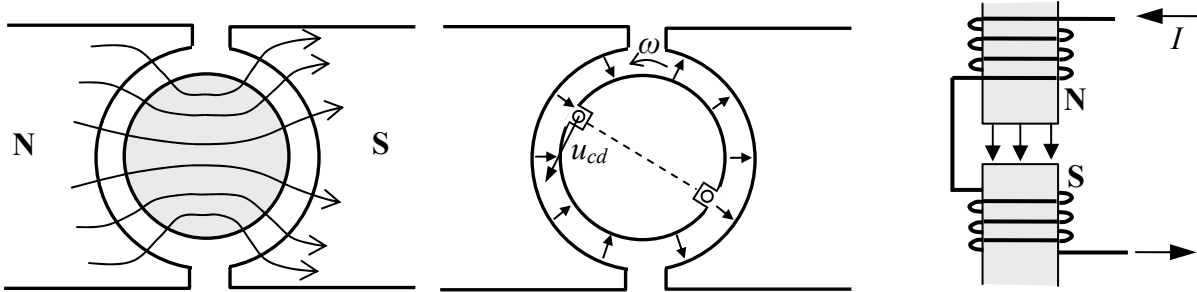


ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΡ

Σε μια ηλεκτρική μηχανή το περιστρεφόμενο τμήμα της ονομάζεται δρομέας ή ρότορας, ενώ το ακίνητο τμήμα στάτης. Θεωρούμε το ακόλουθο απλό παράδειγμα στρεφόμενης μηχανής, που είναι ένα στρεφόμενο αγωγίμο πλαίσιο μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Το τελευταίο δημιουργείται από τους πόλους μόνιμου μαγνήτη, ενώ και ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό.



Το αγωγίμο πλαίσιο είναι τοποθετημένο σε μια εγκοπή του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Το διάκενο έχει το ίδιο πλάτος σε κάθε σημείο, γεγονός που συμβάλλει στην ομοιογένεια του μαγνητικού πεδίου (τελικά και στην ομοιογένεια της μαγνητικής αντίστασης). Επειδή ο αέρας έχει μεγάλη μαγνητική αντίσταση (αντιστρόφως ανάλογη του μ), επιθυμούμε η μαγνητική ροή να διαγράφει τη μικρότερη δυνατή διαδρομή, κάτι που γίνεται όταν το πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια του δρομέα. Οι τάσεις και τα ρεύματα μέσα στη μηχανή είναι και αυτά εναλλασσόμενα, ωστόσο προκύπτει συνεχής έξοδος χάρη στο μηχανισμό ανόρθωσης που ονομάζεται συλλέκτης. Είναι φανερό πως το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο σε οποιοδήποτε σημείο της κυλινδρικής επιφάνειας του περιστρεφόμενου ρότορα, άρα και στις πλευρές του αγωγίμου πλαισίου.

ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΣΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Θεωρώντας ότι ο δρομέας περιστρέφεται, λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου εμφανίζεται τάση στα άκρα του πλαισίου, η οποία είναι το άθροισμα των τάσεων που επάγονται στις 4 πλευρές του. Υπενθυμίζεται ότι η γενική σχέση που ισχύει είναι $e_{ind} = (\mathbf{u} \times \mathbf{B})\mathbf{l}$.

Πλευρά ab:

\mathbf{u} εφαπτόμενη στην περιφέρεια

\mathbf{B} κάθετο στην περιφέρεια, φορά προς τα έξω

$\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ κάθετο στο επίπεδο του χαρτιού, προς τα μέσα (\otimes)

$$e_{ba} = Bul$$

Πλευρές bc και da:

\mathbf{u} , \mathbf{B} στο επίπεδο του χαρτιού, άρα $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ κάθετο στο επίπεδο του χαρτιού.

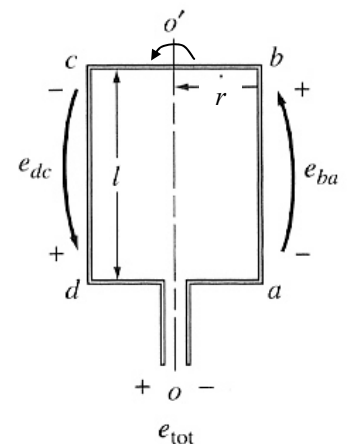
Επειδή το \mathbf{l} είναι τώρα πάνω στο επίπεδο του χαρτιού, είναι $\mathbf{l} \perp (\mathbf{u} \times \mathbf{B})$, οπότε $e_{cb} = e_{ad} = 0$.

Πλευρά cd:

\mathbf{u} εφαπτόμενη στην περιφέρεια

\mathbf{B} κάθετο στην περιφέρεια, φορά προς τα μέσα

$\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ κάθετο στο επίπεδο του χαρτιού, προς τα έξω (\odot): $e_{dc} = Bul$

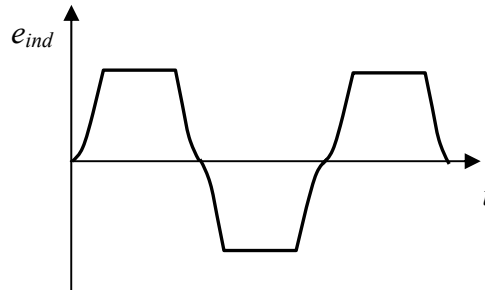


Οπότε

$$e_{ind} = e_{dc} + e_{cb} + e_{ba} + e_{ad} = 2Bul = 2B\omega rl.$$

Όταν ο δρομέας δεν βρίσκεται κάτω από κάποιον πόλο, το μαγνητικό πεδίο είναι 0, οπότε $e_{ind} = 0$.

Όταν το αγωγίμο πλαίσιο περιστραφεί κατά ακόμα 180 μοίρες, η πολικότητα της τάσης θα αλλάξει, ενώ το πλάτος παραμένει το ίδιο.



Η επιφάνεια που βρίσκεται κάτω από καθέναν από τους 2 πόλους σχεδόν ισούται με $A = \pi rl$, όση είναι δηλαδή η μισή παράπλευρη επιφάνεια του ρότορα (αγνοώντας τα μικρά διάκενα). Προφανώς, η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια κάτω από κάθε πόλο θα είναι $\Phi = B\pi rl \Rightarrow B = \Phi / \pi rl$, οπότε η επαγόμενη τάση παίρνει τη μορφή

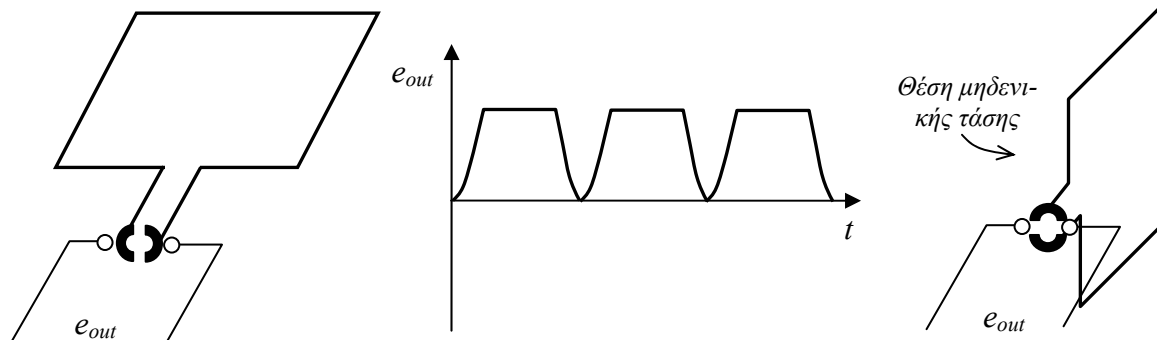
$$e_{ind} = 2 \frac{\Phi}{\pi rl} \omega rl = \frac{2}{\pi} \Phi \omega$$

Με άλλα λόγια, η επαγόμενη τάση εξαρτάται από:

- α) τη μαγνητική ροή του πεδίου,
- β) την ταχύτητα περιστροφής,
- γ) τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Μεταγωγή-Ανόρθωση

Για την παραγωγή συνεχούς τάσης, προσθέτουμε 2 αγωγίμα ημικυκλικά τμήματα (τομείς του συλλέκτη) στα άκρα του πλαισίου, ενώ 2 σταθεροί ακροδέκτες (ψήκτρες) σχηματίζουν τέτοια γωνία, ώστε να ανταλλάσσουν μεταξύ τους αγωγίμα τμήματα όταν η επαγόμενη τάση σε αυτά είναι 0. Σε εκείνο το σημείο αλλάζει πρόσημο η e_{ind} , οπότε η τάση των σταθερών ακροδεκτών έχει πάντα σταθερό πρόσημο. Δηλαδή η θετική ψήκτρα συνδέεται πάντα, μέσω του συλλέκτη, άμεσα με την πλευρά του πλαισίου που βρίσκεται απέναντι από το βόρειο πόλο του μαγνήτη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μεταγωγή. Σημειώνεται πως στις γεννήτριες απάγεται ηλεκτρικό ρεύμα μέσω των ψήκτρων, ενώ στους κινητήρες προσάγεται ρεύμα.



ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΣΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Συνδέοντας στα άκρα του πλαισίου μια πηγή σταθερής τάσης, αυτό θα διαρρέεται από ρεύμα, οπότε λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου θα ασκούνται δυνάμεις στο πλαίσιο. Υπενθυμίζεται ότι γενικά η δύναμη που ασκείται είναι της μορφής $\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$ και η αντίστοιχη ροπή έχει μέτρο $\tau = rF \sin \theta$. Αναλυτικά, σε κάθε πλευρά έχουμε:

Πλευρά ab:

$$F_{ab} = BIl \text{ προς τη φορά περιστροφής}$$

$$\tau_{ab} = rBIl \text{ με ανθρωπολογιακή φορά}$$

Πλευρές bc και da:

$\mathbf{B} // \mathbf{l}$, οπότε οι δυνάμεις είναι παράλληλες προς τον άξονα περιστροφής, με συνέπεια $\tau_{bc} = \tau_{da} = 0$.

Πλευρά cd:

$$F_{cd} = BIl \text{ προς τη φορά περιστροφής}$$

$$\tau_{cd} = rBIl \text{ με ανθρωπολογιακή φορά}$$

Άρα η συνολική ροπή είναι

$$\tau_{ind} = 2rBIl = 2r \frac{\Phi}{\pi r l} Il = \frac{2}{\pi} \Phi I$$

κάτω από τους πόλους. Σε περιοχές όπου δεν υφίσταται πεδίο, η ροπή είναι μηδενική. Συνεπώς, η ροπή εξαρτάται από:

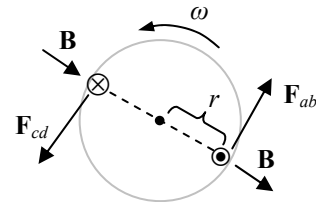
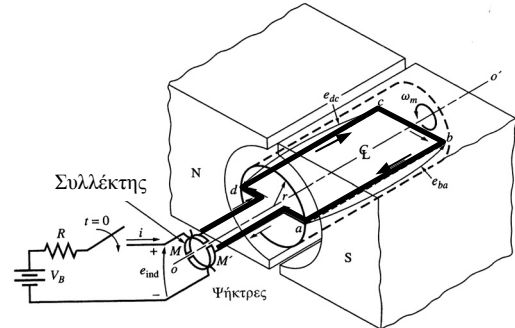
- τη μαγνητική ροή του πεδίου,
- το ρεύμα του δρομέα,
- τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Κατά τη λειτουργία μιας μηχανής ως γεννήτρια (σε σταθερή κατάσταση), η εξωτερική μηχανική ροπή ισούται με τη ροπή των τριβών, αν προφανώς δεν είναι συνδεδεμένο κάποιο φορτίο: $I = 0$, οπότε $\tau_{εξ} = \tau_{τρ}$. Αν υφίσταται ρεύμα ($I \neq 0$) λόγω κάποιου φορτίου, τότε αναπτύσσεται ροπή και από τις μαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται στους περιστρεφόμενους ρευματοφόρους αγωγούς, οπότε $\tau_{εξ} = \tau_{τρ} + \tau_m$. Αντίθετα, αν λειτουργεί μια μηχανή ως κινητήρας, η ροπή των μαγνητικών δυνάμεων εξισορροπεί την εξωτερική ροπή (την προκαλούμενη από κάποιο φορτίο), καθώς και αυτήν των τριβών: $\tau_m = \tau_{τρ} + \tau_{εξ}$.

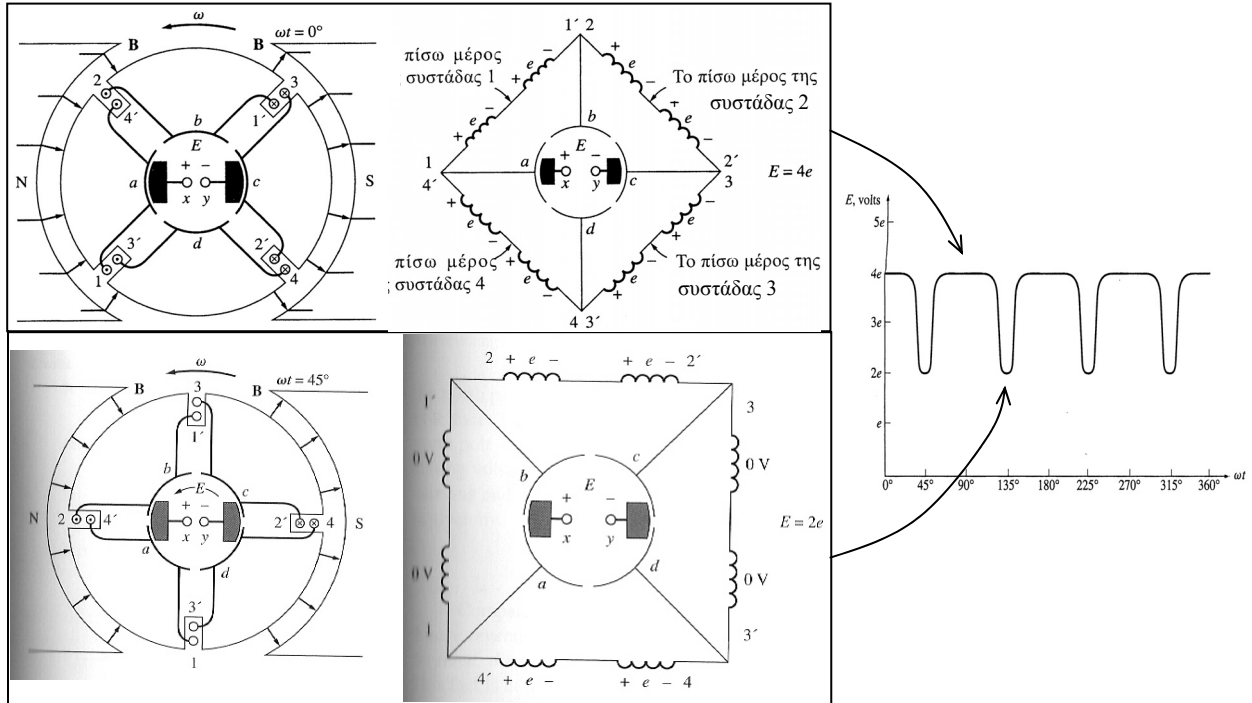
ΜΕΤΑΓΩΓΗ

Όπως ειπώθηκε, έτσι ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία οι εναλλασσόμενες τάσεις και τα ρεύματα του εσωτερικού μιας μηχανής ΣΡ μετατρέπονται σε συνεχείς (με σταθερό πρόσημο) στην έξοδό της. Αποτελεί κρίσιμο σημείο για τη σχεδίαση και λειτουργία μιας μηχανής ΣΡ.

Ας εξετάσουμε τη μεταγωγή σε μηχανή συνεχούς ρεύματος με 4 πλαίσια και 2 πόλους. Οι πλευρές των πλαισίων τοποθετούνται σε αυλάκια που βρίσκονται σε πλήρως αντιδιαμετρικές θέσεις. Όπως και πριν, σε καθεμία από τις πλευρές των πλαισίων αναπτύσσεται τάση με μέτρο $e_{ind} = Bul$. Οι φορές τους σημειώνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα, απ' όπου φαίνεται πως η τάση ανάμεσα στους τομείς που βρίσκονται σε επαφή με τις ψήκτρες είναι ίση με $E = 4e_{ind} = 4Bul$, όταν και τα 4 πλαίσια βρίσκονται εντός του μαγνητικού πεδίου κάτω από τους πόλους. Όταν 2 από τα πλαίσια



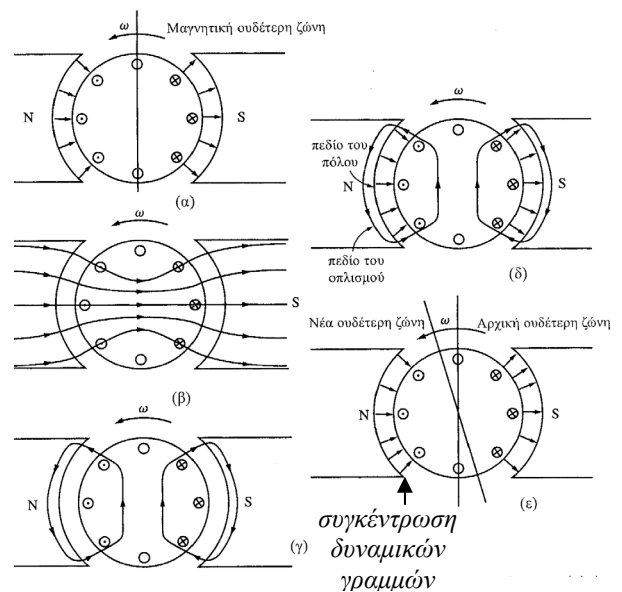
βρίσκονται στο χώρο που δεν υφίσταται μαγνητικό πεδίο, αυτά βραχυκυκλώνονται από τις ψήκτρες, ενώ τα άλλα 2 παραμένουν εντός μαγνητικού πεδίου. Από το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα τώρα φαίνεται πως $E' = 2e_{ind}$. Ουσιαστικά αλλάζει η σύνδεση των πλαισίων στις ψήκτρες ταυτόχρονα με την αλλαγή πολικότητας της τάσης. Τελικά, η προσέγγιση μιας σταθερής τάσης τώρα είναι πολύ καλύτερη και γενικώς βελτιώνεται, όσο ο αριθμός των βρόχων αυξάνεται.



ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗ

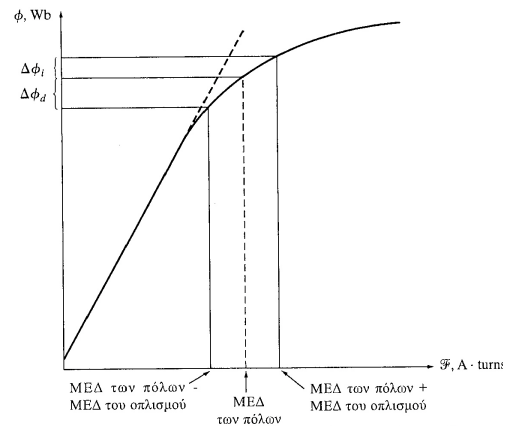
Αντίδραση οπλισμού

Η περιστροφική κίνηση του δρομέα μέσα στο μαγνητικό πεδίο έχει ως αποτέλεσμα την επαγωγή τάσης στους αγωγούς του. Αν στην έξοδο της μηχανής συνδεθεί κάποιο φορτίο, οι αγωγοί θα διαρρέονται από ρεύμα, οπότε θα παράγουν ένα ξεχωριστό μαγνητικό πεδίο, το οποίο παραμορφώνει το πεδίο των πόλων (το τύμπανο μπορεί να θεωρηθεί ως σωληνοειδές, με άξονα αυτόν που καθορίζεται από τις ψήκτρες, οπότε ο μαγνητικός του άξονας είναι κάθετος σε αυτόν του πεδίου των πόλων). Η παραμόρφωση του πεδίου κατά την αύξηση του φορτίου ονομάζεται αντίδραση του οπλισμού. Μια πρώτη συνέπειά της είναι η μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης της μηχανής, η οποία καθορίζεται από το επίπεδο των αγωγών του δρομέα των οποίων η ταχύτητα είναι παράλληλη προς τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου (δηλ. η τάση των αγωγών, όταν αυτοί βρίσκονται στην ουδέτερη ζώνη, είναι μηδέν). Ουσιαστικά, κατά το φαινόμενο αυτό ενισχύεται το πεδίο στο ένα άκρο των πόλων και εξασθενίζει στο άλλο. Το μέγεθος της μετα-



κίνησης εξαρτάται από τη ροή που προκαλεί ο σπλισμός, άρα από την τιμή του ρεύματος και, συνεπώς, από το μέγεθος του φορτίου. Προκύπτει πως στις γεννήτριες, η μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης γίνεται κατά τη φορά περιστροφής, ενώ στους κινητήρες κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Αποτέλεσμα της μετακίνησης της ουδέτερης περιοχής είναι να βραχυκυκλώνονται τομείς του συλλέκτη που βρίσκονται υπό διαφορά δυναμικού, οπότε δημιουργείται κάποιο παρασιτικό ρεύμα. Η διακοπή του συνεπάγεται την εμφάνιση σπινθήρων στις ψήκτρες (με συνέπειες τη φθορά των ψηκτρών και των τομέων συλλέκτη, καθώς και την αύξηση του κόστους συντήρησης).

Άλλο πρόβλημα σχετίζεται με την εξασθένηση της συνολικής μαγνητικής ροής. Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις η μηχανή λειτουργεί κοντά στο σημείο κορεσμού, η θετική επίδραση της ΜΕΔ του δρομέα προκαλεί απλώς μια μικρή αύξηση της μαγνητικής ροής. Αντίθετα, η αρνητική επίδραση της ΜΕΔ του δρομέα συνεπάγεται σημαντικότερη μείωση της ροής, με αποτέλεσμα συνολικά η μέση τιμή της να ελαττώνεται. Στις γεννήτριες, η ελάττωση της ροής συνεπάγεται μειωμένη παραγόμενη τάση, ενώ στους κινητήρες το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα αστάθειας, μέσω της μεγάλης (μη ελεγχόμενης) αύξησης της ταχύτητας περιστροφής.



Ο κυκλικός σπινθηρισμός σχετίζεται με την ανομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου που προκαλείται κάτω από τους πόλους. Η τοπική πύκνωση των μαγνητικών γραμμών συνεπάγεται επαγωγή αυξημένης τάσης σε αγωγούς που καταλήγουν σε γειτονικούς τομείς του συλλέκτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου που, υπό συνθήκες, μπορεί να επεκταθεί σ' όλη την επιφάνεια του συλλέκτη, οδηγώντας στη βραχυκύκλωση των ψηκτρών.

Υπερτάσεις

Κατά τη βραχυκύκλωση τομέων του συλλέκτη από τις ψήκτρες, το ρεύμα που διαρρέει τους αντίστοιχους αγωγούς αντιστρέφεται πλήρως. Επειδή αυτή η αλλαγή γίνεται πολύ γρήγορα, ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος di/dt είναι μεγάλος. Συνεπώς, ακόμα και αν οι συγκεκριμένοι αγωγοί έχουν χαμηλό συντελεστή αυτεπαγωγής L , θα αναπτυχθεί επαγωγική κρουστική τάση στον βραχυκυκλωμένο τομέα (ειδικά σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής), οδηγώντας στην εμφάνιση σπινθηρισμών στις ψήκτρες.

Λύσεις

α) **μετατόπιση των ψηκτρών**: η μετακίνηση των ψηκτρών στη νέα ουδέτερη ζώνη αποτελεί μια απλή, αλλά σχεδόν πάντα μη αποτελεσματική λύση, αφού το μέγεθος της μετατόπισης εξαρτάται πάντα από την τιμή του φορτίου. Επιπλέον, η συγκεκριμένη λύση δε διορθώνει το πρόβλημα της εξασθένησης της μαγνητικής ροής, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται σπάνια, μόνο σε μικρές μηχανές.

β) **βοηθητικοί ή εσωτερικοί πόλοι**: αυτοί τοποθετούνται σε θέσεις μεταξύ των κυρίων πόλων, πάνω από τους αγωγούς που υφίστανται μεταγωγή. Έχουν μικρό μέγεθος, πρακτικά δεν επηρεάζουν τη λειτουργία της μηχανής και το τύλιγμά τους συνδέεται σε σειρά με αυτό του δρομέα.

Εξαλείφουν το πρόβλημα των σπινθηρισμών για μεγάλο εύρος φορτίων, ωστόσο δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της εξασθένηση της ροής.

- γ) **τύλιγμα αντιστάθμισης**: και αυτά είναι συνδεδεμένα σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, τοποθετημένα στις επιφάνειες των πόλων απέναντι από τους στρεφόμενους αγωγούς. Η παρουσία τους προκαλεί ΜΕΔ ίση και αντίθετη με τη ΜΕΔ του δρομέα, οπότε η συνολική ΜΕΔ που απομένει είναι μόνο αυτή των πόλων. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης λύσης είναι το μεγάλο κόστος, γι' αυτό και η χρήση της απαντάται σε μηχανές με αυστηρές προδιαγραφές λειτουργίας.

