

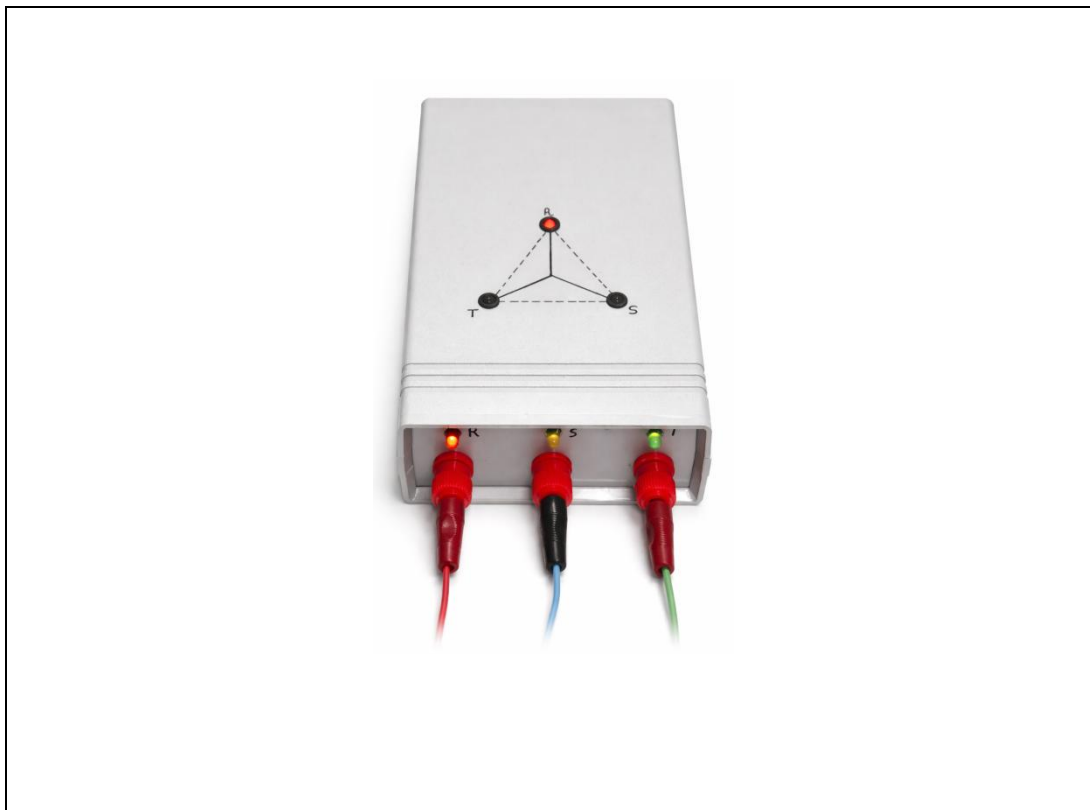


ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΗΣ  
ΔΙΑΔΟΧΗΣ ΦΑΣΕΩΝ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ»



Του φοιτητή  
Γεώργιου Καραμεσούτη  
Αρ. Μητρώου: 518051

Επιβλέπων  
Ιορδάνης Κιοσκερίδης  
Βαθμίδα: Καθηγητής

Ημερομηνία 23-01-2026

Σχεδίαση και υλοποίηση συσκευής ανίχνευσης της διαδοχής φάσεων σε τριφασικό δίκτυο  
25125

Γεώργιος Καραμεσούτης

Ιορδάνης Κιοσκερίδης

19-02-2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 23-01-2026

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γεώργιου Καραμεσούτη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη σύνδεση της θεωρητικής γνώσης της ηλεκτρολογίας και της ηλεκτρονικής με ένα πραγματικό τεχνικό πρόβλημα που εμφανίζεται συχνά σε βιομηχανικές και επαγγελματικές εγκαταστάσεις: τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας ενός τριφασικού συστήματος. Στην πράξη, η απώλεια μίας φάσης ή η λανθασμένη ακολουθία μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά λειτουργικά και μηχανικά προβλήματα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη αξιόπιστων διατάξεων ελέγχου.

Η εργασία προσεγγίζει το αντικείμενο με τρόπο που συνδυάζει τη φυσική ερμηνεία των τριφασικών φαινομένων με τη λογική επεξεργασία σημάτων. Η επιλογή της τεχνολογίας CMOS και της δομικής ανάλυσης ανά λειτουργικό block επιτρέπει τη συστηματική κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος, από την είσοδο των φάσεων έως την τελική οπτική ένδειξη.

Παράλληλα, δίνεται έμφαση στη διαδικασία της υλοποίησης, ώστε η θεωρία να μεταφράζεται σε πραγματικό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Η κατασκευή της πλακέτας, η συναρμολόγηση και ο έλεγχος της διάταξης αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της εκπαιδευτικής αξίας της εργασίας, αναδεικνύοντας τη σημασία της ακρίβειας, της μεθοδολογίας και της τεχνικής κρίσης στον χώρο της εφαρμοσμένης μηχανικής.

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη, ανάλυση και υλοποίηση μιας διάταξης ανίχνευσης παρουσίας και ακολουθίας φάσεων σε τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης. Στόχος της διάταξης είναι η αναγνώριση της σειράς διαδοχής των φάσεων (R–S–T ή R–T–S) και η παροχή άμεσης οπτικής ένδειξης της φοράς περιστροφής του αντίστοιχου τριφασικού ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτή σχετίζεται με τη λειτουργία ηλεκτροκινητήρων και βιομηχανικών φορτίων.

Η υλοποίηση βασίζεται σε ολοκληρωμένα λογικά κυκλώματα τεχνολογίας CMOS και διακριτά ηλεκτρονικά στοιχεία, χωρίς τη χρήση μικροελεγκτή ή λογισμικού. Τα σήματα των τριών φάσεων λαμβάνονται από το τριφασικό δίκτυο και, μέσω κυκλωμάτων περιορισμού ρεύματος και πυκνωτικής σύζευξης, μετατρέπονται σε παλμούς χαμηλής ισχύος. Στη συνέχεια οδηγούνται σε λογικό κύκλωμα ανίχνευσης (flip-flops τύπου D και πύλες NAND με υστέρηση), το οποίο προσδιορίζει τη χρονική σειρά άφιξης των παλμών.

Το αποτέλεσμα της ανίχνευσης σταθεροποιείται μέσω κυκλώματος χρονικής ολοκλήρωσης και οδηγεί κύκλωμα οπτικής ένδειξης, όπου ένας ανεξάρτητος ταλαντωτής και ένας απαριθμητής CD4017 παράγουν κυκλική ακολουθία τριών LED. Η φορά της φωτεινής κίνησης αντιστοιχεί άμεσα στη δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη ακολουθία φάσεων. Τέλος, περιγράφεται η κατασκευή της τυπωμένης πλακέτας με τη μέθοδο μεταφοράς toner χωρίς θερμότητα (cold toner transfer).

# «3 PHASE SEQUENCE DETECTOR»

«GEORGE KARAMESOUTIS»

## **Abstract**

This diploma thesis presents the design, analysis and implementation of a device for detecting the presence and phase sequence in a three-phase alternating current system. The purpose of the device is to identify the order of phase succession (R–S–T or R–T–S) and to provide a direct visual indication of the corresponding direction of rotation of the three-phase electrical field, which is directly related to the operation of three-phase electric motors and industrial loads.

The implementation is based exclusively on CMOS logic integrated circuits and discrete electronic components, without the use of a microcontroller or software. The three phase voltages are taken directly from the three-phase supply and, through current-limiting and capacitive coupling networks, are converted into low-power timing pulses. These signals are then processed by a sequence detection logic stage, based on D-type flip-flops and Schmitt-trigger NAND gates, which determines the temporal order of arrival of the phase pulses.

The detection result is stabilised by a time-integrating circuit and is used to control a visual indication stage. An independent oscillator and a CD4017 decade counter generate a cyclic sequence that drives three LEDs arranged in a triangular configuration. The direction of the illuminated sequence corresponds directly to the clockwise or counter-clockwise phase sequence of the three-phase system.

Finally, the construction of the printed circuit board is presented using the cold toner transfer method, which enables low-cost and accurate fabrication. The developed device is intended for educational and indicative use, as well as for preliminary checking of phase presence and phase sequence in three-phase installations.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών μου και αποτελεί το επιστέγασμα της ακαδημαϊκής και τεχνικής γνώσης που αποκόμισα κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, για την καθοδήγηση, τις επιστημονικές παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Επιπλέον, ευχαριστώ το διδακτικό και εργαστηριακό προσωπικό του Τμήματος για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και τα οποία συνέβαλαν ουσιαστικά στην υλοποίηση της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους ανθρώπους του προσωπικού μου περιβάλλοντος για τη στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Ευχαριστίες .....	vi
Περιεχόμενα .....	vii
Κατάλογος Σχημάτων .....	x
Κατάλογος Εικόνων .....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Ιστορική Αναδρομή των τριφασικών συστημάτων και της ακολουθίας φάσεων .....	1
1.3 Επιλογή τεχνολογίας CMOS και χαρακτηριστικά διεπαφής.....	4
1.4 Βασικά λογικά ολοκληρωμένα κυκλώματα CMOS της διάταξης.....	7
1.4.1 Ολοκληρωμένο CD4013 – Διπλό Flip-Flop τύπου D .....	8
1.4.2 Ολοκληρωμένο CD4093 – Τετραπλή πύλη NAND με είσοδο Schmitt Trigger .....	9
1.4.3 Ολοκληρωμένο CD4049 – Εξαπλός αναστρέφων buffer και οδηγός TTL .....	10
1.5 Δομική προσέγγιση της εργασίας.....	11
1.6 Εκπαιδευτικός και πρακτικός χαρακτήρας.....	12
Κεφάλαιο 2ο: Τριφασικά Συστήματα Εναλλασσόμενης Τάσης .....	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης από μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.....	13
2.2.1 Ημιτονοειδής μορφή της επαγόμενης τάσης .....	14
2.2.2 Φυσική σημασία του φαινομένου.....	14
2.3 Παραγωγή Τριφασικής Τάσης .....	14
2.4 Αλληλένδετα τριφασικά συστήματα .....	18
2.5 Ακολουθία φάσεων στο Τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης.....	21
2.5.1 Δεξιόστροφοι (ίδια φυσική φορά).....	21
2.5.2 Αριστερόστροφοι (αντίστροφη φορά).....	21
2.6 Λειτουργία τριφασικών ηλεκτροκινητήρων.....	23
2.6.1 Γενική αρχή λειτουργίας .....	23
2.6.2 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και σύγχρονη ταχύτητα .....	23
2.6.3 Ασύγχρονος (επαγωγικός) τριφασικός κινητήρας.....	25

2.6.4	Ολίσθηση και χαρακτηριστικά λειτουργίας .....	26
2.6.5	Φορά περιστροφής και ακολουθία φάσεων.....	26
2.7	Συνδεσμολογίες τριφασικών συστημάτων (Αστέρας και Τρίγωνο).....	27
2.8	Επίλογος.....	29
Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση Κυκλώματος ανά Λειτουργικό Block.....		30
3.1	Block 1 – Είσοδος φάσεων, ένδειξη παρουσίας και προσαρμογή σήματος.....	30
3.1.1	Σκοπός του Block.....	30
3.1.2	Είσοδοι του Block.....	31
3.1.3	Περιορισμός ρεύματος και βασική προστασία.....	32
3.1.4	Πυκνωτικός υποβιβασμός τάσης (capacitive dropper) μέσω C1–C3.....	32
3.1.5	Αντιστάσεις R4–R6 παράλληλα στους πυκνωτές (εκφόρτιση και σταθεροποίηση).....	34
3.1.6	Ένδειξη παρουσίας φάσεων .....	34
3.1.7	Προστασία φωτοδιόδων από ανάστροφη πόλωση .....	34
3.1.8	Έξοδος του Block 1 και λειτουργικός ρόλος.....	35
3.2	Block 2 – Ανόρθωση, εξομάλυνση και σταθεροποίηση τάσης τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος.....	35
3.2.1	Σκοπός του Block.....	35
3.2.2	Ανόρθωση από τις τρεις φάσεις .....	35
3.2.3	Εξομάλυνση της τάσης με τον πυκνωτή C7.....	36
3.2.4	Σταθεροποίηση της τάσης με δίοδο Zener .....	36
3.2.5	Πλωτή αναφορά και απουσία ουδετέρου .....	37
3.2.6	Έξοδος του Block 2 και σύνδεση με το επόμενο στάδιο.....	37
3.3	Block 3 – Διαμόρφωση παλμών φάσης και παραγωγή σημάτων ελέγχου.....	38
3.3.1	Κύκλωμα σύζευξης και χρονικής διαμόρφωσης (C4-R7).....	38
3.3.2	Ρόλος των διόδων D11 και D12 – Κατεύθυνση και περιορισμός σήματος .....	39
3.3.3	Αντίσταση R7 – Σημείο αναφοράς και εκφόρτιση.....	39
3.3.4	Σημεία Ελέγχου 1,2 και 3.....	39
3.3.5	Ρόλος του Block 3 στη συνολική λειτουργία .....	40
3.4	Block 4 – Λογική ανίχνευσης ακολουθίας φάσεων (Sequence Detection Logic).....	41
3.4.1	Δομή και κατάσταση ηρεμίας.....	41
3.4.2	Ανίχνευση δεξιόστροφης ακολουθίας (R–S–T).....	42
Βήμα 1 — Παλμός στο Σημείο 1 (R) – Ενεργοποίηση.....		42
Βήμα 2 — Παλμός στο Σημείο 2 (S) – Διέλευση .....		42
Βήμα 3 — Παλμός στο Σημείο 3 (T) – Reset και <b>Επαναφορά</b> .....		42
3.4.3	Ανίχνευση αριστερόστροφης ακολουθίας (R–T–S).....	43

Βήμα 1 — Παλμός στο Σημείο 1 (R) – Ενεργοποίηση.....	43
Βήμα 2 — Παλμός στο Σημείο 3 (S) – Reset και Πρόωρη Επαναφορά.....	43
Βήμα 3 — Παλμός στο Σημείο 3 (T) – Απόρριψη Σήματος.....	43
3.4.4    Ολοκλήρωση και εξομάλυνση σήματος (Integrator) .....	44
3.5    Block 5 – Μονάδα Παραγωγής Ακολουθίας και Οπτικής Ένδειξης.....	44
3.5.1    Ο Ταλαντωτής Χρονισμού (Clock Oscillator) .....	45
3.5.2    Ο Δεκαδικός Απαριθμητής CD4017 (IC1).....	45
3.5.3    Λογική Επιλογής Διαδρομής (Gating Logic – N5 έως N8) .....	46
3.5.4    Βαθμίδα Εξόδου και LED .....	49
3.6    Σύντομη Περιγραφή Λειτουργίας του Κυκλώματος.....	50
Κεφάλαιο 4ο:    Μέθοδος Κατασκευής Τυπωμένου Κυκλώματος.....	51
4.1    Εισαγωγή.....	51
4.2    Θεωρητική αρχή της μεθόδου cold toner transfer.....	51
4.3    Υλικά και εξοπλισμός .....	52
4.4    Περιγραφή διαδικασίας.....	52
4.4.1    Εκτύπωση σχεδίου.....	52
4.4.2    Προετοιμασία πλακέτας .....	53
4.4.3    Παρασκευή διαλύματος Μεταφοράς.....	53
4.4.4    Μεταφορά του toner.....	53
4.4.5    Αφαίρεση Χαρτιού και Έλεγχος .....	53
4.4.6    Χημική Χάραξη.....	54
4.5    Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της μεθόδου .....	55
4.6    Κατασκευή .....	56
4.7    Συμπεράσματα.....	58
4.7.1    Προτάσεις Βελτίωσης και Επεκτάσεις .....	59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60
Ψηφιακή Λογική – CMOS .....	60
Τεχνικά εγχειρίδια και datasheets CMOS .....	60
Πρότυπα και κανονισμοί.....	60

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ιστορική εξέλιξη των πολυφασικών και τριφασικών συστημάτων και της εφαρμογής τους σε ηλεκτρικούς κινητήρες.....	1
Σχήμα 1.2: Τυπική ικανότητα ρεύματος εξόδου της σειράς CMOS B.....	5
Σχήμα 1.3: Διπλό Flip-Flop τύπου D.....	8
Σχήμα 1.4: Τετραπλή πύλη NAND με είσοδο Schmitt Trigger.....	9
Σχήμα 1.5: Εξαπλός αναστρέφων buffer και οδηγός TTL.....	10
Σχήμα 2.1: Τα τρία τυλίγματα του στάτη εντός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....	15
Σχήμα 2.2: Κυματομορφές τριφασικού συστήματος εναλλασσόμενης τάσης με χρονική μετατόπιση 120°.....	16
Σχήμα 2.3: Ανεξάρτητο τριφασικό σύστημα.....	17
Σχήμα 2.4: . Αλληλένδετο Τριφασικό Σύστημα κατα Αστέρα.....	18
Σχήμα 2.5: Αλληλένδετο Τριφασικό Σύστημα κατα Τρίγωνο.....	19
Σχήμα 2.6: Σύγκριση δεξιόστροφης (R–S–T) και αριστερόστροφης (T–S–R) ακολουθίας φάσεων.....	22
Σχήμα 2.7: Δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε τριφασικό κινητήρα.....	24
Σχήμα 2.8: Αρχή λειτουργίας τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα (στάτης – δρομέας).....	25
Σχήμα 2.9: Σχέση ακολουθίας φάσεων και φοράς περιστροφής τριφασικού κινητήρα.....	27
Σχήμα 2.10: Σύνδεση κατά Αστέρα.....	28
Σχήμα 2.11: Σύνδεση κατά Τρίγωνο.....	28
Σχήμα 3.1: Το πλήρες κυκλωματικό διάγραμμα του τριφασικού ανιχνευτή ακολουθίας φάσεων. Τρία LED χρησιμοποιούνται για την ένδειξη παρουσίας τάσης στις φάσεις του δικτύου, ενώ τα υπόλοιπα τρία LED σχηματίζουν μία κυκλική φωτεινή ακολουθία, η οποία απεικονίζει τη φορά περιστροφής του τριφασικού ηλεκτρικού πεδίου και, κατ' επέκταση, τη φορά περιστροφής του κινητήρα.....	30
Σχήμα 3.2: Είσοδοι, περιορισμός ρεύματος , πυκνωτικός υποβιβασμός και ένδειξη παρουσίας φάσεων.....	31
Σχήμα 3.3: Διάταξη ανόρθωσης, σταθεροποίησης και εξομάλυνσης της τάσης δικτύου.....	36
Σχήμα 3.4: Κύκλωμα σύζευξης και χρονικής διαμόρφωσης (C4-R7).....	38
Σχήμα 3.5: Χρονική αντιστοιχία των 6 δυνατών συνδυασμών διαδοχής παλμών στα σημεία 1,2,3 του κυκλώματος Σχ. 3.1.....	40
Σχήμα 3.6: Κύκλωμα της λογικής ανίχνευσης της ακολουθίας (R-S-T).....	41
Σχήμα 3.7: Ταλαντωτής χρονισμού (Clock Oscillator).....	45
Σχήμα 3.8: Δεκαδικός Απαριθμητής CD4017.....	46
Σχήμα 3.9: Μηχανισμός αντιμετάθεσης και βαθμίδα εξόδου με LEDs.....	47

## **Κατάλογος Εικόνων**

Εικ. 4.1 : Μακέτα όψης χαλκού μη ανεστραμμένη.....	52
Εικ. 4.2 : Πλακέτα όπου έχει αφαιρεθεί ο χαλκός με χημική χάραξη.....	54
Εικ. 4.3 : Μακέτα υλικών.....	55
Εικ. 4.4 : Τελική μορφή του τριφασικού ανιχνευτή ακολουθίας φάσεων.....	56
Εικ. 4.5 : Συσκευασία του τριφασικού ανιχνευτή ακολουθίας φάσεων.....	57

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1.1: Τυπικές στάθμες τάσης και ρεύματος TTL και CMOS σε τροφοδοσία 5 V.....	7
---	---



# Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη, ανάλυση και υλοποίηση ενός **ανίχνευτή ακολουθίας φάσεων τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος**, βασισμένου σε τεχνολογία CMOS και διακριτά ηλεκτρονικά στοιχεία.

Η σωστή ακολουθία των φάσεων σε ένα τριφασικό σύστημα R-S-T(L1–L2–L3) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή λειτουργία ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και μηχανών, όπως ηλεκτροκινητήρες, αντλίες και βιομηχανικός εξοπλισμός. Η λανθασμένη φορά ακολουθίας μπορεί να οδηγήσει σε **αντίστροφη περιστροφή**, μειωμένη απόδοση ή ακόμη και **σοβαρές μηχανικές βλάβες**.

Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες διατάξεις ανίχνευσης πολικότητας και ακολουθίας φάσεων. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται μία προσέγγιση **χαμηλού κόστους, απλής κατασκευής και υψηλής αξιοπιστίας**, με χρήση λογικών κυκλωμάτων CMOS.

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή των τριφασικών συστημάτων και της ακολουθίας φάσεων

Η ανάπτυξη των τριφασικών συστημάτων εναλλασσόμενης τάσης συνδέεται άμεσα με την εξέλιξη της ηλεκτρικής ενέργειας στα τέλη του 19ου αιώνα, περίοδο κατά την οποία τέθηκαν τα θεμέλια της σύγχρονης ηλεκτροτεχνίας. Στα πρώτα στάδια της ηλεκτροδότησης, η παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας βασιζόταν κυρίως σε συστήματα συνεχούς ρεύματος, τα οποία παρουσίαζαν σοβαρούς περιορισμούς ως προς τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

Η μετάβαση στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος κατέστη δυνατή χάρη στην ανάπτυξη των μετασχηματιστών, οι οποίοι επέτρεψαν την ανύψωση και υποβίβαση της τάσης με υψηλή απόδοση. Στο πλαίσιο αυτό, άρχισαν να εξετάζονται πολυφασικά συστήματα ως μέσο βελτίωσης της απόδοσης και της σταθερότητας της ηλεκτρικής ισχύος.

Καθοριστική συμβολή στην εξέλιξη των πολυφασικών και ειδικότερα των τριφασικών συστημάτων είχε ο **Nikola Tesla**, ο οποίος στα τέλη της δεκαετίας του 1880 ανέπτυξε τη θεωρία και τις πρακτικές εφαρμογές των πολυφασικών εναλλασσόμενων ρευμάτων. Ο Tesla απέδειξε ότι η χρήση περισσότερων της μίας φάσης επιτρέπει τη δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, καθιστώντας δυνατή τη λειτουργία ηλεκτρικών κινητήρων χωρίς μηχανικούς συλλέκτες [1].

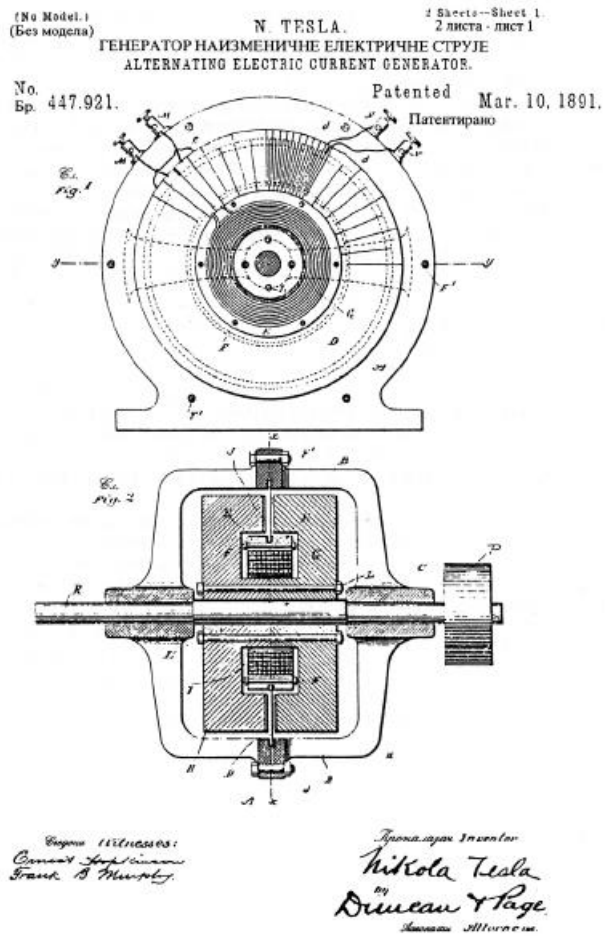
Λίγα χρόνια αργότερα, ο **Mikhail Dolivo-Dobrovolsky**, εργαζόμενος για την AEG, υλοποίησε στην πράξη το **τριφασικό σύστημα** όπως είναι γνωστό σήμερα. Η ανάπτυξη του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα και η επιτυχής μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις απέδειξαν την ανωτερότητα του τριφασικού συστήματος έναντι των μονοφασικών και διφασικών λύσεων.

Η καθιέρωση των τριφασικών συστημάτων συνοδεύτηκε από την αναγνώριση της σημασίας της **ακολουθίας φάσεων**. Καθώς η φορά περιστροφής του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου εξαρτάται άμεσα από τη χρονική σειρά των φάσεων, έγινε σαφές ότι η σωστή σύνδεση των αγωγών R, S και T είναι κρίσιμη για τη λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων και των βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Με την εξάπλωση της βιομηχανικής χρήσης των τριφασικών κινητήρων κατά τον 20ό αιώνα, η ανάγκη για **έλεγχο παρουσίας και ακολουθίας φάσεων** έγινε ολοένα και πιο επιτακτική. Αρχικά, ο έλεγχος αυτός πραγματοποιούνταν με απλά ηλεκτρομηχανικά μέσα ή με δοκιμαστική εκκίνηση των κινητήρων. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές παρουσίαζαν περιορισμούς σε ακρίβεια και ασφάλεια [2].

Η εξέλιξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, και ειδικότερα των ημιαγωγικών και ψηφιακών κυκλωμάτων, επέτρεψε την ανάπτυξη αξιόπιστων διατάξεων ανίχνευσης ακολουθίας φάσεων. Από αναλογικά κυκλώματα βασισμένα σε μετασχηματιστές και ρελέ, η τεχνολογία οδηγήθηκε σε συμπαγείς ηλεκτρονικές λύσεις με χρήση λογικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και, αργότερα, μικροελεγκτών.

Στη σύγχρονη εποχή, οι διατάξεις ανίχνευσης ακολουθίας φάσεων αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των βιομηχανικών αυτοματισμών και των συστημάτων προστασίας. Παράλληλα, εξακολουθούν να παρουσιάζουν έντονο εκπαιδευτικό ενδιαφέρον, καθώς συνδυάζουν βασικές αρχές τριφασικής θεωρίας, μαγνητικού πεδίου και ψηφιακής λογικής, όπως ακριβώς πραγματεύεται η παρούσα εργασία.



Σχ. 1.1: Ιστορική εξέλιξη των πολυφασικών και τριφασικών συστημάτων και της εφαρμογής τους σε ηλεκτρικούς κινητήρες.

### 1.3 Επιλογή τεχνολογίας CMOS και χαρακτηριστικά διεπαφής

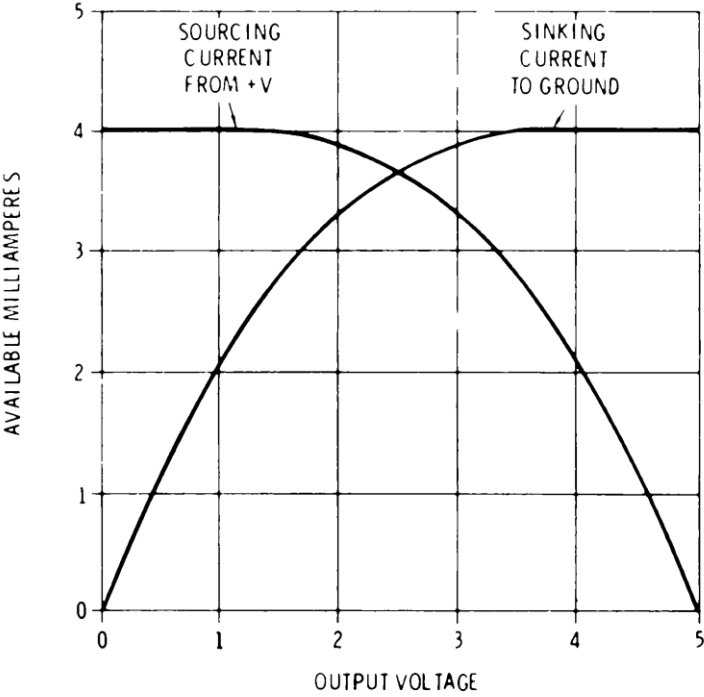
Η τεχνολογία CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες οικογένειες ψηφιακής λογικής, τόσο σε βιομηχανικές όσο και σε εκπαιδευτικές εφαρμογές. Τα κυκλώματα CMOS χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος, ιδιαίτερα σε χαμηλές συχνότητες λειτουργίας, καθώς και από **ευρύ εύρος τάσης τροφοδοσίας**, το οποίο συνήθως εκτείνεται από 3 V έως 15 V, ανάλογα με τον τύπο του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Οι είσοδοί του είναι ουσιαστικά ανοιχτά κυκλώματα, και οι έξοδοί του ταλαντώνονται σε όλο το εύρος μεταξύ των ορίων τροφοδοσίας. Ως πρόσθετο πλεονέκτημα, η ικανότητα οδήγησης εξόδου σε άλλα πακέτα CMOS είναι ουσιαστικά απεριόριστη.

Η ικανότητα οδήγησης φορτίου των λογικών πυλών CMOS εξαρτάται άμεσα από την τάση τροφοδοσίας τους. Στη σειρά CMOS τύπου B, το ρεύμα που μπορεί να παραδοθεί στην έξοδο (source) και το ρεύμα που μπορεί να απορροφηθεί από την έξοδο (sink) είναι πρακτικά ισοδύναμα, γεγονός που απλοποιεί τον σχεδιασμό διεπαφών εξόδου.

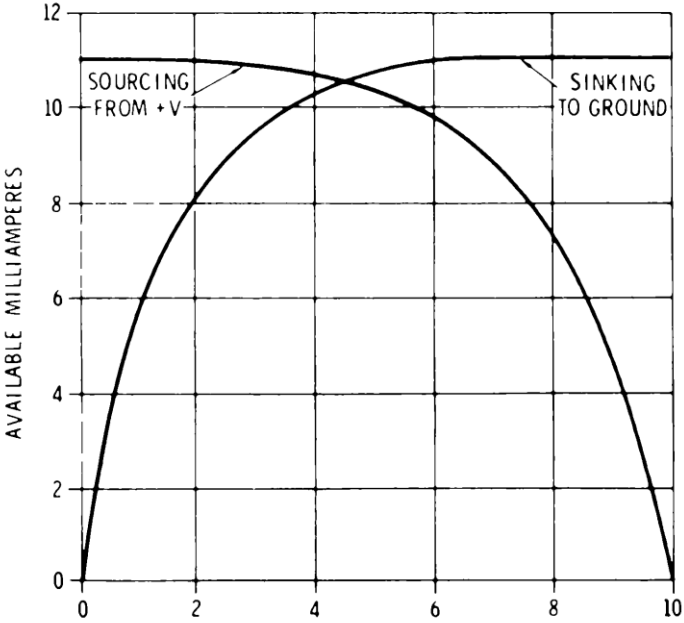
Η λογική CMOS είναι πολύ ανεκτική στο θόρυβο του συστήματος και δεν παράγει πολύ δικό της θόρυβο. Μετατρέπεται εύκολα σε γραμμική λειτουργία και προσφέρει δεκάδες επιλογές για χρονιστές υψηλής απόδοσης, ταλαντωτές και πηγές παλμών με χαμηλό αριθμό εξαρτημάτων [10].

Πολύ συχνά, τα CMOS αποδεικνύονται η κορυφαία επιλογή για σχεδιασμό ψηφιακής λογικής, ιδιαίτερα σε φορητές, χαμηλού κόστους, χαμηλής συχνότητας εφαρμογές. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν ψηφιακά όργανα, βολτόμετρα, μετρητές συχνότητας, οθόνες, βιντεοπαιχνίδια, τηλεοπτικές γραφομηχανές, μικροεπεξεργαστές και τα περιφερειακά τους, ηλεκτρονική μουσική, συναγερμούς, τηλεχειριστήρια και πολλά, πολλά άλλα.

Στο Σχ. 1.2 Για τάση τροφοδοσίας 5 V, η έξοδος μιας τυπικής πύλης CMOS μπορεί να αποδώσει ή να απορροφήσει ρεύμα της τάξης των 4 mA. Με αύξηση της τάσης τροφοδοσίας στα 10 V, το διαθέσιμο ρεύμα εξόδου αυξάνεται σημαντικά και μπορεί να υπερβεί τα 10–11 mA και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η αύξηση αυτή καθιστά δυνατή την απευθείας οδήγηση ενδεικτικών στοιχείων, όπως φωτοдиодων LED, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων ενισχυτικών σταδίων [11].



**5** VOLT SUPPLY



**10** VOLT SUPPLY

Σχ. 1.2: Τυπική ικανότητα ρεύματος εξόδου της σειράς CMOS B.

Παρά τα πλεονεκτήματα της αυξημένης τάσης τροφοδοσίας, απαιτείται προσοχή στα όρια απαγωγής ισχύος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Υψηλά ρεύματα εξόδου συνεπάγονται αυξημένη εσωτερική ισχύ διάχυσης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη θερμική καταπόνηση και τη μακροχρόνια αξιοπιστία του ολοκληρωμένου, λόγω των περιορισμένων διατομών των εσωτερικών μεταλλικών διαδρομών.

Στην παρούσα κατασκευή επιλέχθηκε τάση τροφοδοσίας περίπου **10 V συνεχούς ρεύματος**, τιμή η οποία βρίσκεται εντός του προτεινόμενου εύρους λειτουργίας της σειράς CMOS και επιτρέπει αξιόπιστη λειτουργία όλων των λογικών βαθμίδων. Η τάση αυτή μπορεί να παραχθεί με απλή σταθεροποίηση μέσω διόδου Zener, χωρίς την ανάγκη σύνθετων σταθεροποιητών ή μετατροπέων ισχύος.

Ιδιαίτερη σημασία για την επιλογή της τεχνολογίας CMOS έχει ο τρόπος **διεπαφής (interface)** των εισόδων και εξόδων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι είσοδοι των CMOS παρουσιάζουν **πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου**, γεγονός που επιτρέπει την οδήγησή τους με ελάχιστο ρεύμα. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην παρούσα εφαρμογή, όπου τα σήματα εισόδου προέρχονται από εναλλασσόμενες τάσεις δικτύου, μέσω πυκνωτών σύζευξης και αντιστάσεων περιορισμού ρεύματος.

Επιπλέον, τα CMOS ολοκληρωμένα κυκλώματα διαθέτουν **σαφώς καθορισμένα επίπεδα λογικής τάσης** (logic levels), τα οποία εξαρτώνται από την τάση τροφοδοσίας. Για τροφοδοσία της τάξης των 10–12 V, τα κατώφλια λογικού “0” και “1” απέχουν σημαντικά μεταξύ τους, προσφέροντας υψηλή ανοχή σε ηλεκτρικό θόρυβο και ασταθείς μεταβάσεις σήματος. Το γεγονός αυτό καθιστά τα CMOS κατάλληλα για εφαρμογές όπου τα σήματα εισόδου δεν έχουν ιδανική τετραγωνική μορφή, αλλά προέρχονται από αναλογικές κυματομορφές.

Στον Πίνακα 1.1 χαρακτηριστικών διεπαφής της τεχνολογίας CMOS φαίνεται ότι οι είσοδοι μπορούν να οδηγηθούν είτε απευθείας από άλλες λογικές βαθμίδες, είτε μέσω απλών παθητικών στοιχείων, όπως αντιστάσεις και πυκνωτές. Αυτό επιτρέπει την υλοποίηση απλών και αξιόπιστων διεπαφών μεταξύ αναλογικών και ψηφιακών τμημάτων, χωρίς την ανάγκη ειδικών συγκριτών τάσης (comparators).

Συνεπώς, η χρήση CMOS ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στην παρούσα εργασία δεν έγινε μόνο για λόγους διαθεσιμότητας ή απλότητας, αλλά αποτελεί **συνειδητή σχεδιαστική επιλογή**, βασισμένη στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά διεπαφής, στο εύρος τάσης λειτουργίας και στην αντοχή σε θόρυβο που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία.

Πιν.1-1. Τυπικές στάθμες τάσης και ρεύματος TTL και CMOS σε τροφοδοσία 5 V

Family	Input Levels		Output Levels		Input Levels		Output Levels	
	$V_{IL}$ max	$V_{IH}$ min	$V_{OL}$ max	$V_{OH}$ min	$I_{IL}$ max	$I_{IH}$ min	$I_{OL}$ max	$I_{OH}$ min
7400	0.8V	2.0V	0.4 V	2.4 V	1.6mA	40.0μA	16.0mA	0.4mA
74LS00	0.8V	2.0V	0.4 V	2.7 V	0.4mA	20.0μA	8.0mA	0.4mA
4000	1.5V	3.5V	0.05V	4.95V	1.0μA	1.0μA	0.5mA	0.5mA
74C00	1.5V	3.5V	0.5 V	4.5 V	1.0μA	1.0μA	0.4mA	0.4mA
74HC00	1.0V	3.5V	0.1 V	4.9 V	1.0μA	1.0μA	4.0mA	4.0mA
74HCT00	0.8V	2.0V	0.1 V	4.9 V	1.0μA	1.0μA	4.0mA	4.0mA

Note:

$V_{IL}$  max — maximum input voltage necessary to produce a logic 0 (low).

$V_{IH}$  min — minimum input voltage necessary to produce a logic 1 (high).

$V_{OL}$  max — maximum output voltage necessary to produce a logic 0 (low).

$V_{OH}$  max — maximum output voltage necessary to produce a logic 1 (high).

$I_{IL}$  max — maximum input current drain at a logic 0 (low).

$I_{IH}$  min — minimum input current drain at a logic 1 (high).

$I_{OL}$  max — maximum output current available at a logic 0 (low).

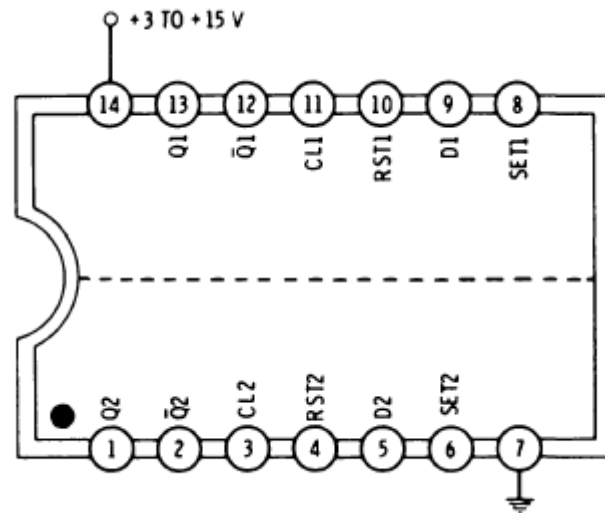
$I_{OH}$  max — maximum output current available at a logic 1 (high).

## 1.4 Βασικά λογικά ολοκληρωμένα κυκλώματα CMOS της διάταξης

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται βασικά ολοκληρωμένα κυκλώματα της οικογένειας **CMOS 4000**, τα οποία υλοποιούν λειτουργίες ακολουθιακής και συνδυαστικής λογικής. Η επιλογή τους βασίζεται στη χαμηλή κατανάλωση ισχύος, στο ευρύ εύρος τάσεων λειτουργίας και στην αυξημένη ανθεκτικότητα σε θόρυβο, χαρακτηριστικά ιδιαίτερα σημαντικά σε εφαρμογές βιομηχανικού περιβάλλοντος.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζεται η λειτουργία και ο ρόλος των ολοκληρωμένων **CD4013**, **CD4093** και **CD4049**, τα οποία αποτελούν τον πυρήνα της λογικής επεξεργασίας της διάταξης.

### 1.4.1 Ολοκληρωμένο CD4013 – Διπλό Flip-Flop τύπου D



Σχ. 1.3 : Διπλό Flip-Flop τύπου D.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα **CD4013** περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητα flip-flop τύπου D με συμπληρωματικές εξόδους Q και Q<sup>-</sup>. Κάθε flip-flop διαθέτει είσοδο δεδομένων **D**, είσοδο ρολογιού **CLK**, καθώς και ασύγχρονες εισόδους **SET** και **RESET**.

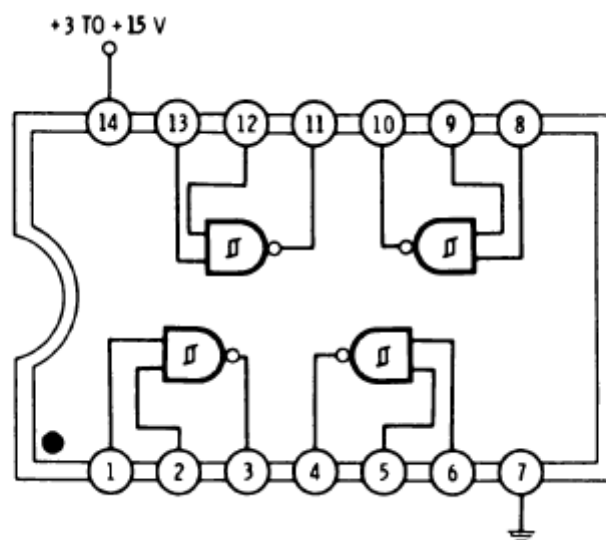
Η βασική λειτουργία του flip-flop τύπου D συνίσταται στην αποθήκευση ενός δυαδικού ψηφίου. Η κατάσταση της εισόδου **D** μεταφέρεται στην έξοδο **Q** κατά τη **θετική ακμή του ρολογιού**, ενώ η Q<sup>-</sup> λαμβάνει την αντίθετη λογική τιμή. Οι ασύγχρονες εισόδους **SET** και **RESET** υπερισχύουν της λειτουργίας με ρολόι και επιτρέπουν τον άμεσο καθορισμό της κατάστασης του flip-flop, ανεξάρτητα από το σήμα χρονισμού.

Σε περίπτωση ταυτόχρονης ενεργοποίησης των εισόδων **SET** και **RESET**, τόσο η έξοδος **Q** όσο και η Q<sup>-</sup> τίθενται σε λογικό υψηλό, κατάσταση η οποία θεωρείται μη επιτρεπτή και αποφεύγεται στον σχεδιασμό αξιόπιστων κυκλωμάτων.

Το CD4013 μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως **διαιρέτης συχνότητας δια δύο**, μέσω διασταυρούμενης σύνδεσης της εξόδου  $Q^-$  στην είσοδο **D**. Λειτουργεί σε εύρος τάσεων από 3 V έως 15 V και είναι λειτουργικά ισοδύναμο με τα TTL ολοκληρωμένα 7474 και 74C74.

Στην παρούσα διάταξη, το CD4013 χρησιμοποιείται για την **ακολουθιακή αποθήκευση και σύγκριση της χρονικής σειράς των παλμών**, που αντιστοιχούν στις τριφασικές τάσεις [13].

#### 1.4.2 Ολοκληρωμένο CD4093 – Τετραπλή πύλη NAND με είσοδο Schmitt Trigger



Σχ. 1.4: Τετραπλή πύλη NAND με είσοδο Schmitt Trigger.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα **CD4093** περιλαμβάνει τέσσερις ανεξάρτητες πύλες **NAND δύο εισόδων**, οι οποίες διαθέτουν **ενσωματωμένη υστέρηση τύπου Schmitt Trigger** στις εισόδους τους.

Η ύπαρξη υστέρησης καθιστά το ολοκληρωμένο ιδιαίτερα κατάλληλο για χρήση σε σήματα με αργή μεταβολή ή παρουσία θορύβου, καθώς αποτρέπει τις ακούσιες μεταγωγές της εξόδου. Η λογική λειτουργία της πύλης NAND είναι τέτοια ώστε η έξοδος βρίσκεται σε λογικό υψηλό όταν τουλάχιστον μία από τις εισόδους είναι χαμηλή, ενώ γίνεται χαμηλή μόνο όταν και οι δύο εισοδοί είναι υψηλές.

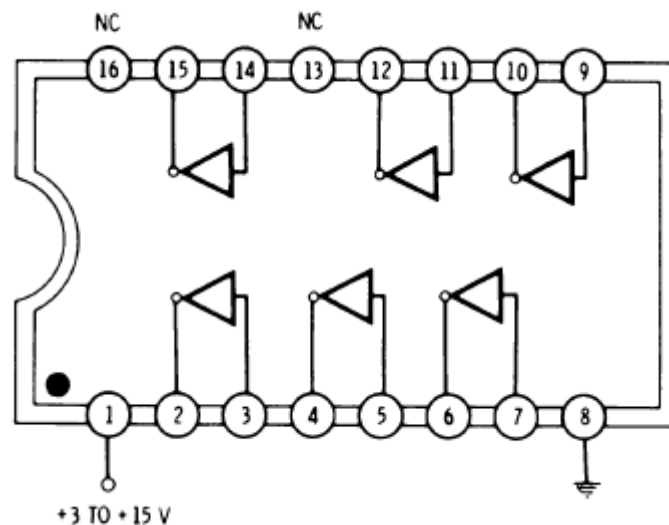
Το CD4093 μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως απλή λογική πύλη όσο και σε εφαρμογές:

- διαμόρφωσης παλμών,
- μονοσταθών και ασταθών κυκλωμάτων,
- Καθαρισμού σημάτων (signal conditioning).

Λόγω της υστέρησης, η στάθμη μεταγωγής της εξόδου διαφέρει κατά την άνοδο και την κάθοδο του σήματος εισόδου, προσφέροντας αυξημένη ανοσία σε θόρυβο. Το ολοκληρωμένο λειτουργεί σε εύρος τάσεων από 3 V έως 15 V και είναι λειτουργικά ισοδύναμο με τα TTL 74132 και CMOS 74C132 [15].

Στην παρούσα εργασία, το CD4093 χρησιμοποιείται για τη **σταθεροποίηση, διαμόρφωση και λογική επεξεργασία των παλμών**, πριν την είσοδό τους στα flip-flop .

### 1.4.3 Ολοκληρωμένο CD4049 – Εξαπλός αναστρέφων buffer και οδηγός TTL



Σχ. 1.5 : Εξαπλός αναστρέφων buffer και οδηγός TTL.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα **CD4049** περιλαμβάνει έξι ανεξάρτητους **αναστρέφοντες ενισχυτές (inverters)**, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ως απλοί αναστροφείς λογικής στάθμης όσο και ως οδηγοί εξόδου.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του CD4049 είναι η δυνατότητα **μετάφρασης τάσης (level translation)**, καθώς η τάση τροφοδοσίας καθορίζει το εύρος τάσης της εξόδου, ενώ οι είσοδοι μπορούν να δεχθούν τάσεις έως και 15 V ανεξάρτητα από την τάση εξόδου. Με τροφοδοσία 5 V, οι εξοδοι είναι συμβατές με λογική TTL.

Το ολοκληρωμένο δεν ενδείκνυται για χρήση με σήματα αργής ανόδου σε γραμμικές εφαρμογές, καθώς σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να αυξηθεί η εσωτερική κατανάλωση ισχύος. Είναι λειτουργικά ισοδύναμο με τα TTL 7404 και CMOS 74C04 / 74HC4049.

Στη συγκεκριμένη διάταξη, το CD4049 χρησιμοποιείται για:

- αναστροφή λογικών σημάτων,
- ενίσχυση και απομόνωση εξόδων,
- και αξιόπιστη οδήγηση των ενδείξεων εξόδου (LED)

## 1.5 Δομική προσέγγιση της εργασίας

Η ανάλυση του κυκλώματος γίνεται με **δομική (block) προσέγγιση**, ώστε κάθε τμήμα να μπορεί να κατανοηθεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Συγκεκριμένα, το κύκλωμα χωρίζεται στα ακόλουθα βασικά υποσυστήματα:

- **Είσοδος τριφασικής τάσης**  
Λήψη των τριών φάσεων μέσω κατάλληλων αντιστάσεων περιορισμού ρεύματος.
- **Διαμόρφωση και προσαρμογή σήματος**  
Μετατροπή των εναλλασσόμενων σημάτων σε μορφή κατάλληλη για επεξεργασία από λογικά κυκλώματα CMOS, μέσω πυκνωτών σύζευξης και προστατευτικών στοιχείων.
- **Τροφοδοτικό τμήμα DC**  
Παραγωγή σταθερής τάσης συνεχούς ρεύματος περίπου 10 V, με χρήση διόδου Zener, κατάλληλης για τη σωστή λειτουργία των ολοκληρωμένων CMOS.
- **Λογική επεξεργασία ακολουθίας φάσεων**  
Χρήση λογικών πυλών CMOS για τον προσδιορισμό της σωστής ή λανθασμένης ακολουθίας φάσεων.
- **Οπτική ένδειξη αποτελέσματος**  
Οδήγηση LED ενδείξεων, που επιτρέπουν την άμεση και κατανοητή παρουσίαση της κατάστασης στον χρήστη.

Κάθε υποσύστημα αναλύεται αρχικά **θεωρητικά** και στη συνέχεια εξετάζεται η **πρακτική του υλοποίηση** στο συνολικό κύκλωμα.

## 1.6 Εκπαιδευτικός και πρακτικός χαρακτήρας

Η εργασία δεν περιορίζεται μόνο στην παρουσίαση ενός έτοιμου κυκλώματος, αλλά στοχεύει στην **κατανόηση της λειτουργίας του βήμα προς βήμα**. Η ανάλυση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε ακόμη και αναγνώστες με βασικές γνώσεις ηλεκτρονικής να μπορούν να παρακολουθήσουν τη λογική σχεδίασης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη **χειροποίητη κατασκευή της πλακέτας**, η οποία περιλαμβάνει:

- μεταφορά τόνερ σε πλακέτα χαλκού,
- χημική χάραξη χαλκού από τις μη αγώγιμες περιοχές,
- τρύπημα,
- συγκόλληση των εξαρτημάτων.

Με τον τρόπο αυτό, η εργασία διατηρεί έντονο **εκπαιδευτικό και τεχνικό χαρακτήρα**, αναδεικνύοντας την αξία της πρακτικής γνώσης σε συνδυασμό με τη θεωρητική τεκμηρίωση.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των τριφασικών συστημάτων και της ακολουθίας φάσεων, το οποίο αποτελεί τη βάση για την κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος.

## Κεφάλαιο 2ο: Τριφασικά Συστήματα Εναλλασσόμενης Τάσης

### 2.1 Εισαγωγή

Το τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο τρόπο παραγωγής, μεταφοράς και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε βιομηχανικές και επαγγελματικές εγκαταστάσεις. Σε ένα τυπικό τριφασικό σύστημα, παράγονται τρεις εναλλασσόμενες τάσεις ίδιου πλάτους και συχνότητας, οι οποίες διαφέρουν χρονικά μεταξύ τους κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες ( $120^\circ$ ).

Οι τρεις αυτές τάσεις συμβολίζονται συνήθως ως φάσεις **R**, **S** και **T** (ή L1, L2 και L3) και μπορούν να παρασταθούν ως ημιτονοειδείς κυματομορφές που εμφανίζονται χρονικά μετατοπισμένες. Η χρονική αυτή μετατόπιση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου όταν οι φάσεις τροφοδοτούν κατάλληλα φορτία, όπως τριφασικούς ηλεκτροκινητήρες.

### 2.2 Παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης από μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο

Η παραγωγή εναλλασσόμενης ηλεκτρικής τάσης βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σύμφωνα με το οποίο μια μεταβολή της μαγνητικής ροής που διέρχεται από έναν αγωγό ή ένα κλειστό αγωγίμο κύκλωμα προκαλεί την εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα του.

Όταν ένας αγωγός ή ένα πηνίο βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλεται χρονικά, ή όταν ο αγωγός κινείται εντός σταθερού μαγνητικού πεδίου, τότε η μαγνητική ροή που τον διαπερνά δεν παραμένει σταθερή. Η μεταβολή αυτή της μαγνητικής ροής έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία επαγόμενης τάσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ροή ηλεκτρικού ρεύματος εφόσον το κύκλωμα είναι κλειστό [4].

Η βασική σχέση που περιγράφει το φαινόμενο αυτό είναι ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σύμφωνα με τον οποίο η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής. Η πολικότητα της επαγόμενης τάσης είναι τέτοια ώστε το επαγόμενο ρεύμα να αντιτίθεται στη μεταβολή που το προκάλεσε, γεγονός που αποτελεί άμεση συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας.

### 2.2.1 Ημιτονοειδής μορφή της επαγόμενης τάσης

Στην περίπτωση περιστροφής ενός αγωγίμου πηνίου μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, η μαγνητική ροή που το διαπερνά μεταβάλλεται περιοδικά με τον χρόνο. Καθώς το πηνίο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, η προβολή του εμβαδού του ως προς τις μαγνητικές γραμμές μεταβάλλεται ημιτονοειδώς.

Ως αποτέλεσμα, η επαγόμενη τάση στα άκρα του πηνίου αποκτά επίσης ημιτονοειδή χρονική μορφή. Η τάση αυτή εναλλάσσει πολικότητα σε κάθε μισή περίοδο περιστροφής, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία εναλλασσόμενης τάσης και, κατ' επέκταση, εναλλασσόμενου ρεύματος.

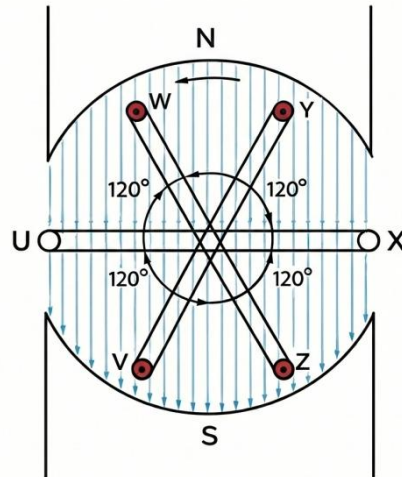
Η συχνότητα της παραγόμενης εναλλασσόμενης τάσης εξαρτάται άμεσα από τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πηνίου και από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο έλεγχος της συχνότητας του παραγόμενου εναλλασσόμενου ρεύματος στις ηλεκτρικές γεννήτριες [5], [6].

### 2.2.2 Φυσική σημασία του φαινομένου

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή αποτελεί τον θεμελιώδη μηχανισμό λειτουργίας όλων των ηλεκτρικών γεννητριών. Στην πράξη, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της αλληλεπίδρασης αγωγών και μαγνητικού πεδίου. Η περιοδική μεταβολή της μαγνητικής ροής είναι το στοιχείο που καθορίζει τη μορφή, τη συχνότητα και το πλάτος της παραγόμενης εναλλασσόμενης τάσης.

## 2.3 Παραγωγή Τριφασικής Τάσης

Η παραγωγή βασίζεται στις αρχές της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Σε μια τριφασική γεννήτρια (σύγχρονη γεννήτρια), υπάρχουν τρία ανεξάρτητα πηνία (τυλίγματα) τοποθετημένα στο στατικό μέρος (στάτορας), τα οποία απέχουν μεταξύ τους κατά  $120^\circ$  στον χώρο. Τα τρία τυλίγματα του στάτη βρίσκονται εντός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τον ρότορα, με αποτέλεσμα την επαγωγή εναλλασσόμενων τάσεων στα άκρα τους. Σχ. 2.1



Σχ. 2.1 Τα τρία τυλίγματα του στάτη εντός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Όταν ο μαγνητικός πόλος του ρότορα περιστρέφεται, επάγει στα πηνία αυτά τρεις εναλλασσόμενες τάσεις οι οποίες έχουν το ίδιο πλάτος και την ίδια συχνότητα, εφόσον τα τυλίγματα είναι όμοια και βρίσκονται εντός του ίδιου περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Επειδή όμως τα πηνία είναι μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά  $120^\circ$ , το πηνίο που το ακολουθεί φθάνει στη θέση αυτή και παίρνει την ίδια τιμή της τάσης, μετά από στροφή  $120^\circ$  (ή  $2\pi/3$  rad). Επομένως η τάση του πηνίου που ακολουθεί **καθυστερεί** ως προς την τάση του πηνίου που προηγείται κατά  $120^\circ$  ή με άλλα λόγια οι δυο τάσεις παρουσιάζουν διαφορά φάσεως  $120^\circ$ . Αντίθετα, το πηνίο που προηγείται και έχει περάσει από την ίδια θέση θα πάρει την ίδια τιμή κατά  $120^\circ$  νωρίτερα. Δηλαδή η τάση αυτή προηγείται κατά  $120^\circ$ .

Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του ρότορα οδηγεί στην επαγωγή τριών φασικών τάσεων στα τυλίγματα του στάτη, του οποίου το μέτρο παραμένει σχεδόν σταθερό, και η κατεύθυνσή του μεταβάλλεται συνεχώς στον χώρο. Το πεδίο αυτό περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, η οποία καθορίζει και τη συχνότητα του δικτύου ενώ ο χαρακτηρισμός “τριφασικό” προκύπτει από την ύπαρξη τριών φασικών τάσεων [6].

Οι στιγμιαίες τιμές των τριών τάσεων περιγράφονται από τις εξής συναρτήσεις του χρόνου  $t$ :

$$U_R = U_m \times \eta \mu \omega t \quad (1)$$

$$U_S = U_m \times \eta \mu (\omega t - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$U_T = U_m \times \eta \mu (\omega t + 2\pi/3) \quad (3)$$

## Κεφάλαιο 2

Όπου:

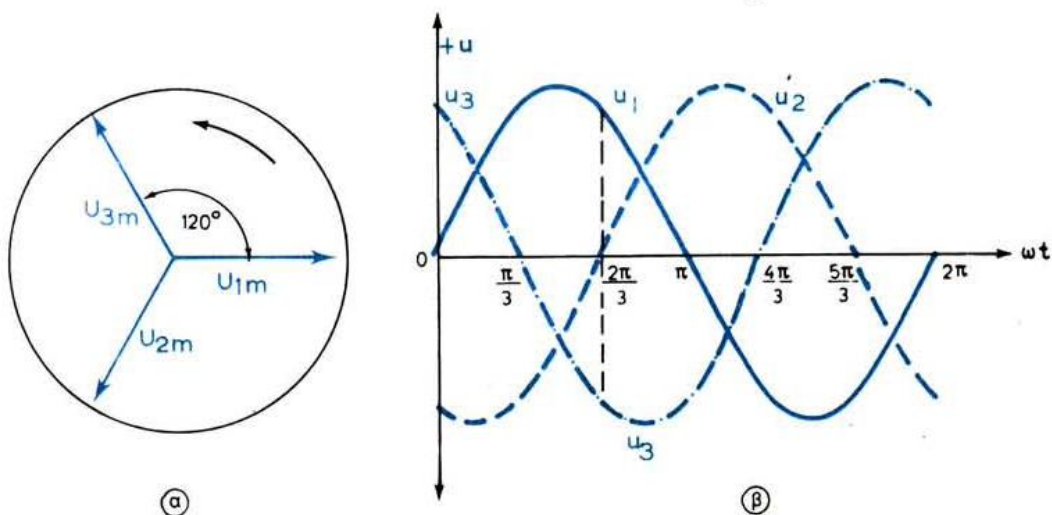
- $U_m$ : μέγιστη τιμή (κορυφή) της φασικής τάσης.
- $\omega = 2\pi f$ : Η κυκλική συχνότητα (όπου  $f = 50$  Hz για το ελληνικό δίκτυο).

Το σχήμα 2.2α μας δείχνει το διανυσματικό διάγραμμα από τις μέγιστες τιμές των τριών τάσεων και το σχήμα 2.2β την χρονική μεταβολή των τιμών τους.

Τα τρία πηνία παριστάνονται γραφικά κατά  $120^\circ$  μετατοπισμένα μεταξύ του και διακρίνονται από τα τρία Αγγλικά γράμματα στην αρχή τους με U, V, W και στο τέλος με τα αντίστοιχα γράμματα X, Y, Z. Τα τρία τυλίγματα του στάτη ονομάζονται φάσεις του συστήματος αλλά δεν πρέπει να συγχέεται με τις φάσεις των εναλλασσόμενων μεγεθών.

Συνδέοντας έναν καταναλωτή σε κάθε φάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, παίρνουμε τρία ανεξάρτητα μονοφασικά κυκλώματα μεταξύ τους. Αυτό το σύστημα των τριών ανεξάρτητων φάσεων, που είναι μετατοπισμένες κατά  $120^\circ$  μεταξύ τους ονομάζεται **ανεξάρτητο τριφασικό σύστημα**.

Αν προσθέσουμε τις τιμές των τάσεων, όπως δίνονται από τις σχέσεις (1), (2), και (3), θα δούμε ότι το άθροισμά τους είναι ίσο με μηδέν.



Σχ. 2.2 Κυματομορφές τριφασικού συστήματος εναλλασσόμενης τάσης με χρονική μετατόπιση  $120^\circ$

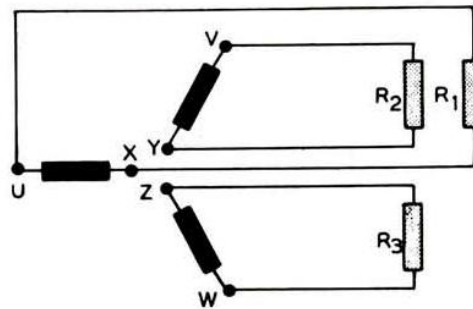
Το ίδιο θα βρούμε από τις καμπύλες του σχήματος 2.2 για οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Πχ. Για  $\omega t = 120^\circ (2\pi/3)$

$$U_R = -U_T \quad \text{και} \quad U_S = 0$$

Άρα: 
$$U = U_R + U_S + U_T = -U_T + 0 + U_T = 0$$

Ένα βασικό χαρακτηριστικό ενός ανεξάρτητου τριφασικού συστήματος με όμοιες φάσεις (πηνία) είναι ότι το αλγεβρικό άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των τάσεων είναι ανά πάσα στιγμή μηδέν.



Σχ. 2.3 Ανεξάρτητο τριφασικό σύστημα.

Για τη λήψη των 3 τάσεων ενός ανεξάρτητου τριφασικού συστήματος χρειάζονται 6 αγωγοί τροφοδοτήσεως. Στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται, για την παραγωγή και τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας ανεξάρτητα τριφασικά συστήματα, λόγω του μεγάλου αριθμού αγωγών που απαιτούνται. Το κόστος κατασκευής ενός τέτοιου δικτύου είναι μεγάλο και επίσης δεν είναι οικονομική η μεταφορά της ενέργειας επειδή υπάρχει μεγάλη απώλεια στους αγωγούς [7].

Αντίθετα, χρησιμοποιούνται στην πράξη συστήματα στα οποία με κατάλληλη συνδεσμολογία των τριών φάσεων επιτυγχάνεται η μεταφορά των ιδίων ποσών ενέργειας, όπως στο ανεξάρτητο σύστημα, αλλά με σημαντική εξοικονόμηση αγωγών. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται **αλληλένδετα τριφασικά συστήματα**.

## 2.4 Αλληλένδετα τριφασικά συστήματα

Ένα τριφασικό σύστημα στο οποίο οι φάσεις είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους, ονομάζεται αλληλένδετο τριφασικό σύστημα.

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι συνδέσεως των φάσεων: σε **αστέρα** και σε **τρίγωνο**.

### α) Σύνδεση κατά αστέρα

Στην κατά αστέρα σύνδεση συνδέουμε αγωγίμα μεταξύ τους τα τέλη των τριών φάσεων X, Y, Z σε ένα σημείο, που ονομάζεται **ουδέτερος κόμβος**, με αποτέλεσμα να σχηματισθεί από τις φάσεις μία μορφή αστέρα.

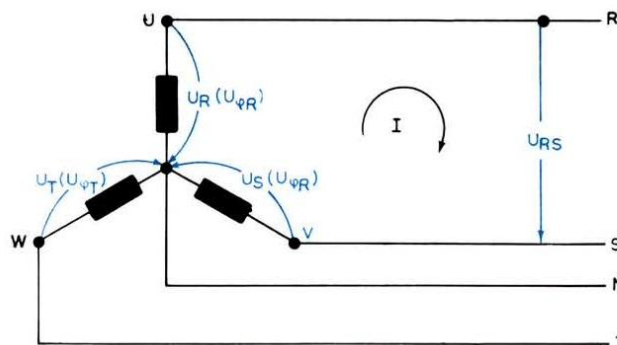
Τα άκρα U, V, W των φάσεων συνδέονται με τρεις αγωγούς τροφοδοτήσεως, που χαρακτηρίζονται αντίστοιχα με τα γράμματα R, S, T, ενώ ο ουδέτερος κόμβος συνδέεται με τον αγωγό N, που ονομάζεται **ουδέτερος αγωγός** (σχ. 2.4).

Στο σύστημα αυτό παρατηρούμε ότι έχουμε 4 αγωγούς και όχι 6 του ανεξάρτητου συστήματος. Γι' αυτό και ονομάζεται **τριφασικό σύστημα αστέρα με 4 αγωγούς**.

Στο σύστημα με 4 αγωγούς έχουμε δύο διαφορετικές τιμές τάσεως στη διάθεσή μας:

Μεταξύ κάθε αγωγού τροφοδοτήσεως R, S, T και του ουδέτερου αγωγού N επικρατεί τάση, που ονομάζεται **φασική τάση  $U_{\phi R}$** . Η φασική τάση είναι ίση με την τάση στα άκρα της αντίστοιχης φάσεως (π.χ.  $U_{\phi R} = U_R$ ). Εφόσον τα τρία πηνία (φάσεις) έχουν ίδια κατασκευή, οι τρεις φασικές τάσεις είναι ίσες ( $U_R = U_S = U_T = U_{\phi}$ ) και παρουσιάζουν μεταξύ διαφορά φάσεως  $120^\circ$ , όπως στο ανεξάρτητο σύστημα.

Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται **συμμετρικό τριφασικό σύστημα**.



Σχ. 2.4 Αλληλένδετο Τριφασικό Σύστημα κατά Αστέρα

Σε ένα συμμετρικό σύστημα το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των φασικών τάσεων και εδώ είναι οποιαδήποτε στιγμή, μηδέν.

2. Η τάση μεταξύ δύο αγωγών τροφοδοτήσεως, π.χ. μεταξύ των R και S, ονομάζεται πολική τάση U. Η τιμή της τάσεως αυτής προκύπτει ως εξής:

Στο σχήμα 2.4  $U_R$  είναι η τάση μεταξύ του αγωγού R και του ουδέτερου αγωγού,  $U_S$  είναι η τάση μεταξύ του αγωγού S και του ουδέτερου αγωγού και  $U_{RS}$  είναι η τάση μεταξύ των αγωγών R και S. Από το βρόχο I παίρνουμε:

$$U_{RS} + U_S - U_R = 0$$

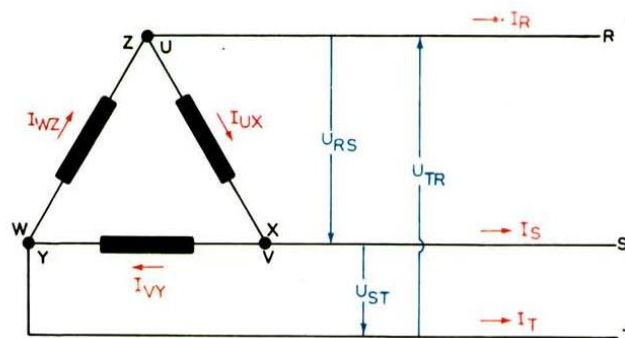
ή

$$U_{RS} = U_R - U_S$$

Άρα η πολική τάση προκύπτει από τη διαφορά δύο φασικών τάσεων. Επειδή όμως οι φασικές τάσεις έχουν διαφορά φάσεως, η διαφορά τους δεν είναι αλγεβρική αλλά διανυσματική, όπως αναφέραμε.

β) Σύνδεση κατά τρίγωνο

Στην σύνδεση κατά τρίγωνο συνδέεται το τέλος X της πρώτης φάσεως με την αρχή V της δεύτερης φάσεως, το τέλος Y της δεύτερης φάσεως με την αρχή W της τρίτης φάσεως και το τέλος Z της τρίτης φάσεως με την αρχή U της πρώτης φάσεως. Έτσι προκύπτει το τρίγωνο του σχήματος 2.5.



Σχ. 2.5 Αλληλένδετο Τριφασικό Σύστημα κατά Τρίγωνο

## Κεφάλαιο 2

Οι αγωγοί τροφοδοτήσεως R, S, T συνδέονται αντίστοιχα στις κορυφές του τριγώνου U(Z), V(X) και W(Y). Βέβαια δεν υπάρχει στη σύνδεση αυτή ουδέτερος αγωγός.

Η πολική τάση U μεταξύ δύο αγωγών τροφοδοτήσεως, π.χ. των R και S, είναι ίση με την τάση  $U_{\phi}$  στα άκρα της αντίστοιχης φάσεως, δηλαδή της U - X. Εφόσον οι τρεις φάσεις είναι όμοιες, οι τρεις πολικές τάσεις  $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$  είναι ίσες και παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσεως  $120^{\circ}$ . Άρα:

$$U = U_{RS} = U_{ST} = U_{TR} = U_{\phi}$$

και το σύστημα είναι πλέον συμμετρικό.

Στην σύνδεση κατά τρίγωνο έχουμε μία μόνο τιμή τάσεως, την πολική τάση. Στο συμμετρικό τριγωνικό σύστημα το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των πολικών τάσεων οποιαδήποτε στιγμή είναι ίσο με μηδέν. Όταν τα φορτία μεταξύ των αγωγών τροφοδοτήσεως είναι ίσα, δηλαδή έχουμε συμμετρικό φορτίο, τα ρεύματα  $I_R$ ,  $I_S$  και  $I_T$  των αγωγών αυτών είναι επίσης ίσα μεταξύ τους [8].

Για να συνοψίσουμε ένα τριφασικό σύστημα αποτελείται από τρεις εναλλασσόμενες τάσεις ίδιου πλάτους και συχνότητας, οι οποίες διαφέρουν χρονικά μεταξύ τους κατά γωνία φάσης  $120^{\circ}$ . Οι τρεις αυτές τάσεις ονομάζονται φάσεις και συμβολίζονται ως R, S και T (ή L1, L2, L3).

## 2.5 Ακολουθία φάσεων στο Τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης

Η σημασία της ακολουθίας φάσεων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε συστήματα που περιλαμβάνουν ηλεκτροκινητήρες. Η φορά περιστροφής ενός τριφασικού κινητήρα καθορίζεται **αποκλειστικά** από τη **σειρά διαδοχής των φάσεων** που φτάνουν στα τυλίγματα, όχι από τα ονόματα των ακροδεκτών. Στην πράξη, η αντιστροφή της ακολουθίας φάσεων επιτυγχάνεται με την εναλλαγή οποιωνδήποτε δύο φάσεων της τροφοδοσίας χωρίς να απαιτείται καμία άλλη μεταβολή στο κύκλωμα ισχύος. Η αλλαγή της ακολουθίας φάσεων οδηγεί σε **αντιστροφή της φοράς περιστροφής**, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία ή και καταστροφή μηχανικών μερών σε αντλίες, ανεμιστήρες, μεταφορικές ταινίες και άλλα συστήματα.

Σε ένα τριφασικό σύστημα υπάρχουν **6** δυνατοί συνδυασμοί σύνδεσης των φάσεων. Χωρίζονται αυστηρά σε **2 ομάδες των 3**.

### 2.5.1 Δεξιόστροφοι (ίδια φυσική φορά)

**R – S – T**

**S – T – R**

**T – R – S**

(κυκλικές μετατοπίσεις της ίδιας ακολουθίας)

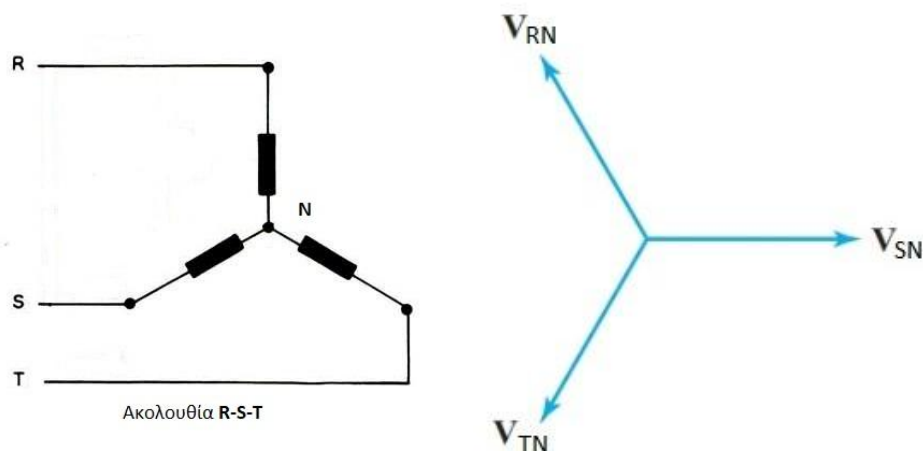
### 2.5.2 Αριστερόστροφοι (αντίστροφη φορά)

**R – T – S**

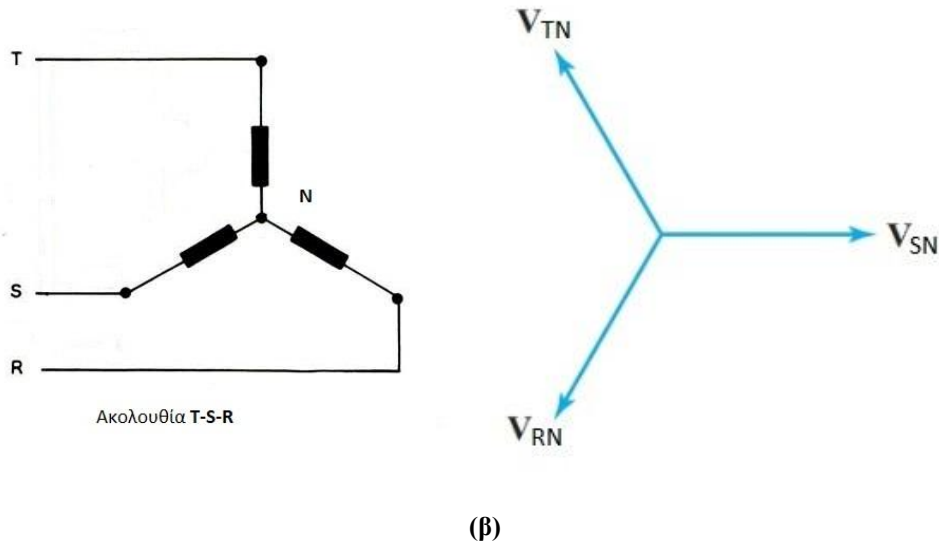
**T – S – R**

**S – R – T**

(κυκλικές μετατοπίσεις της αντίστροφης ακολουθίας)



(α)



Σχ. 2-6: Σύγκριση δεξιόστροφης (R–S–T) και αριστερόστροφης (T–S–R) ακολουθίας φάσεων.

Εκτός από τη σωστή ακολουθία, εξίσου σημαντική είναι και η **παρουσία και των τριών φάσεων**. Η απώλεια μίας φάσης (μονοφασική λειτουργία) μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και καταστροφή κινητήρων, ιδιαίτερα κατά την εκκίνηση ή σε συνθήκες φορτίου. Για τον λόγο αυτό, σε πολλές εγκαταστάσεις πραγματοποιείται έλεγχος τόσο της παρουσίας όσο και της σειράς των φάσεων πριν την ενεργοποίηση του εξοπλισμού.

Από ηλεκτρονική άποψη, η πληροφορία σχετικά με την ακολουθία φάσεων δεν προκύπτει από το πλάτος της τάσης, αλλά από τη **χρονική σχέση** μεταξύ των τριών εναλλασσόμενων σημάτων. Επομένως, για την ανίχνευση της σωστής ή λανθασμένης ακολουθίας απαιτείται η μετατροπή των ημιτονοειδών τάσεων σε κατάλληλα χρονικά σήματα, τα οποία μπορούν να συγκριθούν και να επεξεργαστούν με λογικά κυκλώματα.

Στην παρούσα διάταξη δεν χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός. Η συσκευή τροφοδοτείται αποκλειστικά από τις τρεις φάσεις του τριφασικού συστήματος, αξιοποιώντας την τάση μεταξύ φάσεων, η οποία σε τυπικό ευρωπαϊκό δίκτυο ανέρχεται στα 400 V. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την αυτοτροφοδότηση της συσκευής ανεξάρτητα από την ύπαρξη ουδέτερου, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει συμμετρική λειτουργία και των τριών φάσεων.

Επίσης, η ανίχνευση της ακολουθίας φάσεων βασίζεται στην παρακολούθηση της χρονικής στιγμής εμφάνισης χαρακτηριστικών σημείων των κυματομορφών κάθε φάσης. Μέσω κατάλληλης προσαρμογής των σημάτων και χρήσης λογικών κυκλωμάτων CMOS, καθίσταται δυνατή η αξιόπιστη αναγνώριση της σειράς R–S–T ή T–S–R και η αντίστοιχη οπτική ένδειξη προς τον χρήστη.

Η ακολουθία φάσεων δεν αποτελεί μόνο θεωρητική ιδιότητα του τριφασικού συστήματος, αλλά έχει άμεσες πρακτικές συνέπειες στη λειτουργία των τριφασικών ηλεκτρικών μηχανών. Ειδικότερα, η φορά περιστροφής του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και, κατ' επέκταση, η μηχανική φορά περιστροφής ενός τριφασικού κινητήρα καθορίζονται αποκλειστικά από τη χρονική σειρά των φάσεων. Για τον λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση της βασικής αρχής λειτουργίας των τριφασικών κινητήρων, πριν την ανάλυση της διάταξης ανίχνευσης ακολουθίας φάσεων.

## 2.6 Λειτουργία τριφασικών ηλεκτροκινητήρων

Οι τριφασικοί ηλεκτροκινητήρες αποτελούν την κυριότερη εφαρμογή των τριφασικών συστημάτων εναλλασσόμενης τάσης στη βιομηχανία και τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Η κατανόηση της αρχής λειτουργίας τους είναι απαραίτητη για την ερμηνεία της σημασίας της ακολουθίας φάσεων και της ανάγκης ελέγχου της.

### 2.6.1 Γενική αρχή λειτουργίας

Οι τριφασικοί ηλεκτροκινητήρες αποτελούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών στη βιομηχανία, λόγω της απλής κατασκευής, της υψηλής αξιοπιστίας και της ικανότητάς τους να αποδίδουν μεγάλη μηχανική ισχύ με υψηλή απόδοση. Η λειτουργία τους βασίζεται στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική μέσω της δημιουργίας **περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου** στον στάτη [6].

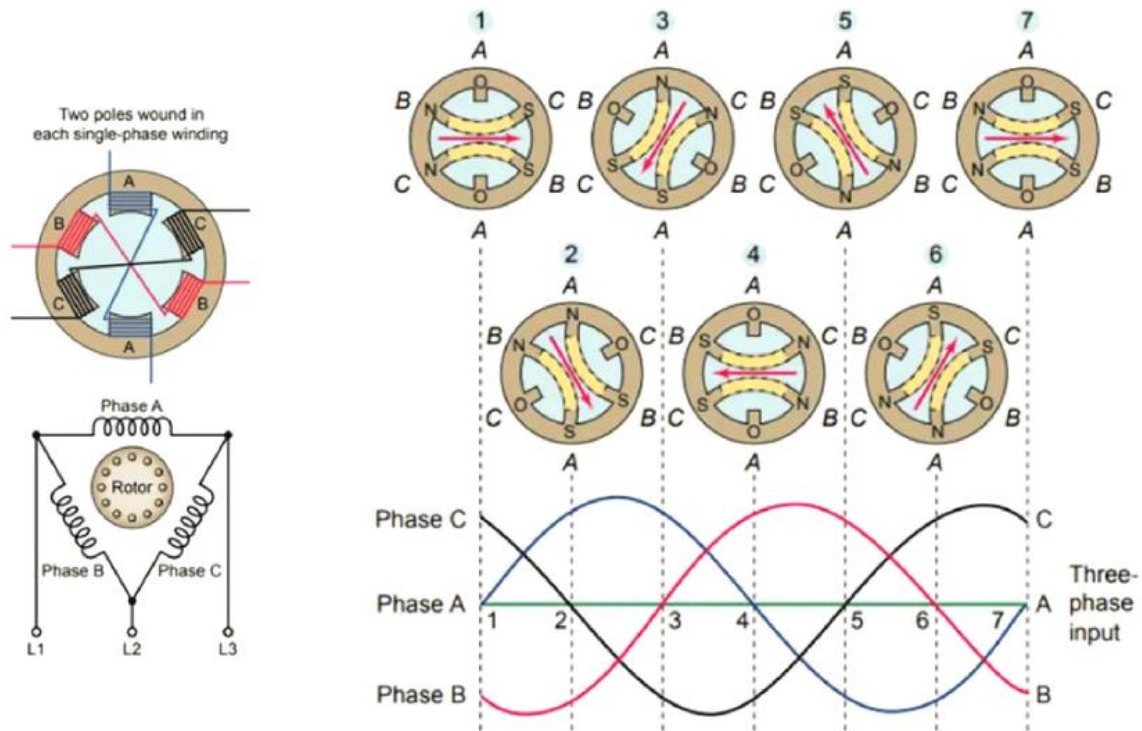
Όταν τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται από τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης, τα ρεύματα που τα διαρρέουν δημιουργούν τρία μαγνητικά πεδία χρονικά μετατοπισμένα κατά  $120^\circ$ . Η σύνθεση των πεδίων αυτών οδηγεί στη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου σταθερού περίπου μέτρου, το οποίο **περιστρέφεται στον χώρο**.

Η περιστροφή αυτή αποτελεί το θεμελιώδες φυσικό φαινόμενο πάνω στο οποίο βασίζεται η λειτουργία όλων των τριφασικών κινητήρων.

### 2.6.2 Περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και σύγχρονη ταχύτητα

Όταν τα τυλίγματα του στάτη ενός τριφασικού κινητήρα τροφοδοτούνται από τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης, τα ρεύματα που τα διαρρέουν δημιουργούν τρία μαγνητικά πεδία, τα οποία είναι χρονικά μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά  $120^\circ$ . Η σύνθεση των τριών αυτών πεδίων οδηγεί στη

δημιουργία ενός **περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου**, του οποίου το μέτρο παραμένει σχεδόν σταθερό, ενώ η κατεύθυνσή του μεταβάλλεται συνεχώς στον χώρο.



Σχ. 2.7 : Δημιουργία περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε τριφασικό κινητήρα.

Όταν τροφοδοτούμε τον τριφασικό στάτη μιας μηχανής με τριφασικό ρεύμα, τα τρία επιμέρους μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από κάθε φάση είδαμε ότι συντίθενται διανυσματικά. Λόγω της χρονικής διαφοράς φάσης ( $120^\circ$ ) και της γεωμετρικής τοποθέτησης των πηνίων, το συνολικό μαγνητικό πεδίο που προκύπτει δεν είναι στατικό, αλλά **περιστρέφεται** στον χώρο με τη σύγχρονη ταχύτητα

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

όπου  $n_s$  η σύγχρονη ταχύτητα (rpm),  $f$  η συχνότητα και  $p$  ο αριθμός των ζευγών πόλων

Για παράδειγμα, σε δίκτυο 50 Hz:

- κινητήρας 2 πόλων έχει σύγχρονη ταχύτητα 3000 rpm,
- κινητήρας 4 πόλων έχει σύγχρονη ταχύτητα 1500 rpm.

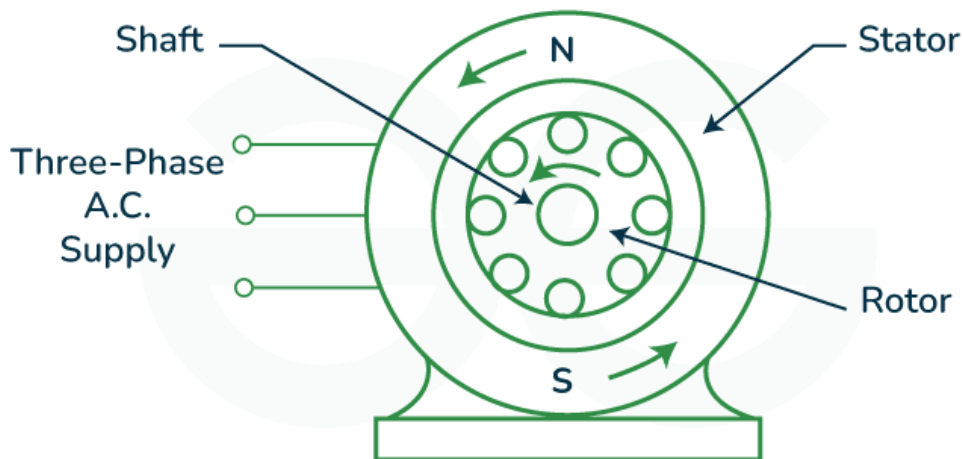
μας λέει πόσο γρήγορα περιστρέφεται το **στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο** μέσα στον στάτη μίας μηχανής.

Η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε ένα τριφασικό κινητήρα εξαρτάται αποκλειστικά από την **ακολουθία φάσεων** του τριφασικού συστήματος. Αν η ακολουθία αντιστραφεί, τότε αντιστρέφεται και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, χωρίς καμία άλλη μεταβολή στις ηλεκτρικές παραμέτρους του συστήματος [8].

### 2.6.3 Ασύγχρονος (επαγωγικός) τριφασικός κινητήρας

Ο ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος τριφασικού κινητήρα. Στον κινητήρα αυτόν, ο δρομέας δεν τροφοδοτείται απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίθετα, τα ρεύματα που τον διαρρέουν επάγονται από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, σύμφωνα με τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Τα επαγόμενα ρεύματα στον δρομέα δημιουργούν δικό τους μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με το πεδίο του στάτη. Η αλληλεπίδραση αυτή οδηγεί στην ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικής ροπής, με αποτέλεσμα την περιστροφή του δρομέα προς την ίδια κατεύθυνση με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.



Three Phase Induction Motor



Σχ. 2.8: Αρχή λειτουργίας τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα (στάτης – δρομέας).

Ο δρομέας δεν μπορεί να φτάσει τη σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου. Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ταχύτητας και της πραγματικής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα ονομάζεται **ολίσθηση** και αποτελεί απαραίτητη συνθήκη για την επαγωγή ρευμάτων και την παραγωγή ροπής.

### 2.6.4 Ολίσθηση και χαρακτηριστικά λειτουργίας

Η ολίσθηση  $s$  ορίζεται ως:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

όπου  $n$  είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

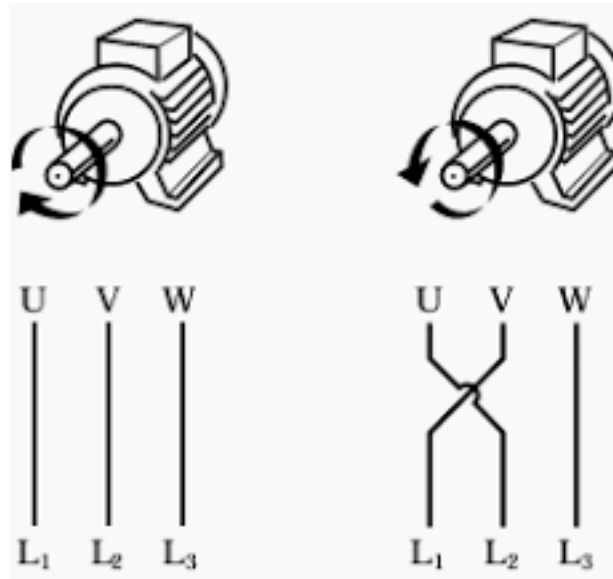
- Κατά την εκκίνηση:  $s = 1$
- Κατά την κανονική λειτουργία:  $s = 1\% - 5\%$

Η ύπαρξη ολίσθησης είναι απαραίτητη για την επαγωγή ρευμάτων στον δρομέα και, συνεπώς, για την παραγωγή ροπής.

### 2.6.5 Φορά περιστροφής και ακολουθία φάσεων

Η φορά περιστροφής του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου καθορίζεται αποκλειστικά από την **ακολουθία φάσεων** του τριφασικού συστήματος. Σε ακολουθία R-S-T, το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, ενώ σε ακολουθία R-T-S η φορά περιστροφής αντιστρέφεται.

Καθώς ο δρομέας τείνει να ακολουθήσει το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, η αλλαγή της ακολουθίας φάσεων οδηγεί άμεσα σε αντιστροφή της μηχανικής φοράς περιστροφής του κινητήρα. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται πρακτικά με την εναλλαγή δύο φάσεων του συστήματος τροφοδοσίας, χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε άλλη μεταβολή στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.



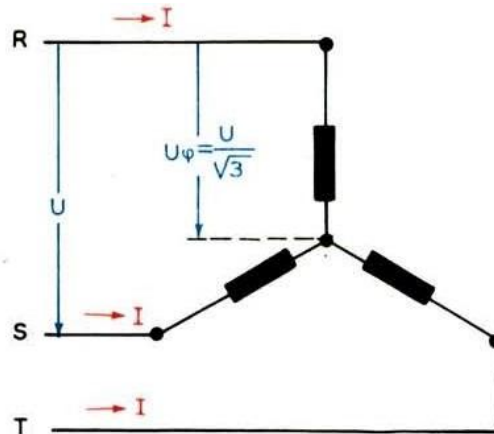
Σχ. 2.9: Σχέση ακολουθίας φάσεων και φοράς περιστροφής τριφασικού κινητήρα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η σωστή ακολουθία φάσεων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή και ορθή λειτουργία των τριφασικών κινητήρων. Η λανθασμένη διαδοχή των φάσεων μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αντίστροφη φορά περιστροφής, με σοβαρές λειτουργικές ή μηχανικές συνέπειες. Για τον λόγο αυτό, καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη διατάξεων ελέγχου και ανίχνευσης της ακολουθίας φάσεων, οι οποίες παρουσιάζονται και αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

## 2.7 Συνδεσμολογίες τριφασικών συστημάτων (Αστέρας και Τρίγωνο)

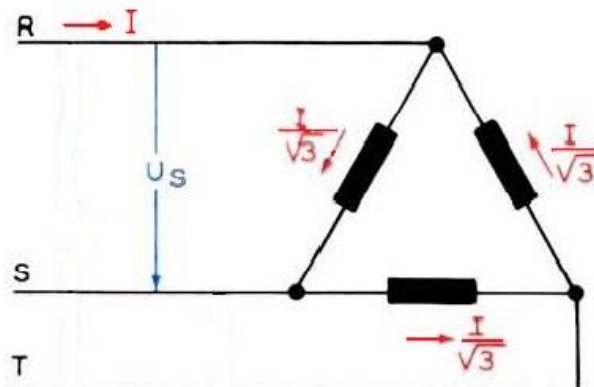
Στα τριφασικά συστήματα, τα φορτία μπορούν να συνδεθούν κυρίως με δύο βασικούς τρόπους: **αστέρα (Y)** και **τρίγωνο (Δ)**. Η επιλογή της συνδεσμολογίας του φορτίου δεν έχει σχέση με τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων της γεννήτριας ή του μετασχηματιστή που τροφοδοτείται από το δίκτυο. Οι δύο αυτές συνδεσμολογίες δεν μεταβάλλουν τη χρονική σχέση μεταξύ των φάσεων, αλλά επηρεάζουν τις τάσεις και τα ρεύματα που εμφανίζονται στους ακροδέκτες του φορτίου.

Στη σύνδεση **αστέρα (Y)**, τα τρία άκρα των τριφασικών τυλιγμάτων ενώνονται σε ένα κοινό σημείο, τον **ουδέτερο κόμβο**, ενώ τα άλλα τρία άκρα συνδέονται στις φάσεις R, S και T. Στην περίπτωση αυτή, η τάση κάθε τυλιγματος (φασική τάση) είναι ίση με την τάση μεταξύ φάσης και ουδετέρου, η οποία σε τυπικό ευρωπαϊκό δίκτυο είναι 230 V. Σχ. 2.10



Σχ. 2.10: Σύνδεση κατά Αστέρα

Αντίθετα, στη σύνδεση **τριγώνου (Δ)**, τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας έναν κλειστό βρόχο, και οι φάσεις συνδέονται στα σημεία ένωσης των τυλιγμάτων. Στην περίπτωση αυτή, κάθε τύλιγμα δέχεται την **τάση μεταξύ φάσεων**, η οποία σε δίκτυο χαμηλής τάσης είναι 400V. Σχ. 2.11



Σχ. 2.11: Σύνδεση κατά Τρίγωνο

Η επιλογή μεταξύ αστέρα και τριγώνου δεν επηρεάζει τη **σειρά των φάσεων** (R-S-T ή T-S-R), αλλά μόνο το επίπεδο τάσης και ρεύματος που εφαρμόζεται στα τυλίγματα. Συνεπώς, η έννοια της ακολουθίας φάσεων είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο συνδεσμολογίας του φορτίου [7].

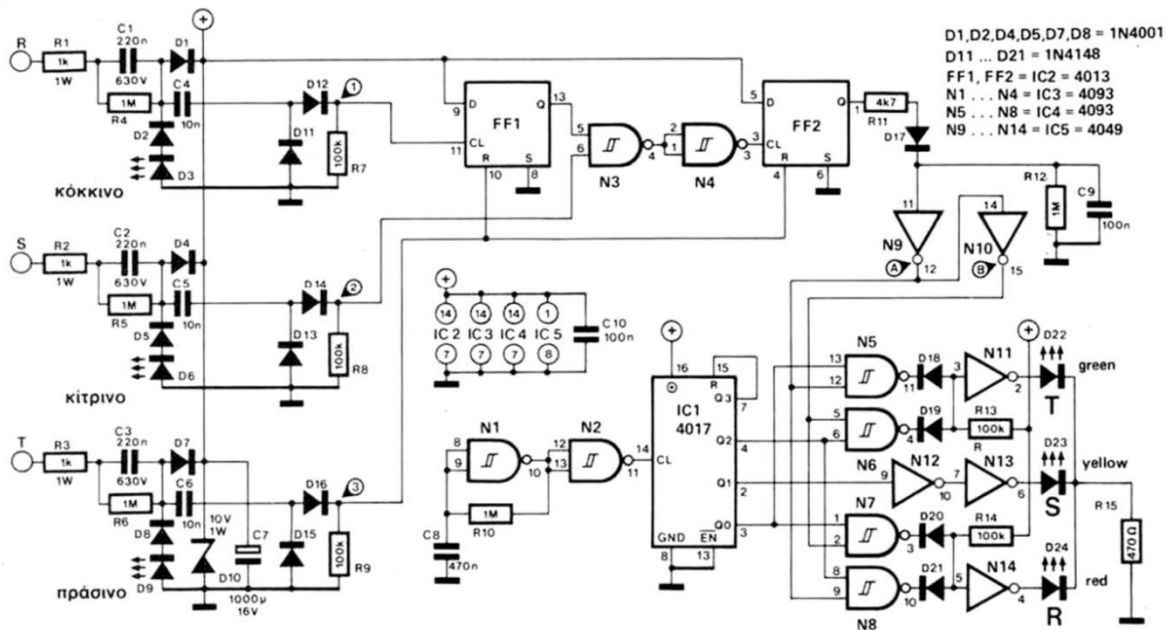
## 2.8 Επίλογος

Η έννοια της ακολουθίας φάσεων αποτελεί βασικό στοιχείο τόσο στη θεωρητική ανάλυση των τριφασικών συστημάτων όσο και στις πρακτικές εφαρμογές τους. Η κατανόησή της είναι απαραίτητη για την ασφαλή και ορθή λειτουργία ηλεκτρικών μηχανών και για τη σωστή σχεδίαση κυκλωμάτων ελέγχου και προστασίας σε τριφασικές εγκαταστάσεις, όπως ρελέ ελέγχου ακολουθίας φάσεων και διατάξεις προστασίας κινητήρων.

Ένα από αυτά είναι και το κύκλωμα που αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους στάδια προσαρμογής σήματος, λογικής επεξεργασίας και ένδειξης.

## Κεφάλαιο 3ο: Ανάλυση Κυκλώματος ανά Λειτουργικό Block

Στο Σχ. 3.1 παρουσιάζεται το πλήρες κυκλωματικό διάγραμμα της διάταξης. Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του, με δομική προσέγγιση ανά λειτουργικό block.



Σχ.3.1: Το πλήρες κυκλωματικό διάγραμμα του τριφασικού ανιχνευτή ακολουθίας φάσεων. Τρία LED χρησιμοποιούνται για την ένδειξη παρουσίας τάσης στις φάσεις του δικτύου, ενώ τα υπόλοιπα τρία LED σχηματίζουν μία κυκλική φωτεινή ακολουθία, η οποία απεικονίζει τη φορά περιστροφής του τριφασικού ηλεκτρικού πεδίου και, κατ' επέκταση, τη φορά περιστροφής του κινητήρα.

### 3.1 Block 1 – Είσοδος φάσεων, ένδειξη παρουσίας και προσαρμογή σήματος

#### 3.1.1 Σκοπός του Block

Ο σκοπός του πρώτου λειτουργικού block είναι η **ασφαλής λήψη των τριών φάσεων** του τριφασικού συστήματος, η **οπτική ένδειξη της παρουσίας τους** και η προσαρμογή τους ώστε να μπορούν να οδηγήσουν τα εσωτερικά στάδια χαμηλής ισχύος του κυκλώματος.

Στην παρούσα διάταξη δεν χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός. Η λειτουργία βασίζεται αποκλειστικά στις **τάσεις μεταξύ φάσεων**, οι οποίες σε τυπικό τριφασικό σύστημα χαμηλής τάσης ανέρχονται στα **400 V**. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε:

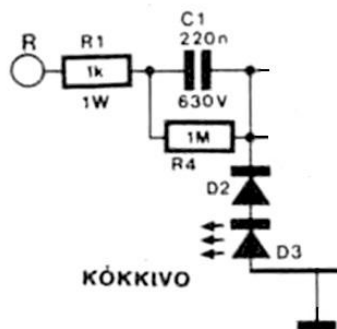
- να περιοριστεί το ρεύμα που εισέρχεται στο κύκλωμα,
- να προστατευθούν τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα,
- και να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία χρονισμού χωρίς επικίνδυνες τάσεις.

### 3.1.2 Είσοδοι του Block

Στις εισόδους του block καταλήγουν οι τρεις φάσεις του τριφασικού συστήματος, οι οποίες συμβολίζονται ως **R, S και T**.

Κάθε φάση εισέρχεται στο κύκλωμα **ανεξάρτητα** από τις άλλες και ακολουθεί παρόμοια διαδρομή επεξεργασίας, γεγονός που εξασφαλίζει συμμετρική λειτουργία και συγκρίσιμα σήματα στα επόμενα στάδια.

Η ανεξάρτητη και συμμετρική επεξεργασία κάθε φάσης εξασφαλίζει τόσο αξιόπιστη ανίχνευση παρουσίας όσο και συγκρίσιμη χρονική πληροφορία για τα επόμενα στάδια



Σχ.3.2: Είσοδοι, περιορισμός ρεύματος, πυκνωτικός υποβιβασμός και ένδειξη παρουσίας φάσεων.

### 3.1.3 Περιορισμός ρεύματος και βασική προστασία

Κατά την είσοδο κάθε φάσης, Σχ.3.2 παρεμβάλλονται αντιστάσεις R1, R2 και R3 μεγάλης ισχύος, οι οποίες λειτουργούν ως στοιχεία περιορισμού ρεύματος σε συνδυασμό με το πυκνωτικό τμήμα που ακολουθεί. Η επιλογή ισχύος γίνεται με βάση την υψηλή τάση του τριφασικού δικτύου και τη θερμική καταπόνηση που μπορεί να αναπτυχθεί σε συνθήκες λειτουργίας ή σφάλματος.

Οι αντιστάσεις αυτές:

- περιορίζουν το ρεύμα που μπορεί να ρεύσει προς το εσωτερικό του κυκλώματος,
- μειώνουν την καταπόνηση των στοιχείων που συνδέονται απευθείας με το δίκτυο,
- και επιτρέπουν τη λήψη χρονικής πληροφορίας με ασφαλή τρόπο.

Συμβάλλουν επιπλέον στον περιορισμό ρευμάτων αιχμής κατά τη σύνδεση ή σε στιγμιαίες υπερτάσεις του δικτύου.

### 3.1.4 Πυκνωτικός υποβιβασμός τάσης (capacitive dropper) μέσω C1–C3

Μετά τον περιορισμό του ρεύματος από τις αντιστάσεις R1–R3, η τροφοδότηση χαμηλής ισχύος της διάταξης υλοποιείται με **πυκνωτικό υποβιβασμό τάσης** (capacitive dropper) μέσω των πυκνωτών C1–C3. Οι πυκνωτές αυτοί λειτουργούν ως **χωρητική αντίδραση**  $X_C=1/(2\pi fC)$ , επιτρέποντας τη διέλευση **περιορισμένου εναλλασσόμενου ρεύματος** από το δίκτυο χωρίς τις μεγάλες απώλειες που θα είχε ένας καθαρά ωμικός υποβιβασμός. Έτσι, παρέχεται το απαιτούμενο ρεύμα για το τμήμα ανόρθωσης/εξομάλυνσης και τη δημιουργία της εσωτερικής DC τροφοδοσίας, με **πολύ μικρό αριθμό εξαρτημάτων** και χαμηλό κόστος, αλλά **χωρίς γαλβανική απομόνωση** από το δίκτυο.

Για λόγους ασφάλειας και σταθερής λειτουργίας, ο πυκνωτικός υποβιβασμός συνοδεύεται από παθητικά στοιχεία που περιορίζουν τα ρεύματα αιχμής και διασφαλίζουν φόρτιση/εκφόρτιση σε ασφαλή επίπεδα. Η προσέγγιση αυτή είναι ευρέως γνωστή στη βιβλιογραφία ως “transformerless / non-isolated capacitive power supply” και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πολύ χαμηλής ισχύος όπου η απομόνωση δεν αποτελεί απαίτηση.

**Σημείωση:** Η **σύζευξη σήματος** και η **εξαγωγή/διατήρηση χρονικής πληροφορίας** των φάσεων (pulse shaping / coupling) δεν ανήκουν λειτουργικά στο στάδιο υποβιβασμού ισχύος και αναλύονται στην επόμενη ενότητα, στο αντίστοιχο κύκλωμα C4–R7–D... (Block 3).

Ποσοτικός προσδιορισμός πυκνωτικού υποβιβασμού

Για τη συγκεκριμένη υλοποίηση επιλέχθηκαν πυκνωτές **C1–C3 = 220 nF / 630 V** τύπου **MKT**, κατάλληλοι για απευθείας σύνδεση σε εναλλασσόμενες τάσεις δικτύου. Η χωρητική αντίδραση κάθε πυκνωτή, για συχνότητα δικτύου 50 Hz, δίνεται από τη σχέση:

$$X_C = 1/2\pi fC$$

και για  $C=220 \text{ nF}$  προκύπτει:

$$X_C \approx 1/2\pi \cdot 50 \cdot 220 \times 10^{-9} \approx 14,5 \text{ k}\Omega$$

Η τιμή αυτή καθορίζει το **μέγιστο εναλλασσόμενο ρεύμα** που μπορεί να ρεύσει από κάθε φάση, το οποίο περιορίζεται σε επίπεδα της τάξης μερικών δεκάδων mA (θεωρητικό ανώτατο όριο), επαρκή για την τροφοδότηση του κυκλώματος ανόρθωσης και σταθεροποίησης, με σημαντικά μικρότερη πραγματική τιμή στη συγκεκριμένη διάταξη.

Η χρήση πυκνωτών τύπου MKT με ονομαστική τάση 630 V εξασφαλίζει επαρκές περιθώριο αντοχής έναντι των τάσεων μεταξύ φάσεων (400 V RMS), καθώς και αυξημένη αξιοπιστία σε μακροχρόνια λειτουργία. Παράλληλα, η απουσία ωμικών απωλειών καθιστά τον πυκνωτικό υποβιβασμό ενεργειακά αποδοτικό σε εφαρμογές πολύ χαμηλής ισχύος.

Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα **μη απομονωμένου πυκνωτικού τροφοδοτικού (non-isolated capacitive power supply)**, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης, όπου η απλότητα και το χαμηλό κόστος υπερिशύουν της ανάγκης γαλβανικής απομόνωσης.

Η αρχή λειτουργίας και τα όρια της μεθόδου αυτής αναλύονται εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία εφαρμογών.

### 3.1.5 Αντιστάσεις R4–R6 παράλληλα στους πυκνωτές (εκφόρτιση και σταθεροποίηση)

Οι αντιστάσεις R4–R6, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα με τους πυκνωτές C1–C3, λειτουργούν ως **αντιστάσεις εκφόρτισης (bleeder resistors)** και ταυτόχρονα συμβάλλουν στον καθορισμό ενός σταθερού σημείου αναφοράς (bias) στους αντίστοιχους κόμβους.

Ο ρόλος τους είναι να εξασφαλίζουν ότι οι πυκνωτές δεν παραμένουν φορτισμένοι όταν διακόπτεται η τάση ή όταν αλλάζουν οι συνθήκες λειτουργίας, βελτιώνοντας τη σταθερότητα και την επαναληψιμότητα της ένδειξης. Το ρεύμα που διαρρέει τις αντιστάσεις αυτές είναι πολύ μικρό και δεν αποτελεί τον κύριο παράγοντα αγωγής ή ενεργοποίησης των LED.

### 3.1.6 Ένδειξη παρουσίας φάσεων

Η ένδειξη παρουσίας των φάσεων υλοποιείται με ανεξάρτητα κλάδους για κάθε φάση, με **φωτοдиодους (LEDs D3, D6, D9)**. Εφόσον υπάρχει τάση σε μία φάση, ρέει μικρό εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω του αντίστοιχου κλάδου, επαρκές για την ενεργοποίηση του Led.

Για λόγους άμεσης αναγνώρισης εφαρμόζεται χρωματικός συμβολισμός:

- φάση **R** → κόκκινο LED,
- φάση **S** → κίτρινο LED,
- φάση **T** → πράσινο LED.

Με τον τρόπο αυτό, το κύκλωμα μπορεί να «δει» την παρουσία της κάθε φάσης και τη χρονική της μεταβολή, χωρίς να μεταφέρει επικίνδυνα επίπεδα ισχύος από το τριφασικό δίκτυο προς τα ηλεκτρονικά χαμηλής τάσης.

### 3.1.7 Προστασία φωτοδιόδων από ανάστροφη πόλωση

Οι διόδοι **D2, D5 και D8**, οι οποίες βρίσκονται σε σειρά με τις φωτοдиодους ένδειξης, επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος μόνο κατά τη μία ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάσης. Με τον τρόπο αυτό προστατεύουν τα LED από ανάστροφη πόλωση, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία δηλαδή θερμικό και ηλεκτρικό στρες των LED σε μακροχρόνια λειτουργία.

### 3.1.8 Έξοδος του Block 1 και λειτουργικός ρόλος

Το Block 1 λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ του τριφασικού δικτύου και των ηλεκτρονικών σταδίων του κυκλώματος, επιτρέποντας τη λήψη της χρονικής πληροφορίας των φάσεων με πολύ μικρά και ασφαλή ρεύματα.

Μέσω του περιορισμού ρεύματος και της πυκνωτικής σύζευξης, το κύκλωμα ανιχνεύει την παρουσία και τη χρονική μεταβολή κάθε φάσης χωρίς μεταφορά επικίνδυνων επιπέδων ισχύος προς τα ηλεκτρονικά χαμηλής τάσης, ενώ παράλληλα παρέχεται άμεση οπτική ένδειξη παρουσίας φάσεων.

Τα σήματα που προκύπτουν από αυτό είναι χαμηλής στάθμης και κατάλληλα για περαιτέρω επεξεργασία στα επόμενα λειτουργικά στάδια του κυκλώματος, ολοκληρώνοντας έτσι τη λειτουργία εισόδου και προσαρμογής των φάσεων.

## 3.2 Block 2 – Ανόρθωση, εξομάλυνση και σταθεροποίηση τάσης τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος

### 3.2.1 Σκοπός του Block

Σκοπός του Block 2 είναι η παραγωγή μίας **σταθεροποιημένης τάσης συνεχούς ρεύματος**, κατάλληλης για την τροφοδοσία των λογικών κυκλωμάτων CMOS του συστήματος. Η τροφοδοσία παράγεται **χωρίς μετασχηματιστή και χωρίς ουδέτερο αγωγό**, αξιοποιώντας απευθείας τις φάσεις του τριφασικού δικτύου, με περιορισμένα ρεύματα και χωρίς γαλβανική απομόνωση.

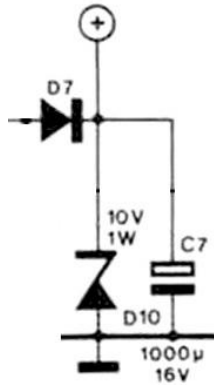
Το Block 2 αποτελεί **αυτόνομο ενεργειακό υποσύστημα** του κυκλώματος και δεν σχετίζεται με την επεξεργασία ή την ένδειξη των φάσεων, οι οποίες αναλύθηκαν στο Block 1.

### 3.2.2 Ανόρθωση από τις τρεις φάσεις

Η ανόρθωση της τάσης πραγματοποιείται με τις διόδους **D1, D4 και D7**, οι οποίες συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συλλέγουν ενέργεια από την εκάστοτε φάση που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη στιγμιαία τάση.

Κατά τη λειτουργία, κάθε χρονική στιγμή άγει η diode της φάσης με το υψηλότερο δυναμικό, επιτρέποντας τη φόρτιση του πυκνωτή εξομάλυνσης.

Η διάταξη αυτή υλοποιεί μια τριφασική ημιανόρθωση, η οποία πλεονεκτεί έναντι της μονοφασικής καθώς η συχνότητα της κυμάτωσης είναι τριπλάσια (150Hz), επιτρέποντας σταθερότερη τάση με μικρότερες απαιτήσεις φιλτραρίσματος.



Σχ.3.3: Διάταξη ανόρθωσης, σταθεροποίησης και εξομάλυνσης της τάσης δικτύου .

### 3.2.3 Εξομάλυνση της τάσης με τον πυκνωτή C7

Μετά την ανόρθωση, Σχ.3.3 η παραγόμενη τάση παρουσιάζει κυμάτωση λόγω της ημιτονοειδούς μορφής των φάσεων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο πυκνωτής **C7 (1000 μF)**, ο οποίος λειτουργεί ως πυκνωτής εξομάλυνσης.

Ο C7 φορτίζεται κατά τις χρονικές στιγμές αγωγής των διόδων και εκφορτίζεται στα ενδιάμεσα διαστήματα, μειώνοντας τις διακυμάνσεις της τάσης και παρέχοντας μία σχετικά ομαλή συνεχή τάση στην είσοδο του σταθεροποιητικού σταδίου.

### 3.2.4 Σταθεροποίηση της τάσης με δίοδο Zener

Η σταθεροποίηση της τάσης επιτυγχάνεται με τη δίοδο **Zener D10**, η οποία περιορίζει τη μέγιστη τάση τροφοδοσίας σε προκαθορισμένη τιμή, κατάλληλη για τα λογικά κυκλώματα CMOS.

Όταν η τάση εξόδου τείνει να υπερβεί την τάση διάσπασης της Zener, η δίοδος άγει και απορροφά το πλεονάζον ρεύμα, διατηρώντας την τάση εντός ασφαλών ορίων. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται αξιόπιστη λειτουργία των CMOS ολοκληρωμένων, τα οποία απαιτούν σταθερή τάση τροφοδοσίας εντός συγκεκριμένου εύρους.

### 3.2.5 Πλωτή αναφορά και απουσία ουδέτερου

Το αρνητικό άκρο της παραγόμενης συνεχούς τάσης **δεν συνδέεται με ουδέτερο ή γείωση**, αλλά αποτελεί **πλωτό σημείο αναφοράς (floating reference)**, το οποίο ορίζεται εσωτερικά από τη λειτουργία του κυκλώματος.

Η τροφοδοσία αυτή δεν είναι γαλβανικά απομονωμένη από το δίκτυο, γεγονός που επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς το σημείο αναφοράς του κυκλώματος (GND) βρίσκεται σε επικίνδυνο δυναμικό ως προς τη γείωση της εγκατάστασης. Ωστόσο, η πλωτή αυτή αναφορά είναι απολύτως επαρκής για την τροφοδοσία και σωστή λειτουργία των εσωτερικών λογικών κυκλωμάτων.

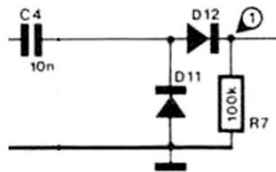
Καθώς το κύκλωμα δεν έχει ουδέτερο, η "επιστροφή" του ρεύματος από τη Zener και τον C7 προς το δίκτυο γίνεται μέσω των άλλων δύο φάσεων (που εκείνη τη στιγμή έχουν χαμηλότερο δυναμικό).

### 3.2.6 Έξοδος του Block 2 και σύνδεση με το επόμενο στάδιο

Η έξοδος του Block 2 παρέχει μία σταθεροποιημένη τάση συνεχούς ρεύματος, η οποία χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την τροφοδοσία των λογικών κυκλωμάτων CMOS του συστήματος. Με την ολοκλήρωση του Block 2, το κύκλωμα διαθέτει την απαραίτητη τροφοδοσία DC για τη λειτουργία των λογικών σταδίων. Η χρονική πληροφορία των φάσεων, η οποία έχει εξαχθεί ανεξάρτητα στο Block 1 μέσω των αντίστοιχων κλάδων σύζευξης (C4–C6), σε συνδυασμό με την παρεχόμενη τροφοδοσία, επιτρέπει την υλοποίηση της λογικής ανίχνευσης της ακολουθίας φάσεων, η οποία αναλύεται στο επόμενο λειτουργικό block.

### 3.3 Block 3 – Διαμόρφωση παλμών φάσης και παραγωγή σημάτων ελέγχου

Το Block 3 αποτελεί το στάδιο στο οποίο η χρονική πληροφορία κάθε φάσης, όπως αυτή έχει εξαχθεί στα προηγούμενα blocks, μετατρέπεται σε **σαφή σήματα ελέγχου**, κατάλληλα για την οδήγηση των λογικών κυκλωμάτων CMOS του επόμενου σταδίου. Η λειτουργία του Block 3 δεν σχετίζεται με την παραγωγή ή τη σταθεροποίηση τάσης, αλλά αποκλειστικά με τη **διαμόρφωση και τον έλεγχο της μορφής των σημάτων**.



Σχ.3.4: Κύκλωμα σύζευξης και χρονικής διαμόρφωσης (C4-R7).

Για κάθε φάση (R, S, T) χρησιμοποιείται ένα όμοιο υποκύκλωμα, αποτελούμενο από έναν πυκνωτή σύζευξης, μία αντίσταση αναφοράς και δύο διόδους, το οποίο οδηγεί σε αντίστοιχο σημείο ελέγχου (1, 2 ή 3).

#### 3.3.1 Κύκλωμα σύζευξης και χρονικής διαμόρφωσης (C4-R7)

Ο πυκνωτής **C4** σε συνδυασμό με την αντίσταση **R7**, Σχ. 3.4 σχηματίζουν ένα κύκλωμα σύζευξης με χαρακτηριστικά υψηλοπερατού φίλτρου.

Ο ρόλος του κυκλώματος αυτού είναι:

- να απομονώνει οποιαδήποτε στατική (DC) συνιστώσα,
- και να μεταφέρει προς το επόμενο στάδιο κυρίως τη **χρονική μεταβολή** της τάσης της αντίστοιχης φάσης.

Η χρονική σταθερά του κυκλώματος  $\tau = R7 \cdot C4$  επιλέγεται έτσι ώστε το σήμα εξόδου να ακολουθεί τις μεταβολές της ημιτονοειδούς τάσης, χωρίς να μεταφέρει πληροφορία πλάτους σε απόλυτη μορφή.

Με τον τρόπο αυτό διατηρείται κυρίως το «πότε» της φάσης και όχι το «πόσο».

### 3.3.2 Ρόλος των διόδων D11 και D12 – Κατεύθυνση και περιορισμός σήματος

Οι διόδοι **D11** και **D12** δεν συνδέονται με τη σταθεροποιημένη τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος και δεν λειτουργούν ως περιοριστές προς τις γραμμές τροφοδοσίας. Ο ρόλος τους είναι **τοπικός** και αφορά αποκλειστικά τη διαμόρφωση του σήματος που προκύπτει από το κύκλωμα C4–R7.

Συγκεκριμένα, οι διόδοι:

- επιβάλλουν καθορισμένη κατεύθυνση στη μεταβολή της τάσης που εμφανίζεται στο σημείο ελέγχου,
- απορρίπτουν ανεπιθύμητες πολικότητες της μεταβατικής τάσης,
- και περιορίζουν το πλάτος των μεταβολών σε ασφαλή επίπεδα ως προς το **πλωτό σημείο αναφοράς** του υποκυκλώματος.

Με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται η εμφάνιση απρόβλεπτων τάσεων στο σημείο ελέγχου και εξασφαλίζεται επαναλαμβανόμενη και ελεγχόμενη μορφή σήματος.

### 3.3.3 Αντίσταση R7 – Σημείο αναφοράς και εκφόρτιση

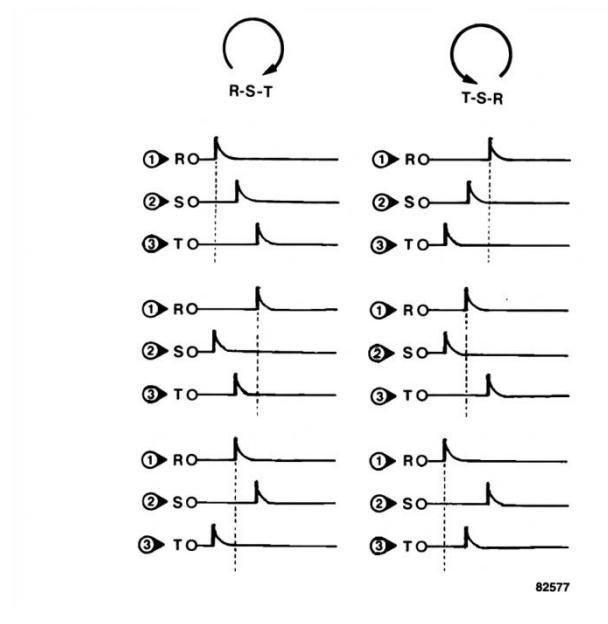
Η αντίσταση **R7** παρέχει καθορισμένο σημείο αναφοράς για το σήμα ελέγχου και λειτουργεί ως διαδρομή εκφόρτισης του πυκνωτή C4 μεταξύ διαδοχικών κύκλων. Χωρίς την παρουσία της R7, το σημείο ελέγχου θα παρέμενε αιωρούμενο, γεγονός που θα οδηγούσε σε ασταθή ή μη επαναλήψιμη λογική συμπεριφορά.

Η R7, σε συνεργασία με τις διόδους, καθορίζει τη χρονική διάρκεια και την αποκατάσταση του σήματος μετά από κάθε μεταβολή.

### 3.3.4 Σημεία Ελέγχου 1,2 και 3

Στα σημεία ελέγχου **1, 2 και 3** προκύπτουν τρία ανεξάρτητα σήματα, ένα για κάθε φάση του τριφασικού συστήματος. Τα σήματα αυτά:

- φέρουν τη χρονική πληροφορία της αντίστοιχης φάσης,
- έχουν ελεγχόμενο πλάτος και καθορισμένη πολικότητα,
- και είναι κατάλληλα για άμεση χρήση ως σήματα ελέγχου στα λογικά κυκλώματα CMOS του επόμενου block.



Σχ.3.5: Χρονική αντιστοιχία των 6 δυνατών συνδυασμών διαδοχής παλμών στα σημεία 1,2,3 του Σχ 3.0

Η χρονική διαφορά μεταξύ των σημάτων μας δίνει την διαφορά των φάσεων του δικτύου και αποτελεί τη βάση για την ανίχνευση της ακολουθίας φάσεων.

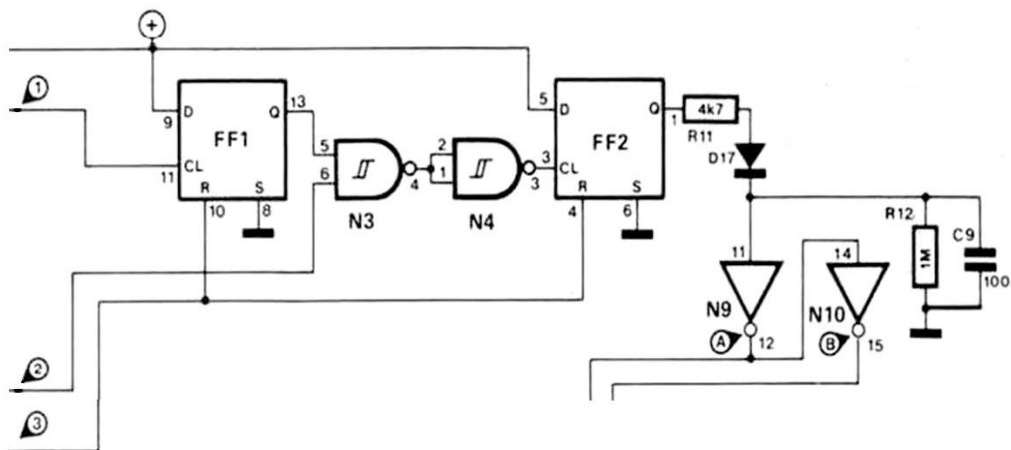
### 3.3.5 Ρόλος του Block 3 στη συνολική λειτουργία

Το Block 3 ολοκληρώνει τη μετάβαση από την αναλογική πληροφορία φάσης σε διακριτά σήματα ελέγχου, χωρίς να εισάγει νέα ενεργειακά στάδια ή σταθεροποίηση τάσης. Με την έξοδό του, το κύκλωμα διαθέτει καθορισμένα σήματα χρονισμού, έτοιμα να οδηγήσουν το επόμενο λογικό στάδιο, το οποίο θα χρησιμοποιήσει τη σειρά εμφάνισής τους για τον προσδιορισμό της ακολουθίας φάσεων.

### 3.4 Block 4 – Λογική ανίχνευσης ακολουθίας φάσεων (Sequence Detection Logic)

Το Block 4 αποτελεί το στάδιο λήψης απόφασης του κυκλώματος. Χρησιμοποιώντας τους παλμούς χρονισμού που προέρχονται από τις τρεις φάσεις, το κύκλωμα αναγνωρίζει τη σειρά διαδοχής τους και ενεργοποιεί την αντίστοιχη έξοδο ένδειξης (Σημείο A ή B).

Η λογική ανίχνευσης Σχ.3.6, υλοποιείται με το ολοκληρωμένο CD4013 (Dual D-Type Flip-Flop) και με πύλες NAND του CD4093.



Σχ.3.6: Κύκλωμα της λογικής ανίχνευσης της ακολουθίας (R-S-T).

#### 3.4.1 Δομή και κατάσταση ηρεμίας

Τα δύο flip-flops (FF1 και FF2) είναι ρυθμισμένα ώστε να λειτουργούν ως μνήμες μίας κατάστασης:

- **Είσοδοι Data (D1, D2):**  
Συνδέονται μόνιμα στο λογικό HIGH ( $V_{CC}$ ). Με τον τρόπο αυτό, κάθε παλμός στην είσοδο Clock μεταφέρει λογικό “1” στην έξοδο Q.
- **Είσοδοι Reset (R1, R2):**  
Συνδέονται στη Φάση T (Σημείο 3). Κάθε κύκλος λειτουργίας ολοκληρώνεται με έναν παλμό Reset, ο οποίος επαναφέρει τις εξόδους Q σε λογικό LOW.
- **Σήμα Αναφοράς:**  
Η Φάση R (Σημείο 1) χρησιμοποιείται ως σήμα έναρξης της διαδικασίας ανίχνευσης της ακολουθίας.

### 3.4.2 Ανίχνευση δεξιόστροφης ακολουθίας (R–S–T)

Στη δεξιόστροφη ακολουθία R–S–T, για τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία της παροχής στην πλακέτα, οι παλμοί εμφανίζονται χρονικά ως εξής:

R στο Σημείο 1 → S στο Σημείο 2 → T στο Σημείο 3

Υπενθυμίζεται ότι:

- το Σημείο 1 οδηγεί το Clock του FF1,
- το Σημείο 2 οδηγείται στην πύλη N3 (και μέσω N3–N4 μπορεί να χρονίσει το FF2),
- το Σημείο 3 οδηγεί τα Reset των FF1 και FF2,
- τα D των FF είναι μόνιμα στο λογικό HIGH.

Βήμα 1 — Παλμός στο Σημείο 1 (R) – Ενεργοποίηση

Ο παλμός της φάσης R στο Σημείο 1 εφαρμόζεται στην είσοδο Clock του FF1. Με δεδομένο ότι η είσοδος D είναι στο λογικό HIGH, το FF1 χρονίζεται και η έξοδος Q1 τίθεται σε HIGH.

Η κατάσταση αυτή λειτουργεί ως σήμα ενεργοποίησης (enable) για τη λογική πύλη N3, προετοιμάζοντας το κύκλωμα για τον έλεγχο της επόμενης φάσης.

Βήμα 2 — Παλμός στο Σημείο 2 (S) – Διέλευση

Ο παλμός της φάσης S εμφανίζεται στο Σημείο 2 και οδηγείται στην πύλη N3. Επειδή το Q1 είναι ήδη HIGH, η N3 επιτρέπει τη διέλευση/διαμόρφωση του παλμού. Μέσω της N4, ο παλμός μετατρέπεται σε κατάλληλη ακμή χρονισμού για το Clock του FF2.

Το FF2 χρονίζεται, και επειδή το D είναι μόνιμα στο HIGH, η έξοδος Q2 μεταβαίνει σε κατάσταση HIGH.

Αυτό αποτελεί το καθοριστικό γεγονός της δεξιόστροφης ανίχνευσης.

Βήμα 3 — Παλμός στο Σημείο 3 (T) – Reset και **Επαναφορά**

Ο παλμός της φάσης T στο Σημείο 3 οδηγεί τις εισόδους Reset των FF1 και FF2, μηδενίζοντας τις εσωτερικές ψηφιακές καταστάσεις και ολοκληρώνοντας τον κύκλο ανίχνευσης προετοιμάζοντας το κύκλωμα για τον επόμενο κύκλο των 20ms (συχνότητα 50 Hz).

Ωστόσο, το αποτέλεσμα της ανίχνευσης δεν χάνεται, όπως εξηγείται παρακάτω στην παράγραφο 3.4.3.

Συμπέρασμα για τη δεξιόστροφη περίπτωση:

Στη διαδοχή R–S–T, η εμφάνιση του παλμού στο Σημείο 2 (S) ενώ το FF1 παραμένει ενεργοποιημένο από το προηγούμενο Σημείο 1 (R) οδηγεί με επιτυχία στον χρονισμό του FF2. Το γεγονός αυτό καταγράφεται και διατηρείται από το κύκλωμα μνήμης, επιτρέποντας την αξιόπιστη αναγνώριση της δεξιόστροφης φοράς ανεξάρτητα από επόμενους παλμούς reset.

### 3.4.3 Ανίχνευση αριστερόστροφης ακολουθίας (R–T–S)

Στην αριστερόστροφη ακολουθία R–T–S, οι παλμοί εμφανίζονται στα σημεία 1,2,3 με διαφορετική σειρά από ότι στην ορθή ως R-S-T:

R (Σημείο 1) → T (Σημείο 2) → S (Σημείο 3)

Βήμα 1 — Παλμός στο Σημείο 1 (R) – Ενεργοποίηση

Ο παλμός της Φάσης R εφαρμόζεται στην είσοδο Clock του FF1 και πάλι. Η είσοδος D είναι μόνιμα στο λογικό HIGH, το FF1 χρονίζεται και η έξοδος Q1 τίθεται σε κατάσταση HIGH.

Η κατάσταση αυτή λειτουργεί ως σήμα ενεργοποίησης (enable) για τη λογική διέλευσης του επόμενου παλμού.

Βήμα 2 — Παλμός στο Σημείο 3 (S) – Reset και Πρόωρη Επαναφορά

Ο παλμός της S εφαρμόζεται στις εισόδους Reset των FF1 και FF2, μηδενίζοντας τις εξόδους τους και ολοκληρώνοντας τον κύκλο ανίχνευσης. Με τον τρόπο αυτό, το κύκλωμα επανέρχεται σε κατάσταση αναμονής για την εμφάνιση του επόμενου παλμού.

Βήμα 3 — Παλμός στο Σημείο 3 (T) – Απόρριψη Σήματος

Ο παλμός της T οδηγείται στην πύλη N3. Εφόσον η πύλη N3 παραμένει ανενεργή ο παλμός δεν φτάνει στο FF2.

**Αποτέλεσμα:**

Η έξοδος Q2 παραμένει σε λογικό LOW. Η κατάσταση αυτή οδηγεί το Σημείο B σε κατάσταση HIGH, υποδηλώνοντας αριστερόστροφη φορά περιστροφής.

Αντίστοιχη λειτουργία προκύπτει και για τις λοιπές δυνατές διαδοχές που ανήκουν στην ίδια κατηγορία φοράς, καθώς ο μηχανισμός αντίχενυσης και αποθήκευσης βασίζεται αποκλειστικά στη χρονική σχέση των παλμών και όχι στην ονομασία της φάσης.

#### **3.4.4 Ολοκλήρωση και εξομάλυνση σήματος (Integrator)**

##### **Ρόλος του κυκλώματος C9–R12–D17**

Κρίσιμο στοιχείο της λειτουργίας αποτελεί το κύκλωμα που αποτελείται από την R11 από τον πυκνωτή C9, την αντίσταση R12 και τη δίοδο D17 χρησιμοποιείται για τη χρονική σταθεροποίηση και διατήρηση του αποτελέσματος της αντίχενυσης ακολουθίας. Η φόρτιση του C9 επιτρέπεται μόνο όταν η έξοδος του αντίστοιχου flip-flop βρίσκεται στη σωστή λογική κατάσταση (HIGH), ενώ η δίοδος D17 αποτρέπει την εκφόρτιση του πυκνωτή προς τα πίσω μέσω του flip-flop κατά τη φάση μηδενισμού.

Η αντίσταση R12 καθορίζει τη χρονική διάρκεια διατήρησης της ένδειξης, επιτρέποντας την ομαλή και σταθερή εμφάνιση του αποτελέσματος στις εξόδους του κυκλώματος. Ο C9 δεν προλαβαίνει να εκφορτιστεί λόγω της σχετικά μεγάλης σταθεράς χρόνου εκφόρτισης και με τον τρόπο αυτό, η πληροφορία της ακολουθίας φάσεων διατηρείται ακόμη και μετά την παύση των παλμών χρονισμού.

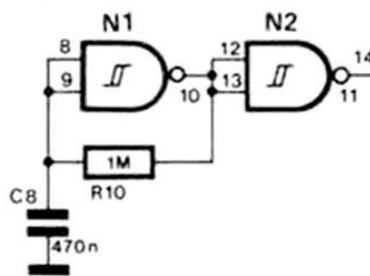
#### **3.5 Block 5 – Μονάδα Παραγωγής Ακολουθίας και Οπτικής Ένδειξης**

Το τελευταίο στάδιο του κυκλώματος αναλαμβάνει να οπτικοποιήσει τη φορά περιστροφής των φάσεων. Το Block 5 λαμβάνει τα σήματα ελέγχου από τα σημεία A και B και, μέσω ενός εσωτερικού ταλαντωτή και ενός απαριθμητή, οδηγεί τρία LED (D24, D23, D22) σε μια κυκλική διαδοχή.

### 3.5.1 Ο Ταλαντωτής Χρονισμού (Clock Oscillator)

Πριν τον απαριθμητή, απαιτείται ένα σήμα χρονισμού που καθορίζει την ταχύτητα με την οποία ανάβουν τα LEDs.

- **Στοιχεία:** Χρησιμοποιείται η πύλη **N1** (από το IC3 4093) σε συνδεσμολογία ασταθούς πολυδονητή, μαζί με την αντίσταση R12 και τον πυκνωτή C10.
- **Λειτουργία:** Η N1 παράγει μια συνεχή σειρά τετραγωνικών παλμών. Η συχνότητα αυτής της ταλάντωσης είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα του δικτύου (50Hz) και έχει επιλεγεί έτσι ώστε η κίνηση των LED να είναι ευδιάκριτη από το ανθρώπινο μάτι.
- **Απομόνωση:** Η πύλη **N2** λειτουργεί ως βαθμίδα απομόνωσης (buffer), μεταφέροντας το σήμα χρονισμού στην είσοδο Clock (pin 14) του IC1.

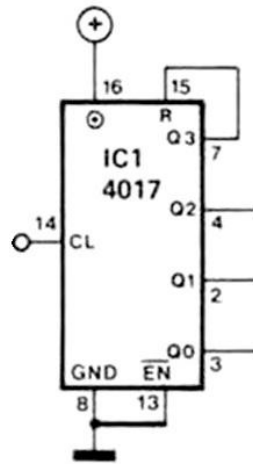


Σχ.3.7: Ταλαντωτής χρονισμού (Clock Oscillator).

### 3.5.2 Ο Δεκαδικός Απαριθμητής CD4017 (IC1)

Το IC1 είναι ένας απαριθμητής τύπου Johnson με 10 αποκωδικοποιημένες εξόδους.

- **Κυκλική Λειτουργία:** Αν και το ολοκληρωμένο διαθέτει 10 εξόδους, εμείς χρειαζόμαστε μόνο 3 για να αντιστοιχούν στις 3 φάσεις. Για τον λόγο αυτό, η τέταρτη έξοδος Q3, (pin 7) συνδέεται στην είσοδο **Reset** (pin 15). Έτσι, μόλις ο απαριθμητής φτάσει στο "3", επαναφέρεται άμεσα στην αρχική του κατάσταση, δημιουργώντας έναν συνεχή βρόχο τριών καταστάσεων (0-1-2 → 0-1-2).
- **Έξοδοι:** Οι τρεις ενεργές έξοδοι παρέχουν διαδοχικά παλμούς HIGH, οι οποίοι αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία της οπτικής ακολουθίας [14].



Σχ.3.8: Δεκαδικός Απαριθμητής CD4017.

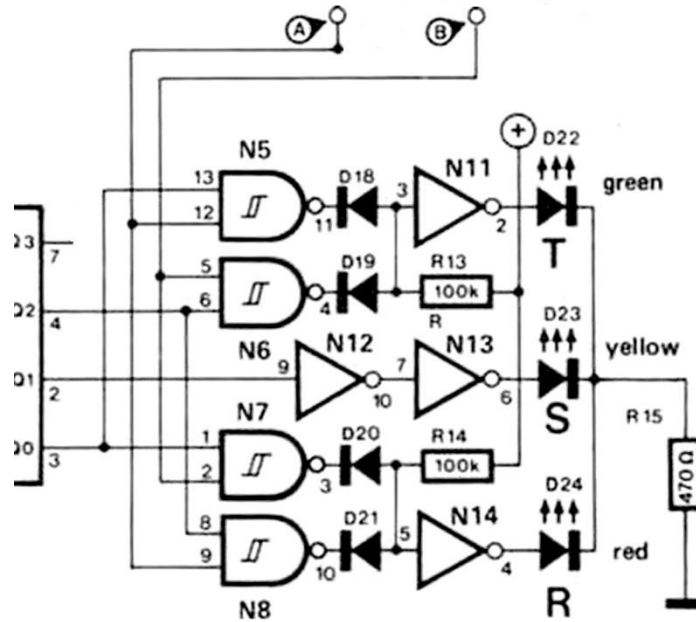
### 3.5.3 Λογική Επιλογής Διαδρομής (Gating Logic – N5 έως N8)

Η λογική επιλογής διαδρομής είναι το υποσύστημα που συνδέει τη στατική πληροφορία του Block 4 (κατεύθυνση) με τη δυναμική πληροφορία του CD4017 (χρονισμός). Ουσιαστικά, οι τέσσερις πύλες NAND (N5, N6, N7, N8) του ολοκληρωμένου **IC4 (CD4093)** λειτουργούν ως ένας ηλεκτρονικός διακόπτης δύο δρόμων.

#### 3.5.3.1 Τα Σήματα Ελέγχου ως "Gate Enables"

Τα σήματα από τα σημεία **A** (Αριστερόστροφη) και **B** (Δεξιόστροφη) λειτουργούν ως σήματα ενεργοποίησης (Enable) για τις αντίστοιχες πύλες:

- Όταν το **Σημείο B** είναι HIGH, ενεργοποιούνται οι πύλες που αντιστοιχούν στη δεξιόστροφη ακολουθία.
- Όταν το **Σημείο A** είναι HIGH, ενεργοποιούνται οι πύλες που αντιστοιχούν στην αριστερόστροφη ακολουθία.



Σχ.3.9: Μηχανισμός αντιμετάθεσης και βαθμίδα εξόδου με LEDs .

### 3.5.3.2 Μηχανισμός Αντιμετάθεσης (Cross-Routing)

#### 1. Δεξιόστροφη Λειτουργία (B = HIGH):

Σε αυτή την κατάσταση, οι πύλες **N6** και **N7** τίθενται σε κατάσταση αναμονής σήματος (enabled), καθώς η μία είσοδός τους πολώνεται σε HIGH επίπεδο.

- Η πύλη **N7** δέχεται το σήμα Q0 στο pin 1 (πρώτος παλμός) και το σήμα από το σημείο B. Εφόσον το B είναι HIGH, το σήμα Q0 περνάει (αναστραμμένο) και οδηγεί το **LED R (D24)**.
- Η πύλη **N6** δέχεται το σήμα Q2 στο pin 6 (τρίτος παλμός) και το σήμα από το σημείο B. Το σήμα Q2 περνάει (αναστραμμένο) και οδηγεί το **LED T (D22)**.
- **Λογική Wired-OR:** Οι έξοδοι των πυλών που καταλήγουν στο ίδιο LED (π.χ. N7 και N8 για το D24) απομονώνονται μέσω των διόδων D20- D21. Η αντίσταση pull-up (100kΩ) εξασφαλίζει ότι η είσοδος του driver N14 (CD4049) παραμένει σε HIGH κατάσταση, εκτός αν μία από τις δύο NAND δώσει LOW σήμα (ενεργός παλμός).
- **Ακολουθία:** Q0 → R, Q1 → S, Q2 → T (Σειρά: **R-S-T**).

## 2. Αριστερόστροφη Λειτουργία (A = HIGH):

Υπό τις συνθήκες αυτές ενεργοποιούνται οι πύλες **N5** και **N8**.

- Η πύλη **N5** δέχεται το σήμα Q0 στο pin 1 (πρώτος παλμός) και το σήμα από το σημείο A. Εφόσον το A είναι HIGH, το σήμα Q0 περνάει (αναστραμμένο) και οδηγεί το **LED T (D22)**.
- Η πύλη **N8** δέχεται το σήμα Q2 pin 8 (τρίτος παλμός) και το σήμα από το σημείο A. Το σήμα Q2 δρομολογείται προς το **LED R (D24)**.
- **Λογική Wired-OR:** Οι έξοδοι των πυλών που καταλήγουν στο ίδιο LED (π.χ. N5 και N6 για το D22) απομονώνονται μέσω των διόδων D18- D19. Η αντίσταση pull-up (100kΩ) εξασφαλίζει ότι η είσοδος του driver N11 (CD4049) παραμένει σε HIGH κατάσταση, εκτός αν μία από τις δύο NAND δώσει LOW σήμα (ενεργός παλμός).
- **Ακολουθία:** Q0 → T, Q1 → S, Q2 → R (Σειρά: **T-S-R**).

### 3.5.3.3 Ο ρόλος της Πύλης NAND ως Διακόπτη

Η χρήση πυλών NAND (Schmitt Trigger) προσφέρει δύο πλεονεκτήματα:

- **Λογικός Έλεγχος:** Μια πύλη NAND με δύο εισόδους λειτουργεί ως αναστροφέας για τη μία είσοδο μόνο όταν η άλλη είσοδος είναι HIGH. Αν η είσοδος ελέγχου (A ή B) είναι LOW, η έξοδος της πύλης παραμένει σταθερά HIGH, «κλείνοντας» τη διαδρομή του σήματος.
- **Καθαρότητα Σήματος:** Λόγω της ιδιότητας Schmitt Trigger, τυχόν θόρυβος που μπορεί να έχει παρεισφρήσει στα σήματα ελέγχου απορρίπτεται, εξασφαλίζοντας ότι τα LED τροφοδοτηθούν σωστά. Σε κάθε άλλη περίπτωση θα μπορούσαν να προκαλέσουν "τρεμόπαιγμα" (flicker) στα LED.

### 3.5.3.4 Συγχρονισμός με τη Μεσαία Φάση (S)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο παλμός **Q1** (ο δεύτερος κατά σειρά από τον 4017) οδηγεί πάντα το LED S (D23), ανεξάρτητα από τα σημεία A και B. Αυτό συμβαίνει επειδή σε οποιαδήποτε κυκλική εναλλαγή τριών στοιχείων, το μεσαίο στοιχείο παραμένει στη θέση του αν αντιστρέψουμε τα δύο άκρα. Αυτή η απλοποίηση μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων πυλών στο κύκλωμα.

### 3.5.4 Βαθμίδα Εξόδου και LED

Λόγω της περιορισμένης ικανότητας παροχής ρεύματος των CMOS, χρησιμοποιούνται οι αναστροφείς **N11 έως N14** (IC5 4049) ως οδηγοί (drivers).

- **Διάταξη:** Τα LED D24, D23 και D22 τοποθετούνται στην πρόσοψη της συσκευής σε σχηματισμό **ισόπλευρου τριγώνου**. Αυτή η γεωμετρική διάταξη επιτρέπει στον χρήστη να αντιληφθεί αμέσως τη «φορά περιστροφής» του φωτεινού παλμού, η οποία αντιστοιχεί στη φορά περιστροφής του ηλεκτρικού πεδίου του κινητήρα.

Με τη διάταξη αυτή, η κατεύθυνση της ένδειξης καθορίζεται αποκλειστικά από τη λογική απόφαση των προηγούμενων σταδίων, χωρίς να απαιτείται μεταβολή της λειτουργίας του απεριθμητή.

### 3.6 Σύντομη Περιγραφή Λειτουργίας του Κυκλώματος

Το παρόν κύκλωμα υλοποιεί την ανίχνευση της ακολουθίας φάσεων σε τριφασικό σύστημα και την αντίστοιχη οπτική ένδειξη της φοράς περιστροφής. Τα σήματα των τριών φάσεων αρχικά μετατρέπονται σε ψηφιακούς παλμούς μέσω κατάλληλων σταδίων προσαρμογής και διαμόρφωσης.

Στη συνέχεια, ένας απαριθμητής CD4017 δημιουργεί διαδοχικά χρονικά παράθυρα, τα οποία επιτρέπουν τη δρομολόγηση των παλμών σε τρία καθορισμένα χρονικά γεγονότα. Η σειρά άφιξης των γεγονότων αυτών επεξεργάζεται από κύκλωμα λογικής μνήμης που βασίζεται σε flip-flops CD4013 και πύλες NAND, με σκοπό την αναγνώριση της δεξιόστροφης ή αριστερόστροφης ακολουθίας φάσεων.

Το αποτέλεσμα της ανίχνευσης αποθηκεύεται και σταθεροποιείται μέσω κυκλώματος χρονικής ολοκλήρωσης και οδηγείται σε λογική επιλογής διαδρομής. Ένας ανεξάρτητος ταλαντωτής παράγει σήμα χρονισμού για την οπτική απεικόνιση, ενώ η τελική βαθμίδα χρησιμοποιεί λογικές πύλες και οδηγούς για την ενεργοποίηση τριών LED σε κυκλική ακολουθία.

Η φορά της φωτεινής κίνησης αντιστοιχεί άμεσα στη φορά περιστροφής του τριφασικού ηλεκτρικού πεδίου, παρέχοντας σαφή και άμεση οπτική ένδειξη χωρίς τη χρήση μικροελεγκτή ή λογισμικού.

Η διάταξη προορίζεται για ενδεικτική και εκπαιδευτική χρήση, καθώς και για προκαταρκτικό έλεγχο παρουσίας και ακολουθίας φάσεων, και δεν υποκαθιστά πιστοποιημένα όργανα προστασίας ή αυτοματισμούς ισχύος. Η λειτουργία της βασίζεται αποκλειστικά στην επεξεργασία χρονικής πληροφορίας χαμηλής ισχύος και δεν επεμβαίνει απευθείας στο κύκλωμα τροφοδοσίας του φορτίου. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η απλότητα, η αξιοπιστία και η σαφής διάκριση μεταξύ κυκλωμάτων ένδειξης και κυκλωμάτων ισχύος.

## Κεφάλαιο 4ο: Μέθοδος Κατασκευής Τυπωμένου Κυκλώματος

### 4.1 Εισαγωγή

Η υλοποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας απαιτούσε την κατασκευή τυπωμένης πλακέτας (Printed Circuit Board – PCB) με επαρκή ακρίβεια, αξιοπιστία και χαμηλό κόστος. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε η μέθοδος μεταφοράς toner χωρίς χρήση θερμότητας (heatless ή cold toner transfer), η οποία αποτελεί εναλλακτική της κλασικής θερμικής μεθόδου μεταφοράς.

Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στη χημική ενεργοποίηση του toner της εκτύπωσης laser και επιτρέπει τη μεταφορά του σχεδίου των αγώγιμων διαδρομών στον χαλκό χωρίς τη χρήση σιδερώστρας ή θερμοκολλητή, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες παραμόρφωσης του σχεδίου.

### 4.2 Θεωρητική αρχή της μεθόδου cold toner transfer

Ο toner που χρησιμοποιείται στους laser εκτυπωτές αποτελείται κυρίως από θερμοπλαστικό πολυμερές υλικό, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες στερεοποιείται στην επιφάνεια του χαρτιού. Στην κλασική μέθοδο μεταφοράς, η συγκόλληση του toner στον χαλκό επιτυγχάνεται με θερμική τήξη.

Στη μέθοδο cold toner transfer, αντί για θερμότητα, χρησιμοποιείται μίγμα οργανικών διαλυτών το οποίο προκαλεί **μερική χημική μαλάκυνση** του πολυμερούς binder του toner. Με τον τρόπο αυτό, ο toner αποκτά προσωρινά κολλώδη χαρακτηριστικά και μπορεί να προσκολληθεί στην επιφάνεια του χαλκού μέσω μηχανικής πίεσης.

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας και περιορίζει τα θερμικά φαινόμενα που επηρεάζουν την ακρίβεια των αγώγιμων διαδρομών.

### 4.3 Υλικά και εξοπλισμός

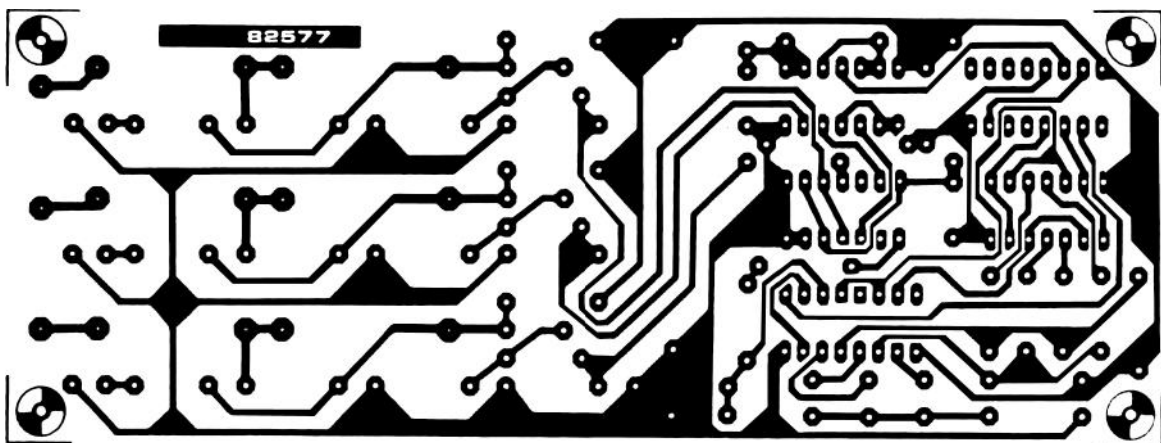
Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα υλικά:

- Χαλκοεπενδεδυμένη πλακέτα (μονής όψης)
- Laser εκτυπωτής
- Γυαλιστερό ή επιστρωμένο χαρτί εκτύπωσης
- Ακετόνη
- Αιθυλική ή ισοπροπυλική αλκοόλη
- Απορροφητικό χαρτί
- Διάλυμα χημικής χάραξης - Υπερθειικό Νάτριο-Sodium persulfate ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ )
- Μέσα ατομικής προστασίας (γάντια, εξερισμός)

### 4.4 Περιγραφή διαδικασίας

#### 4.4.1 Εκτύπωση σχεδίου

Το κύκλωμα εκτυπώθηκε από μακέτα περιοδικού σε κατοπτρική μορφή (mirror image) με laser εκτυπωτή, Εικ.4.1. Η επιλογή της κατοπτρικής εκτύπωσης είναι απαραίτητη ώστε το τελικό σχέδιο να εμφανιστεί σωστά στην επιφάνεια του χαλκού μετά τη μεταφορά.



Εικ.4.1: Μακέτα όψης χαλκού μη ανεστραμμένη .

#### **4.4.2 Προετοιμασία πλακέτας**

Η επιφάνεια του χαλκού καθαρίστηκε σχολαστικά ώστε να απομακρυνθούν οξειδώσεις και ρύποι. Η σωστή προετοιμασία της επιφάνειας είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχή πρόσφυση του toner.

#### **4.4.3 Παρασκευή διαλύματος Μεταφοράς**

Παρασκευάστηκε μίγμα αλκοόλης και ακετόνης σε αναλογία περίπου **8:3**. Η αλκοόλη λειτουργεί ως ρυθμιστής της δράσης της ακετόνης, η οποία μαλακώνει τον toner χωρίς να τον διαλύει πλήρως.

#### **4.4.4 Μεταφορά του toner**

Το διάλυμα απλώθηκε στην επιφάνεια του χαλκού και αμέσως τοποθετήθηκε το χαρτί με το toner σε άμεση επαφή με την πλακέτα. Ασκήθηκε ομοιόμορφη κατακόρυφη πίεση για λίγα δευτερόλεπτα, αποφεύγοντας οποιαδήποτε πλευρική μετατόπιση.

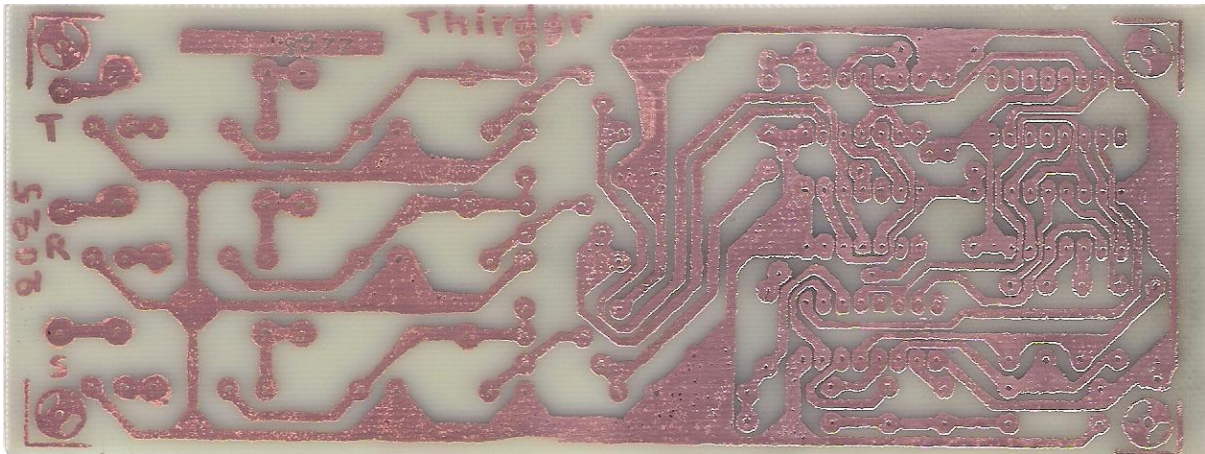
Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου πραγματοποιείται η χημική ενεργοποίηση και μεταφορά του toner.

#### **4.4.5 Αφαίρεση Χαρτιού και Έλεγχος**

Μετά την εξάτμιση των διαλυτών, το χαρτί αφαιρέθηκε προσεκτικά. Ο toner παρέμεινε στην επιφάνεια του χαλκού σχηματίζοντας τη μάσκα των αγωγίων διαδρομών.

#### 4.4.6 Χημική Χάραξη

Η πλακέτα τοποθετήθηκε σε διάλυμα χημικής χάραξης μέχρι να αφαιρεθεί πλήρως ο μη προστατευμένος χαλκός. Μετά το πέρας της χάραξης, ο toner αφαιρέθηκε και η πλακέτα ήταν έτοιμη για διάτρηση και συναρμολόγηση, Εικ.4.2.

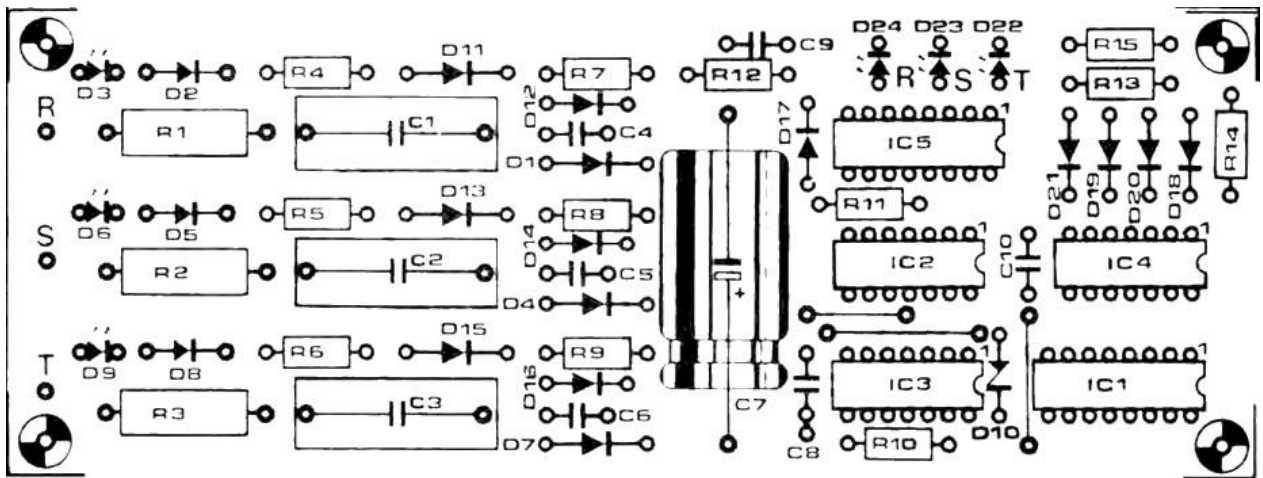


Εικ.4.2: Πλακέτα όπου έχει αφαιρεθεί ο χαλκός με χημική χάραξη.

#### 4.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της μεθόδου

Η μέθοδος μεταφοράς toner χωρίς θερμότητα παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η απουσία θερμικής καταπόνησης, η μειωμένη παραμόρφωση του σχεδίου και το χαμηλό κόστος υλοποίησης. Παράλληλα, παρουσιάζει περιορισμούς που σχετίζονται με την ευαισθησία της διαδικασίας στις αναλογίες των διαλυτών και στην ποιότητα του toner.

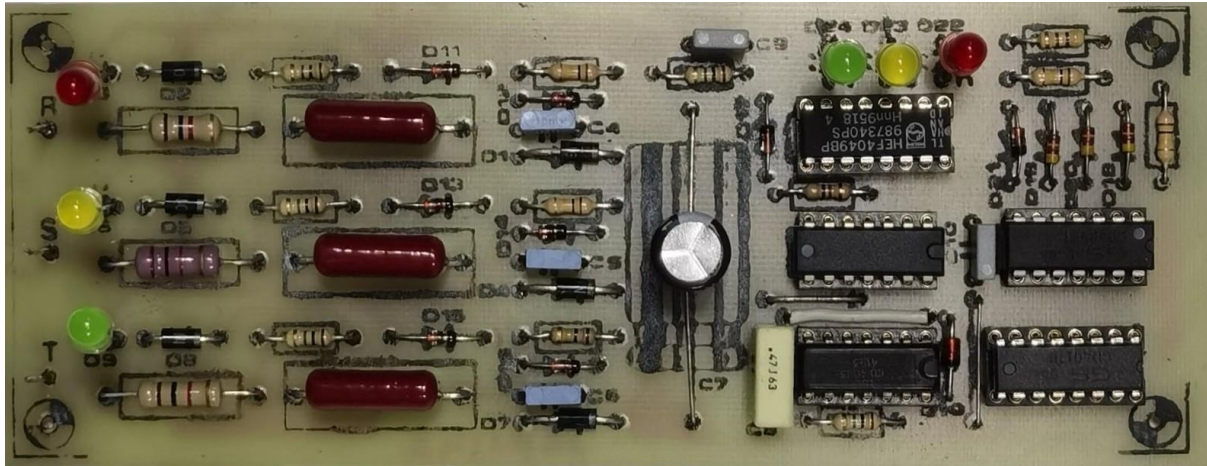
Στην εικ.4.3 φαίνεται και η μακέτα των υλικών από την πάνω πλευρά του βακελίτη.



Εικ.4.3: Μακέτα υλικών

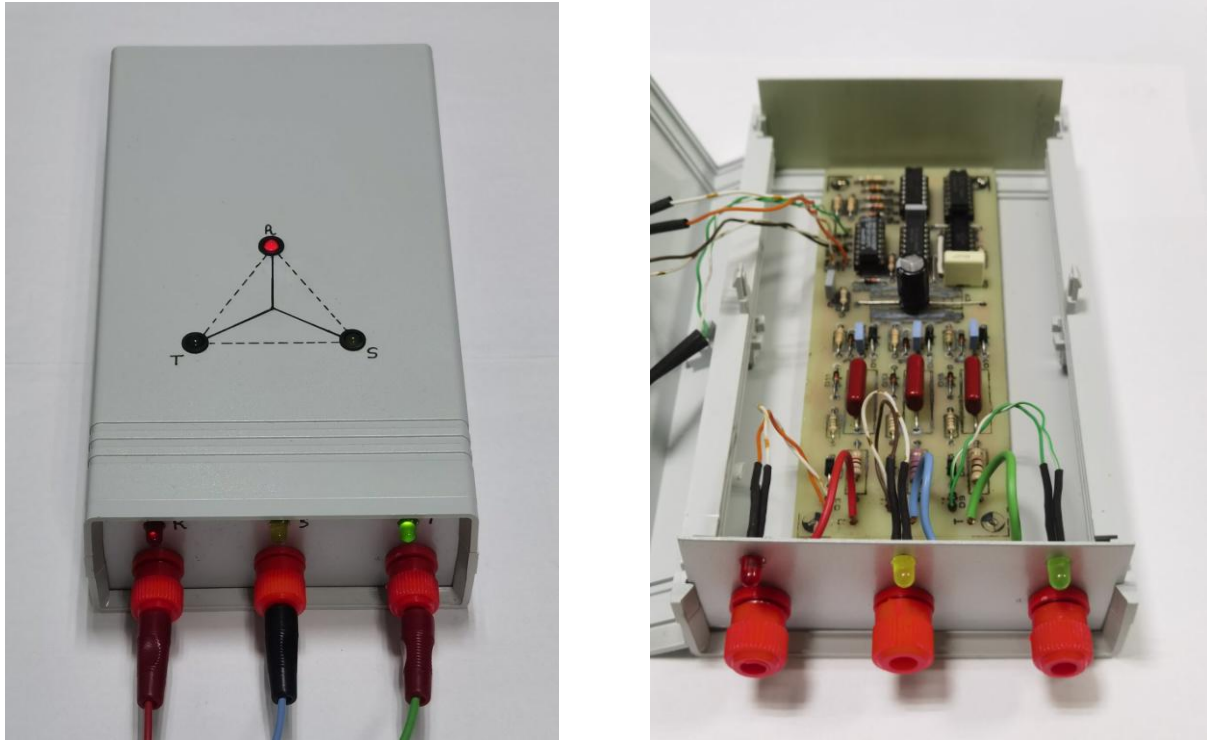
## 4.6 Κατασκευή

Η μέθοδος cold toner transfer αποτέλεσε κατάλληλη επιλογή για την κατασκευή της πλακέτας της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια για εργαστηριακές εφαρμογές και συνδυάζει απλότητα, χαμηλό κόστος και επαναληψιμότητα, χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού. Στην Εικ.4.4 φαίνεται η τελική μορφή του τριφασικού ανιχνευτή ακολουθίας φάσεων.



Εικ.4.4: Τελική μορφή του τριφασικού ανιχνευτή ακολουθίας φάσεων.

Υπολογίστηκε η θέση των φωτοдиодων D22, D23 και D24 ώστε να σχηματίζουν μορφή ισόπλευρου τριγώνου, διευκολύνοντας την άμεση οπτική αναγνώριση της φοράς περιστροφής. Όσον αφορά την προστασία έναντι ηλεκτροπληξίας, η ολοκληρωμένη διάταξη τοποθετήθηκε σε ανθεκτικό πλαστικό περίβλημα καλής ποιότητας, χωρίς μεταλλικά στοιχεία που να εκτίθενται στην εξωτερική επιφάνεια. Οι υποδοχές σύνδεσης των τριών φάσεων υλοποιήθηκαν με μπόρνες ασφαλείας κατάλληλες για τάσεις δικτύου. Πάνω από κάθε είσοδο τοποθετήθηκαν τα αντίστοιχα LED ένδειξης παρουσίας φάσης με σήμανση R, S και T.



Εικ.4.5: Συσκευασία του τριφασικού ανιχνευτή ακολουθίας φάσεων.

Η πλακέτα στερεώθηκε στο εσωτερικό του περιβλήματος με αποστάτες από μονωτικό υλικό, εξασφαλίζοντας μηχανική σταθερότητα και ηλεκτρική ασφάλεια. Δεδομένου ότι το κύκλωμα δεν διαθέτει γαλβανική απομόνωση από το δίκτυο, η πρόσβαση στο εσωτερικό της συσκευής κατά τη λειτουργία δεν επιτρέπεται.

#### **4.7 Συμπεράσματα**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μελέτη, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας ηλεκτρονικής διάταξης ανίχνευσης παρουσίας και ακολουθίας φάσεων σε τριφασικό σύστημα εναλλασσόμενης τάσης. Αρχικά παρουσιάστηκε το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο των τριφασικών συστημάτων, της ακολουθίας φάσεων και της λειτουργίας των τριφασικών ηλεκτροκινητήρων, προκειμένου να τεκμηριωθεί η σημασία του προβλήματος και η πρακτική του διάσταση.

Η υλοποιημένη διάταξη βασίστηκε σε ολοκληρωμένα κυκλώματα CMOS της σειράς 4000 και αξιοποίησε αρχές ακολουθιακής και συνδυαστικής λογικής για τη μετατροπή της χρονικής πληροφορίας των τριφασικών τάσεων σε σαφή και άμεσα κατανοητή ένδειξη της ακολουθίας φάσεων. Μέσω της ανάλυσης και της πειραματικής επαλήθευσης, διαπιστώθηκε ότι η διάταξη είναι σε θέση να ανιχνεύει αξιόπιστα τόσο την παρουσία των φάσεων όσο και τη σωστή ή αντίστροφη διαδοχή τους.

Ιδιαίτερο πλεονέκτημα της προτεινόμενης λύσης αποτελεί η απλότητα του κυκλώματος, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος και η δυνατότητα λειτουργίας χωρίς την ανάγκη μηχανικού φορτίου ή μικροελεγκτή. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τη διάταξη κατάλληλη για χρήση τόσο σε εκπαιδευτικές εφαρμογές όσο και σε βασικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου απαιτείται άμεσος και αξιόπιστος έλεγχος της ακολουθίας φάσεων.

#### 4.7.1 Προτάσεις Βελτίωσης και Επεκτάσεις

Παρότι η προτεινόμενη διάταξη επιτυγχάνει τον στόχο της παρούσας εργασίας, υπάρχουν δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης και επέκτασης, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.

Μία πρώτη βελτίωση θα μπορούσε να αφορά την ενσωμάτωση κυκλώματος **επιτήρησης απώλειας φάσης ή ασυμμετρίας τάσεων**, ώστε η διάταξη να παρέχει πληρέστερη εικόνα της κατάστασης του τριφασικού συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, θα ενισχυόταν ο προστατευτικός χαρακτήρας της συσκευής.

Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί η αντικατάσταση ή η συμπληρωματική χρήση των λογικών ολοκληρωμένων με **μικροελεγκτή**, επιτρέποντας την υλοποίηση πιο σύνθετων λειτουργιών, όπως η καταγραφή σφαλμάτων, η επικοινωνία με εξωτερικά συστήματα ή η απομακρυσμένη ένδειξη της κατάστασης του δικτύου.

Μία ακόμη πιθανή επέκταση αφορά τη βελτίωση της διεπαφής χρήστη, μέσω της προσθήκης ψηφιακής οθόνης ή οπτικοακουστικών ενδείξεων, οι οποίες θα παρείχαν σαφέστερη πληροφόρηση σε περιβάλλοντα με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας.

Τέλος, η περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς της διάταξης υπό συνθήκες έντονου ηλεκτρικού θορύβου ή μεταβατικών φαινομένων θα μπορούσε να οδηγήσει σε πρόσθετες βελτιώσεις θωράκισης και φίλτρανσης, ενισχύοντας την αξιοπιστία της σε απαιτητικά βιομηχανικά περιβάλλοντα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] **Ηλεκτροτεχνία II**, Γ. Γεωργίου, Ι. Καρύδης, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- [2] **Electrical Machines, Drives and Power Systems**, Theodore Wildi, Pearson Education.
- [3] **Electric Machinery Fundamentals**, Stephen J. Chapman, McGraw-Hill.
- [4] **The Art of Electronics**, Paul Horowitz, Winfield Hill, Cambridge University Press.
- [5] **Würth Elektronik, Application Note: Capacitive Power Supplies**.
- [6] **Κοκκινάκης Κ., Καρύδης Γ., Ηλεκτροτεχνία II**, Ίδρυμα Ευγενίδη, Αθήνα, 1992.
- [7] **Electrical Machines**, P. S. Bimbhra
- [8] **Electric Machinery Fundamentals**, S. J. Chapman
- [9] **Electrical Technology**, B. L. Theraja & A. K. Theraja

### **Ψηφιακή Λογική – CMOS**

- [10] **CMOS Cookbook**, Don Lancaster, Sams Publishing.
- [11] **Electronic Devices and Circuit Theory**, Boylestad & Nashelsky, Pearson.

### **Τεχνικά εγχειρίδια και datasheets CMOS**

- [12] Texas Instruments, *CMOS Logic Data Book*, CD4000 Series.
- [13] Texas Instruments, *CD4013B Dual D-Type Flip-Flop – Datasheet*.
- [14] Texas Instruments, *CD4017B Decade Counter – Datasheet*.
- [15] Texas Instruments, *CD4093B Quad NAND Schmitt Trigger – Datasheet*.
- [16] Texas Instruments, *CD4049UB Hex Inverter – Datasheet*.

### **Πρότυπα και κανονισμοί**

- [17] IEC 60038, *Standard Voltages*.
- [18] IEC 60204-1, *Safety of Machinery – Electrical Equipment of Machines*.