



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ

Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Επιβλέπων: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΑΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης

Μέθοδοι ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων Σ.Ρ.

(Control methods for electric D.C. motors)

Πτυχιακή Εργασία:

Δέδες Παναγιώτης του Κωνσταντίνου (Α.Μ. 38969)

Ευθυμίου Σωτήριος του Διονυσίου (Α.Μ. 28245)

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2014



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ

Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Επιβλέπων: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΑΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης

Μέθοδοι ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων Σ.Ρ.

(Control methods for electric D.C. motors)

Πτυχιακή Εργασία:

Δέδες Παναγιώτης του Κωνσταντίνου (Α.Μ. 38969)

Ευθυμίου Σωτήριος του Διονυσίου (Α.Μ. 28245)

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2014

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μας, στον τομέα Σημάτων και Συστημάτων, του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του ΤΕΙ Πειραιά.

Αντικείμενο της εργασίας, είναι οι μέθοδοι ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος.

Η πτυχιακή αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2012 – 2013 και 2013 – 2014, υπό την επίβλεψη της κυρίας Εριέττας Ι. Ζουντουρίδου, εργαστηριακής συνεργάτιδας του ΤΕΙ Πειραιά στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών, στην οποία οφείλουμε ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση της.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά, τον κύριο Ηρακλή Βυλλιώτη, καθηγητή εφαρμογών του ΤΕΙ Πειραιά στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών, για την άψογη συνεργασία μας, την ουσιαστική βοήθεια τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Αιγάλεω, Ιούνιος 2014

Περίληψη

Ο έλεγχος της ηλεκτρικής κίνησης γίνεται καθημερινά περισσότερο αναγκαίος σε πολλές εφαρμογές και για συνεχώς μεγαλύτερο εύρος ισχύος. Οι λόγοι που κατά κύριο λόγο επιβάλλουν τη χρήση κινητήριων συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας είναι πρώτον, η εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. έλεγχος της παροχής μιας αντλίας μέσω ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα), δεύτερον, η απαίτηση της εφαρμογής για έλεγχο ταχύτητας και θέσης (π.χ. σε εφαρμογές όπως ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ηλεκτρονικές συσκευές γραφείου, ρομπότ, μηχανές κατεργασίας υλικών) και τρίτον, η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της διάταξης (π.χ. ελεγχόμενη επιτάχυνση κι επιβράδυνση με συχνές εκκινήσεις και πεδήσεις της μηχανής).

Η τεχνολογική ανάπτυξη και βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος καθώς κι η χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας είχαν ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους των ηλεκτρονικών μονάδων οδήγησης (drives) και την αύξηση της αξιοπιστίας τους. Οι νέες μονάδες οδήγησης κινητήρων είναι πλέον οικονομικά προσιτές και προσφέρουν πολλαπλές δυνατότητες, ώστε να είναι πρακτικά δυνατή η αντιμετώπιση οποιουδήποτε σύνθετου προβλήματος ελέγχου.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, παρουσιάζουμε τους πιο διαδεδομένους τρόπους στον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα :

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύουμε τη λειτουργία του παλμογράφου. Γίνεται αναφορά στην ιστορία του και το πως φτάσαμε στους σύγχρονους ψηφιακούς παλμογράφους. Περιγράφουμε τις δυνατότητες που μας παρέχει και τον τρόπο χειρισμού, ώστε να τις εκμεταλλευτούμε στο έπακρο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναφέρουμε τις διατάξεις ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Μονοφασικές ή τριφασικές, πλήρως ελεγχόμενες ή ημιελεγχόμενες, εναλλασσόμενης ή συνεχούς εισόδου, ακόμη και διατάξεις οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται στις μέρες μας αλλά παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Γίνεται εκτενής αναφορά στις εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία της κάθε διάταξης, τις αρμονικές και τις κυματώσεις τους, στη συνεχή και ασυνεχή αγωγή.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η περιγραφή των ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Η κατασκευαστική τους δομή, το ισοδύναμο κύκλωμα τους, οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται, αναπόφευκτα μειονεκτήματα και τρόποι αντιμετώπισης τους, καθώς γίνεται και αναφορά εξισώσεων που διέπουν την λειτουργία τους και χρησιμεύουν στην κατανόηση των δυνατοτήτων ελέγχου αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η επίτευξη ελέγχου μέσω ημιελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας σε ωμικό φορτίο και σε ηλεκτρικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Παρατίθενται εικόνες με χρήσιμα δεδομένα από τον παλμογράφο κατά τη διάρκεια του πειράματος, καθώς και παραδείγματα στα οποία υπολογίζεται η γωνία έναυσης που χρησιμοποιείται για το πείραμα, από τα δεδομένα που μας παρέχει ο παλμογράφος.

Λέξεις κλειδιά : Έλεγχος κινητήρων Σ.Ρ. , Πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα , Ημιελεγχόμενη γέφυρα, Μη ελεγχόμενη γέφυρα, Ψαλιδιστές, Διπλομετατροπέας, Αυτομετασχηματιστής , Triac , Παλμογράφος , Κινητήρας συνεχούς ρεύματος

Abstract

The need for controlling electric motors is daily growing bigger in many applications and a continuously growing range of electric power. The main reasons for using adjustable speed motor systems are, firstly, saving energy consumption (i.e. pump's flow control by controlling the rotation speed of the motor), secondly, if the application requires controlling speed and position (i.e. applications like electric cars, electric office equipment, robots, material processing machines) and finally, improving the dynamic behavior of the device (i.e. controlled acceleration and deceleration with frequent starts and engine braking).

The technological advance and improvement of Power Electronics, and the usage of digital technology resulted a significant cost reduction of electronic unit drives and also increased their reliability. New motor drive units are now affordable and offer multiple possibilities, so that it is practically possible to resolve any complex control problem.

In this thesis, we present the most common ways to control electric dc motors. More specifically:

In the first chapter, we analyze the operation of the oscilloscope. Reference is made to its history and how we got to the modern digital oscilloscopes. We describe the features the oscilloscope provides us, and how to handle them so that we can take advantage to the fullest.

In the second chapter, we report controlled electric dc motor drives. Single phase or three phase, fully controlled or semi controlled, AC or DC input, even control drives that are of no use nowadays but still are interesting. We concluded an extensive reference to the equations related to the operation of every device, the harmonics and ripples, in continuous and non continuous conduction.

In the third chapter, we refer to the electric dc motors. Their manufactory structure, their equivalent circuit, categories in which they are separated, inevitable disadvantages and ways of resolving them. We also concluded a reference to equations related with their operation and are useful in understanding the potential control methods.

In the fourth chapter, we describe the achieved control via a semi controlled single phase bridge to a resistive load and an electric dc motor. We reproduced images with useful data taken from the oscilloscope during the experiment and examples, in which the ignition angle used for the experiment is calculated, by the data given by the oscilloscope.

Key words: DC motor control, fully controlled bridge drive, Semi controlled bridge drive, Non controlled bridge drive, Choppers, Oscilloscope, Electric DC motors

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Παλμογράφοι

1.1 Εισαγωγή	σελ 1
1.2 Χρήση Παλμογράφου	σελ 4
1.2.1 Πραγματοποίηση μετρήσεων με το μενού Cursors	σελ 12
1.2.2 Πραγματοποίηση μετρήσεων με το μενού Measure	σελ 13
1.2.3 Χρήση μενού Main/Delayed	σελ 16
1.2.4 Χρήση μενού Acquire	σελ 19
1.2.5 Χρήση μενού καναλιών (1 ή 2)	σελ 23
1.2.6 Χρήση μενού Math	σελ 27

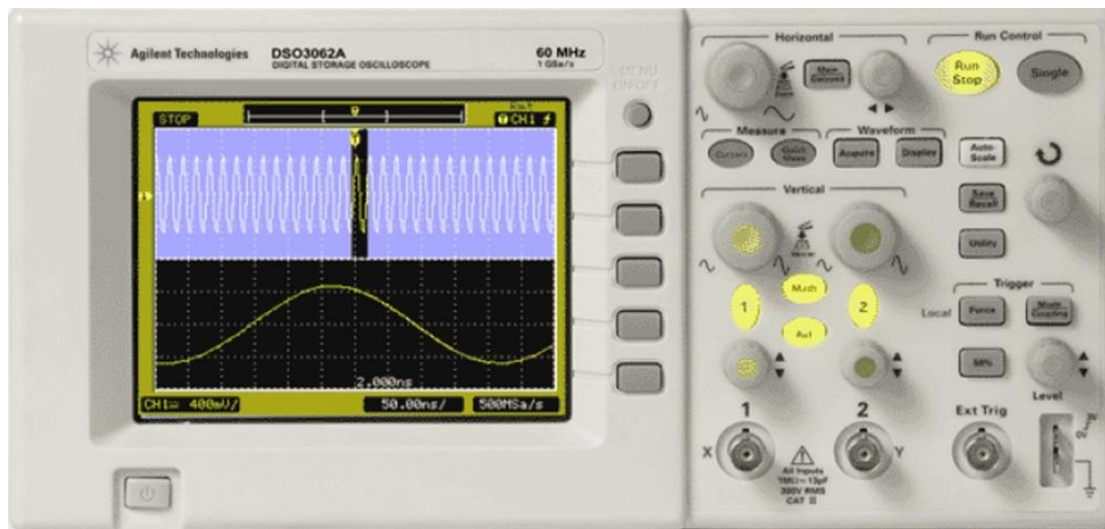
Κεφάλαιο 2 : Διατάξεις Ελέγχου Κινητήρων Σ.Ρ.

2.1 Εισαγωγή	σελ 30
2.2 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη	σελ 30
2.2.1 Συνεχής αγωγή	σελ 31
2.2.2 Ασυνεχής αγωγή	σελ 34
2.3 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη	σελ 36
2.3.1 Συνεχής αγωγή	σελ 39
2.3.2 Ασυνεχής αγωγή	σελ 42
2.4 Μονοφασική ημιελεγχόμενη	σελ 44
2.4.1 Συνεχής αγωγή	σελ 46
2.4.2 Ασυνεχής αγωγή	σελ 49
2.5 Τριφασική ημιελεγχόμενη	σελ 51
2.5.1 Συνεχής αγωγή	σελ 51
2.5.2 Ασυνεχής αγωγή	σελ 54
2.6 Choppers	σελ 54
2.6.1 Κλάση A	σελ 57
2.6.1.1 Συνεχής αγωγή	σελ 57

2.6.1.2 Ασυνεχής αγωγή	σελ 60
2.6.2 Κλάση Β	σελ 62
2.6.2.1 Συνεχής αγωγή	σελ 62
2.6.2.2 Ασυνεχής αγωγή	σελ 64
2.6.3 Κλάση Γ	σελ 66
2.6.4 Κλάση Δ	σελ 67
2.6.5 Κλάση Ε	σελ 70
2.7 Διπλομετατροπέας	σελ 71
2.8 Συνδυασμός μη ελεγχόμενης γέφυρας με ΑΜ/Σ ή Triac	σελ 72
2.8.1 Μη ελεγχόμενη και ΑΜ/Σ	σελ 72
2.8.2 Μη ελεγχόμενη και Triac	σελ 73
2.9 Αρμονικές – Κυματώσεις	σελ 73
2.9.1 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα	σελ 74
2.9.2 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα	σελ 76
2.9.3 Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα	σελ 76
2.9.4 Τριφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα	σελ 77
2.9.5 Συντελεστής μετατόπισης	σελ 77
2.9.6 Μετατροπέας DC-DC κλάσης Α	σελ 78
Κεφάλαιο 3 : Ηλεκτρικοί κινητήρες Σ.Ρ.	
3.1 Εισαγωγή	σελ 80
3.2 Κατασκευαστική δομή	σελ 81
3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα	σελ 83
3.4 Καμπύλη μαγνήτισης	σελ 85
3.5 Αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου	σελ 86
3.6 Ουδέτερη ζώνη – Μετακίνηση των ψηκτρών	σελ 89
3.7 Τυλίγματα βοηθητικών πόλων	σελ 90
3.8 Μαγνητικοί πόλοι με τυλίγματα αντιστάθμισης	σελ 92

3.9 Διακύμανση ταχύτητας	σελ 92
3.10 Διερεύνηση εξισώσεων του κινητήρα	σελ 93
3.11 Κατηγορίες κινητήρων Σ.Ρ.	σελ 94
3.11.1 Κινητήρες Σ.Ρ. Παράλληλης Διέγερσης	σελ 95
3.11.2 Κινητήρες Σ.Ρ. Ξένης διέγερσης	σελ 97
3.11.3 Κινητήρες Σ.Ρ. Διέγερσης σειράς	σελ 98
3.11.4 Κινητήρας Σ.Ρ. Σύνθετης Διέγερσης	σελ 99
3.11.5 Κινητήρες Σ.Ρ. με μόνιμους μαγνήτες	σελ 101
Κεφάλαιο 4 : Πειραματικό Μέρος	
4 Πειραματικό Μέρος	σελ 104
Βιβλιογραφία	σελ 111
Εικονογραφία	σελ 111

Κεφάλαιο 1 : Παλμογράφος



Ψηφιακός παλμογράφος Agilent DSO3262A [3]

1.1 Εισαγωγή

Οι παλμογράφοι είναι καταγραφικά όργανα που χρησιμοποιούνται για καταγραφή ταχέως μεταβαλλόμενων μεγεθών. Διακρίνονται σε : α) Παλμογράφους μελάνης , β) Παλμογράφους φωτεινής δέσμης , γ) Ηλεκτρονικούς παλμογράφους και δ) Ψηφιακούς παλμογράφους .

Στους παλμογράφους μελάνης ,το κινητό μέρος της διατάξεως μετρήσεως παρουσιάζει μικρή περίοδο ίδιας ταλάντωσης και πάλλεται γύρω από την θέση ισορροπίας με την συχνότητα της τάσεως που εφαρμόζεται σε αυτό. Η συχνότητα μπορεί να είναι μέχρι 1000Hz . Στο ταλαντευόμενο μέρος στερεώνεται εύκαμπτος τριχοειδής σωλήνας που καταλήγει σε στόμιο. Μια ηλεκτροκίνητη αντλία καταθλίβει μέσω ενός λεπτού φίλτρου το μελάνι μέσα στο σωλήνα. Το μελάνι εκτοξεύεται έτσι από το ελεύθερο άκρο του σωλήνα και προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του ισοταχώς και ταχέως κινούμενου χαρτιού , σχηματίζοντας τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσεως στη διάταξη μετρήσεως.

Στους παλμογράφους φωτεινής δέσμης ,το κινητό τους σύστημα είναι όμοιο με το κινητό σύστημα των παλμικών γαλβανομέτρων. Πάνω στο κάτωτρο του κινητού συστήματος προσπίπτει φωτεινή δέσμη η οποία προέρχεται από κατάλληλο λαμπτήρα. Η δέσμη αυτή αφού ανακλαστεί , προσπίπτει στη φωτοευπαθή επιφάνεια ταχέως και ισοταχώς κινούμενου χαρτιού, σχηματίζουσα επ' αυτού την μορφή της τάσεως που εφαρμόζεται στο κινητό σύστημα.

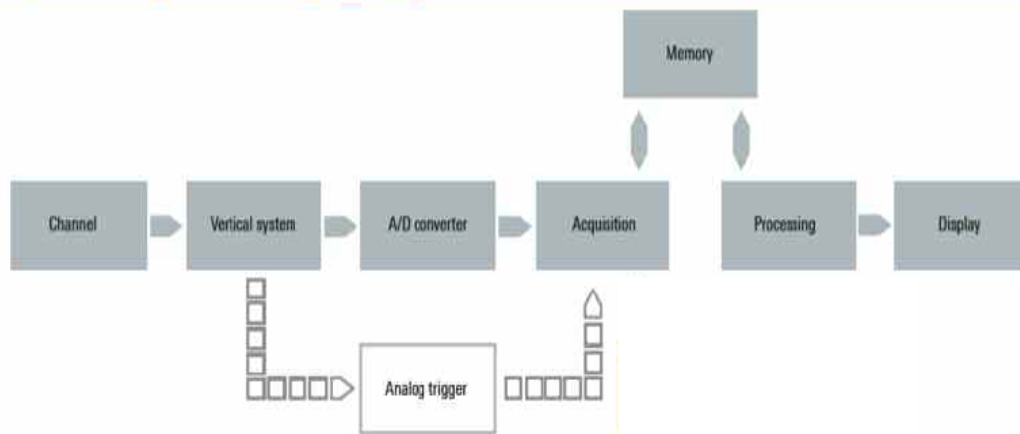
Με τους ηλεκτρονικούς παλμογράφους επιτυγχάνεται η παρακολούθηση και καταγραφή μεγεθών συχνότητας μέχρι 1GHz (10^9 Hz) .Αυτό καθίσταται δυνατό λόγω της σχεδόν μηδενικής αδράνειας της κινούμενης δέσμης ηλεκτρονίων , η οποία αποτελεί το κινητό σύστημα του παλμογράφου. Οι ηλεκτρονικοί παλμογράφοι είναι τα πλέον εύστροφα και ευαίσθητα όργανα μετρήσεως , με τους οποίους μπορούμε να μετρήσουμε μεγέθη όπως συνεχείς και εναλλασσόμενες τάσεις και εντάσεις, χρόνο , συχνότητα ως και διαφορά φάσης δυο εναλλασσομένων μεγεθών. Με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων ηλεκτρικών μετατροπέων, μπορούμε να μετρήσουμε οποιοδήποτε ηλεκτρικό μέγεθος.

Ένας ηλεκτρονικός παλμογράφος αποτελείται από καθοδικό σωλήνα ή σωλήνα Braun, ο οποίος είναι ένας γυάλινος σωλήνας στο εσωτερικό του οποίου επικρατεί υψηλό κενό. Μέσα στο σωλήνα βρίσκονται μία έμμεσα ή άμεσα θερμαινόμενη κάθοδος, το ηλεκτρόδιο ελέγχου των εξερχόμενων ηλεκτρονίων, τα κυλινδρικά ηλεκτρόδια εστίασεως και επιταχύνσεως, τα ηλεκτρόδια ή η διάταξη ή οι πλάκες κατακόρυφης απόκλισης της δέσμης ηλεκτρονίων, τα ηλεκτρόδια ή η διάταξη ή οι πλάκες οριζόντιας απόκλισης της δέσμης των ηλεκτρονίων, το ηλεκτρόδιο τελικής επιταχύνσεως και η προστατευτική κυλινδρική ταινία και η οθόνη του σωλήνα η οποία φέρει, εσωτερικά, επικάλυψη με φθορίζουσα ουσία και εξωτερικά δίκτυο ορθογωνίων συντεταγμένων.

Οι ηλεκτρονικοί παλμογράφοι λειτουργούν ως εξής, η κάθοδος του σωλήνα, μέσω του θερμαντικού νήματος φτάνει σε υψηλή θερμοκρασία εκπέμποντας ηλεκτρόνια, τα οποία υπό τη μορφή ηλεκτρονικού νέφους πληρούν το χώρο γύρω από αυτή. Τα ηλεκτρόνια αυτά έλκονται από την άνοδο, εμποδίζονται όμως να οδεύσουν προς αυτή από το ηλεκτρόδιο ελέγχου το οποίο περιβάλλει την κάθοδο και βρίσκεται σε αρνητικότερο δυναμικό σε σχέση με αυτή. Ορισμένος αριθμός ηλεκτρονίων κατορθώνει να διαφύγει δια μέσου της οπής του ηλεκτροδίου ελέγχου και να οδεύσει προς την άνοδο, από τον αριθμό των ηλεκτρονίων αυτών, ο οποίος ελέγχεται από το δυναμικό του ηλεκτροδίου ελέγχου, εξαρτάται η φωτεινότητα της σχηματιζόμενης φωτεινής κηλίδας στην οθόνη του παλμογράφου. Τα ηλεκτρόνια που οδεύουν από την κάθοδο προς την άνοδο, συγκεντρώνονται από τη διάταξη εστίασεως για να σχηματίσουν μια ηλεκτρονική δέσμη. Για την εστίαση της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά, μαγνητικό πεδίο. Η ηλεκτρονική δέσμη μετά την έξοδο της από το ηλεκτρόδιο επιταχύνσεως εισέρχεται στην περιοχή των πλακών κατακόρυφης απόκλισης, εάν η διαφορά δυναμικού που υφίσταται μεταξύ των πλακών δεν είναι μηδέν τότε ασκείται, σε κάθε ηλεκτρόνιο, δύναμη η οποία το εκτρέπει από την πορεία του. Ως αποτέλεσμα έχουμε την εκτροπή της δέσμης των ηλεκτρονίων σε κατακόρυφο επίπεδο, η εκτροπή αυτή θα είναι ανάλογη με την τάση που εφαρμόζεται στις πλάκες. Με συνεχή μεταβολή της τάσης αυτής μπορούμε να προκαλέσουμε την κίνηση της δέσμης σε κατακόρυφο επίπεδο, ακολούθως η ηλεκτρονική δέσμη εισέρχεται στην περιοχή των πλακών οριζόντιας απόκλισης, οπότε κατά τον ίδιο τρόπο μπορούμε να πετύχουμε την κίνηση της δέσμης σε οριζόντιο επίπεδο. Εν τέλει η δέσμη επιταχυνόμενη από το ηλεκτρόδιο τελικής επιταχύνσεως, το δυναμικό του οποίου είναι υψηλότερο των δυναμικών όλων των άλλων ηλεκτροδίων του σωλήνα. Προσπίπτει επί της οθόνης. Στο σημείο προσπτώσεως σχεδόν όλη η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και μόνο ένα 10% σε ορατό φως δημιουργώντας την φωτεινή κηλίδα. [1]

Ο πρώτος ψηφιακός παλμογράφος εφευρέθηκε από τον Walter LeCroy ύστερα από την παραγωγή ψηφιοποιητών υψηλής ταχύτητας για το ερευνητικό κέντρο CERN. Ξεκινώντας από την δεκαετία του 1980, ο ψηφιακός παλμογράφος έχουν πλέον επικρατήσει έναντι των άλλων κατηγοριών παλμογράφων. Σε αντίθεση με τους αναλογικούς προκατόχους τους, τους ηλεκτρονικούς παλμογράφους, οι οποίοι κάνουν χρήση συνεχώς μεταβαλλόμενων τάσεων, χρησιμοποιούν δυαδικούς αριθμούς οι οποίοι ανταποκρίνονται σε δείγματα της τάσης. Ένας μετατροπέας analog to digital χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τις μετρούμενες τάσεις σε ψηφιοποιημένα δεδομένα. Οι κυματομορφές λαμβάνονται σαν σειρές δειγμάτων. Τα δείγματα αποθηκεύονται και συσσωρεύονται έως ότου να παρθούν αρκετά τα οποία στην σωστή σειρά να σχηματίσουν την κυματομορφή, την οποία καλούνται να αποτυπώσουν. Η ψηφιακή τεχνολογία επιτρέπει στο δεδομένο να αποτυπωθεί με φωτεινότητα, σαφήνεια και σταθερότητα.

Οι ψηφιακοί παλμογράφοι μπορούν να χωριστούν σε τρεις υποκατηγορίες : τους παλμογράφους ψηφιακής αποθήκευσης/καταγραφής (Digital Storage Oscilloscopes – DSO) , τους ψηφιακούς παλμογράφους φωσφόρου (Digital phosphor oscilloscopes) και τους δειγματοληπτικούς ψηφιακούς παλμογράφους (Digital sampling oscilloscopes) .



Τυπικό μπλοκ διάγραμμα της αρχιτεκτονικής ενός ψηφιακού παλμογράφου [2]

Οι DSO είναι οι πλέον προτιμώμενοι στις βιομηχανικές εφαρμογές. Αντίθετα από τους αναλογικούς παλμογράφους τύπου καθοδικού σωλήνα, οι DSO χρησιμοποιούν ψηφιακή μνήμη , που δύναται να καταχωρεί δεδομένα για όσο χρειαστεί χωρίς υποβάθμιση. Οι παλμογράφοι ψηφιακής αποθήκευσης επιτρέπουν επίσης την περίπλοκη επεξεργασία του σήματος μέσω κυκλωμάτων ταχείας επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων. Το μετρούμενο μέγεθος ή αλλιώς η είσοδος του παλμογράφου ψηφιοποιείται από τον μετατροπέα analog to digital ,τα δεδομένα επεξεργάζονται και προωθούνται στην οθόνη. Στους πρώτους DSO η οθόνη ήταν καθοδικός σωλήνας , πλέον όμως συναντάμε σχεδόν αποκλειστικά DSO με έγχρωμη LCD οθόνη. Τα δεδομένα μπορούν επίσης να σταλούν μέσω τοπικού δικτύου LAN ή WAN για επεξεργασία ή αρχειοθέτηση. Το περιεχόμενο της οθόνης μπορεί άμεσα να καταγραφεί πάνω σε χαρτί χρησιμοποιώντας έναν ενσωματωμένο στον παλμογράφο εκτυπωτή. Το λογισμικό ανάλυσης των σημάτων του παλμογράφου μπορεί να εξάγει αρκετά χαρακτηριστικά από το πεδίο του χρόνου π.χ. πλάτος παλμού , φάσματα συχνοτήτων, ιστογράμματα και στατιστικές, χάρτες ακριβείας και ένα μεγάλο αριθμό σημαντικών παραμέτρων για μηχανικούς στα πεδία των τηλεπικοινωνιών και των ηλεκτρονικών ισχύος. Το βασικό πλεονέκτημα έναντι των παλμογράφων αναλογικής αποθήκευσης είναι η φωτεινότητα και η ευκρίνεια της απεικόνισης σε μεγάλο βαθμό, η δυνατότητα για επ' άπειρον καταχώρηση των ιχνών σε εξωτερικές μονάδες αποθήκευσης και η επανάκτηση αυτών των δεδομένων αν χρειαστεί. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να βρει πεδίο εφαρμογής σε συστήματα υπό δοκιμαστικό έλεγχο όπου μπορούμε να συγκρίνουμε το ελεγχόμενο ίχνος με το ίχνος ενός προτύπου σήματος ενός πρότυπου συστήματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να καταγράψουν παροδικά σήματα σε λειτουργία μονής σάρωσης (single sweep mode) χωρίς τους φραγμούς στην φωτεινότητα και στην ταχύτητα εγγραφής που θα υπήρχαν σε έναν αναλογικής καταχώρησης παλμογράφο. Το εμφανιζόμενο ίχνος μπορεί να παραποιηθεί αφού πρώτα αποκτηθεί , ποσότητα αυτού μπορεί να εστιασθεί σε μεγαλύτερο μέγεθος ώστε να γίνουν πιο ευδιάκριτες κάποιες λεπτομέρειες ή ακόμη και η επιμέρους απεικόνιση ενός μεγάλου σε διάρκεια σήματος ώστε να βρεθούν τυχόν περιοχές ενδιαφέροντος. Πολλά όργανα επιτρέπουν τον σχολιασμό του χρήστη σε αποθηκευμένα ίχνη.

Η ψηφιακή αποθήκευση επιτρέπει επίσης και την ύπαρξη ενός άλλου τύπου παλμογράφων , τους παλμογράφους δείγματος ισοδύναμου χρόνου (equivalent time sample), οι οποίοι αντί να λαμβάνουν διαδοχικά δείγματα μετά από τον σκανδαλισμό του γεγονότος, λαμβάνουν μόνο ένα δείγμα .Ωστόσο , ο παλμογράφος είναι σε θέση να περιορίσει με ακρίβεια την χρονική στιγμή της λήψης του δείγματος ,δημιουργώντας την εικόνα του σήματος στις επαναλήψεις του. Αυτό απαιτεί είτε ωρολογιακό μηχανισμό είτε ένα συνεχόμενο μοτίβο. Αυτός ο τύπος παλμογράφων χρησιμοποιείται συχνότερα σε εφαρμογές επικοινωνίας υψηλών ταχυτήτων ,επειδή επιτρέπει μεγάλο ρυθμό δειγματοληψίας και θόρυβο χαμηλού πλάτους εν συγκρίσει με τους παραδοσιακούς παλμογράφους πραγματικού χρόνου (real time).

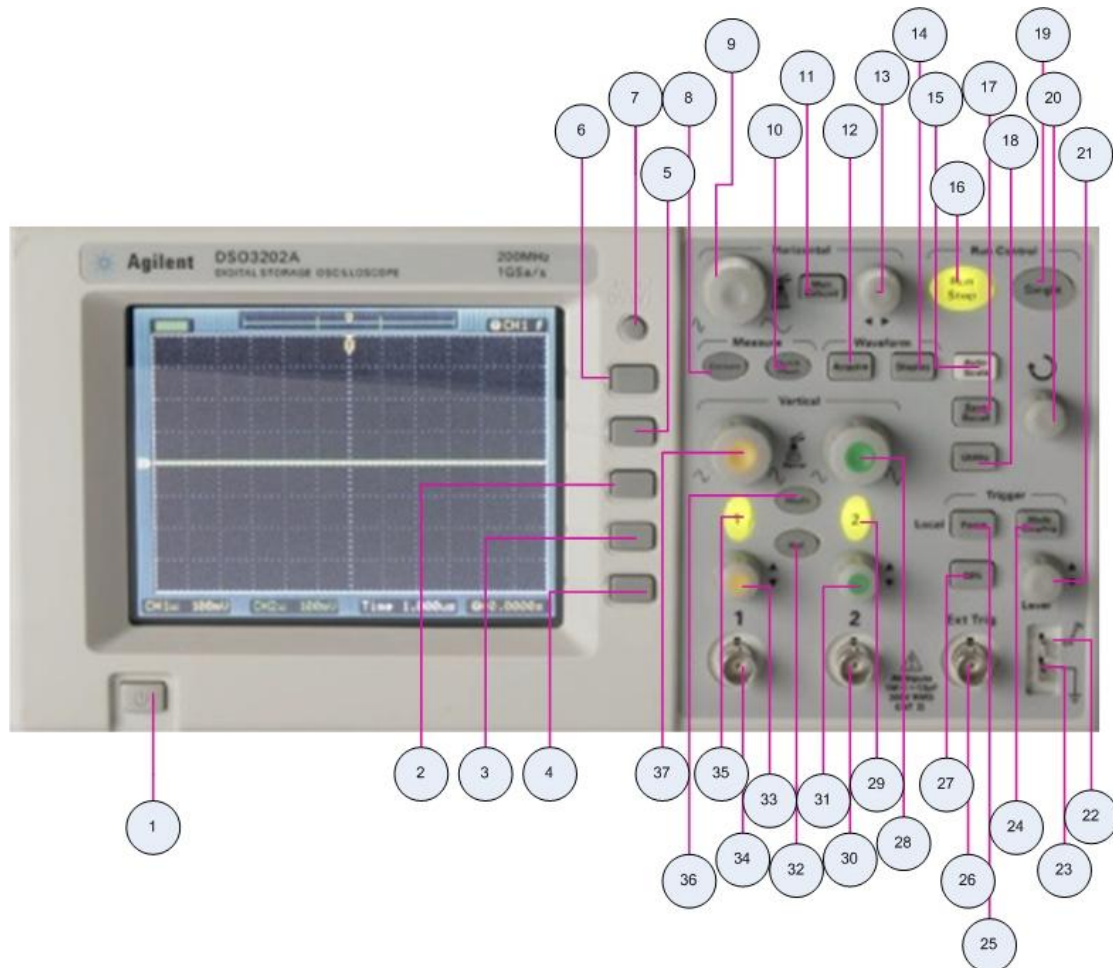
Οι ψηφιακοί παλμογράφοι περιορίζονται από την απόδοση των αναλογικών κυκλωμάτων εισόδου, την διάρκεια του δειγματοληπτικού παραθύρου και της ανάλυσης του ρυθμού δειγματοληψίας. Όταν δεν χρησιμοποιείται η λειτουργία του ισοδύναμου χρόνου , η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο ο ρυθμός του Nyquist, διπλάσια της συχνότητας του πιο υψίσυχνου στοιχείου του σήματος που παρατηρούμε για να αποφύγουμε την παραμόρφωση του σήματος (aliasing).

Τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών παλμογράφων έναντι των αναλογικών , είναι α) φωτεινότερη και μεγαλύτερη έγχρωμη οθόνη που επιτρέπει την διάκριση πολλαπλών ίχνων, β) δειγματοληψία ισοδύναμου χρόνου κατά μέσο όρο διαδοχικών σημάτων ή σάρωση για υψηλότερη ανάλυση σε επίπεδο μV , γ) Peak detection (ανίχνευση κορυφών), δ) Δυνατότητα για περιήγηση και εστίαση (pan και zoom) ανάμεσα σε πολλαπλά αποθηκευμένα ίχνη ,που διευκολύνουν τη λειτουργία του παλμογράφου ακόμα και από αρχάριους χρήστες χωρίς σκανδαλισμό (triggering), προϋποθέτοντας γρήγορη απόκριση από τον παλμογράφο (δεδομένου ότι μερικοί παλμογράφοι έχουν έως και 1ms καθυστέρηση) , ε) Δίνει δυνατότητα καταγραφής σε σήματα που μεταβάλλονται με πολύ αργό ρυθμό - όπως η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, στ) Δυνατότητα αυτοματισμού.

Μειονέκτημα των ψηφιακών παλμογράφων είναι ο περιορισμένος ρυθμός ανανέωσης της οθόνης. Η οθόνη δείχνει ακριβώς ίδια για κάθε ρυθμό σημάτων που ξεπερνά τον ρυθμό ανανέωσης της οθόνης (στους αναλογικούς παλμογράφους , ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί τον ρυθμό σκανδαλισμού των σημάτων, από τη σταθερότητα του ίχνους στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα). Επιπλέον , σε μερικές περιπτώσεις είναι δύσκολο να εντοπιστούν βλάβες ή άλλα σπάνια φαινόμενα όσο αυτό αφορά τις ασπρόμαυρες οθόνες των κλασικών ψηφιακών παλμογράφων ,κάτι που σε αναλογικούς παλμογράφους η οθόνη με την φθορίζουσα επικάλυψη κάνει ορατό ακόμα και αν αντικατασταθούν από μεταγενέστερα σήματα .

Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να ξεπεραστούν από τους ψηφιακούς παλμογράφους φωσφόρου (digital phosphor oscilloscopes) οι οποίοι αποθηκεύουν δεδομένα χρησιμοποιώντας αρκετά υψηλό ρυθμό ανανέωσης και τα απεικονίζουν με ποικίλη ευαισθησία ώστε να εξομοιώσουν την παραμονή του ίχνους στην οθόνη όπως αυτό προσφέρεται στους παλμογράφους καθοδικού σωλήνα. [2] [3] [4]

1.2 Χρήση Παλμογράφου



Πρόσωση παλμογράφου DSO3202A της Agilent [1]

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την πρόσωση του DSO3202A της Agilent , η πρόσωση και η χρήση του 3202 δεν διαφέρει από τον DSO3062A, που χρησιμοποιούμε για τις ανάγκες της πτυχιακής εργασίας, καθώς η διαφορά των δύο μοντέλων είναι το εύρος συχνοτήτων το οποίο είναι 60MHz για τον 3062 και 200MHz για τον 3202. Όπως φαίνεται και στην εικόνα κάθε στοιχείο της πρόσωσης του παλμογράφου αντιστοιχεί σε έναν αριθμό για την επεξήγηση της λειτουργίας του , όπως θα δούμε στη συνέχεια.

1. Κουμπί On/Off : Με αυτό το κουμπί τίθεται σε λειτουργία ή εκτός λειτουργίας ο παλμογράφος
2. Κουμπί χειρισμού Menu οθόνης : Αναλόγως το χειρισμό που θέλουμε να πράξουμε το κουμπί αυτό δίνει τη δυνατότητα συγκεκριμένης επιλογής που μπορεί να ανταποκρίνεται σε ρυθμίσεις του ίδιου του παλμογράφου αλλά και σε εμφάνιση δεδομένων που αφορούν τα σήματα που τοποθετούμε στις εισόδους του παλμογράφου
3. Κουμπί χειρισμού Menu οθόνης : Αναλόγως το χειρισμό που θέλουμε να πράξουμε το κουμπί αυτό δίνει τη δυνατότητα συγκεκριμένης επιλογής που μπορεί να ανταποκρίνεται σε ρυθμίσεις του ίδιου του παλμογράφου αλλά και σε εμφάνιση δεδομένων που αφορούν τα σήματα που τοποθετούμε στις εισόδους του παλμογράφου
4. Κουμπί χειρισμού Menu οθόνης : Αναλόγως το χειρισμό που θέλουμε να πράξουμε το κουμπί αυτό δίνει τη δυνατότητα συγκεκριμένης επιλογής που μπορεί να ανταποκρίνεται σε ρυθμίσεις του ίδιου του παλμογράφου αλλά και σε εμφάνιση

- δεδομένων που αφορούν τα σήματα που τοποθετούμε στις εισόδους του παλμογράφου
5. Κουμπί χειρισμού Menu οθόνης : Αναλόγως το χειρισμό που θέλουμε να πράξουμε το κουμπί αυτό δίνει τη δυνατότητα συγκεκριμένης επιλογής που μπορεί να ανταποκρίνεται σε ρυθμίσεις του ίδιου του παλμογράφου αλλά και σε εμφάνιση δεδομένων που αφορούν τα σήματα που τοποθετούμε στις εισόδους του παλμογράφου
 6. Κουμπί χειρισμού Menu οθόνης : Αναλόγως το χειρισμό που θέλουμε να πράξουμε το κουμπί αυτό δίνει τη δυνατότητα συγκεκριμένης επιλογής που μπορεί να ανταποκρίνεται σε ρυθμίσεις του ίδιου του παλμογράφου αλλά και σε εμφάνιση δεδομένων που αφορούν τα σήματα που τοποθετούμε στις εισόδους του παλμογράφου
 7. Κουμπί On/Off Menu Οθόνης : Το κουμπί αυτό αφορά την εμφάνιση ή απόκρυψη του Menu χειρισμού της οθόνης. Καθώς η πλειοψηφία των κουμπιών του παλμογράφου ανοίγουν το menu οθόνης με τις επιλογές που προσφέρουν ,η χρήση του συγκεκριμένου κουμπιού είναι κυρίως για την απόκρυψη του menu οθόνης μετά τις επιλογές ή ρυθμίσεις του χρήστη και σπανιότερα για την επανεμφάνιση του
 8. Κουμπί Cursors : Με το κουμπί αυτό εμφανίζεται το menu χειρισμού οθόνης με επιλογές που αφορούν δεδομένα μετρήσεων που ορίζονται από δύο κέρσορες τους οποίους μπορούμε να τοποθετήσουμε για την μέτρηση χρόνου ή τάσης. Διατίθενται τρεις επιλογές για τον τρόπο με τον οποίο θα κινηθούν οι κέρσορες στην οθόνη και μία για το κλείσιμο του μενού των cursors , τα οποία αναλύονται περαιτέρω σε επόμενη παράγραφο
 9. Επιλογέας οριζόντιας κλίμακας : Γυρίζοντας τον επιλογέα μπορούμε να ρυθμίσουμε την κλίμακα χρόνου ανά division (και κατά συνέπεια τον ρυθμό δειγματοληψίας του παλμογράφου) .Η ρύθμιση χρόνου ανά division αλλάζει με αλληλουχία βήματος 1-2-5, όταν αυτή τεθεί σε κλίμακα 50ms/div ή υψηλότερη , ο παλμογράφος μπαίνει σε λειτουργία αργής σάρωσης (slow scan mode) κατά την οποία κάνει χρήση της peak detect acquisition ώστε να μην χαθούν δεδομένα. Αντιστρόφως για κλίμακα 20ns/div ή χαμηλότερη , ο παλμογράφος χρησιμοποιεί ημιτονοειδή παρεμβολή ώστε να επεκτείνει την οριζόντια βάση του χρόνου. Η κλίμακα χρόνου ανά division εμφανίζεται πάντα στο status bar , στο κάτω μέρος της οθόνης , καθώς όλα τα κανάλια εμφανίζονται πάνω στην ίδια χρονική βάση, ο παλμογράφος εμφανίζει μόνο μία κλίμακα χρόνου για όλα τα κανάλια
 10. Κουμπί Measure : Αυτό το κουμπί δίνει την δυνατότητα προβολής δεδομένων που προκύπτουν από 20 αυτόματες μετρήσεις ,οι οποίες αφορούν μετρήσεις τάσης και χρόνου, καθώς και έναν μετρητή συχνότητας του υλικού. Για την προβολή συγκεκριμένης μέτρησης πατώντας το κουμπί Measure ,στην οθόνη εμφανίζεται το μενού των μετρήσεων, στο οποίο μπορούμε να επιλέξουμε από ποιο κανάλι ή την κυματομορφή που προκύπτει από το κουμπί Math και βασίζεται στα δεδομένα των δύο καναλιών εισόδου, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω στην λειτουργία του κουμπιού Math (36) , μέσω της επιλογής Source. Στη συνέχεια μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ τάσης και χρόνου για να δούμε τις επιλογές μετρήσεων που διατίθενται , από τις επιλογές voltage και time αντίστοιχα. Αφού επιλέξουμε τη μέτρηση που επιθυμούμε πατώντας το κουμπί Menu display (7) ,τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτή τη μέτρηση εμφανίζονται στο κάτω μέρος της οθόνης. Στο μενού που προκύπτει πατώντας το κουμπί measure μπορούμε να επιλέξουμε επίσης , την εμφάνιση όλων των αυτομάτων μετρήσεων μέσω της επιλογής Display all , αλλά και την απόκρυψη των δεδομένων που προκύπτουν από το κουμπί measure στην

οθόνη , μέσω της επιλογής Clear. Αναλυτικά οι αυτόματες μετρήσεις του παλμογράφου αναλύονται περαιτέρω σε επόμενη παράγραφο

11. Κουμπί Main/Delayed : Το κουμπί αυτό εμφανίζει το μενού Main/Delayed , το οποίο δίνει την δυνατότητα εμφάνισης της καθυστερημένης βάσης χρόνου, αλλαγή της λειτουργίας της βάσης χρόνου, επαναφορά του αντισταθμίσιμου σκανδαλισμού (trigger offset) , ρύθμιση του trigger holdoff (λειτουργία κατά την οποία, ορίζεται μία περίοδος στην οποία ο παλμογράφος ύστερα από σκανδαλισμό, δεν ξανασκανδαλίζει ώστε να εμφανίζεται πιο σταθερή η κυματομορφή) και επαναφορά του trigger holdoff. Σε επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται αναλυτικά οι λειτουργίες του μενού Main/Delayed
12. Κουμπί Acquire: Το κουμπί αυτό εμφανίζει το μενού Acquire , μέσω του οποίου μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ των δύο λειτουργιών δειγματοληψίας real time ή equivalent time sampling, καθώς και του τρόπου καταγραφής (acquisition mode) , μεταξύ των normal , average και peak detect mode, των οποίων η λειτουργία αναλύεται σε επόμενη παράγραφο
13. Επιλογέας οριζόντιας θέσης : Γυρίζοντας τον επιλογέα μετατοπίζουμε το σημείο σκανδαλισμού σε σχέση με το κέντρο της οθόνης. Ο επιλογέας μετατοπίζει την οριζόντια θέση όλων των καναλιών, των μαθηματικών συναρτήσεων ,καθώς και των κυματομορφών αναφοράς. Για την επαναφορά της θέσης σκανδαλισμού στο κέντρο της οθόνης θα πρέπει να πατήσουμε το κουμπί Main/Delayed (11) και από το μενού να διαλέξουμε την επιλογή trig-offset reset
14. Κουμπί Display: Το κουμπί αυτό εμφανίζει το μενού των ρυθμίσεων της οθόνης. Από το μενού αυτό, μέσω της επιλογής Type μπορούμε να επιλέξουμε τον τρόπο εμφάνισης των κυματομορφών μεταξύ κουκίδων (σημείων) ή διανυσμάτων (οπού ο παλμογράφος με ψηφιακή παρεμβολή ενώνει τα σημεία) , τον τρόπο εμφάνισης του πλέγματος μέσω της επιλογής Grid ,οπού εκεί μπορούμε να διαλέξουμε μεταξύ εμφάνισης πλέγματος και συντεταγμένων ή μόνο συντεταγμένων στους άξονες, ενώ μπορούμε να διαλέξουμε και την απόκρυψη συντεταγμένων και πλέγματος. Άλλη επιλογή των ρυθμίσεων είναι η διατήρηση της εμφάνισης των κυματομορφών, μέσω της επιλογής Persist ,οπού μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ της επ' άπειρον εμφάνισης πατώντας την επιλογή infinite ή την απόκρυψη με την επιλογή off. Η επιλογή Clear αποκρύπτει όσα εμφανίζονται στην οθόνη , ακόμη και αν έχει επιλεγεί infinite persist για τις κυματομορφές. Ακόμη , μπορεί να ρυθμιστεί η φωτεινότητα της οθόνης από το κεντρικό μενού ρυθμίσεων οθόνης, η χρονική διάρκεια του μενού ρυθμίσεων οθόνης μέσω της επιλογής Menu Display (μεταξύ 1,2,5,10,20 δευτερολέπτων ή επ' άπειρον) καθώς και ο χρωματισμός της οθόνης μέσω της επιλογής Screen ,οπού ο χρήστης μπορεί να διαλέξει μεταξύ normal ή inverted (η επιλογή inverted κατά περίπτωση χρησιμεύει αν ο χρήστης θέλει να εκτυπώσει τις κυματομορφές εξοικονομώντας μελάνι και χρόνο, καθώς το κύριο μέρος της οθόνης θα είναι λευκού χρώματος)
15. Κουμπί Auto-scale : Το κουμπί αυτό ενεργοποιεί μία δυνατότητα του παλμογράφου κατά την οποία , εφ' όσον υπάρχει κυματομορφή με συχνότητα ίση ή μεγαλύτερη των 50Hz και βαθμό χρησιμοποίησης (duty cycle) μεγαλύτερο του 1%, ο παλμογράφος θα ενεργοποιήσει όποιο κανάλι ,στο οποίο εφαρμόζεται κυματομορφή που πληροί τα παραπάνω κριτήρια , ρυθμίζοντας τις κατάλληλες κλίμακες οριζόντια και κάθετα, επίσης διαλέγει ένα πεδίο χρονικής βάσης, βασισμένο στην πηγή σκανδαλισμού. Η πηγή σκανδαλισμού που επιλέγεται , είναι το μικρότερο αριθμητικά κανάλι με εφαρμοζόμενη κυματομορφή.
16. Κουμπί Run/Stop: Το κουμπί αυτό δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ξεκινάει ή να σταματάει το σύστημα λήψης δεδομένων του παλμογράφου. Όταν το κουμπί

Run/Stop είναι πράσινο, σημαίνει πως ο παλμογράφος λαμβάνει δεδομένα, εφόσον πατηθεί , το χρώμα του γίνεται κόκκινο ,που σημαίνει πως ο παλμογράφος έχει σταματήσει να λαμβάνει δεδομένα. Κατά συνέπεια όταν το κουμπί Run/Stop είναι κόκκινο ,το πατάμε για να συνεχίσει να λαμβάνει δεδομένα

17. Κουμπί Save/Recall : Το κουμπί αυτό χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ή φόρτωση κυματομορφών ή ρυθμίσεων του παλμογράφου. Στο μενού save/recall που εμφανίζεται μετά το πάτημα του κουμπιού , επιλέγοντας storage ,εμφανίζονται οι επιλογές waveforms και setups, από όπου μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ κυματομορφών ή ρυθμίσεων αντίστοιχα. Ύστερα μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ save και load για την αποθήκευση ή την φόρτωση τους
18. Κουμπί Utility : Το κουμπί αυτό εμφανίζει το μενού Utilities, το οποίο διαθέτει επτά επιλογές. Πρώτη επιλογή είναι το Mask Test, οπου μέσω αυτού μπορούμε να ορίσουμε μία πρότυπη κυματομορφή, την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για να συγκρίνουμε με τις κυματομορφές των μετρήσεων μας. Πατώντας την επιλογή Source του Mask Test μενού μπορούμε να επιλέξουμε το κανάλι εισόδου , το σήμα του οποίου θα συγκριθεί με την πρότυπη κυματομορφή. Η έναρξη και η παύση του mask test ορίζονται από την επιλογή Operate στο μενού Mask Test , με την σήμανση play και stop αντίστοιχα. Στο Mask Test μενού επίσης διατίθεται η επιλογή Msg Display ,η οποία εμφανίζει ή αποκρύπτει ένα ενημερωτικό μήνυμα στην οθόνη, σχετικά με τις επιτυχείς και ανεπιτυχείς κυματομορφές (σε σύγκριση με τα όρια της πρότυπης κυματομορφής που ορίσαμε) καθώς και τον συνολικό αριθμό κυματομορφών. Πατώντας την επιλογή Output στο Mask Test μενού , μπορούμε να ορίσουμε πότε θα σταματήσει η διαδικασία της σύγκρισης επιλέγοντας Fail ή Pass αναλόγως αν θέλουμε να σταματήσει στην πρώτη ανεπιτυχή ή επιτυχή αντίστοιχα κυματομορφή που θα εξετάσει. Η δημιουργία της πρότυπης κυματομορφής γίνεται ρυθμίζοντας τα οριζόντια και κάθετα όρια σφάλματος από τις επιλογές X Mask και Y Mask αντίστοιχα με την χρήση του επιλογέα εισόδου (20) και πατώντας την επιλογή create mask, επίσης έχουμε την επιλογή να αποθηκεύσουμε την πρότυπη κυματομορφή ή να φορτώσουμε κάποια πρότυπη κυματομορφή από τις επιλογές save ή load αντίστοιχα. Η δεύτερη επιλογή του Utilities menu είναι το I/O parameters. Αφορά τον προγραμματισμό του παλμογράφου και όχι κάποια λειτουργία για το χρήστη. Η τρίτη επιλογή του Utilities menu είναι το Language που ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε 11 γλώσσες (απλοποιημένα και παραδοσιακά κινέζικα, κορεάτικα, γιαπωνέζικα, αγγλικά, γερμανικά, γαλλικά , πορτογαλικά ,ισπανικά , ιταλικά και ρώσικα) για την λειτουργία του παλμογράφου. Τέταρτη επιλογή του Utilities menu είναι το Sound ,όπου επιλέγοντας on ή off ανοίγουμε ή κλείνουμε αντίστοιχα τον βομβητή του παλμογράφου. Πέμπτη επιλογή του Utilities menu είναι το System Info το οποίο εμφανίζει στην οθόνη το μοντέλο του παλμογράφου, τον σειριακό αριθμό του, πόσες φορές έχει τεθεί σε λειτουργία, την έκδοση του λογισμικού του και πληροφορίες για εγκατεστημένες λειτουργίες σε αυτόν. Για να κλείσει το System Info θα πρέπει να πατηθεί το κουμπί Run /Stop (16) .Έκτη επιλογή του Utilities menu είναι τα Self Tests , τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες : screen tests όπου πατώντας το κουμπί Run /Stop (16) η οθόνη παίρνει διάφορα χρώματα ώστε να διαπιστωθεί τυχόν βλάβη σε αυτή και key tests όπου στην οθόνη παρουσιάζεται μία εικόνα της πρόσοψης του παλμογράφου και εκεί πατώντας τα κουμπιά και γυρίζοντας τους επιλογείς μπορούμε να δούμε αν έχουν κάποια βλάβη, καθώς όταν ένα κουμπί ή επιλογέας λειτουργεί σωστά η εικόνα του στην οθόνη θα πάρει πράσινο χρώμα. Έβδομη και τελευταία επιλογή του Utilities menu είναι το Self- Cal , το οποίο κάνει αυτόματα καλιμπράρισμα στον παλμογράφο και αφού

πατηθεί, στην οθόνη εμφανίζονται οι οδηγίες που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης για την πραγματοποίηση του

19. Κουμπί Single: Το κουμπί αυτό χρησιμοποιείται για την καταγραφή και εμφάνιση στην οθόνη μίας μονής λήψης δεδομένων, ανεξάρτητα από το αν ο παλμογράφος είναι σταματημένος ή λαμβάνει σήματα, μετά από τη χρήση του κουμπιού single, ο παλμογράφος σταματάει να λαμβάνει σήματα και το κουμπί Run/Stop παίρνει κόκκινο χρώμα
20. Επιλογέας εισόδου : Ο επιλογέας αυτός χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των μενού του παλμογράφου για την ρύθμιση των διαφόρων επιλεγμένων τιμών. Όταν δύναται να χρησιμοποιηθεί σε κάποιο μενού , στην οθόνη του μενού εμφανίζεται η σήμανση του επιλογέα αυτού κάτω από την επιλογή
21. Επιλογέας Level : Ο επιλογέας αυτός χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του επιπέδου σκανδαλισμού. Στρέφοντας τον επιλογέα Level , το επίπεδο σκανδαλισμού φαίνεται στην κάτω αριστερά γωνία της οθόνης. Αν η ρύθμιση είναι για σύζευξη DC, το επίπεδο σκανδαλισμού εμφανίζεται ως τάση , αν η ρύθμιση είναι για σύζευξη AC ή LF reject τότε εμφανίζεται ως ποσοστό επί του εύρους σκανδαλισμού. Επίσης για σύζευξη DC ,μια γραμμή στην οθόνη ,δείχνει τη θέση του επιπέδου σκανδαλισμού σε σχέση με την κυματομορφή
22. Επαφή εξόδου σήματος αμπεροτσιμπίδας : Για χαμηλές συχνότητες , η αμπεροτσιμπίδα συνδέεται στις επαφές (22) και (23), για υψηλές συχνότητες συνδέεται μέσω αντάπτορα σε μία από τις εισόδους των καναλιών (30) ή (34)
23. Επαφή γείωσης αμπεροτσιμπίδας : Για την γείωση της αμπεροτσιμπίδας σε χαμηλές συχνότητες
24. Κουμπί Mode /Coupling : Το κουμπί αυτό εμφανίζει το μενού Mode/Coupling στο οποίο μπορούμε να ορίσουμε τη λειτουργία σκανδαλισμού που επιθυμούμε, το trigger sweep και τον τρόπο σύζευξης. Για να διαλέξουμε την λειτουργία σκανδαλισμού ,πατώντας την επιλογή Mode διαλέγουμε μεταξύ των Edge,το οποίο χρησιμοποιείται σε αναλογικά αλλά και ψηφιακά κυκλώματα και το οποίο ενεργοποιείται όταν η είσοδος υπερβεί συγκεκριμένη τιμή τάσης που έχουμε ορίσει, Pulse , το οποίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση παλμών σε συγκεκριμένα πλάτη και Video το οποίο χρησιμοποιείται για τον σκανδαλισμό γραμμών ή πεδίων σε καταγεγραμμένες κυματομορφές. Στη συνέχεια διαλέγουμε στην επιλογή Source σε ποια κυματομορφή θα γίνει ο σκανδαλισμός, ενώ ανάλογα την επιλογή μας στη λειτουργία (Mode) προκύπτει και αντίστοιχη επιλογή για να θέσουμε τα όρια στα ενεργοποιηθεί ο σκανδαλισμός. Η επιλογή sweep καθορίζει αν οι λήψεις δεδομένων θα γίνεται χωρίς ή με ένα μόνο σκανδαλισμό. Οι υπό-επιλογές στο trigger sweep είναι auto και normal όπου η λήψη γίνεται χωρίς και με σκανδαλισμό αντίστοιχα. Τέλος η σύζευξη του σκανδαλισμού,trigger coupling επιλέγεται αφού έχουμε διαλέξει την λειτουργία (για Edge ή Pulse) στην επιλογή coupling και χρησιμοποιείται για να φιλτράρει μέρη του σήματος χαμηλής ή υψηλής συχνότητας ή dc offset τα οποία παρεμβαίνουν στην επίτευξη ενός σταθερού σκανδαλισμού. Το trigger coupling επηρεάζει μόνο το σύστημα σκανδαλισμού και όχι το πώς εμφανίζεται το σήμα στην οθόνη. Οι υπό-επιλογές για το trigger coupling είναι DC , LF reject το οποίο θέτει τη σύζευξη σκανδαλισμού σε απόρριψη υψηλών συχνοτήτων (με όριο τα 10kHz), HF reject το οποίο θέτει τη σύζευξη σκανδαλισμού σε απόρριψη χαμηλών συχνοτήτων (με όριο τα 100kHz) και AC ,το οποίο χρησιμοποιείται για κυματομορφές συχνότητας 50Hz και πάνω
25. Κουμπί (Local) Force : Το κουμπί αυτό χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να πραγματοποιήσουμε λήψη δεδομένων ακόμη και όταν το σήμα δεν είναι στα όρια ενεργοποίησης του σκανδαλισμού που έχουμε θέσει. Το κουμπί δεν έχει καμία χρήση

αν η λήψη δεδομένων έχει παυτεί . Μία ακόμη λειτουργία του κουμπιού αυτού , η Local Force, είναι η επιστροφή του ελέγχου του παλμογράφου στο πάνελ ,όταν είναι συνδεδεμένος και ελέγχεται από απομακρυσμένη συσκευή (στη περίπτωση σύνδεσης με απομακρυσμένη συσκευή ,ο έλεγχος του παλμογράφου γίνεται από τον υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ,ενώ τα κουμπιά και οι επιλογείς πλην των κουμπιών Power (1) και Force (25) δεν ανταποκρίνονται, επίσης στην πάνω δεξιά γωνία της οθόνη εμφανίζεται η ένδειξη Rmt ,με κόκκινο χρώμα, που ενημερώνει ότι ο έλεγχος γίνεται από απομακρυσμένη συσκευή)

- 26.Επαφή Exit Trigger: Μέσω αυτής της επαφής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε εξωτερικό σήμα για τον σκανδαλισμό , καθώς επίσης στην περίπτωση αυτή στο μενού Mode/Coupling υπάρχουν οι επιλογές EXT και EXT/5 στο Source (η επιλογή EXT/5 μικραίνει το σήμα που τοποθετούμε στην επαφή κατά το ένα πέμπτο)
- 27.Κουμπί 50% : Το κουμπί αυτό θέτει το επίπεδο σκανδαλισμού στο 50% του κάθετου πλάτους του σήματος
- 28.Επιλογέας κάθετης κλίμακας καναλιού 2: Γυρίζοντας τον επιλογέα μπορούμε να ρυθμίσουμε το πλάτος της κυματομορφής του καναλιού 2 ανά division, χρησιμοποιώντας τη γείωση ως σημείο αναφοράς .Η ρύθμιση πλάτους ανά division αλλάζει με αλληλουχία βήματος 1-2-5, από 2mV/div έως 10V/div (δεδομένου ότι το probe είναι στη ρύθμιση 1X) .Πατώντας τον επιλογέα προς τα μέσα, εναλλάσσουμε τη λειτουργία της κλίμακας ανάμεσα σε vernier και normal, όπου η κλίμακα vernier είναι μικρομετρική, ενώ η λειτουργία της normal είναι αυτή που αναφέρω παραπάνω (1-2-5). Επίσης η κλίμακα vernier δύναται να χρησιμοποιηθεί μόνο στις κυματομορφές των καναλιών 1 και 2 ,ενώ δεν λειτουργεί για τις κυματομορφές που προκύπτουν από το κουμπί math (36) ή κυματομορφές αναφοράς που προκύπτουν από το κουμπί ref (32). Η ρύθμιση της κλίμακας του πλάτους του καναλιού, εμφανίζεται στο κάτω μέρος της οθόνης στο status bar
- 29.Κουμπί On/Off καναλιού 2: Το κουμπί αυτό, αν πατηθεί όταν η κυματομορφή του καναλιού 2 δεν εμφανίζεται στην οθόνη ενεργοποιεί την κυματομορφή και εμφανίζει το μενού του καναλιού 2. Αν πατηθεί όταν στην οθόνη εμφανίζεται μόνο η κυματομορφή ,τότε εμφανίζει και το μενού του καναλιού 2. Αν στην οθόνη εμφανίζεται και η κυματομορφή του καναλιού 2 και το μενού του καναλιού ,τότε πατώντας το κουμπί αυτό αποκρύπτεται το μενού και απενεργοποιείται η κυματομορφή
- 30.Επαφή εισόδου καναλιού 2 : Επαφή για την είσοδο του σήματος που θέλουμε να απεικονίσουμε στο κανάλι 2
- 31.Επιλογέας κάθετης θέσης καναλιού 2: Γυρνώντας τον επιλογέα μπορούμε να αλλάξουμε την κάθετη θέση της κυματομορφής του καναλιού 2 στην οθόνη. Καθώς η κάθετη θέση της κυματομορφής μεταβάλλεται ,εμφανίζεται ένα μήνυμα το οποίο δείχνει την θέση του σημείου αναφοράς (της γείωσης) σε σχέση με το κέντρο της οθόνης για μικρό χρονικό διάστημα στην κάτω αριστερά γωνία της οθόνης. Η λειτουργία αυτή του παλμογράφου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την σύγκριση κυματομορφών , τοποθετώντας την μία κυματομορφή πάνω στην άλλη ή την μία κυματομορφή κάτω από την άλλη
- 32.Κουμπί Ref : Το κουμπί αυτό δίνει την δυνατότητα αποθήκευσης μιας ήδη υπάρχουσας κυματομορφής και τον τρόπο με τον οποίο θα εμφανίζεται στην οθόνη ,για λόγους αναφοράς. Δεδομένου ότι υπάρχει έστω μία κυματομορφή στην οθόνη του παλμογράφου, πατώντας το κουμπί Ref και ύστερα το κουμπί χειρισμού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή source, διαλέγουμε ποια κυματομορφή θα αποτελέσει την κυματομορφή αναφοράς και πατάμε στην επιλογή save για την αποθήκευση της. Οι τρεις επιλογές που μένουν στο Ref menu , αφορούν την αντιστροφή της

κυματομορφής αναφοράς διαλέγοντας μεταξύ on και off στην επιλογή invert , την θέση και την κλίμακα πλάτους οι οποίες αφού επιλεγθούν με το κουμπί χειρισμού της οθόνης που τους αντιστοιχεί (η κάθε μία από αυτές με ανάλογη σήμανση), ορίζονται από τον επιλογέα εισόδου (20). Η κυματομορφή αναφοράς έχει λευκό χρώμα στην οθόνη

33. Επιλογέας κάθετης θέσης καναλιού 1: Γυρνώντας τον επιλογέα μπορούμε να αλλάξουμε την κάθετη θέση της κυματομορφής του καναλιού 1 στην οθόνη. Καθώς η κάθετη θέση της κυματομορφής μεταβάλλεται ,εμφανίζεται ένα μήνυμα το οποίο δείχνει την θέση του σημείου αναφοράς (της γείωσης) σε σχέση με το κέντρο της οθόνης για μικρό χρονικό διάστημα στην κάτω αριστερά γωνία της οθόνης. Η λειτουργία αυτή του παλμογράφου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την σύγκριση κυματομορφών , τοποθετώντας την μία κυματομορφή πάνω στην άλλη ή την μία κυματομορφή κάτω από την άλλη
34. Επαφή εισόδου καναλιού 1 : Επαφή για την είσοδο του σήματος που θέλουμε να απεικονίσουμε στο κανάλι 1
35. Κουμπί On/Off καναλιού 1: Το κουμπί αυτό, αν πατηθεί όταν η κυματομορφή του καναλιού 1 δεν εμφανίζεται στην οθόνη ενεργοποιεί την κυματομορφή και εμφανίζει το μενού του καναλιού 1. Αν πατηθεί όταν στην οθόνη εμφανίζεται μόνο η κυματομορφή ,τότε εμφανίζει και το μενού του καναλιού 1. Αν στην οθόνη εμφανίζεται και η κυματομορφή του καναλιού 1 και το μενού του καναλιού ,τότε πατώντας το κουμπί αυτό αποκρύπτεται το μενού και απενεργοποιείται η κυματομορφή
36. Κουμπί Math : Το κουμπί αυτό εμφανίζει το Math menu , μέσω του οποίου μπορούμε να κάνουμε πρόσθεση, πολλαπλασιασμό ή αφαίρεση μεταξύ των δύο καναλιών , ή μετασχηματισμό Fourier σε ένα από τα δύο κανάλια. Στο Math menu πατώντας στην επιλογή Operate διαλέγουμε μεταξύ των 1+2 ,1-2 και 1x2 ανάλογα την πράξη που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε μεταξύ των κυματομορφών ενώ επίσης διατίθεται και επιλογή invert για την αντιστροφή της εικόνας της μαθηματικής κυματομορφής. Η επιλογή FFT (Fast Fourier Transform) μετασχηματίζει μια κυματομορφή από το πεδίο του χρόνου ,στο πεδίο της συχνότητας. Οι κυματομορφές FFT χρησιμεύουν στον εντοπισμό αρμονικών και θορύβου σε συστήματα, θορύβου σε τροφοδοτικά DC και ανάλυση δονήσεων. Για την λειτουργία FFT , αφού την επιλέξουμε μέσω του Operate στο Math menu, διαλέγουμε σε ποια κυματομορφή θα την εφαρμόσουμε μέσω του Source επιλέγοντας το επιθυμητό κανάλι , από την επιλογή Window διαλέγουμε τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής FFT ανάλογα με την χρήση που θέλουμε μεταξύ καλύτερης ανάλυσης της συχνότητας ή καλύτερης ανάλυσης του μεγέθους. Μέσω της επιλογής Display διαλέγουμε αν θέλουμε την κυματομορφή FFT σε πλήρη οθόνη ή σε Split screen ώστε να εμφανίζονται και οι υπόλοιπες κυματομορφές (ή ενδεχομένως η κυματομορφή που χρησιμοποιήσαμε ως πηγή) . Μέσω της επιλογής Scale μπορούμε να διαλέξουμε μονάδες μεταξύ V_{rms} και dBV_{rms} . Οι δυο επιλογές που μένουν στο Math menu , αφορούν την θέση και την κλίμακα πλάτους οι οποίες αφού επιλεγθούν με το κουμπί χειρισμού της οθόνης που τους αντιστοιχεί (η κάθε μία από αυτές με ανάλογη σήμανση), ορίζονται από τον επιλογέα εισόδου (20). Οι μαθηματικές κυματομορφές έχουν μωβ χρώμα στην οθόνη
37. Επιλογέας κάθετης κλίμακας καναλιού 1: Γυρίζοντας τον επιλογέα μπορούμε να ρυθμίσουμε το πλάτος της κυματομορφής του καναλιού 1 ανά division, χρησιμοποιώντας τη γείωση ως σημείο αναφοράς .Η ρύθμιση πλάτους ανά division αλλάζει με αλληλουχία βήματος 1-2-5, από 2mV/div έως 10V/div (δεδομένου ότι το probe είναι στη ρύθμιση 1X) .Πατώντας τον επιλογέα προς τα μέσα, εναλλάσσουμε τη λειτουργία της κλίμακας ανάμεσα σε vernier και normal, όπου η κλίμακα vernier

είναι μικρομετρική, ενώ η λειτουργία της normal είναι αυτή που αναφέρω παραπάνω (1-2-5). Επίσης η κλίμακα vernier δύναται να χρησιμοποιηθεί μόνο στις κυματομορφές των καναλιών 1 και 2 ,ενώ δεν λειτουργεί για τις κυματομορφές που προκύπτουν από το κουμπί math (36) ή κυματομορφές αναφοράς που προκύπτουν από το κουμπί ref (32). Η ρύθμιση της κλίμακας του πλάτους του καναλιού, εμφανίζεται στο κάτω μέρος της οθόνης στο status bar

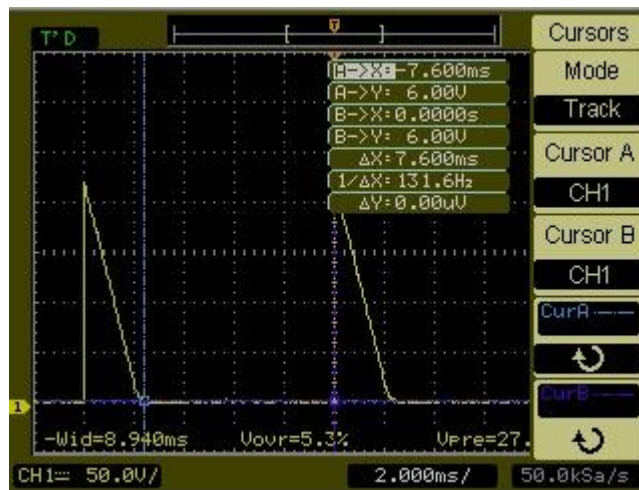
Με βάση την λειτουργία τους τα κουμπιά και οι επιλογείς μπορούν να χωριστούν σε 9 κατηγορίες:

- Έλεγχος Μετρήσεων : Κουμπιά Cursors και Measure
- Έλεγχος Κυματομορφών : Κουμπιά Acquire και Display
- Έλεγχος Μενού : Κουμπιά Save/Recall και Utility
- Κάθετος έλεγχος : Επιλογείς Κάθετης θέσης και κλίμακας και κουμπιά καναλιού 1, καναλιού 2, Math και Ref
- Οριζόντιος έλεγχος : Επιλογείς οριζόντιας θέσης και κλίμακας και κουμπί Main/Delayed
- Έλεγχος Σκανδαλισμού : Επιλογέας Level και κουμπιά 50%, Mode/Coupling και Force
- Έλεγχος Εκτέλεσης : Κουμπιά Run/Stop, Single και Auto-Scale
- Κουμπιά διαχείρισης μενού: Τα 5 κουμπιά χειρισμού μενού οθόνης
- Επιλογέας εισόδου

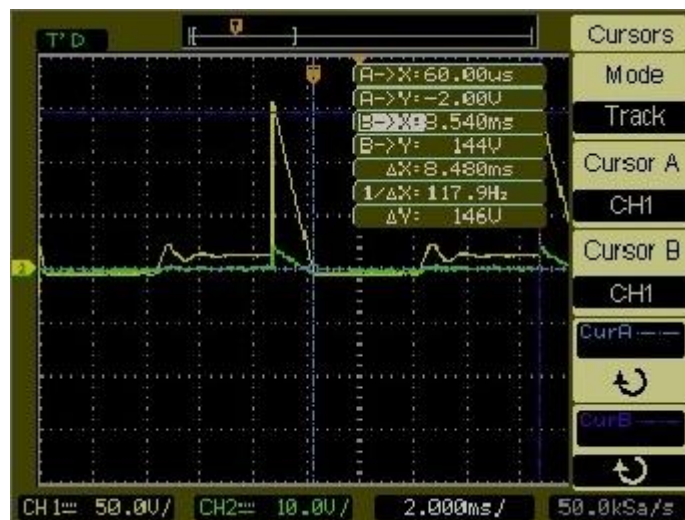
1.2.1 Πραγματοποίηση μετρήσεων με το μενού Cursors

Πατώντας το κουμπί Cursors (8) , ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από το μενού που θα εμφανιστεί τον τρόπο με τον οποίο θα μετακινηθούν οι κέρσορες στην κυματομορφή. Οι επιλογές είναι οι εξής :

- Manual mode, στην οποία ο χρήστης μετακινεί ο ίδιος τους δυο παράλληλους κέρσορες με τον επιλογέα εισόδου (20), ο εκάστοτε κέρσορας επιλέγεται ώστε να μετακινηθεί πατώντας CurA ή CurB στην αντίστοιχη επιλογή, από το μενού Type ο χρήστης διαλέγει μεταξύ Time ή Voltage για τον καθορισμό του τύπου μέτρησης και από την επιλογή Source διαλέγεται η επιθυμητή για την μέτρηση κυματομορφή. Οι τιμές που εμφανίζονται είναι : CurA, CurB τα οποία παρουσιάζουν την θέση του κέρσορα στην οθόνη , ΔX ή ΔY και $1/\Delta X$ ή $1/\Delta Y$ ανάλογα με την επιλογή που κάναμε στο Type , για τον χρόνο ή το πλάτος της τάσης αντίστοιχα.
- Track mode, στην οποία ο χρήστης μετακινεί ένα ή δυο κέρσορες τύπου cross-hair, ο οποίος ή οι οποίοι ανιχνεύουν τα σημεία μιας κυματομορφής και μπορούν να πραγματοποιήσουν μετρήσεις μεταξύ διαφορετικών σημείων της. Πατώντας Cursor A ή Cursor B επιλέγουμε το κανάλι στο οποίο θα κινείται και θα κάνει μετρήσεις ο κέρσορας ή επιλέγοντας None τον απενεργοποιούμε. Ο εκάστοτε κέρσορας επιλέγεται ώστε να μετακινηθεί πατώντας CurA ή CurB στην αντίστοιχη επιλογή και μετακινείται με τον επιλογέα εισόδου (20). Οι τιμές του κέρσορα A εμφανίζονται ως A-> X και A->Y , ομοίως για τον κέρσορα B εμφανίζονται ως B-> X και B->Y. Αν είναι και οι δυο κέρσορες ενεργοποιημένοι, τότε εμφανίζονται και οι τιμές ΔX που είναι η χρονική διαφορά μεταξύ των δυο κερσόρων , $1/\Delta X$ που είναι η συχνότητα που σχετίζεται με την χρονική διαφορά μεταξύ των δυο κερσόρων και ΔY που είναι η διαφορά πλάτους μεταξύ των δύο κερσόρων.



Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε , την χρήση της επιλογής Track mode για την μέτρηση του χρόνου μεταξύ των κερσόρων A και B , οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε με απλή μέθοδο των τριών να προκύπτει από το ΔX , η γωνία έναυσης της ημιελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας με ωμικό φορτίο που είχε τοποθετηθεί για τις ανάγκες αυτής της πτυχιακής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα για το παράδειγμα της εικόνας , γνωρίζουμε ότι 10ms στην κλίμακα του χρόνου αντιστοιχούν σε μια ημιπερίοδο , δηλαδή 180° , οπότε αφού το ΔX , η απόσταση μεταξύ των κερσόρων είναι 7,6ms , τότε η γωνία έναυσης της γέφυρας θα είναι $136,8^\circ$.



Στην παραπάνω εικόνα , η οποία πρόκειται για ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα με φορτίο κινητήρα και γωνία έναυσης $152,64^\circ$, μέσα από τους κέρσορες μπορούμε να ενημερωθούμε και για το πλάτος της κυματομορφής που προκύπτει από το ΔY , 146V, ενώ επίσης όπως και στο παράδειγμα της προηγούμενης εικόνας η γωνία έναυσης προκύπτει με απλή μέθοδο των τριών από το ΔX .

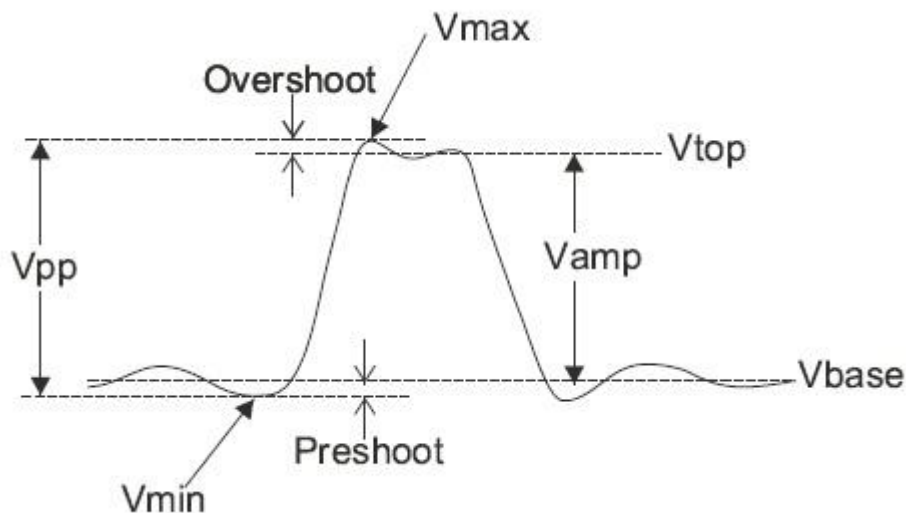
- Auto Mode, στην επιλογή αυτή οι κέρσορες εμφανίζονται για την πιο πρόσφατη αυτόματη μέτρηση, στην περίπτωση που δεν έχει γίνει κάποια αυτόματη μέτρηση, όπως αυτή περιγράφεται στην ανάλυση του κουμπιού_Measure (10) σε προηγούμενη παράγραφο, δεν θα εμφανιστούν κέρσορες.

1.2.2 Πραγματοποίηση μετρήσεων με το μενού Measure

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη παράγραφο για την χρήση του κουμπιού Measure (10), διατίθενται 21 αυτόματες μετρήσεις, 10 αυτόματες μετρήσεις για την τάση, 10 αυτόματες μετρήσεις για τον χρόνο και ο μετρητής συχνότητας του υλικού. Πιο συγκεκριμένα οι μετρήσεις έχουν ως εξής :

1) Μετρήσεις Τάσης

- Vpp (Peak- to- Peak Voltage)
- Vmax (Maximum Voltage)
- Vmin (Minimum Voltage)
- Vavg (Average Voltage)
- Vamp (Amplitude Voltage = Vtop - Vbase)
- Vtop (Top Voltage)
- Vbase (Base Voltage)
- Vrms (Root-Mean- Square Voltage)
- Overshoot
- Preshoot



Σημεία μέτρησης της τάσης [1]

Vmax: Το μέγιστο πλάτος, το θετικότερο άκρο της τάσης της κυματομορφής, όπως μετράται
Vmin: Το ελάχιστο πλάτος, το αρνητικότερο άκρο της τάσης της κυματομορφής, όπως μετράται

Vpp: Το πλάτος μεταξύ των δύο κορυφών, του θετικότερου και αρνητικότερου άκρου της τάσης της κυματομορφής όπως μετράται

Vavg: Μέση τάση, ο αριθμητικός μέσος όρος για ολόκληρη την κυματομορφή

Vtop: Τάση επίπεδης κορυφής της κυματομορφής χρήσιμο κυρίως σε κυματομορφές τετραγωνικών παλμών

Vbase: Τάση επίπεδης βάσης της κυματομορφής χρήσιμο κυρίως σε κυματομορφές τετραγωνικών παλμών

Vamp: Η τάση μεταξύ Vtop και Vbase, προκύπτει αφαιρώντας την Vbase από την Vtop

Vrms: Η πραγματική ενεργός τιμή της τάσης ολόκληρης της κυματομορφής, προκύπτει από

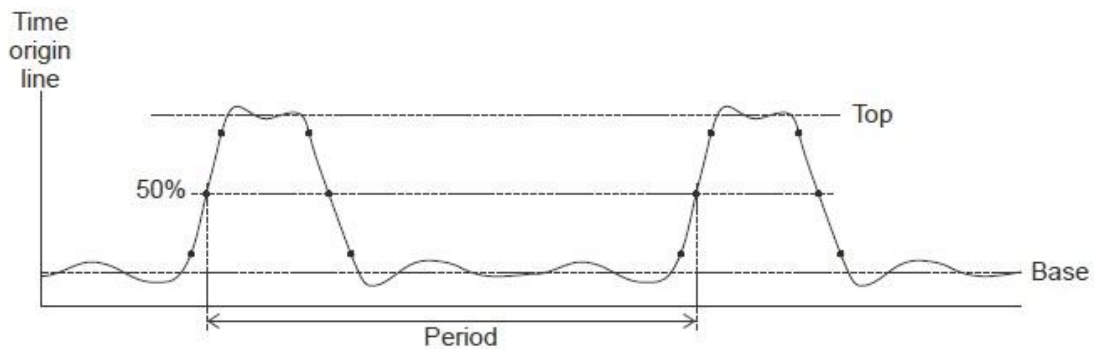
τον τύπο $RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}}$, όπου xi η τιμή στο i σημείο και n το πλήθος των σημείων

Overshoot: ορίζεται ως $(V_{max}-V_{top})/V_{amp}$, χρήσιμο κυρίως σε κυματομορφές τετραγωνικών παλμών

Preshoot: ορίζεται ως $(V_{min} - V_{base})/V_{amp}$, χρήσιμο κυρίως σε κυματομορφές τετραγωνικών παλμών

2) Μετρήσεις χρόνου

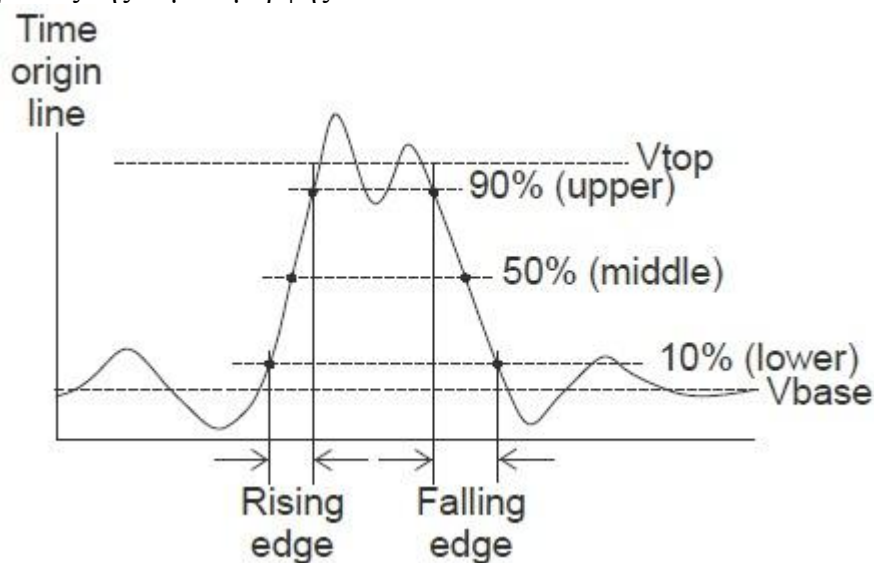
- Frequency
- Period
- Rise Time
- Fall Time
- + Pulse Width
- -Pulse Width
- + Duty Cycle
- - Duty Cycle
- Delay 1- 2, rising edges
- Delay 1- 2, falling edges
- Counter (Frequency)



Σημεία μέτρησης του χρόνου (α) [1]

Frequency : η συχνότητα της κυματομορφής

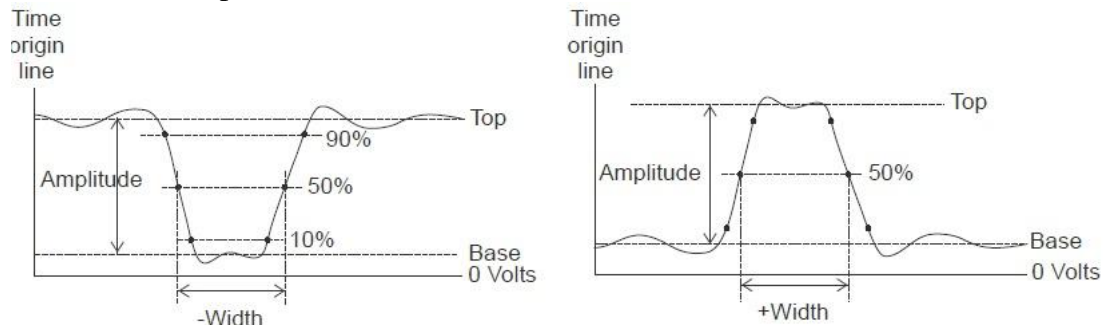
Period : η περίοδος της κυματομορφής



Σημεία μέτρησης του χρόνου (β) [1]

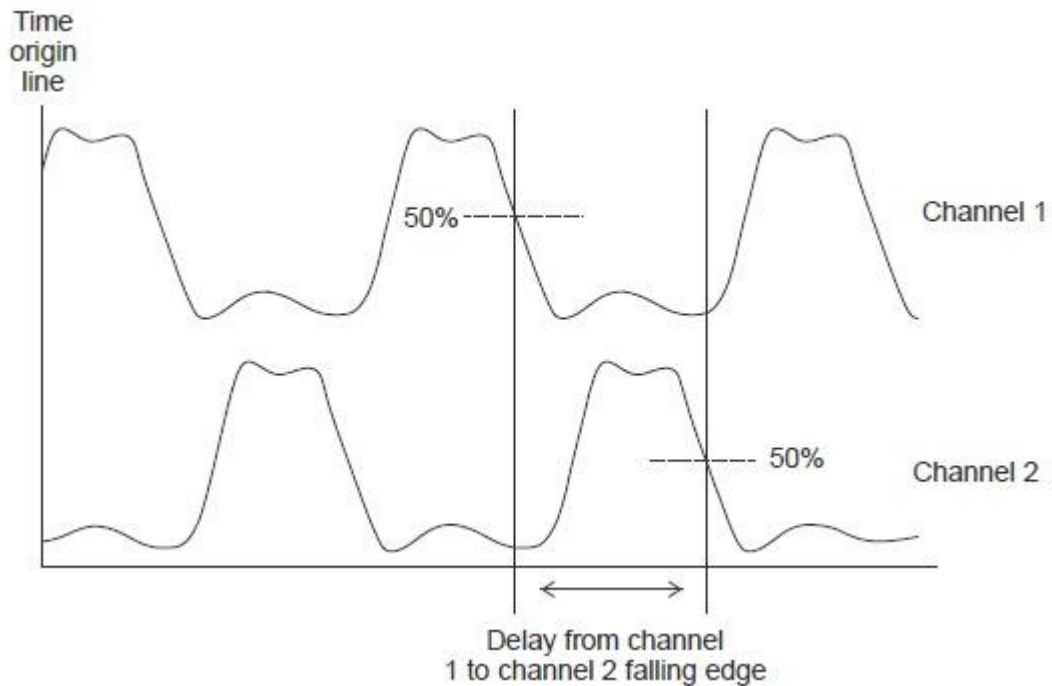
Rise Time : ο χρόνος ανύψωσης της κυματομορφής , γίνεται πιο κατανοητό στην παραπάνω εικόνα , είναι περίπου ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει η τάση από το 10% του V_{amp} ως το 90% του V_{amp}

Fall Time : ο χρόνος πτώσης της κυματομορφής , γίνεται πιο κατανοητό στην παραπάνω εικόνα , είναι περίπου ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει η τάση από το 90% του Vamp ως το 10% του Vamp



Σημεία μέτρησης του χρόνου (γ) [1]

- + Pulse Width : μετράει το χρονικό πλάτος του θετικού παλμού μιας κυματομορφής
- Pulse Width : μετράει το χρονικό πλάτος του αρνητικού παλμού μιας κυματομορφής
- + Duty Cycle : μετράει τον θετικό βαθμό χρησιμοποίησης σε μία κυματομορφή
- Duty Cycle : μετράει τον αρνητικό βαθμό χρησιμοποίησης σε μία κυματομορφή



Σημεία μέτρησης του χρόνου (δ) [1]

Delay 1- 2, rising edges : μετράει την καθυστέρηση μεταξύ δυο κυματομορφών (από το κανάλι 1 στο κανάλι 2) χρησιμοποιώντας τον χρόνο ανύψωσης της κυματομορφής

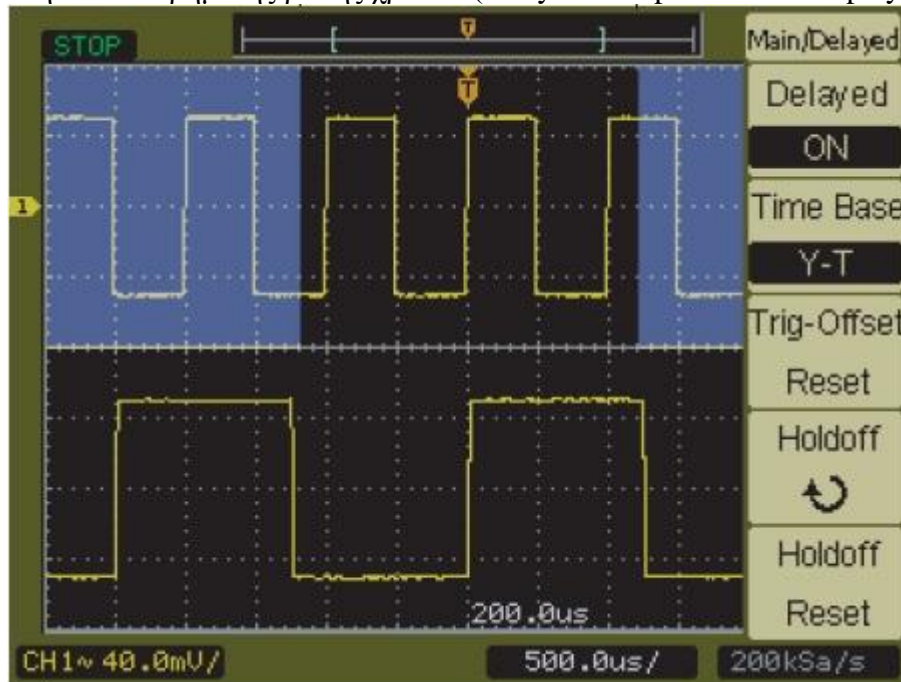
Delay 1- 2, falling edges : μετράει την καθυστέρηση μεταξύ δυο κυματομορφών (από το κανάλι 1 στο κανάλι 2) χρησιμοποιώντας τον χρόνο πτώσης της κυματομορφής

Counter (Frequency) : Οι παλμογράφοι της σειράς 3000 της Agilent , διαθέτουν μετρητή συχνότητας του υλικού, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει στην πηγή που έχουμε σκανδαλίσει για συχνότητες από 5Hz έως την ονομαστική συχνότητα του παλμογράφου , ενδεικτικά 60MHz για τον 3062A που χρησιμοποιούμε.

1.2.3 Χρήση μενού Main/Delayed

Πατώντας το κουμπί Main/Delayed , έχουμε την εμφάνιση του ομώνυμου μενού το οποίο μας δίνει τις εξής δυνατότητες :

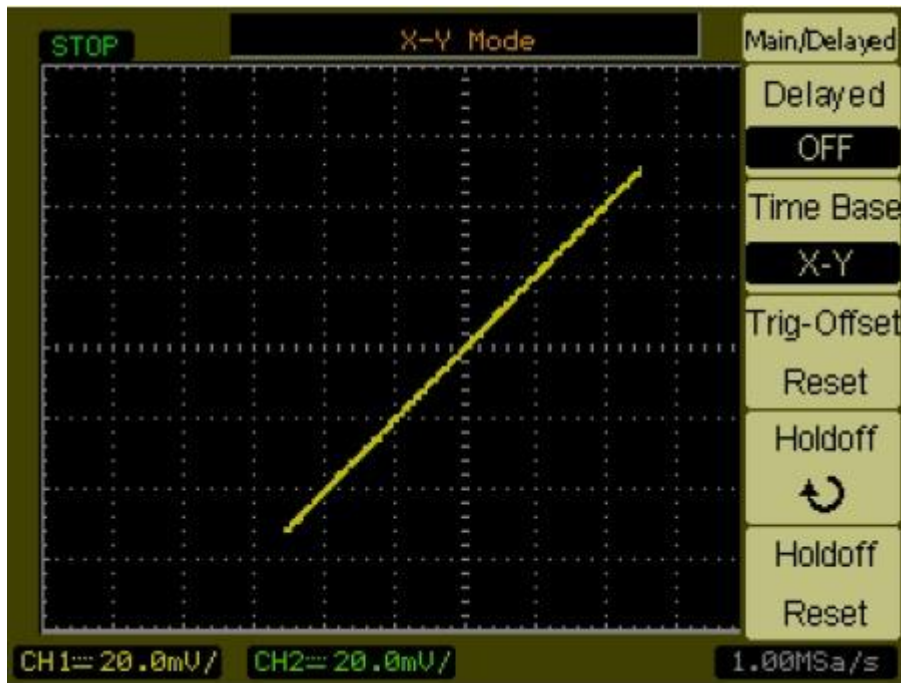
- Εμφάνιση καθυστερημένης βάσης χρόνου (delayed sweep time base display)



Delayed sweep time base display [1]

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η δυνατότητα αυτή μεγεθύνει μία ποσότητα της αρχικής κυματομορφής, η οποία αρχική κυματομορφή φαίνεται στο επάνω μισό της οθόνης και, την παρουσιάζει στο κάτω μισό της οθόνης σε εστιασμένη χρονική βάση (στο παράδειγμα που εικονίζεται στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι η αρχική κυματομορφή είναι σε κλίμακα χρόνου 500μsec/div ενώ η ποσότητα καθυστερημένης βάσης χρόνου είναι σε κλίμακα χρόνου 200μsec/div). Για να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη δυνατότητα , επιλέγουμε delayed on στο μενού Main/Delayed. Με αυτή την κίνηση εμφανίζονται στα δύο μισά της οθόνης , η αρχική κυματομορφή και η ποσότητα καθυστερημένης βάσης στις θέσεις που φαίνονται στην εικόνα και αναλύθηκαν παραπάνω. Με τον επιλογέα οριζόντιας κλίμακας (9) μεταβάλλεται η εστίαση ,στενεύοντας ή πλαταίνοντας την περιοχή που μεγεθύνεται. Με τον επιλογέα οριζόντιας θέσης (13) μετακινούμε την περιοχή που μεγεθύνεται, χρονικά προς την αρχή ή το τέλος της αρχικής κυματομορφής

- Αλλαγή λειτουργίας της βάσης χρόνου



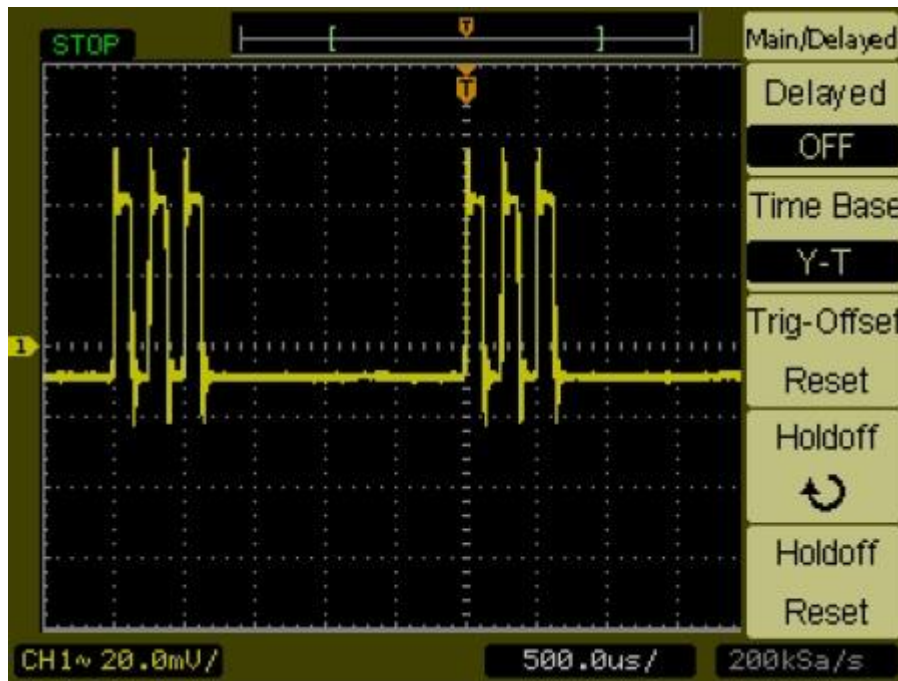
X-Y Display Format[1]

Από την επιλογή Time Base στο μενού Main/Delayed ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την εμφάνιση της κυματομορφής μεταξύ Y-T που είναι ο κάθετος άξονας του πλάτους του σήματος Y και ο οριζόντιος άξονας του χρόνου T, ή X-Y που είναι μεταξύ των δύο καναλιών εισόδου και όπου, οριζόντιος άξονας X είναι το κανάλι 1 και κάθετος άξονας Y είναι το κανάλι 2. Η X-Y μορφή εμφάνισης είναι χρήσιμη για μελέτη των φασικών σχέσεων μεταξύ των δύο κυματομορφών, ωστόσο, με την X-Y μορφή εμφάνισης δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αρκετές λειτουργίες του παλμογράφου (αυτόματες μετρήσεις τάσης και χρόνου, μετρήσεις με την χρήση των κερσόρων, mask test, μαθηματική κυματομορφή, κυματομορφή αναφοράς, εμφάνιση καθυστερημένης βάσης χρόνου, εμφάνιση των κυματομορφών ως διανύσματα, χρήση του επιλογέα οριζόντιας θέσης (9), έλεγχος σκανδαλισμού)

- Επαναφορά του αντισταθμίσιματος σκανδαλισμού (trigger offset)

Στρέφοντας τον επιλογέα οριζόντιας θέσης ,μεταβάλλουμε την θέση του σημείου σκανδαλισμού σε σχέση με το κέντρο της οθόνης. Για την επιστροφή του σημείου σκανδαλισμού στο κέντρο της οθόνης ,πατάμε το κουμπί χειρισμού μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Trig-Offset Reset.

- Ρύθμιση του trigger holdoff



Trigger holdoff [1]

Το trigger holdoff όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο σχετικά με την χρήση του κουμπιού Main/Delayed, είναι μια λειτουργία κατά την οποία ορίζεται μία περίοδος στην οποία ο παλμογράφος ύστερα από σκανδαλισμό δεν ξανασκανδαλίζει, ώστε να εμφανίζεται πιο σταθερή η κυματομορφή. Για την ρύθμιση της λειτουργίας αυτής, πατάμε το κουμπί χειρισμού μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή holdoff, στο μενού Main/Delayed και, στρέφοντας τον επιλογέα εισόδου (20) πετυχαίνουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

- Επαναφορά του trigger holdoff

Πατώντας το κουμπί χειρισμού μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Holdoff Reset, στο μενού Main/Delayed, το trigger holdoff επιστρέφει στην ελάχιστη τιμή των 100nsec.

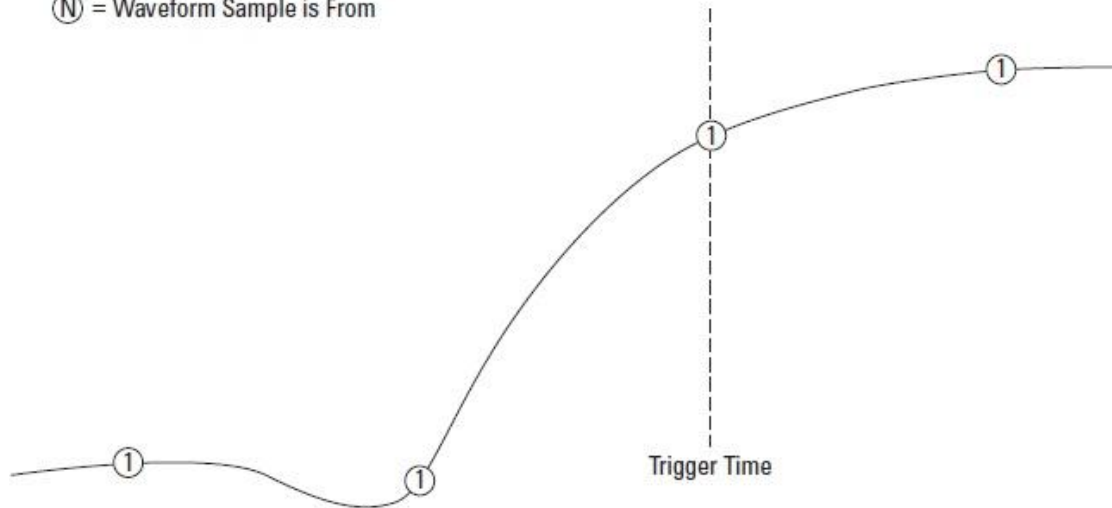
1.2.4 Χρήση μενού Acquire

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο σχετικά με την χρήση του κουμπιού Acquire (12), το ομώνυμο μενού που εμφανίζεται παρουσιάζει τις εξής δυνατότητες :

- Επιλογή τρόπου δειγματοληψίας

Ο παλμογράφος μπορεί να πάρει τα δείγματα για την απεικόνιση του σήματος που θέλουμε με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι σε πραγματικό χρόνο (real time sampling) και χρησιμεύει στον δειγματισμό μη επαναλαμβανόμενων κυματομορφών, όπου κάθε μονή κυματομορφή λαμβάνεται σε ομοιόμορφα απέχοντα διαστήματα. Στον τύπο παλμογράφου που χρησιμοποιούμε για τις ανάγκες της πτυχιακής (σειρά 3000 της Agilent) η δειγματοληψία δύναται να φτάσει το ένα δισεκατομμύριο δείγματα ανά δευτερόλεπτο.

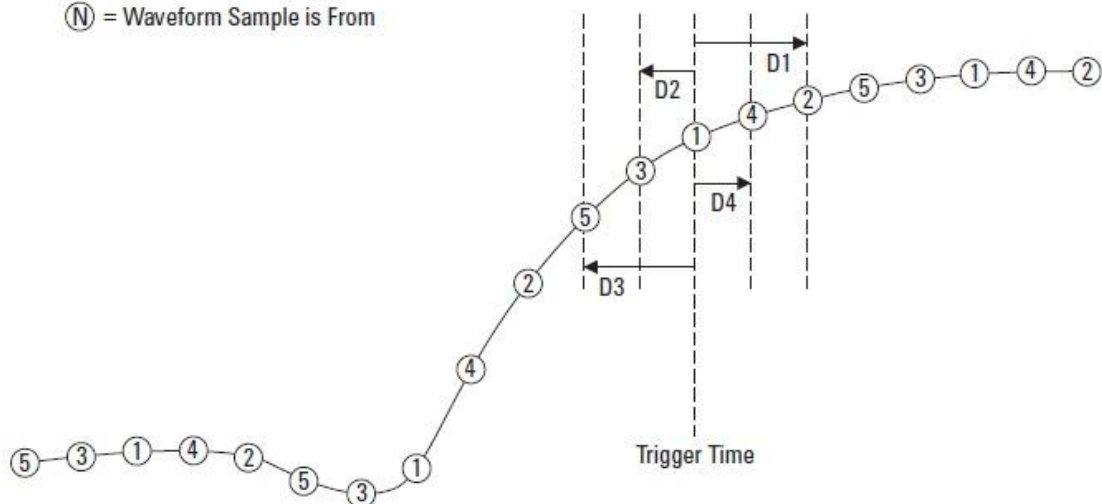
Ⓝ = Waveform Sample is From



Δειγματοληψία σε πραγματικό χρόνο [1]

Για την επιλογή της δειγματοληψίας σε πραγματικό χρόνο, πατάμε το κουμπί χειρισμού μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Sampling, στο μενού Acquire και, διαλέγουμε το real time. Ο δεύτερος τρόπος δειγματοληψίας είναι αυτός του ισοδύναμου χρόνου (equivalent time sampling) που χαρακτηρίζεται από την επαναλαμβανόμενη δειγματοληψία. Πολλαπλές κυματομορφές λαμβάνονται προς δειγματοσμό, χρησιμοποιώντας διαφορετικές, τυχαίες καθυστερήσεις από το σημείο σκανδαλισμού, αποσκοπώντας να αποδώσει υψηλότερα πραγματικά ποσοστά δειγματοληψίας.

Ⓝ = Waveform Sample is From



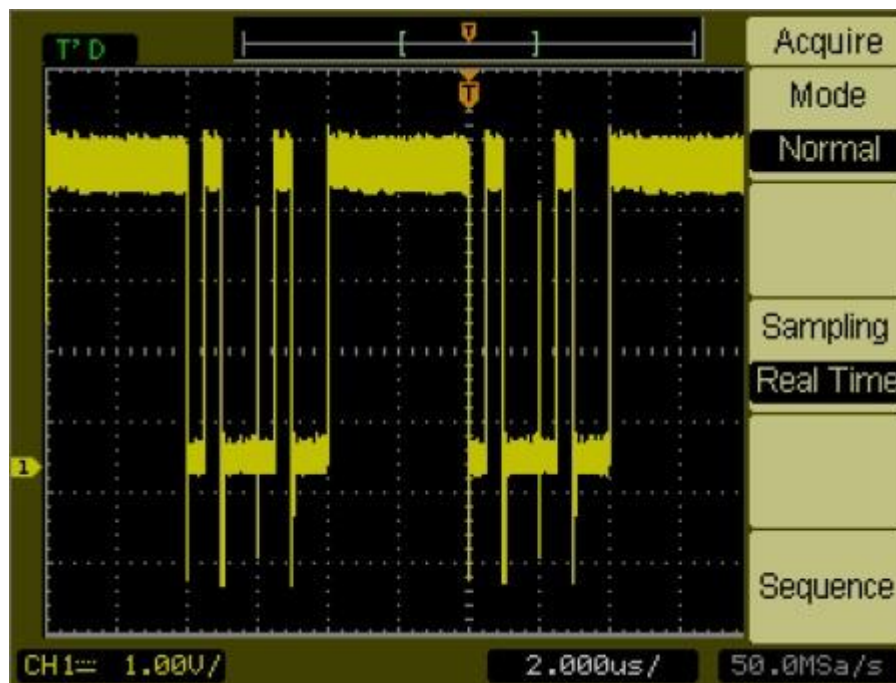
Δειγματοληψία σε ισοδύναμο χρόνο [1]

Στην δειγματοληψία ισοδύναμου χρόνου, τα πραγματικά ποσοστά δειγματοληψίας μπορεί να είναι υψηλότερα, εξαιτίας του ότι ο χρόνος μεταξύ των δειγμάτων κατά τη λήψη είναι μικρότερος. Η λειτουργία αυτή απαιτεί επαναλαμβανόμενες κυματομορφές με σταθερό σημείο σκανδαλισμού και δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί σε μη επαναλαμβανόμενες κυματομορφές. Η λειτουργία του ισοδύναμου χρόνου είναι χρήσιμη όταν χρησιμοποιείται για την λήψη σημάτων υψηλής συχνότητας σε μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας από τον

αντίστοιχο ρυθμό δειγματοληψίας σε πραγματικό χρόνο. Τα οφέλη που προσφέρει η λειτουργία αυτή κρίνονται αμελητέα αν ο ρυθμός δειγματοληψίας που χρησιμοποιήσουμε είναι ίδιος με τον αντίστοιχο στην λειτουργία πραγματικού χρόνου. Στον τύπο παλμογράφου που χρησιμοποιούμε για τις ανάγκες της πτυχιακής (σειρά 3000 της Agilent) , η λειτουργία δειγματοληψίας ισοδύναμου χρόνου μπορεί να φτάσει έως και 20psec οριζόντιας ανάλυσης το οποίο αντιστοιχεί σε ένα ισοδύναμο ρυθμού δειγματοληψίας 50 δισεκατομμυρίων δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο. Για την επιλογή της δειγματοληψίας σε ισοδύναμο χρόνο , πατάμε το κουμπί χειρισμού μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Sampling , στο μενού Acquire και, διαλέγουμε το equ-time.

- Επιλογή τρόπου καταγραφής

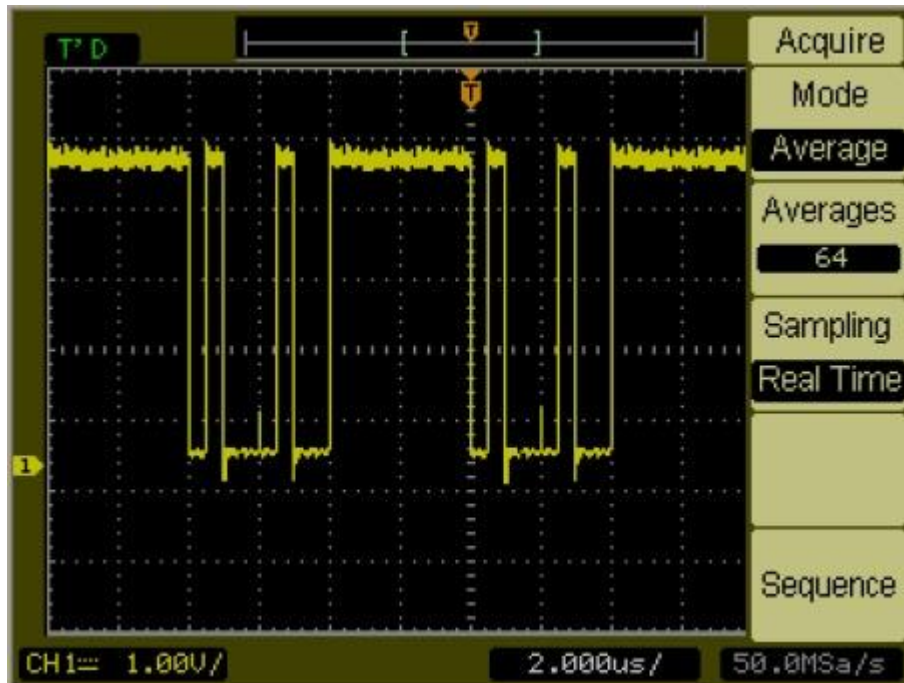
Ο παλμογράφος διαθέτει τρεις διαφορετικές λειτουργίες για τον τρόπο με τον οποίο θα λάβει και εν συνεχεία θα αποδώσει στην οθόνη την κυματομορφή που επιθυμούμε. Ο πρώτος τρόπος είναι η λειτουργία Normal, όπου η λήψη γίνεται σύμφωνα με τον ρυθμό δειγματοληψίας που έχουμε ορίσει και απεικονίζεται στην οθόνη το ένα δείγμα μετά το άλλο. Για την επιλογή της λειτουργίας Normal , πατάμε το κουμπί χειρισμού του μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Acquisition, στο μενού Acquire ώσπου να εμφανιστεί το Normal.



Σήμα με θόρυβο σε Normal mode [1]

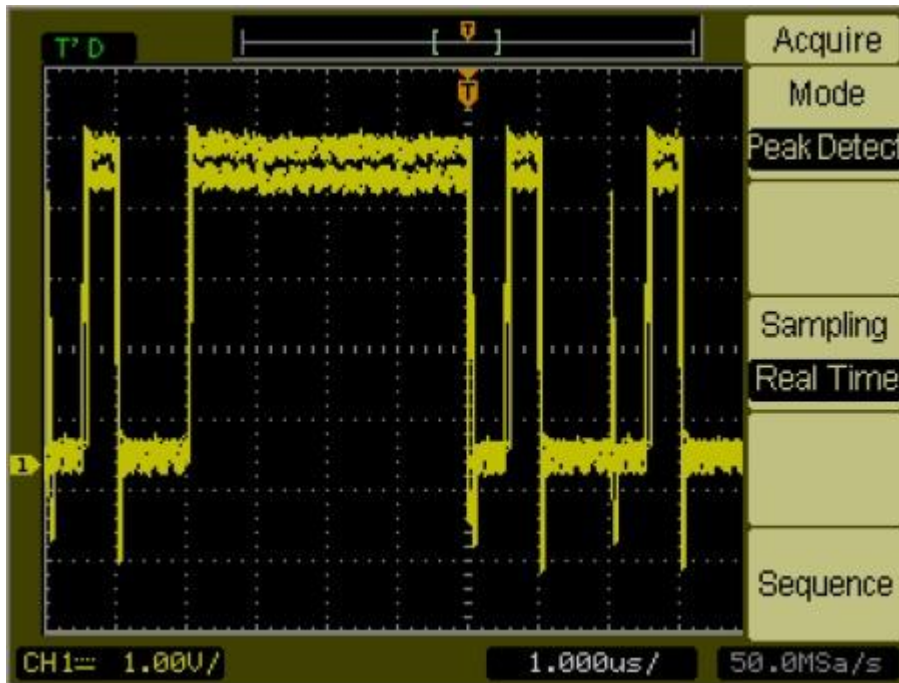
Ο δεύτερος τρόπος είναι η λειτουργία Average , όπου η λήψη γίνεται σύμφωνα με τον ρυθμό δειγματοληψίας που έχουμε ορίσει και απεικονίζεται στην οθόνη, η τρέχουσα μέση τιμή ενός καθορισμένου αριθμού καταγραφών. Το πλεονέκτημα της λειτουργίας αυτής ,είναι ότι αφαιρεί τον τυχαίο θόρυβο από την κυματομορφή καθώς και βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε το όφελος που προσφέρει η συγκεκριμένη λειτουργία σε κυματομορφή που περιέχει θόρυβο, συγκρίνοντας την με την εικόνα του σήματος με θόρυβο σε Normal mode που βρίσκεται παραπάνω. Το μειονέκτημα της λειτουργίας Average είναι ότι ελαττώνει τον ρυθμό ανανέωσης της οθόνης Για την

επιλογή της λειτουργίας Average , πατάμε το κουμπί χειρισμού του μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Acquisition, στο μενού Acquire ώσπου να εμφανιστεί το Average. Στη συνέχεια μπορούμε να επιλέξουμε από το κουμπί χειρισμού του μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Averages τον αριθμό των καταγραφών που όπως αναφέρεται παραπάνω θα χρησιμοποιηθούν για την τρέχουσα μέση τιμή τους, η επιλογή αυτή μπορεί να είναι ένας από τους αριθμούς 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 και 256



Σήμα με θόρυβο σε Average mode [1]

Ο τρίτος τρόπος καταγραφής είναι η λειτουργία Peak Detect .Στις λειτουργίες Normal και Average, η δειγματοληψία από τον μετατροπέα analog to digital, όσο μειώνεται η οριζόντια κλίμακα χρόνου ανά division , γίνεται σε ρυθμό που υπερβαίνει τα δείγματα που μπορούν να αποθηκευτούν, στην περιορισμένη μνήμη του παλμογράφου. Συνεπώς, κάποια δείγματα δεν αποθηκεύονται και έτσι ο χρήστης μπορεί να χάσει κάποια στενά κομμάτια ενός σήματος. Ωστόσο στη λειτουργία Peak Detect ,η καταγραφή γίνεται στον μεγαλύτερο δυνατό ρυθμό δειγματοληψίας, αλλά οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές της περιόδου που σχετίζεται με τον πραγματικό ρυθμό δειγματοληψίας αποθηκεύονται. Κατά αυτόν τον τρόπο , δύναται να καταγραφούν και τα στενά κομμάτια δειγμάτων του σήματος, που απορρίπτονται στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις ,βάσει των ρυθμίσεων στην οριζόντια κλίμακα.



Κυματομορφή σε Peak Detect mode [1]

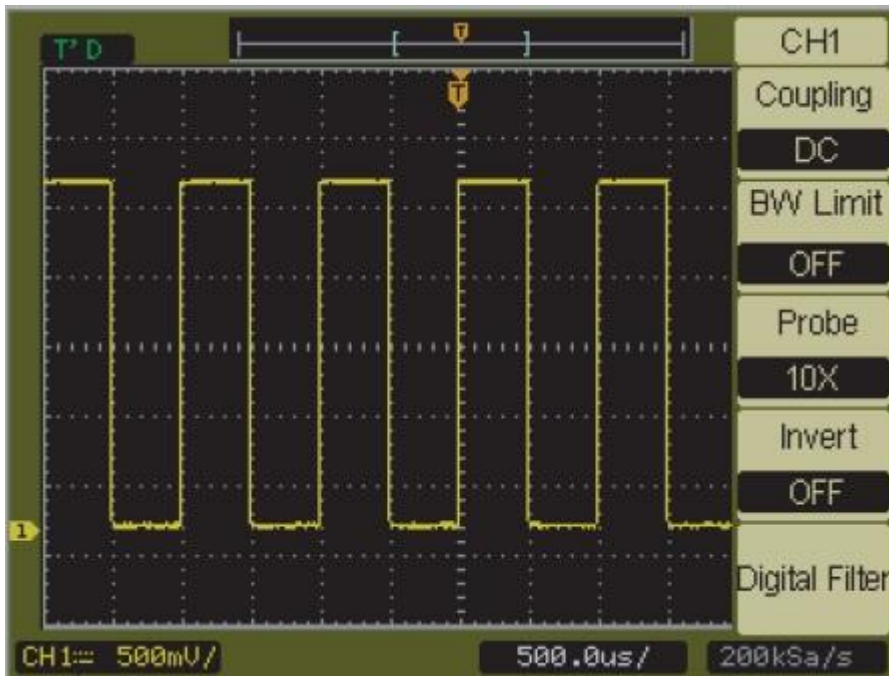
Λόγω της αποθήκευσης των μέγιστων και ελάχιστων τιμών της περιόδου που σχετίζεται με τον πραγματικό ρυθμό δειγματοληψίας, η λειτουργία καταγραφής αυτή, δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αποφευχθεί η παραμόρφωση της κυματομορφής (aliasing). Για την επιλογή της λειτουργίας Peak Detect, πατάμε το κουμπί χειρισμού του μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Acquisition, στο μενού Acquire ώσπου να εμφανιστεί το Peak Detect.

1.2.5 Χρήση μενού καναλιών (1 ή 2)

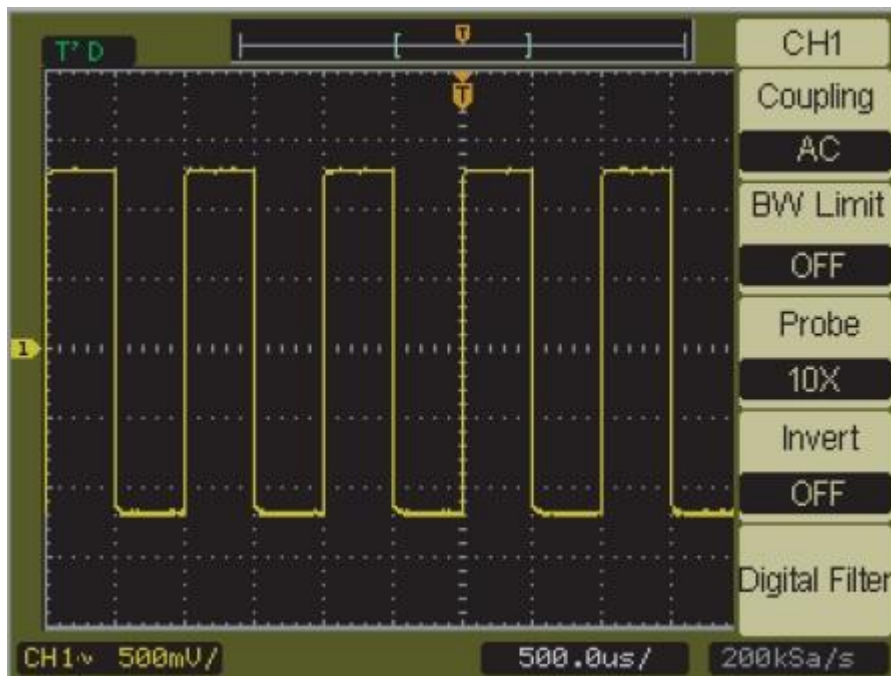
Πατώντας το κουμπί on/off ενός από τα δύο κανάλια, κουμπιά (35) και (29) για τα κανάλια 1 και 2 αντίστοιχα, με σκοπό την εμφάνιση του μενού του εκάστοτε καναλιού κατά τρόπο δηλαδή όπως αυτός αναφέρεται στην επεξήγηση κουμπιών και επιλογέων σε προηγούμενη παράγραφο, έχουμε τις εξής δυνατότητες :

- Channel Coupling

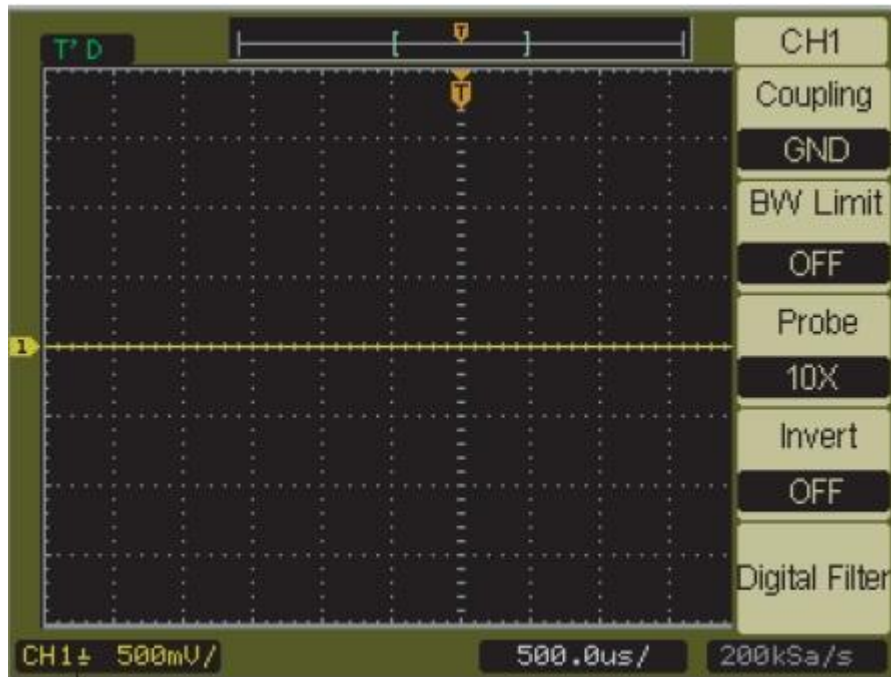
Η δυνατότητα αυτή του παλμογράφου αφήνει τον χρήστη να επιλέξει ποια στοιχεία του εισερχόμενου σήματος θα περάσουν στον παλμογράφο και συνεπώς θα εμφανιστούν στην κυματομορφή. Πατώντας το κουμπί χειρισμού του μενού οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Coupling, στο μενού CH1 ή CH2 αναλόγως με το ποιο κανάλι θέλουμε να ρυθμίσουμε, διαλέγουμε μεταξύ του DC που επιτρέπει και στα συνεχή και στα εναλλασσόμενα στοιχεία της κυματομορφής να περάσουν στον παλμογράφο και να εμφανιστούν στην οθόνη, του AC που απορρίπτει τα συνεχή στοιχεία της κυματομορφής και του GND που αποσυνδέει την κυματομορφή από την είσοδο του παλμογράφου. Στις τρεις παρακάτω εικόνες γίνεται μία επίδειξη των τριών αυτών επιλογών και του αποτελέσματος καθενός τρόπου Coupling στην εμφάνιση της κυματομορφής στην οθόνη.



DC Coupling [1]



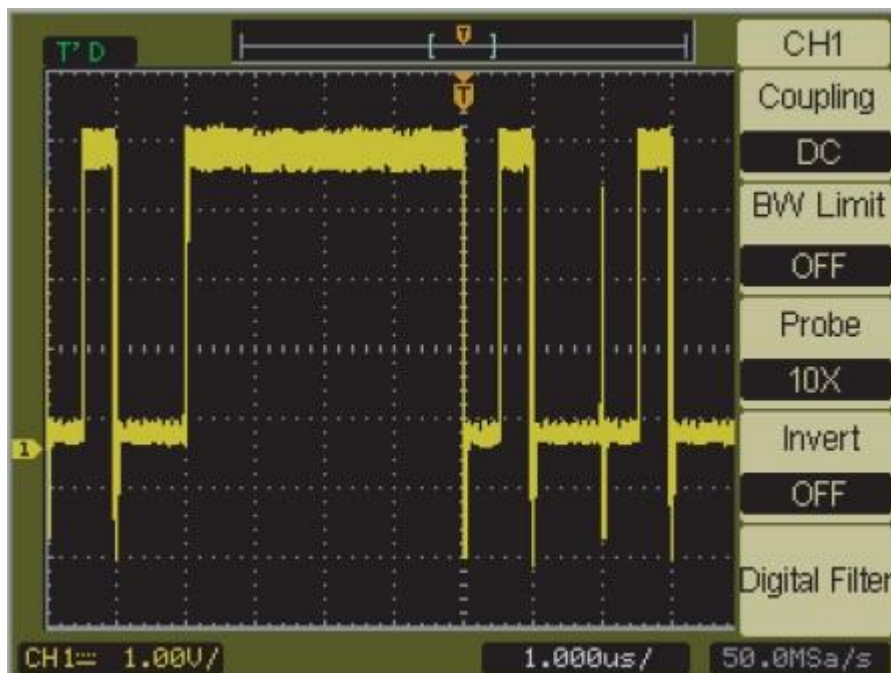
AC Coupling [1]



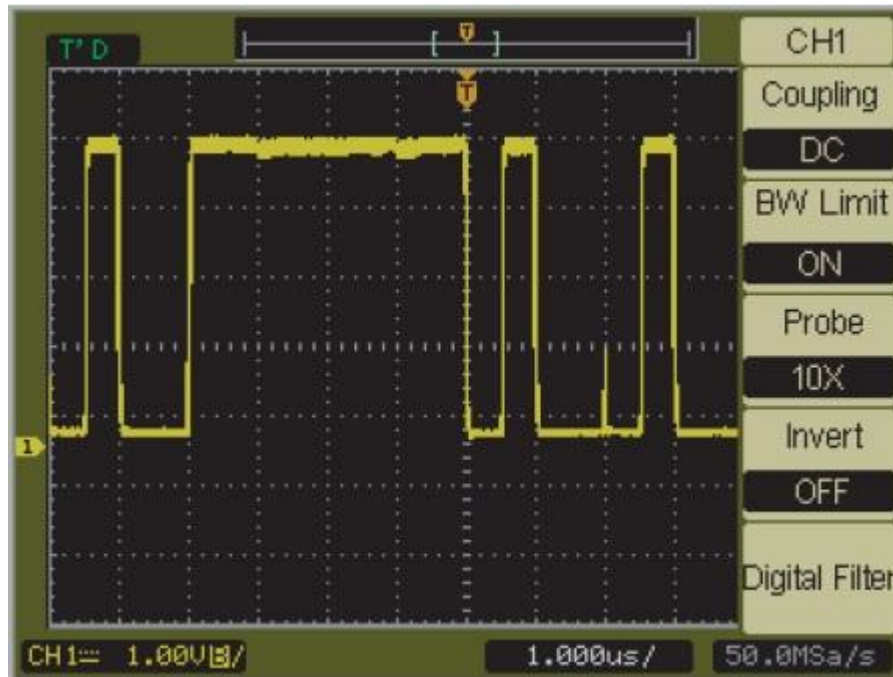
GND Coupling [1]

- Bandwidth limit (όριο εύρους ζώνης)

Όταν στοιχεία υψηλής συχνότητας μιας κυματομορφής δεν είναι σημαντικά για την μελέτη αυτής, η επιλογή BW Limit , δύναται να χρησιμοποιηθεί ώστε να απορρίπτεται στοιχεία των οποίων η συχνότητα υπερβαίνει τα 20MHz. Στις δύο παρακάτω εικόνες είναι εμφανής η χρησιμότητα της.



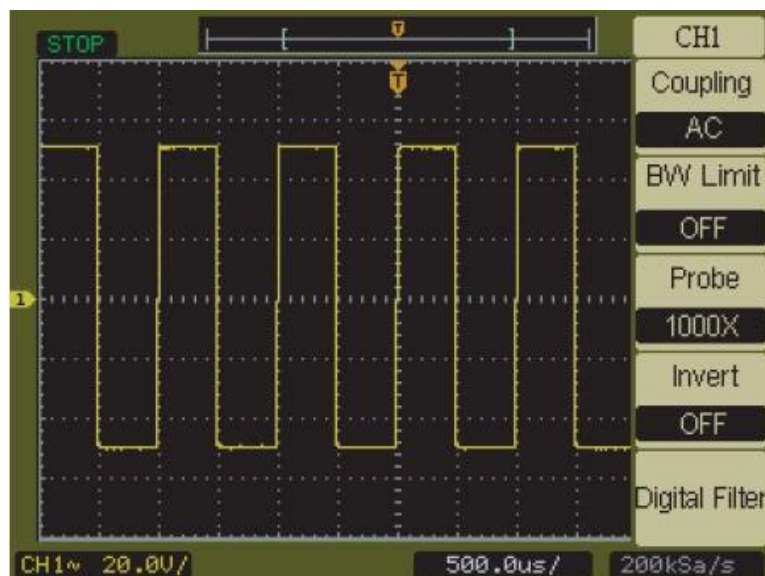
Χωρίς BW Limit [1]



Η ίδια κομματομορφή με χρήση BW Limit [1]

- Απόσβεση συντελεστή probe

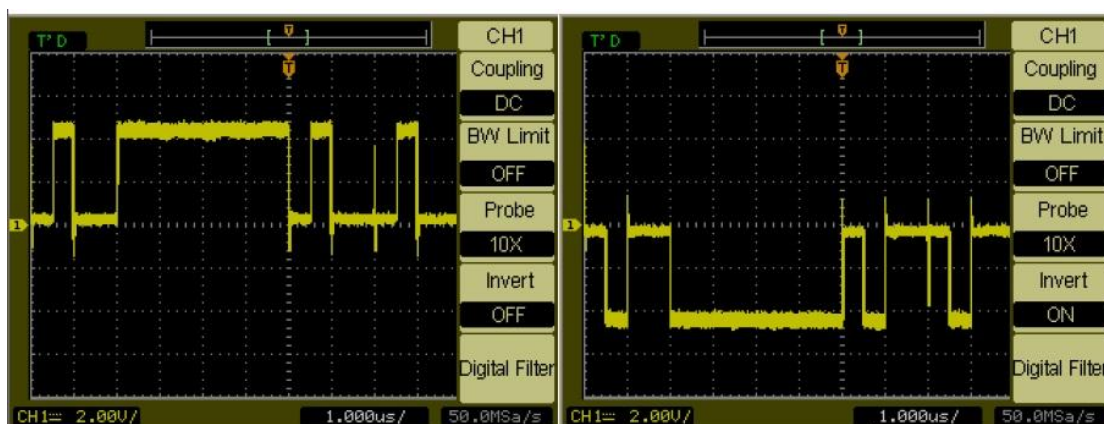
Για να πραγματοποιηθούν σωστά οι μετρήσεις μας, θα πρέπει να ρυθμίζουμε μέσω της επιλογής probe του μενού του εκάστοτε καναλιού, τον συντελεστή (πολλαπλασιαστή) του probe ώστε να είναι ο ίδιος στις ρυθμίσεις του παλμογράφου και στην ρύθμιση που έχουμε κάνει πάνω στο probe, ώστε να ανταποκρίνεται στο πραγματικό μέγεθος της τάσης ή του ρεύματος που μετράμε. Οι ρυθμίσεις που προσφέρονται στην επιλογή Probe είναι 1X , 10X , 100X και 1000X όπως αντίστοιχα και στο ίδιο το probe .



Εμφάνιση σήματος περίπου 50V με ρύθμιση probe 1000X [1]

- Αντιστροφή κυματομορφής

Μέσω αυτής της επιλογής ,ο χρήστης δύναται να αντιστρέψει μία κυματομορφή ως προς την γείωση ,πατώντας το κουμπί χειρισμού της οθόνης που αντιστοιχεί στην επιλογή Invert



Αριστερά η κυματομορφή χωρίς κάποια επεξεργασία Δεξιά με χρήση invert [1]

- Ψηφιακό φίλτρο

Η τελευταία επιλογή του μενού του εκάστοτε καναλιού είναι το Digital Filter , πατώντας το αντίστοιχο κουμπί χειρισμού οθόνης ,ανοίγει το αντίστοιχο μενού του ψηφιακού φίλτρου ,από το οποίο πάλι με χρήση των κουμπιών χειρισμού οθόνης μπορούμε να επιλέξουμε μία από τις παρακάτω επιλογές :

- ↳ f - Low pass filter
- ↳ f - High pass filter
- ↳ f - Band pass filter
- ↳ f - Band reject filter

Όπου αναλόγως τον τύπο φίλτρου που διαλέγουμε ,μπορεί να μας ζητηθεί να ορίσουμε ανώτατο και κατώτατο όριο, το οποίο ρυθμίζεται γυρνώντας τον επιλογέα εισόδου (20).

1.2.6 Χρήση μενού Math

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη παράγραφο, πατώντας το κουμπί Math (36) ανοίγει το ομώνυμο μενού, το οποίο μας παρέχει τις εξής δυνατότητες :

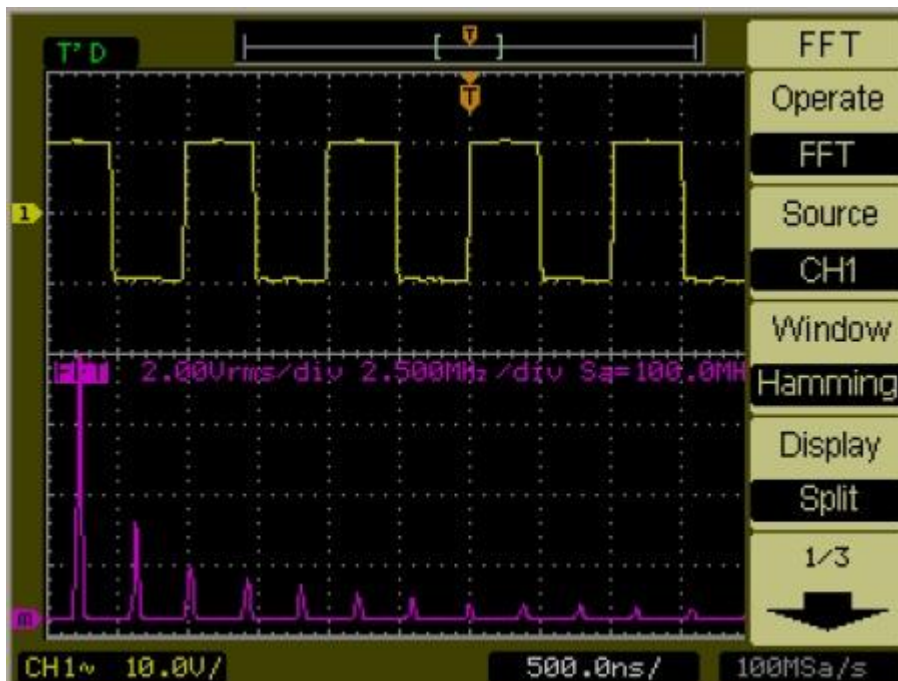
- Πράξεις μεταξύ των κυματομορφών

Πατώντας στην επιλογή Operate διαλέγουμε μεταξύ των 1+2 ,1-2 και 1x2 ανάλογα την πράξη που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε μεταξύ των κυματομορφών ενώ επίσης διατίθεται και επιλογή invert για την αντιστροφή της εικόνας της μαθηματικής κυματομορφής. Οι μαθηματικές κυματομορφές έχουν μωβ χρώμα στην οθόνη



Πρόσθεση των δύο κυματομορφών εισόδου [1]

- FFT



FFT της κυματομορφής του καναλιού 1 [1]

Η επιλογή FFT (Fast Fourier Transform) μετασχηματίζει μια κυματομορφή από το πεδίο του χρόνου ,στο πεδίο της συχνότητας. Οι κυματομορφές FFT χρησιμεύουν στον εντοπισμό αρμονικών και θορύβου σε συστήματα, θορύβου σε τροφοδοτικά DC και ανάλυση δονήσεων. Για την λειτουργία FFT , αφού την επιλέξουμε μέσω του Operate στο Math menu, διαλέγουμε σε ποια κυματομορφή θα την εφαρμόσουμε μέσω του Source επιλέγοντας το επιθυμητό κανάλι , από την επιλογή Window διαλέγουμε τα χαρακτηριστικά της κυματομορφής FFT ανάλογα με την χρήση που θέλουμε μεταξύ καλύτερης ανάλυσης της

συχνότητας ή καλύτερης ανάλυσης του μεγέθους. Μέσω της επιλογής Display διαλέγουμε αν θέλουμε την κυματομορφή FFT σε πλήρη οθόνη ή σε Split screen ώστε να εμφανίζονται και οι υπόλοιπες κυματομορφές (ή ενδεχομένως η κυματομορφή που χρησιμοποιήσαμε ως πηγή). Μέσω της επιλογής Scale μπορούμε να διαλέξουμε μονάδες μεταξύ V_{rms} και dBV_{rms} .

Σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις παραμένουν ακόμα δυο επιλογές, οι οποίες αφορούν την θέση και την κλίμακα πλάτους, και οι οποίες αφού επιλεγθούν με το κουμπί χειρισμού της οθόνης που τους αντιστοιχεί (η κάθε μία από αυτές με ανάλογη σήμανση), ορίζονται από τον επιλογέα εισόδου (20).

Κεφάλαιο 2 : Διατάξεις Ελέγχου Κινητήρων Σ.Ρ.

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός των διατάξεων αυτών, είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου σε μια ελεγχόμενου μεγέθους συνεχή τάση, μεταβάλλοντας τη γωνία έναυσης "α" (έναρξη αγωγής) των διακοπτικών στοιχείων. Σε όλους αυτούς τους μετατροπείς, η μεταγωγή, δηλαδή η μετάβαση του ρεύματος από το ένα θυρίστορ στο επόμενο, επιτυγχάνεται πολύ εύκολα με τη λεγόμενη φυσική μεταγωγή (natural or line communication) ,οφειλόμενη στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου. Στην κατάλληλη χρονική στιγμή, η έναυση του ενός θυρίστορ προκαλεί την ανάστροφη πόλωση και τη σβέση του προηγούμενου, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η χρήση πρόσθετων κυκλωμάτων εξαναγκασμένης μεταγωγής. Η ιδιότητα αυτή της φυσικής μεταγωγής, κάνει τους συγκεκριμένους μετατροπείς (phase controlled converters) ιδιαίτερα απλούς και λιγότερο δαπανηρούς. Λόγω δε των σχετικά μικρών απωλειών των διακοπτικών στοιχείων, η απόδοσης τους είναι αρκετά μεγάλη της τάσης των 90% και άνω. Οι μετατροπείς αυτοί ,διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς.

Η χρήση του καθενός από αυτούς, εξαρτάται από τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής, από το αν υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής, από το μέγεθος της διακύμανσης της ανορθωμένης τάσης κλπ.

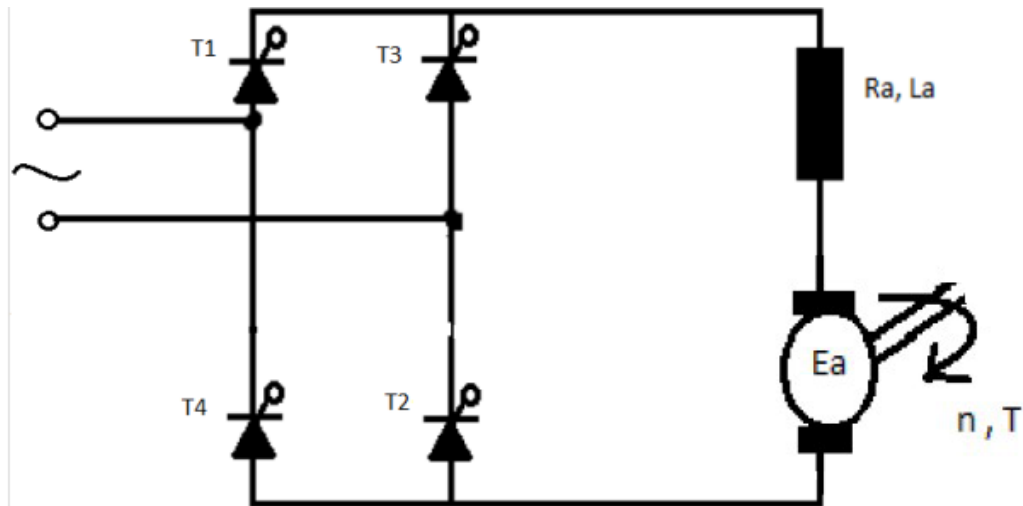
Οι ημιελεγχόμενες διατάξεις λειτουργούν από τη φύση τους στο 1^ο τεταρτημόριο, δηλαδή η τάση και το ρεύμα έχουν καθορισμένη πολικότητα από την πλευρά του συνεχούς. Οι πλήρως ελεγχόμενες διατάξεις , μπορούν να λειτουργήσουν σε δύο τεταρτημόρια. Δηλαδή στους μετατροπείς αυτούς μπορεί να αντιστραφεί η πολικότητα της τάσης ,όχι όμως και η φορά του ρεύματος , καθόσον οι δίοδοι και τα θυρίστορ είναι μονοφάρα στοιχεία. Σε αντίθεση με τους απλούς ,οι διπλοί μετατροπείς μπορούν να λειτουργήσουν και στα τέσσερα τεταρτημόρια.

Πολλές φορές στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου τοποθετείται μια δίοδος, η οποία στη συνήθη λειτουργία είναι πολωμένη ανάστροφα. Η δίοδος αυτή είναι γνωστή ως δίοδος ελεύθερης ροής (freewheeling diode) και έχει σκοπό την κατανάλωση της αποθηκευμένης ενέργειας στην αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου, κατά τα διαστήματα της μη αγωγής των θυρίστορ. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που θα πρέπει να διαθέτουν οι δίοδοι αυτές είναι ότι , θα πρέπει να είναι εξαιρετικά γρήγορες ως προς την αναδιάταξη των φορέων τους (ultra high speed diodes), έτσι ώστε να προστατεύουν το κύκλωμα από τις προκαλούμενες υπερτάσεις.

Η χρήση των μετατροπέων μισού κύματος είναι αρκετά περιορισμένη, διότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αγωγή του ρεύματος τυμπάνου είναι ασυνεχής λόγω μικρής αυτεπαγωγής. Στους υπόλοιπους μονοφασικούς μετατροπείς ,η αγωγή του ρεύματος μπορεί να είναι συνεχής ή ασυνεχής. Αυτό εξαρτάται από τη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση. Αντίθετα στους τριφασικούς μετατροπείς, η αγωγή του ρεύματος τυμπάνου είναι στις περισσότερες περιπτώσεις συνεχής.

Πρέπει να διευκρινίσουμε ότι, το είδος της αγωγής του ρεύματος τυμπάνου, έχει επίδραση στη ρύθμιση της ταχύτητας καθώς επίσης και στη δυναμική απόκριση του μετατροπέα. [5]

2.2 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

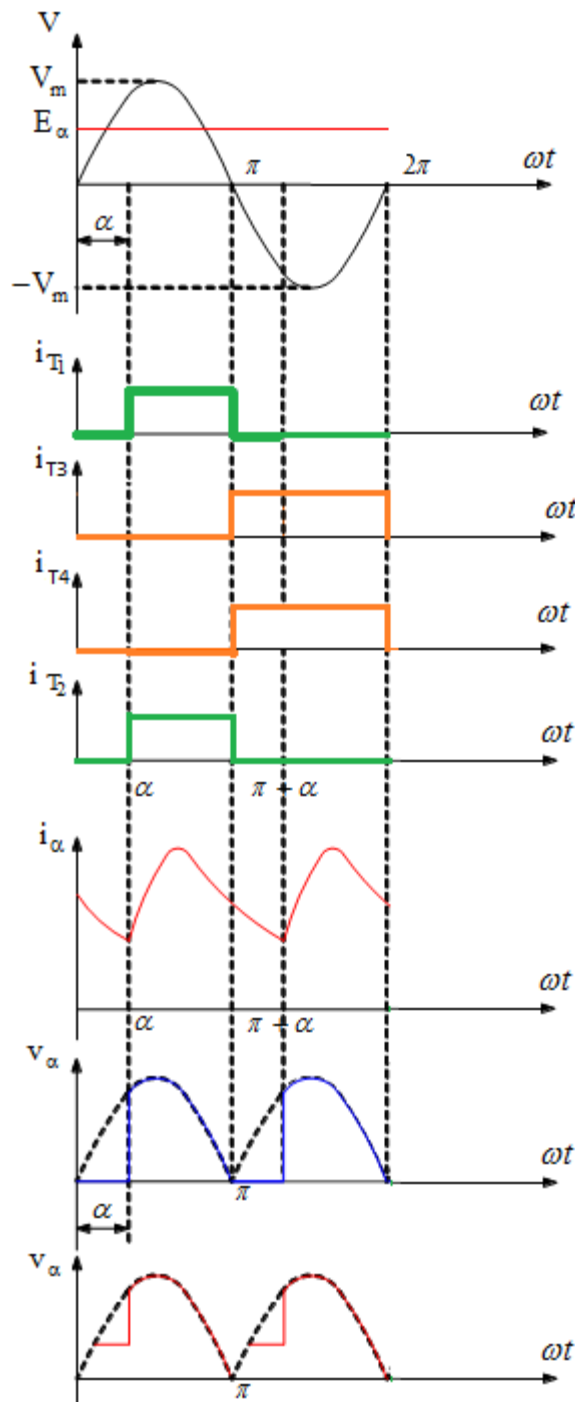


Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας-κινητήρα Σ.Ρ.-Ε.Δ.

2.2.1 Λειτουργία στη συνεχή αγωγή

Με την πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα, η μηχανή Σ.Ρ., μπορεί να λειτουργήσει σε δύο τεταρτημόρια. Η λειτουργία της, όσο αφορά τη συνεχή αγωγή, έχει ως εξής, κατά την πρώτη ημιπερίοδο, την οποία θα θεωρήσουμε ότι είναι αυτή που πολώνει ορθά το T1, ορθά πολωμένα θα είναι τα θυρίστορ T1 και T2 ενώ αντίστροφα πολωμένα θα είναι τα T3 και T4 οπότε και όταν θα δώσουμε ένα παλμό γωνίας “α”, η πορεία του ρεύματος θα περάσει από το T1, το φορτίο και το T2. Στην επόμενη ημιπερίοδο, ορθά πολωμένα θα είναι τα θυρίστορ T3 και T4 ενώ θα πολωθούν αντίστροφα τα θυρίστορ T1 και T2, δίνοντας τον παλμό την χρονική στιγμή $\pi + \alpha$ τα θυρίστορ 3 και 4 άγουν και η πορεία του ρεύματος θα είναι από το T3 στο φορτίο κατά την ίδια φορά με την προηγούμενη ημιπερίοδο και τέλος στο T4. Για γωνία έναυσης από 0 έως 90 μοίρες, ο κινητήρας που τροφοδοτείται από την γέφυρα λειτουργεί κανονικά και η γέφυρα αυξάνει την τάση τυμπάνου του για όσο μικρότερη γωνία δίνουμε, δηλαδή στο πρώτο τεταρτημόριο λειτουργίας η γέφυρα λειτουργεί ως ανορθωτής. Για γωνία έναυσης από 90 έως 180 μοίρες, η γέφυρα λειτουργεί και ως αντιστροφέας, και ο κινητήρας που θα τροφοδοτηθεί από αυτή, με την προϋπόθεση ότι αντιστρέφεται και η πολικότητας της Α.Η.Ε.Δ., θα λειτουργήσει ως γεννήτρια ή πέδη στέλνοντας ισχύ πίσω στο δίκτυο.

Για τη λειτουργία ως ανορθωτή ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$)



Παλμοί έναυσης των θυρίστορ και κυματομορφές εξόδου στη συνεχή αγωγή [5]

Παρατηρούμε πως η κυμάτωση της τάσης $v_a(t)$ και του ρεύματος $i_a(t)$, είναι διπλάσια της συχνότητας της τάσης εισόδου. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου της πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας, για τυχαία γωνία έναυσης είναι :

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_a(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin\theta d\theta \quad \text{Σχέση 2.1.1}$$

$$\text{Αντίστοιχα η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου είναι } I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{2V_m}{\pi R_a} - \frac{E_a}{R_a} \quad \text{Σχέση 2.1.2}$$

Η Διαφορική εξίσωση του ρεύματος τυμπάνου στο διάστημα αγωγής, $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$, είναι $v_{\alpha}(t) = V_m \sin \omega t = R_{\alpha} i_{\alpha}(t) + L_{\alpha} \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} + e_{\alpha}(t)$ Σχέση 2.1.3

Με αρκετά καλή προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε αμελητέα την κυμάτωση των στροφών και κατ' επέκταση της Α.Η.Ε.Δ. $e_{\alpha}(t)$ Οπότε στην παραπάνω διαφορική εξίσωση αντί της $e_{\alpha}(t)$ να χρησιμοποιήσουμε τη μέση τιμή αυτής E_{α} .

Αν υποθέσουμε μερική λύση της Δ.Ε., της μορφής $i_{\alpha,\mu} = A + B \sin \omega t + C \cos \omega t$ Σχέση 2.1.4, προκύπτει η εξής έκφραση για το ρεύμα τυμπάνου :

$i_{\alpha}(t) = D e^{\frac{-t}{T_{\alpha}}} - \frac{E_{\alpha}}{R_{\alpha}} + \frac{V_m}{Z_{\alpha}} \sin(\omega t - \varphi)$ Σχέση 2.1.5. Όπου $\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\omega L_{\alpha}}{R_{\alpha}} \right]$ Σχέση 2.1.6, $T_{\alpha} = \frac{L_{\alpha}}{R_{\alpha}}$ Σχέση 2.1.7, $Z_{\alpha} = \sqrt{R_{\alpha}^2 + (\omega L_{\alpha})^2}$ Σχέση 2.1.8 και D η σταθερά ολοκλήρωσης της γενικής λύσης της ομογενούς Δ.Ε.

Από την παραπάνω απεικόνιση των κυματομορφών τάσεων-ρευμάτων στη λειτουργία ανορθωτή, έχουμε τις ακόλουθες οριακές συνθήκες

$$I_{\alpha, \min} = i_{\alpha}(\omega t = \alpha) = i_{\alpha}(\omega t = \pi + \alpha) \text{ Σχέση 2.1.9}$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω συνθήκες στη σχέση 2.1.5, υπολογίζουμε την τιμή της σταθεράς D. $D = \frac{2V_m \sin(\alpha - \varphi)}{Z_{\alpha} e^{\frac{-\alpha}{T_{\alpha}}} [e^{\frac{-\pi}{T_{\alpha}}} - 1]}$ Σχέση 2.1.10

Με βάση τα παραπάνω, η τελική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου είναι

$$i_{\alpha}(\omega t) = \frac{V_m}{Z_{\alpha}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \frac{2 \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{-(\omega t - \alpha)}{\omega T_{\alpha}}}}{(1 - e^{\frac{-\pi}{\omega T_{\alpha}}})} \right] - \frac{E_{\alpha}}{R_{\alpha}} \text{ Σχέση 2.1.11}$$

Προφανώς η ολοκλήρωση της σχέσης 2.1.11, στο διάστημα $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$, θα μας δώσει την ίδια μέση τιμή με εκείνη της σχέσης 2.1.2.

Η ενεργός τιμή του ρεύματος τυμπάνου, η οποία συμπίπτει με την ενεργό τιμή του ρεύματος εισόδου, μπορεί να υπολογιστεί με τους εξής δυο τρόπους :

Με βάση τον ορισμό. Δηλαδή $I_{\alpha, rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\alpha}^2(t) dt}$ Σχέση 2.1.12

Από τη σχέση $I_{\alpha, rms} = \sqrt{I_{\alpha}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (I_{\alpha n, rms}^2)}$ Σχέση 2.1.13

Όπου $I_{\alpha n, rms} = \frac{V_{\alpha n, rms}}{Z_{\alpha n}}$ και $Z_{\alpha n} = \sqrt{R_{\alpha}^2 + (n\omega L_{\alpha})^2}$ Σχέση 2.1.14

Συνήθως προτιμάται ο δεύτερος τρόπος, όπου χρησιμοποιώντας τους 3-4 πρώτους όρους των αρμονικών συνιστωσών, υπολογίζουμε την ενεργό τιμή του ρεύματος με αρκετά καλή προσέγγιση.

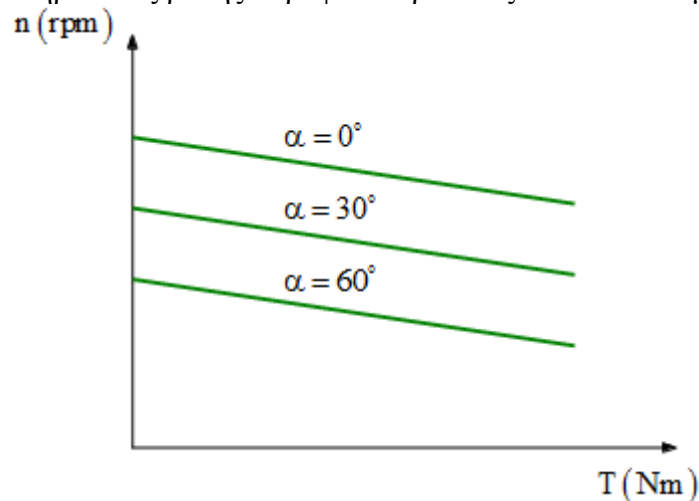
Η αναλυτική έκφραση των χαρακτηριστικών ροπής-στροφών του κινητήρα, στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής, είναι

$$n = \frac{2\sqrt{2}V_{rms} \cos\alpha}{\pi K_g \Phi_f} - \frac{R_a}{K_m K_g \Phi_f} T \quad \text{Σχέση 2.1.15}$$

Όπου V_{rms} , η ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου.

Ο πρώτος όρος της σχέσης 2.1.15 παριστά την ταχύτητα όταν δεν υπάρχει φορτίο. Ο δεύτερος όρος, παριστά τη μείωση των στροφών λόγω φορτίου. Η θεωρητική ταχύτητα περιστροφής χωρίς φορτίο μεταβάλλεται με τη γωνία έναυσης, ενώ η κλίση για συγκεκριμένο φορτίο παραμένει σταθερή.

Οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής-στροφών παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Χαρακτηριστικές ροπής-στροφών κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική ανορθωτική γέφυρα.[5]

Για τη λειτουργία ως αντιστροφέα ($90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$)

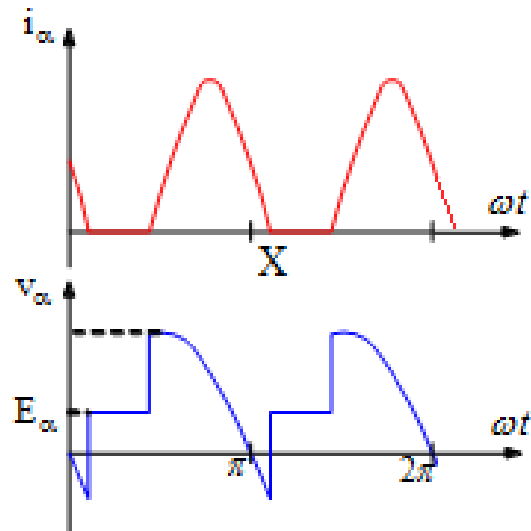
Για γωνία έναυσης μεγαλύτερη των 90° , η τάση $v_a(t)$ του τυλίγματος τυμπάνου του κινητήρα γίνεται αρνητική. Εάν ταυτόχρονα αντιστραφεί και η πολικότητα της Α.Η.Ε.Δ., $e_\alpha(t)$, έχουμε λειτουργία αντιστροφέα δηλαδή η μηχανή λειτουργεί πλέον στο 2^ο τεταρτημόριο. Υπάρχουν δύο δυνατότητες λειτουργίας της μηχανής :

Στην περίπτωση που το μηχανικό φορτίο στον άξονα είναι παθητικό, έχουμε λειτουργία πέδης (δυναμική πέδηση)

Στην περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα συντήρησης της ροπής του άξονα (ενεργητικό μηχανικό φορτίο), τότε έχουμε λειτουργία γεννήτριας, παρέχοντας πλέον μόνιμα ισχύ στο δίκτυο

Εάν τώρα η γωνία έναυσης γίνει μεγαλύτερη των 90° αλλά δεν αντιστραφεί η φορά της $e_\alpha(t)$, τότε το ρεύμα $i_a(t)$ μηδενίζεται και ο κινητήρας είναι σαν να διακόπτεται από το δίκτυο (ελεύθερη πέδηση). [5]

2.2.2 Λειτουργία στην Ασυνεχή Αγωγή



Κυματομορφές εξόδου στη ασυνεχή αγωγή [5]

Στο διάστημα $\alpha < \omega t < X$, ο κινητήρας συνδέεται με το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω των θυρίστωρ T1 και T4. Τη χρονική στιγμή $\omega t = X$, το ρεύμα τυμπάνου μηδενίζεται, οπότε έχουμε τη σβέση των προαναφερθέντων θυρίστωρ. Μέχρι τον επόμενο παλμό έναυσης (T2, T3) δηλαδή στο διάστημα $X < \omega t < \pi + \alpha$, το ρεύμα τυμπάνου εξακολουθεί να είναι μηδενικό.

Επομένως, στο διάστημα αυτό η μηχανική ενέργεια του φορτίου καλύπτεται από την κινητική ενέργεια των στρεφομένων μαζών. Επιπλέον δε, για $X < \omega t < \pi + \alpha$, είναι $v_\alpha(t) = e_\alpha(t) = E_\alpha$.

Για μεγάλες ταχύτητες και μικρά φορτία είναι δυνατόν να έχουμε διακοπή του ρεύματος, πριν ακόμα η τάση του δικτύου περάσει στα αρνητικά, δηλαδή για $\omega t < \pi$.

Η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου είναι $V_\alpha = \frac{1}{\pi} \int_\alpha^{\pi+\alpha} v_\alpha(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \left[\int_\alpha^X V_m \sin \omega t d\omega t + \int_\alpha^X E_\alpha d\omega t \right] = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos X) + \frac{E_\alpha}{\pi} (\pi + \alpha - X)$

Σχέση 2.1.16

Αντίστοιχα, η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου είναι $I_\alpha = \frac{V_\alpha - E_\alpha}{R_\alpha} = \frac{V_m}{\pi R_\alpha} (\cos \alpha - \cos X) + \frac{E_\alpha}{\pi} (\pi + \alpha - X)$ Σχέση 2.1.17

Η Δ.Ε. του ρεύματος τυμπάνου στο διάστημα αγωγής, $\alpha < \omega t < X$, είναι η ίδια με εκείνη της συνεχούς αγωγής (Σχέση 2.1.3). Επομένως, στο διάστημα αυτό, η αναλυτική έκφραση του ρεύματος δίνεται από τη Σχέση 2.1.7. Η μόνη διαφορά είναι στις οριακές τιμές, όπου τώρα για $\omega t = \alpha$ και $\omega t = X$, είναι

$I_{\alpha, \min} = i_\alpha(\alpha) = i_\alpha(X) = 0$ Σχέση 2.1.18

Από τις σχέσεις 2.1.4 και 2.1.5 υπολογίζουμε την τιμή της σταθεράς D ,

$$D = \left[\frac{E_a}{R_a} - \frac{V_m}{Z_a} \sin(\alpha - \varphi) \right] e^{\frac{\alpha}{\omega T_a}} \quad \text{Σχέση 2.1.19}$$

Επομένως, μετά τον υπολογισμό της τιμής της σταθεράς ολοκλήρωσης, η γενική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου είναι

$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z_a} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{-(\omega t - \alpha)}{\omega T_a}} \right] - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{\frac{-(\omega t - \alpha)}{\omega T_a}} \right) \quad \text{Σχέση 2.1.20}$$

Η γωνία 'X' μηδενισμού του ρεύματος, βρίσκεται από τη σχέση 2.1.20 αν θέσουμε $i_a(\omega t = X) = 0$. Η προκύπτουσα εξίσωση είναι υπερβατική και λύνεται με επαναληπτικές μεθόδους. Επίσης, αν θέσουμε $\omega t = X = \pi + \alpha$, η προκύπτουσα σχέση αποτελεί το κριτήριο για την ελάχιστη απαιτούμενη κρίσιμη τιμή της αντεπαγωγής του τυλίγματος τυμπάνου, για την οποία κάτω από ορισμένες συνθήκες φόρτισης, έχουμε συνεχή αγωγή. Θα πρέπει λοιπόν

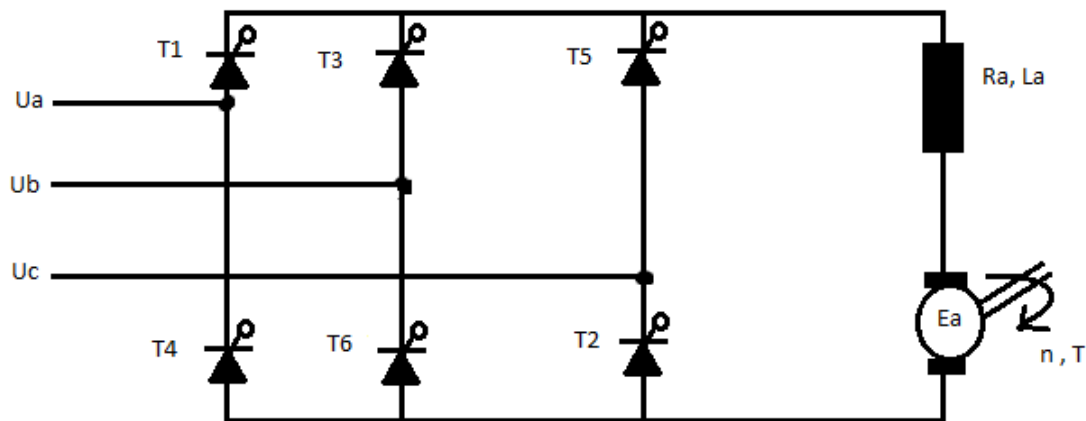
$$\cos\varphi * \sin(\alpha - \varphi) \frac{e^{\frac{-\pi}{\omega T_a} + 1}}{e^{\frac{-\pi}{\omega T_a} - 1}} \geq \frac{E_a}{V_m} \quad \text{Σχέση 2.1.21}$$

Όπου $\cos\varphi = \frac{R_a}{Z_a}$ Σχέση 2.1.22

Για την χαρακτηριστική ροπής-στροφών στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής, έχουμε

$$n = \frac{V_m}{\pi K_m \phi_f} (\cos\alpha - \cos X) + \frac{E_a}{\pi K_g \phi_f} (\pi + \alpha - X) - \frac{R_a T}{K_m K_g \phi_f} \quad \text{Σχέση 2.1.23} \cdot [5]$$

2.3 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (ανόρθωση 6 παλμών)



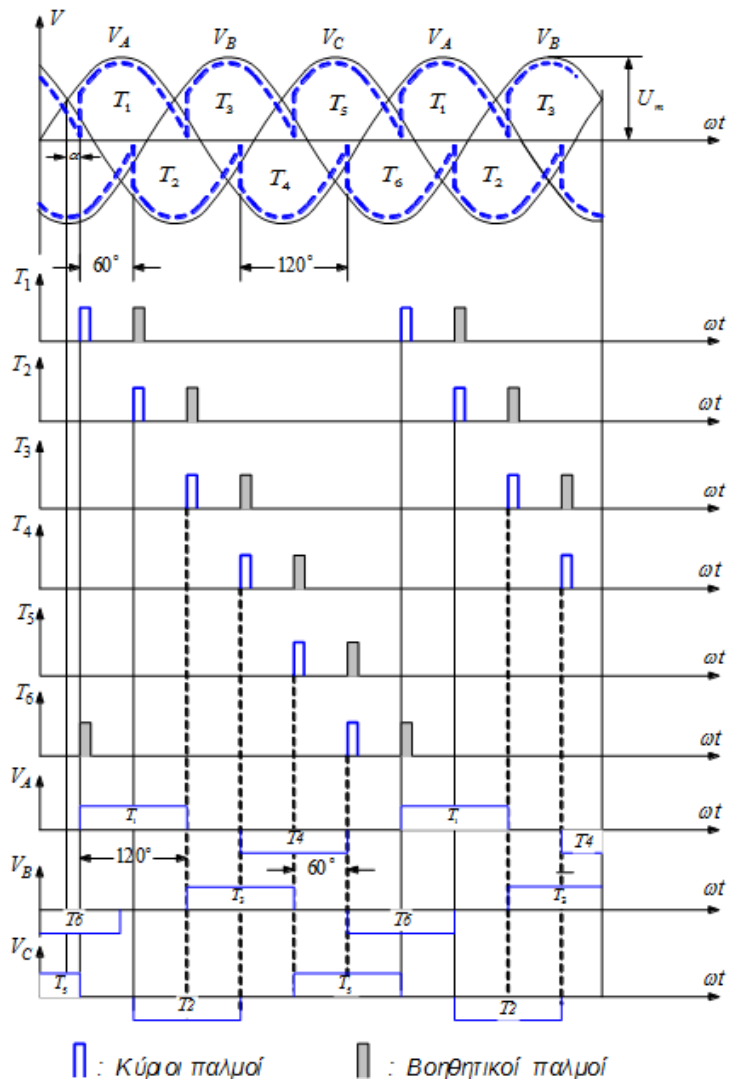
Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα

Το κύκλωμα της ανόρθωσης αυτής, αποτελεί την καλύτερη λύση μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Αυτό οφείλεται στις δυνατότητες παροχής υψηλής ισχύος εξόδου και της μικρής κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα της ανόρθωσης αυτής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει μετασχηματιστή εισόδου χωρίς να υπάρχει το πρόβλημα του μαγνητικού κορεσμού. Οι διάφορες τάσεις εισόδου εφαρμόζονται στην έξοδο ως εξής :

- V_{cb} μέσω των θυρίστορ T5 , T6
- V_{ab} μέσω των θυρίστορ T6 , T1
- V_{ac} μέσω των θυρίστορ T1 , T2
- V_{bc} μέσω των θυρίστορ T2 , T3
- V_{ba} μέσω των θυρίστορ T3 , T4
- V_{ca} μέσω των θυρίστορ T4 , T5

Τα θυρίστορ T1, T3, T5 ονομάζονται θετική ομάδα της ανόρθωσης επειδή άγουν κατά τη θετική ημιπερίοδο των τάσεων εισόδου. Ομοίως τα θυρίστορ T4, T6, T2 ονομάζονται αρνητική ομάδα της ανόρθωσης επειδή άγουν κατά την αρνητική ημιπερίοδο των τάσεων εισόδου. Κάθε θυρίστορ άγει για ένα τρίτο της περιόδου της τάσης εισόδου, συνεπώς ,η γωνία έναυσης 'α' των θυρίστορ μετρείται από τη γωνία $\omega t=30^\circ$ των αντίστοιχων φασικών τάσεων τους.

Οι παλμοί έναυσης των θυρίστορ μιας ομάδας έχουν μεταξύ τους μια διαφορά τάσης 120° , όπως συμβαίνει και με τις αντίστοιχες φασικές τους τάσεις. Επομένως κάθε θυρίστορ άγει για 120° . Τα θυρίστορ της αρνητικής ομάδας αρχίζουν να άγουν μετά από 180° σε σχέση με τα αντίστοιχα τους θυρίστορ της θετικής ομάδας. Δηλαδή αν το θυρίστορ T1 αρχίζει να άγει σε μια γωνία α , τότε το αντίστοιχο του θυρίστορ από την αρνητική ομάδα , το T4 , θα αρχίσει να άγει στη γωνία $\alpha+180^\circ$. Για κάθε περίοδο της τάσης εισόδου, η τάση εξόδου έχει έξι παλμούς. Για το λόγο αυτό η ανόρθωση αυτή ονομάζεται και ανόρθωση έξι παλμών.

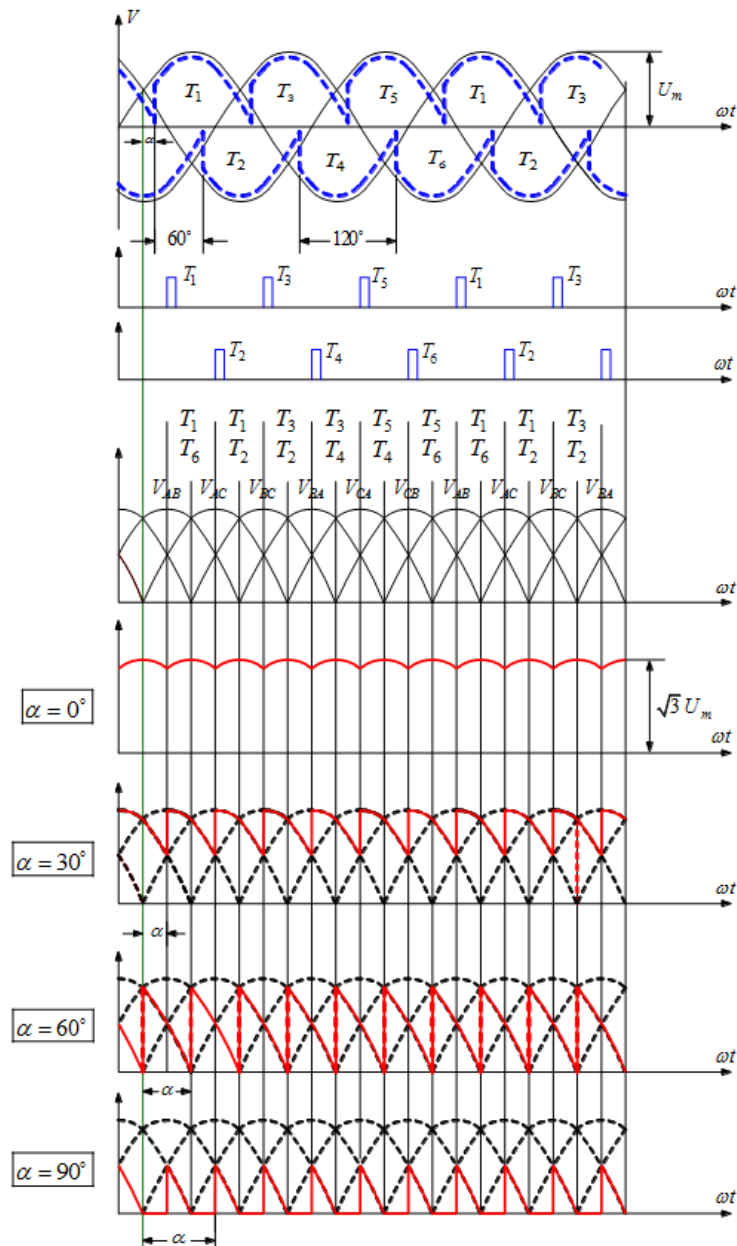


Διαστήματα αγωγής και παλμοί έναυσης των θυρίστορ [6]

Διάστημα αγωγής σε μοίρες	Θυρίστορ που άγουν	Τάση εξόδου
$30 + \alpha \leq \omega t \leq 90 + \alpha$	T1 και T6	$V_a(t) - V_b(t)$
$90 + \alpha \leq \omega t \leq 150 + \alpha$	T1 και T2	$V_a(t) - V_c(t)$
$150 + \alpha \leq \omega t \leq 210 + \alpha$	T3 και T2	$V_b(t) - V_c(t)$
$210 + \alpha \leq \omega t \leq 270 + \alpha$	T3 και T4	$V_b(t) - V_a(t)$
$270 + \alpha \leq \omega t \leq 330 + \alpha$	T5 και T4	$V_c(t) - V_a(t)$
$330 + \alpha \leq \omega t \leq 390 + \alpha$	T5 και T6	$V_c(t) - V_b(t)$

Όταν η γωνία έναυσης είναι μηδέν, τότε η ανόρθωση λειτουργεί σαν μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση γέφυρας. Εξετάζοντας την παρακάτω εικόνα των κυματομορφών τάσεως εξόδου, διαπιστώνεται ότι η ανόρθωση χρειάζεται αρχικά για κάθε ομάδα θυρίστορ, τρεις παλμούς έναυσης με διαφορά φάσης 120° του ενός από τον άλλο. Συνολικά χρειάζονται δηλαδή έξι παλμοί με διαφορά φάσης 60° . Οι παλμοί αυτοί πρέπει να είναι συγχρονισμένοι με την τάση εισόδου, ώστε τα θυρίστορ να άγουν στην επιθυμητή γωνία έναυσης α . Το σημείο μέτρησης των παλμών έναυσης της τριφασικής ανόρθωσης είναι μετά από 30° της

φασικής τάσης ή 60° μετά την πολική τάση. Για να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη σβέση ενός thyristor, λόγω του φαινομένου μετάβασης κάποιου άλλου thyristor, ένας επιπλέον παλμός έναυσης προστίθεται για κάθε thyristor στη γωνία εκείνη όπου γίνεται η μετάβαση κάποιου άλλου thyristor, δηλαδή σε απόσταση 60° από τον κύριο παλμό έναυσης (διακρίνεται στην εικόνα «διαστήματα αγωγής και παλμοί έναυσης των thyristor»). Η θετική ή αρνητική τάση που εφαρμόζεται σε κάθε thyristor, εξαρτάται από τις τάσεις εισόδου και από την κατάσταση αγωγής των υπολοίπων thyristor της ανόρθωσης. [8]



Κυματομορφές της τάσης εξόδου [6]

2.3.1 Λειτουργία στη συνεχή αγωγή

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα, στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής είναι

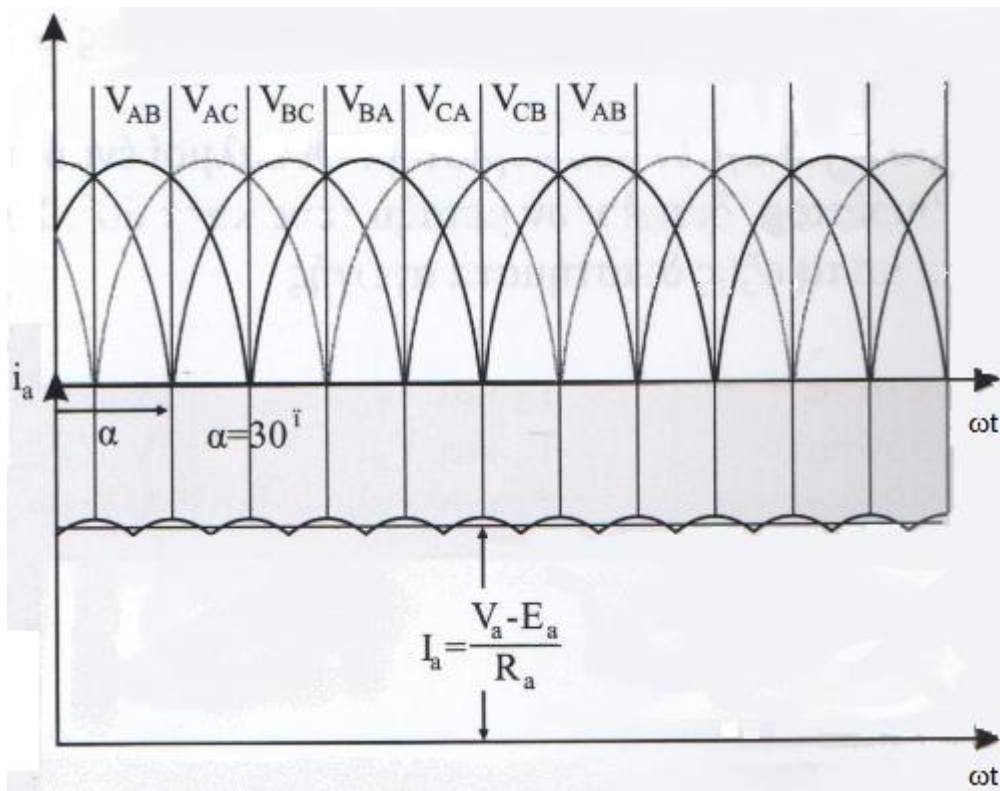
$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) dt = \frac{6}{2\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} v_{AB}(\omega t) dt = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + 30) d\omega t \Rightarrow V_a = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos\alpha = \frac{3\sqrt{2}(\sqrt{3}V_{rms})}{\pi} \cos\alpha = 1.35V_{L,rms} \cos\alpha$$

Σχέση 2.2.1

Όπου, $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, v_{AB} η διαφορά φασικών τάσεων, V_m η μέγιστη τιμή της φασικής τάσης εισόδου και $V_{L,rms}$ η ενεργός τιμή της πολικής τάσης εισόδου.

Αντίστοιχα η μέση τιμή του ρεύματος στο φορτίο είναι $I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi R_a} \cos\alpha - \frac{E_a}{R_a}$ Σχέση

2.2.2



Κυματομορφή ρεύματος στο φορτίο ($\alpha=30^\circ$) [4]

Για τις μεταβολές της γωνίας έναυσης μέχρι και 90° , δηλαδή $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, η μέση τιμή της τάσης είναι θετική, οπότε έχουμε λειτουργία ανορθωτή. Για γωνίες μεγαλύτερες των 90° , δηλαδή $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, η μέση τιμή της τάσης γίνεται αρνητική, οπότε αν ταυτόχρονα αντιστραφεί και η πολικότητα της Α.Η.Ε.Δ. (μέσω του ρεύματος διέγερσης), θα έχουμε λειτουργία αντιστροφέα.

Στο διάστημα αγωγής, $\alpha + 30^\circ \leq \alpha \leq \alpha + 90^\circ$, η Δ.Ε. λειτουργίας του κινητήρα είναι

$$v_a(t) = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad \text{Σχέση 2.2.3}$$

Εάν αμελήσουμε την κυμάτωση των στροφών, η Α.Η.Ε.Δ. του κινητήρα μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, με την προϋπόθεση βέβαια ότι και το ρεύμα διέγερσης είναι σταθερό, δηλαδή $e_a(t) = E_a$. Η γενική λύση της σχέσης 2.2.3 ,προκύπτει από το άθροισμα της γενικής λύσης της ομογενούς Δ.Ε. $i_{\alpha,\sigma\mu}(t) = Ae^{\frac{-t}{T_a}}$ Σχέση 2.2.4 και μιας μερικής λύσης της μορφής $i_{\alpha,\mu}(t) = B\sin(\omega t + 30) + C\cos(\omega t + 30) + D$ Σχέση 2.2.5. Μετά τον υπολογισμό των σταθερών B, C, D (από την αντικατάσταση της σχέσης 2.2.5 στη σχέση 2.2.3) η γενική έκφραση του ρεύματος παίρνει την μορφή

$$i_a(\omega t) = -\frac{E_a}{R_a} + \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \sin(\omega t + 30) + Ae^{\frac{-t}{T_a}} \quad \text{Σχέση 2.2.6} \quad \text{όπου } Z_a = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2} \quad \text{και}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\omega L_a}{R_a} \right] \quad \text{Σχέση 2.2.7.} \quad \text{Η σταθερά ολοκλήρωσης } A, \text{ υπολογίζεται από τις οριακές συνθήκες}$$

$$I_{a,\min} = i_a(\omega t = \alpha + 30) = i_a(\omega t = \alpha + 90) = I_{\alpha 1} \quad \text{Σχέση 2.2.8} \quad \text{οπότε}$$

$$A = -\frac{\sqrt{3}V_m e^{\frac{-(\alpha+30)}{\omega T_a}}}{Z_a \left(1 - e^{\frac{-\epsilon 0}{\omega T_a}}\right)} \sin(\alpha - \varphi) \quad \text{Σχέση 2.2.9.} \quad \text{Επομένως η τελική έκφραση του ρεύματος είναι}$$

$$i_a(\omega t) = -\frac{E_a}{R_a} + \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \left[\sin(\omega t + 30 - \varphi) - \frac{e^{\frac{-(\omega t - \alpha - 30)}{\omega T_a}}}{1 - e^{\frac{-\epsilon 0}{\omega T_a}}} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad \text{Σχέση 2.2.10.}$$

Η έκφραση της ελάχιστης τιμής του ρεύματος τυμπάνου, προκύπτει από τη σχέση 2.2.10 εάν

$$\text{θέσουμε } \omega t = \alpha + 30^\circ. \text{ Επομένως } I_{\alpha 1} = \frac{3V_m}{2Z_a} \cos(\alpha - \varphi) - \frac{\sqrt{3}V_m}{2Z_a} \sin(\alpha - \varphi) \frac{1 + e^{\frac{-\epsilon 0}{\omega T_a}}}{1 - e^{\frac{-\epsilon 0}{\omega T_a}}} - \frac{E_a}{R_a} \quad \text{Σχέση}$$

2.2.11. Η ενεργός τιμή του ρεύματος τυμπάνου βρίσκεται από τη σχέση

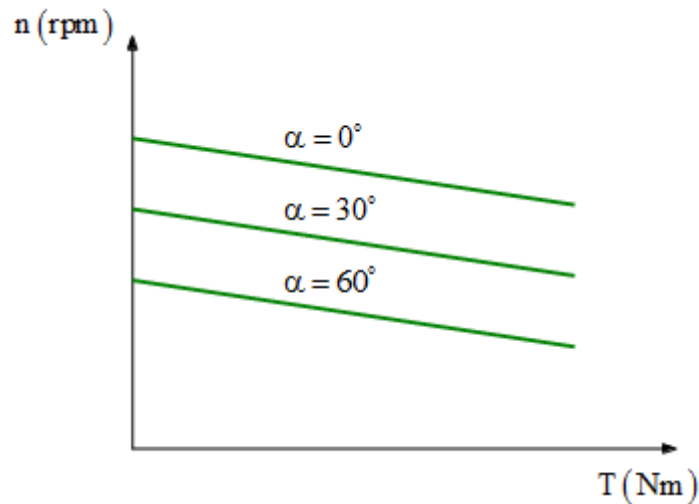
$$I_{\alpha,rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_a^2(t) dt = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} i_a^2(\omega t) d\omega t \quad \text{Σχέση 2.2.12.} \quad \text{Για την ενεργό τιμή του ρεύματος}$$

γραμμής από την πλευρά του εναλλασσομένου, λαμβάνοντας υπόψη ότι το διάστημα αγωγής του κάθε θυρίστορ είναι 120° , προκύπτει $I_{\alpha,rms}^2 = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} i_a^2(\omega t) d\omega t = \frac{2}{3} I_{\alpha,rms}^2$ Σχέση

2.2.13.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η έκφραση της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών, στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής, είναι $n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi K_g \Phi} \cos \alpha - \frac{R_a T}{K_g K_m \Phi^2}$ Σχέση 2.2.14. Οι

χαρακτηριστικές ροπής – στροφών για κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. σε πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα στη συνεχή αγωγή είναι ίδια με τις χαρακτηριστικές ροπής – στροφών κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. σε πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα στη συνεχή αγωγή.



Χαρακτηριστικές ροπής-στροφών κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική ανορθωτική γέφυρα. [5]

Τώρα στην περίπτωση που προστεθεί στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου και μία δίοδος ελεύθερας ροής, η τάση ακροδεκτών περιορίζεται μόνο στις θετικές τιμές, $0^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$, δηλαδή έχουμε λειτουργία στο 1^ο τεταρτημόριο.

Για μεταβολή της γωνίας έναυσης στο διάστημα $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, η τάση $v_a(t)$ του τυλίγματος τυμπάνου είναι πάντα θετική. Επομένως, είναι σαν να μην υπάρχει η δίοδος ελεύθερας ροής και η μέση τιμή της τάσης δίνεται από τη σχέση 2.2.1. Για γωνίες έναυσης, $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$, η δίοδος ελεύθερης ροής περιορίζει την τάση $v_a(t)$ στα διαστήματα που είναι θετική. Η μέση τιμή λοιπόν της τάσης τυμπάνου στην περίπτωση αυτή είναι $V_a = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{150} \sqrt{2}V_m \sin(\omega t + 30) d\omega t = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} [1 + \cos(\alpha + 60)]$ Σχέση 2.2.15. [5]

2.3.2 Λειτουργία στην ασυνεχή αγωγή

Στην περίπτωση που η αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου είναι αρκετά μικρή, τότε για διάφορες λειτουργικές καταστάσεις (π.χ. μικρά φορτία, υψηλές στροφές), η αγωγή του ρεύματος τυμπάνου μπορεί να γίνει ασυνεχής. Έστω θ_c , η περίοδος αγωγής του ρεύματος. Παρατηρούμε ότι, όσο η Α.Η.Ε.Δ. πλησιάζει στην τιμή της τάσης τυμπάνου, τόσο οι παλμοί του ρεύματος ελαττώνονται σε μέγεθος και διάρκεια. Προφανώς στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής ισχύει $\theta_c < 60^\circ$ Σχέση 2.2.16. Η μόνη διαφορά είναι στις οριακές συνθήκες, όπου τώρα κατά τη στιγμή της έναυσης το ρεύμα είναι μηδέν. Δηλαδή $i_a(\omega t = \alpha + 30) = I_{min} = I_{a1} = 0$ Σχέση 2.2.17. Επομένως, η έκφραση της σταθεράς ολοκλήρωσης A, παίρνει την μορφή

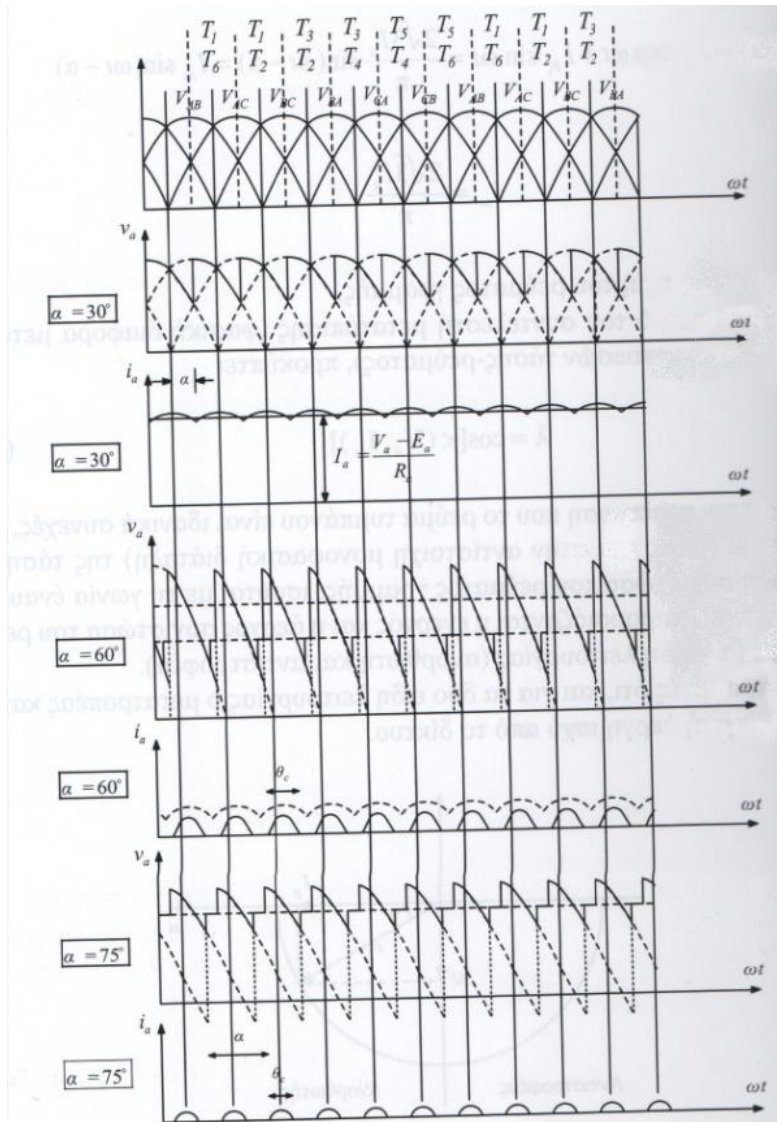
$$A = \left[\frac{E_a}{R_a} - \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \sin(\alpha + 60 - \varphi) \right] e^{\frac{\alpha+30}{\omega T_a}} \text{ Σχέση 2.2.18.}$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της A, η τελική έκφραση του ρεύματος στο διάστημα αγωγής $\alpha + 30^\circ \leq \omega t \leq \alpha + \theta_c$, γίνεται

$$i_a(\omega t) = \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \left[\sin(\omega t + 30 - \varphi) - \sin(\alpha + 60 - \varphi) e^{\frac{-(\omega t - \alpha - 30)}{\omega T_a}} \right] - \frac{E_a}{R_a} \left[1 - e^{\frac{-(\omega t - \alpha - 30)}{\omega T_a}} \right]$$

Σχέση 2.2.19. Η γωνία αγωγής θ_c , η οποία εξαρτάται από την αυτεπαγωγή του τυλίγματος

τυμπάνου καθώς και από τις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης του κινητήρα, υπολογίζεται από τη σχέση 2.2.19, αν θέσουμε όπου $i_a(\omega t = \alpha + 30 + \theta_c) = 0$. Η εξίσωση που θα προκύψει από την αντικατάσταση στη σχέση 2.2.19, είναι υπερβατική και λύνεται με επαναληπτικές μεθόδους.



Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα - ασυνεχής αγωγή. Κυματομορφές τάσης-ρεύματος [4]

Η μέση τιμή της τάσης τυμπάνου, δίνεται από τη σχέση $V_a = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} v_a(\omega t) d\omega t = \frac{3}{\pi} \left[\int_{\alpha+30}^{\alpha+\theta_c} \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + 30) d\omega t + \int_{\alpha+\theta_c+30}^{\alpha+90} E_a d\omega t \right]$ ή

$$V_a = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} [\cos(\alpha + 60) - \cos(\alpha + 60 + \theta_c)] + \frac{3E_a}{\pi} (60 - \theta_c) \quad \text{Σχέση 2.2.20}$$

Για $\theta_c = 60^\circ$, δηλαδή όταν είμαστε στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής, τότε η σχέση 2.2.20 γίνεται ίση με τη Σχέση 2.2.1. Η ενεργός τιμή του ρεύματος τυμπάνου δίνεται

από την σχέση $I_{a,rms} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+30+\theta_c} i_a^2(\omega t) d\omega t}$ Σχέση 2.2.21 και η μέση τιμή

$$I_a = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+30+\theta_c} i_a(\omega t) d\omega t \quad \text{Σχέση 2.2.22}$$

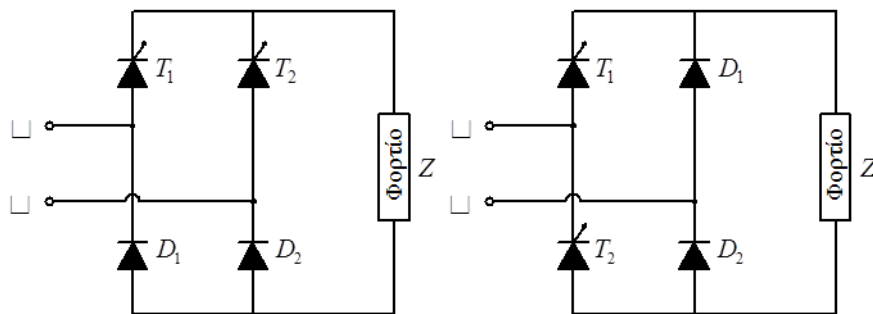
Το κριτήριο για την εύρεση της κρίσιμης τιμής της αυτεπαγωγής L_a , για την οποία κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης έχουμε συνεχή αγωγή, προκύπτει σύμφωνα με το εξής σκεπτικό. Θα πρέπει το διάστημα αγωγής να είναι 60° ($\theta_c = 60^\circ$) και το ελάχιστο ρεύμα τυμπάνου $i_a(\omega t = \alpha + 30 + \theta_c) = I_{a,min} = 0$. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω συνθήκες στην

$$\frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \left[\sin(\alpha + 90 - \varphi) - \sin(\alpha + 60 - \varphi) e^{\frac{-60}{\omega T_a}} \right] - \frac{E_a}{R_a} \left[1 - e^{\frac{-60}{\omega T_a}} \right] = 0 \quad \text{Σχέση 2.2.23.} \quad (2.2.19)$$

Οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών, προκύπτουν κατά τα γνωστά από την γενική έκφραση, όπου η v_a υπολογίζεται από τη σχέση 2.2.20. [5]

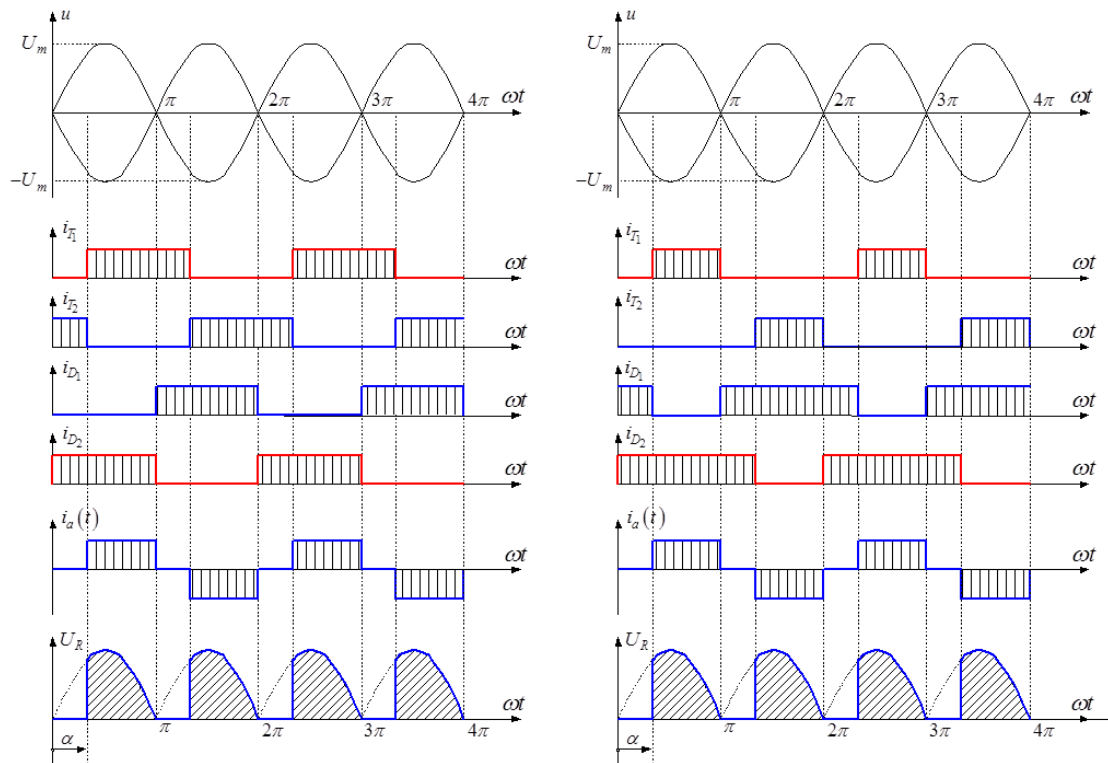
2.4 Μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα

Γενικά με τον όρο «ημieleγχόμενες διατάξεις» εννοούμε τις διατάξεις εκείνες που περιλαμβάνουν ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία (π.χ. θυρίστορ και διόδους). Σε αντίθεση με τις πλήρως ελεγχόμενες, οι ημieleγχόμενες διατάξεις λειτουργούν μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή ως ανορθωτικές διατάξεις. Η μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα μπορεί να είναι είτε συμμετρικών κλάδων είτε ασύμμετρων κλάδων.



Αριστερά : Συμμετρική μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα. Δεξιά : Ασύμμετρη μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα [5]

Η συμμετρική μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα όπως φαίνεται και στην εικόνα αποτελείται από δυο κλάδους, και κάθε κλάδος περιέχει ένα θυρίστορ και μία δίοδο. Εν αντιθέσει, η μη συμμετρική ή ασύμμετρη μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα, έχει στον ένα κλάδο τις διόδους και στον άλλο κλάδο τα θυρίστορ.



Αριστερά: Κυματομορφές συμμετρικής ημιελεγχόμενης Δεξιά: Κυματομορφές ασύμμετρης ημιελεγχόμενης (ωμικό φορτίο) [5]

Όπως φαίνεται και στην εικόνα των κυματομορφών παραπάνω, το αποτέλεσμα του ελέγχου, είναι ίδιο είτε χρησιμοποιήσουμε την συμμετρική είτε την ασύμμετρη ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα. Η διαφορά μεταξύ των δύο διατάξεων είναι στην πορεία του ρεύματος εξόδου. Πιο αναλυτικά, κατά την θετική ημιπερίοδο στη συμμετρική ημιελεγχόμενη, ορθά πολωμένα είναι τα διακοπτικά στοιχεία T1 και D2 και η πορεία που θα ακολουθήσει το ρεύμα είναι από το δίκτυο στο T1 και κατά τη χρονική στιγμή που θα δοθεί ο παλμός έναυσης σε γωνία α , το ρεύμα θα περάσει από το φορτίο και στη συνέχεια μέσω της διόδου D2 θα επιστρέψει πίσω στο δίκτυο. Κατά τη θετική ημιπερίοδο στην ασύμμετρη ημιελεγχόμενη γέφυρα, η πορεία του ρεύματος εξόδου θα είναι ίδια όπως και στην συμμετρική, καθώς και σε αυτή την περίπτωση, ορθά πολωμένα είναι τα διακοπτικά στοιχεία T1 και D2, με το θυρίστορ T1 να είναι το πρώτο στοιχείο από το οποίο θα περάσει το ρεύμα. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, στη συμμετρική ημιελεγχόμενη, ορθά πολωμένα είναι τα διακοπτικά στοιχεία T2 και D1 και η πορεία που θα ακολουθήσει το ρεύμα είναι από το δίκτυο στο T2 και κατά τη χρονική στιγμή που θα δοθεί ο παλμός έναυσης σε γωνία α , το ρεύμα θα περάσει από το φορτίο και στη συνέχεια μέσω της διόδου D1 θα επιστρέψει πίσω στο δίκτυο. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, στην ασύμμετρη ημιελεγχόμενη, ορθά πολωμένα είναι, όπως και στην συμμετρική, τα διακοπτικά στοιχεία D1 και T2. Η πορεία του ρεύματος σε αυτή την περίπτωση είναι, πως το ρεύμα πρώτα θα περάσει από την διόδο D1 και το φορτίο, ενώ στην συνέχεια θα οδηγηθεί πίσω στο δίκτυο μέσω του T2, όταν σε αυτό δώσουμε τον παλμό έναυσης σε γωνία α . Η διαφορά δηλαδή των δύο διατάξεων είναι πως κατά την αρνητική ημιπερίοδο ο έλεγχος της τάσης και κατά συνέπεια, του ρεύματος, στη συμμετρική ημιελεγχόμενη γίνεται πριν το φορτίο, ενώ στην ασύμμετρη γίνεται μετά το φορτίο.

2.4.1 Λειτουργία στη συνεχή αγωγή

Όταν η αυτεπαγωγή L_a του τυλίγματος τυμπάνου του κινητήρα είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μας εξασφαλίζει συνεχή αγωγή σε όλο το εύρος της λειτουργίας του μετατροπέα, τότε οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της διάταξης διαμορφώνονται όπως στην παρακάτω εικόνα.

Η παλμοδότηση των θυρίστορ γίνεται συμμετρικά, δηλαδή η έναυση του T1 γίνεται σε γωνία α και του T2 σε γωνία $\alpha + \pi$, με αναφορά την τάση του δικτύου. Παρατηρούμε πως για διάστημα $\alpha < \omega t < \pi$, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την τάση του δικτύου μέσω των διακοπών T1 και D2. Στο διάστημα αυτό λοιπόν, η τάση ακροδεκτών του τυλίγματος τυμπάνου δίνεται από την εξίσωση $v_a(t) = v(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$ Σχέση 2.3.1

Δηλαδή στο διάστημα αυτό, η Δ.Ε. του κυκλώματος είναι ίδια με την αντίστοιχη της πλήρως ελεγχόμενης διάταξης. Επομένως, η γενική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου είναι

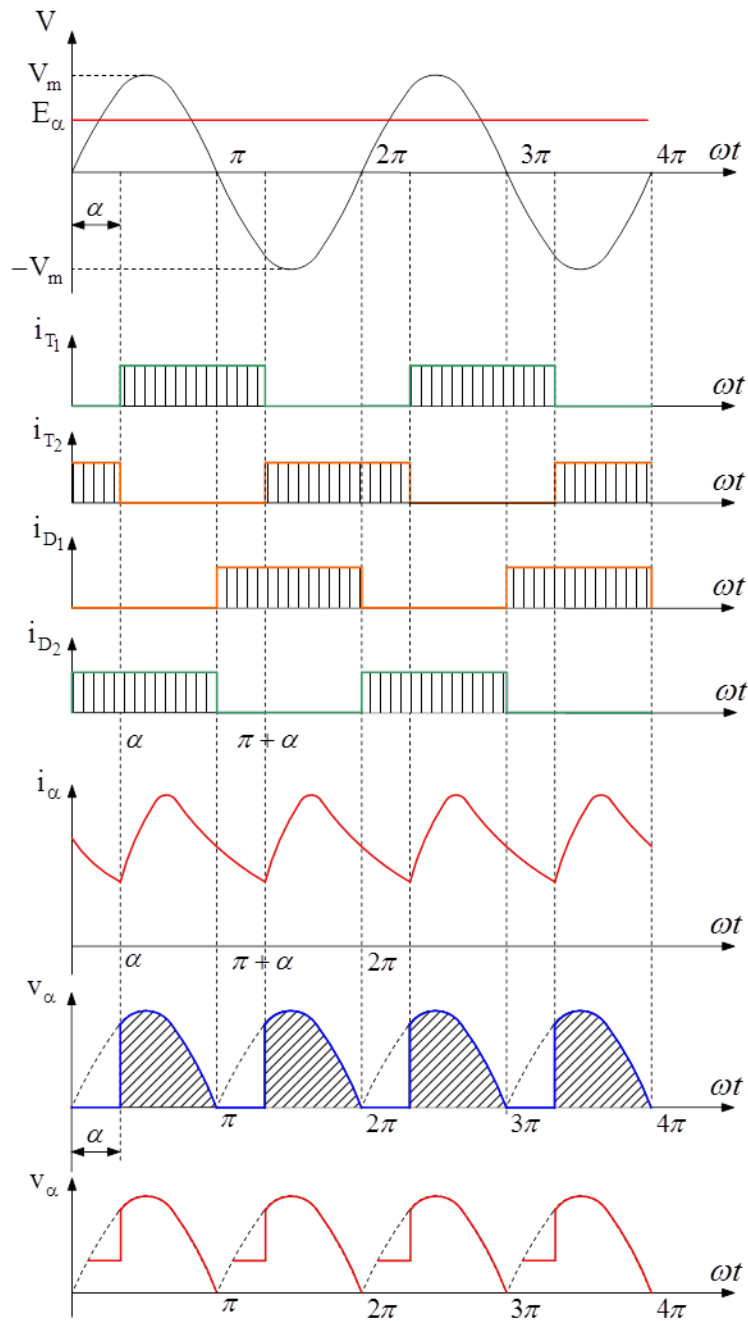
$$i_a(t) = D e^{\frac{-t}{T_a}} - \frac{E_a}{R_a} + \frac{V_m}{Z_a} \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{Σχέση 2.3.2} \quad \text{όπου } \varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\omega L_a}{R_a} \right], \quad T_a = \frac{L_a}{R_a},$$
$$Z_a = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2} \quad \text{Σχέση 2.3.3} \quad \text{και } D \text{ η σταθερά ολοκλήρωσης της γενικής λύσης της ομογενούς Δ.Ε.}$$

Για $\omega t > \pi$, η τάση $v_a(t)$ τείνει να αναστραφεί, καθώς η εναλλασσόμενη τάση του δικτύου $v(t)$ γίνεται αρνητική. Αυτό έχει ως συνέπεια, να πολωθεί ορθά η δίοδος ελευθέρως ροής αρχίζοντας να άγει, με αποτέλεσμα το βραχυκύκλωμα του τυλίγματος τυμπάνου $v_a(t) = 0$.

Επομένως στην περιοχή αυτή ισχύει ότι $v_a(t) = 0 = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$ Σχέση 2.3.4

Στο διάστημα αγωγής λοιπόν του T1, ο κινητήρας παραλαμβάνει από το δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια. Μέρος της ενέργειας αυτής αποθηκεύεται ως μαγνητική ενέργεια στην αυτεπαγωγή και ως κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών και το υπόλοιπο καταναλίσκεται ως μηχανική ενέργεια φορτίου.

Στο διάστημα αγωγής της δίοδος ελευθέρως ροής, ένα ποσοστό της μαγνητικής ενέργειας της αυτεπαγωγής καταναλίσκεται ως μηχανική ενέργεια και το υπόλοιπο ως θερμότητα στην αντίσταση τυμπάνου. Επομένως και στο διάστημα αυτό, το ρεύμα τυλίγματος τυμπάνου συνεχίζει να παράγει ηλεκτρομαγνητική ροπή στον κινητήρα. Δεν επιστρέφεται καθόλου ισχύς στο δίκτυο.



Κυματομορφές τάσεων - ρευμάτων στη συνεχή αγωγή [5]

Η γενική λύση της σχέσης 2.3.4 στο διάστημα $\pi < \omega t < \pi + \alpha$, είναι $i_a(t') = Ae^{\frac{-t'}{T_a}} - \frac{E_a}{R_a}$ Σχέση 2.3.5 όπου $t' = t - \pi$ Σχέση 2.3.6. Ο υπολογισμός των σταθερών A και D, θα γίνει βάσει των οριακών συνθηκών. Δηλαδή $i_a(\omega t = \alpha) = i_a(\omega t' = \alpha) = I_{a1}$ Σχέση 2.3.7 και $i_a(\omega t = \pi) = i_a(\omega t' = 0) = I_{a2}$ Σχέση 2.3.8. Από την αντικατάσταση των σχέσεων 2.3.7 και 2.3.8 στη σχέση 2.3.5, προκύπτει το παρακάτω σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους $D - A = -\frac{V_m}{z_a} e^{\frac{\alpha}{\omega T_a}} \sin(\alpha - \varphi)$ Σχέση 2.3.9 και $A - D e^{\frac{-\pi}{\omega T_a}} = \frac{V_m}{z_a} \sin \varphi$ Σχέση 2.3.10.

Από την επίλυση του συστήματος των 2.3.9 και 2.3.10 προκύπτει

$$D = \frac{V_m}{Z_a} \frac{\left[\sin \varphi - e^{-\frac{\alpha}{\omega T_a}} \sin(\alpha - \varphi) \right]}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \right)} \quad \text{Σχέση 2.3.11} \quad \text{και} \quad A = \frac{V_m}{Z_a} \frac{\left[\sin \varphi - e^{-(\alpha - \pi)\omega T_a} \sin(\alpha - \varphi) \right]}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \right)} \quad \text{Σχέση 2.3.12.}$$

Οι ακρότατες τιμές του ρεύματος τυμπάνου, είναι $I_{\alpha 1} = \frac{V_m}{Z_a} \frac{\left[e^{\frac{-\alpha}{\omega T_a}} \sin \varphi - e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \sin(\alpha - \varphi) \right]}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \right)} - \frac{E_a}{R_a}$

Σχέση 2.3.13 και $I_{\alpha 2} = \frac{V_m}{Z_a} \frac{\left[\sin \varphi - e^{-\frac{\pi - \alpha}{\omega T_a}} \sin(\alpha - \varphi) \right]}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \right)} - \frac{E_a}{R_a}$ Σχέση 2.3.14. Επομένως, η διακύμανση

του ρεύματος $\Delta I = I_{\alpha 2} - I_{\alpha 1}$, είναι $\Delta I = \frac{V_m}{Z_a} \frac{\left[\left(1 - e^{-\frac{\alpha}{\omega T_a}} \right) \sin \varphi + e^{-\alpha \omega T_a} \left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \right) \sin(\alpha - \varphi) \right]}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \right)}$ Σχέση

2.3.15.

Η μέση τιμή της τάσης $v_a(t)$ του τυλίγματος τυμπάνου είναι

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} v_a(t) dt = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\alpha} v_a(t) d\omega t + \int_{\alpha}^{\pi} v_a(t) d\omega t \right] \Rightarrow V_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{V_m}{\pi} [\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos \alpha]$$

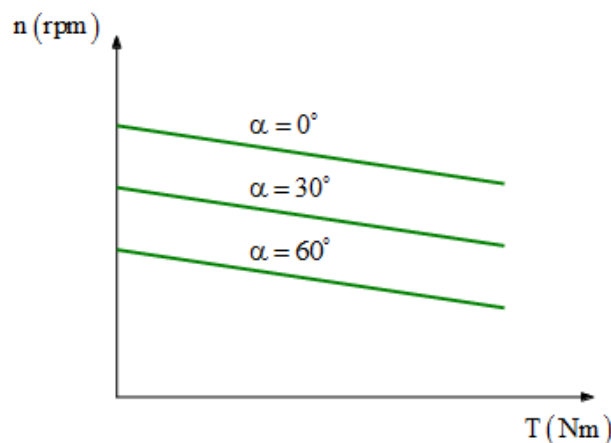
Επομένως $V_a = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos \alpha] = \frac{\sqrt{2} V_{rms}}{\pi} [1 + \cos \alpha]$ Σχέση 2.3.16

Για τη μέση τιμή του ρεύματος θα έχουμε αντίστοιχα $I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{V_m}{\pi R_a} [1 + \cos \alpha] - \frac{E_a}{R_a}$

Σχέση 2.3.17.

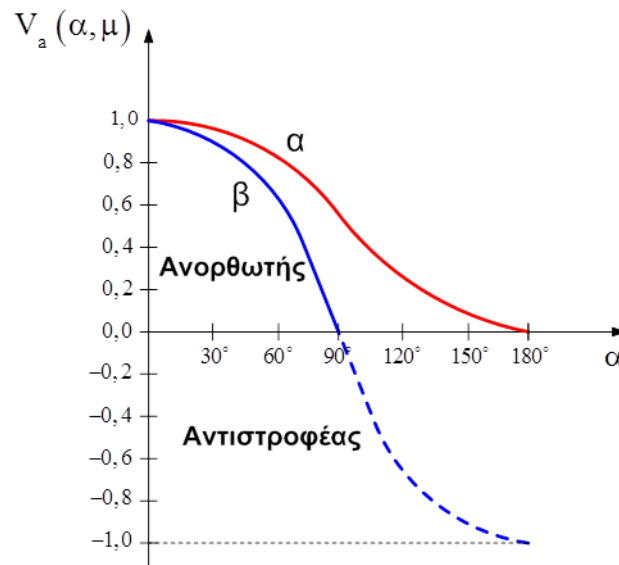
Για την χαρακτηριστική ροπής-στροφών, βάσει των παραπάνω σχέσεων έχουμε την έκφραση

$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K_g \Phi} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2} V_{rms}}{\pi} \right) (1 + \cos \alpha)}{K_g \Phi} - \frac{R_a T}{K_g K_m \Phi^2} \quad \text{Σχέση 2.3.18 [5]}$$



Χαρακτηριστική ροπής-στροφών κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. Ημιελεγχόμενη μονοφασική ανορθωτική γέφυρα [5]

Αξιοσημείωτη είναι η σύγκριση των μέσων τιμών των τάσεων εξόδου, της ημιελεγχόμενης και της πλήρως ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας



Μεταβολή της V_a σε συνάρτηση της γωνίας έναυσης, (α) ημιελεγχόμενη (β) πλήρως ελεγχόμενη [5]

Για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) η μέση τιμή της τάσης εξόδου της ημιελεγχόμενης διάταξης είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης της πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας, με αποτέλεσμα οι στροφές σε λειτουργία χωρίς φορτίο αλλά και οι χαρακτηριστικές ροπές – στροφών να είναι υψηλότερες.

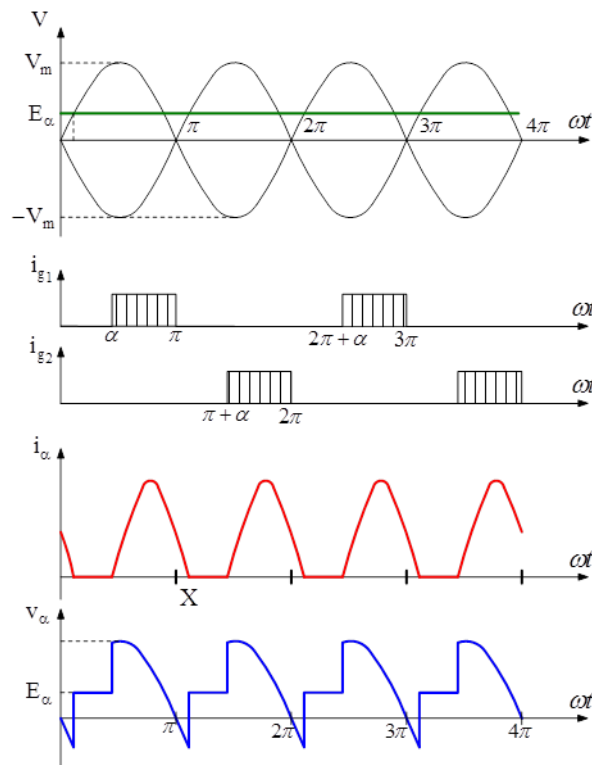
2.4.2 Λειτουργία στην ασυνεχή αγωγή

Αν η αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου δεν είναι αρκετά μεγάλη, υπάρχει η πιθανότητα, η εκφόρτιση του ρεύματος i_a μέσω της διόδου ελεύθερης ροής, να γίνει εντός του διαστήματος $\pi < \omega t < \pi + \alpha$ σε μια τυχαία γωνία $\omega t = X$.

Η ασυνέχεια αυτή του ρεύματος, ως επί το πλείστον εκδηλώνεται σε λειτουργικές καταστάσεις με μικρό φορτίο και υψηλές ταχύτητες (δηλαδή μεγάλες τιμές της E_a). Γενικά στις διατάξεις αυτές, η ασυνέχεια του ρεύματος πρέπει να αποφεύγεται μέσω εξωτερικά συνδεδεμένων σε σειρά αυτεπαγωγών, διότι μειώνεται κατά πολύ η ταχύτητα της δυναμικής απόκρισης του συστήματος, αυξάνεται δε και η κυμάτωση του ρεύματος με αποτέλεσμα τη δημιουργία παρασιτικών ροπών. Επίσης οι ταχύτητες χωρίς φορτίο είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες της συνεχούς αγωγής, με αποτέλεσμα η ρύθμιση της ταχύτητας να είναι χειρότερη. Για το διάστημα $\alpha < \omega t < \pi$, ο κινητήρας συνδέεται με το δίκτυο μέσω των T1 και D2. Η μεταβολή του ρεύματος στο διάστημα αυτό είναι όμοια με την αντίστοιχη της συνεχούς αγωγής. Επομένως
$$i_a(t) = D e^{\frac{-t}{\tau_a}} - \frac{E_a}{R_a} + \frac{V_m}{Z_a} \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{Σχέση 2.3.19}$$
 η μόνη διαφορά είναι στις αρχικές συνθήκες όπου στη περίπτωση αυτή ισχύει $i_a(\omega t - \alpha) = 0 = I_{a1}$ Σχέση 2.3.20 Η τιμή της σταθεράς D υπολογίζεται από την αντικατάσταση της σχέσης 2.3.20

στη σχέση 2.3.19 και έχει την τιμή $D = \frac{E_a}{R_a} + \frac{V_m}{Z_a} \sin \varphi$ Σχέση 2.3.21 άρα

$$i_a(t) = \frac{E_a}{R_a} \left(e^{\frac{-t}{T_a}} - 1 \right) + \frac{V_m}{Z_a} [\sin \varphi - \sin (\omega t - \varphi)] \quad \text{Σχέση 2.3.22}$$



Μονοφασική ημειλεγχόμενη γέφυρα - ασυνεχής αγωγή. Κυματομορφές τάσεων-ρευμάτων [5]

Για $\omega t = \pi$, το τυλίγμα τυμπάνου βραχυκυκλώνεται από τη δίοδο ελεύθερης ροής. Έστω ότι, για $\omega t = X < \pi + \alpha$, έχουμε την πλήρη εκφόρτιση του ρεύματος. Η χρονική μεταβολή του ρεύματος στο διάστημα αυτό, είναι όμοια με την αντίστοιχη της συνεχούς αγωγής ($\pi < \omega t < \pi + \alpha$). Δηλαδή $i_a(t') = A e^{\frac{-t'}{T_a}} - \frac{E_a}{R_a}$ όπου $t' = t - \pi$ Σχέση 2.3.23. Για $\omega t' = 0$ και $\omega t = \pi$,

είναι $i_a(\omega t' = 0) = I_{a2}$ Σχέση 2.3.24. Από την ισότητα των σχέσεων 2.3.19 και 2.3.23, για $\omega t = \pi$, υπολογίζουμε την τιμή της σταθεράς A. $A = \frac{E_a}{R_a} e^{\frac{-\pi}{T_a}} + \frac{2V_m}{Z_a} \sin \varphi$ Σχέση 2.3.25

Επομένως $i_a(t') = \frac{E_a}{R_a} \left(e^{\frac{-(\pi+\omega t')}{\omega T_a}} - 1 \right) + \frac{2V_m}{Z_a} e^{\frac{-t'}{T_a}} \sin \varphi$ Σχέση 2.3.26.

Η γωνία X μηδενισμού του ρεύματος, βρίσκεται από τη σχέση 2.3.26, αν θέσουμε $i_a(\omega t' = X') = 0$ (όπου $X' = X - \pi$). Η προκύπτουσα εξίσωση, είναι υπερβατική και λύνεται με επαναληπτικές μεθόδους. Επίσης από τη σχέση 2.3.26 εάν θέσουμε $\omega t' = X' = \alpha$, η προκύπτουσα σχέση αποτελεί το κριτήριο για την ελάχιστη απαιτούμενη κρίσιμη τιμή της αυτεπαγωγής του τυλίγματος τυμπάνου, για την οποία κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, έχουμε συνεχή αγωγή. Θα πρέπει λοιπόν $\left[\frac{\sin \varphi \cos \varphi}{e^{\frac{\alpha}{\omega T_a}} - e^{\frac{-\pi}{\omega T_a}}} \right] \geq \frac{E_a}{2V_m}$ Σχέση 2.3.27

Η μέση τιμή της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου είναι

$$V_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v_a(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} v_a(\omega t) d\omega t + \int_{\pi}^X v_a(\omega t) d\omega t + \int_X^{\pi+\alpha} v_a(\omega t) d\omega t \right] =$$

$$\frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin(\omega t) d\omega t + \int_{\pi}^X 0 d\omega t + \int_X^{\pi+\alpha} V_m \sin(\omega t) d\omega t \right] \Rightarrow V_a = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos \alpha] +$$

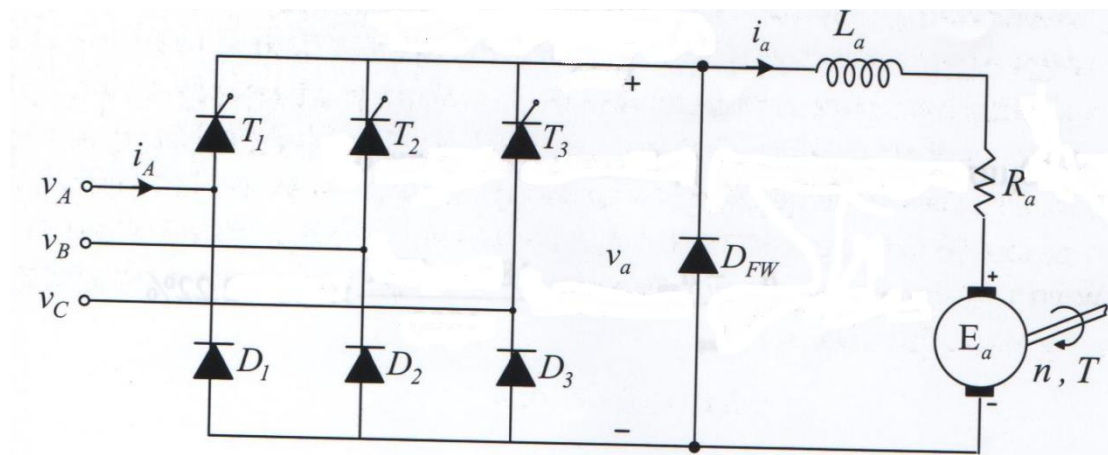
$$\frac{E_a}{\pi} (\pi + \alpha - X)$$

Σχέση 2.3.28.

Παρατηρούμε ότι, για ασυνεχή αγωγή η μέση τιμή της τάσης είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης μέσης τιμής για τη συνεχή αγωγή, κατά τον παράγοντα $\frac{E_a}{\pi} (\pi + \alpha - X)$. Για την μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου θα έχουμε αντίστοιχα

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{V_m}{\pi R_a} [1 + \cos \alpha] + \frac{E_a}{\pi R_a} [\pi + \alpha - X] \quad \text{Σχέση 2.3.29 [5]}$$

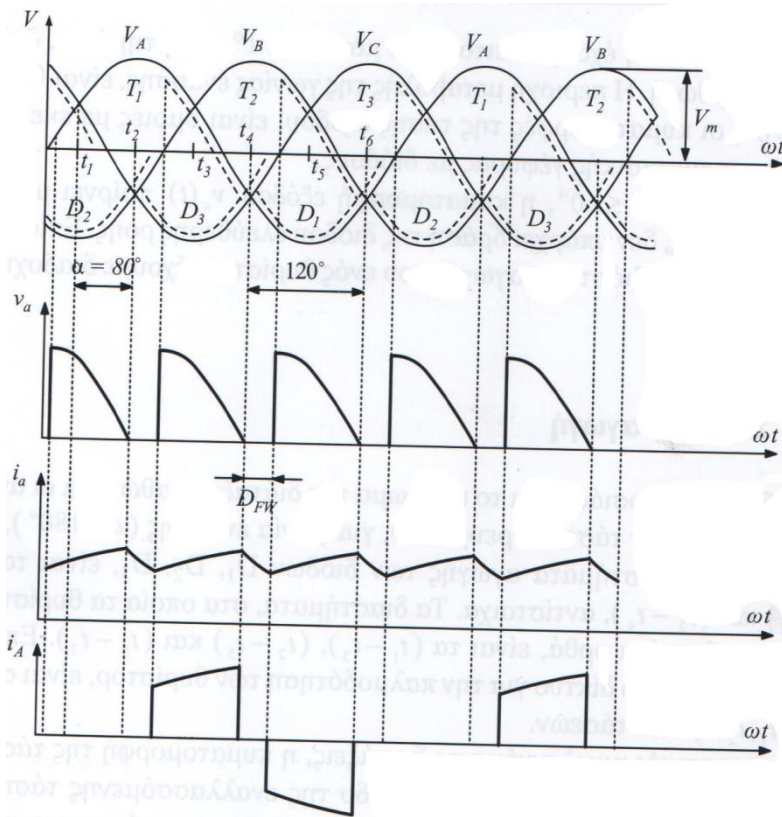
2.5 Τριφασική ημieleγχόμενη γέφυρα



Τριφασική ημieleγχόμενη γέφυρα [4]

Με τη διάταξη αυτή έχουμε λειτουργία μόνος στο 1^ο τεταρτημόριο, δηλαδή λειτουργία ανορθωτή. Η περιοχή μεταβολής της γωνίας έναυσης είναι $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. Για γωνίες, $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, η κυματομορφή εξόδου $v_a(t)$ παίρνει μόνο θετικές τιμές. Επομένως δεν υπάρχει δράση της διόδου ελευθέρως ροής, επίσης, στην εν λόγω περιοχή στο διάστημα αγωγής του ενός θυρίστορ, έχουμε διαδοχική αγωγή δύο διόδων. Για γωνία έναυσης $\alpha = 0^\circ$, οι κυματομορφές της τάσης εξόδου θα είναι όμοιες με εκείνες μιας μη ελεγχόμενης τριφασικής γέφυρας με διόδους.

2.5.1 Λειτουργία στη συνεχή αγωγή



κυματομορφές τάσεων ρευμάτων [4]

Από την εικόνα των κυματομορφών, οι οποίες είναι για γωνία έναυσης $\alpha = 80^\circ$, τα χρονικά διαστήματα αγωγής των διόδων D_1 , D_2 , D_3 , είναι τα $(t_4 - t_6)$, $(t_6 - t_8)$ και $(t_2 - t_4)$, αντίστοιχα. Τα διαστήματα, στα οποία τα θυρίστορ T_1 , T_2 , T_3 είναι πολωμένα ορθά, είναι τα $(t_1 - t_3)$, $(t_2 - t_5)$ και $(t_5 - t_7)$. Επομένως, ο συγχρονισμός με το δίκτυο για την παλμοδότηση των θυρίστορ, είναι στα σημεία τομής t_1 , t_2 , t_3 των τάσεων. Στις τριφασικές ημieleγχόμενες διατάξεις, η κυματομορφή της τάσης εξόδου περιλαμβάνει τρεις παλμούς ανά περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου (ανά 120°). Επομένως οι διαθέσιμοι χρόνοι για την εκφόρτιση του ρεύματος είναι μικρότεροι των μονοφασικών διατάξεων, με αποτέλεσμα η αγωγή του ρεύματος να είναι ως επί το πλείστον συνεχής.

Στο διάστημα $(\frac{\pi}{6} + \alpha) \leq \omega t \leq \omega t_4$, έχουμε αγωγή των T_1 και D_3 . Επομένως ο άνω ακροδέκτης του τυλίγματος τυμπάνου συνδέεται με τη φασική τάση v_A , ενώ ο κάτω ακροδέκτης με τη φασική τάση v_C . Η τάση ακροδεκτών του τυλίγματος τυμπάνου λοιπόν, στο διάστημα αυτό είναι $v_a(t) = v_A(t) - v_C(t) = v_{AC}(t)$ Σχέση 2.4.1

Τη χρονική στιγμή t_4 , είναι $v_A(t) = v_C(t)$ και $v_a(t) = 0$, για $t > t_4$, η τάση $v_a(t)$ τείνει να γίνει αρνητική. Επομένως, η διάδος ελευθέρως ροής πολώνεται ορθά, το T_1 διακόπτεται και, το ρεύμα τυμπάνου ρέει πλέον μέσω αυτής, μέχρι την χρονική στιγμή της παλμοδότησης του T_2 . Στη περίπτωση απουσίας της διόδου, η εκφόρτιση του πηνίου θα γινόταν μέσω των στοιχείων T_1 , D_1 . Για μεγάλες τιμές της γωνίας έναυσης, το ρεύμα του κινητήρα μπορεί να είναι συνεχές ή όχι, ανάλογα της ζήτησης σε ρεύμα και ταχύτητα. Εάν δηλαδή η ζήτηση σε

ρεύμα είναι μικρή και η ταχύτητα του κινητήρα είναι υψηλή, είναι πιθανόν να έχουμε διακοπόμενη λειτουργία. Έστω ότι οι φασικές τάσεις στην είσοδο της διάταξης είναι $v_A(t) = \sqrt{2}V \sin \omega t$, $v_B(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120)$, $v_C(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + 120)$ Σχέση 2.4.2

Για συνεχή αγωγή, η μέση τιμή της $v_a(t)$ είναι $V_a = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} v_a(t) dt = \frac{3}{T} \int_0^{T'} v_a(t) dt = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6} + \alpha + 120} (v_A(t) - v_C(t)) d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 + \cos \alpha)$

Σχέση 2.4.3 όπου $V_{L,rms}$ η ενεργός τιμή της πολικής τάσης.

Για να υπολογίσουμε τη χρονική μεταβολή του ρεύματος, θα πρέπει να διακρίνουμε τις εξής περιοχές λειτουργίας, $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ και $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Για το διάστημα $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$:

Στο διάστημα αγωγής των 120° αγωγής του ενός θυρίστορ, έχουμε τη διαδοχική αγωγή δύο διόδων. Τα επιμέρους διαστήματα αγωγής των διόδων (κατά τη διάρκεια αγωγής ενός συγκεκριμένου θυρίστορ) είναι ίσα (60° έκαστο), μόνο στην περίπτωση που $\alpha = 0^\circ$. Σε όλες τις άλλες περιοχές λειτουργίας, τα διαστήματα αγωγής της πρώτης περιόδου είναι μικρότερα. Ενδεικτικά για $\alpha + 30^\circ \leq \omega t \leq 90^\circ$, έχουμε αγωγή των T1 και D2. Επομένως $v_a(t) = v_A(t) - v_B(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a$ Σχέση 2.4.4. Στο διάστημα αγωγής του T1, $90^\circ \leq \omega t \leq 30^\circ + \alpha + 120^\circ$, έχουμε ταυτόχρονη αγωγή των T1 και D3, οπότε $v_a(t) = v_A(t) - v_C(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a$ Σχέση 2.4.5 όπου $v_A(t) - v_B(t) = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30)$ Σχέση 2.4.6 και $v_A(t) - v_C(t) = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t - 30)$ Σχέση 2.4.7

Οι γενικές λύσεις των παραπάνω Δ.Ε., θα είναι αντίστοιχα $i_{a1}(t) = -\frac{E_a}{R_a} + \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \sin(\omega t + 30 - \varphi) + A_1 e^{\frac{-t}{T_a}}$ Σχέση 2.4.8
 $i_{a2}(t) = -\frac{E_a}{R_a} + \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \sin(\omega t - 30 - \varphi) + A_2 e^{\frac{-t}{T_a}}$ Σχέση 2.4.9. Οι σταθερές ολοκλήρωσης A_1 και A_2 υπολογίζονται από τις εξής οριακές συνθήκες:

Για $\omega t = 90^\circ$ $i_{a1} = i_{a2} = I_{min}$ Σχέση 2.4.10 επομένως $\frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \sin(120 - \varphi) + A_1 e^{\frac{-90}{\omega T_a}} = \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} \sin(90 - \varphi) + A_2 e^{\frac{-90}{\omega T_a}}$ Σχέση 2.4.11

Για συνεχή αγωγή ισχύει $i_{a1}(\omega t = 30 + \alpha) = i_{a2}(\omega t = 150 + \alpha)$ Σχέση 2.4.12 και

$$A_1 e^{\frac{-(30+\alpha)}{\omega T_a}} \left[A_1 - A_2 e^{\frac{-120}{\omega T_a}} \right] = \frac{\sqrt{3}V_m}{Z_a} [\sin(120 + \alpha - \varphi) - \sin(60 + \alpha - \varphi)]$$
 Σχέση 2.4.13.

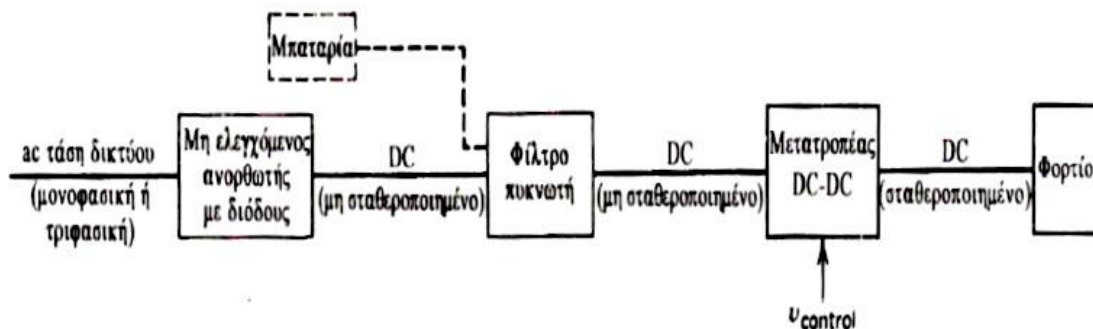
Επομένως, στην περιοχή λειτουργίας $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, οι σταθερές A_1 και A_2 είναι συναρτήσεις της γωνίας έναυσης

Για το διάστημα $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, υπάρχουν διαστήματα που η τάση ακροδεκτών $v_a(t)$ τείνει να γίνει αρνητική. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε τη λειτουργία της διόδου ελεύθερης ροής. Αν η γέφυρα δεν διαθέτει δίοδο ελεύθερης ροής, στα διαστήματα που η τάση ακροδεκτών τείνει να γίνει αρνητική, έχουμε ταυτόχρονη αγωγή των σε σειρά στοιχείων ενός συγκεκριμένου κλάδου κάθε φορά, προσφέροντας το μονοπάτι για τη δίοδο του ρεύματος. [5]

2.5.2 Λειτουργία στην ασυνεχή αγωγή

Για την ασυνεχή λειτουργία της τριφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας ισχύει ότι και στην τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (ή γέφυρα έξι παλμών). [5]

2.6 Μετατροπείς DC-DC (Ψαλιδιστές – Chopper)

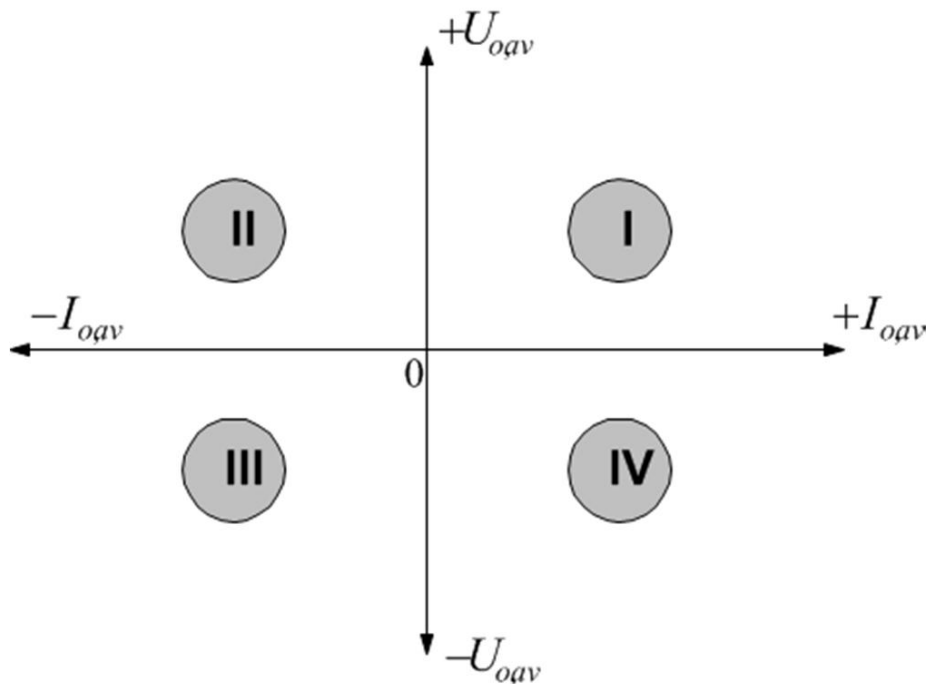


Σύστημα μετατροπέα DC-DC [7]

Οι μετατροπείς DC-DC χρησιμοποιούνται ευρέως σε σταθεροποιημένες DC τροφοδοσίες και σε εφαρμογές DC κινητήριων συστημάτων. Όπως ενδεικτικά φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, συχνά η είσοδος των μετατροπέων αυτών είναι μία μη σταθεροποιημένη DC τάση, η οποία λαμβάνεται με ανόρθωση της τάσης του δικτύου. Λόγω της μεταβολής του πλάτους της τάσης του δικτύου, η DC τάση αυξομειώνεται. Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της μη σταθεροποιημένης DC εισόδου σε μια ελεγχόμενη DC εξόδου. Οι ψαλιδιστές μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι το ισοδύναμο του μετασχηματιστή στο συνεχές ρεύμα, αλλά με διαρκώς μεταβαλλόμενο λόγο μετασχηματισμού, εφόσον μία συνεχής τάση στην είσοδο τους μετατρέπεται στην έξοδο, σε συνεχή τάση διαφορετικής τιμής, παρέχοντας επιπλέον την δυνατότητα της αναλογικής μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού σε ευρεία όρια. Τα πλεονεκτήματα των μετατροπέων DC-DC έναντι άλλων τεχνικών ελέγχου της συνεχούς τάσης είναι: α) το σχετικά χαμηλό κόστος τους, β) ο υψηλός βαθμός απόδοσης τους και γ) η γρήγορη δυναμική τους απόκριση. Οι ψαλιδιστές κατασκευάζονται, για ισχύες μεταξύ 10 και εκατομμυρίων watt. Η συχνότητα μεταγωγής, συνήθως είναι μεταξύ 100Hz και 1kHz, αλλά κατασκευάζονται και ψαλιδιστές για 10kHz ή και παραπάνω. [6] [7]

Η ταξινόμηση των ψαλιδιστών μπορεί να γίνει με αρκετά κριτήρια. Ανάλογα με την σχέση τάσης εξόδου και τάσης εισόδου διαχωρίζονται σε: 1) ψαλιδιστές υποβιβασμού ή εν σειρά ψαλιδιστές (step – down dc/dc converters ή Buck dc/dc converters) όπου η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή το πολύ ίση, της τάσης εισόδου, 2) ψαλιδιστές ανύψωσης ή εν παραλλήλω

ψαλιδιστές (step – up dc/dc converters ή Boost converters) όπου η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή το λιγότερο ίση, της τάσης εισόδου και 3) ψαλιδιστές υποβιβασμού-ανύψωσης ή εν σειρά-εν παραλλήλω ψαλιδιστές (step – down-up dc/dc converters ή Buck-Boost converters) όπου η τάση εξόδου μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Άλλο κριτήριο για την ταξινόμηση τους είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας όπου διακρίνονται σε : 1) ψαλιδιστές με απευθείας σύνδεση, όπου δεν υπάρχει στοιχείο σύνδεσης της ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου και 2) ψαλιδιστές με έμμεση σύνδεση (ή με αποθήκευση), όταν υπάρχει στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου. Τέλος μπορούμε να τους διαχωρίσουμε ανάλογα με τα τεταρτημόρια ($U_{o,av}$, $I_{o,av}$) λειτουργίας τους σε : 1) ψαλιδιστές για ένα τεταρτημόριο 2) ψαλιδιστές για δύο τεταρτημόρια και 3) ψαλιδιστές για τέσσερα τεταρτημόρια.



Τεταρτημόρια λειτουργίας [5]

Χρησιμοποιώντας το κριτήριο των τεταρτημορίων λειτουργίας και έχοντας ως φορτίο μια μηχανή Σ.Ρ. , μπορούμε να διαχωρίσουμε τους μετατροπείς DC-DC σε πέντε κατηγορίες. Στον μετατροπέα κλάσης A (I), η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας στο 1^ο τεταρτημόριο. Ο μετατροπέας κλάσης B (II) , μας παρέχει την δυνατότητα αναγεννητικής πέδησης, μετά τη μετάβαση της μηχανής από το πρώτο στο δεύτερο τεταρτημόριο, όπου με την αναστροφή του ρεύματος τυμπάνου, ένα μέρος της κινητικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών επιστρέφει στο δίκτυο. Ο μετατροπέας κλάσης C (I , II) λειτουργεί στα δύο πρώτα τεταρτημόρια , συνδυάζοντας την λειτουργία των δύο προηγούμενων μετατροπέων A και B. Ο μετατροπέας κλάσης D (I , IV) λειτουργεί στο 1^ο και 4^ο τεταρτημόριο λειτουργίας και τέλος ο μετατροπέας κλάσης E (I , II , III , IV) λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Οι ελεγχόμενοι ηλεκτρονικοί διακόπτες που παρεμβάλλονται μεταξύ πηγής και φορτίου, μπορεί να είναι τρανζίστορ ισχύος , θυρίστορ ή GTO. Η χρήση των τρανζίστορ (MOSFET ισχύος ,

IGBT) και των GTO προσφέρεται περισσότερο, διότι αποφεύγονται τα κυκλώματα εξαναγκασμένης μεταγωγής που απαιτεί η χρήση των θυρίστορ. [5]

Στους ψαλιδιστές η μέση τάση εξόδου πρέπει να ελέγχεται, ώστε να είναι σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο μπορούν να αυξομειώνονται. Οι μετατροπείς DC-DC διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της συνεχούς τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Σε ένα DC-DC μετατροπέα με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης (t_{on} και t_{off}) των διακοπών.

Μία από τις μεθόδους ελέγχου της μέσης τάσης εξόδου χρησιμοποιεί σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης $T = t_{on} + t_{off}$) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Σε αυτή τη μέθοδο, που ονομάζεται μετάβαση με διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation, PWM), μεταβάλλεται η σχετική διάρκεια αγωγής (βαθμός χρησιμοποίησης) duty cycle, $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$, που ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας που ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης. Η άλλη μέθοδος ελέγχου είναι γενικότερη. Σύμφωνα με αυτή μεταβάλλονται τόσο η συχνότητα μετάβασης και η περίοδος, όσο και η διάρκεια που ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε μετατροπείς DC-DC που χρησιμοποιούν θυρίστορ με εξαναγκασμένη μετάβαση. Οι μεταβολές της συχνότητας μετάβασης καθιστούν δύσκολο το φιλτράρισμα της κυμάτωσης των κυματομορφών της εισόδου και της εξόδου.

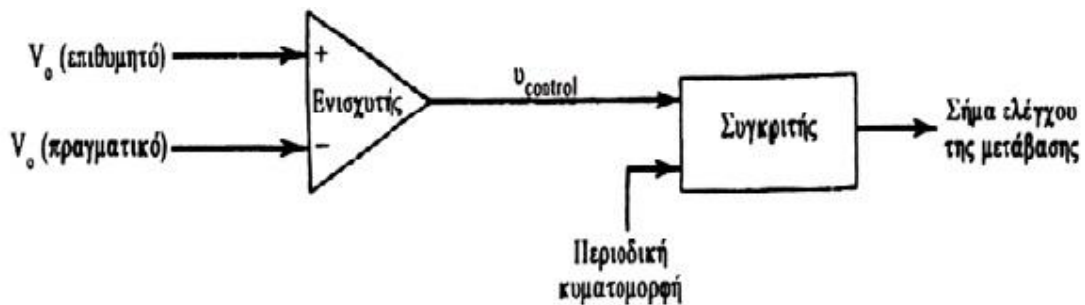
Συνοψίζοντας η μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Με σταθερή συχνότητα και μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής t_{on} (PWM)
- Με σταθερό t_{on} ή t_{off} και μεταβάλλοντας την περίοδο T του παλμού (frequency modulation)

Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Για τη μεταβολή της τάσης, η συχνότητα πρέπει να μεταβάλλεται σε αρκετά μεγάλη κλίμακα, γεγονός που δυσκολεύει την σχεδίαση των απαιτούμενων φίλτρων. Επίσης στις υψηλές συχνότητες, παρουσιάζεται έντονη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση. Τα μεγάλα διαστήματα μη αγωγής (t_{off}) σε χαμηλές τάσεις, δημιουργούν στις περιπτώσεις τροφοδοσίας κινητήρων την ασυνέχεια του ρεύματος τυμπάνου, πράγμα το οποίο είναι ανεπιθύμητο.

Στη διαμόρφωση με PWM με σταθερή συχνότητα μετάβασης, το σήμα ελέγχου του διακόπτη, το οποίο ελέγχει την κατάσταση του (κλειστός ή ανοιχτός), παράγεται με τη σύγκριση του επιπέδου τάσης του σήματος ελέγχου $V_{control}$ με μια περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους. Γενικά, το σήμα της τάσης ελέγχου λαμβάνεται ενισχύοντας το σφάλμα ή τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης εξόδου και της επιθυμητής της τιμής. Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής (συνήθως είναι πριονωτή), καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης. Στον έλεγχο με PWM η συχνότητα αυτή διατηρείται σταθερή και επιλέγεται σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος, που μεταβάλλεται πολύ αργά με τον χρόνο σε σχέση με τη συχνότητα μετάβασης, είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του

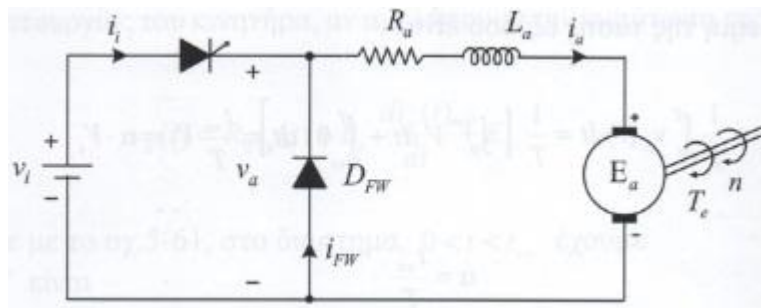
διακόπτη γίνεται high, προκαλώντας το κλείσιμο του διακόπτη. Διαφορετικά, ο διακόπτης είναι ανοιχτός. [7]



Λειτουργικό διάγραμμα μεθόδου PWM [7]

2.6.1 Μετατροπέας κλάσης A

Όπως προαναφέραμε, ο μετατροπέας κλάσης A, είναι μετατροπέας ενός τεταρτημορίου. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι, η μέση τιμή της τάσης εξόδου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου (step-down converter).

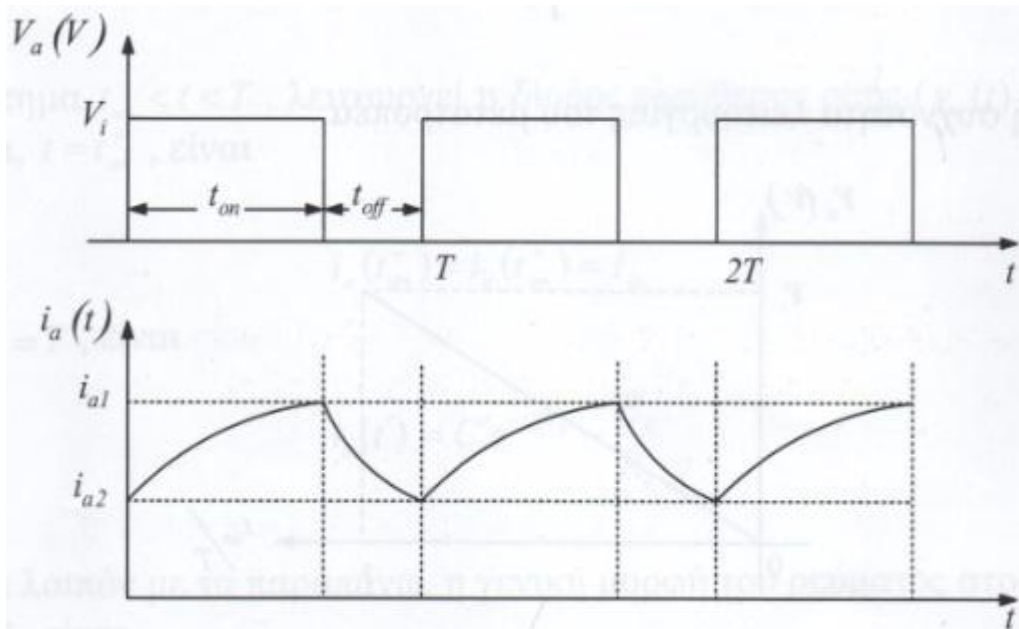


Μετατροπέας κλάσης A με φορτίο κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. [4]

Στα διαστήματα παλμοδότησης του θυρίστορ, η τάση εισόδου του μετατροπέα εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου. Στα διαστήματα μη αγωγής του θυρίστορ, λόγω της συσσωρευμένης ενέργειας στην αυτεπαγωγή, το τύλιγμα τυμπάνου βραχυκυκλώνεται μέσω της διόδου ελεύθερης ροής. Ανάλογα δε με τις συνθήκες φόρτισης του κινητήρα και την τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης, η αγωγή του ρεύματος τυμπάνου μπορεί να είναι συνεχής ή ασυνεχής. Η συνεχής αγωγή είναι γενικά επιδιωκόμενη (εφόσον είναι πρακτικά και οικονομικά εφικτό), διότι βελτιώνει την δυναμική απόκριση του συστήματος.

2.6.1.1 Λειτουργία στη συνεχή αγωγή

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου καθώς επίσης και του ρεύματος του μετατροπέα στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής.



Κυματομορφές τάσης-ρεύματος. Συνεχής αγωγή [4]

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι :

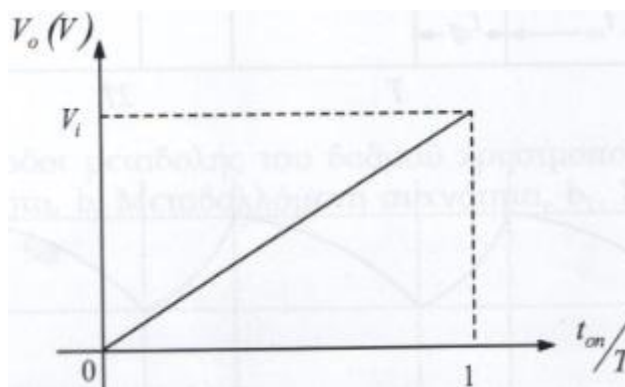
$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} V_i dt + \int_{t_{on}}^T 0 dt \right] = \frac{t_{on}}{T} V_i = \alpha V_i \text{ Σχέση 2.5.1}$$

Όπου $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$ Σχέση 2.5.2 ο βαθμός χρησιμοποίησης του μετατροπέα.

Αντίστοιχα , για την ενεργό τιμή της τάσης έχουμε :

$$V_{a,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_a^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_i^2 dt} = \sqrt{\frac{t_{on}}{T}} V_i \text{ Σχέση 2.5.3}$$

Μεταβάλλοντας , λοιπόν το βαθμό χρησιμοποίησης , σύμφωνα με την Σχέση 2.5.3 επιτυγχάνουμε γραμμική μεταβολή της μέσης τιμής της τάσης εξόδου , από το μηδέν έως και την τιμή V_i της τάσης εισόδου , όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Χαρακτηριστική $V_a=f(\alpha)$ [4]

Από την ανάλυση σε σειρά Fourier, η αναλυτική έκφραση της τάσης εξόδου του μετατροπέα, στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής είναι :

$$v_a(t) = \alpha V_i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_i}{n\pi} [\sin 2n\pi\alpha \cos n\omega t + (1 - \cos 2n\pi\alpha) \sin n\omega t] \quad \text{Σχέση 2.5.4} \quad \text{όπου}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{Σχέση 2.5.5} \quad \text{η γωνιακή συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα.}$$

Η Δ.Ε. λειτουργίας του κινητήρα, αν αμελήσουμε την κυμάτωση της Α.Η.Ε.Δ., είναι $v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a$ Σχέση 2.5.6. Σύμφωνα δε με την εικόνα παραπάνω, των κυματομορφών τάσης-ρεύματος στη συνεχή αγωγή, στο διάστημα $0 < t < t_{on}$, έχουμε:

Για $t = 0^+$ είναι $v_a = V_i$ και $i_a = I_{a2}$ Σχέση 2.5.7. Εφαρμόζοντας αυτές τις αρχικές συνθήκες (σχέση 2.5.7) η γενική λύση της σχέσης 2.5.6 παίρνει την μορφή

$$i_a(t) = I_{a2} e^{-\frac{t}{T_a}} + \left(\frac{V_i - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right) \quad \text{Σχέση 2.5.8} \quad \text{όπου } T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad \text{Σχέση 2.5.9} \quad \text{η σταθερά χρόνου του τυλίγματος τυμπάνου.}$$

Για $t = t_{on}^-$ είναι $i_a = I_{a1}$. Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην σχέση 2.5.8, έχουμε :

$$i_a(t = t_{on}^-) = I_{a1} = I_{a2} e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} + \left(\frac{V_i - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} \right) \quad \text{Σχέση 2.5.10}$$

Στο διάστημα, $t_{on} < t < T$, λειτουργεί η δίοδος ελεύθερης ροής ($v_a(t) = 0$). Επομένως για $t = t_{on}^+$, είναι : $i_a(t_{on}^-) = i_a(t_{on}^+) = I_{a1}$ Σχέση 2.5.11 και για $t = T$, είναι $i_a(t') = C' e^{-\frac{t'}{T_a}} - \frac{E_a}{R_a}$ Σχέση 2.5.12.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η γενική μορφή του ρεύματος στο διάστημα $t_{on} < t < T$, είναι $i_a(t') = C' e^{-\frac{t'}{T_a}} - \frac{E_a}{R_a}$ (σχέση 2.5.12) όπου $t' = t - t_{on}$ Σχέση 2.5.13. Στο διάστημα αυτό οι οριακές συνθήκες είναι :

$$\text{Για } t' = 0^+, i_a(t_{on}^-) = i_a(t_{on}^+) = I_{a1}$$

$$\text{Για } t' = t_{off}, i_a(T) = i_a(0) = I_{a2} \quad \text{Σχέση 2.5.14}$$

$$\text{Επομένως} \quad , i_a(t') = I_{a1} e^{-\frac{t'}{T_a}} - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t'}{T_a}} \right) \quad \text{Σχέση 2.5.15} \quad \text{και}$$

$$i_a(t' = t_{off}) = I_{a2} = I_{a1} e^{-\frac{-(T-t_{on})}{T_a}} - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{-(T-t_{on})}{T_a}} \right) \quad \text{Σχέση 2.5.16} .$$

Οι τιμές των I_{a2}, I_{a1} , μπορούν τώρα να υπολογιστούν από την επίλυση του συστήματος των σχέσεων 2.5.11 και 2.5.15. Επομένως

$$I_{a1} = \frac{V_i}{R_a} \left[\frac{1 - e^{-\frac{T-t_{on}}{T_a}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_a}}} \right] - \frac{E_a}{R_a} \text{ Σχέση 5.17 και } I_{a2} = \frac{V_i}{R_a} \left[\frac{e^{\frac{t_{on}}{T_a}} - 1}{e^{\frac{T}{T_a}} - 1} \right] - \frac{E_a}{R_a} \text{ Σχέση 2.5.18}$$

Για $\alpha=1$ δηλαδή $t_{on} = T$, έχουμε $I_{a1} = I_{a2} = \frac{V_i - E_a}{R_a}$ Σχέση 2.5.19.

Έχοντας λοιπόν υπολογίσει τις οριακές τιμές (I_{a2} και I_{a1}) του ρεύματος τυμπάνου, μπορούμε μέσω των σχέσεων 2.5.8 και 2.5.15, να υπολογίσουμε το ρεύμα σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της περιόδου λειτουργίας. [1]

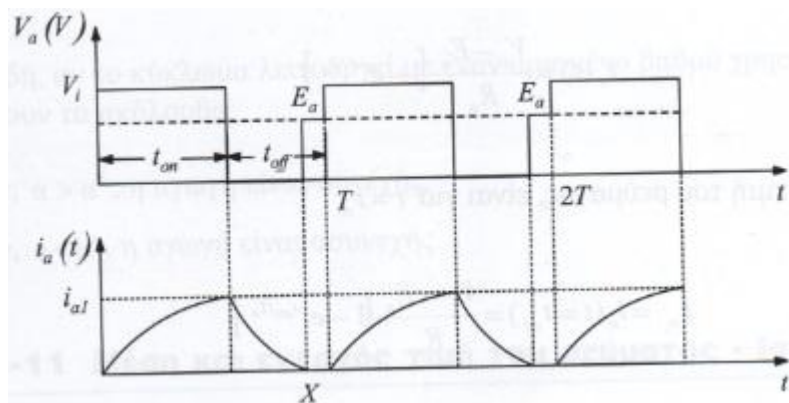
2.6.1.2 Λειτουργία στην Ασυνεχή αγωγή

Η αναλυτική έκφραση της τάσης εξόδου στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής, είναι $V_a(t) =$

$$aV_i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_i}{n\pi} [\sin 2n\pi\alpha \cos n\omega t + (1 - \cos 2n\pi\alpha) \sin n\omega t] - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_a}{n\pi} [\sin n\Omega X \cos n\omega t + (1 - \cos n\omega X) \sin n\omega t]$$

Σχέση 2.5.20.

Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε τις κυματομορφές τάσης- ρεύματος στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής



Κυματομορφές τάσης-ρεύματος. Ασυνεχής αγωγή [1]

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από την παραπάνω εικόνα, η μέση και η ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου είναι :

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_{on}} V_i dt + \int_{t_{on}}^X 0 dt + \int_X^T E_a dt \right] = \frac{1}{T} [t_{on} V_i + (T - X) E_a] = aV_i + \left(1 - \frac{X}{T}\right) E_a$$

Σχέση 2.5.21

$$V_{a,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_a^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_i^2 dt + \int_X^T E_a^2 dt} = \sqrt{aV_i^2 + \left(1 - \frac{X}{T}\right) E_a^2} \text{ Σχέση 2.5.22}$$

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος τυμπάνου στην περίπτωση αυτή, είναι εν γένει διαφορετική από την αντίστοιχη μέγιστη τιμή της συνεχούς αγωγής. Προφανώς, η ελάχιστη τιμή του ρεύματος για την ασυνεχή αγωγή είναι μηδέν.

Για, $0 < t < t_{on}$, ισχύουν οι σχέσεις 2.5.4 και 2.5.6. Θέτοντας, $i_a(0^+) = I_{a2} = 0$ από την σχέση 2.5.8, προκύπτει $i_a(t) = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right]$ Σχέση 2.5.23

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος, είναι για $t = t_{on}$

$$I_{a1} = i_a(t = t_{on}) = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left[1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} \right] \text{ Σχέση 2.5.24 }$$

Στο διάστημα $t_{on} < t < X$, της μη αγωγής του θυρίστορ, η μαγνητική ενέργεια της αυτεπαγωγής εκφορτίζεται μέσω της διόδου ελεύθερης ροής. Μέρος της ενέργειας αυτής, καταναλίσκεται ως θερμότητα στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου R_a και το υπόλοιπο ως μηχανική ισχύς στον άξονα της μηχανής. Σε όλο το διάστημα αυτό, η τάση ακροδεκτών παραμένει μηδενική. Η χρονική μεταβολή του ρεύματος προκύπτει από την σχέση 2.5.14, όπου η τιμή του μέγιστου ρεύματος δίνεται από την σχέση 2.5.24.

Δηλαδή $i_a(t') = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left[1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} \right] e^{-\frac{t'}{T}} - \frac{E_a}{R_a} \left[1 - e^{-\frac{t'}{T_a}} \right]$ Σχέση 2.5.25 όπου $t' = t - t_{on}$ και $t_{on} < t < X$.

Έστω ότι, για $t = X$, έχουμε μηδενισμό του ρεύματος. Αντικαθιστώντας στην σχέση 2.5.24 όπου $t' = X - t_{on}$ και θέτοντας όπου $i_a = 0$, υπολογίζουμε το χρόνο X ως εξής :

$$X = T_a \ln \left[e^{\frac{t_{on}}{T_a}} \left[1 + \frac{V_i - E_a}{E_a} \left[1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} \right] \right] \right] \text{ Σχέση 2.5.26 .}$$

Τα όρια μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής, σε συνάρτηση του βαθμού χρησιμοποίησης, βρίσκονται από τη σχέση 2.5.18, αν θέσουμε $I_{a2} = 0$, ή από την σχέση 2.5.26 αν θέσουμε όπου $X = T$. Επομένως

$$\frac{E_a}{V_i} = \frac{\left[e^{\frac{t'_{on}}{T_a}} - 1 \right]}{\left[e^{\frac{T}{T_a}} - 1 \right]} \Rightarrow e^{\frac{a'T}{T_a}} = 1 + \frac{E_a}{V_i} \left[e^{\frac{T}{T_a}} - 1 \right] \text{ Σχέση 2.5.27 , } \quad \text{όπου}$$

$$a' = \frac{t'_{on}}{T} = \frac{T_a}{T} \ln \left[1 + \frac{E_a}{V_i} \left[e^{\frac{T}{T_a}} - 1 \right] \right] \text{ Σχέση 2.5.28 .}$$

Δηλαδή αν το κύκλωμα λειτουργεί με έναν ορισμένο βαθμό χρησιμοποίησης a' , ισχύουν τα ακόλουθα :

Εάν, $a > a'$, η αγωγή είναι συνεχής.

Εάν, $\alpha < \alpha'$, η αγωγή είναι ασυνεχής.

Ανεξάρτητα από το είδος της αγωγής, η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου δίνεται από τη σχέση $I_\alpha = \frac{V_a - E_a}{R_a}$ Σχέση 2.5.29

Για συνεχή αγωγή $I_\alpha = \frac{\alpha V_i - E_a}{R_a}$ Σχέση 2.5.30

και για ασυνεχή αγωγή $I_\alpha = \frac{1}{R_a} \left[\alpha V_i - \frac{\alpha}{T} E_a \right]$ Σχέση 2.5.31.

Η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου, στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής είναι

$$I_i = \alpha \frac{V_i - E_a}{R_a} - \frac{T_a}{T} \frac{V_i}{R_a} \left[1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} \right] \frac{\left[\frac{T}{e^{T_a} - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}}} \right]}{\left[\frac{T}{e^{T_a} - 1} \right]} \quad \text{Σχέση 2.5.32.}$$

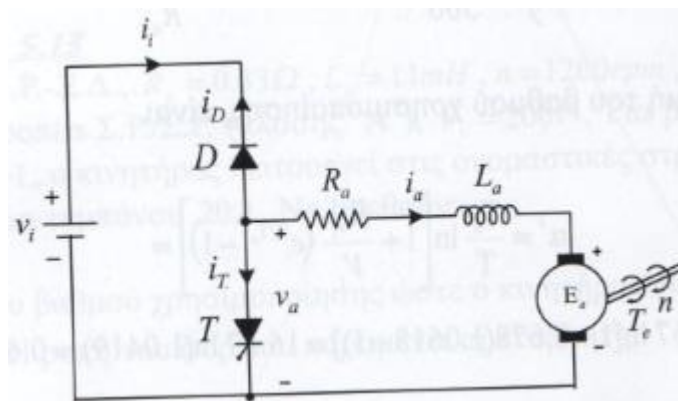
Εντελώς ανάλογα, για ασυνεχή λειτουργία ισχύει $I_i = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left[\alpha - \frac{T_a}{T} \left[1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} \right] \right]$ Σχέση 2.5.33. [1]

2.6.2 Μετατροπέας κλάσης B

Μέσω του μετατροπέα κλάσης B, επιτυγχάνεται η ανύψωση της τάσης στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου πέραν της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα την αντιστροφή της φοράς του ρεύματος τυμπάνου και κατά συνέπεια και του ρεύματος εισόδου (step-up converter).

Στο διάστημα της αντιστροφής του ρεύματος τυμπάνου, έχουμε λειτουργία αναγεννητικής πέδησης (λειτουργία στο δεύτερο τεταρτημόριο) και επιστροφή μέρους της κινητικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών στο δίκτυο.

Το κύκλωμα ισχύος του εν λόγω μετατροπέα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, προκύπτει από την αντιμετάθεση των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα κλάσης A μέσω κατάλληλου αυτοματισμού. Το κύκλωμα ελέγχου παραμένει ως έχει.

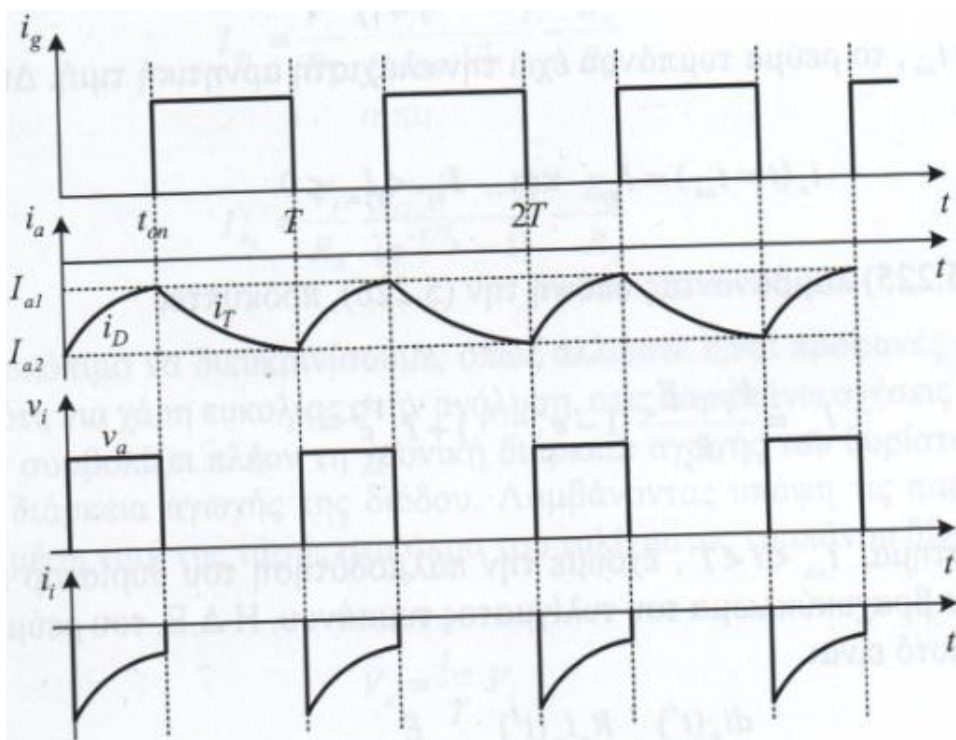


Μετατροπέας κλάσης B με φορτίο κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Λ. [4]

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα , στα διαστήματα της παλμοδότησης του θυρίστορ, έχουμε βραχυκύκλωμα του τυλίγματος τυμπάνου και συσσώρευση μαγνητικής ενέργειας στην αυτεπαγωγή. Στα διαστήματα της μη παλμοδότησης, λόγω της αυτεπαγωγής έχουμε ανύψωση της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου πέραν της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα την ορθή πόλωση της διόδου και την επιστροφή της ενέργειας στο δίκτυο. Σύμφωνα δε με τις φορές των ρευμάτων της παραπάνω εικόνας, οι τιμές τους θα είναι πάντα αρνητικές. Ανάλογα δε με τις συνθήκες φόρτισης και την τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης , η αγωγή του ρεύματος τυμπάνου μπορεί να είναι συνεχής ή ασυνεχής.

2.6.2.1 Λειτουργία στην συνεχή αγωγή

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι κυματομορφές τάσης-ρεύματος του μετατροπέα κλάσης B, για συνεχή αγωγή.



Κυματομορφές τάσης-ρεύματος, μετατροπέας κλάσης B. Συνεχής αγωγή [4]

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα , τη χρονική στιγμή, $t = 0$, της διακοπής της αγωγής του θυρίστορ, το ρεύμα τυμπάνου έχει τη μέγιστη αρνητική τιμή. Δηλαδή $i_a(t = 0) = I_{a2}$ Σχέση 2.5.34. Στο διάστημα, $0 < t < t_{on}$, η διάδος είναι ορθά πολωμένη και $v_a(t) = V_i$. Η Δ.Ε. του ρεύματος στο διάστημα αυτό είναι

$\frac{di_a(t)}{dt} + \frac{R_a i_a(t)}{L_a} = \frac{V_i - E_a}{L_a}$ Σχέση 2.5.35. Από την επίλυση της σχέσης 2.5.35 λαμβάνοντας υπόψη την σχέση 2.5.34, έχουμε $i_a(t) = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}}\right) + I_{a2} e^{-\frac{t}{T_a}}$ Σχέση 2.5.36 όπου $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ η σταθερά χρόνου του τυλίγματος τυμπάνου.

Για , $t = t_{on}$, το ρεύμα τυμπάνου έχει την ελάχιστη αρνητική τιμή. Δηλαδή $i_a(t = t_{on}) = I_{a1}$ και $I_{a2} < I_{a1} < 0$ Σχέση 2.5.37 . Από την σχέση 2.5.36 λαμβάνοντας υπόψη την σχέση 2.5.37, προκύπτει $I_{a1} = \frac{V_i - E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}}\right) + I_{a2} e^{-\frac{t_{on}}{T_a}}$ Σχέση 2.5.38.

Στο διάστημα , $t_{on} < t < T$, έχουμε την παλμοδότηση του θυρίστορ και κατά συνέπεια το βραχυκύκλωμα του τυλίγματος τυμπάνου. Η Δ.Ε. του ρεύματος στο διάστημα αυτό είναι : $\frac{di_a(t')}{dt'} + \frac{R_a i_a(t')}{L_a} = -\frac{E_a}{L_a}$ Σχέση 2.5.39 , όπου $t' = t - t_{on}$ Σχέση 2.5.40.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι, τη χρονική στιγμή, $t' = 0$ ή $t = t_{on}$ το ρεύμα τυμπάνου έχει την τιμή, $i_a = I_{a1}$, από την επίλυση της σχέσης 2.5.39 προκύπτει

$$i_a(t') = -\frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t'}{T_a}}\right) + I_{a1} e^{-\frac{t'}{T_a}}$$
 Σχέση 2.5.41.

Στο τέλος του κύκλου λειτουργίας , δηλαδή τη χρονική στιγμή, $t' = T$ ή $t' = T - t_{on}$ το ρεύμα τυμπάνου έχει τη μέγιστη αρνητική τιμή του , $i_a = I_{a2}$. Επομένως από την σχέση 2.5.41 προκύπτει $I_{a2} = -\frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{(T-t_{on})}{T_a}}\right) + I_{a1} e^{-\frac{(T-t_{on})}{T_a}}$ Σχέση 2.5.42.

Οι σχέσεις 2.5.38 και 2.5.39, είναι απόλυτα όμοιες με τις αντίστοιχες σχέσεις 2.5.10 και 2.5.16 του μετατροπέα κλάσης Α. Από την επίλυση προκύπτουν οι οριακές τιμές του ρεύματος τυμπάνου, οι οποίες στην περίπτωση του μετατροπέα κλάσης Β έχουν αρνητικές τιμές.

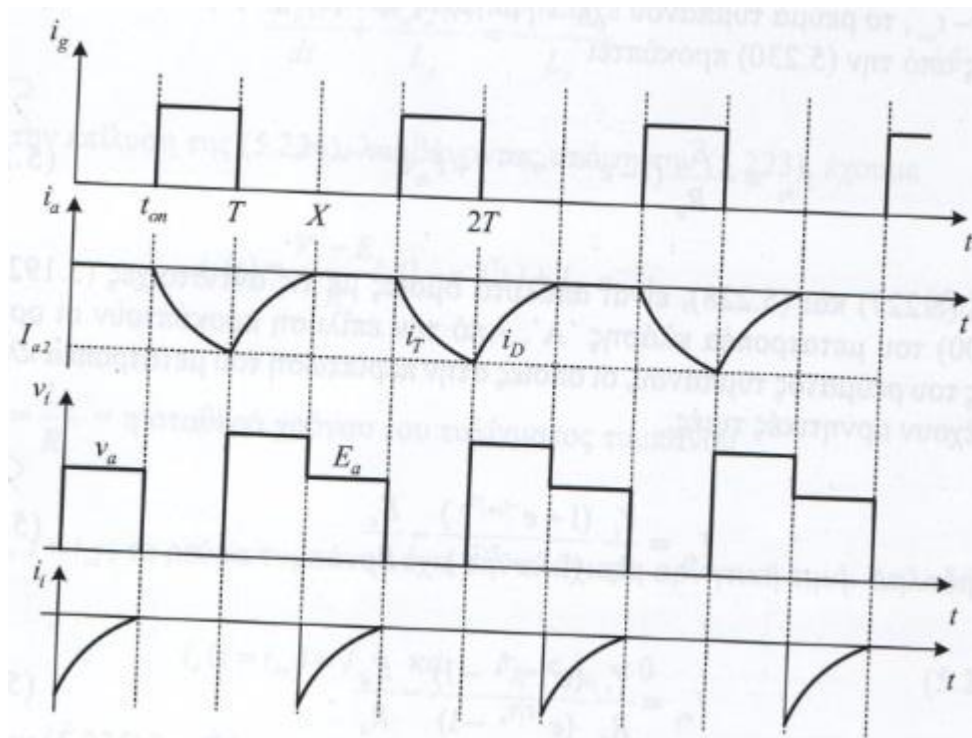
$$I_{a1} = \frac{V_i}{R_a} \frac{\left(1 - e^{-\frac{t_{on}}{T_a}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{T}{T_a}}\right)} - \frac{E_a}{R_a}$$
 Σχέση 2.5.43

$$I_{a2} = \frac{V_i}{R_a} \frac{\left(e^{-\frac{t_{on}}{T_a}} - 1\right)}{\left(e^{-\frac{T}{T_a}} - 1\right)} - \frac{E_a}{R_a}$$
 Σχέση 2.5.44

Είναι σκόπιμο να διευκρινίσουμε ,όπως άλλωστε είναι προφανές και από την εικόνα των κυματομορφών τάσης – ρεύματος στο μετατροπέα κλάσης Β στη συνεχή αγωγή, παραπάνω, ότι για χάρη ευκολίας στην ανάλυση, στις παραπάνω σχέσεις το μέγεθος t_{on} δεν συμβολίζει πλέον τη χρονική διάρκεια αγωγής του θυρίστορ αλλά τη χρονική διάρκεια αγωγής της δίοδου. Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις αυτές , η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου δίνεται από τη σχέση $V_a = \frac{t_{on}}{T} V_i$ Σχέση 2.5.45 και για τη μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου αντίστοιχα έχουμε : $I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a}$ (σχέση 2.5.29). [5]

2.6.2.2 Λειτουργία στην ασυνεχή αγωγή

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κυματομορφές τάσης- ρεύματος στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής.



Κυματομορφές τάσης-ρεύματος, μετατροπέας κλάσης Β. Ασυνεχής αγωγή [4]

Για $0 < t < t_{on}$, δηλαδή το διάστημα που η διόδος είναι ορθά πολωμένη, η Δ.Ε. του ρεύματος τυμπάνου δίνεται από την σχέση 2.5.6. Λαμβάνοντας δε υπόψη την αρχική συνθήκη από την σχέση 2.5.7, η γενική λύση παίρνει τη μορφή της σχέσης 2.5.8. Δηλαδή $i_a(t) = \left(\frac{v_i - E_a}{R_a}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}}\right) + I_{a2} e^{-\frac{t}{T_a}}$ Σχέση 2.5.46.

Στο διάστημα της παλμοδότησης του θυρίστορ, $t_{on} < t < T$, ισχύει η Δ.Ε. της σχέσης 2.5.12. Λαμβάνοντας δε υπόψη ότι στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής ισχύει, $i_a(t' = 0) = I_{a1} = 0$, η σχέση 2.5.15 παίρνει τη μορφή $i_a(t') = -\frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t'}{T_a}}\right)$ Σχέση 2.5.47. Αλλά $i_a(t = T) = i_a(t' = T - t_{on}) = I_{a2}$ Σχέση 2.5.48. Από την αντικατάσταση της σχέσης 2.5.48 στην σχέση 2.5.47, προκύπτει $I_{a2} = -\frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{-(T-t_{on})}{T_a}}\right)$ Σχέση 2.5.49.

Στο διάστημα $X < t < t_{on}$, το ρεύμα τυμπάνου καθώς επίσης και το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα, είναι μηδέν. Η χρονική στιγμή μηδενισμού του ρεύματος, υπολογίζεται από την σχέση 2.5.46 θέτοντας $\alpha(t = X) = 0$ και όπου I_{a2} , την έκφραση της σχέσης 2.5.49. Μετά από λίγες πράξεις καταλήγουμε στην έκφραση

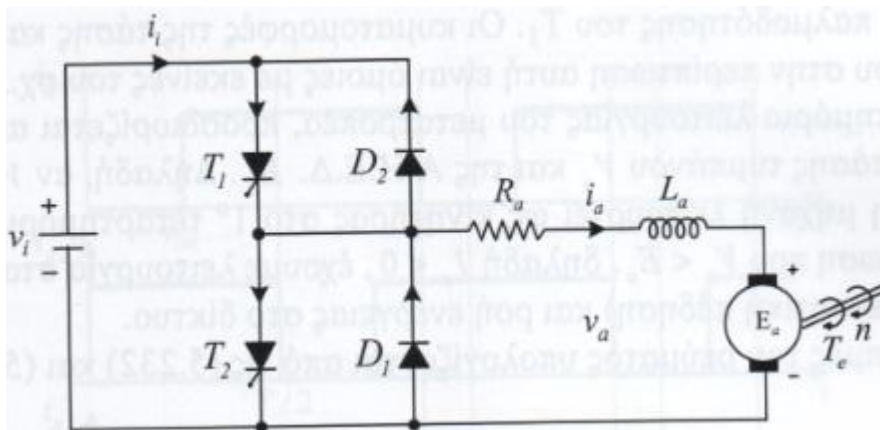
$$X = T_a \ln \frac{E_a e^{\frac{-(T-t_{on})}{T_a}} - V_i}{E_a - V_i} \quad \text{Σχέση 2.5.50.}$$

Η οριακή τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης για την οποία έχουμε συνεχή αγωγή, βρίσκεται από την σχέση 2.5.50 αν θέσουμε όπου $X = T : a' = \frac{T_a}{T} \ln \left[e^{\frac{T}{T_a}} \left[\frac{V_i}{E_a} + e^{\frac{T}{T_a}} \left(1 - \frac{V_i}{E_a} \right) \right] \right]$ Σχέση 2.5.51. Επομένως, εάν $a < a'$, η αγωγή είναι συνεχής. Και εάν $a > a'$, η αγωγή είναι ασυνεχής. Υπενθυμίζουμε ότι, στην περίπτωση του μετατροπέα κλάσης B προς χάρη ευκολίας στην ανάλυση, σαν βαθμό χρησιμοποίησης ορίσαμε το λόγο του χρονικού διαστήματος αγωγής της διόδου (ανά περίοδο) προς την περίοδο λειτουργίας. Δηλαδή σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα κυματομορφών τάσης – ρεύματος για τον μετατροπέα κλάσης B στην ασυνεχή αγωγή, είναι $a = \frac{t_{on}}{T}$ Σχέση 2.5.52.

Για τη μέση τιμή της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου κατά την ασυνεχή αγωγή, αντίστοιχα έχουμε $V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^X V_i dt + \int_X^T E_a dt \right] = \frac{1}{T} [XV_i + (t_{on} - X)E_a]$ Σχέση 2.5.53 και $I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a}$ (σχέση 2.5.29). [5]

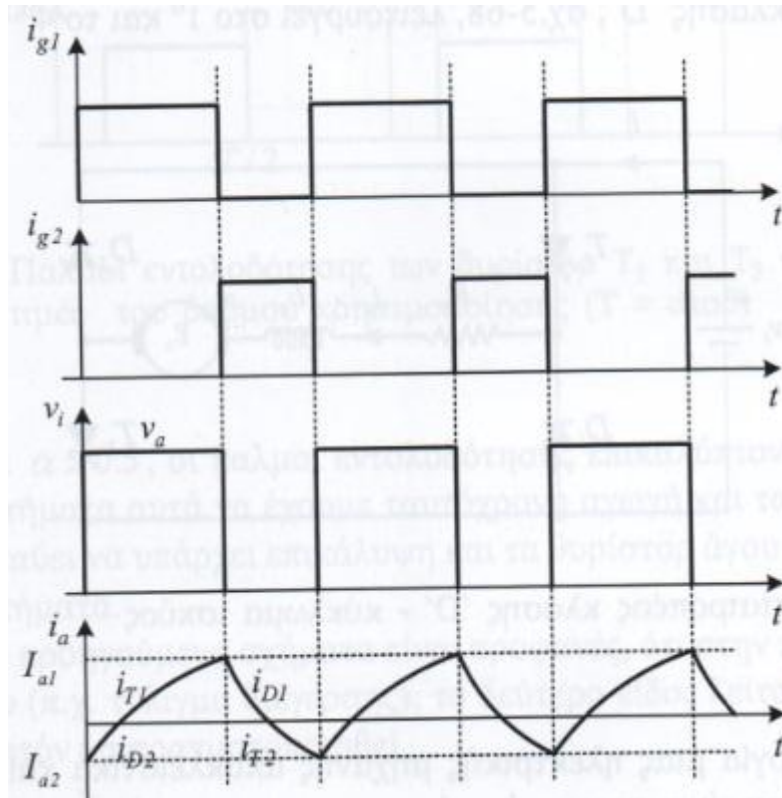
2.6.3 Μετατροπέας κλάσης C

Αν και η μεταγωγή του μετατροπέα κλάσης A σε κλάση B, στις περιπτώσεις αναγεννητικής πέδησης είναι μια αρκετά ικανοποιητική λύση, υπάρχουν πολλές κατηγορίες φορτίων (π.χ. εργαλειομηχανές) για τα οποία η ομαλή μετάβαση από το ένα τεταρτημόριο στο άλλο, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη σωστή λειτουργία τους. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται ο μετατροπέας κλάσης C, ο οποίος όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων μετατροπέων.



Μετατροπέας κλάσης C με φορτίο κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. [4]

Τα διαστήματα παλμοδότησης των θυρίστορ δεν πρέπει να συμπίπτουν, διότι στην περίπτωση αυτή θα έχουμε βραχυκύκλωμα της τάσης εισόδου.



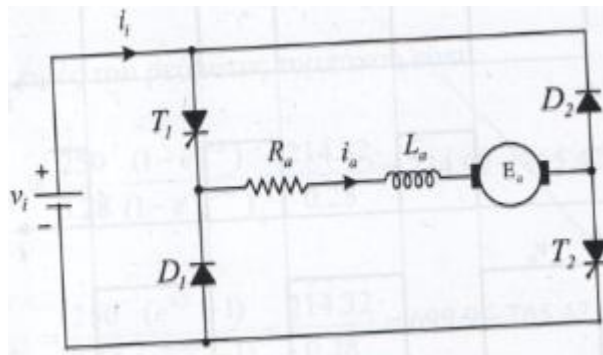
Κυματομορφές τάσης-ρεύματος, μετατροπέας κλάσης C. [4]

Σύμφωνα λοιπόν ,με την παραπάνω εικόνα των κυματομορφών τάσης-ρεύματος στον μετατροπέα κλάσης C ,στα διαστήματα αγωγής των T1-D2, ο μετατροπέας λειτουργεί στο 1^ο τεταρτημόριο (κλάση A) . Σε περίπτωση δε που η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου έχει αρκετά μεγάλη τιμή (έτσι ώστε η στιγμιαία τιμή του ρεύματος να είναι πάντα θετική), το θυρίστορ T2 (στα διαστήματα παλμοδότησης του) και η δίοδος D2 δεν άγουν. Στην περίπτωση αυτή, οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος είναι όμοιες με τις κυματομορφές τάσης – ρεύματος του μετατροπέα κλάσης A στην ασυνεχή αγωγή. Για λειτουργία στο 2^ο τεταρτημόριο, έχουμε αγωγή των T2-D2 (μετατροπέας κλάσης B) . Εντελώς ανάλογα με τη λειτουργία στο 1^ο τεταρτημόριο , εάν οι συνθήκες φόρτισης είναι τέτοιες , ώστε η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου να έχει μια επαρκή αρνητική τιμή, τα στοιχεία T1 και D1, δεν άγουν ακόμη και στα διαστήματα παλμοδότησης του T1 . Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος τυμπάνου στην περίπτωση αυτή είναι όμοιες με τις κυματομορφές τάσης – ρεύματος του μετατροπέα κλάσης B στη συνεχή αγωγή.

Το τεταρτημόριο λειτουργίας του μετατροπέα , προσδιορίζεται από τη σχέση μεταξύ της τάσης τυμπάνου V_a και της Α.Η.Ε.Δ. E_a . Δηλαδή , αν $V_a > E_a$, τότε $I_a > 0$ και η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας στο 1^ο τεταρτημόριο. Αντίθετα , στην περίπτωση που $V_a < E_a$, τότε $I_a < 0$, έχουμε λειτουργία στο 2^ο τεταρτημόριο (αναγεννητική πέδηση) και ροή ενέργειας στο δίκτυο. Οι ακραίες τιμές του ρεύματος υπολογίζονται από τις σχέσεις 2.5.43 και 2.5.44. [5]

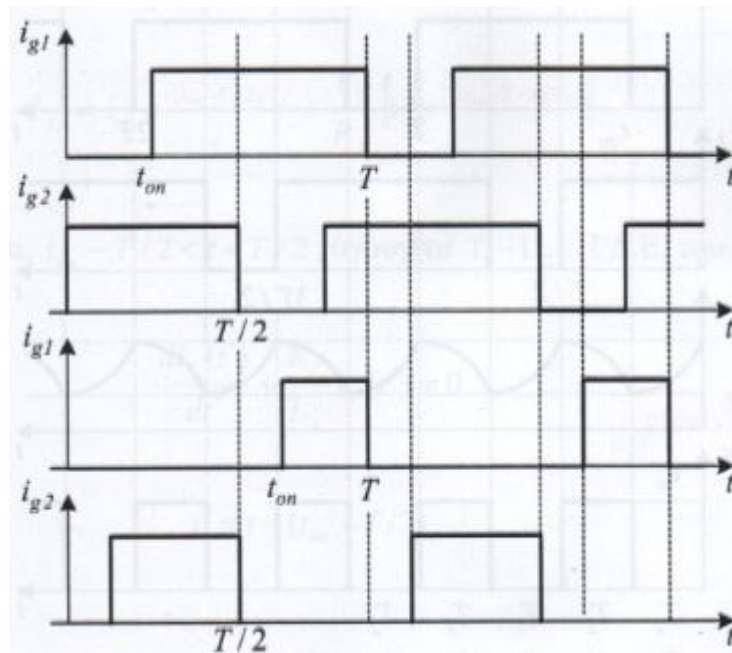
2.6.4 Μετατροπέας κλάσης D

Ο μετατροπέας κλάσης D, όπως αυτός φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, λειτουργεί στο 1^ο και στο 4^ο τεταρτημόριο. Επειδή η λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής αποκλειστικά και μόνο στα δύο αυτά τεταρτημόρια είναι πρακτικά ανέφικτη, ο μετατροπέας αυτός σε αντίθεση με τους υπολοίπους, δεν χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του τυλίγματος τυμπάνου. Ο μετατροπέας αυτός όμως, είναι από τους πλέον κατάλληλους για την τροφοδοσία και τον έλεγχο του τυλίγματος διέγερσης, διότι με τη δυνατότητα βραχυκύκλωσης του τυλίγματος ($\alpha = 0.5$) όπως θα δούμε στη συνέχεια, επιτυγχάνονται αρκετά γρήγορες μεταβολές του ρεύματος.



Μετατροπέας κλάσης D με φορτίο κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. [4]

Οι παλμοί εντολοδότησης των δύο θυρίστορ είναι απόλυτα όμοιοι, διαφέρουν όμως χρονικά κατά μισή περίοδο. Ανάλογα δε με την τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης, σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα, διακρίνουμε δύο διαφορετικά είδη λειτουργίας.

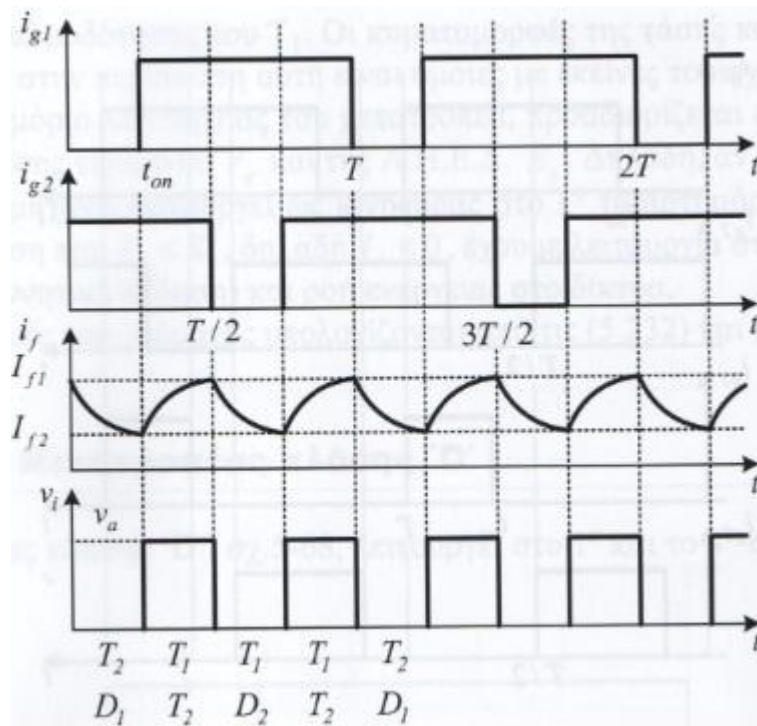


Παλμοί εντολοδότησης των θυρίστορ T1 και T2 για διαφορετικές τιμές του βαθμού χρησιμοποίησης ($T =$ σταθερό). [4]

Πράγματι για $\alpha > 0.5$, οι παλμοί εντολοδότησης επικαλύπτονται, με αποτέλεσμα στα διαστήματα αυτά να έχουμε ταυτόχρονη αγωγή και των δυο θυρίστωρ. Για $\alpha < 0.5$, παύει να υπάρχει επικάλυψη και τα θυρίστωρ άγουν σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Από τα δύο προηγούμενα σχήματα είναι προφανές, ότι στην περίπτωση παθητικού φορτίου (πχ. τύλιγμα διέγερσης), το δεύτερο είδος λειτουργίας ($\alpha < 0.5$) δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί.

Έλεγχος του τυλίγματος διέγερσης ($\alpha > 0.5$)

Η τιμή της σταθεράς χρόνου του τυλίγματος της κύριας διέγερσης ενός κινητήρα Σ.Ρ. (λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής που παρουσιάζει), είναι αρκετά μεγαλύτερη της αντίστοιχης του τυλίγματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα η αγωγή του ρεύματος του τυλίγματος διέγερσης σε συνάρτηση των παλμών έναυσης των θυρίστωρ, παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Κυματομορφές τάσης – ρεύματος του τυλίγματος διέγερσης ($\alpha > 0.5$). [4]

Παρατηρούμε ότι, η συχνότητα της τάσης στο τύλιγμα διέγερσης, είναι διπλάσια από τη συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα. Επομένως, η ανάλυση της λειτουργίας θα περιοριστεί στο διάστημα, $0 < t < \frac{T}{2}$.

Για, $0 < t < t_{on} - \frac{T}{2}$, έχουμε λειτουργία των T1-T2.

Η Δ.Ε. του ρεύματος είναι $\frac{di_f(t)}{dt} + \frac{R_f}{L_f} i_f(t) = \frac{V_i}{L_f}$ Σχέση 2.5.54

Η γενική λύση της σχέσης 2.5.54 λαμβάνοντας υπόψη ότι, $i_f(t = 0) = I_{f2}$, είναι

$i_f(t) = I_{f2} e^{\frac{-t}{T_f}} + \frac{V_i}{R_f} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_f}}\right)$ Σχέση 2.5.55 αλλά $i_f\left(t = t_{on} - \frac{T}{2}\right) = I_{f1}$ Σχέση 2.5.56. Από

την αντικατάσταση της σχέσης 2.5.56 στην σχέση 2.5.54, προκύπτει

$$I_{f1} = I_{f2} e^{\frac{-(t_{on} - \frac{T}{2})}{T_f}} + \frac{V_i}{R_f} \left[1 - e^{\frac{-(t_{on} - \frac{T}{2})}{T_f}}\right] \quad \text{Σχέση 2.5.57}$$

Στο διάστημα $t_{on} - \frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}$, άγουν τα T1-D2. Η Δ.Ε. του ρεύματος είναι

$$\frac{di_f(t')}{dt} + \frac{R_f}{L_f} i_f(t') = 0 \quad \text{Σχέση 2.5.58} \quad \text{όπου} \quad t' = t - \left(t_{on} - \frac{T}{2}\right) \quad \text{Σχέση 2.5.59} \quad \text{και}$$

$i_f(t' = 0) = I_{f1}$ Σχέση 2.5.60. Η γενική λύση της σχέσης 2.5.58 λαμβάνοντας υπόψη την

σχέση 2.5.60 είναι $i_f(t') = I_{f1} e^{\frac{-t'}{T_f}}$ Σχέση 2.5.61 αλλά $i_f\left(t = \frac{T}{2}\right) = i_f(t' = T - t_{on}) = I_{f2}$

Σχέση 2.5.62. Από την αντικατάσταση της σχέσης 2.5.62 στην σχέση 2.5.61 έχουμε

$$I_{f2} = I_{f1} e^{\frac{-(T - t_{on})}{T_f}} \quad \text{Σχέση 2.5.63}.$$

Από την επίλυση του συστήματος των σχέσεων 2.5.57 και 2.5.63, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις ακραίες τιμές, I_{f1} και I_{f2} , του ρεύματος διέγερσης. Επομένως

$$I_{f1} = \frac{V_i}{R_f} \frac{\left(\frac{1 - e^{\frac{-(t_{on} - \frac{T}{2})}{T_f}}}{1 - e^{\frac{-T}{2T_f}}}\right)}{\left(\frac{1 - e^{\frac{-(t_{on} - \frac{T}{2})}{T_f}}}{1 - e^{\frac{-T}{2T_f}}}\right)} \quad \text{Σχέση 2.5.64} \quad \text{και} \quad I_{f2} = \frac{V_i}{R_f} \frac{\left(\frac{e^{\frac{t_{on} - \frac{T}{2}}{T_f}} - 1}{e^{\frac{T}{2T_f}} - 1}\right)}{\left(\frac{e^{\frac{T}{2T_f}} - 1}{e^{\frac{T}{2T_f}} - 1}\right)} \quad \text{Σχέση 2.5.65}$$

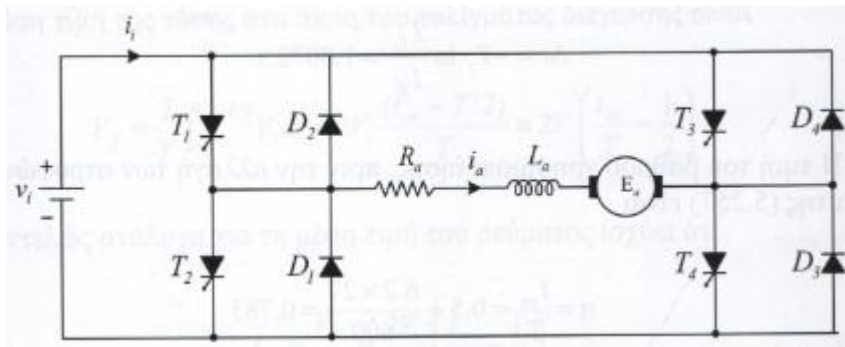
Η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του τυλίγματος διέγερσης είναι

$$V_f = \frac{2}{T} \int_0^{t_{on} - \frac{T}{2}} V_i dt = 2V_i \left(\frac{t_{on}}{T} - \frac{1}{2}\right) \quad \text{Σχέση 2.5.66}$$

Εντελώς ανάλογα για τη μέση τιμή του ρεύματος ισχύει ότι

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{2V_i}{R_f} \left(\frac{t_{on}}{T} - \frac{1}{2}\right) \quad \text{Σχέση 2.5.67 [5]}$$

2.6.5 Μετατροπέας κλάσης E



Μετατροπέας κλάσης E με φορτίο κινητήρα Σ.Ρ.Ξ.Δ. [4]

Με το μετατροπέα κλάσης E, όπως αυτός φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, επιτυγχάνουμε λειτουργία και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Η λογική ελέγχου του κυκλώματος παλμοδότησης των θυρίστορ, καθορίζει τη λειτουργία της μηχανής Σ.Ρ. σε οποιοδήποτε από τα τέσσερα τεταρτημόρια. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι τα διαστήματα αγωγής των θυρίστορ, T1-T2 και T3-T4 αντίστοιχα δεν πρέπει να συμπίπτουν γιατί θα προκαλέσουν το βραχυκύκλωμα της τάσης εισόδου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της συνεχούς παλμοδότησης του T4 και της μη παλμοδότησης του T3, έχουμε λειτουργία στο 1^ο και 2^ο τεταρτημόριο (λειτουργία ανάλογη του μετατροπέα κλάσης C). Από την άλλη πλευρά αν η παλμοδότηση του T2 είναι συνεχής (προφανώς το T1 δεν παλμοδοτείται), η τάση στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου αλλάζει πρόσημο (γίνεται αρνητική) και έχουμε λειτουργία στο 3^ο και 4^ο τεταρτημόριο. [5]

2.7 Διπλομετατροπέας

Από τις πλήρως ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις που εξετάσαμε, μονοφασικές είτε τριφασικές, μπορούν να λειτουργήσουν σε δύο τεταρτημόρια, καθόσον η τάση εξόδου μπορεί να αναστραφεί με κατάλληλη επιλογή της γωνίας έναυσης, αλλά αυτό δεν μπορεί να συμβεί και με το ρεύμα, διότι τόσο οι δίοδοι όσο και τα θυρίστορ είναι μονοφάρα στοιχεία. Εάν όμως συνδεθούν δύο πλήρως ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις αντιπαράλληλα μπορούμε να πετύχουμε λειτουργία και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Από τους δύο μετατροπείς ο ένας θα λειτουργεί ως ανορθωτής και ο άλλος ως αντιστροφέας. Η τάση όμως που παράγεται από κάθε μετατροπέα, δεν είναι ιδανικά συνεχής, αλλά παρουσιάζει κάποια κυμάτωση. Επειδή δε οι κυματώσεις των δυο μετατροπέων δε βρίσκονται σε φάση, αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ισχυρού ρεύματος μεταξύ των δύο μετατροπέων. Το κυκλικό αυτό ρεύμα, το οποίο δεν διέρχεται από το φορτίο, ελέγχεται με διάφορες τεχνικές.

Στην πράξη υπάρχουν δυο βασικοί τρόποι λειτουργίας των διπλομετατροπέων :

- α) Η λειτουργία χωρίς κυκλικό ρεύμα που επιτυγχάνεται με αυτόματο έλεγχο των παλμών έναυσης και
- β) Η λειτουργία με κυκλικό ρεύμα, όπου τοποθετείται μία αυτεπαγωγή μεταξύ των δυο μετατροπέων και με χρήση ειδικών διατάξεων ελέγχου.

Με την τεχνική του κυκλικού ρεύματος πιθανόν οι μετατροπείς να φορτίζονται αρκετά περισσότερο από το μέγιστο ονομαστικό φορτίο, γεγονός που κάνει την τεχνική αυτή

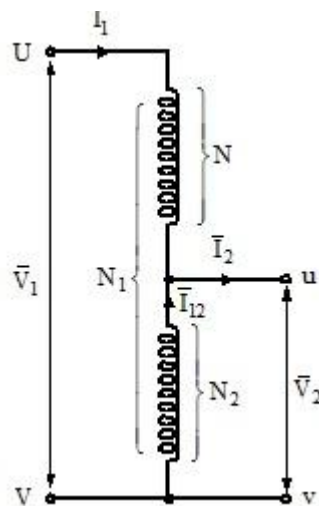
ελάχιστα αποδοτική. Από την άλλη πλευρά όμως, η χρήση της τεχνικής αυτής είναι απαραίτητη όταν το ρεύμα φορτίου τείνει να γίνει ασυνεχές. Αν συνδυαστούν και οι δύο τεχνικές, θα έχουμε την πλέον αποδοτική συμπεριφορά του διπλομετατροπέα, όπου η χρήση του θεωρείται απαραίτητη. [5]

2.8 Συνδυασμός μη ελεγχόμενης γέφυρας με AM/Σ ή Triac

Η μη ελεγχόμενη γέφυρα αποτελούμενη μόνο από διόδους, ανορθώνει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, χωρίς να μας δίνει όμως, την δυνατότητα να ελέγχουμε την τάση που τροφοδοτούμε το τύλιγμα τυμπάνου και κατ' επέκταση τις στροφές του κινητήρα. Σε αυτό το σημείο μπαίνει η ανάγκη χρησιμοποίησης κάποιου στοιχείου ελέγχου, στην είσοδο της μη ελεγχόμενης γέφυρας.

Ο διπλομετατροπέας καθώς και οι συνδυασμοί μη ελεγχόμενης γέφυρας με triac ή αυτομετασχηματιστή, δεν χρησιμοποιούνται πλέον για τον έλεγχο κινητήρων DC ή τουλάχιστον δεν χρησιμοποιούνται όσο χρησιμοποιούνται οι διατάξεις ελέγχου που αναφέρθηκαν πριν από τις δυο αυτές περιπτώσεις. Ωστόσο η αναφορά σε αυτές τις διατάξεις κρίθηκε αναγκαία από την άποψη μιας πιο εμπειριστατωμένης ενημέρωσης όσο αφορά τις διατάξεις ελέγχου των κινητήρων συνεχούς ρεύματος

2.8.1 Μη ελεγχόμενη και AM/Σ

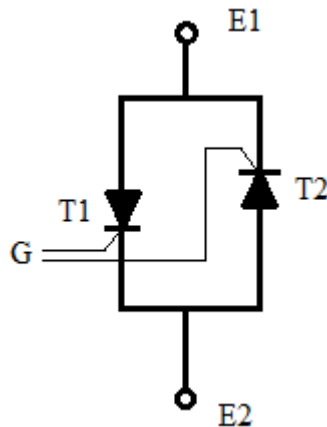


Ηλεκτρικό ισοδύναμο Αυτομετασχηματιστή [6]

Μία επιλογή στοιχείου ελέγχου, στην είσοδο της μη ελεγχόμενης γέφυρας, είναι η χρησιμοποίηση του αυτομετασχηματιστή. Ο λόγος μετασχηματισμού m του AM/Σ στην προκειμένη περίπτωση είναι $m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$, επίσης η διατομή του δεύτερου τυλίγματος είναι

μικρότερη, καθώς το ρεύμα το οποίο διέρχεται από το κοινό τύλιγμα, είναι μικρότερο συγκριτικά με το ρεύμα που διέρχεται από το πρώτο τύλιγμα. Τα πλεονεκτήματα των AM/Σ είναι το μικρότερο βάρος και κόστος σε σχέση με M/Σ δύο τυλιγμάτων, μικρότερες απώλειες και ο μεγάλος βαθμός απόδοσης στη μεταφορά ισχύος. Το μειονέκτημα τους είναι ότι επειδή 1^{ov} και 2^{ov} είναι στο ίδιο τύλιγμα δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση [6]

2.8.2 Μη ελεγχόμενη και Triac



κατασκευαστικό ισοδύναμο TRIAC [8]

Η άλλη επιλογή είναι αυτή του Triac, ή αλλιώς μονοφασικού μετατροπέα E.P./E.P. (AC/AC). Είναι μια κατασκευή που αποτελείται από δύο θυρίστορ συνδεδεμένα αντιπαράλληλα. Η λειτουργία του είναι σχετικά απλή, στη μία ημιπερίοδο άγει το ένα θυρίστορ και στην άλλη άγει το άλλο θυρίστορ. Το αποτέλεσμα που έχουμε από αυτή τη διάταξη είναι σημαντικό, γιατί αυξομειώνοντας την γωνία έναυσης των θυρίστορ επιτυγχάνεται αυξομείωση της ενεργού τιμής της τάσης στην είσοδο του φορτίου, εν προκειμένω δηλαδή στην είσοδο της μη ελεγχόμενης γέφυρας.

2.9 Αρμονικές συνιστώσες, συντελεστές παραμόρφωσης και μετατόπισης στις διατάξεις ελέγχου

Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και κυκλώματα ισχύος είναι τόσο ευέλικτα και χρήσιμα, ώστε οι διατάξεις που ελέγχουν αποτελούν το 50 με 60 τοις εκατό του συνολικού φορτίου στα περισσότερα συστήματα ισχύος του ανεπτυγμένου κόσμου. Ως αποτέλεσμα, η συμπεριφορά αυτών των ηλεκτρικών κυκλωμάτων ισχύος, επηρεάζει έντονα την συνολική λειτουργία των συστημάτων ισχύος με τα οποία συνδέονται. Το βασικό πρόβλημα που σχετίζεται με τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι οι αρμονικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος που επάγονται στα συστήματα ισχύος από τις διακοπτόμενες ταλαντώσεις στους ηλεκτρονικούς ελεγκτές ισχύος. Οι αρμονικές αυτές, αυξάνουν τις συνολικές ροές ρεύματος στις γραμμές. Τα επιπλέον ρεύματα προκαλούν αυξημένες απώλειες και θέρμανση στα εξαρτήματα του συστήματος ισχύος, απαιτώντας μεγαλύτερα εξαρτήματα ώστε να τροφοδοτείται το ίδιο συνολικό φορτίο. Επιπλέον τα υψηλά ρεύματα ουδετέρου μπορούν να θέσουν σε λειτουργία ηλεκτρονόμους προστασίας (ρελέ), που σταματούν τη λειτουργία τμημάτων ενός συστήματος ισχύος. Για έναν κινητήρα ο οποίος συνδέεται απευθείας στη γραμμή, στο ρεύμα των φάσεων του, παρουσιάζεται μόνο η βασική αρμονική, ενώ τίποτα δεν παρουσιάζεται στον ουδέτερο. Αντιθέτως σε έναν κινητήρα που συνδέεται μέσω ενός ηλεκτρονικού ελεγκτή ισχύος, στο ρεύμα των φάσεων του συμπεριλαμβάνονται και η βασική συχνότητα και όλες οι περιττές αρμονικές, ενώ και στο ρεύμα του ουδετέρου περιλαμβάνονται κάποιες από τις αρμονικές [9]

Όσο αφορά τις διατάξεις ελέγχου που αναφερόμαστε στις προηγούμενες παραγράφους, αναλύοντας ρεύματα και τάσεις σε σειρές Fourier, θα είμαστε σε θέση να διατυπώσουμε τις σχέσεις για τον υπολογισμό των αρμονικών και των συντελεστών μετατόπισης και παραμορφώσεως, για τις μονοφασικές και τριφασικές πλήρως ελεγχόμενες και ημιελεγχόμενες γέφυρες καθώς και για τους μετατροπείς DC – DC κλάσης A .

2.9.1 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

Για την λειτουργική κατάσταση του μετατροπέα κατά την οποία το ρεύμα εξόδου είναι συνεχές, η τάση μπορεί να αναλυθεί σε σειρά Fourier ως εξής :

$$v_0 = \bar{V}_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega t) \quad \underline{\text{Σχέση 2.6.1}}$$

όπου \bar{V}_0 η μέση τιμή της τάσης εξόδου

$$\bar{V}_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}V_m \sin\omega t \, d\omega t = \frac{2\sqrt{2}V_m}{\pi} \cos\alpha \quad \underline{\text{Σχέση 2.6.2}}$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_0 \sin(n\omega t) \, d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_0 \sin(n\omega t) \, d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v_0 \sin(n\omega t) \, d\omega t \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\alpha} (-\sqrt{2}V_m) \sin \omega t \sin(n\omega t) \, d\omega t + \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}V_m) \sin \omega t \sin(n\omega t) \, d\omega t \\ &= \frac{-2\sqrt{2}V_m}{\pi} \int_0^{\alpha} \frac{[\cos(\omega t - n\omega t) - \cos(\omega t + n\omega t)]}{2} \, d\omega t \\ &\quad + \frac{2\sqrt{2}V_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{[\cos(\omega t - n\omega t) - \cos(\omega t + n\omega t)]}{2} \, d\omega t \\ &= \frac{-\sqrt{2}V_m}{\pi} \int_0^{\alpha} [\cos(\omega t - n\omega t) - \cos(\omega t + n\omega t)] \, d\omega t \\ &\quad + \frac{\sqrt{2}V_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [\cos(\omega t - n\omega t) - \cos(\omega t + n\omega t)] \, d\omega t \\ &= \frac{-\sqrt{2}V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(1-n)\omega t}{1-n} - \frac{\sin(1+n)\omega t}{1+n} \right]_0^{\alpha} + \frac{\sqrt{2}V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(1-n)\omega t}{1-n} - \frac{\sin(1+n)\omega t}{1+n} \right]_{\alpha}^{\pi} = \\ &= \frac{\sqrt{2}V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} + \frac{\sin(1+n)\alpha}{1+n} \right] = \\ &= \frac{2\sqrt{2}V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \quad \underline{\text{Σχέση 2.6.3}} \end{aligned}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_0 \cos(n\omega t) \, d\omega t = \frac{2\sqrt{2}V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right] \quad \underline{\text{Σχέση 2.6.4}}$$

Όπου $n=2,4,6,\dots$

Η σχέση 2.6.1 μπορεί να γραφεί ως εξής

$$v_0 = \bar{V}_0 + \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \hat{V}_{0,n} + \cos(n\omega t - \theta_n) \text{ Σχέση 2.6.5 όπου}$$

$$\hat{V}_{0,n} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \text{ Σχέση 2.6.6 και } \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \text{ Σχέση 2.6.7}$$

Στην σχέση 2.6.6 η $\hat{V}_{0,n}$ εκφράζει το πλάτος της νιοστής αρμονικής της τάσης εξόδου ενώ στην σχέση 2.6.7 η γωνία θ_n εκφράζει την διαφορά φάσης μεταξύ a_n και b_n .

Επίσης, το ρεύμα εξόδου, για την λειτουργική κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου, δίνεται από την

$$i_0 = \bar{I}_0 + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \hat{I}_{0,n} + \cos(n\omega t - \theta_n - \varphi_n) \text{ Σχέση 2.6.8 όπου}$$

$$\hat{I}_{0,n} = \frac{\hat{V}_{0,n}}{\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \text{ Σχέση 2.6.9 και } \varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{n\omega L}{R}\right) \text{ Σχέση 2.6.10}$$

Στη σχέση 2.6.9 το $\hat{I}_{0,n}$ εκφράζει το πλάτος της νιοστής αρμονικής του ρεύματος εξόδου ενώ στην σχέση 2.6.7 η γωνία φ_n εκφράζει την διαφορά φάσης μεταξύ $n\omega L$ και R . Με L ορίζουμε την αυτεπαγωγή του κινητήρα και R την ωμική του αντίσταση. [8]

Από την αρμονική ανάλυση του ρεύματος έχουμε $I_{An} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_{\alpha} \cos n\omega t d\omega t - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} I_{\alpha} \cos n\omega t d\omega t \right]$ Σχέση 2.6.11 και

$I_{Bn} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_{\alpha} \sin n\omega t d\omega t - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} I_{\alpha} \sin n\omega t d\omega t \right]$ Σχέση 2.6.12. Επομένως

$$I_{An} = -\frac{2I_{\alpha}}{\pi n} [1 - (-1)^n] \sin \alpha, \quad n=1,2,3,\dots \text{ Σχέση 2.6.13 και } I_{Bn} = \frac{2I_{\alpha}}{\pi n} [1 - (-1)^n] \cos \alpha, \quad n=1,2,3,\dots \text{ Σχέση 2.6.14}$$

$$\text{Για } n=1, \text{ έχουμε } I_{A1} = -\frac{4I_{\alpha}}{\pi} \sin \alpha \text{ και } I_{B1} = -\frac{4I_{\alpha}}{\pi} \cos \alpha \text{ Σχέση 2.6.15}$$

Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος γραμμής είναι $i_1(\omega t) = \frac{4I_{\alpha}}{\pi} (-\cos \omega t \sin \alpha + \sin \omega t \cos \alpha) = \frac{4I_{\alpha}}{\pi} \sin(\omega t - \alpha) = I_{m,1} \sin(\omega t - \alpha)$ Σχέση

2.6.16 όπου $I_{m,1} = \frac{4I_{\alpha}}{\pi}$ και $I_{rms,1} = \frac{2\sqrt{2}I_{\alpha}}{\pi}$ Σχέση 2.6.17 η μέγιστη και η ενεργός τιμή αντίστοιχα της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος εισόδου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις 2.6.13 και 2.6.14, η γενική έκφραση του ρεύματος εισόδου της ανορθωτικής διάταξης παίρνει την μορφή $i(\omega t) = \frac{2I_{\alpha}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} [1 - (-1)^n] \sin[n(\omega t - \alpha)]$ Σχέση 2.6.18. Η ενεργός τιμή του ρεύματος $i(t)$ βάσει ορισμού είναι

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_{rms,i}^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_a^{\pi+a} I_a^2 d\omega t + \int_{\pi+a}^{2\pi+a} I_a^2 d\omega t} = I_a = I_{a,rms} \text{ Σχέση 2.6.19}$$

Ο συντελεστής παραμόρφωσης είναι $D.F. = \frac{I_{rms,i}}{I_{rms}} = \frac{\frac{2\sqrt{2}I_a}{\pi}}{I_a} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.9$ Σχέση 2.6.20. [5]

2.9.2 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

Στην περίπτωση που το ρεύμα εξόδου είναι συνεχές, ισχύει η σχέση $v_0 = \bar{V}_0 + \sum_{n=6,12,18,\dots} \hat{V}_{0,n} \cos(n\omega t - \theta_n)$ Σχέση 2.6.21 όπου η μέση τιμή ενός παλμού της τάσης εξόδου είναι και η μέση τιμή αυτής και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{V}_0 = \frac{1}{T} \int_{\left(\frac{T}{12}\right)-a}^{\left(\frac{T}{12}\right)+a} v_{ab} dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha-\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{\pi}{6}} v_{ab} d\omega t = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha-\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{\pi}{6}} \sqrt{6} V_m \cos \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_m \cos a \text{ Σχέση 2.6.22}$$

. Όπου V_m η ενεργός τιμή της φασικής τάσης εισόδου. Επίσης για τους συντελεστές

της τάσης έχουμε $\hat{V}_{0,n} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ (σχέση 2.6.6), $\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$ (σχέση 2.6.7),

$$a_n = \frac{6}{\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{2\pi}{3}} v_0 \sin n\omega t d\omega t \text{ Σχέση 2.6.23}, b_n = \frac{6}{\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{2\pi}{3}} v_0 \cos n\omega t d\omega t \text{ Σχέση 2.6.24}$$

και $n=6,12,18,24,\dots$ [8]

Από την ανάλυση κατά Fourier οι εκφράσεις για τους συντελεστές της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος γραμμής είναι

$$I_{A1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos \omega t d\omega t = \frac{1}{\pi} \left[\int_{30+a}^{150-a} I_a \cos \omega t d\omega t - \int_{210+a}^{330+a} I_a \cos \omega t d\omega t \right] \Rightarrow$$

$$I_{A1} = -\frac{2\sqrt{3}I_a}{\pi} \sin a \text{ Σχέση 2.6.25} \text{ και}$$

$$I_{B1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin \omega t d\omega t = \frac{1}{\pi} \left[\int_{30+a}^{150-a} I_a \sin \omega t d\omega t - \int_{210+a}^{330+a} I_a \sin \omega t d\omega t \right] \Rightarrow$$

$$I_{B1} = \frac{2\sqrt{3}I_a}{\pi} \cos a \text{ Σχέση 2.6.26}$$

Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος γραμμής είναι

$$i_1(\omega t) = I_{A1} \cos \omega t + I_{B1} \sin \omega t = \frac{2\sqrt{3}I_a}{\pi} \sin(\omega t - a) = I_m \sin(\omega t - a) \text{ Σχέση 2.6.27} \text{ όπου}$$

$$I_m = \frac{2\sqrt{3}I_a}{\pi} \text{ Σχέση 2.6.28} \text{ είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος της γραμμής. [5]}$$

2.9.3 Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα

Με την υπόθεση ότι, το ρεύμα τυμπάνου είναι ιδανικά συνεχές και ότι η τάση στην είσοδο του μετατροπέα στερείται αρμονικών, από την αρμονική ανάλυση του ρεύματος προκύπτει

$$I_{An} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} I_a \cos n\omega t d\omega t - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_a \cos n\omega t d\omega t \right] \text{ Σχέση 2.6.29} \text{ και}$$

$$I_{Bn} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi} I_a \sin n\omega t d\omega t - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} I_a \sin n\omega t d\omega t \right] \text{ Σχέση 2.6.30} \text{ από τις οποίες σχέσεις}$$

προκύπτει ότι $I_{An} = -\frac{I_a}{\pi n} [1 - (-1)^n] \sin a$, $n=1,2,3,..$ Σχέση 2.6.31 και $I_{Bn} = \frac{I_a}{\pi n} [1 - (-1)^n] \cos na$, $n=1,2,3,..$ Σχέση 2.6.32

Η θεμελιώδης συνιστώσα προκύπτει από τις σχέσεις 2.6.31 και 2.6.32 , αν θέσουμε όπου $n=1$. Επομένως $I_{A1} = \frac{2I_a}{\pi} \sin a$ και $I_{B1} = \frac{2I_a}{\pi} (1 + \cos a)$ Σχέση 2.6.33 και $i_1(\omega t) = \frac{4I_a}{\pi} \cos \frac{a}{2} \sin \left(\omega t - \frac{a}{2} \right)$ Σχέση 2.6.34

Για $a = 0^\circ$, η έκφραση της θεμελιώδους συνιστώσας είναι ίδια με εκείνη της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης διάταξης (σχέση 2.6.16) .Η συνολική ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής είναι $I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = I_a \sqrt{\frac{\pi-a}{\pi}}$ Σχέση 2.6.35.

Ο συντελεστής παραμόρφωσης είναι $D.F. = \frac{I_{rms,1}}{I_{rms}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi(\pi-a)} \cos \left(\frac{a}{2} \right)$ Σχέση 2.6.36. [5]

2.9.4 Τριφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα

Για την υπολογισμό των συντελεστών I_{A1} και I_{B1} , της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος γραμμής στην τριφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα , διακρίνουμε τις περιοχές $0^\circ \leq a \leq 60^\circ$ και $60^\circ \leq a \leq 180^\circ$.

Στην περιοχή λειτουργίας $0^\circ \leq a \leq 60^\circ$, η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος εισόδου είναι $i_{A1}(\omega t) = I_{A1} \cos \omega t + I_{B1} \sin \omega t$ Σχέση 2.6.37 όπου

$$I_{A1} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{30+a}^{150+a} I_a \cos \omega t d\omega t - \int_{210}^{330} I_a \cos \omega t d\omega t \right] = -\frac{\sqrt{3}I_a}{\pi} \sin a$$
 Σχέση 2.6.38 και

$$I_{B1} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{30+a}^{150+a} I_a \sin \omega t d\omega t - \int_{210}^{330} I_a \sin \omega t d\omega t \right] = \frac{\sqrt{3}I_a}{\pi} (1 + \cos a)$$
 Σχέση 2.6.39 .

Επομένως η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος γραμμής είναι $i_{A1}(\omega t) = I_{A1} \cos \omega t + I_{B1} \sin \omega t = \frac{2\sqrt{3}I_a}{\pi} \cos \left(\frac{a}{2} \right) \sin \left(\omega t - \frac{a}{2} \right)$ Σχέση 2.6.40 . Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εισόδου δίνεται από τη σχέση $I_m = \frac{2\sqrt{3}I_a}{\pi} \cos \left(\frac{a}{2} \right)$ Σχέση 2.6.41 .

Στην περιοχή λειτουργίας $60^\circ \leq a \leq 180^\circ$, όπως έχει αναφερθεί και σε παραπάνω παράγραφο σχετικά με την λειτουργία της διάταξης της τριφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας , υπάρχουν διαστήματα αγωγής της διόδου ελεύθερης ροής ή απουσίας αυτής της ταυτόχρονης αγωγής των στοιχείων ενός κλάδου. Οι συντελεστές I_{A1} και I_{B1} είναι, $I_{A1} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{30+a}^{210+a} I_a \cos \omega t d\omega t - \int_{210+a-60}^{330} I_a \cos \omega t d\omega t \right] = -\frac{\sqrt{3}I_a}{\pi} \sin a$ Σχέση 2.6.42 και $I_{B1} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{30+a}^{210+a} I_a \sin \omega t d\omega t - \int_{210+a-60}^{330} I_a \sin \omega t d\omega t \right] = \frac{\sqrt{3}I_a}{\pi} (1 + \cos a)$ Σχέση 2.6.43 αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι και για τις δύο περιοχές λειτουργίας , οι παραπάνω συντελεστές παραμένουν ίδιοι (αφού οι σχέσεις 2.6.38 και 2.6.39 καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα των

αντιστοιχών 2.6.42 και 2.6.43) . Επομένως και στην περιοχή αυτή η έκφραση της θεμελιώδους συνιστώσας δίνεται από την σχέση 2.6.40 . [5]

2.9.5 Συντελεστής μετατόπισης

Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος των μετατροπέων φυσικής μεταγωγής, καθυστερεί πάντοτε της τάσης κατά μια γωνία μετατόπισης «φ» . Δηλαδή οι μετατροπείς ελεγχόμενης φάσης απορροφούν άεργη επαγωγική ισχύ από το δίκτυο. Συντελεστής μετατόπισης ορίζεται ο λόγος της μέσης καταναλισκόμενης ισχύος προς το γινόμενο των ενεργών τιμών της τάσης και της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος γραμμής. Δηλαδή : $\lambda = \frac{P_{av}}{V_{rms} I_{rms,1}} = \frac{V_{rms} I_{rms,1} \cos \varphi}{V_{rms} I_{rms,1}} = \cos \varphi$.

Ο συντελεστής μετατόπισης για την μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα είναι $\lambda = \frac{P_s}{V_{rms} I_{rms,1}} = \frac{V_{rms} I_{rms,1} \cos a}{V_{rms} I_{rms,1}} = \cos a = \cos \varphi$. Η χρονική καθυστέρηση της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος γραμμής έναντι της τάσης (φασική μετατόπιση) είναι ίση με τη γωνία έναυσης. Αντίστοιχα για την μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα ο συντελεστής μετατόπισης είναι $\lambda = \cos \frac{a}{2} = \cos \varphi'$, αυτό σημαίνει ότι η φασική διαφορά της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος ως προς την τάση έχει μειωθεί στο μισό και η βελτίωση αυτή στον συντελεστή μετατόπισης έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη κατανάλωση άεργης ισχύος σε σχέση με την πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα.

Για την τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα ο συντελεστής μετατόπισης είναι ίσος με το συνημίτονο της φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος τυμπάνου. Σε περίπτωση που το ρεύμα τυμπάνου είναι ιδανικά συνεχές, η φασική διαφορά μεταξύ της τάσης με τη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος γραμμής θα είναι ίση με τη γωνία έναυσης. Δηλαδή $\lambda = \cos a = \cos \varphi$ όπως και στην αντίστοιχη μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. Ομοίως για την τριφασική ημιελεγχόμενη, $\lambda = \cos [V_{A1}, \widetilde{I}_{A1}] = \cos \frac{a}{2} = \cos \varphi'$, δηλαδή ο συντελεστής μετατόπισης είναι ίδιος με την αντίστοιχη μονοφασική ημιελεγχόμενη διάταξη γέφυρα. Κατά συνέπεια , η μειωμένη κατά το ήμισυ φασική διαφορά τάσης και θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος γραμμής, της ημιελεγχόμενης τριφασικής διάταξης ως προς την αντίστοιχη πλήρως ελεγχόμενη, επιφέρει βελτιωμένο συντελεστή μετατόπισης, δηλαδή μικρότερη κατανάλωση άεργης ισχύος.

Συνοψίζοντας , η σύγκριση ως προς τον συντελεστή μετατόπισης στις τέσσερις προαναφερθείσες γέφυρες, έθιξε το πλεονέκτημα των ημιελεγχόμενων διατάξεων ως προς την κατανάλωση άεργης επαγωγικής ισχύος, έναντι των αντίστοιχων τους πλήρως ελεγχόμενων διατάξεων. [5]

2.9.6 Μετατροπέας DC-DC κλάσης A

Η τάση εξόδου του μετατροπέα αποτελείται από τετραγωνικούς παλμούς και περιέχει εκτός από τη μηδενική ή χρήσιμη αρμονική συνιστώσα (την μέση τιμή της τάσης εξόδου δηλαδή) και ανώτερες ή ανεπιθύμητες αρμονικές, οι οποίες μπορούν να εξαλειφθούν με την εφαρμογή ενός φίλτρου LC (πηνίου- πυκνωτή) μεταξύ της εξόδου του μετατροπέα και του φορτίου. Οι

τιμές των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών υπολογίζονται με χρήση σειρών Fourier ως εξής :

$$v_0 = \bar{V}_0 + \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \hat{V}_{01,n} \sin(n\omega t) + \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \hat{V}_{02,n} \cos(n\omega t) \quad \text{Σχέση 2.6.44} \quad \text{όπου}$$

$$\hat{V}_{01,n} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} v_0 \sin(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{t_{ON}} V \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt = \left(\frac{2}{T}\right) \left(\frac{VT}{2n\pi}\right) \left(-\cos\left(\frac{2n\pi t_{ON}}{T}\right) + \cos 0\right) = \frac{V}{n\pi} (1 - \cos n\omega t_{ON})$$

$$\text{Σχέση 2.6.45}$$

$$\hat{V}_{02,n} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} v_0 \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{t_{ON}} V \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt = \left(\frac{2}{T}\right) \left(\frac{VT}{2n\pi}\right) \left(-\sin\left(\frac{2n\pi t_{ON}}{T}\right) + \sin 0\right) = \frac{V}{n\pi} (\sin n\omega t_{ON})$$

Σχέση 2.6.46, V η DC τάση εισόδου και n η τάξη της αρμονικής συνιστώσας.

Επομένως το πλάτος της νιοστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου δίνεται από τη

σχέση $\bar{V}_{0,n} = \sqrt{\hat{V}_{01,n}^2 + \hat{V}_{02,n}^2}$ Σχέση 2.6.47. Η διαφορά μεταξύ των συντελεστών $\hat{V}_{01,n}$ και

$\hat{V}_{02,n}$ δίνεται από την σχέση $\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{V}_{02,n}}{\hat{V}_{01,n}}\right)$ Σχέση 2.6.48.

Στην ασυνεχή αγωγή, η τάση εξόδου του μετατροπέα μπορεί να εκφραστεί με σειρές Fourier ως εξής $v_0 = \bar{V}_0 + \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \hat{V}_{01,n} \sin(n\omega t) + \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \hat{V}_{02,n} \cos(n\omega t)$ (σχέση 2.6.44) όπου :

$$\hat{V}_{01,n} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} v_0 \sin(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \left[\int_0^{t_{ON}} V \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt + \int_{t_x}^T V_C \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \right] = \frac{V}{n\pi} (1 - \cos n\omega t_{ON}) - \frac{V_C}{n\pi} (1 - \cos n\omega t_x)$$

$$\text{Σχέση 2.6.49}$$

$$\hat{V}_{02,n} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} v_0 \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \left[\int_0^{t_{ON}} V \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt + \int_{t_x}^T V_C \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \right] = \frac{V}{n\pi} (\sin n\omega t_{ON}) - \frac{V_C}{n\pi} (\sin n\omega t_x)$$

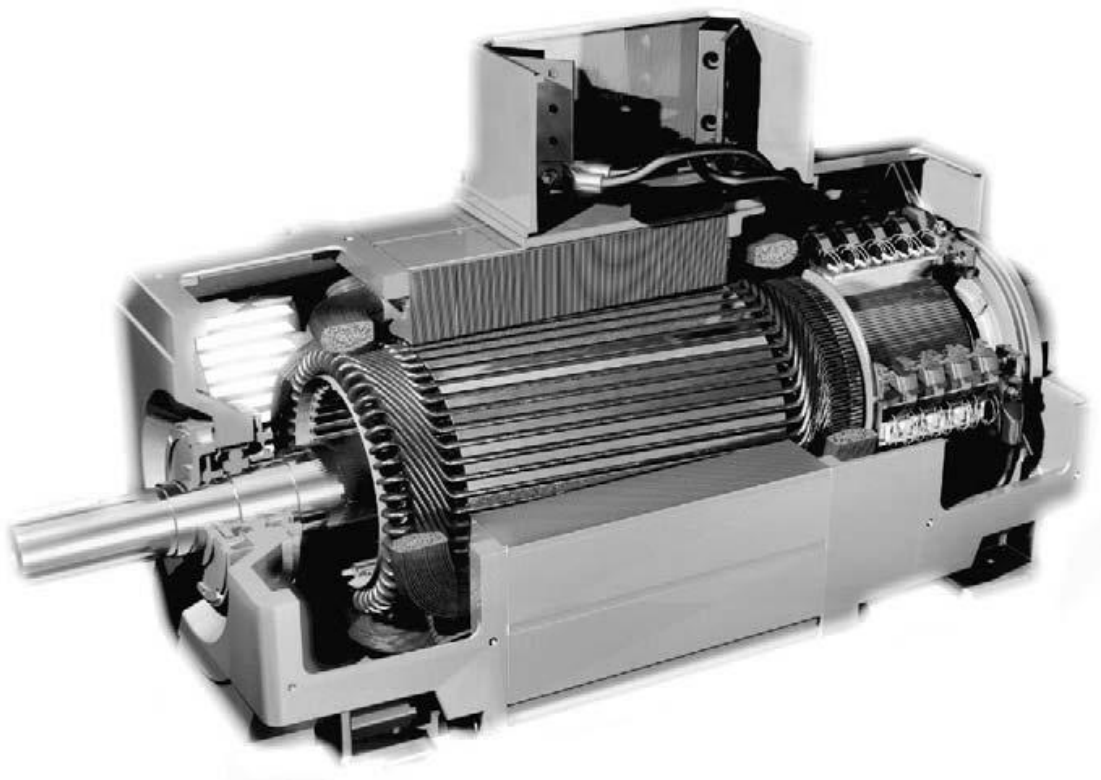
$$\text{Σχέση 2.6.50}$$

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου στην ασυνεχή αγωγή είναι

$$\bar{V}_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} v_0 dt = \frac{1}{T} \left[\int_{-\frac{T}{2}}^{t_{ON}} V dt + \int_{t_x}^T V_C dt \right] = \frac{t_{ON}}{T} V + \frac{(T-t_x)}{T} V_C \quad \text{Σχέση 2.6.51} \quad \text{όπου V η τάση}$$

της πηγής εισόδου και V_C η Α.Η.Ε.Δ. του κινητήρα. [8]

Κεφάλαιο 3 : Ηλεκτρικοί Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

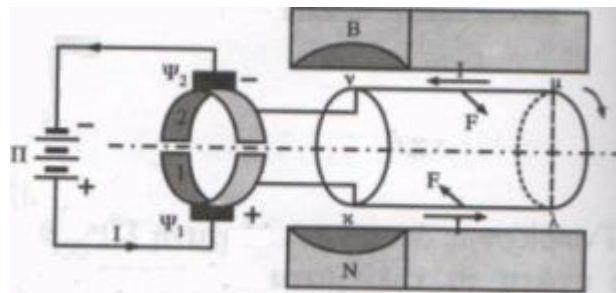


Τομή πρόσοψης τετραπολικού κινητήρα Σ.Ρ. [9]

3.1 Εισαγωγή

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, είναι μηχανές που μετατρέπουν την συνεχή ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Τις προηγούμενες δεκαετίες, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνταν κατά κόρο σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, κυρίως λόγω του πλεονεκτήματος του ανεξάρτητου ελέγχου της μαγνητικής ροής και της ηλεκτρικής ροπής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, ο κινητήρας Σ.Ρ. Ξένης Διέγερσης, ο οποίος λειτουργεί με υψηλή απόδοση και ταχεία δυναμική απόκριση και στα τέσσερα τεταρτημόρια ακόμη και σε ιδιαίτερα χαμηλές ταχύτητες.

Αν και τα συστήματα ελέγχου και τροφοδοσίας των κινητήρων Σ.Ρ. είναι απλούστερα και οικονομικότερα από τα αντίστοιχα των κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος, οι ίδιοι οι κινητήρες Σ.Ρ. εμφανίζουν αρκετά μειονεκτήματα σε σύγκριση με τους κινητήρες Ε.Ρ. , τα οποία οφείλονται κυρίως στην παρουσία του συστήματος συλλέκτη-ψηκτρών. Βέβαια, το σύστημα αυτό είναι ο μηχανισμός που κάνει την διαφορά μεταξύ των μηχανών Ε.Ρ. και των μηχανών Σ.Ρ. , αφού είναι υπεύθυνος για την μεταγωγή , την τεχνική με την οποία οι εναλλασσόμενες τάσεις στα άκρα των αγωγών του δρομέα μετατρέπονται σε συνεχείς στα άκρα της μηχανής. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται κυρίως σε τρεις βασικούς νόμους της φυσικής, τον νόμο της επαγωγής του Faraday, το νόμο του Laplace και τον νόμο του Lenz. Συνοπτικά , στο κινητό μέρος της μηχανής έχουμε το επαγωγικό τύλιγμα και στο σταθερό τα διάφορα τυλίγματα όπως κύρια, βοηθητικά και αντιστάθμισης. Όταν τροφοδοτήσουμε με συνεχή τάση τη μηχανή, στο δρομέα θα έχουμε ρευματοφόρους αγωγούς (βρόγχους) ενώ στο στάτη θα έχουμε μαγνητικό πεδίο. Με αυτές τις συνθήκες σύμφωνα με τον νόμο του Laplace, στο επαγωγικό τύλιγμα αναπτύσσονται ζεύγη ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων ,δηλαδή ροπή στρέψης και άρα περιστροφή του άξονα.



Στοιχειώδης κινητήρας Σ.Ρ. [11]

Από τη στιγμή που οι ρευματοφόροι βρόγχοι του επαγωγικού τυλίγματος του δρομέα αρχίσουν να περιστρέφονται στο μαγνητικό πεδίο λόγω των δυνάμεων Laplace, αναπτύσσεται στα άκρα τους μια τάση από επαγωγή σύμφωνα με τον νόμο του Faraday για κίνηση αγωγών σε μαγνητικό πεδίο, η οποία τάση σύμφωνα με τον νόμο του Lenz, είναι αντίθετη με την αιτία που τη δημιούργησε, δηλαδή την τάση της πηγής συνεχούς ρεύματος.

3.2 Κατασκευαστική δομή



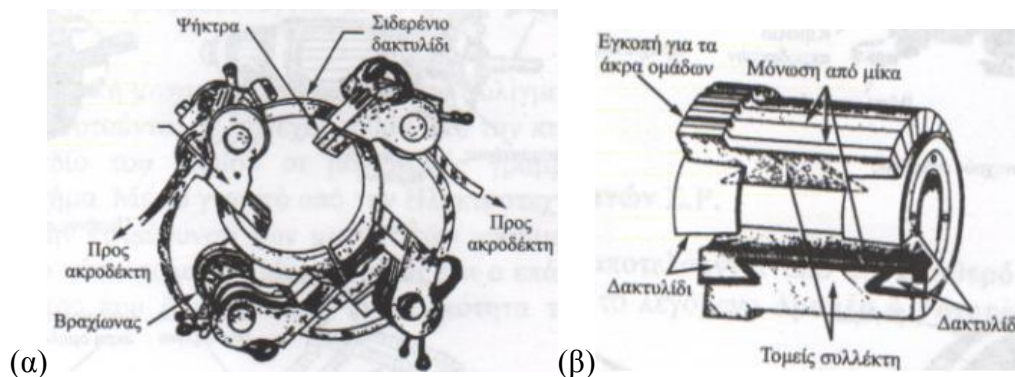
Μηχανή συνεχούς ρεύματος [11]

Μια μηχανή Σ.Ρ. , κινητήρας ή γεννήτρια περιλαμβάνει τα ίδια κατασκευαστικά μέρη. Αποτελούνται από τον ακίνητο στάτη, και τον κινούμενο δρομέα. Ο στάτης μιας μηχανής Σ.Ρ. ,αποτελείται από το ζύγωμα , τους μαγνητικούς πόλους ,τους βοηθητικούς πόλους, τον ψηκτροφορέα με τις ψήκτρες, το κιβώτιο ακροδεκτών και τα δύο καλύμματα. Το ζύγωμα είναι το κύριο μέρος του στάτη, αποτελεί τον κορμό της μηχανής ,μέσω του οποίου ενώνονται μηχανικά και μαγνητικά οι πόλοι. Κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή μαλακό σίδηρο. Οι μαγνητικοί πόλοι αποτελούν τη διέγερση της μηχανής , δηλαδή την πρωτεύουσα πηγή μαγνητικής ροής στο διάκενο.



Αριστερά : Στάτης , Δεξιά : Δρομέας [11]

Οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται μεταξύ των κύριων πόλων και χρησιμεύουν για την αποφυγή των σπινθηρισμών του συλλέκτη από τη μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης, κατά την υπό φορτίο λειτουργία. Ο ψηκτροφορέας με τις ψήκτρες χρησιμεύει για την προσαγωγή ή απαγωγή του ρεύματος των τυλιγμάτων του δρομέα της μηχανής. Οι ψήκτρες, κατασκευάζονται από σκληρό άνθρακα ,από γραφίτη ή από μίγμα άνθρακα και χαλκού. Τέλος, τα καλύμματα χρησιμεύουν για τη στήριξη του άξονα του δρομέα, του ψηκτροφορέα και την προφύλαξη του εσωτερικού της μηχανής.



(α)

(β)



(γ)

(α) Ψηκτροφορέας , (β) Συλλέκτης , (γ) Ψήκτρα (Καρβουνάκι) [11]

Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα, το επαγωγικό τύμπανο (πυρήνα και τύλιγμα), το συλλέκτη και τον ανεμιστήρα. Ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου καθώς και ο πυρήνας του στάτη, κατασκευάζονται από μονωμένα ελάσματα , για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των απωλειών από δινορεύματα

Τα βασικά τυλίγματα μιας μηχανής Σ.Ρ., είναι δύο, το τύλιγμα διέγερσης το οποίο βρίσκεται στο σταθερό μέρος (στάτη) και το τύλιγμα τυμπάνου το οποίο βρίσκεται στο δρομέα . Κατασκευαστικά τα τυλίγματα διέγερσης είναι συγκεντρωμένα. Δηλαδή ,κάθε πόλος αποτελείται από μια ομάδα ,όπου Ν ελίγματα διασυνδεδεμένα σε σειρά καταλήγουν σε δυο ακροδέκτες.

Ο αριθμός των ελιγμάτων αυτών καθώς επίσης και η διατομή τους καθορίζονται κυρίως από την ισχύ και κατ' επέκταση από την εγκατεστημένη ροή στο διάκενο, από τη γεωμετρία της μηχανής και από το είδος των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Το τύλιγμα τυμπάνου σε αντίθεση με το τύλιγμα διέγερσης , είναι διανεμημένο. Αποτελείται από ομάδες ομοιόμορφα διανεμημένες και κατάλληλα συνδεδεμένες στις οδοντώσεις (αύλακες) ,περί την περιφέρεια του διακένου. Τα άκρα των ομάδων αυτών καταλήγουν στους τομείς του συλλέκτη. Οι βασικές κατηγορίες τυλιγμάτων τυμπάνου είναι δύο , τα βροχοτυλίγματα και τα κυματοτυλίγματα.

Τα απλά βροχοτυλίγματα παρουσιάζουν τις εξής ιδιότητες :

1. Ο αριθμός των τομέων του συλλέκτη είναι ίσος με τον αριθμό του τυλίγματος ,δεδομένου ότι σε κάθε τομέα καταλήγουν δύο άκρα
2. Ο αριθμός των παραλλήλων κλάδων του τυλίγματος ,είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων της μηχανής
3. Ο αριθμός των ψηκτρών ισούται με τον αριθμό των πόλων ή τον αριθμό των παραλλήλων κλάδων του τυλίγματος.

Για τα απλά κυματοτυλίγματα ,ισχύει πως, έχουν μόνο δυο παράλληλους κλάδους, ανεξάρτητα του αριθμού των πόλων της μηχανής.

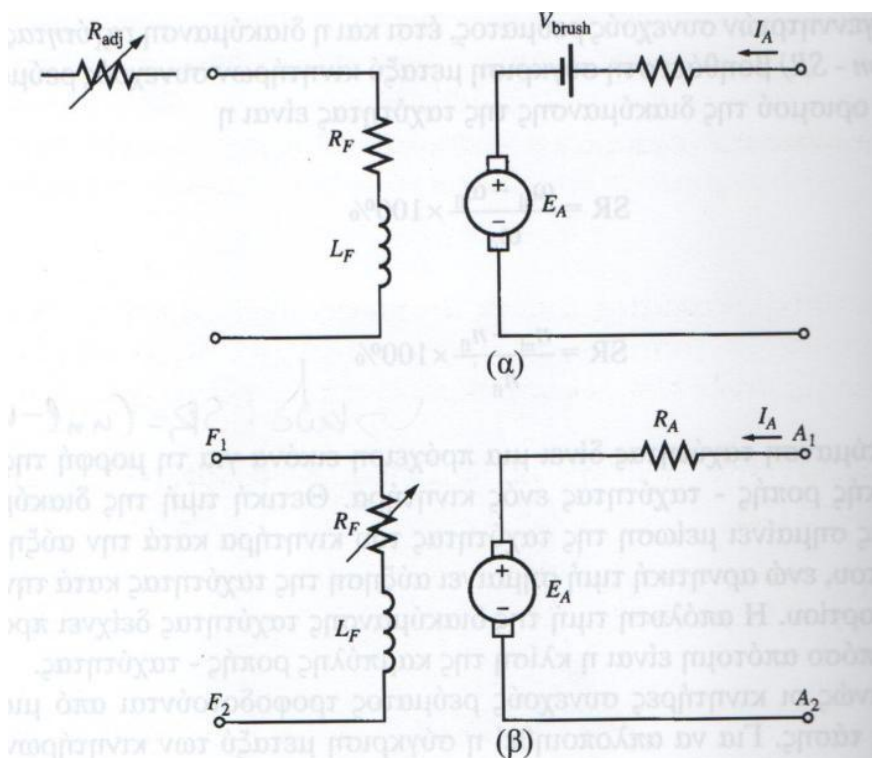
Στην πράξη ,για διπολικές μηχανές προτιμούνται τα βροχοτυλίγματα ,διότι κατασκευάζονται ευκολότερα. Για μηχανές με περισσότερα από ένα ζεύγη πόλων, το κυματοτύλιγμα δίνει μεγαλύτερες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις από το αντίστοιχο βροχοτύλιγμα. Αυτό συμβαίνει

γιατί το βροχοτύλιγμα έχει περισσότερους παράλληλους κλάδους και κατά συνέπεια λιγότερες διασυνδεδεμένες ομάδες.

Από την φύση των τυλιγμάτων αυτών είναι προφανές ότι ,τα κυματοτυλίγματα χρησιμοποιούνται σε μηχανές μικρής και μέσης ισχύος ,ενώ τα βροχοτυλίγματα σε μηχανές μεγάλης ισχύος. [5] [9] [10]

3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το κύκλωμα οπλισμού παριστάνεται με μια ιδανική πηγή τάσης E_A και με μια αντίσταση R_A . Στην ουσία πρόκειται για το ισοδύναμο Thevenin της συνολικής δομής του δρομέα, που περιλαμβάνει τους αγωγούς του δρομέα ,τους βοηθητικούς πόλους και το τύλιγμα αντιστάθμισης, αν υπάρχει .



(α) Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. (β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. [10]

Η πτώση τάσης V_{brush} στις ψήκτρες, παρουσιάζεται με μία μικρή πηγή συνεχούς τάσης που έχει πολικότητα αντίθετη προς το ρεύμα του δρομέα της μηχανής. Τα τυλίγματα της διέγερσης , που παράγουν την κύρια μαγνητική ροή του κινητήρα παρουσιάζονται με την αυτεπαγωγή L_F και την αντίσταση R_F . Η αντίσταση R_{adj} παρουσιάζει την εξωτερική μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ποσότητας του ρεύματος διέγερσης.

Σε αυτό το κύκλωμα (εικόνα (α)) μπορούν να γίνουν κάποιες απλοποιήσεις (εικόνα (β)). Η πτώση τάσης στις ψήκτρες είναι ένα πολύ μικρό κλάσμα της παραγόμενης τάσης στα άκρα του κινητήρα. Έτσι , σε περιπτώσεις που δεν είναι σημαντική , μπορεί να παραληφθεί ή να

περιληφθεί προσεγγιστικά στην τιμή της R_A . Η εσωτερική αντίσταση των αγωγών διέγερσης μπορεί επίσης να συμπεριληφθεί στην τιμή της μεταβλητής αντίστασης R_{adj} , οπότε η συνολική τιμή των δύο αντιστάσεων συμβολίζεται με R_F . Μια ακόμη παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος περιλαμβάνει όλους τους αγωγούς διέγερσης του κινητήρα.

Η τάση εξ επαγωγής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής δίνεται από την εξίσωση : $E_A = K\Phi\omega$ Σχέση 3.1.1

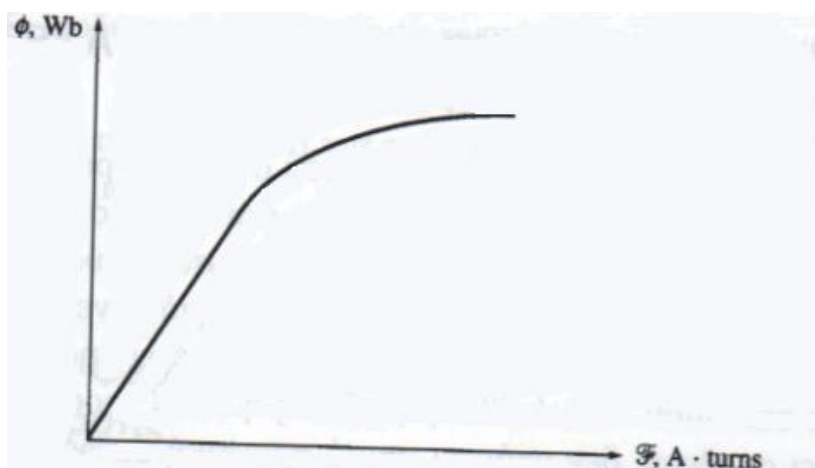
Ενώ η επαγόμενη ροπή στον άξονα της δίνεται από την εξίσωση $\tau_{ind} = Kn\Phi I_A$ Σχέση 3.1.2.

Όπου K η κατασκευαστική σταθερά της μηχανής, Φ η μαγνητική ροή ανά πόλο, ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε rad/s, n η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε rpm/s και I_A το ρεύμα τυλίγματος δρομέα.

Οι σχέσεις 3.1.1 και 3.1.2 καθώς επίσης, ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα οπλισμού και η καμπύλη μαγνήτισης της μηχανής αποτελούν τα απαραίτητα εργαλεία για την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. [9]

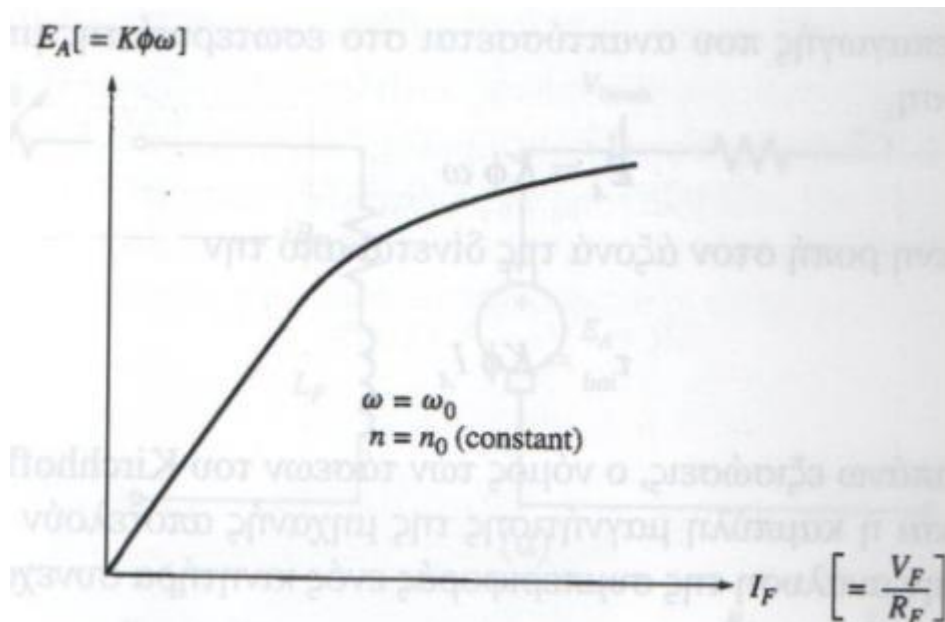
3.4 Καμπύλη μαγνήτισης

Η τάση E_A , που παράγεται στο εσωτερικό ενός κινητήρα Σ.Ρ., όπως προκύπτει από την σχέση 3.1.1, είναι ανάλογη της ροής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής και της ταχύτητας περιστροφής της. Το ρεύμα διέγερσης παράγει την μαγνητεγερτική δύναμη του πεδίου της μηχανής που δίνεται από την σχέση : $F = N_F I_F$ Σχέση 3.1.3. Αυτή η μαγνητεγερτική δύναμη αντιστοιχίζεται στη μαγνητική ροή διέγερσης μέσω της καμπύλης μαγνήτισης του μετάλλου των πόλων.



Καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού [10]

Επειδή το ρεύμα διέγερσης είναι ανάλογο της μαγνητεγερτικής δύναμης, και η τάση E_A είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής, η καμπύλη μαγνήτισης ή στατική χαρακτηριστική ενός κινητήρα παρουσιάζει την E_A ως προς το ρεύμα διέγερσης σε κάποια σταθερή ταχύτητα ω_0 περιστροφής.

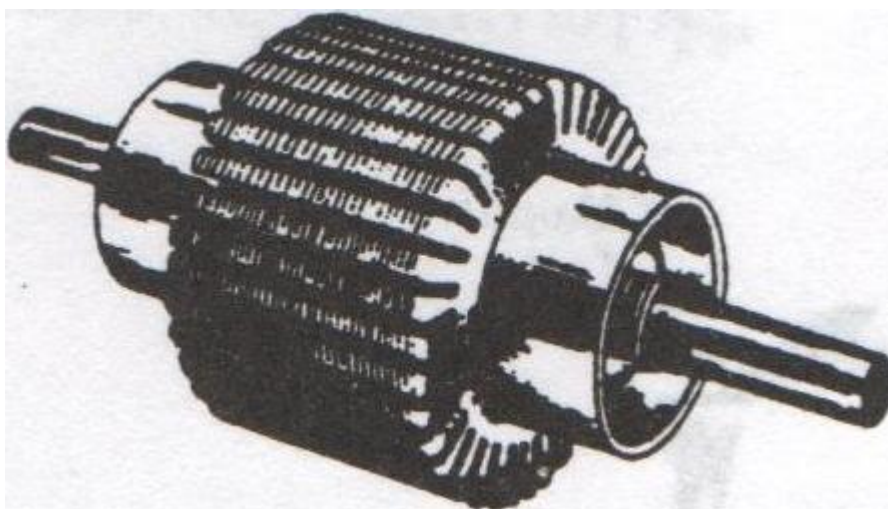


Καμπύλη μαγνήτισης ενός κινητήρα Σ.Ρ. [10]

Οι περισσότεροι κινητήρες σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν κοντά στο σημείο κορεσμού της καμπύλης μαγνήτισης, με σκοπό να παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς. Αυτό σημαίνει ότι συχνά μια αρκετά μεγάλη αύξηση στο ρεύμα διέγερσης μιας μηχανής προκαλεί μικρή αύξηση στην τάση E_A , κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο. [5] [9]

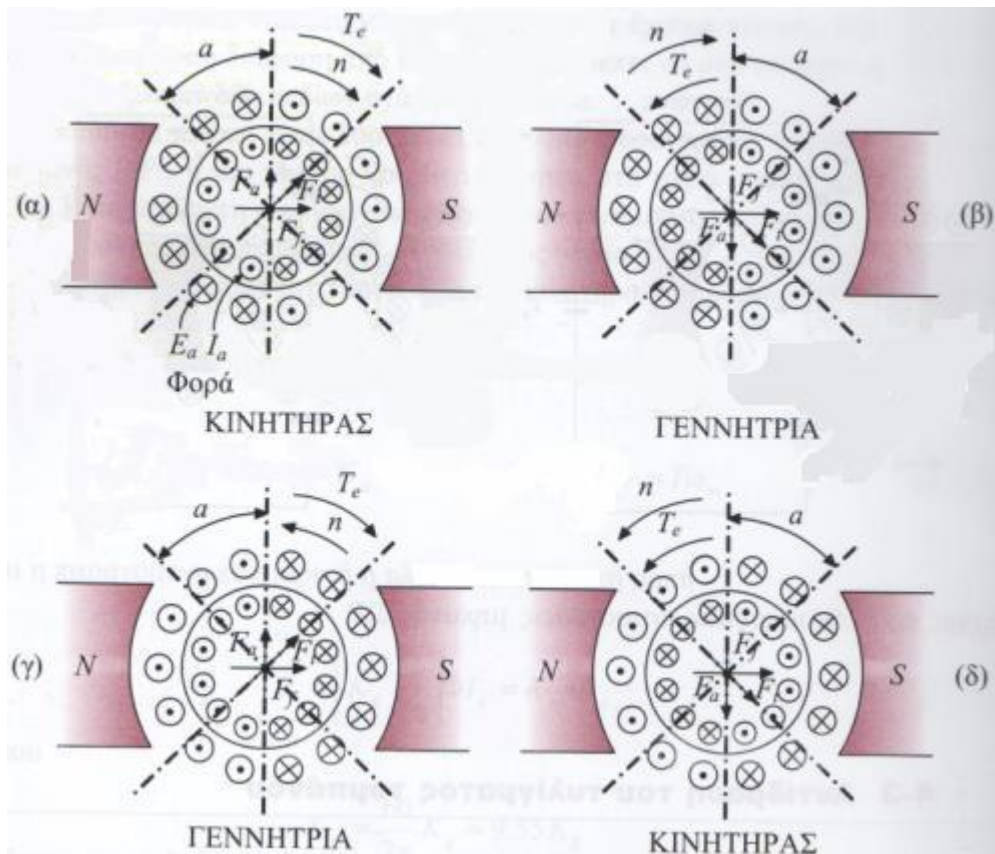
3.5 Αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου

Η μαγνητεγερτική δύναμη του τυλίγματος τυμπάνου αλληλεπιδρά με την αντίστοιχη μαγνητεγερτική δύναμη (Μ.Ε.Δ.) του τυλίγματος διέγερσης, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής.



Πυρήνας από επαγωγικό τύμπανο [11]

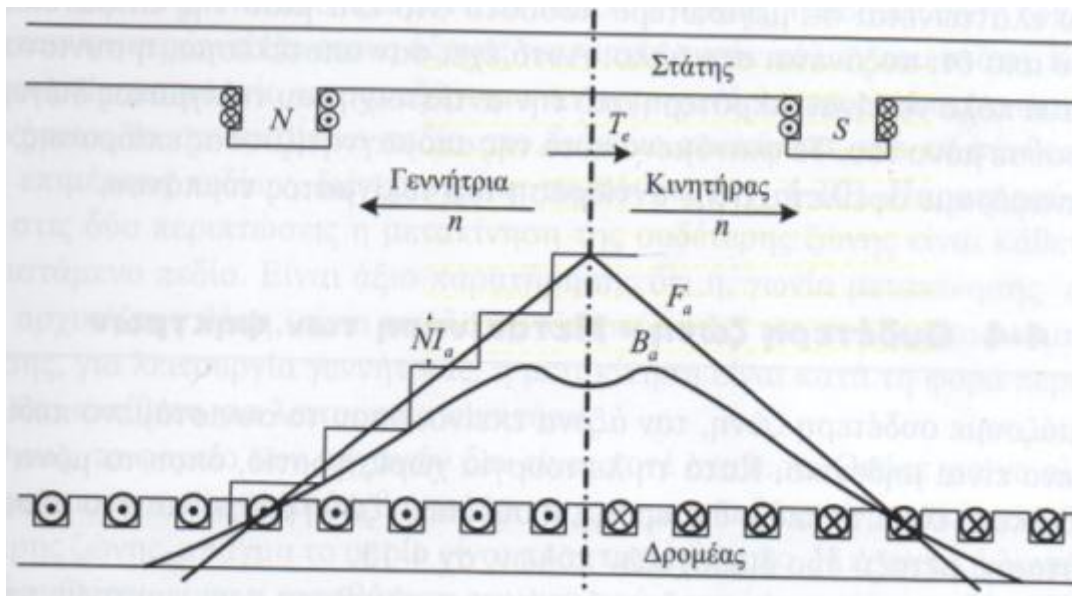
Η επίδραση αυτή της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου στην κύρια ροή του πεδίου διέγερσης, είναι γνωστή ως αντίδραση τυμπάνου (armature reaction).



Αλληλεπίδραση πεδίων διέγερσης-τυμπάνου [4]

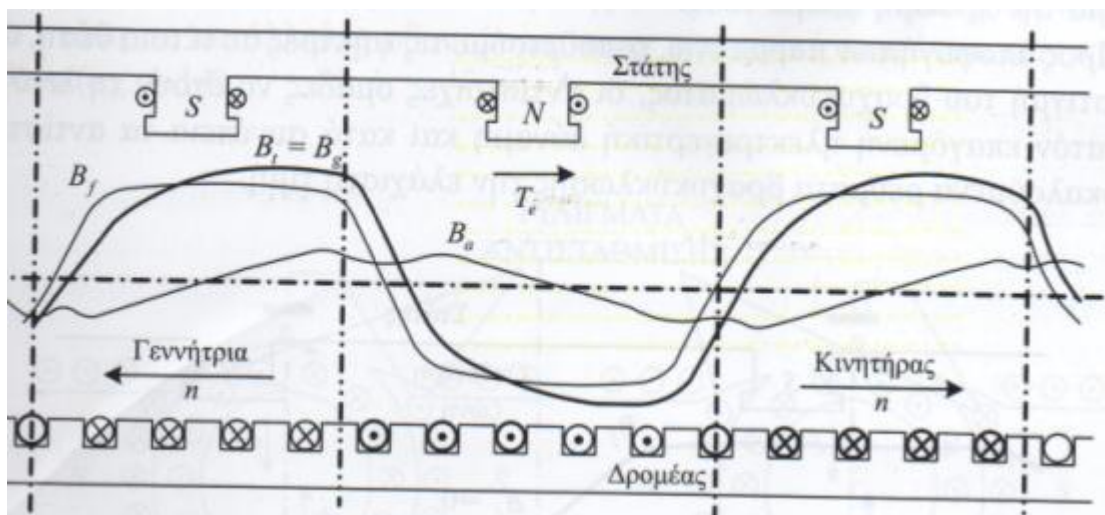
Παρατηρώντας την αλληλεπίδραση των πεδίων διέγερσης-τυμπάνου, στην παραπάνω εικόνα, βλέπουμε ότι οι κατανομές των Μ.Ε.Δ. , στις περιπτώσεις (α)-(γ) και (β)-(δ) , είναι απόλυτα όμοιες, υπό την προϋπόθεση ότι τα αντίστοιχα ρεύματα καθώς και ο αριθμός των ελιγμάτων είναι ίσα. Η μόνη διαφορά είναι ότι, για τη λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα, το πεδίο του στάτη προηγείται πάντα του πεδίου του δρομέα, ενώ αντίθετα έπεται για τη λειτουργία της μηχανής ως γεννήτριας.

Επίσης, στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται το ανάπτυγμα μιας στοιχειώδους διπολικής μηχανής Σ.Ρ. καθώς και οι αντίστοιχες χωρικές κατανομές της Μ.Ε.Δ. και της πυκνότητας ροής του τυλίγματος τυμπάνου για της περιπτώσεις (α) – (γ) της εικόνας παραπάνω ως προς την αλληλεπίδραση πεδίων διέγερσης-τυμπάνου.



Κατανομές Μ.Ε.Δ. και πυκνότητας ροής του τυλίγματος τυμπάνου στο διάκενο της μηχανής [4]

Παρατηρούμε ότι, η Μ.Ε.Δ. στην ιδανική περίπτωση έχει τριγωνική μορφή. Θετική δε Μ.Ε.Δ. σημαίνει ότι, οι μαγνητικές γραμμές εγκαταλείπουν (εξέρχονται) την επιφάνεια του δρομέα. Λόγω των έκτυπων πόλων του στάτη, η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος στην περιφέρεια του διακένου δεν είναι σταθερή. Η ανομοιομορφία αυτή, έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της κυματομορφής της πυκνότητας ροής σε σχέση με την αντίστοιχη Μ.Ε.Δ., ή ακριβέστερα την ελάττωση της στην περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο στο κέντρο της απόστασης αυτής, δηλαδή εκεί που η μαγνητική αντίσταση παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της.



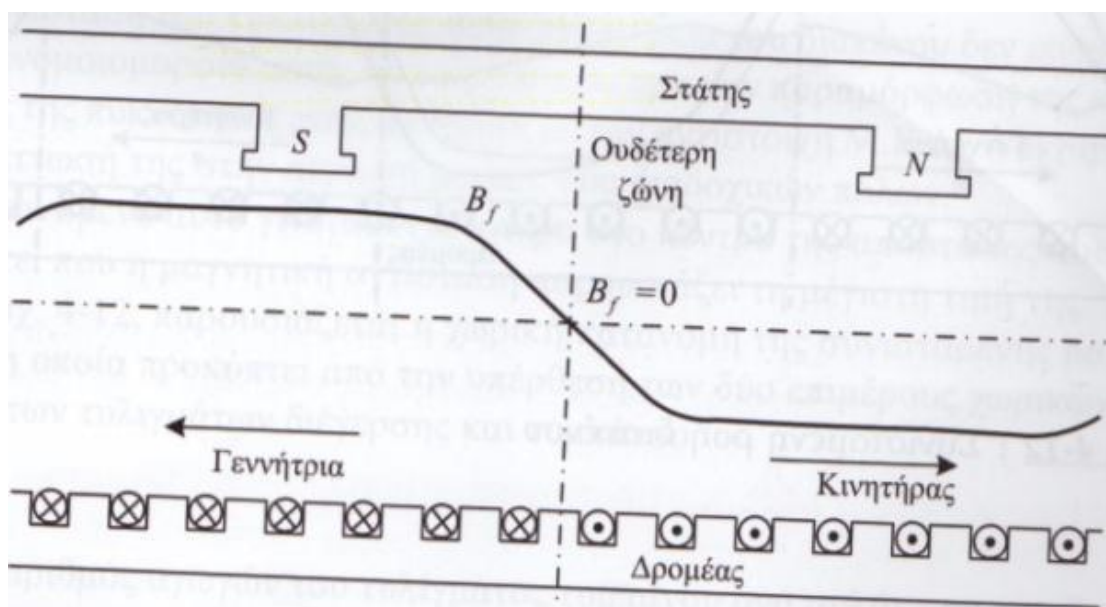
Συνισταμένη ροή διακένου [4]

Στην παραπάνω εικόνα, παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της συνισταμένης ροής διακένου, η οποία προκύπτει από την υπέρθεση των δύο επιμέρους χωρικών κατανομών, των τυλιγμάτων διέγερσης και τυμπάνου.

Λόγω του κορεσμού των σιδηρομαγνητικών υλικών , η πυκνότητα της ροής διακένου ελαττώνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό στο ένα μισό της επιφάνειας του πόλου από ότι αυξάνεται στο άλλο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα , η συνισταμένη ροή ανά πόλο να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του τυλίγματος διέγερσης, αν δρούσε μόνο του. Το φαινόμενο αυτό της απομαγνητίζουσας επίδρασης , οφείλεται στην αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου. [5]

3.6 Ουδέτερη ζώνη – Μετακίνηση των ψηκτρών

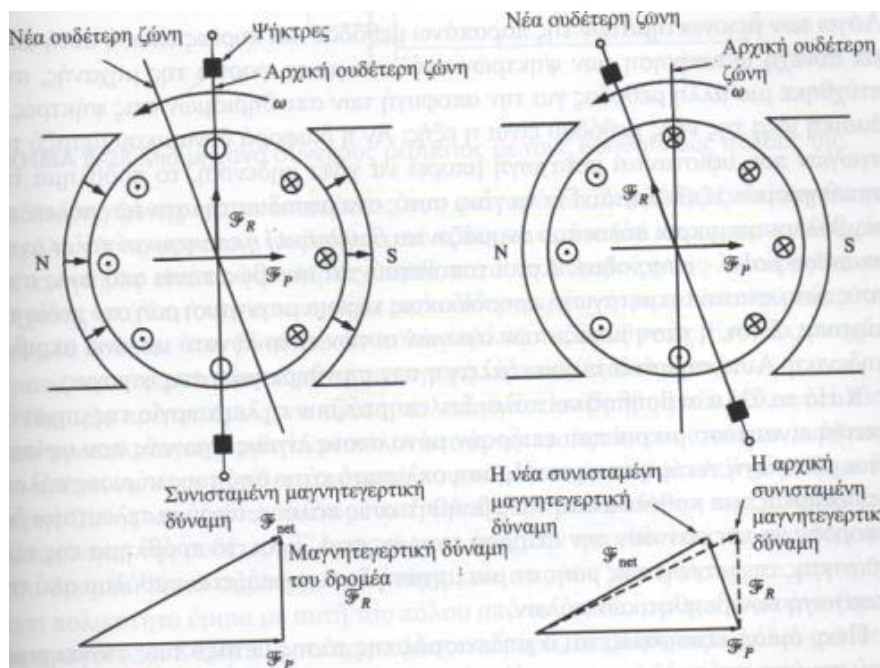
Ουδέτερη ζώνη ονομάζουμε , τον άξονα εκείνο, όπου το συνιστάμενο πεδίο στο διάκενο είναι μηδενικό. Κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο , όπου το μόνο πεδίο στο διάκενο είναι το πεδίο διέγερσης, η ουδέτερη ζώνη βρίσκεται στο μέσον της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων, το οποίο φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Ουδέτερη ζώνη διπολικής μηχανής [4]

Κατά την περιστροφή του δρομέα , έχουμε ολίσθηση των ψηκτρών επί των τομέων του συλλέκτη. Αποτέλεσμα της ολίσθησης αυτής , είναι το περιοδικό βραχυκύκλωμα δύο γειτονικών τομέων για κάθε εν επαφή ψήκτρα. Αλλά ανάλογα με το είδος της περιέλιξης του τυλίγματος τυμπάνου , σε δύο διαδοχικούς τομείς συνδέονται τα άκρα μιας ή περισσότερων σε σειρά συνδεδεμένων ομάδων, με αποτέλεσμα το στιγμιαίο βραχυκύκλωμα τους. Συνέπεια του γεγονότος αυτού , είναι η υπερθέρμανση των αντίστοιχων ομάδων , η απώλεια ενέργειας και η δημιουργία σπινθηρισμών στην επιφάνεια επαφής συλλέκτη – ψηκτρών , με αποτέλεσμα την πρόωρη φθορά τους. Προς αποφυγή των παραπάνω , τοποθετούμε τις ψήκτρες σε τέτοια θέση, ώστε τη στιγμή του βραχυκυκλώματος, οι αντίστοιχες ομάδες να έχουν τη λιγότερο δυνατή επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη και κατά συνέπεια τα αντίστοιχα προκαλούμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης την ελάχιστη τιμή. Είναι προφανές ότι, κατά τη λειτουργία της μηχανής χωρίς φορτίο , όπου στο διάκενο δρα μόνο το πεδίο διέγερσης, η φυσική θέση τοποθέτησης των ψηκτρών είναι στους άξονες των μαγνητικών πόλων του στάτη. Κατά τη λειτουργία με φορτίο και ανεξάρτητα αν η μηχανή λειτουργεί ως

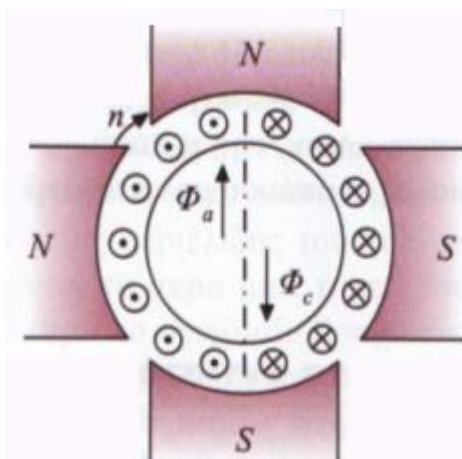
κινητήρας ή γεννήτρια, το συνιστάμενο πεδίο στο διάκενο προκύπτει από την σύνθεση των δύο επιμέρους πεδίων , διέγερσης και τυμπάνου. Γυρίζοντας πίσω τέσσερις εικόνες, σε αυτή της αλληλεπίδρασης πεδίων διέγερσης – τυμπάνου, παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις , η μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης είναι ανάλογη του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου. Επίσης για λειτουργία γεννήτριας, η μετακίνηση είναι κατά τη φορά περιστροφής και αντίθετη για λειτουργία κινητήρα. Όμως το φορτίο των μηχανών δεν είναι ποτέ σταθερό. Οπότε για να ελαττώσουμε τους σπινθηρισμούς , θα πρέπει να έχουμε μια διαρκή μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης, το οποίο είναι πρακτικά αδύνατο. Ως μέθοδος , χρησιμοποιείται ελάχιστα και μόνο σε μικρές μηχανές που περιστρέφονται αποκλειστικά προς τη μία κατεύθυνση. Αυτό συμβαίνει , επειδή είναι η πιο οικονομική λύση στο πρόβλημα για τόσο μικρές μηχανές.



Αριστερά : Η συνισταμένη Μ.Ε.Δ. σε μηχανή Σ.Ρ. με ψήκτρες στο κατακόρυφο επίπεδο **Δεξιά :** Η συνισταμένη Μ.Ε.Δ. σε μηχανή Σ.Ρ. όπου οι ψήκτρες έχουν μετακινηθεί σε νέα ουδέτερη ζώνη [10]

Συνεπώς, η πρακτική που ακολουθείται είναι η τοποθέτηση των ψηκτρών στην «φυσική» τους θέση (στον άξονα μαγνητικών πόλων) και η προσπάθεια παρεμπόδισης της μετακίνησης αυτής , εξουδετερώνοντας την επίδραση του τυλίγματος τυμπάνου με κατάλληλες μεθόδους. Σε μηχανές Σ.Ρ. με ισχύ άνω του ενός ίππου τοποθετούνται βοηθητικοί πόλοι, ενώ σε κινητήρες Σ.Ρ. μεγάλης ισχύος αλλά και σε κινητήρες Σ.Ρ. που υπόκεινται σε μεγάλες αλλαγές φορτίων και δουλεύουν σε υψηλές ταχύτητες, εκτός από τους βοηθητικούς πόλους, χρησιμοποιούμε και τα τυλίγματα αντιστάθμισης στους μαγνητικούς πόλους. [5] [9] [10]

3.7 Τυλίγματα βοηθητικών πόλων



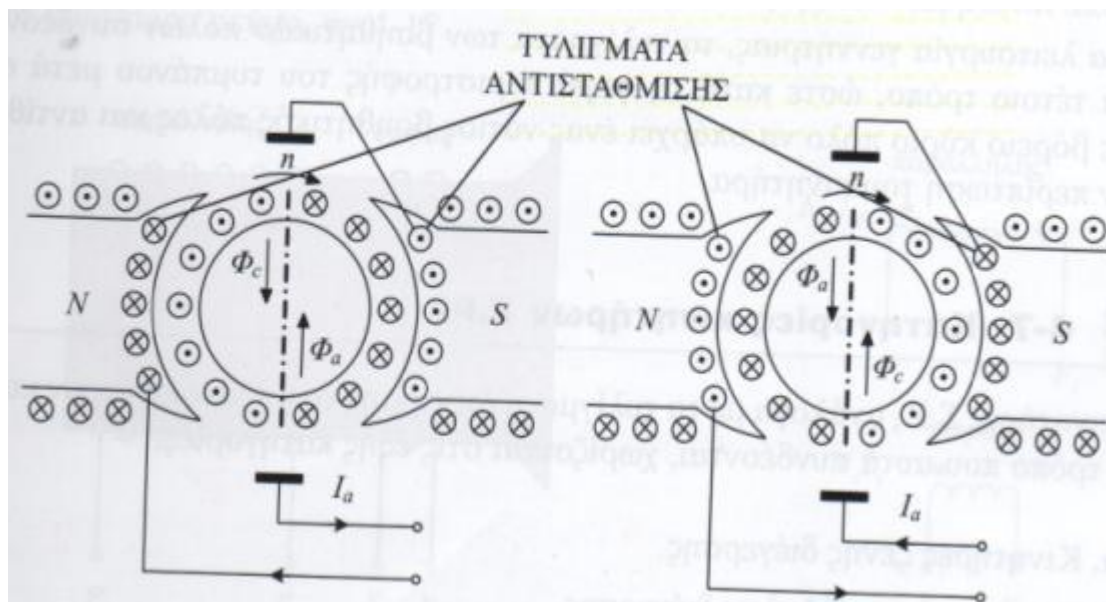
Τυλίγματα βοηθητικών πόλων [4]

Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής είναι ότι, αν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των αγωγών που υφίστανται μεταγωγή μπορεί να γίνει μηδενική, το πρόβλημα των σπινθηρισμών εξαλείφεται. Για να γίνει αυτό, στα μεσοδιαστήματα των πόλων παρεμβάλλονται μικροί πόλοι που ονομάζονται βοηθητικοί πόλοι. Αυτοί τοποθετούνται ακριβώς πάνω από τους αγωγούς που υφίστανται μεταγωγή, προσδίδοντας κάποια μαγνητική ροή στο πεδίο της μηχανής. Έτσι, η τάση μεταξύ των αγωγών αυτών είναι δυνατό να γίνει ακριβώς μηδενική. Αυτό σημαίνει τέλεια εξάλειψη των σπινθηρισμών στις ψήκτρες. Κατά τα άλλα, οι βοηθητικοί πόλοι δεν επηρεάζουν την λειτουργία της μηχανής, επειδή είναι τόσο μικροί που επιδρούν μόνο στους λίγους αγωγούς που υφίστανται μεταγωγή.

Η εξασφάλιση του μηδενισμού της τάσης για κάθε τιμή φορτίου μεταξύ των συγκεκριμένων τομέων του συλλέκτη, πραγματοποιείται με την σύνδεση σε σειρά των βοηθητικών πόλων και του δρομέα. Πιο συγκεκριμένα καθώς το φορτίο της μηχανής και το ρεύμα δρομέα αυξάνονται, το μέγεθος της μετακίνησης της ουδέτερης ζώνης και τα φαινόμενα υπέρτασης (σπινθηρισμοί) στις ψήκτρες αυξάνονται επίσης. Έτσι, η τάση μεταξύ των αγωγών που υφίστανται μεταγωγή μεγαλώνει, όμως η αυξημένη ροή, που προσδίδουν οι βοηθητικοί πόλοι, προκαλεί μεγαλύτερη τάση στους παραπάνω αγωγούς, η οποία είναι αντίθετη στην τάση που οφείλεται στη μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι οι επιπτώσεις από τη μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης και των σπινθηρισμών στις ψήκτρες εξαλείφονται για μεγάλο μέρος φορτίων.

Στον κινητήρα Σ.Ρ. η μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης γίνεται σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του δρομέα. Αυτό σημαίνει ότι η τάση των αγωγών που υφίστανται μεταγωγή, έχει πολικότητα όμοια με αυτή του πόλου τον οποίο προσεγγίζουν οι αγωγοί. Έτσι, για να προκαλέσουν οι βοηθητικοί πόλοι μια αντίθετη τάση, θα πρέπει να έχουν πολικότητα ίδια με του προηγούμενου κύριου πόλου. Δηλαδή, διαβάζοντας την παραπάνω εικόνα οι πόλοι έχουν ως εξής N, N βοηθητικός, S, S βοηθητικός. Στους περισσότερους κινητήρες μέσου μεγέθους και γενικών εφαρμογών, το πρόβλημα των σπινθηρισμών λύνεται με χρήση βοηθητικών πόλων και με σχετικά μικρό κόστος, όμως δεν διορθώνουν τον τρόπο κατανομής της μαγνητικής ροής κάτω από τις επιφάνειες των πόλων και έτσι δεν δίνεται κάποια λύση για το πρόβλημα εξασθένησης της ροής [9]

3.8 Μαγνητικοί πόλοι με τυλίγματα αντιστάθμισης



Τυλίγματα αντιστάθμισης διπολικής μηχανής [4]

Οι αγωγοί του τυλίγματος αντιστάθμισης (compensating winding) βρίσκονται στο στάτη σε κατάλληλες οδοντώσεις , στην εξωτερική επιφάνεια των κυρίων πόλων. Συνδέονται σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου και κατά τέτοιο τρόπο , ώστε κάθε αγωγός του τυλίγματος αντιστάθμισης να διαρρέεται σε κάθε στιγμή από ίσο και αντίθετης φοράς ρεύμα από εκείνο του γειτονικού αγωγού του τυλίγματος τυμπάνου. Αν τα δύο τυλίγματα έχουν τον ίδιο αριθμό αμπερελιγμάτων, η αντίδραση τυμπάνου σχεδόν μηδενίζεται, με αποτέλεσμα τη μη μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης. Το βασικότερο μειονέκτημα των τυλιγμάτων αντιστάθμισης, είναι το μεγάλο κόστος τους, καθώς είναι απαραίτητο να εισχωρήσουν στις επιφάνειες των πόλων. Επίσης σε κάθε μηχανή που διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης θα πρέπει να υπάρχουν και βοηθητικοί πόλοι, αφού μόνα τους δεν μπορούν να καταστείλουν τα φαινόμενα σπινθηρισμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις , οι βοηθητικοί πόλοι είναι δυνατό να μην είναι τόσο ισχυροί , γιατί δεν χρησιμοποιούνται για την διόρθωση της μετακίνησης της ουδέτερης ζώνης.

Εξαιτίας της μεγάλης δαπάνης που απαιτεί η εισαγωγή τυλίγματος αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο όταν το απαιτούν εξαιρετικά αυστηρές προδιαγραφές για τον κινητήρα. [5] [9]

3.9 Διακύμανση ταχύτητας

Ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, είναι η διακύμανση ταχύτητας (Speed Regulation) SR. Η εξίσωση που μας δίνει την διακύμανση ταχύτητας δίνεται στις παρακάτω σχέσεις , ανάλογα με το αν χρησιμοποιήσουμε rad/sec (σχέση 3.1.4) ή rpm/sec (Σχέση 3.1.5) :

$$SR = \frac{\omega_{nl} - \omega_{fl}}{\omega_{fl}} \times 100\% \text{ Σχέση 3.1.4 } \quad \text{ή} \quad SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\% \text{ Σχέση 3.1.5}$$

Όπου ω_{nl} ή n_{nl} η ταχύτητα του δρομέα χωρίς φορτίο σε rad ή rpm ανά δευτερόλεπτο αντίστοιχα και ω_{fl} ή n_{fl} η ταχύτητα του δρομέα με πλήρες φορτίο σε rad ή rpm ανά δευτερόλεπτο αντίστοιχα.

Η διακύμανση ταχύτητας δίνει μια πρόχειρη εικόνα για τη μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας ενός κινητήρα. Θετική τιμή της διακύμανσης ταχύτητας σημαίνει μείωση της ταχύτητας του κινητήρα κατά την αύξηση του φορτίου του, ενώ αρνητική τιμή σημαίνει αύξηση της ταχύτητας κατά την αύξηση του φορτίου. Η απόλυτη τιμή της διακύμανσης ταχύτητας δείχνει προσεγγιστικά το πόσο απότομη είναι η κλίση της καμπύλης ροπής - ταχύτητας. [9]

3.10 Διερεύνηση εξισώσεων του κινητήρα

Το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας δίνεται από την $I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a}$ Σχέση 3.1.6, όπου V_a η τάση τυλίγματος τυμπάνου και R_a η αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου.

Κατά την εκκίνηση του κινητήρα η τάση εξ επαγωγής E_a είναι μηδέν, και αυτό προκύπτει από την σχέση 3.1.1 δεδομένου ότι $\omega = 0$ αφού ο δρομέας είναι ακίνητος. Η απουσία αυτή της Α.Η.Ε.Δ., έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ρεύματος αρκετά μεγαλύτερου του αντίστοιχου ονομαστικού. Για συνήθεις κινητήρες με αρκετά καλή προσέγγιση ισχύει ότι $I_{a,εκ} = \frac{V_a}{R_a} \approx (7 \div 10)I_{a,ον}$ Σχέση 3.1.7 όπου $I_{a,εκ}$ το ρεύμα εκκίνησης και $I_{a,ον}$ το ονομαστικό ρεύμα τυμπάνου.

Για την αποφυγή υψηλών ρευμάτων εκκίνησης, συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου βοηθητική αντίσταση εκκίνησης, έτσι ώστε στην σχέση 3.1.7 η R_a κατά την εκκίνηση να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου και έτσι να μειώνεται και το ρεύμα στα επιτρεπτά όρια φόρτισης της μηχανής. Με την έναρξη της επιτάχυνσης του δρομέα, έχουμε σταδιακή αύξηση της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ. και έτσι σταδιακά μειώνουμε και την βοηθητική αντίσταση εκκίνησης. Με την αποκατάσταση των στροφών, η αντίσταση αυτή τίθεται εκτός λειτουργίας.

Μια άλλη, εξίσου καλή μέθοδος εκκίνησης, είναι η τροφοδοσία του κινητήρα μέσω τροφοδοτικού με δυνατότητα ρύθμισης του μεγέθους της τάσης V_a , ξεκινώντας από χαμηλή τιμή και σταδιακά αυξάνοντας την. Βέβαια και στις δύο περιπτώσεις, η ροπή εκκίνησης είναι χαμηλότερη.

Από τις σχέσεις 3.1.1 και 3.1.2 προκύπτει η σχέση για τις στροφές της μηχανής $n = \frac{V_a - I_a R_a}{K \Phi I_f}$

Σχέση 3.1.8 όπου I_f το ρεύμα διέγερσης.

Από τη σχέση 3.1.8 διαπιστώνουμε πως οι στροφές του κινητήρα εξαρτώνται από την τάση τροφοδοσίας, το ρεύμα και την αντίσταση τυμπάνου καθώς και το ρεύμα διέγερσης. Συνοπτικά, αυτό σημαίνει πως για τον έλεγχο του κινητήρα αρκεί να μεταβάλλουμε έναν από

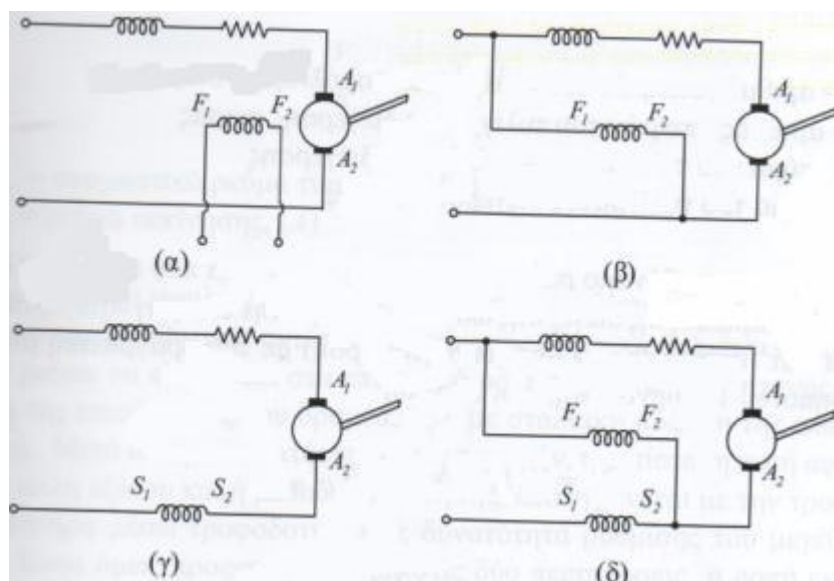
αυτούς τους παράγοντες σε συγκεκριμένη τιμή για να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, οι στροφές του κινητήρα είναι ανάλογες της τάσης τροφοδοσίας, άρα με την κατάλληλη διάταξη ανάμεσα στην πηγή και τον κινητήρα μπορούμε να αυξάνουμε ή να μειώνουμε την τάση τροφοδοσίας και κατά αντιστοιχία τις στροφές του κινητήρα. Επίσης, παρεμβάλλοντας κάποια μεταβλητή αντίσταση σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου, ελέγχουμε τον κινητήρα μέσω του αντιστρόφως ανάλογου με τις στροφές, ρεύματος τυμπάνου. Αυτή η μέθοδος ελέγχου, συνεπάγεται μεγάλες απώλειες χαλκού οπότε και δεν εφαρμόζεται στην πράξη, αντιθέτως με μηδαμινό κόστος ισχύος, μεταβάλλοντας το ρεύμα του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, παρεμβάλλοντας αντίσταση στον παράλληλο κλάδο, μπορούμε να ελαττώσουμε το διερχόμενο ρεύμα και κατ' επέκταση την ροή διακένου, με αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών. [5]

3.11 Κατηγορίες κινητήρων Σ.Ρ.

Για την απλοποίηση της σύγκρισης μεταξύ των κινητήρων συνεχούς ρεύματος διαφορετικού τύπου και για την ευκολότερη ανάλυση τους, η τάση εισόδου ενός κινητήρα θα θεωρείται σταθερή, εκτός και αν σημειώνεται το αντίθετο.

Ανάλογα με τα τυλίγματα διέγερσης τα οποία διαθέτουν και με τον τρόπο που αυτά συνδέονται, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες :

- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος Ξένης (ή ανεξάρτητης) Διέγερσης (separately excited dc motors)
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος Παράλληλης Διέγερσης (shunt dc motors)
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος Διέγερσης Σειράς (series dc motors)
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος Σύνθετης Διέγερσης (compounded dc motors)
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μόνιμο μαγνήτη (permanent - magnet dc motors)

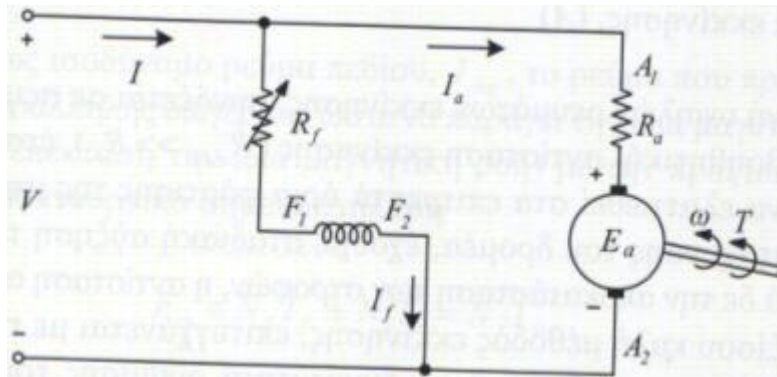


Κινητήρας Σ.Ρ. (α) Ξένης (β) Παράλληλης (γ) σε Σειρά (δ) Σύνθετης Διέγερσης [4]

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, στην ξένη διέγερση το τύλιγμα τροφοδοτείται από μία ξένη πηγή Σ.Ρ. (F1 - F2 στο κύκλωμα α). Στην παράλληλη διέγερση το τύλιγμα

διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το επαγωγικό τυλίγμα ($F_1 - F_2$ στο κύκλωμα β). Στην διέγερση σε σειρά το τυλίγμα συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τυλίγμα και συνεπώς διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα ($S_1 - S_2$ στο κύκλωμα γ). Και τέλος στην σύνθετη διέγερση , βλέπουμε ότι υπάρχουν δύο τυλίγματα το ένα παράλληλα και το άλλο σε σειρά με το επαγωγικό τυλίγμα (αντίστοιχα $F_1 - F_2$ και $S_1 - S_2$ στο κύκλωμα δ). [5] [9] [10]

3.11.1 Κινητήρες Σ.Ρ. Παράλληλης Διέγερσης



Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. Παράλληλης διέγερσης [4]

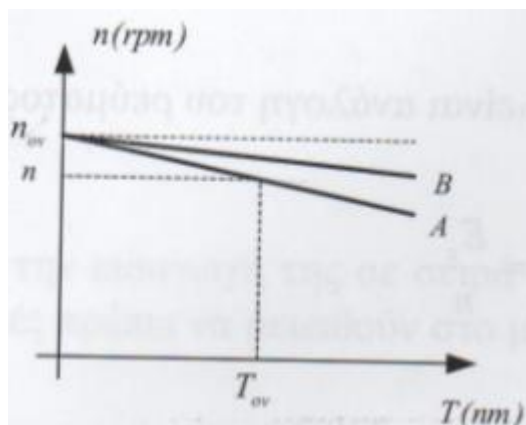
Το συνολικό ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο , είναι ίσο με το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου και της κύριας διέγερσης. Δηλαδή $I = I_a + I_f$

Σχέση 3.1.9

Σε έναν κινητήρα παράλληλης διέγερσης, με τυλίγματα αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, η ροή ανά πόλο του πεδίου διέγερσης, παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστη από το ρεύμα τυμπάνου και είναι επομένως σταθερή για σταθερό ρεύμα διέγερσης. Από την σχέση 3.1.2 , γνωρίζουμε ότι για σταθερή ροή υπάρχει αναλογία μεταξύ της παραγόμενης ροπής και του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου. Δηλαδή $T = K\Phi(I_f = \text{σταθερό})$ $I_a = K'I_a$ Σχέση 3.1.10 όπου $K' = K\Phi$ (Nm/A) Σχέση 3.1.11.

Για $\Phi = \text{σταθερό}$, από τις σχέσεις 3.1.8 και 3.1.10 προκύπτει ότι $n = \frac{V_a}{K\Phi} - \frac{R_a}{K\Phi} I_a = \frac{V_a}{K\Phi} - \frac{R_a}{K^2\Phi^2} T$ Σχέση 3.1.12

Επομένως , εάν ο κινητήρας στρέφεται με κάποιο συγκεκριμένο αριθμό στροφών, μια απότομη αύξηση φορτίου προκαλεί ελάττωση των στροφών και κατ' επέκταση της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ. , με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου, στην τιμή που απαιτείται από την αύξηση της ροπής. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει γραμμική εξάρτηση της χαρακτηριστικής στροφών – ροπής , η οποία απεικονίζεται ως καμπύλη Α στην παρακάτω εικόνα.



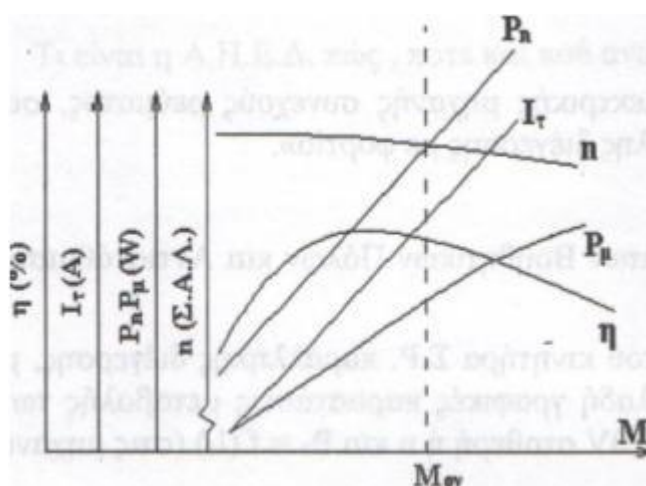
Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής [4]

Αν η μηχανή δε διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, υπάρχει μια μικρή εξασθένιση του πεδίου διέγερσης λόγω της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα η μεταβολή των στροφών να είναι μικρότερη από ότι στην περίπτωση που η μηχανή θα διέθετε τα τυλίγματα αυτά. Στην παραπάνω εικόνα η περίπτωση αυτή απεικονίζεται ως καμπύλη B και είναι εμφανής, η διαφορά της μεταβολής των στροφών σε σχέση με την καμπύλη A.

Επίσης η διακύμανση των στροφών, για μία ευρεία περιοχή μεταβολής του φορτίου, και αυτό αφορά και τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, είναι αρκετά μικρή και για το λόγο αυτό, οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης καλούνται και κινητήρες σταθερής ταχύτητας. Στην περίπτωση δε, αύξησης της ροπής φορτίου πέραν από μία ορισμένη τιμή, αν η μηχανή δε διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης, η αυξημένη αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου, είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντική αύξηση των στροφών και ενδεχομένως αστάθεια του κινητήρα.

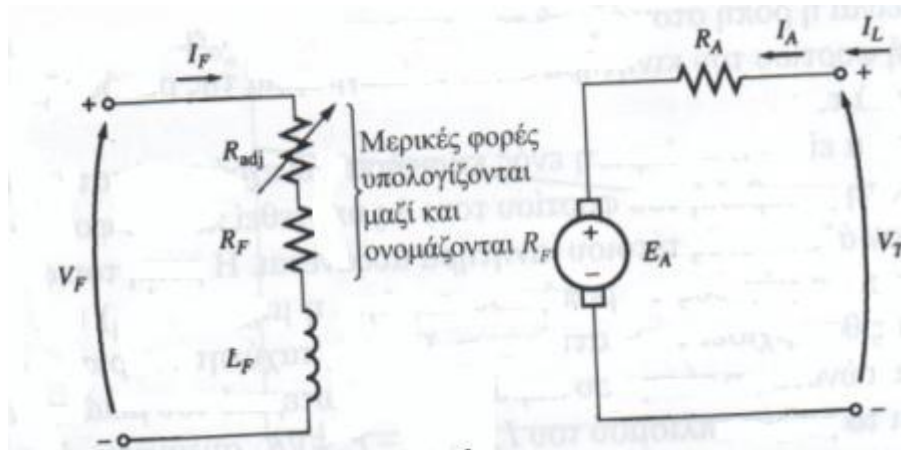
Οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν σχεδόν σταθερή ταχύτητα αλλά όχι υψηλή ροπή εκκίνησης όπως οι ανεμιστήρες, οι φυγοκεντρικές αντλίες κλπ [5]

Στην παρακάτω εικόνα έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε το πως επηρεάζονται διάφορα μεγέθη του κινητήρα συναρτήσει της ροπής του φορτίου



Χαρακτηριστική βαθμού απόδοσης (η), ρεύματος τυμπάνου (I_T), ισχύος εισόδου (P_{η}), ισχύος εξόδου (P_{μ}) και στροφών (n) συναρτήσει της ροπής (M) [11]

3.11.2 Κινητήρες Σ.Ρ. Ξένης διέγερσης

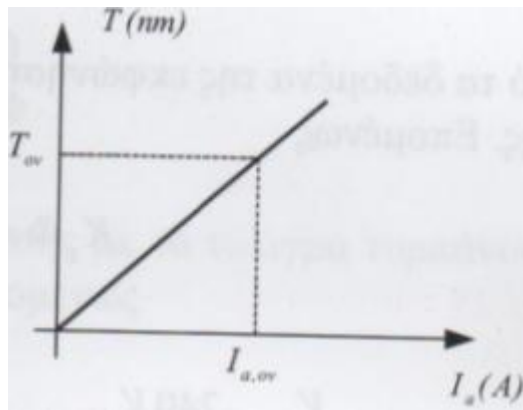


Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. Ξένης διέγερσης [10]

Αντίθετα με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, των οποίων το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου, οι κινητήρες Σ.Ρ. ξένης διέγερσης τροφοδοτούνται από ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης. Ο λόγος για τον οποίο η εισαγωγή αυτών των κινητήρων αρχίζει με την αναφορά στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, είναι λόγω του ότι και οι δύο αυτές κατηγορίες, αν έχουμε ως κοινό δεδομένο ότι η τάση διέγερσης τους είναι σταθερή, τότε έχουν κοινές γραφικές παραστάσεις.

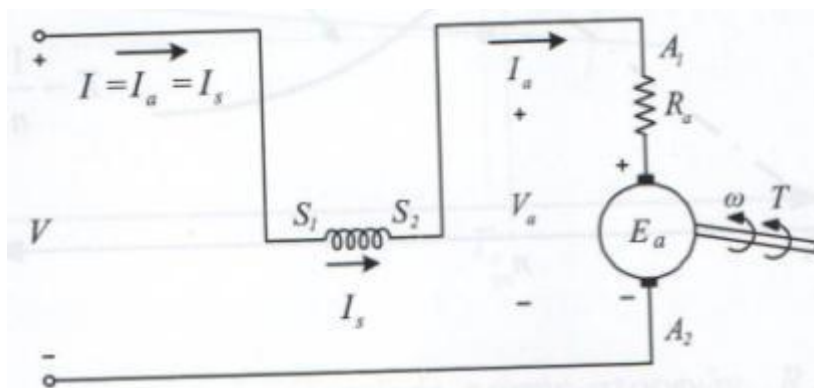
Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης (ή ανεξάρτητης) διέγερσης, έχουν μόνιμο τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος, το οποίο δίνει στο κύκλωμα την τάση διέγερσης, η οποία είναι πάντα σταθερή. Γνωρίζουμε ότι εάν η τάση διέγερσης είναι σταθερή, τότε είναι σταθερό και το ρεύμα διέγερσης. Συνεπώς διατηρείται σταθερή και η μαγνητική ροή οπότε η ροπή και το ρεύμα τυμπάνου βρίσκονται σε ευθεία αναλογία (σχέση 3.1.10). [11]

Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε την χαρακτηριστική ροπής και ρεύματος επαγωγικού τυμπάνου, η οποία ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι η τάση της διέγερσης είναι σταθερή, εξίσου και για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.



Χαρακτηριστική ροπής – ρεύματος τυμπάνου για σταθερή τάση διέγερσης [4]

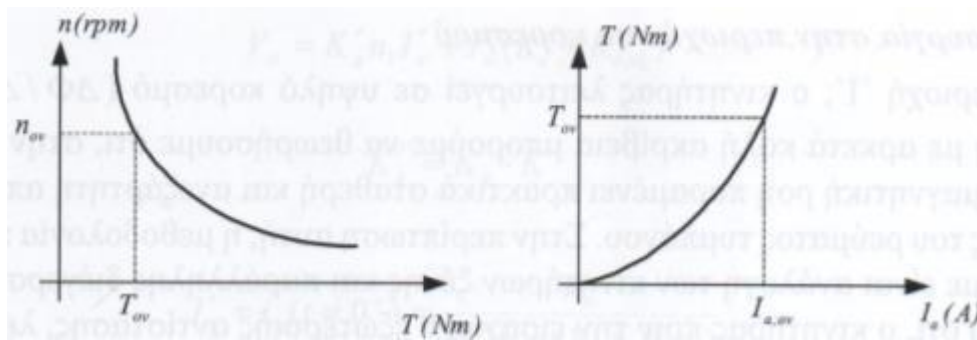
3.11.3 Κινητήρες Σ.Ρ. Διέγερσης σειράς



Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. διέγερσης σειράς [4]

Επειδή το τύλιγμα διέγερσης είναι σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο, το ρεύμα τυμπάνου δημιουργεί και το πεδίο διέγερσης του κινητήρα. Επομένως, με την αύξηση του φορτίου έχουμε και ανάλογη αύξηση της μαγνητικής ροής. Στη γραμμική χαρακτηριστική της καμπύλης μαγνήτισης, η ροή είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου. Επομένως σύμφωνα με την σχέση 3.1.10, στην περιοχή αυτή η ροπή θα είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος. Δηλαδή $T = K\Phi I_a = K' I_a^2$ Σχέση 3.1.13.

Στην περιοχή κορεσμού, οι μεταβολές της μαγνητικής ροής είναι μικρότερες για αντίστοιχες μεταβολές του ρεύματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα η εσωτερική ροπή να αυξάνει σε μικρότερη αναλογία από το τετράγωνο του ρεύματος. Οποσδήποτε όμως, οι μεταβολές αυτές είναι μεγαλύτερες από την πρώτη δύναμη του ρεύματος. Όταν η ζήτηση του φορτίου είναι μικρή, τότε και η αντίστοιχη ροή του πεδίου είναι μικρή. Στην περίπτωση αυτή, η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να πάρει αρκετά υψηλές τιμές, με καταστροφικές όμως συνέπειες. Αντίθετα για μεγάλα φορτία η ροή είναι αρκετά υψηλή, με αποτέλεσμα οι στροφές να είναι σημαντικά χαμηλές.

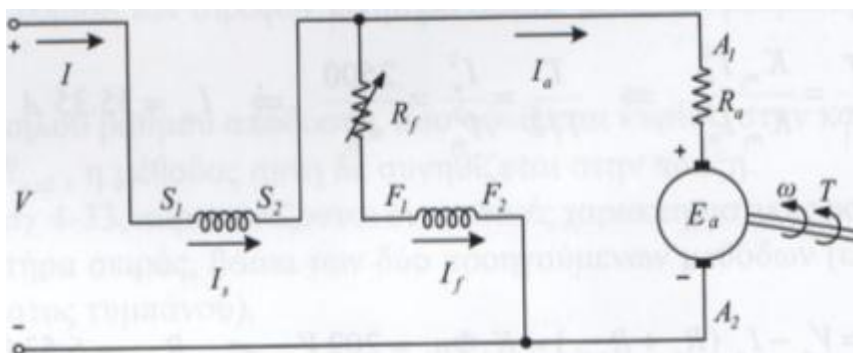


Αριστερά : χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής Δεξιά : χαρακτηριστική ροπής – ρεύματος ,για κινητήρα Σ.Ρ. διέγερσης σειράς [4]

Από τις παραπάνω χαρακτηριστικές, προκύπτει πως, οι κινητήρες σειράς δίνουν αρκετά υψηλές ροπές εκκίνησης. Χρησιμοποιούνται γενικά στην ηλεκτρική κίνηση, όπως σιδηρόδρομοι και οχήματα μεταφοράς, σε ανελκυστήρες φορτίων, γερανούς και γενικά όπου απαιτούνται υψηλές ροπές κατά την εκκίνηση, η μεταβαλλόμενη ταχύτητα δεν παίζει πρωταρχικό ρόλο και ο κινητήρας κάτω από φυσιολογικές συνθήκες φέρει ένα σημαντικό φορτίο.

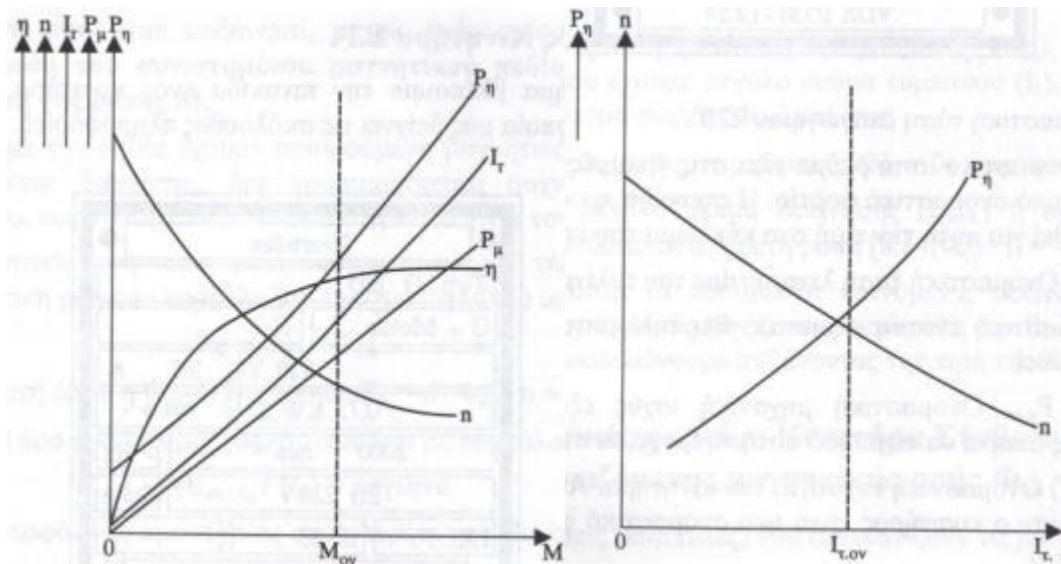
Είναι άξιο παρατήρησης, ότι κατά την εκκίνηση με φορτίο, ο κινητήρας σειράς απορροφά λιγότερο ρεύμα από τον κινητήρα παράλληλης διέγερσης. Μία ακόμη διαφορά τους είναι, ο αριθμός ελιγμάτων των τυλιγμάτων διέγερσης, γιατί αφού το τύλιγμα διέγερσης σειράς, βρίσκεται στον στάτη και διαρρέεται από το ρεύμα τυμπάνου, για να μας δώσει τα απαραίτητα αμπεριλίγματα, απαιτείται σχετικά μικρός αριθμός σπειρών, διατομής ανάλογης των αγωγών του τυλιγματος τυμπάνου, σε αντίθεση με το τύλιγμα της κύριας διέγερσης το οποίο διαθέτει κατά πολύ μεγαλύτερο αριθμό σπειρών μικρής διατομής και διαρρέεται από μικρότερο ρεύμα. [5]

3.11.4 Κινητήρας Σ.Ρ. Σύνθετης Διέγερσης



Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα Σ.Ρ. σύνθετης διέγερσης [4]

Οι κινητήρες αυτού του είδους, δίνουν υψηλότερες ροπές εκκίνησης σε σχέση με τους αντίστοιχους κινητήρες παράλληλης διέγερσης, αλλά σημαντικά χαμηλότερες από τους αντίστοιχους κινητήρες διέγερσης σειράς.



Χαρακτηριστικές κινητήρα Σ.Ρ. σύνθετης διέγερσης [11]

Ανάλογα δε με την πολικότητα σύνδεσης του τυλίγματος σειράς σε σχέση με εκείνη της κύριας διέγερσης, για την παραγόμενη ηλεκτρική ροπή ισχύουν τα εξής

- Προσθετική (ή αθροιστική) σύνδεση όπου η ροπή υπολογίζεται από την σχέση $T = K(\Phi_f + \Phi_s)I_a$ Σχέση 3.1.13
- Αφαιρετική (ή διαφορική) σύνδεση όπου η ροπή υπολογίζεται από την σχέση $T = K(\Phi_f - \Phi_s)I_a$ Σχέση 3.1.14

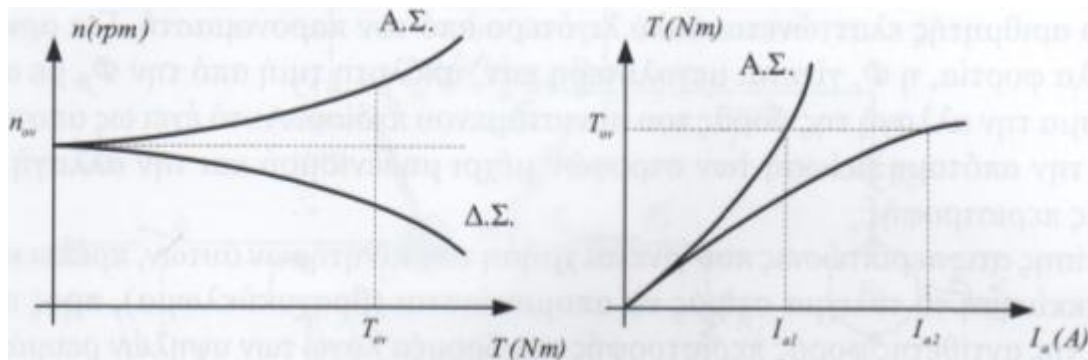
Όπου Φ_f είναι η ροή του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης και Φ_s είναι η ροή του τυλίγματος διέγερσης σειράς.

Από τις σχέσεις 3.1.13 και 3.1.14 προκύπτει ότι , στην προσθετική διάταξη ο κινητήρας αποδίδει αρκετά μεγαλύτερη ροπή, από ότι ο κινητήρας παράλληλης διέγερσης με το ίδιο ρεύμα τυμπάνου. Το αντίθετο ισχύει για τη διαφορική σύνδεση.

Οι κινητήρες σύνθετης διαφορικής σύνδεσης, χρησιμοποιούνται ελάχιστα στην πράξη και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις. Ο λόγος είναι ότι, μετά από ορισμένο φορτίο παρουσιάζουν μεγάλη αστάθεια λειτουργίας. Πράγματι σύμφωνα με τη σχέση είναι : $n = \frac{V_a - I_a(R_a + R_s)}{\Phi_f - \Phi_s}$

Σχέση 3.1.15.

Παρατηρούμε ότι, η αύξηση του φορτίου προκαλεί αύξηση των στροφών, καθόσον ο αριθμητής ελαττώνεται πολύ λιγότερο από τον παρονομαστή. Για αρκετά μεγάλα φορτία , η Φ_s γίνεται μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή από την Φ_f , με αποτέλεσμα , την απότομη μείωση των στροφών μέχρι μηδενισμού και την αλλαγή της φοράς περιστροφής. Επίσης στις περιπτώσεις που γίνεται χρήση των κινητήρων αυτών , πρέπει κατά την εκκίνηση το τύλιγμα σειράς να απομονώνεται (βραχυκύκλωμα), προς αποφυγή της αντίθετης φοράς περιστροφής του δρομέα λόγω των υψηλών ρευμάτων εκκίνησης, με συνέπεια τις αρκετά αυξημένες τιμές της ροής Φ_s . [5]

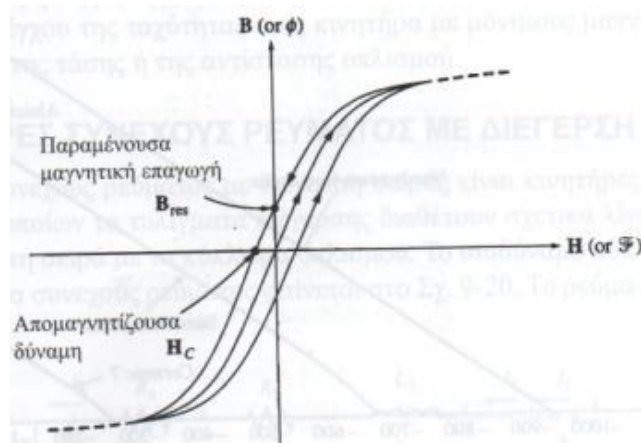


Αριστερά χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής Δεξιά χαρακτηριστική ρεύματος – ροπής κινητήρα Σ.Ρ. σύνθετης διέγερσης για Αθροιστική Σύνδεση και Διαφορική Σύνδεση [4]

3.11.5 Κινητήρες Σ.Ρ. με μόνιμους μαγνήτες

Στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες, το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη έχει αντικατασταθεί από μόνιμο μαγνήτη. Με τον τρόπο αυτό δεν μπορούμε να μεταβάλλουμε τη διέγερση με αποτέλεσμα ο έλεγχος της ταχύτητάς τους να γίνεται μόνο από το τύλιγμα του δρομέα μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας τους. Τέτοιου είδους κινητήρες σε μερικές εφαρμογές παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Κύρια χαρακτηριστικά των κινητήρων αυτών είναι ότι δεν έχουν ωμικές απώλειες στο στάτη και τα προβλήματα της μετάβασης είναι μειωμένα λόγω της μικρής τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του μαγνήτη. Επίσης, οι κινητήρες αυτοί έχουν μικρότερο όγκο στάτη λόγω του μικρότερου χώρου που καταλαμβάνει ο μαγνήτης σε σχέση με τα τυλίγματα χαλκού των κλασικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Επειδή αυτοί οι κινητήρες λειτουργούν χωρίς ρεύμα διέγερσης, δεν παρουσιάζουν απώλειες χαλκού. Ακόμη, αφού δεν διαθέτουν τυλίγματα διέγερσης είναι δυνατόν να έχουν και μικρότερο μέγεθος. Οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες είναι συνήθως μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε μικροεργαλεία, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οικιακές συσκευές, διεγέρτριες σύγχρονων γεννητριών κλπ, όπου το κόστος και ο χώρος για ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης δεν μπορεί να εξασφαλιστεί.

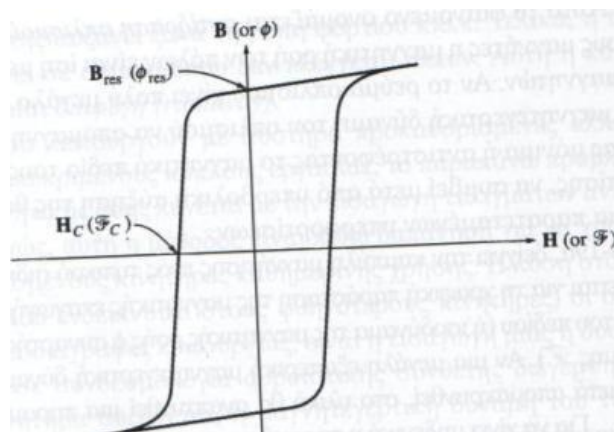
Όμως οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Οι μόνιμοι μαγνήτες δεν είναι δυνατόν να παράγουν τόσο μεγάλη μαγνητική επαγωγή, όσο ένα ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης και έτσι παρουσιάζει μικρότερη επαγόμενη ροπή ανά μονάδα ρεύματος οπλισμού, από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης με το ίδιο μέγεθος και την ίδια δομή. Επίσης αυτό το είδος κινητήρων παρουσιάζει και τον κίνδυνο απομαγνήτισης. Η μαγνητεγερτική δύναμη του οπλισμού αφαιρείται από την μαγνητεγερτική δύναμη των πόλων σε κάποια σημεία κάτω από τα πέλματα των πόλων και προστίθεται στη μαγνητεγερτική δύναμη των πόλων σε κάποια άλλα σημεία κάτω από τα πέλματα των πόλων, μειώνοντας την μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής. Στους κινητήρες Σ.Ρ. με μόνιμους μαγνήτες η μαγνητική ροή των πόλων είναι ίση με την παραμένουσα ροή των μαγνητών. Αν το ρεύμα οπλισμού γίνει πολύ μεγάλο, υπάρχει μια πιθανότητα η μαγνητεγερτική δύναμη του οπλισμού να απομαγνήτισει τους πόλους μόνιμα ή αντιστρέφοντας το μαγνητικό πεδίο τους. Η απομαγνήτιση μπορεί επίσης να συμβεί μετά από υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια παρατεταμένων υπερφορτίσεων.



Καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού [10]

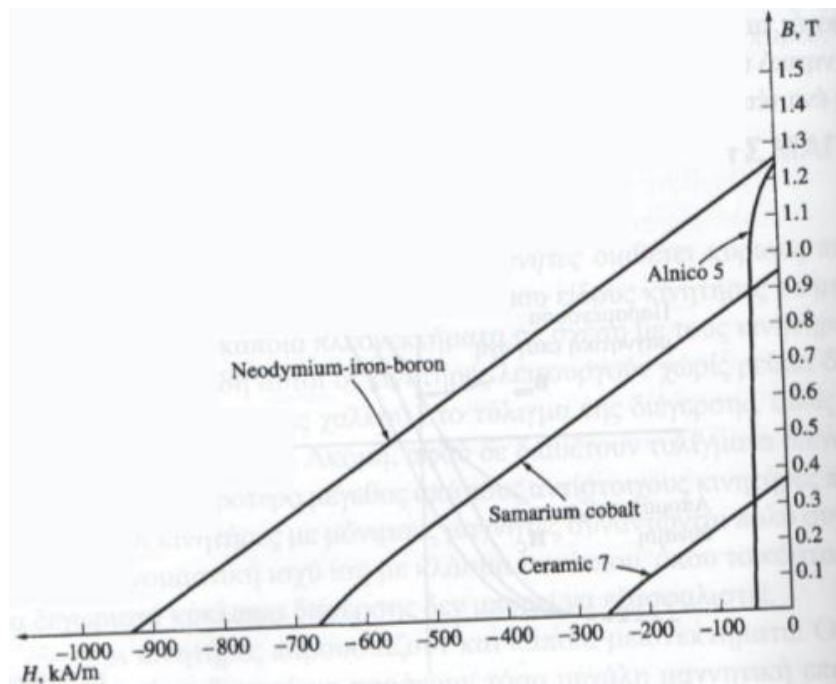
Η παραπάνω εικόνα δείχνει την καμπύλη μαγνήτισης ενός τυπικού σιδηρομαγνητικού υλικού. Πρόκειται για την γραφική παράσταση της μαγνητικής επαγωγής B συναρτήσει της έντασης του πεδίου H (ή ισοδύναμα της μαγνητικής ροής Φ συναρτήσει της μαγνητεγερτικής δύναμης F). Αν μία μεγάλη εξωτερική μαγνητεγερτική δύναμη εφαρμοστεί στο υλικό, θα αναπτυχθεί μια παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_{res} . Για να γίνει μηδενική η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή, είναι αναγκαία η εφαρμογή μιας απομαγνητίζουσας δύναμης H_C με φορά αντίθετη από τη φορά της μαγνητικής έντασης H , που εγκατέστησε αρχικά το μαγνητικό πεδίο. Στις συνηθισμένες εφαρμογές των ηλεκτρικών μηχανών, όπως στους δρομείς και στους στάτες, το σιδηρομαγνητικό υλικό που επιλέγεται θα πρέπει να έχει τις μικρότερες δυνατές B_{res} και H_C , επειδή ένα τέτοιο υλικό παρουσιάζει μικρές απώλειες υστέρησης.

Αντίθετα, το κατάλληλο υλικό για τους πόλους μαγνήτισης ενός κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες θα πρέπει να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη δυνατή παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_{res} και ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη δυνατή απομαγνητίζουσα δύναμη H_C . Η μεγάλη τιμή B_{res} παράγει μεγάλη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής, ενώ η μεγάλη τιμή της H_C σημαίνει ότι για την απομαγνήτιση των πόλων απαιτείται πολύ μεγάλο ρεύμα.



Καμπύλη μαγνήτισης κατάλληλου σιδηρομαγνητικού υλικού [10]

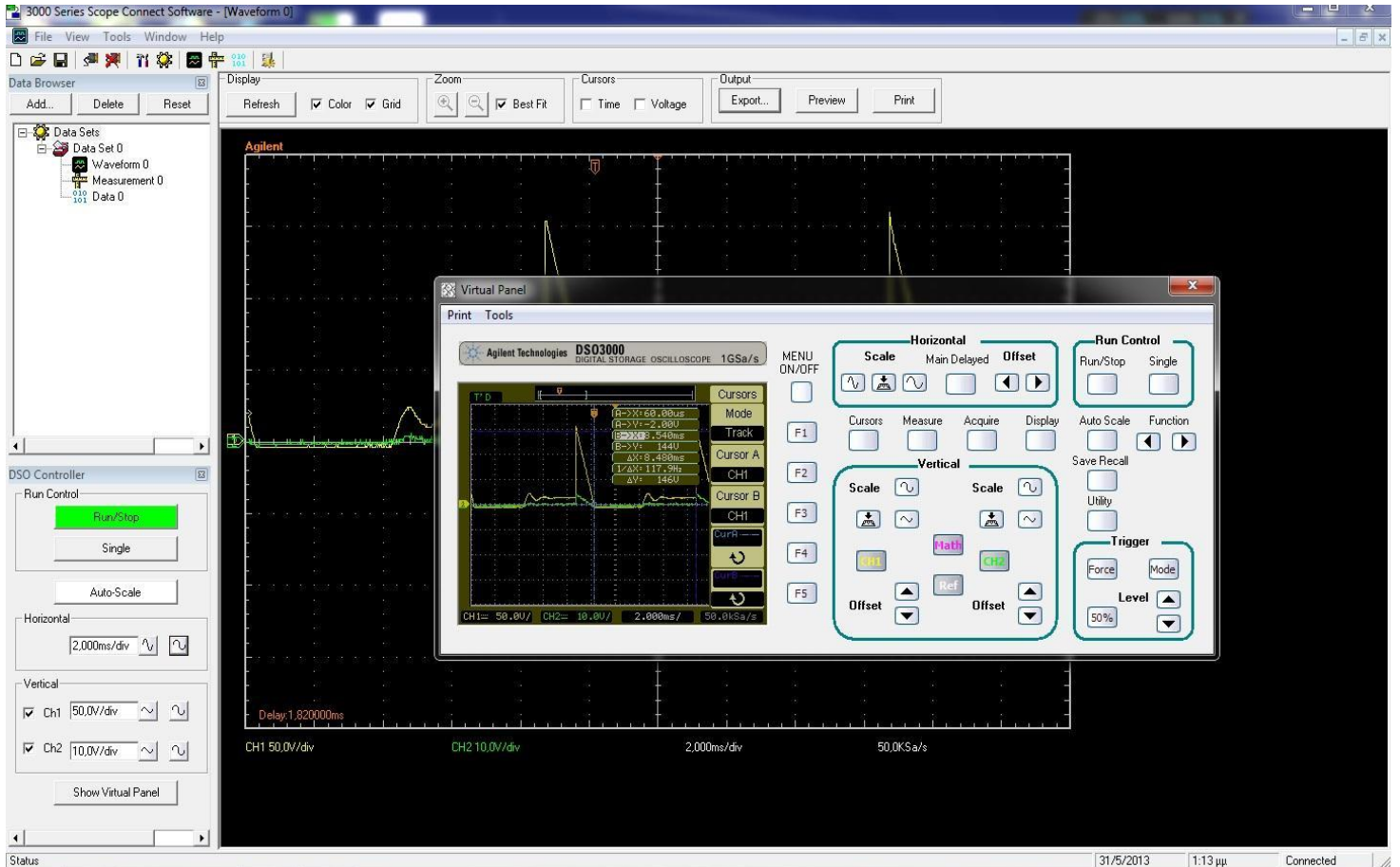
Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, το οποίο είναι κατάλληλο για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών. Φαίνεται η μεγάλη παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_{res} και η σχετικά μεγάλη απομαγνητίζουσα δύναμη H_C .



Καμπύλη μαγνήτισης στο δεύτερο τεταρτημόριο για τυπικά μαγνητικά υλικά [10]

Στην εικόνα παραπάνω βλέπουμε το δεύτερο τεταρτημόριο των καμπυλών μαγνήτισης για κάποια τυπικά μαγνητικά υλικά. Φαίνεται ότι οι μαγνήτες σπάνιων γαιών συνδυάζουν μεγάλη παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_{res} και μεγάλη απομαγνητίζουσα δύναμη H_C . Συνεπώς οι μαγνήτες των σπάνιων αυτών γαιών θα πρέπει να προτιμούνται για την κατασκευή των πόλων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες. [9]

Κεφάλαιο 4 : Πειραματικό Μέρος



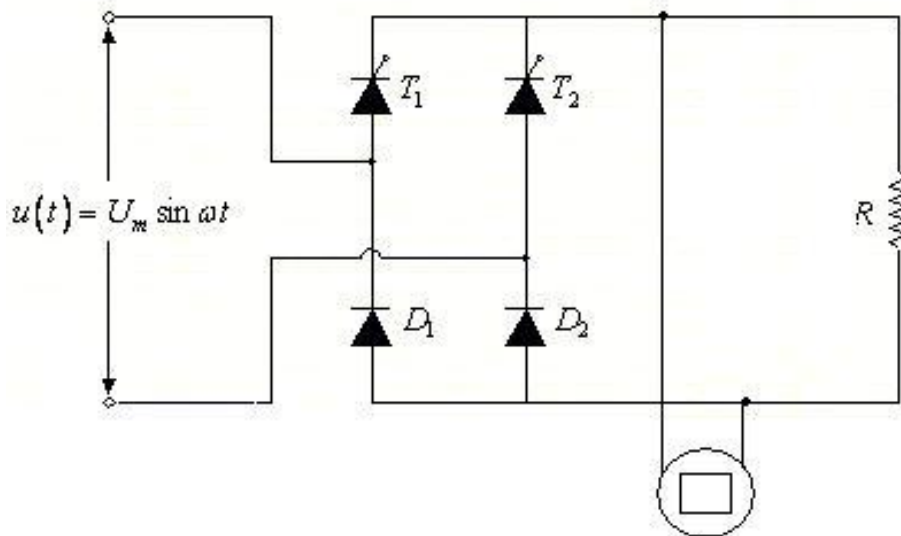
Τηλεχειρισμός του παλμογράφου κατά την διάρκεια του πειράματος

Στο πειραματικό σκέλος της εργασίας μας , δεν έγινε χρήση όλων των διατάξεων ή όλων των κατηγοριών των κινητήρων που αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια. Χρησιμοποιήθηκε, από τις διατάξεις, αυτή της μονοφασικής συμμετρικής ημιελεγχόμενης γέφυρας και από τους κινητήρες, ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Η παρατήρηση του ελέγχου της τάσης γινόταν από τον παλμογράφο 3062A της Agilent ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω του λογισμικού της Agilent, 3000 Series Scope Connect Software , είχαμε την δυνατότητα να χειριζόμαστε τον παλμογράφο δια μέσω του H/Y (τηλεχειρισμός του παλμογράφου όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα) και την δυνατότητα να αποθηκεύσουμε με screenshot την εικόνα που λαμβάναμε (το συγκεκριμένο μοντέλο παλμογράφου υποστηρίζει και άλλους τρόπους για την εξαγωγή της εικόνας).

Η συνδεσμολογία περιλάμβανε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το φορτίο της συμμετρικής μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας ήταν ωμικές αντιστάσεις για την παρακολούθηση της λειτουργίας της γέφυρας στην ασυνεχή αγωγή. Στην δεύτερη περίπτωση της συμμετρικής μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας ήταν επαγωγικό φορτίο, ένας

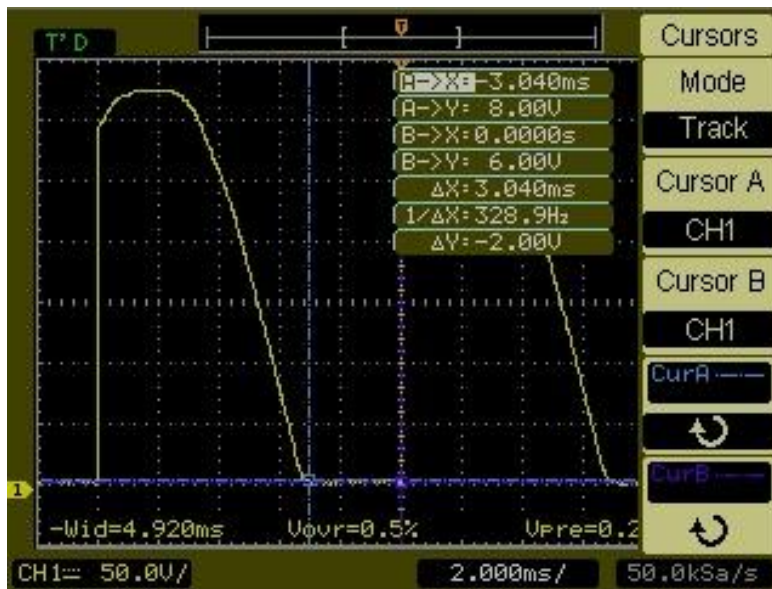
κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης που με τη σειρά του τροφοδοτούσε με μηχανική ενέργεια μία γεννήτρια συνδεδεμένη σε σειρά με ωμικό φορτίο.

Για την πρώτη περίπτωση, αυτή του ωμικού φορτίου, το κύκλωμα ήταν όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



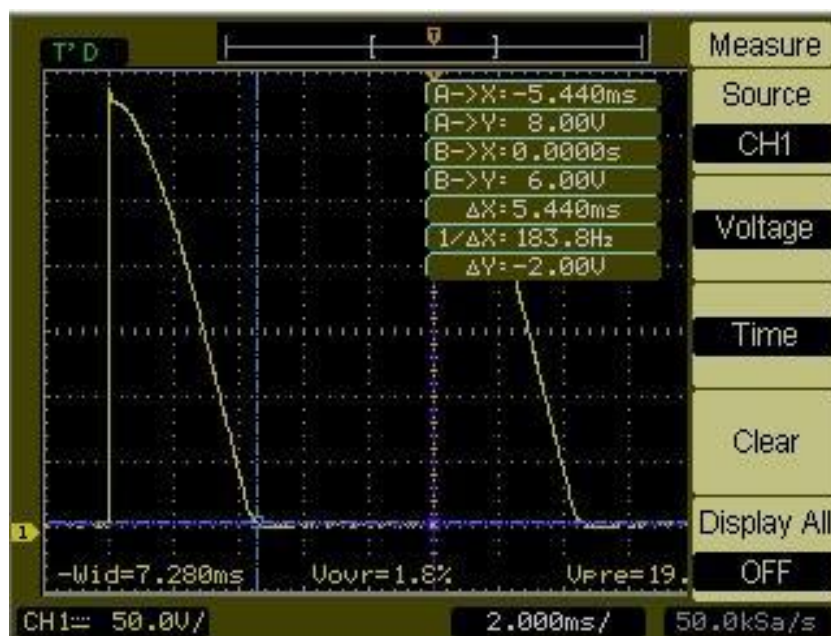
Κύκλωμα μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας με ωμικό φορτίο

Η εικόνα παρακάτω είναι ενδεικτική του τρόπου με τον οποίο υπολογίζαμε την γωνία έναυσης. Με χρήση του μενού Cursors του παλμογράφου βρίσκουμε με μεγάλη ακρίβεια την απόσταση από την σβέση της κυματομορφής στην χρονική στιγμή A στην έναυση αυτής την χρονική στιγμή B, η οποία για την παρακάτω εικόνα είναι όπως φαίνεται στο ΔX του μενού 3.04ms. Απο την εικόνα που έχουμε μέσω του παλμογράφου και την κλίμακα του χρόνου που έχουμε διαλέξει, βλέπουμε πως μια ημιπερίοδος αντιστοιχεί σε 5 divisions δηλαδή 10ms βάσει της κλίμακας των 2ms/division που έχουμε επιλέξει. Το μόνο που απομένει για να βρούμε την γωνία έναυσης που έχουμε θέσει στην γέφυρα, με ακρίβεια, είναι η εφαρμογή της απλής μεθόδου των τριών από όπου προκύπτει $\alpha = \frac{3.04msec}{10msec} * 180^\circ = 54,72^\circ$



Ημιελεγχόμενη γέφυρα με ωμικό φορτίο και γωνία έναυσης 54,72°

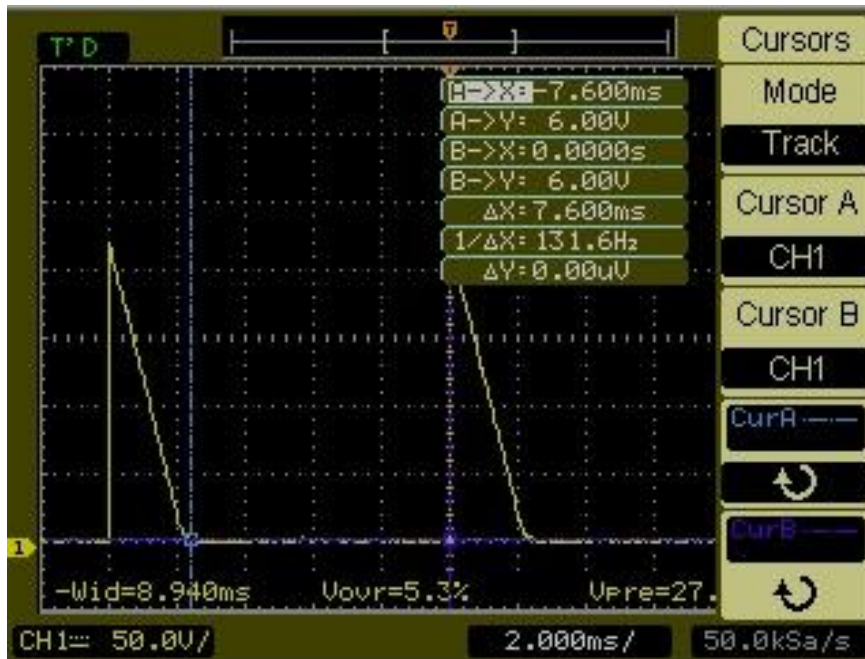
Αλλάζοντας και πάλι την γωνία έναυσης τυχαία προκύπτει η παρακάτω εικόνα



Ημιελεγχόμενη γέφυρα με ωμικό φορτίο και γωνία έναυσης 97,92°

Όπως και στην περίπτωση της προηγούμενης γωνίας έναυσης, έτσι και εδώ με τα δεδομένα που λαμβάνουμε δια μέσω του παλμογράφου η γωνία έναυσης υπολογίζεται με τη χρήση της απλής μεθόδου των τριών όπου $\alpha = \frac{5.44msec}{10msec} * 180^\circ = 97,92^\circ$.

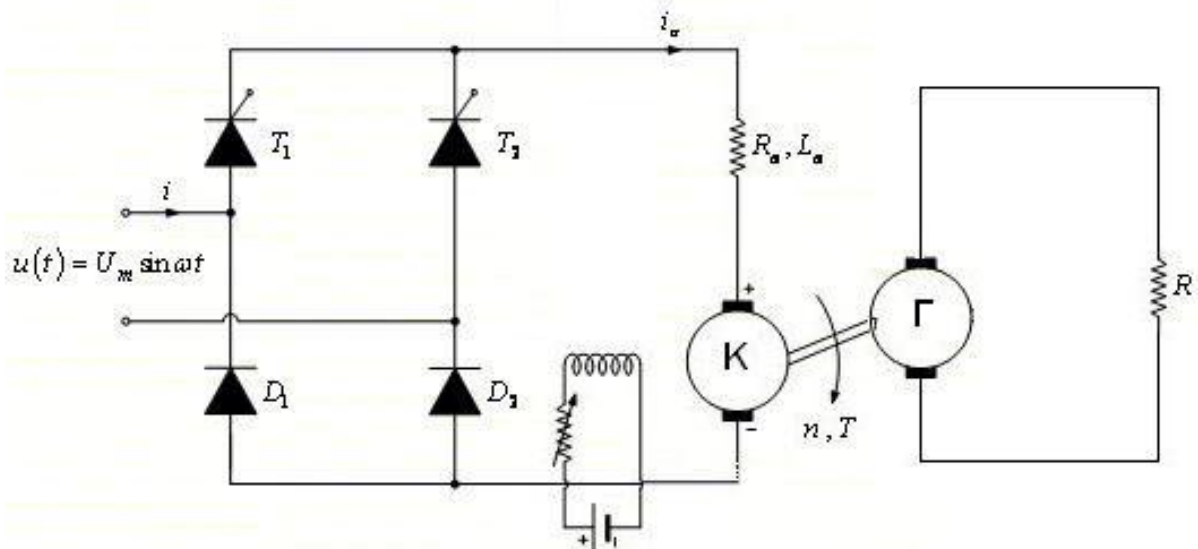
Ομοίως και στην τελευταία περίπτωση ωμικού φορτίου, που έχουμε αλλάξει τυχαία την γωνία έναυσης



Ημιελεγχόμενη γέφυρα με ωμικό φορτίο και γωνία έναυσης 136.8°

Από τα δεδομένα που λαμβάνουμε δια μέσω του παλμογράφου η γωνία έναυσης υπολογίζεται με τη χρήση της απλής μεθόδου των τριών, όπου $\alpha = \frac{7.6msec}{10msec} * 180^\circ = 136,8^\circ$.

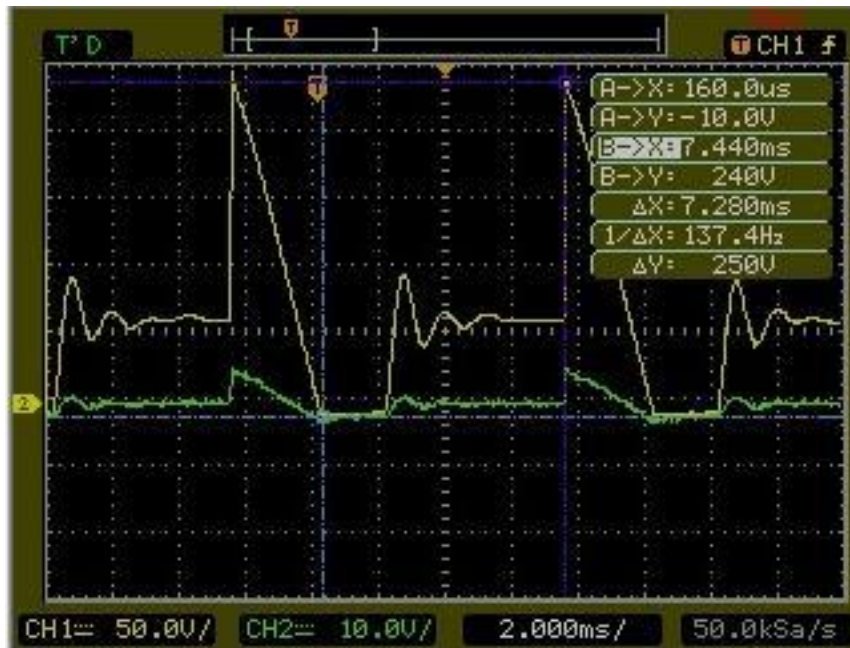
Η δεύτερη περίπτωση φορτίου, ήταν αυτή του επαγωγικού φορτίου. Αυτή τη φορά στα άκρα της εξόδου της μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας, τοποθετήθηκε ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Στα άκρα αυτού, συνδέθηκε γεννήτρια συνεχούς ρεύματος η οποία, με τη σειρά της τροφοδοτούσε ωμικό φορτίο (το ωμικό φορτίο που τροφοδοτούσε η ημιελεγχόμενη γέφυρα στην πρώτη περίπτωση).



Κύκλωμα μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας με επαγωγικό φορτίο

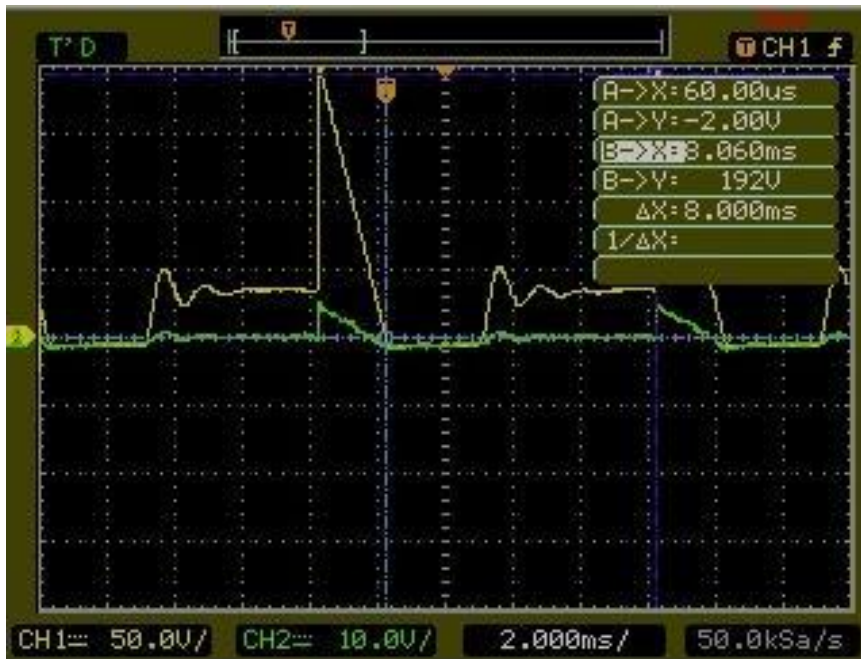
Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το κύκλωμα της μονοφασικής ημιελεγχόμενης γέφυρας με φορτίο κινητήρα συνεχούς ρεύματος Ξένης Διέγερσης. Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να

δούμε , όπως και στην πρώτη περίπτωση για το ωμικό φορτίο, την κυματομορφή της τάσης και να υπολογίσουμε την γωνία έναυσης.



Ημελεγχόμενη γέφυρα με επαγωγικό φορτίο και γωνία έναυσης 131.04°

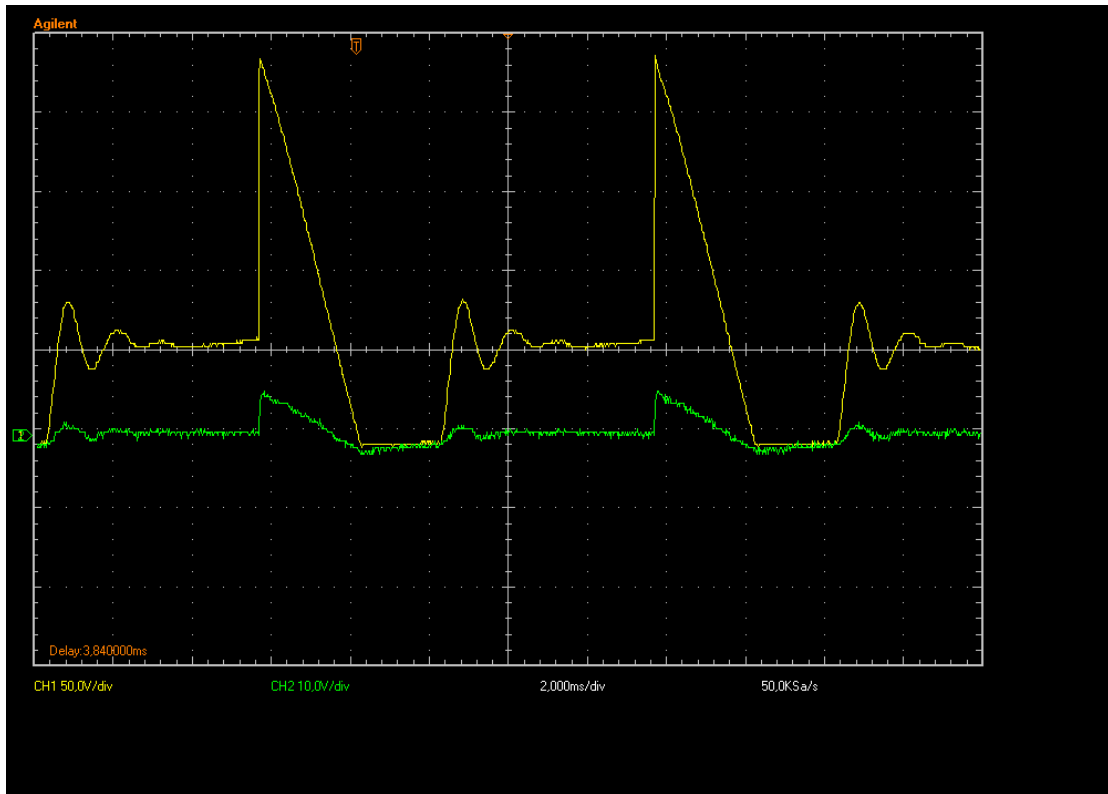
Στην περίπτωση του επαγωγικού φορτίου, με χρήση αμπεροτσιμπίδας, στο δεύτερο κανάλι (πράσινη κυματομορφή) εικονίζεται και το ρεύμα εξόδου της γέφυρας και μπορεί να υπολογιστεί δεδομένου ότι , η αμπεροτσιμπίδα είναι ήταν ρυθμισμένη στην κλίμακα 10mA/mV και μέσω του μενού Cursors θα μπορούσαμε να έχουμε τα κατάλληλα δεδομένα (ΔY στο 2^ο κανάλι και κλίμακα 2⁰⁰ καναλιού) για να το υπολογίσουμε με ακρίβεια. Όσο αφορά για τον υπολογισμό της γωνίας έναυσης για την παραπάνω εικόνα, η μεθοδολογία δεν διαφέρει από την πρώτη περίπτωση , οπότε από την ένδειξη ΔX της περιοχής που έχουμε επιλέξει και της οριζόντιας κλίμακας (κλίμακας χρόνου) , υπολογίζουμε πως $\alpha = \frac{7.28msec}{10msec} * 180^\circ = 131,04^\circ$.



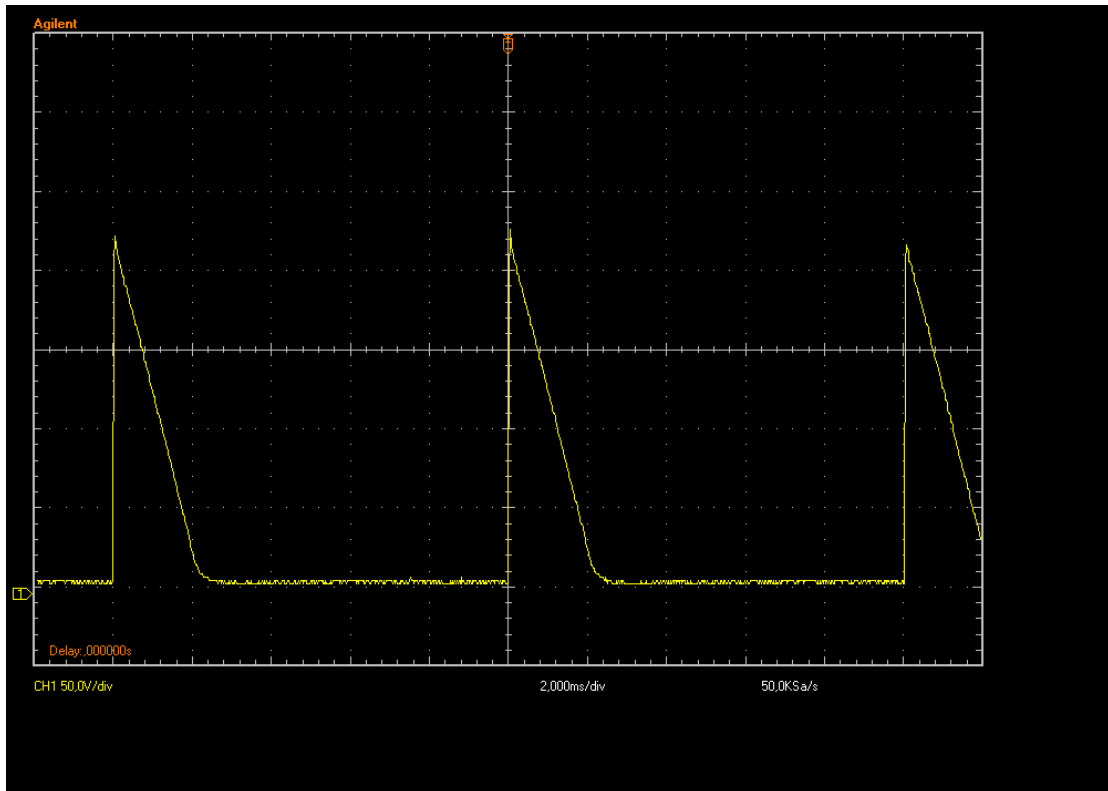
Ημιελεγχόμενη γέφυρα με επαγωγικό φορτίο και γωνία έναυσης 144°

Αντιστρόφως, και κατά πολύ χρησιμότερη πρακτική, θα μπορούσαμε με τα ίδια μέσα να πετύχουμε με ακρίβεια μια επιθυμητή γωνία έναυσης. Για παράδειγμα, αν υπολογίσουμε πως χρειαζόμαστε μια γωνία έναυσης 144° για τις ανάγκες μας, από την απλή μέθοδο των τριών και πάλι, προκύπτει πως $\Delta X = \frac{10ms}{180ms} * 144^\circ = 8msec$.

Άξια παρατήρησης είναι η παρακάτω παράθεση των φωτογραφιών για αρκετά κοντινή γωνία έναυσης, μεταξύ των δύο περιπτώσεων που αναφερθήκαν στο κεφάλαιο 4 αλλά και για την συνεχή και ασυνεχή λειτουργία της γέφυρας όπως αυτές αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.



Ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα με φορτίο κινητήρα και γωνία έναυσης $131,04^\circ$



Ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα με ωμικό φορτίο και γωνία έναυσης $136,8^\circ$

Βιβλιογραφία

Για τις ανάγκες της συγγραφής της παρούσας πτυχιακής εργασίας, έγινε χρήση των κειμένων που περιέχονται παρακάτω. Σε κάθε παράγραφο ή υπό-κεφάλαιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αναφέρεται εντός αγκυλών και σε γαλάζιο χρωματισμό, ο αύξων αριθμός όπως αυτός εξηγείται παρακάτω, του βιβλίου ή του διαδικτυακού τόπου ή των σημειώσεων μαθήματος σε έντυπη μορφή ή της διπλωματικής ή πτυχιακής εργασίας, που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή. Σε σημεία που απουσιάζει η σήμανση της βιβλιογραφίας το κείμενο είναι κατά αποκλειστικότητα των συγγραφέων της παρούσας πτυχιακής εργασίας χωρίς την χρήση κάποιας από τις πηγές που αναφέρονται παρακάτω, αποτελεί συμπέρασμα των συγγραφέων και ως τέτοιο πρέπει να αντιμετωπιστεί.

[1] Σημειώσεις εργαστηρίου ηλεκτρικών μετρήσεων (έντυπη μορφή) του ομότιμου καθηγητή του τμήματος ηλεκτρολογίας του Τ.Ε.Ι. Πειραιά Στυλιανού Μανωλά

[2] Wikipedia – άρθρο: Oscilloscope history
http://en.wikipedia.org/wiki/Oscilloscope_history

[3] Wikipedia – άρθρο: Oscilloscope types http://en.wikipedia.org/wiki/Oscilloscope_types

[4] Wikipedia – άρθρο: Digital storage oscilloscope
http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_storage_oscilloscope

[5] Ηλεκτρική κίνηση Παντελής Β. Μαλατέστας εκδόσεις Τζιόλα 3^η έκδοση

[6] Ηλεκτρική κίνηση Παντελής Β. Μαλατέστας Ηρακλής Βυλλιώτης εκδόσεις Τζιόλα

[7] Διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη και κατασκευή για ρύθμιση στροφών ενός DC κινητήρα (ισχύος 2kw) μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσεως» του Γρηγορίου Α. Ζαφειράκη της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, Οκτώβριος 2012 - <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/6590/1/DT2013-0035.pdf>

[8] Ηλεκτρονικά Ισχύος Στέφανος Ν. Μανιάς εκδόσεις Συμείων 6^η έκδοση

[9] Ηλεκτρικές Μηχανές Stephen J. Chapman εκδόσεις Τζιόλα 4^η έκδοση

[10] Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών Ι Γεωργίου Α. Πολλάλη εκδόσεις ΙΩΝ 5^η έκδοση

[11] Πτυχιακή εργασία με τίτλο «Εφαρμογή ηλεκτρικών μηχανών σε συστήματα ηλεκτρικής έλξης (ηλεκτρικός σιδηρόδρομος).» του Ασημινάκη Γεώργιου του τμήματος Μηχανολογίας της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 2012 - <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse2/stef/mhx/2012/AsiminakisGeorgios/attached-document-1333094272-643289-25363/Asiminakis2012.pdf>

Εικονογραφία

Για τις ανάγκες της συγγραφής της παρούσας πτυχιακής εργασίας, έγινε χρήση των εικόνων από πηγές που περιέχονται παρακάτω. Σε κάθε εικόνα της παρούσας πτυχιακής εργασίας,

αναφέρεται εντός αγκυλών και σε κόκκινο χρωματισμό, ο αύξων αριθμός όπως αυτός εξηγείται παρακάτω, του βιβλίου (μέσω σκάνερ) ή του διαδικτυακού τόπου ή των σημειώσεων μαθήματος σε έντυπη μορφή (μέσω σκάνερ) ή της διπλωματικής ή πτυχιακής εργασίας , που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή. Σε σημεία που απουσιάζει η σήμανση της εικονογραφίας η εικόνα είναι σχεδιασμένη από τους συγγραφείς της παρούσας πτυχιακής εργασίας ή αποτυπώθηκε από τους ίδιους κατά την διάρκεια πειράματος μέσω παλμογράφου.

[1] Agilent 3000 Series Oscilloscopes User's and Service Guide

[2] The Impact of Digital Oscilloscope Blind Time on Your Measurements Application Note ROHDE&SCHWARZ

[3] Notes On Oscilloscopes - <http://www.eee.metu.edu.tr/~ee214/documents/NotesOnOscilloscopes.pdf>

[4] Ηλεκτρική κίνηση Παντελής Β. Μαλατέστας εκδόσεις Τζιόλα 3^η έκδοση

[5] Ηλεκτρική κίνηση Παντελής Β. Μαλατέστας Ηρακλής Βυλλιώτης εκδόσεις Τζιόλα

[6] Ηλεκτρονικά Ισχύος Παντελής Β. Μαλατέστας Ηρακλής Βυλλιώτης εκδόσεις Τζιόλα

[7] Διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη και κατασκευή για ρύθμιση στροφών ενός DC κινητήρα (ισχύος 2kw) μέσω μετατροπέα υποβιβασμού τάσεως» του Γρηγορίου Α. Ζαφειράκη της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ ,Οκτώβριος 2012 - <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/6590/1/DT2013-0035.pdf>

[8] Ηλεκτρονικά Ισχύος Στέφανος Ν. Μανιάς εκδόσεις Συμεών 6^η έκδοση

[9] Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications του Austin Hughes εκδόσεις Newnes 3^η έκδοση

[10] Ηλεκτρικές Μηχανές Stephen J. Chapman εκδόσεις Τζιόλα 4^η έκδοση

[11] Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών Ι Γεωργίου Α. Πολλάλη εκδόσεις ΙΩΝ 5^η έκδοση