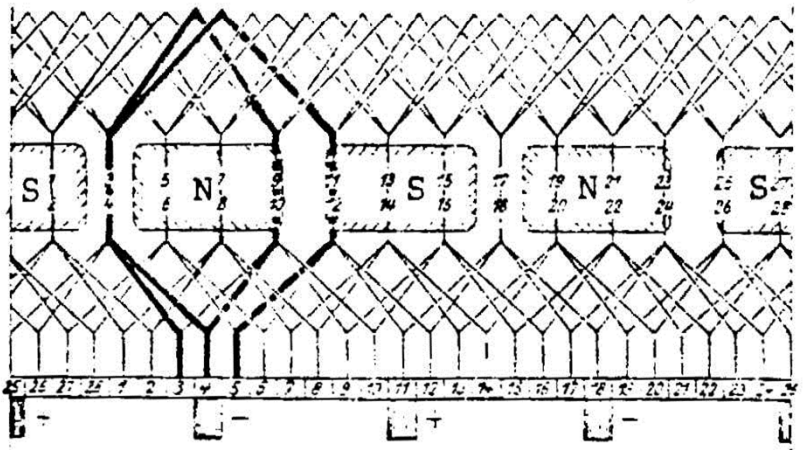
$$2\alpha = 2mp \quad (3.5)$$

Γενικά, ένα βροχοτύλιγμα λέγεται διπλό ή τριπλό κλπ. εάν αποτελείται από δύο, τρία κλπ. ανεξάρτητα τυλίγματα, που είναι τοποθετημένα πάνω στο ίδιο επαγωγικό τύμπανο και έχουν κοινό συλλέκτη.

a) κανονικό  
 $y_1=6, y_2=5$

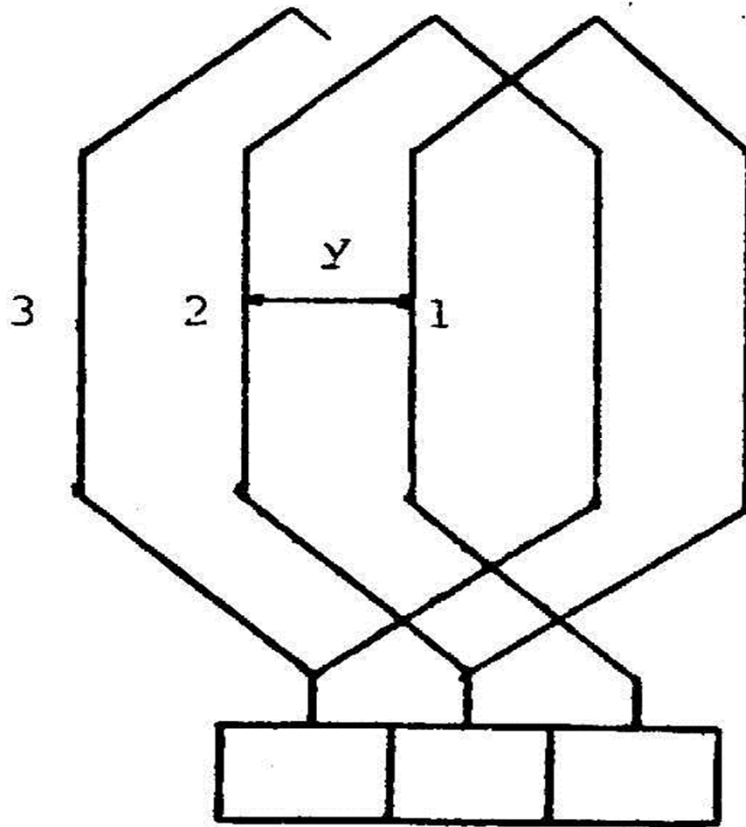


b) βαθμωτό  
 $y_1=7, y_2=6$



**Σχήμα 3.36.** Ανάπτυγμα ενός τετραπολικού απλού τυλίγματος.  
 a) κανονικό  $y_1=6, y_2=5$   
 b) βαθμωτό  $y_1=7, y_2=6$

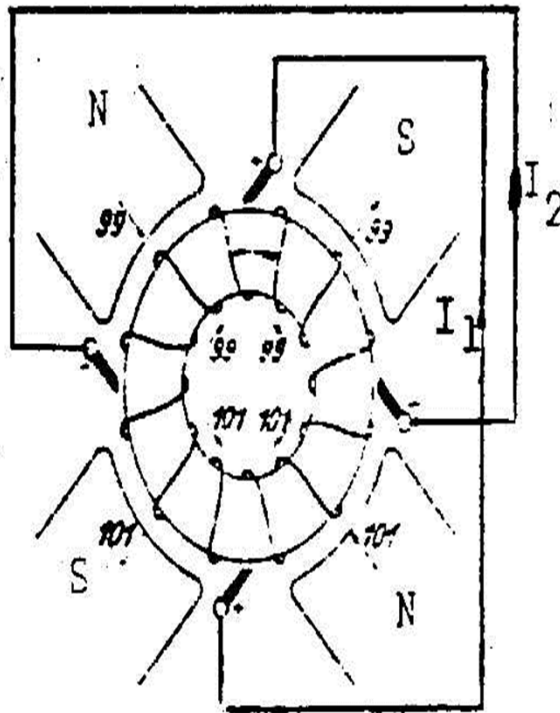
Τα τυλίγματα του σχήματος (3.36) φέρουν και μια άλλη ονομασία, λέγονται *αδιασταύρωτα τυλίγματα*, διότι τα άκρα ενός πηνίου, τα οποία οδηγούνται προς τους τομείς του συλλέκτη δεν διασταυρώνονται. Αντίθετα προς την μορφή αυτή υπάρχουν και τα *διασταυρωμένα τυλίγματα*, όπως δείχνει το σχήμα (3.37).



Σχήμα 3.37. Διασταυρωμένο τύλιγμα.

Επειδή τα αδιασταύρωτα τυλίγματα απαιτούν κατά τι μικρότερο αγωγό και επομένως λιγότερο μέταλλο, στην πράξη χρησιμοποιούνται πάντοτε αυτά.

### 3.3.3 Ισοδυναμικές συνδέσεις βροχοτυλιγμάτων



**Σχήμα 3.38.** Ρεύματα στους αγωγούς συνδέσεως λόγω ασυμμετρίας του πεδίου ενός δακτυλιοειδούς τυλίγματος.

Στους αγωγούς των ισοδυναμικών συνδέσεων ρέουν ρεύματα με μικρή ένταση, τα οποία αντιδρούν επί του ασύμμετρου πεδίου και ελαττώνουν την διαφορά των μαγνητικών ροών των διαφόρων πόλων (ένα είδος αυτοδιόρθωση).

Ένα βροχοτύλιγμα με  $2p$  πόλους θα έχει  $p$  σημεία με το ίδιο δυναμικό, όταν η μηχανή είναι συμμετρική και το πηλίκο:

$$\frac{N}{p} = \frac{k}{up} \quad (3.6)$$

είναι ένας ακέραιος αριθμός.

$N$ =αριθμός αυλακώσεων.

$k$ =αριθμός τομέων.

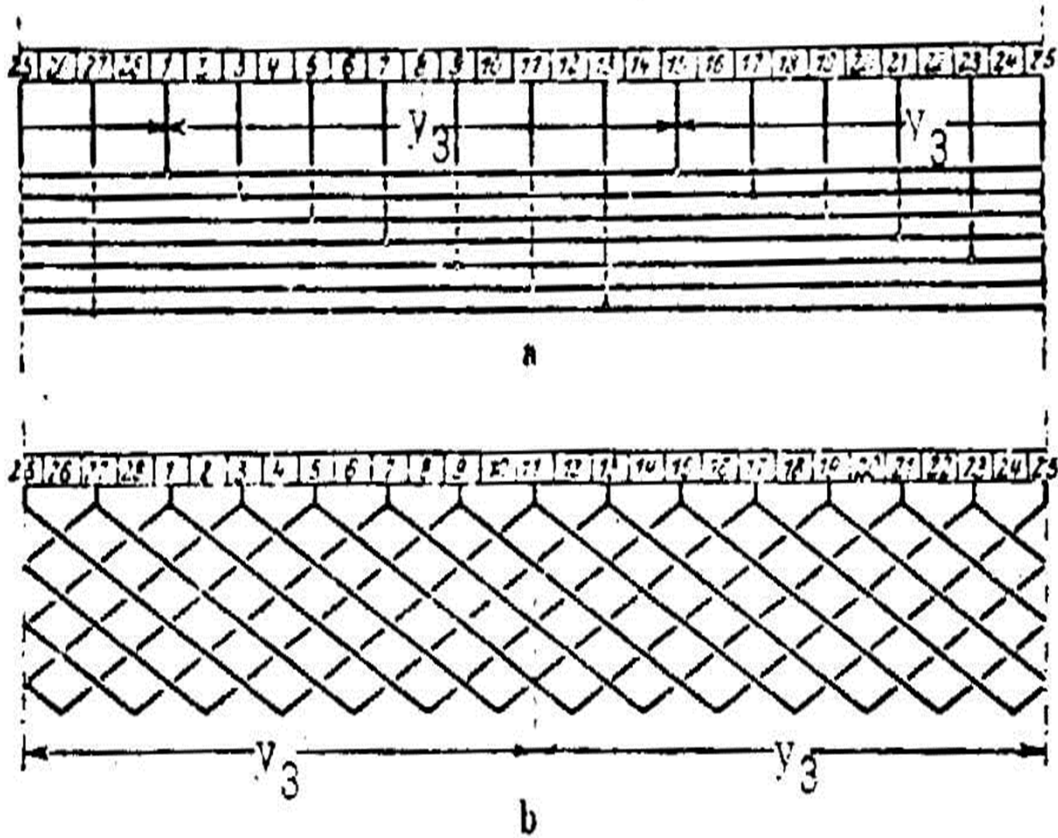
$u$ =αριθμός στοιχείων μιας στρώσης σε μια αύλακα.

$p$ =αριθμός ζευγών πόλων.

Ως βήμα ισοδυναμικών συνδέσεων ορίζεται το πηλίκο

$$y_3 = \frac{k}{p}, \quad (3.7)$$

το οποίο δηλώνει τον αριθμό των τομέων, που συναντάμε εάν ξεκινήσουμε από ένα τομέα και προχωρήσουμε μέχρι να συναντήσουμε τον επόμενο ισοδυναμικό τομέα. Στο σχήμα (3.39) παρουσιάζονται δύο μορφές των ισοδυναμικών συνδέσεων.



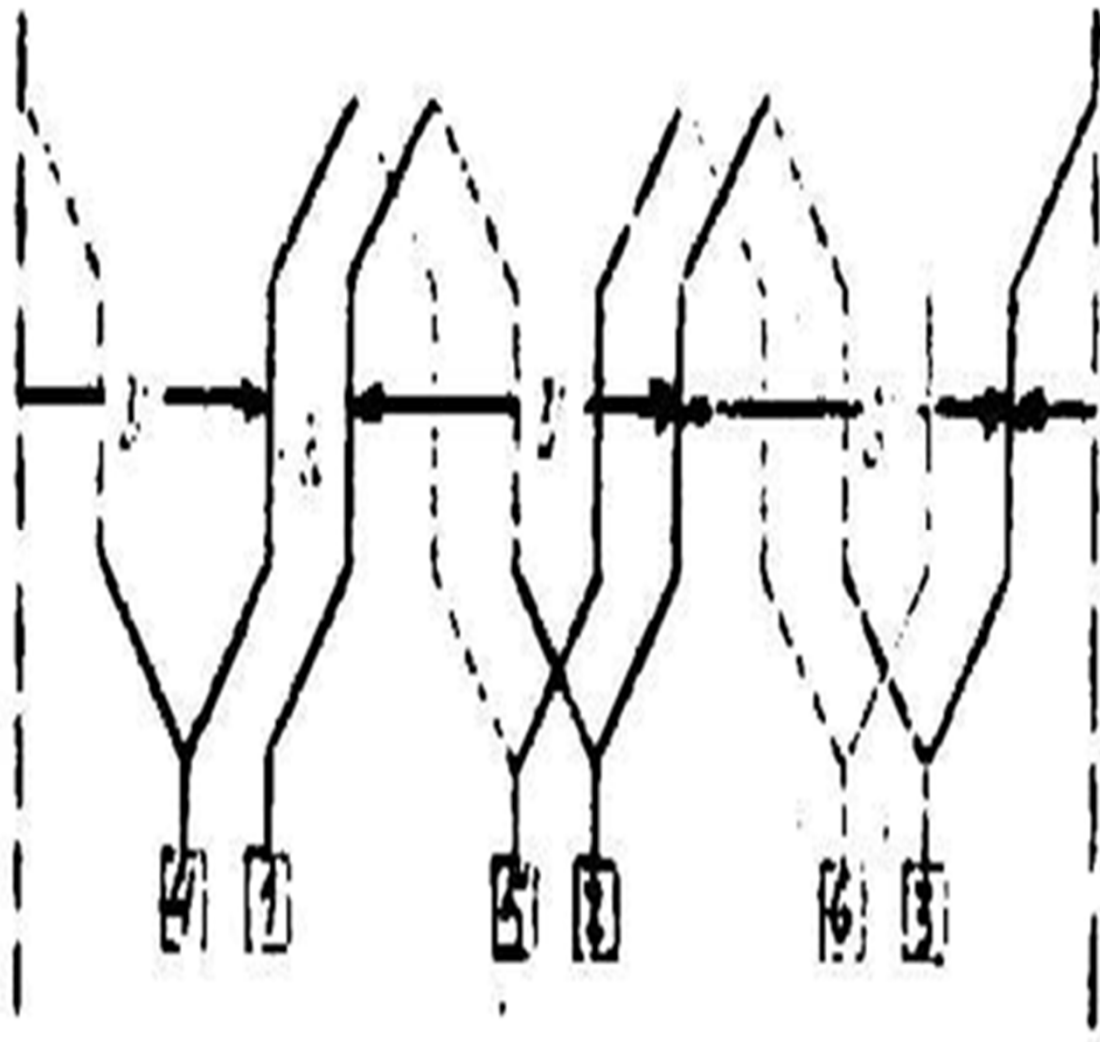
**Σχήμα 3.39.** Ισοδυναμικές συνδέσεις.

a) υπό μορφή δακτυλίων

b) υπό μορφή συνηθισμένων μετωπικών επιφανειών.



### 3.3.4 Κυματοτύλιγμα

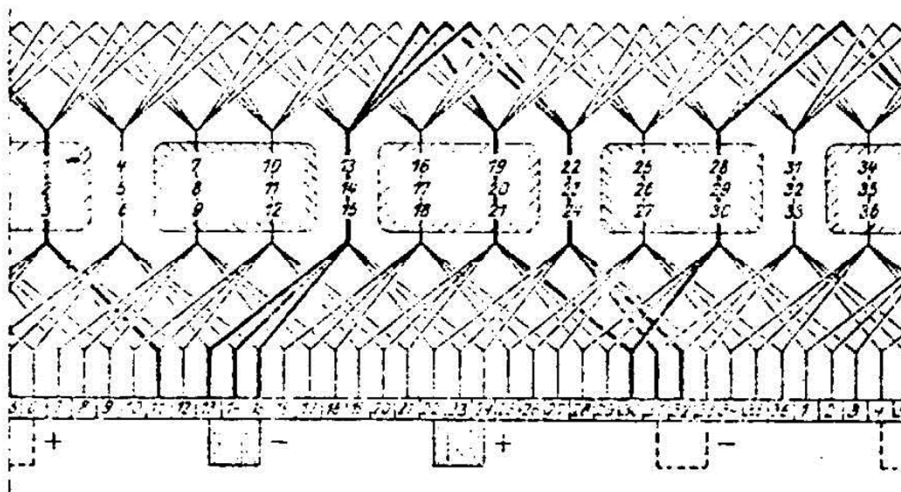


**Σχήμα 3.40 :** Ανάπτυγμα ενός εξαπολικού κυματοτυλίγματος.

Ενώ ένα βροχοτύλιγμα μπορεί να κατασκευασθεί με τυχόντα αριθμό τομέων ή πηνίων, για ένα κυματοτύλιγμα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$k = p\gamma \pm m \quad (3.8)$$

- $p$  = αριθμός ζευγών πόλων.
- $k$  = αριθμός τομέων.
- $\gamma$  = βήμα τυλίγματος.
- $m$  = αριθμός πολλαπλότητας.



**Σχήμα 3.41 .** Διπλό βαθμωτό κυματοτύλιγμα  $u=3$ ,  $p=2$ ,  $\gamma_1=8$ ,  $\gamma_2=9$ ,  $\gamma=17$ .

Γενικά ισχύει:

$$2\alpha = 2m \quad (3.9)$$

Λόγω της διάταξης αυτής χρειαζόμαστε μόνο δύο ψήκτρες. Για το βήμα τυλίγματος ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\gamma = \frac{k \pm m}{p} = \frac{k \pm \alpha}{p} \quad (3.10)$$

Είναι αυτονόητο ότι οι αριθμοί  $\gamma$ ,  $k$ ,  $\alpha$ ,  $p$  πρέπει να είναι ακέραιοι. Στο σχήμα (3.41) βλέπουμε ένα διπλό βαθμωτό και αδιασταύρωτο κυματοειδές τύλιγμα με  $u=3$  πλευρές πηνίων ανά στρώση σε μία αυλάκωση.

Ο αριθμός των τομέων είναι  $k = u \times N = 36$  επειδή ο αριθμός των αυλακώσεων είναι  $N=12$ . Σύμφωνα με τον τύπο (3.10), το βήμα του τυλίγματος θα είναι:

$$y = \frac{36-2}{2} = 17 , \quad \text{επειδή } p=2, m=2, \quad (3.11)$$

επιπρόσθετα δε, διότι για την αδιασταύρωτη μορφή ισχύει το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση (3.10).

Τα κυματοειδή τυλίγματα δεν μπορούν να κατασκευαστούν για όλες τις τιμές του  $u$  και του  $\alpha$  για δεδομένο  $p$ . Παραδείγματος χάρη για  $u=3$ ,  $p=2$  και  $\alpha=1$  προκύπτει σύμφωνα με την σχέση (3.10).

### 3.3.5 Ισοδυναμικές συνδέσεις κυματοτύλιγματος

Όπως είδαμε, εάν έχουμε ένα βροχοτύλιγμα, για να ελαττώσουμε τα εσωτερικά ρεύματα λόγω ασυμμετρίας, χρησιμοποιούμε τις ισοδυναμικές συνδέσεις. Στο κυματοειδές τύλιγμα κάθε ένας παράλληλος κλάδος συνίσταται από περισσότερες περιφορές, στις οποίες πάντοτε ανήκουν  $p$  πηνία σε σειρά. Τα πηνία αυτά βρίσκονται κάτω από διαφορετικούς πόλους της μηχανής.

Επομένως δεν υπάρχει η ανάγκη να εξουδετερώσουμε την τυχούσα ανισότητα των μαγνητικών ροών εκάστου πόλου, διότι σε κάθε παράλληλο κλάδο εμφανίζονται γενικά οι ίδιες ανισότητες, ώστε συνολικά οι τάσεις των παραλλήλων κλάδων να είναι ίσες.

Εν τούτοις σε πολλαπλά κυματοειδή τυλίγματα, είναι δυνατόν να έχουμε άνιση κατανομή του ρεύματος στους παράλληλους κλάδους, η οποία κυρίως οφείλεται στην άνιση αντίσταση μεταξύ των ψηκτρών και τομέων κατά την επαφή. Η άνιση κατανομή του ρεύματος έχει ως συνέπεια τη διατάραξη της ομοιόμορφης κατανομής της τάσης κατά μήκος του συλλέκτη, πράγμα το οποίο είναι δυνατόν να επιφέρει σπινθηρισμούς.

Προς αποφυγή αυτών συνδέουμε εκείνα τα σημεία του τυλίγματος, τα οποία στην ομοιόμορφη κατανομή της τάσης θα είχαν την ίδια τάση. Για απλά τυλίγματα ( $m=\alpha=1$ ) δεν έχουμε ισοδυναμικές συνδέσεις. Στα πολλαπλά τυλίγματα έχουμε  $\alpha$  ισοδυναμικά σημεία και  $k/\alpha$  ομάδες, εάν  $N/\alpha = k/\alpha = \text{ακέραιος}$ .

## 3.3.6 Χρησιμοποίηση βροχοτυλιγμάτων και κυματοτυλιγμάτων

### Βροχοτύλιγμα

- Αριθμός παραλλήλων κλάδων ίσος με τον αριθμό των πόλων της μηχανής.
- Τροφοδοτείται με μεγάλο ρεύμα, διότι το ολικό ρεύμα κατανέμεται σε πολλούς παράλληλους κλάδους.
- Στο βροχοτύλιγμα χρειαζόμαστε πολλούς αγωγούς μικρότερης διατομής για μηχανές μικρής ισχύος.

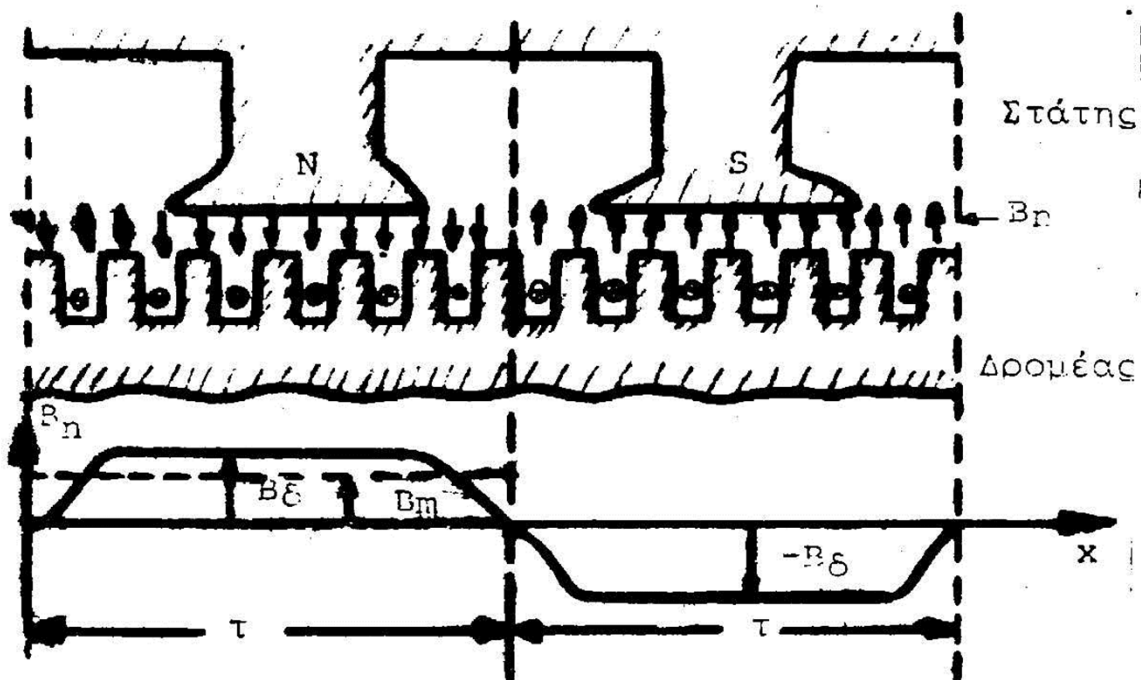
### Κυματοτύλιγμα

- Δύο παράλληλοι κλάδοι
- Μεγαλύτερη τάση εξ επαγωγής σε σύγκριση προς το βροχοτύλιγμα με τον ίδιο αριθμό πόλων και αγωγών, διότι έχουμε περισσότερους αγωγούς συνδεδεμένους σε σειρά.
- Κατάλληλο για μηχανές μικρής ισχύος

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι για δεδομένη ισχύ, εάν επιθυμούμε μικρή τάση και μεγάλα ρεύματα καταλληλότερο είναι το βροχοτύλιγμα, ενώ για μεγάλη τάση και μικρό ρεύμα πιο κατάλληλο είναι το κυματοτύλιγμα.

## 3.4 Τάση εξ επαγωγής, τάση στους ακροδέκτες, ρευματικό στρώμα και ηλεκτρομαγνητική ροπή

### 3.4.1 Τάση εξ επαγωγής



Σχήμα 3.42 . Κατανομή της μαγνητικής επαγωγής.



Στην περιοχή κάτω από τους πόλους η μαγνητική επαγωγή έχει σταθερή τιμή. Στο μέσο μεταξύ δύο ετερόνυμων πόλων η μαγνητική επαγωγή μηδενίζεται, διότι εκατέρωθεν της θέσης αυτής έχει αντίθετη φορά, λόγω αλλαγής της πολικότητας. Η θέση αυτή λέγεται ουδέτερη ζώνη.

Η μέγιστη τιμή της επαγωγής στο διάκενο παρίσταται με το σύμβολο  $B_{\delta}$ . Λέγοντας μαγνητική ροή σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, όταν κάνουμε τον υπολογισμό της τάσης, εννοούμε την ολική ροή ενός πόλου, η οποία ξεκινάει από αυτόν και εισέρχεται στην επιφάνεια του τυμπάνου. Αυτή υπολογίζεται με το ολοκλήρωμα:

$$\Phi = \int_0^{\tau} B_n l dx \quad , \quad (3.11.α)$$

διότι η κάθετη συνιστώσα  $B_n$  είναι συνάρτηση του  $x$ , η δε ροή δια της στοιχειώδους επιφάνειας  $dA=l dx$  είναι :

$$d\Phi = B_n(x) l dx \quad (3.11.β)$$

Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει εάν θεωρήσουμε την κάθετη συνιστώσα σταθερή κατά μήκος του πολικού βήματος  $\tau$  και ότι έχει τιμή  $B_m$  ίση με την μέση τιμή της επαγωγής  $B_n(x)$ . Τότε η μαγνητική ροή  $\Phi$  αποκτά την τιμή:

$$\Phi = \tau l B_m \quad (3.12)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση

$$U = vBl$$

σε ένα περιστρεφόμενο αγωγό με ταχύτητα

$$v = D\pi n = 2\tau r n = 2\tau f$$

θα αναπτύσσεται κατά μέσο όρο η τάση:

$$U_{\varepsilon\pi 1} = 2\tau f l B_m = 2f\Phi \quad (3.13)$$

Το τύλιγμα έχει  $z$  αγωγούς εντός των αυλακώσεων και  $2\alpha$  παράλληλους κλάδους, ώστε σε κάθε κλάδο να αντιστοιχούν  $\frac{z}{2\alpha}$  αγωγοί. Τότε η ολική τάση εξ επαγωγής έχει μέση τιμή:

$$\begin{aligned} U_{\varepsilon\pi} &= \frac{z}{2\alpha} U_{\varepsilon\pi 1} = \frac{z}{2\alpha} 2 f \Phi = \frac{z}{\alpha} p n \Phi = \\ &= \frac{p}{\alpha} z n \Phi = \frac{p}{\alpha} z \frac{\Omega}{2\pi} \Phi = C_U \Omega \Phi \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$C_U = \frac{p}{\alpha} \frac{z}{2\pi}$$

## 3.4.2 Τάση στους ακροδέκτες

Εκτός από την πτώση της τάσης στην ωμική αντίσταση του τυμπάνου πρέπει να ληφθεί υπ' όψη και η τάση στην αντίσταση επαφής μεταξύ ψηκτρών και συλλέκτη. Έτσι μπορούμε να γράψουμε:

$$U_T = U_{\varepsilon\Pi} \pm (I_T R_T + U_{\Psi}) \quad (3.15)$$

$U_{\varepsilon\Pi}$  = τάση εξ επαγωγής.

$U_T$  = τάση στους ακροδέκτες του τυμπάνου.

$I_T$  = ρεύμα τυμπάνου

$R_T$  = αντίσταση τυμπάνου

$U_{\Psi}$  = τάση επί των ψηκτρών

- για γεννήτρια

+ για κινητήρα

Η  $U_{\Psi}$  είναι γενικά μικρή σχετικά με την  $U_T$  και μπορεί να παραληφθεί, έτσι χρησιμοποιούμε συνήθως μόνο την τάση  $U_T$ .

### 3.4.3 Ρευματικό στρώμα

Η έννοια του ρευματικού στρώματος ορίζεται ως το διάρρευμα (αριθμός αγωγών επί ρεύμα) ανά μονάδα μήκους επί της περιφέρειας του δρομέα.

Εάν το ολικό ρεύμα, το οποίο διαρρέει μια ψήκτρα είναι  $I$ , τότε σε κάθε ένα παράλληλο κλάδο το ρεύμα ανέρχεται σε  $\frac{I}{2\alpha}$ . Το ρεύμα αυτό διαρρέει κάθε έναν αγωγό. Εάν  $Z$  είναι ο συνολικός αριθμός των αγωγών, τότε η διαρροή ανέρχεται σε:

$$\Theta = \frac{I}{2\alpha} Z \quad (3.16)$$

και το ρευματικό στρώμα  $A$  κατά τον ορισμό θα είναι:

$$A = \frac{\Theta}{\pi D} = \frac{ZI}{2\alpha\pi D} = \frac{ZI}{4\alpha\rho\tau} \quad (3.17)$$

Το ρευματικό στρώμα  $A$  είναι ένα μέτρο σύγκρισης για διαφορετικές ηλεκτρικές μηχανές όσον αφορά την φόρτιση αυτών. Για μικρές μηχανές είναι

$$A = 200 \frac{A}{\text{cm}},$$

ενώ για μεγάλες φθάνουμε στην τιμή

$$A = 600 \frac{A}{\text{cm}}.$$

### 3.4.4 Ηλεκτρομαγνητική ροπή

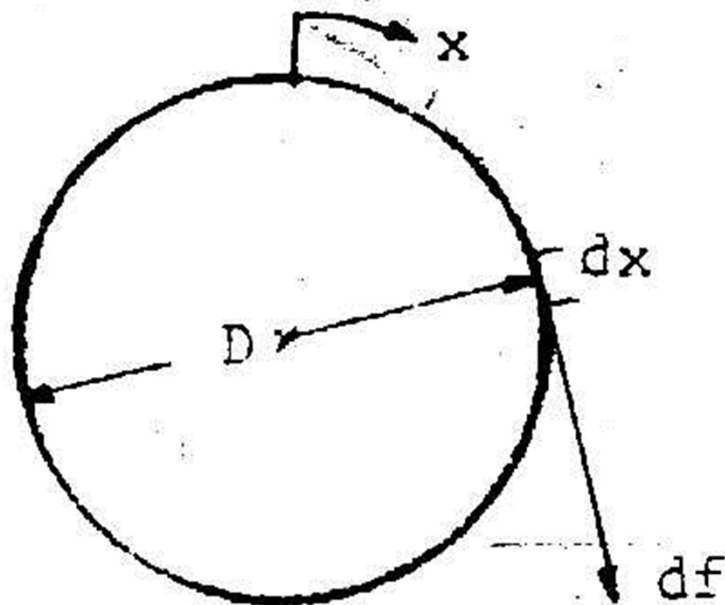
Ο δρομέας αναπτύσσει μια ροπή, η οποία εξαρτάται από τη δύναμη σε κάθε έναν αγωγό. Ως γνωστόν, σε ένα ρευματοφόρο αγωγό μήκους  $l$  που βρίσκεται κάθετα εντός ενός μαγνητικού πεδίου  $B$  επενεργεί η δύναμη:

$$F = iBl , \quad (3.18)$$

όπου  $i$  είναι το ρεύμα του αγωγού.

Για μια ηλεκτρική μηχανή, στη θέση του **ρεύματος**  $i$  υπεισέρχεται το ρευματικό στρώμα  $A$ , ώστε για τη δύναμη που αναπτύσσεται σε ένα στοιχειώδες τμήμα  $dx$  της περιφέρειας του δρομέα, μπορούμε να γράψουμε:

$$df = AdxBl \quad (3.19)$$



**Σχήμα 3.43 .** Για τον ορισμό της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.

Η δύναμη αυτή επιφέρει μια στοιχειώδη ροπή:

$$dM = df \frac{D}{2} = \frac{D}{2} l B A dx \quad (3.20)$$

Η ολική ροπή προκύπτει δι' ολοκλήρωσεως κατά μήκος της περιφέρειας, οπότε προκύπτει:

$$M = \int_0^{2\pi r} dM = \frac{D}{2} l \cdot \int_0^{2\pi r} B(x) A(x) dx \quad (3.21)$$

Γενικά η μαγνητική επαγωγή  $B(x)$ , η οποία εδώ συμπίπτει με την κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου επί του δρομέα καθώς και το ρευματικό στρώμα  $A(x)$  είναι δυνατόν να είναι συνάρτηση του τόπου δηλαδή της αποστάσεως  $x$ , που την μετράμε επί της περιφέρειας (σχήμα 3.33).

Στη μηχανή συνεχούς ρεύματος και τα δύο μεγέθη είναι σταθερά, οπότε η σχέση 3.20 παίρνει τη μορφή:

$$M = \frac{D}{2} l B A \int_0^{2p\tau} dx = \frac{D}{2} l B A 2p\tau = Dp\tau l B A \quad (3.22)$$

Επειδή σύμφωνα με τη σχέση 3.12 είναι  $\Phi = \tau l B$ , η σχέση 3.22 γράφεται στην τελική της μορφή αφού λάβουμε υπ' όψη τη σχέση 3.16:

$$M = DpA\Phi = Dp \cdot \frac{ZI\Phi}{2\alpha\pi D} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{p}{\alpha} \cdot \frac{Z}{2}\Phi I = C_M \Phi I \quad (3.23)$$

με τη σταθερά της μηχανής:

$$C_m = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{p}{\alpha} \cdot \frac{Z}{2}$$

Όπως είναι γνωστό η ροπή  $M$  εκφράζεται σε  $\text{kpm}$  ή  $\text{Nm}$ , μεταξύ δε  $\text{kpm}$  και  $\text{Nm}$  υπάρχει η σχέση:

$$1 \text{ Nm} = 0,102 \text{ kpm} = 1 \text{ Watt-sec}$$

Τα σύμβολα στη σχέση (3.23) έχουν την ακόλουθη σημασία:

$\Phi$  = μαγνητική ροή ( $\text{Vs}$ )

$I$  = ρεύμα τυμπάνου ( $\text{A}$ )

$p$  = αριθμός ζευγών πόλων

$\alpha$  = αριθμός ζευγών παράλληλων κλάδων

$Z$  = ο αριθμός των αγωγών ολοκλήρου του τυλίγματος του τυμπάνου.

Παρατηρούμε ότι ισχύει  $C_U = C_M = C = \frac{p}{\alpha} \cdot \frac{z}{2\pi}$  υπό την προϋπόθεση ότι στην τάση εξ επαγωγής υπεισέρχεται η γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  και όχι ο αριθμός στροφών, όπως έγινε στη σχέση (3.14).



# Πηγές

**Οι πηγές των Εικόνων, των Σχημάτων και των Διαγραμμάτων είναι:**

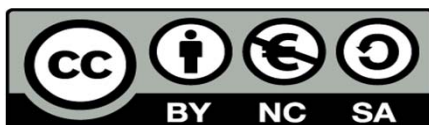
[1] Α.Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικές Μηχανές Α», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009

[2] Α.Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικές Μηχανές Β», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009

[3] Α.Ν. Σαφάκας, «Δυναμική Ηλεκτρομηχανικών συστημάτων» Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2008

[4] Τζόγια Χ. Καππάτου, Εξομοιώσεις Ηλεκτρικών Μηχανών σε περιβάλλον Πεπερασμένων Στοιχείων, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Η.Μ.Τ.Υ, Πανεπιστήμιο Πατρών.

# Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

