



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σύστημα αυτόματης σταθεροποίησης στροφών  
μονοφασικού ηλεκτρικού κινητήρα με αναλογικά  
διακριτά ηλεκτρονικά στοιχεία»



Του φοιτητή  
**ΤΣΩΤΣΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ**  
Αρ. Μητρώου: 516150

Επιβλέπων  
Ονοματεπώνυμο  
Δημητριάδης Παναγιώτης

Ημερομηνία 6/2/2022

Τίτλος Δ.Ε.: Σύστημα αυτόματης σταθεροποίησης στροφών μονοφασικού ηλεκτρικού κινητήρα με αναλογικά διακριτά ηλεκτρονικά στοιχεία.

Κωδικός Δ.Ε.: 22103

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Τσώτσος Δημήτριος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Δημητριάδης Παναγιώτης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 10 / 10 / 2021

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 5 / 2 / 2022

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 Τσώτσου Δημήτριου 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 οποιονδήποτε 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.

*Αφιερώνεται στην*

*Οικογένεια μου που με την πολύτιμη στήριξη της μου έδωσε το προνόμιο να σπουδάσω σε μια δύσκολη οικονομικά εποχή. Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές για την γνώση που μου πρόσφεραν, αλλά κυρίως τον κ. Δημητριάδη για την βοήθεια του στην πτυχιακή εργασία.*



## Πρόλογος

Η συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε λόγο του ενδιαφέροντος που έχω για τα αναλογικά ηλεκτρονικά και ιδιαίτερα για τα κυκλώματα ισχύος, σε συνδυασμό με το ενδιαφέρον μου για την ηλεκτροκίνηση. Μέσα από τη διαδικασία περάτωσης αυτής της εργασίας μου δόθηκε η ευκαιρία να μελετήσω σε βάθος τις ιδιότητες και την συμπεριφορά των διακριτών αναλογικών κυκλωμάτων, που το ανωτέρω σύστημα, τόσο μεμονωμένα σαν βαθμίδες, όσο και στην συνεργασία μεταξύ τους ως ολοκληρωμένο αυτόματο σύστημα με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας του.

Ασφαλώς, υπάρχουν ολοκληρωμένα κυκλώματα, καθώς και προγραμματιζόμενοι μικροελεγκτές, που δύνανται με λιγότερα υλικά, να εκτελέσουν την ανωτέρω εργασία. Αλλά, μέσω της ανωτέρω μεθόδου, που εφάρμοσα, στο να χρησιμοποιήσω διακριτά ηλεκτρονικά, μου δίδεται η δυνατότητα επιπλέον, εκτός το ότι, να διερευνήσω σε βάθος την όλη διαδικασία ενός αυτομάτου ελέγχου στροφών ενός κινητήρα, αλλά και να προβώ σε όποιες άλλες τροποποιήσεις ή πρωτοτυπίες, τις οποίες δε θα ήταν δυνατόν να τις πραγματοποιήσω με υπάρχοντα τυποποιημένα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην μελέτη, σχεδιασμό και κατασκευή συστήματος οδήγησης μονοφασικού AC κινητήρα, το οποίο ελέγχει και διατηρεί σταθερή την ταχύτητα των στροφών του κινητήρα, ρυθμίζοντας αυτόματα την γωνία έναυσης του διακόπτη ισχύος (TRIAC).

Γενικά, το σύστημα αποτελείται αποκλειστικά από αναλογικά διακριτά στοιχεία. Ένας οπτικός αισθητήρας παλμών, προσαρμοσμένος στον άξονα περιστροφής του κινητήρα, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα δημιουργεί, (μέσω μιας βαθμίδας μετατροπείας συχνότητας σε τάση), μια τάση, η οποία ελέγχει, (μέσω ειδικής βαθμίδας οδήγησης), τη βαθμίδα παλμών έναυσης του κεντρικού διακόπτη (TRIAC) τροφοδοσίας ισχύος του κινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διατηρείται η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα σταθερή. Σε περίπτωση, λοιπόν, που για οποιοδήποτε λόγο, από εξωτερικό παράγοντα «πέφτουν» οι στρόφες του κινητήρα, μέσω του αισθητήρα, το σύστημα διέγερσης κάνει αυτόματη διόρθωση της γωνίας έναυσης του TRIAC

Η εργασία αρχικά, αναφέρεται στους μονοφασικούς κινητήρες, την αρχή λειτουργίας, τις εφαρμογές, τα είδη και τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια δίδονται γενικές πληροφορίες για τις μεθόδους και τα κυκλώματα που πραγματοποιούν φασικό έλεγχο σε AC κινητήρα, με τη χρήση διακοπών ισχύος TRIAC.

Στα τελευταία δύο κεφάλαια, περιγράφεται η μελέτη και ο σχεδιασμός του συστήματος και της πλακέτας PCB, ολοκληρώνοντας στη συνέχεια με κάποιες προτάσεις βελτίωσης του συγκεκριμένου συστήματος.

# «Automatic stabilization system of a single-phase electric motor with analog discrete electronic components.»

«DIMITRIOS TSOTSOS»

## Abstract

The present work refers to the design, design and construction of a single-phase AC motor drive system, which controls and maintains a constant motor speed by adjusting the operating angle of the power switch (TRIAC).

In general, the system consists of proportionally distinct elements. An optical pulse sensor, adapted to the motor shaft rotation, depending on the shaft rotation speed, (via a frequency-to-voltage converter stage), a voltage, which controls, (via a special drive stage), the pulse stage of the main switch (TRIAC) engine power supply. This keeps the engine shaft speed constant. In case, therefore, that for any reason, the engine speed "falls" due to an external factor, through the sensor, the excitation system automatically corrects the TRIAC angle.

The work initially refers to single-phase motors, their principle of operation, applications, types and characteristics. The following is a general overview of control methods and AC circuits in an AC motor using TRIAC power switches.

In the last two chapters, the study and design of the system and the pcb board are described, concluding with some suggestions for improvements of the specific system.

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επόπτη καθηγητή της εργασίας κ. Παναγιώτη Δημητριάδη που ήταν άμεσα διαθέσιμος σε οποιαδήποτε απορία ή δυσκολία συναντούσα. Θα ήταν παράληψη επίσης να μην ευχαριστήσω και όλους τους καθηγητές του τμήματος που μέσα από τα χρόνια φοίτησης αποκόμισα τα περισσότερα γνωστικά εφόδια που χρειάστηκα για να ολοκληρώσω την συγκεκριμένη εργασία.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract .....	vii
Ευχαριστίες .....	viii
Περιεχόμενα .....	ix
Κατάλογος Σχημάτων .....	xi
Κατάλογος Εικόνων .....	xi
Συντομογραφίες.....	xiii
Κεφάλαιο 1 .....	1
Είδη Κινητήρων Γενικά. ....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Μονοφασικοί κινητήρες. ....	2
1.3 Ασύγχρονοι - επαγωγικοί μονοφασικοί κινητήρες.....	2
1.3.1 Λειτουργία Μονοφασικών Επαγωγικών Κινητήρων, Γενικά. ....	2
1.3.2 Μονοφασικός Κινητήρας με Βοηθητικό Τύλιγμα Αντίστασης.....	4
1.3.3 Μονοφασικός Κινητήρας με Πυκνωτή. ....	4
1.3.4 Κινητήρες με βραχυκυκλωμένες σπείρες στο στάτη.....	5
1.4 Σύγχρονοι AC κινητήρες.....	5
1.4.2 Εκκίνηση σύγχρονων κινητήρων. ....	6
1.4.3 Χρήσεις σύγχρονων κινητήρων.....	6
1.5 Επίλογος. ....	6
Κεφάλαιο 2.....	7
Φασικός Έλεγχος.....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Έλεγχος ηλεκτρικών κινητήρων.....	7
2.2.1 Τρίδος εναλλασομένου ρεύματος (TRIAC) .....	8
2.2.2 Προϋποθέσεις έναυσης του TRIAC μέσω της Πύλης. ....	15
2.2.3 Κυκλώματα έναυσης του TRIAC.....	15
2.2.4 Τεχνικές και επιλογή κυκλώματος έναυσης. ....	16
2.2.5 Μέθοδοι ελέγχου ισχύος.....	17
2.2.6 Συνδεσμολογίες φασικού ελέγχου με ρυθμιστές AC. ....	21

2.3 Επίλογος.....	23
Κεφάλαιο 3.....	24
Μελέτη των βαθμίδων του συστήματος αυτομάτου σταθεροποίησης των στροφών μονοφασικού κινητήρα με διακριτά αναλογικά ηλεκτρονικά. ....	24
3.1 Εισαγωγή.....	24
3.2 Το διάγραμμα ροής και γενική περιγραφή του κυκλώματος και των στοιχείων του. ....	24
3.2.1 Κύκλωμα Τροφοδοσίας:.....	25
3.2.2 Αισθητήρας μέτρησης στροφών κινητήρα. ....	25
3.2.3 LM555 (Προσομοίωση αισθητήρα στροφών κινητήρα):.....	26
3.2.4 Μετατροπέας συχνότητας σε τάση (frequency to voltage converter) :.....	28
3.2.5 Κύκλωμα με Unijunction τρανζίστορ: .....	29
3.2.6 TRIAC και Κινητήρας AC:.....	32
Κεφάλαιο 4.....	34
Πειραματική υλοποίηση του συστήματος και υπολογισμός των στοιχείων του.....	34
4.1 Γενικό Κύκλωμα : .....	35
4.2 Μετατροπέας συχνότητας σε τάση (frequency to Voltage). ....	35
4.3 Γεννήτρια παλμών διέγερσης.....	36
4.4 Δικτύωμα προστασίας υπέρτασης snubber – TRIAC. ....	38
4.5 Συνολική λειτουργία του Κυκλώματος. ....	40
4.6 Σχεδιασμός πλακέτας PCB.....	42
Κεφάλαιο 5.....	43
Εναλλακτικές μέθοδοι υλοποίησης και βελτιώσεις.....	43
5.1 Μετατροπείς συχνότητας σε τάση (Frequency to voltage converter) .....	43
5.2 Αισθητήριο αντίχνευσης στροφών.....	45
5.3 Διαφορετικές μέθοδοι ελέγχου.....	46
5.3.1 Έλεγχος μέσω microcontroller.....	46
5.3.2 Φασικός έλεγχος με το ολοκληρωμένο TCA 785 .....	48
5.3 Μελλοντικές εργασίες (Future Works). ....	49
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	52
Datasheets.....	52

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.3:Δημιουργία στρεφόμενου Μ.Π από δύο τυλίγματα.....	3
Σχήμα 4-2.2.4β:.....	17
Σχήμα 4-2.2.5β1:.....	19
Σχήμα 4-2.2.5β2:.....	19
Σχήμα 4-2.2.5β3:.....	19
Σχήμα 4-2.2.5γ1:.....	20
Σχήμα 4-2.2.5γ2:.....	21
Σχήμα 4-2.2.5γ3:.....	21
Σχήμα 4-2.2.5γ4:.....	21
Σχήμα 5.7.2α:.....	22
Σχήμα 5.7.2β:.....	22
Σχήμα 5.7.2γ:.....	22
Σχήμα 5.7.2δ:.....	23

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 :Κινητήρας σε αρχικό στάδιο.....	1
Εικόνα 2 : Μονοφασική λειτουργία .....	2
Εικόνα 3 : Σύγχρονος AC κινητήρας .....	2
Εικόνα 4 :Λειτουργικά διαγράμματα μετατροπών ηλεκτρικής ενέργειας.....	8
Εικόνα 5 :Μονοφασικός ρυθμιστής εναλλασόμενης τάσης .....	12
Εικόνα 7 :Κυματομορφές εξόδου TRIAC - MOTOR -UJT.....	13
Εικόνα 9 :Βασική λειτουργία φασικού ελέγχου.....	13
Εικόνα 9 :Κυματομορφές διακύμανσης ισχύος.....	14
Εικόνα 10 :Ενεργός τιμή τάσης ανάλογης της γωνίας έναυσης .....	14
Εικόνα 11 :Με ωμικό φορτίου .....	15
Εικόνα 12:Με επαγωγικό φορτίο .....	15
Εικόνα 13:Διάγραμμα ροής .....	25
Εικόνα 14 :Τροφοδοσία .....	26
Εικόνα 15 :Αισθητήρας .....	27
Εικόνα 16 :Ασταθής πολυδονητής .....	28
Εικόνα 17:Αταθής πολυδονητής(2).....	29
Εικόνα 18 :555-Im331(f-v).....	30
Εικόνα 19 :Im331 tachometer .....	31
Εικόνα 20 :Unijunction .....	34
Εικόνα 21:Τriac παλμοί έναυσης .....	35
Εικόνα 22 :Συνολικό κύκλωμα .....	36
Εικόνα 23 :Κινητήρας με αισθητήριο .....	38
Εικόνα 24 :LM331 .....	39

Εικόνα 25:UJT(3).....	40
Εικόνα 26:Snubber.....	40
Εικόνα 27:Γωνία έναυσης με delay 5.6ms.....	41
Εικόνα 28:Παλμοί έναυσης με delay 5.6ms.....	41
Εικόνα 29:Γωνία έναυσης με delay 4.2ms.....	42
Εικόνα 30:Παλμοί έναυσης με delay 4.2ms.....	42
Εικόνα 31:PCB.....	44
Εικόνα 32:PCB 3D.....	45
Εικόνα 33:F-V IC 4151.....	47
Εικόνα 34:VFC 31 CIRCUIT.....	48
Εικόνα 35:LM 2907.....	49
Εικόνα 36:PIC16F628A.....	50
Εικόνα 37 : Συνδεσμολογία κυκλώματος με microcontroller.....	51
Εικόνα 38: TCA 785.....	52

## Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
Α.Μ.Κ	Ασύγχρονοι μονοφασικοί κινητήρες
Α.Τ.Κ	Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες
Μ.Π	Μαγνητικού πεδίου
Η.Ρ	Horse Power ( ιπποδύναμη )
Μ.Η.Ε	Μετατροπέα Ηλεκτρικής ενέργειας
UJT	Uni-Junction Transistor

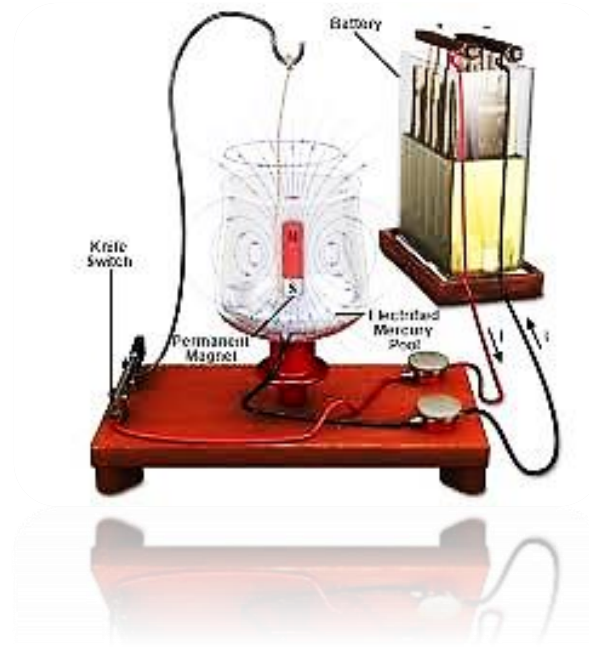


## Κεφάλαιο 1

### Είδη Κινητήρων Γενικά.

#### 1.1 Εισαγωγή

Η γενική αρχή είναι ότι οι ηλεκτροκινητήρες αποσκοπούν στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική καθώς και το αντίστροφο ως ηλεκτρογεννήτριες. Αυτό γενικά επιτυγχάνεται με την αλληλεπίδραση δυο μαγνητικών πεδίων: ενός σταθερού κι ενός άλλου προσαρμοσμένου σε ένα κινούμενο εξάρτημα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε, μελετήθηκε και εφαρμόστηκε πρακτικά για πρώτη φορά στην ιστορία από τον Michael Faraday ο οποίος το 1821 κατασκεύασε μια διάταξη η οποία τροφοδοτούμενη με ηλεκτρική ενέργεια παρήγαγε μηχανική και κατά συνέπεια κινητική ενέργεια σε ένα κινούμενο μέσα σε υδράργυρο ηλεκτρόδιο [1].



**Εικόνα 1.** Κινητήρας στο αρχικό στάδιο. [1].

Ο έλεγχος και η χρήση της ηλεκτρικής κίνησης είναι αναγκαίος στη σύγχρονη εποχή για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, αύξησης της παραγωγής με ταυτόχρονη μείωση του κόστους της και γενικά βελτίωσης της ποιότητας ζωής του ανθρώπου. Στην εξέλιξη των συστημάτων ελέγχου της ηλεκτρικής κίνησης και κυρίως την ευρεία εξάπλωση τους σε όλες τις φάσεις της παραγωγής, μεταποίησης και διανομής βιομηχανικών προϊόντων βοήθησε σημαντικά η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρικών ισχύος και ακόμη περισσότερο η εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας. Η απαίτηση για υψηλής ποιότητας έλεγχο ροπής, ταχύτητας και θέσης της ηλεκτρικής κίνησης οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων που

επιτυγχάνουν ελεγχόμενη δυναμική απόκριση και ικανοποιητική σταθερότητα στην απόρριψη διαταραχών.[4]

### 1.2 Μονοφασικοί κινητήρες.

Είναι γεγονός ότι, οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες (Α.Τ.Κ) είναι ουσιαστικά οι πιο συνηθισμένοι κινητήρες σε μεγάλες εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Όμως, τα περισσότερα σπίτια και μικρές επιχειρήσεις δεν έχουν τη δυνατότητα χρήσης τριφασικής ισχύος. Σε αυτές τις περιπτώσεις όλοι οι κινητήρες θα πρέπει να λειτουργούν με τροφοδοσία από μονοφασικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, οι οποίοι χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, και με τις οποίες θα ασχοληθούμε σε αυτό το κεφάλαιο.[8]



Εικόνα 2 : Μονοφασικοί κινητήρες.[20]

### 1.3 Ασύγχρονοι - επαγωγικοί μονοφασικοί κινητήρες.

#### 1.3.1 Λειτουργία Μονοφασικών Επαγωγικών Κινητήρων, Γενικά.

Αν κόψουμε τη μία φάση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα κατά τη λειτουργία του, παρουσιάζεται το αξιοσημείωτο φαινόμενο ο κινητήρας να εξακολουθεί να εργάζεται. Σ' αυτή την περίπτωση ο κινητήρας μας παρέχει φυσικά λιγότερη ισχύ. Απ' αυτό το φαινόμενο όμως βγάζουμε το συμπέρασμα ότι αν θέλουμε να πάρουμε κίνηση από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μονοφασικούς ασύγχρονους κινητήρες όμοιους με τους πολυφασικούς. Αυτοί όμως οι μονοφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες δεν μπορούν να ξεκινήσουν μόνοι τους γιατί με ένα μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα μπορούμε να πετύχουμε στρεφόμενο πεδίο, αλλά μονάχα εναλλασσόμενο πεδίο. Οι κινητήρες λοιπόν αυτοί χρησιμοποιούν για την εκκίνησή τους, που πρέπει να γίνεται πάντοτε δίχως φορτίο, ένα βοηθητικό τύλιγμα που αποσυνδέεται από το κύκλωμα όταν ο κινητήρας ξεκινήσει. Ο δρομέας ενός

ασύγχρονου μονοφασικού κινητήρα κατασκευάζεται όπως και οι δρομείς των τριφασικών τυλίγματα, με δακτυλίους και εκκινητή.[12]

Γενικότερα ,ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας της διαφοράς φάσης στο βοηθητικό τύλιγμα, οι Α.Μ.Κ. διακρίνονται βασικά σε:

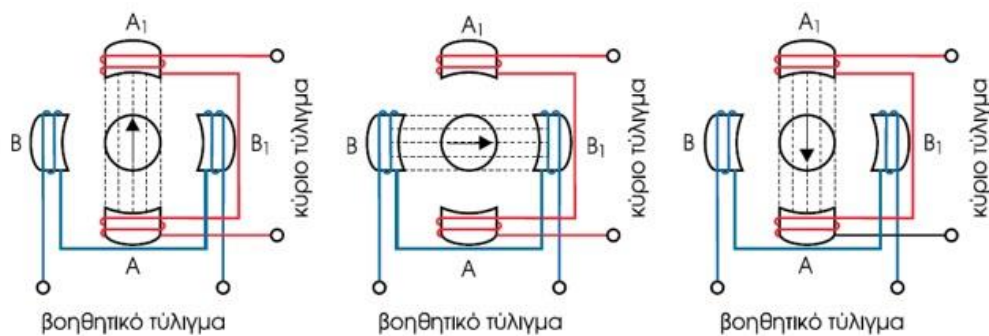
- - Κινητήρες με αντίσταση.
- - Κινητήρες με πυκνωτή και
- - Κινητήρες με βραχυκυκλωμένες σπείρες στο στάτη.[8]

Δημιουργία **στρεφόμενου Μ.Π.** από τα δύο τυλίγματα, που είναι κατάλληλα τοποθετημένα στο στάτη του κινητήρα (σχ. 1.3), όταν το βοηθητικό έχει κατασκευασθεί έτσι, ώστε να παρουσιάζει μεγάλη ωμική αντίσταση. Αν τα ρεύματα που διαρρέουν τα δύο τυλίγματα έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης  $90^{\circ}$ , τότε:

- Τη χρονική στιγμή, που δείχνει το σχήμα 1.3 (1), στο κύριο τύλιγμα η ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της, ενώ στο βοηθητικό θα είναι μηδενική. Έτσι το Μ.Π. που δημιουργείται (από το κύριο τύλιγμα) έχει κατεύθυνση από το Α προς Α1.

- Μετά από  $\frac{1}{4}$  της περιόδου το ρεύμα στο κύριο τύλιγμα μηδενίζεται, ενώ το ρεύμα στο βοηθητικό τύλιγμα παίρνει τη μέγιστη τιμή του. Τώρα το Μ.Π που δημιουργείται (από το κύριο τύλιγμα), θα κατευθύνεται, όπως δείχνει στο σχήμα 1.3 (2).

- - Μετά από ένα ακόμη τέταρτο της περιόδου το ρεύμα στο κύριο τύλιγμα θα είναι μέγιστο αρνητικό, ενώ στο βοηθητικό τύλιγμα μηδενίζεται. Δηλαδή το Μ.Π θα κατευθύνεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 (3).



**Σχήμα 1.3:** Δημιουργία στρεφόμενου Μ.Π από δύο τυλίγματα (Αρχή λειτουργίας Α.Μ.Κ).[12]

Αν συνεχίσουμε τη παρακολούθηση αυτή, θα διαπιστώσουμε, ότι σε κάθε πλήρη περίοδο του ρεύματος το Μ.Π. κάνει μια πλήρη περιστροφή, δηλ. είναι ένα **στρεφόμενο Μ.Π.**

Στους περισσότερους Α.Μ.Κ., όπως θα δούμε στη συνέχεια, το βοηθητικό τύλιγμα μετά την εκκίνηση αποσυνδέεται, είτε μ' ένα **φυγοκεντρικό διακόπτη**, σε ορισμένες στροφές, είτε μ' έναν **ηλεκτρονόμο**. Τότε το στρεφόμενο Μ.Π. δημιουργείται πλέον απ' το κύριο τύλιγμα και το ρεύμα που κυκλοφορεί (από επαγωγή) στους αγωγούς του δρομέα του κινητήρα.

Η ροπή εκκίνησης στους Α.Μ.Κ. εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων των δύο τυλιγμάτων. Όσο πλησιάζει προς τις  $90^{\circ}$ , τόσο μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης δημιουργείται.[8]

### 1.3.2 Μονοφασικός Κινητήρας με Βοηθητικό Τύλιγμα Αντίστασης.

Οι κινητήρες αυτού του είδους έχουν σχετικό μικρή ροπή εκκίνησης και αρκετό θόρυβο κατά τη λειτουργία τους, αλλά είναι πολύ φθηνοί. Η ισχύς τους δεν ξεπερνά τα 3/4HP (1HP=736W) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλες ροπές εκκίνησης (ή λειτουργούν με θόρυβο).[8]

Η δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου επιτυγχάνεται αν στο βοηθητικό τύλιγμα παρεμβληθεί μια ωμική αντίσταση. Η τιμή της ωμικής αντίστασης επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση σύρματος αντίστασης. Το βοηθητικό τύλιγμα συνήθως κατασκευάζεται ως δίμιτο τύλιγμα. Κατά την κατασκευή αυτού το 1/3 του αριθμού των σπειρών τυλίγεται αντίρροπα. Στο δίμιτο βοηθητικό τύλιγμα το επαγωγικό αποτέλεσμα αναιρείται μερικώς ενώ η πραγματική αντίσταση διατηρείται. Το βοηθητικό τύλιγμα αντίστασης πρέπει μετά από την εκκίνηση του κινητήρα να αποσυνδέεται για να αποφεύγεται η θερμική υπερφόρτισή του. Αυτό γίνεται πχ με τη χρησιμοποίηση ενός φυγοκεντρικού διακόπτη. Ο κινητήρας μετά από την αποσύνδεση αυτή λειτουργεί όπως ο στροφαλοφόρος κινητήρας. Ο κινητήρας με βοηθητικό τύλιγμα αντίστασης κατασκευάζεται για ονομαστική ισχύ μέχρι 300W. Η ροπή εκκίνησης είναι περίπου ίση με την ονομαστική ροπή. Οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε χαμηλή συχνότητα ζεύξης/ απόζευξης, π.χ. σε συμπιεστές ψυγείων και σε κινητήρες για καυστήρες.[12]

### 1.3.3 Μονοφασικός Κινητήρας με Πυκνωτή.

Οι Α.Μ.Κ με πυκνωτή κατασκευάζονται για μεγαλύτερες ισχύς (μέχρι 3HP≅2kW), είναι όμως πιο ακριβοί απ' τους κινητήρες με αντίσταση και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που είναι απαραίτητη η μεγάλη ροπή εκκίνησης, όπως π.χ. οι αεροσυμπιεστές, οι αντλίες, οι ράμπες συνεργείων αυτοκινήτων, τα ηλεκτρικά ψυγεία, τα κλιματιστικά μηχανήματα και άλλα τμήματα μηχανών και συσκευών που πρέπει να ξεκινούν με φορτίο.[8]

Στον κινητήρα με πυκνωτές η απαραίτητη μετατόπιση φάσης για τη δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου μεταξύ των ρευμάτων του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος επιτυγχάνεται με τη σύνδεση ενός πυκνωτή σε σειρά στο βοηθητικό τύλιγμα. Ο πυκνωτής εφαρμόζεται συνήθως στο περίβλημα του κινητήρα (Σχ.11). Όταν το βοηθητικό τύλιγμα είναι αδιαίρετο, τότε ο πυκνωτής παρεμβάλλεται μπροστά στο βοηθητικό τύλιγμα (Σχ.12). Σε διαιρεμένο βοηθητικό τύλιγμα παρεμβάλλεται μεταξύ δύο τμημάτων. Η μεταβολή της φοράς περιστροφής του κινητήρα αυτού πραγματοποιείται αν το ρεύμα στο βοηθητικό κύκλωμα αλλάξει πολικότητα. Αυτό γίνεται με αλλαγή των συνδέσεων του πυκνωτή στο κιβώτιο των ακροδεκτών του κινητήρα. Ο κινητήρας με τη χρησιμοποίηση ενός πυκνωτή εκκίνησης CA και ενός πυκνωτή λειτουργίας CB αναπτύσσει μια υψηλή ροπή κατά τη στιγμή εκκίνησής του (Σχ.13) Η ροπή εκκίνησης μπορεί μέσω της χωρητικότητας των δύο πυκνωτών να αυξηθεί δύο μέχρι τρεις φορές της ονομαστικής ροπής (Σχ.11). Ο κινητήρας αυτός έχει τη δυνατότητα να εκκινηθεί και με φορτίο. Με την επίτευξη της κανονικής λειτουργίας η χωρητικότητα εκκίνησης αποσυνδέεται ώστε να παραμένει μόνο χωρητικότητα λειτουργίας στο κύκλωμα. Η αποσύνδεση είναι απαραίτητη, επειδή η υψηλή ολική χωρητικότητα των πυκνωτών (εκκίνησης και λειτουργίας) προκαλεί στο βοηθητικό τύλιγμα υψηλό ρεύμα. Αυτό σημαίνει υπερθέρμανση του κινητήρα κατά τη μόνιμη λειτουργία. Η αποσύνδεση γίνεται με θερμικούς ηλεκτρονόμους ή με ηλεκτρονόμους που η λειτουργία του εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος ή όπως στο Σχ.13 με φυγοκεντρικούς διακόπτες. Με την αποσύνδεση της

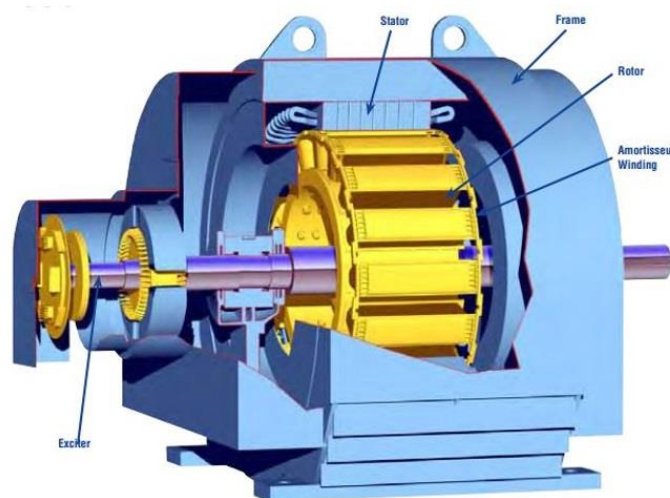
ολικής χωρητικότητας η συμπεριφορά λειτουργίας αντιστοιχεί σ' αυτήν ενός στροφαλοφόρου κινητήρα. Οι πυκνωτές εκκίνησης αποσυνδέονται μόλις ο κινητήρας αποκτήσει την κανονική λειτουργία του. Ο πυκνωτής λειτουργίας πρέπει ανά KW ισχύος του κινητήρα να έχει μια άεργη ισχύ 1,3 KVar. Για τη χωρητικότητα του πυκνωτή εκκίνησης εκλέγεται συνήθως τριπλή τιμή του πυκνωτή λειτουργίας. Ο πυκνωτής και η επαγωγή του βοηθητικού πηνίου σχηματίζουν έναν ταλαντωτή σειράς. Για το λόγο αυτό η τάση του πυκνωτή είναι μεγαλύτερη από την τάση του δικτύου. Η μέγιστη τάση στον πυκνωτή εμφανίζεται σε λειτουργία του κινητήρα χωρίς φορτίο. Ο πυκνωτής του κινητήρα με πυκνωτή (πυκνωτές) πρέπει να υπολογίζεται για τη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση. Κινητήρες με πυκνωτή σε ονομαστικές ισχύεις της τάξης των 2KW χρησιμοποιούνται σε οικιακά μηχανήματα, σε εργαλειομηχανές και σε μηχανήματα οικοδομής, π. χ .Ψυγεία και πλυντήρια.[12]

### 1.3.4 Κινητήρες με βραχυκυκλωμένες σπείρες στο στάτη.

Οι Α.Μ.Κ με βραχυκυκλωμένες σπείρες στο στάτη έχουν τη μικρότερη ροπή εκκίνησης και το μικρότερο βαθμό απόδοσης απ' όλους τους μονοφασικούς κινητήρες, είναι όμως πολύ φθηνοί και δεν παρουσιάζουν τακτικά βλάβες. Χρησιμοποιούνται σε οικιακές συσκευές πολύ μικρής ισχύος (π.χ. 30 W), όπως ανεμιστήρες, στεγνωτήρες μαλλιών κ.λπ.[8]

## 1.4 Σύγχρονοι AC κινητήρες

Σύγχρονοι ονομάζονται οι κινητήρες όπου ο δρομέας τους περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης. Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, το οποίο παράγει στο εσωτερικό της περιστρεφόμενο ομογενές μαγνητικό πεδίο . Τροφοδοτούμε το δρομέα με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (ρεύμα διέγερσης) έτσι αναπτύσσεται ομογενές μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του. Στο εσωτερικό του κινητήρα υφίστανται δυο πεδία που τείνουν να ευθυγραμμιστούν (δύναμη Laplace), όπως ακριβώς δυο μαγνητικοί ράβδοι. Επειδή, όμως, το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς, το πεδίο του δρομέα και ο ίδιος ο δρομέας προσπαθεί συνεχώς να τον ακολουθεί στρεφόμενος με τη σύγχρονη ταχύτητα.[18]



**Εικόνα 3.** Σύγχρονος AC κινητήρας.[18]

### 1.4.2 Εκκίνηση σύγχρονων κινητήρων.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα που είναι:

α) η εκκίνηση με βοηθητικό κινητήρα που φέρνει τον κινητήρα κοντά στις σύγχρονες στροφές και στην συνέχεια τροφοδοτείται η διέγερση με συνεχές ρεύμα. Ο κινητήρας που τώρα συμπεριφέρεται σαν εναλλακτήρας πρέπει να συγχρονισθεί με το δίκτυο και στην συνέχεια διακόπτεται η τροφοδότηση του βοηθητικού κινητήρα ή αποσυνδέεται ο άξονάς του από τον σύγχρονο κινητήρα.

β) η εκκίνηση με ενσωματωμένο στον δρομέα τύλιγμα κλωβού οπότε ο κινητήρας εκκινεί ως ασύγχρονος, φθάνει κοντά στις σύγχρονες στροφές και στην συνέχεια τροφοδοτείται η διέγερση με ρεύμα και ο δρομέας συγχρονίζεται στο πεδίο του στάτη. Η εκκίνηση αυτή μπορεί να γίνει και υπό φορτίο.[18]

### 1.4.3 Χρήσεις σύγχρονων κινητήρων.

Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι ακριβοί σε σχέση με τους ασύγχρονους αλλά έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε μερικές περιπτώσεις. Κατασκευάζονται σε μεγάλες ισχύς, πχ πάνω από 100 KW και προτιμώνται όταν υπάρχει ανάγκη απόλυτα σταθερής ταχύτητας περιστροφής σε συνδυασμό με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Μια άλλη περιοχή εφαρμογών είναι η χρησιμοποίηση του σύγχρονου κινητήρα για βελτίωση του συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης και στην περίπτωση αυτή ονομάζεται σαν σύγχρονος πυκνωτής η σύγχρονος αντισταθμιστής. Στην τελευταία αυτή περίπτωση ρυθμίζεται το ρεύμα διέγερσης και ο κινητήρας μπορεί άλλοτε να απορροφά και άλλοτε να παρέχει άεργο ισχύ ώστε να ελαχιστοποιηθεί ή και να μηδενισθεί η ποσότητα της άεργου ισχύος που μεταφέρεται από το δίκτυο στην εγκατάσταση και είναι απαραίτητη για την λειτουργία της (πχ. σε εγκαταστάσεις με ανορθωτές, ρυθμιστές τάσης, ασύγχρονους κινητήρες).[18]

### 1.5 Επίλογος.

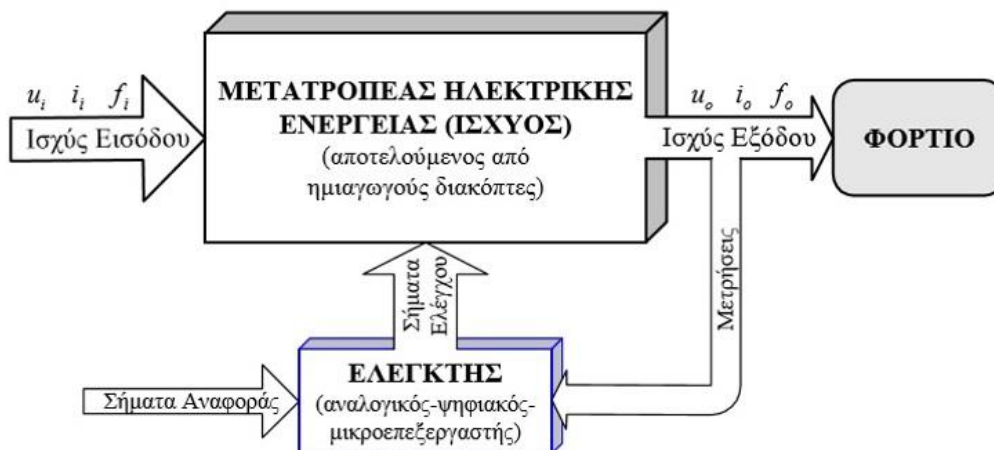
Αυτές ήταν οι κυριότερες κατηγορίες μονοφασικών κινητήρων με τις βασικές αρχές λειτουργίας που συναντιούνται στην καθημερινότητα μας. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται μια μέθοδος ελέγχου αυτών των κινητήρων που εξυπηρετεί την εφαρμογή που υλοποιείται.

## Κεφάλαιο 2

### Φασικός Έλεγχος.

#### 2.1 Εισαγωγή

Γενικά, στον έλεγχο την επεξεργασία και την μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούμε μια ιδιαίτερη ηλεκτρονική διάταξη, τα ηλεκτρονικά ισχύος. Επειδή η ηλεκτρική ισχύς παρέχεται με σταθερά χαρακτηριστικά αυτό προκαλεί την ανάγκη μετατροπής της, έτσι ώστε να τροφοδοτούμε διάφορες εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν και έχουν διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις. Η κύρια διαθέσιμη πηγή ισχύος (δίκτυο ισχύος), είναι μία τριφασική πηγή σταθερής τάσης και συχνότητας. Όπως αναφέραμε όταν οι ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής που μας ενδιαφέρει δεν είναι συμβατές με τα χαρακτηριστικά του δικτύου τότε είναι αναγκαία η χρήση ενός μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας (Μ.Η.Ε.). Στην Εικόνα 4. παρουσιάζεται το γενικό λειτουργικό διάγραμμα του Μ.Η.Ε. Η διάταξη ισχύος διαμορφώνει κατάλληλα τις παραμέτρους εξόδου της τάσης, της έντασης, και της συχνότητας, έτσι ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του φορτίου. [5]



Εικόνα 4. Λειτουργικό διάγραμμα μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας.[5]

#### 2.2 Έλεγχος ηλεκτρικών κινητήρων.

Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία ηλεκτροκινητήρων. Για κάθε τύπο κινητήρα έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι μετατροπείς μέσω των οποίων ελέγχουμε τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά (ροπή, ταχύτητα περιστροφής, θέση). Όπου αυτός ο έλεγχος επιτυγχάνεται κυρίως με την χρήση ημιαγωγών διακοπών ισχύος.[5]

Το βασικό κύκλωμα διέγερσης των προαναφερθέντων ημιελεγχόμενων διακοπών είναι της απλής ωμικής αντίστασης (R), ή του συνδυασμού ωμικής αντίστασης (R) και πυκνωτή (C). Για να υπάρξει αξιοπιστία στην διαχείριση της παρεχόμενης ισχύος στο φορτίο στα κυκλώματα φασικού ελέγχου,

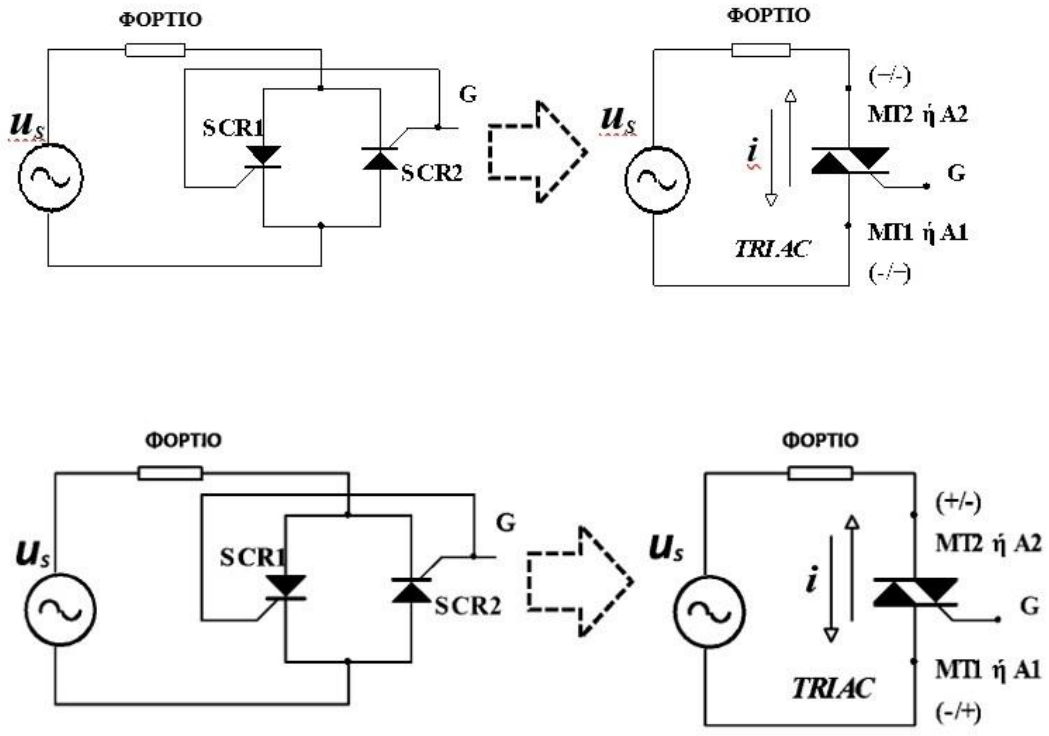
καθοριστικό ρόλο παίζει το κύκλωμα έναυσης ή μονάδα σκανδαλισμού (*triggering unit*) που είναι συνδεδεμένη με τον βασικό ημιαγωγό διακόπτη ισχύος SCR ή TRIAC. Διότι μέσω του κυκλώματος αυτού ρυθμίζεται η στιγμή ή γωνία καθυστέρησης – έναυσης  $\alpha$  του ημιαγωγού διακόπτη SCR ή TRIAC σε κάθε ημιπερίοδο αγωγιμότητας. Δηλαδή πότε θα αρχίσει να άγει ο διακόπτης καθ' όλο το υπόλοιπο χρονικό διάστημα της ημιπεριόδου αγωγιμότητας. Έχουμε επίσης υπ' όψιν ότι, κατά τον φασικό έλεγχο η διάρκεια του παλμού διέγερσης αρχίζει από της τάξεως των  $\mu s$ . Η ισχύς που καταναλίσκει το κύκλωμα διέγερσης (σε σχέση με το κύκλωμα ισχύος) πρέπει είναι αμελητέα έως σχετικά μικρή, αλλά και η επέμβασή του (με τον παλμό διέγερσης), την απαιτούμενη στιγμή για τη διέγερση του SCR ή TRIAC, να είναι ακριβής. [14]

Για το φασικό έλεγχο, με την χρήση συνδεσμολογιών που αποτελούνται μόνο από αντιστάσεις και πυκνωτές (R, R-C), δημιουργείται ένα βασικό μειονέκτημα, στο ότι η τάση διέγερσης για την ροή ρεύματος  $I_{GT}$  στη Πύλη (Gate), δεν συντονίζεται ακριβώς με τις απαιτήσεις έναυσης στον εκάστοτε ημιαγωγό διακόπτη. Επίσης, εκτός της παλμογεννήτριας, οι μονάδες σκανδαλισμού πρέπει να περιλαμβάνουν κύκλωμα που παρακολουθεί την κυματομορφή της τάσης δικτύου για τον εντοπισμό (ανίχνευση) της μηδενικής τιμής (*zero crossing detector circuit*), πιθανόν και τροφοδοτικό για σταθεροποιημένη τάση αναφοράς κλπ. Έτσι σε διατάξεις ελέγχου ισχύος που απαιτείται υψηλός βαθμός αξιοπιστίας, οι πολύπλοκες μονάδες σκανδαλισμού αντικαθίστανται όλο και περισσότερο με ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα γραμμικά ή και υβριδικά, όπως το PA 436 της *General Electric*, το L 120 της *SGS-ATES*, το TCA 780-85 της *Siemens*, το TDA 1185 της *Motorola* κλπ. Ειδικά στα επαγωγικά φορτία επειδή ο ρυθμός αύξησης ρεύματος είναι αργός σε σύγκριση με τα ωμικά, απαιτείται ευρύς παλμός σκανδαλισμού μέχρι τη χρονική στιγμή που το ρεύμα φορτίου πάρει την τιμή κορφής στην ημιπερίοδο ελέγχου. [14]

Σε απλά κυκλώματα ισχύος όμως, όπου δεν απαιτείται υψηλός βαθμός αξιοπιστίας στον έλεγχο της ισχύος, υπάρχει μία ποικιλία ημιαγωγών στοιχείων, τα οποία υπερκαλύπτουν τα μειονεκτήματα των απλών κυκλωμάτων έναυσης, και με την υποστήριξη μερικών παθητικών στοιχείων (R, C) αποτελούν αυτοτελείς μονάδες σκανδαλισμού, οι οποίες μας παρέχουν τους κατάλληλους και αξιόπιστους παλμούς έναυσης. Τα στοιχεία αυτά είναι κυρίως Δίοδοι Διέγερσεως (*Trigger Diodes – Diacs*), Τρανζίστορς Μίας Επαφής (*Unijunction Transistors – UJT*) και Προγραμματιζόμενα *Unijunction Τρανζίστορς (PUT)*. [14]

### 2.2.1 Τρίοδος εναλλασσόμενου ρεύματος (TRIAC)

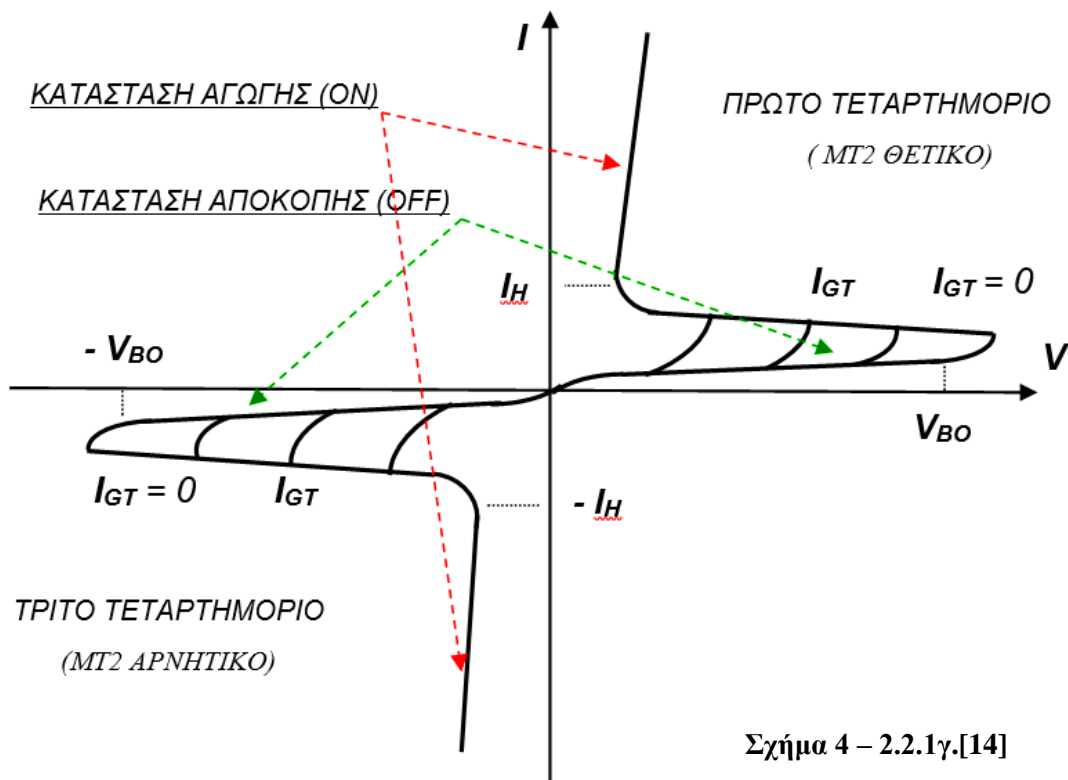
Το TRIAC ανήκει στην οικογένεια των θυρίστορ (SCR) και παρουσιάζει την συμπεριφορά δύο αντιπαράλληλα συνδεδεμένων θυρίστορ με μία κοινή Πύλη (Gate). (Σχήμα 4 – 2.2.1α,β). Έτσι, επιτρέπει τη ροή του ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις ανάλογα με την πόλωσή του. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4 – 2.2.1β, έχει τρεις ακροδέκτες, οι οποίοι ονομάζονται: Άνοδος1 (*Anode 1, A1*) ή *Main Terminal1 (MT1)*, Άνοδος2 (*Anode 2, A2*) ή *Main Terminal2 (MT2)* και Πύλη (*Gate, G*). [14]



Σχήμα 4 – 2.2.α

Σχήμα 4 – 2.2.1 β[14]

Στο TRIAC οι χαρακτηριστικές  $I - V$  στο πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο είναι συμμετρικές, όπως φαίνεται και από το σχήμα 4 – 2.2.1γ. Στο πρώτο τεταρτημόριο ο ακροδέκτης  $MT2$  είναι θετικός ως προς τον  $MT1$  και λειτουργεί όπως η Άνοδος του SCR. Στο τρίτο τεταρτημόριο ο ακροδέκτης  $MT2$  είναι αρνητικός ως προς τον  $MT1$  και λειτουργεί όπως η Κάθοδος του SCR. [14]



Σχήμα 4 – 2.2.1γ.[14]

Όπως το SCR, έτσι και το TRIAC παρουσιάζει τα εξής όμοια χαρακτηριστικά:

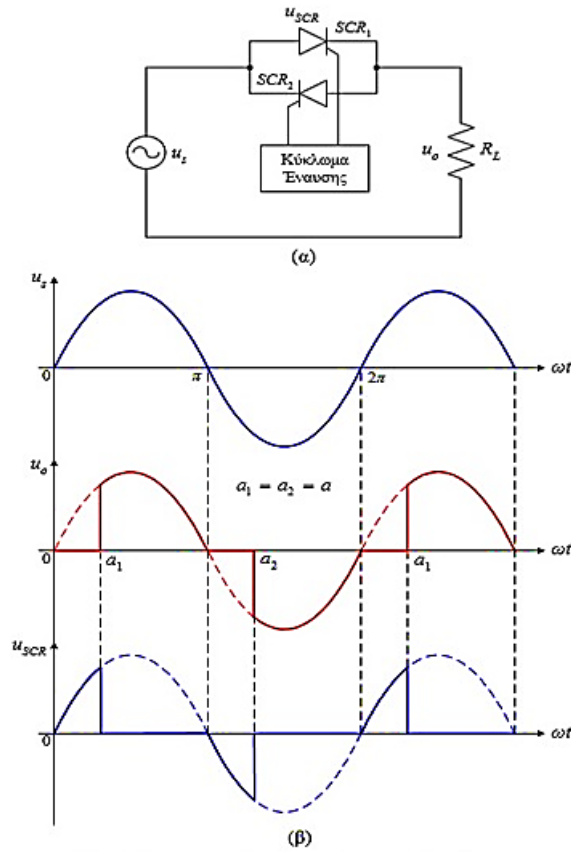
- Παραμένει στη κατάσταση αποκοπής (OFF) έως ότου εφαρμοστεί στη Πύλη (G) ένα ικανό σήμα διέγερσης, ως επί το πλείστον παλμός ρεύματος  $I_{GT}$ , ελέγχοντας (καθορίζοντας) έτσι την Ορθή Τάση Διάσπασης  $V_{BO}$ , και μεταβαίνει στη κατάσταση αγωγής (ON).
- Η  $V_{BO}$  ρυθμίζεται από το πλάτος του παλμού  $I_{GT}$ . Δηλαδή ελαττώνεται με την αύξηση του ρεύματος  $I_{GT}$ , και αυξάνεται με την ελάττωση του ρεύματος  $I_{GT}$ , το οποίο μάλιστα μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό.
- Στη κατάσταση ON η τάση μεταξύ των δύο ακροδεκτών MT2 και MT1 ελαχιστοποιείται και το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο περιορίζεται μόνο από τις παραμέτρους του εξωτερικού κυκλώματος ισχύος.
- Η σβέση γίνεται με το μηδενισμό του ρεύματος που το διαρρέει, αλλά στο TRIAC με μεγαλύτερο χρόνο σβέσης  $t_q$  και μικρότερη τιμή του  $dvF/dt$ . Γι' αυτό τα TRIAC συνήθως χρησιμοποιούνται για φασικό έλεγχο ισχύος σε Ωμικά φορτία, με συχνότητες από 50 έως 400 Hz, καθώς και χαρακτηρίζονται ως ηλεκτρονόμοι στερεάς κατάστασης (*solid state relays*).

Με τη χρήση του TRIAC έχουμε το πλεονέκτημα να επεκτείνουμε τη περιοχή ελέγχου ισχύος και στην αρνητική ημιπερίοδο της κυματομορφής της πηγής AC, χωρίς να την ανορθώσουμε. Έτσι, κυκλώματα που βασίζονται στο διακόπτη αυτό, όπου η κυματομορφή φορτίου εξακολουθεί να είναι AC, χαρακτηρίζονται ως **μετατροπείς AC/AC ή ροθμιστές AC (AC regulators)**.

Βάσει των ανωτέρω, το TRIAC ενεργεί σαν ένας AC διακόπτης, ο οποίος με πηγή AC και φορτίο που απαιτεί AC τροφοδοσία, μπορεί να ελέγξει την ισχύ μέσω φασικού ελέγχου από 0% έως 100%, σε αντίθεση με το SCR, το οποίο με πηγή AC μπορεί να ελέγξει ισχύ από 0% έως 50%, δηλαδή τη μία μόνο ημιπερίοδο κατά την οποία είναι ορθά πολωμένο.

Το βασικό μειονέκτημα του TRIAC είναι ότι έχει πολύ μικρότερη ικανότητα ελέγχου ισχύος από το SCR, δηλαδή έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για αμφίπλευρο έλεγχο κυκλωμάτων εναλλασσόμενου ρεύματος μόνο μέχρι 40-50 A, με ρεύμα Πύλης γύρω στα 20-25 mA. Οπότε για μεγαλύτερο έλεγχο ισχύος τοποθετούνται αντιπαράλληλα SCRs.

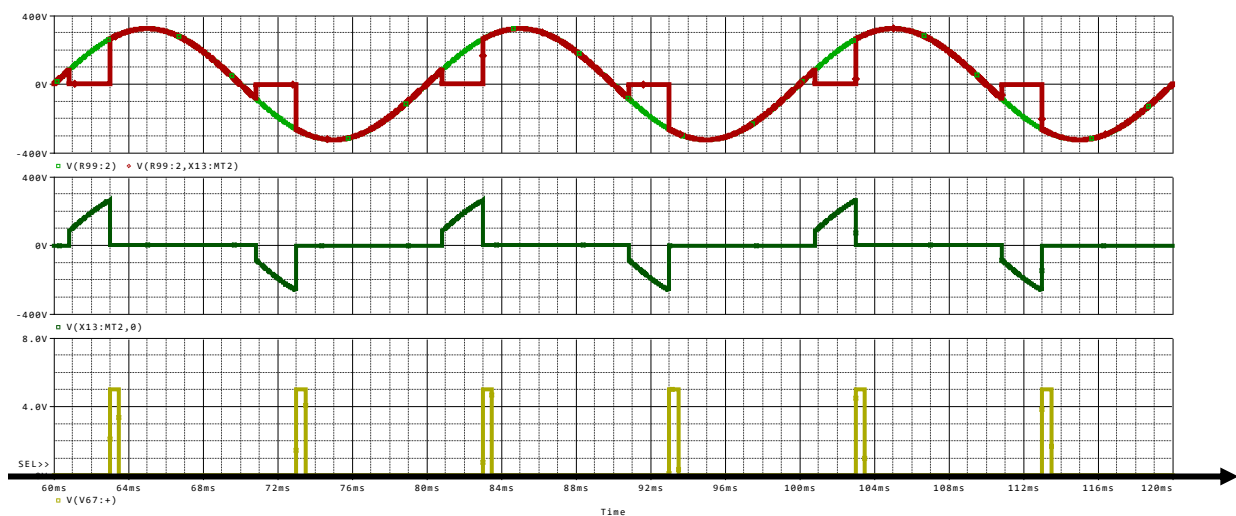
Το TRIAC πήρε την ονομασία του από το συνθετικό TRI, δηλαδή ημιαγωγός διακόπτης τριών ακροδεκτών και AC, που σημαίνει πλήρη έλεγχο στο AC.[14]



Εικόνα 5. Μονοφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης.[5]

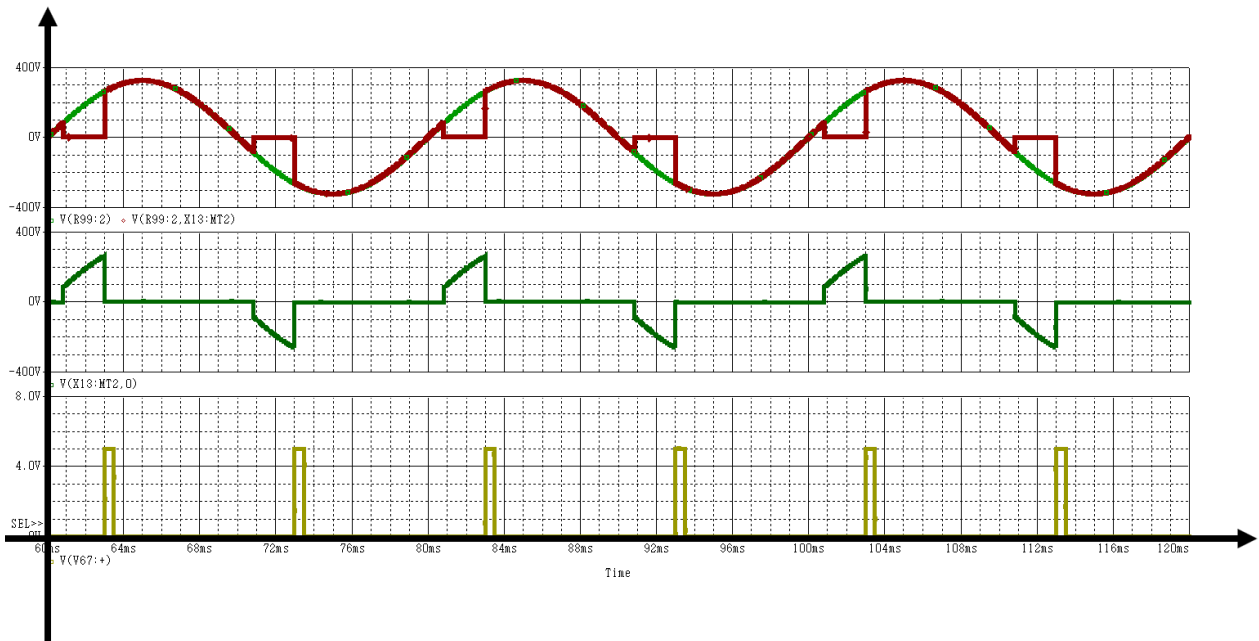
Κυματομορφές γωνίας έναυσης του TRIAC υλοποιημένες στο PSPICE.

ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΣΧΥΟΣ

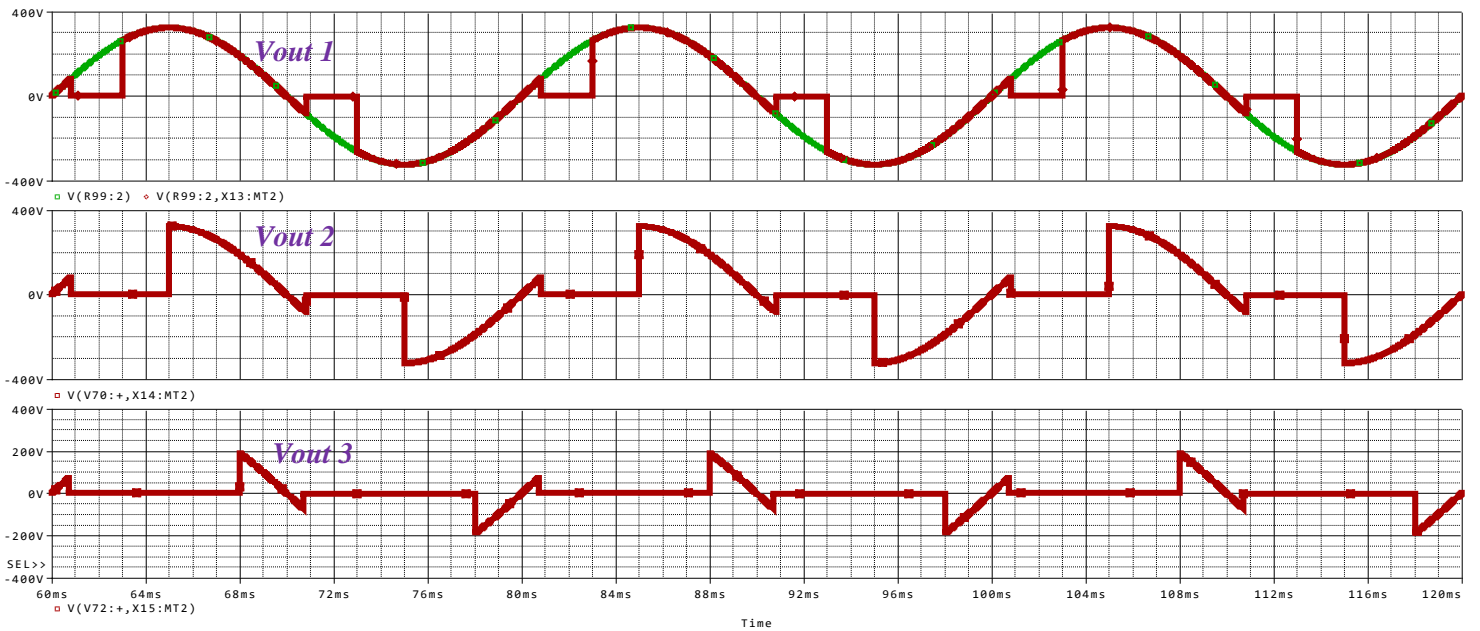


Εικόνα 7. Κυματομορφές εξόδου TRIAC – MOTOR – UIT.

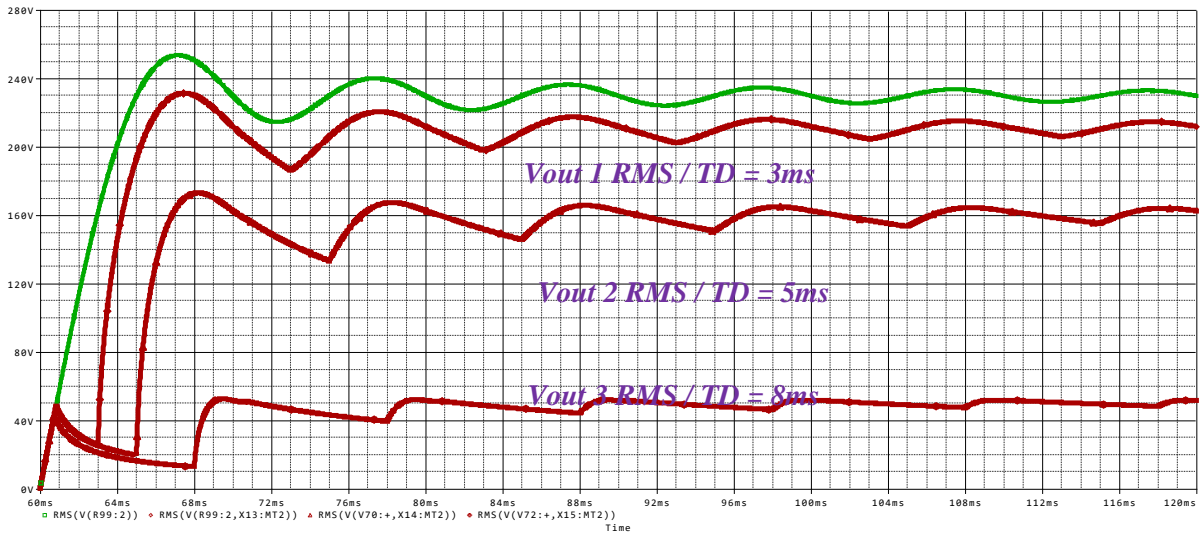
## Κεφάλαιο 2



Εικόνα 8. Βασική λειτουργία φασικού ελέγχου.



Εικόνα 9. Κυματομορφές διακόπτη ισχύος.



Εικόνα 10 .Ενεργός τιμή Τάσης ανάλογη της γωνίας έναυσης

$$\text{Χρήσιμος τύπος } E_{RMS} = \frac{E_p}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - a + \frac{I}{2} \sin 2a} \quad (1)$$

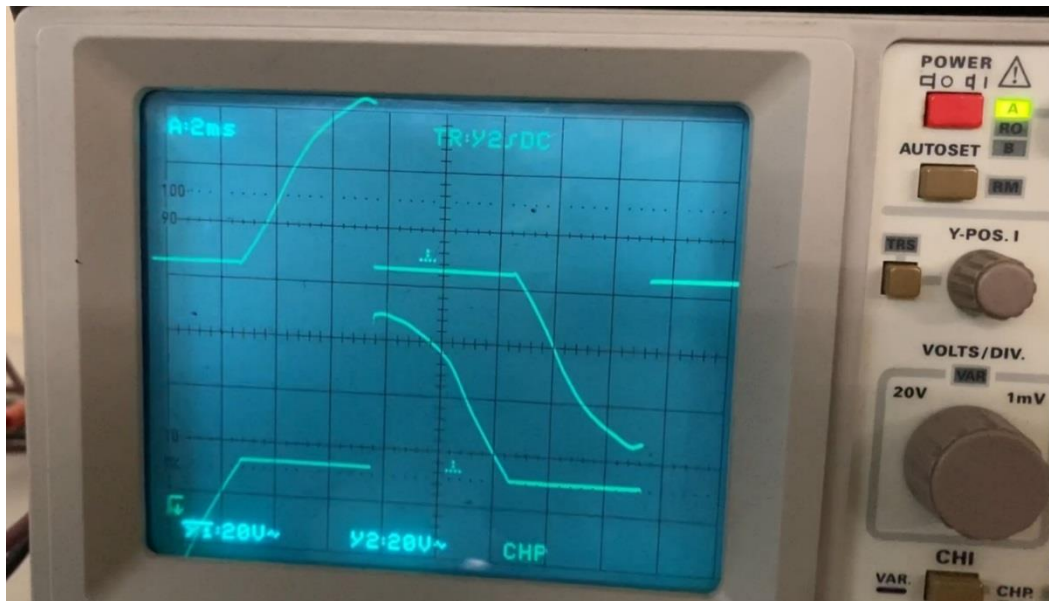
**Παρατήρηση**

180° → π = 3,14 για συχνότητα τροφοδοσίας 50 Hz → 20 ms περίοδος, ημιπερίοδος → 10 ms

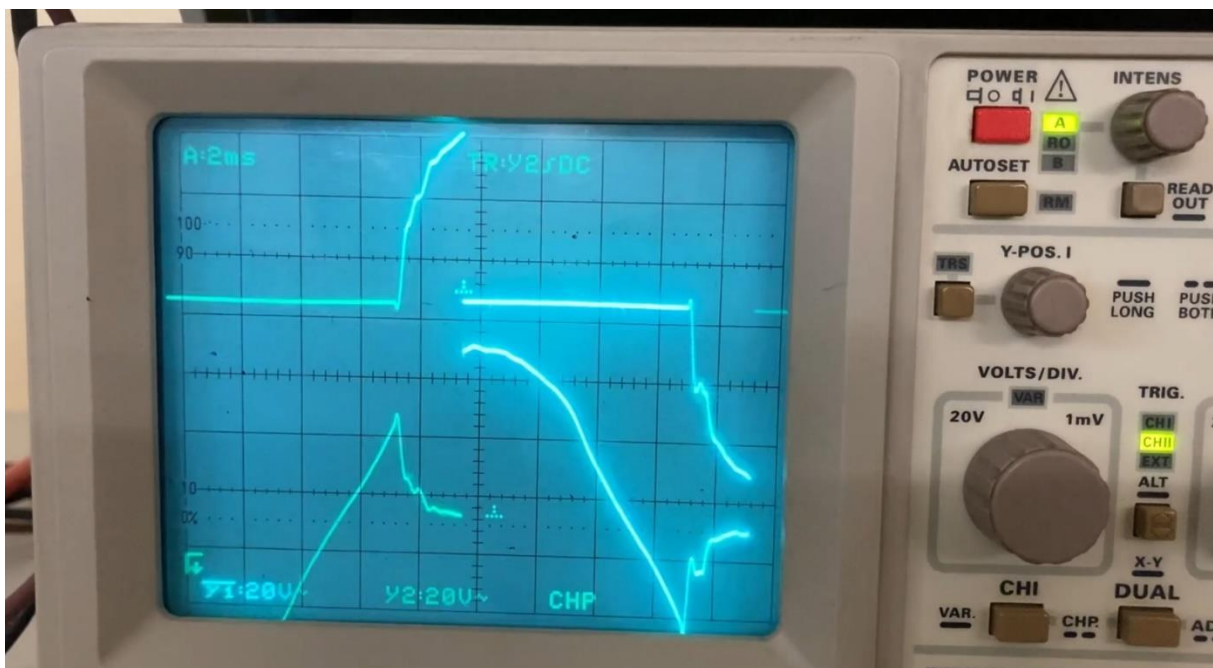
90° → π/2 = 1,57 ..... → 5 ms

30° → π/6 = 0,523 ..... → 1,66 ms

Εργαστηριακή υλοποίηση και παρατήρηση βασικής συνδεσμολογίας φασικού ελέγχου μέσω του TRIAC.



Εικόνα 11. Με ωμικό φορτίο.



Εικόνα 12. Με επαγωγικό φορτίο (κινητήρας AC).

Η διαφορά ως προς το επαγωγικό φορτίο (Εικόνα 12) είναι λόγω του ότι αποθηκεύει ενέργεια υπό μορφή μαγνητικού πεδίου, κατά τη διέλευση ρεύματος από αυτό, την οποία και απελευθερώνει μόλις διακοπεί η τροφοδοσία του.

### 2.2.2 Προϋποθέσεις έναυσης του TRIAC μέσω της Πύλης.

Το ρεύμα διέγερσης  $I_{GT}$  στη Πύλη, διεγείρει ένα TRIAC όταν υπάρχει θετική ή αρνητική πόλωση μεταξύ G και MT1, άσχετα με το τι πόλωση υπάρχει μεταξύ MT2 και MT1 (θετική ή αρνητική). Έτσι, όπως φαίνεται και στο πρώτο τεταρτημόριο του σχήματος 4 – 2.2.1γ, όταν το MT2 είναι θετικό ως προς το MT1, το G (εφ' όσον εκπληρώνει τις ανάλογες προδιαγραφές) μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό ως προς το MT1, για να μεταβεί το TRIAC στη κατάσταση αγωγής. Το ίδιο επίσης συμβαίνει όταν το MT2 είναι αρνητικό ως προς το MT1, το G μπορεί επίσης να είναι θετικό ή αρνητικό ως προς το MT1. Τα ανωτέρω καθορίζουν τους τέσσερις τρόπους λειτουργίας – διέγερσης του TRIAC όπως φαίνεται στον κατωτέρω πίνακα 2. [14]

**Πίνακας 2.**

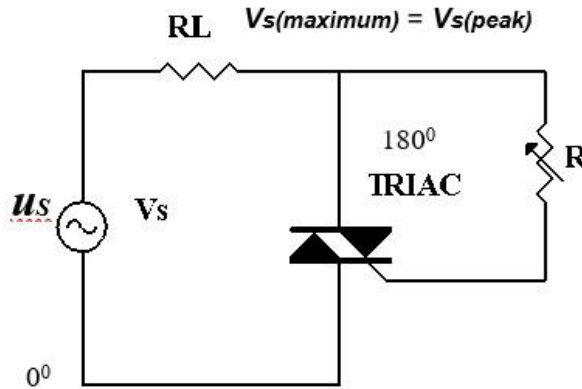
<b>MT2 (A2)</b>	<b>GATE (G)</b>	<b>ΤΕΤΑΡΤΗΜΟΡΙΟ</b>	<b>ΤΡΟΠΟΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ</b>
+	+	1	1
+	-	1	2
-	+	3	3
-	-	3	4

### 2.2.3 Κυκλώματα έναυσης του TRIAC.

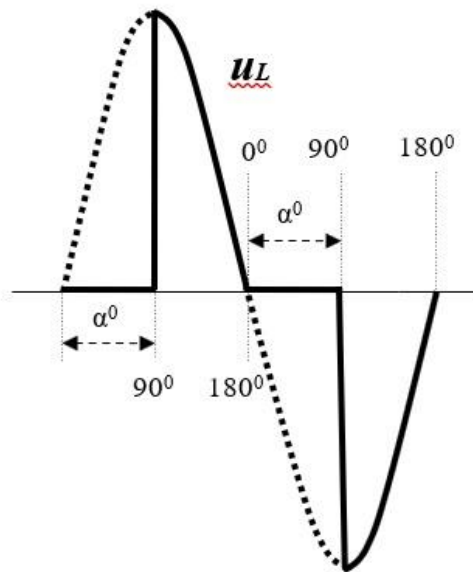
Τα κυκλώματα έναυσης (διέγερσης) του TRIAC ομοιάζουν κατά πολύ με αυτά του SCR. Και στην περίπτωση του TRIAC το σήμα διέγερσης που εφαρμόζεται στη Πύλη (G) πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό και ικανής διάρκειας, ώστε να διεγείρει το στοιχείο και να καλύψει το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να σταθεροποιηθεί στη κατάσταση αγωγής (ON). Επειδή συχνά χρησιμοποιούνται παλμοί έναυσης, και ως επί το πλείστον παλμορεύματα  $IGT$ , αυτοί οι παλμοί πρέπει να έχουν, όπως και στα SCR, αρκετή ένταση και διάρκεια (περίπου 30  $\mu s$ ) για να οδηγήσουν το TRIAC στη κατάσταση αγωγής (ON). Και όπως προαναφέρθηκε, όσο ισχυρό είναι το  $IGT$  (ο παλμός έναυσης), τόσο ταχύτερα μεταβαίνει στη κατάσταση ON το στοιχείο, δηλαδή μικραίνει η  $V_{BO}$ . (Υπ' όψιν ότι, όταν το TRIAC ευρίσκεται στον τρόπο διέγερσης 1, χρειάζεται λιγότερο σήμα διέγερσης σε σχέση με τους άλλους τρεις, και αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν όταν πρόκειται να εργαστεί και με τους άλλους τρόπους συγχρόνως). [14]

2.2.4 Τεχνικές και επιλογή κυκλώματος έναυσης.

Βάσει των σχημάτων 4 – 2.2.4α,β, με μέγιστη αντίσταση R το TRIAC δεν άγει (OFF). Καθώς ελαττώνεται η R, φθάνει σε ένα σημείο στο οποίο παρέχεται ικανό ρεύμα Πύλης, και που εκείνη τη στιγμή η πηγή  $u_s$  έχει τιμή κορυφής. Τότε το TRIAC έρχεται στη κατάσταση αγωγής (ON), με γωνία καθυστέρησης  $\alpha = 90^\circ$ . Όσο τώρα συνεχίζει να ελαττώνεται η αντίσταση R, η γωνία καθυστέρησης τείνει να γίνει  $\alpha = 0^\circ$ . Παρατηρούμε τελικά ότι η γωνία καθυστέρησης περιορίζεται σε διάστημα  $0^\circ - 90^\circ$ , όπως και στο SCR κατά τη μία ημιπερίοδο, αλλά τώρα ως προς το TRIAC και για τις δύο ημιπεριόδους. [14]

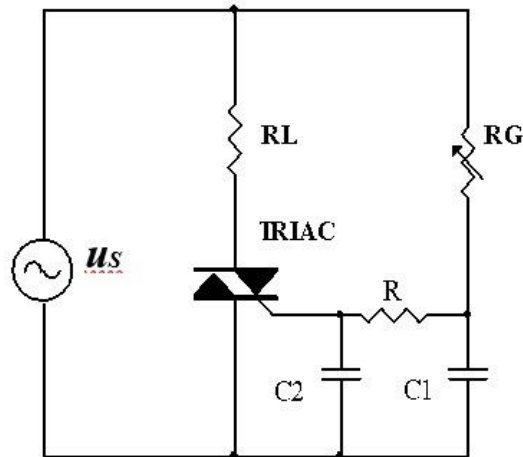


Εικόνα 6. Σχήμα 4 – 2.2.4β[14]



Εικόνα 7. Κυματομορφή τάσης τροφοδοσίας με γωνία καθυστέρησης.[14]

Ο πλέον εύκολος τρόπος, ώστε η γωνία καθυστέρησης να κυμαίνεται σε όλο το διάστημα της ημιπεριόδου  $0^\circ - 180^\circ$  (θετικής και αρνητικής), κι εδώ όπως με το SCR, γίνεται η χρήση ενός δικτύωματος R – C, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 4 – 2.2.4γ.



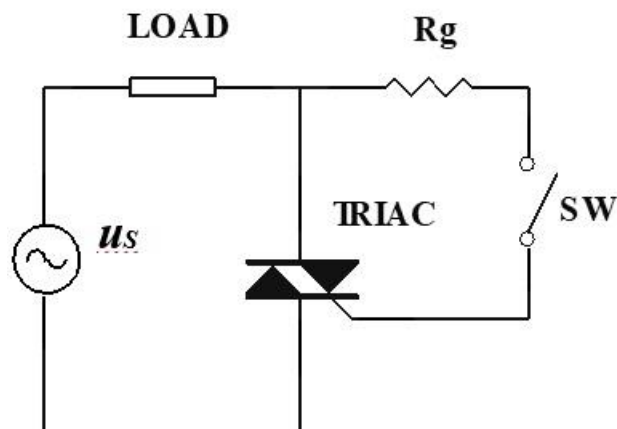
Εικόνα 7. Σχήμα 4 – 2.2.4γ.[14]

### 2.2.5 Μέθοδοι ελέγχου ισχύος.

Οι βασικοί μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι τρεις:

#### 1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ ON – OFF :

Εδώ ο ημιαγωγός διακόπτης TRIAC, διεγείρεται (ON) αλλά και αποκόπτεται (OFF), με τη βοήθεια ενός μηχανικού μικροδιακόπτη (SW), Εικόνα 8. Το TRIAC δηλαδή, συμπεριφέρεται σαν ένας κοινός μηχανικός διακόπτης μανδάλωσης. Ο έλεγχος παροχής της ισχύος (ρύθμιση), γίνεται μόνο σε δύο στάθμες 0% ή 100% που αντιστοιχεί στη κατάσταση ανοιχτού (ON) ή κλειστού (OFF) διακόπτη. [14]

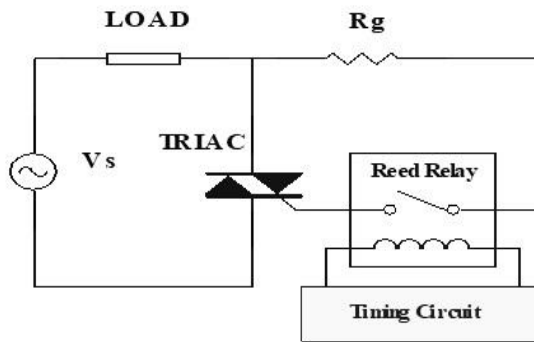


Εικόνα 8. Ημιαγωγός διακόπτης TRIAC.[14]

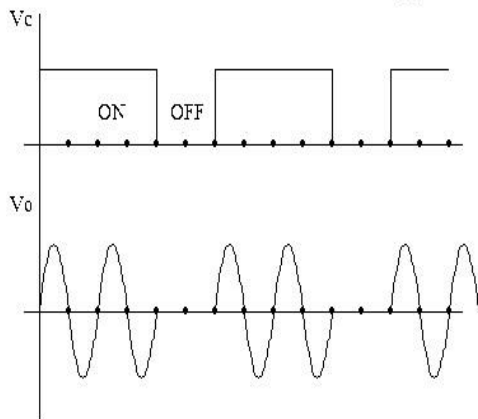
2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΚΟΠΤΗ AC :

Είναι όμοια με την προηγούμενη, μόνο που εδώ μπορούμε να ελέγχουμε τη παροχή ισχύος στο φορτίο προκαλώντας διαδοχικά ON – OFF στον ημιαγωγό διακόπτη (TRIAC), μέσω των επαφών του reed relay. Έτσι το φορτίο λαμβάνει τη πλήρη ισχύ της πηγής για χρονική περίοδο έστω  $t_{ON}$ , και μηδενική ισχύ για τη περίοδο  $t_{OFF}$ . Συνεπώς η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο είναι ρυθμιζόμενη και εξαρτάται από το λόγο  $\frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = D$ , δηλαδή τον *κύκλο λειτουργίας (Duty cycle, D)* του κυκλώματος χρονισμού (Timing Circuit), που ελέγχει την έναυση (σχήμα 4 – 2.2.5β1).

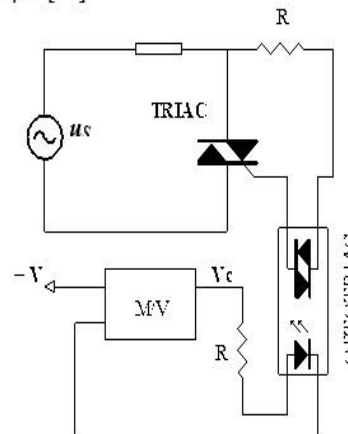
Επειδή οι χρόνοι  $t_{ON}$  και  $t_{OFF}$  επιλέγονται να είναι ακέραια πολλαπλάσια μιας ημιπεριόδου (10ms για 50 Hz) του δικτύου ( $\mu s$ ), οι δυναμικοί διακόπτες αναφέρονται και σαν *διακόπτες πολλαπλών περιόδων*, και έχουν περιοχή ρύθμισης ισχύος στο φορτίο από 0 – 100%, διαβαθμισμένη με βήμα 2, δηλαδή 2, 4, 6, 8,.....96, 98, 100%. [14]



Εικόνα 9. Σχήμα 4 – 2.2.5β1. [14]



Εικόνα 10. Σχήμα 4 – 2.2.5β2. [14]



Εικόνα 11. Σχήμα 4 – 2.2.5β3. [14]

Η λειτουργία του κυκλώματος γίνεται κατανοητή από τις κυματομορφές του σχήματος 4 – 2.2.5β2, όπου η τάση  $V_c$  είναι η τάση διέγερσης του πηνίου του reed relay και προέρχεται από ένα κύκλωμα χρονισμού (Timing Circuit, ή Multi-Vibrator), τετραγωνικού παλμού με ρυθμιζόμενο κύκλο λειτουργίας  $D$ . Η  $V_o$  είναι η τάση φορτίου. Η ενεργός τιμή της τάσης φορτίου δίδεται από τη σχέση:

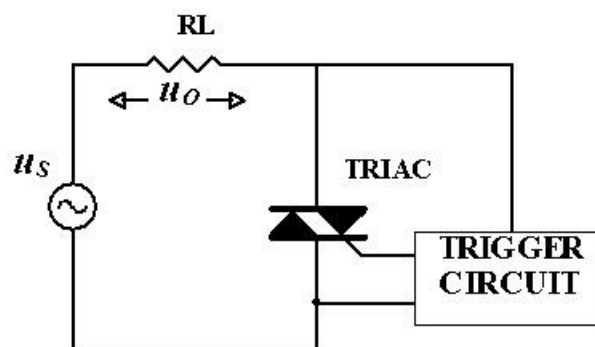
$$V_{O(RMS)} = V_S \sqrt{D} \quad (2)$$

Η εντολή έναυσης στο TRIAC μπορεί να δίδεται μαγνητικά, μέσω reed relay (σχ. 4 – 2.2.5β1), ή ακόμη καλύτερα μέσω *οπτοσυζεύκτη* (*Photocoupler, Optoisolator, Optotriac*), όπως φαίνεται και στο κύκλωμα του σχήματος 4 – 2.2.5β3. (Βλέπε και § 4 – 2.4.3). Έτσι, μέσω του οπτοζεύκτη έχουμε όχι μόνο ωμική (γαλβανική) απομόνωση του κυκλώματος ελέγχου από το κύκλωμα ισχύος, αλλά και αξιόπιστη απόκριση από πλευράς ταχύτητας. Λόγω της απομόνωσης του κυκλώματος ελέγχου του διακόπτη ισχύος και της αξιόπιστης απόκρισης από πλευράς ταχύτητας, αυτά τα κυκλώματα επικράτησε να αναφέρονται σαν *ηλεκτρονόμοι (ρελέ) στερεάς κατάστασης (Solid State Relays ή SSRs)*. Τα SSRs μπορούν να λειτουργήσουν σαν στατικοί διακόπτες ON – OFF ή σαν δυναμικοί διακόπτες με την προσθήκη κατάλληλου κυκλώματος χρονισμού.[14]

### 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΑΣΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (PHASE CONTROL – AC REGULATION)

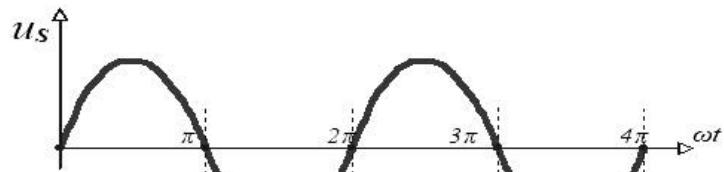
Σε αντίθεση με το SCR, το οποίο εκ κατασκευής επιτρέπει το φασικό έλεγχο ισχύος μόνο της μίας ημιπεριόδου της Κυματομορφής τροφοδοσίας AC, στη περίπτωση του TRIAC μπορούμε να έχουμε συνεχή ρύθμιση της ισχύος (αδιαβάθμητη), ρυθμίζοντας την έναυσή του στο κατάλληλο σημείο κατά την διάρκεια κάθε μίας ημιπεριόδου. (Χρόνοι  $T_{ON}$  και  $T_{OFF}$  στη περιοχή των ημιπεριοδών  $0 - \pi$  και  $\pi - 2\pi$ , μικρότεροι των 10ms για κάθε ημιπερίοδο της συχνότητας του δικτύου των 50 Hz). Για όλες τις μεθόδους ελέγχου ισχύος AC, το βασικό σημείο που δεν πρέπει να μας διαφεύγει είναι:

Τα TRIACs και τα SCRs έρχονται αυτόματα σε αποκοπή μόλις μηδενιστεί το ρεύμα που τα διαρρέει, και αυτό γίνεται πάντα, (προκειμένου για ωμικό φορτίο), σε κάθε σημείο εναλλαγής της ημιπεριόδου, δηλαδή στα σημεία  $0, \pi, 2\pi, 3\pi$  κ.λ.π. [14]

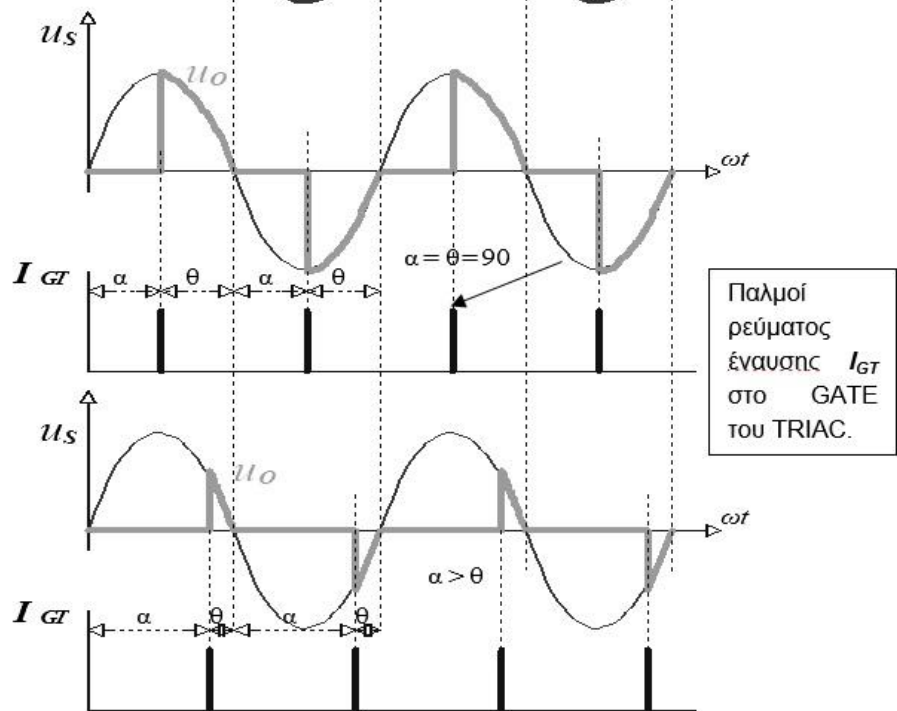


Εικόνα 12. Σχήμα 4 – 2.2.5γ1. [14]

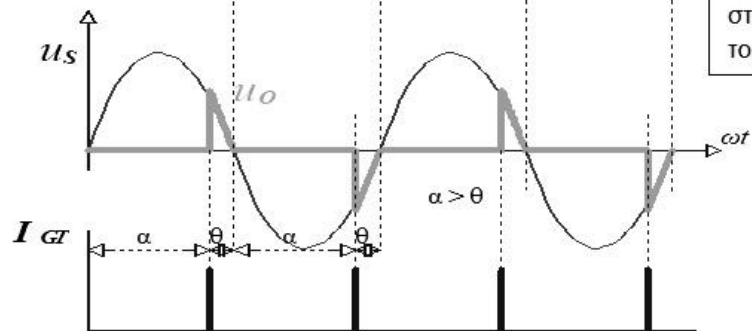
Σχήμα 4 – 2.2.5γ2. [14]



Σχήμα 4 – 2.2.5γ3. [14]



Σχήμα 4 – 2.2.5γ4. [14]



Σύμφωνα λοιπόν με τα σχήματα 4 – 2.2.5γ3 ( $\alpha = \theta = 90^\circ$ ) και 4 – 2.2.5γ4 ( $\alpha > \theta$ ) (σε χρονικό συσχετισμό με την τάση τροφοδοσίας  $u_s$  σχήμα 4 – 2.2.5γ2), δίδοντας παλμό ρεύματος έναυσης  $I_{GT}$  στο TRIAC, μείωση της γωνίας καθυστέρησης έναυσης  $\alpha$  συνεπάγεται και την αντίστοιχη αύξηση της γωνίας αγωγιμότητας  $\theta$ , άρα και της παρεχόμενης ισχύος στο φορτίο (έντονη γραμμή).

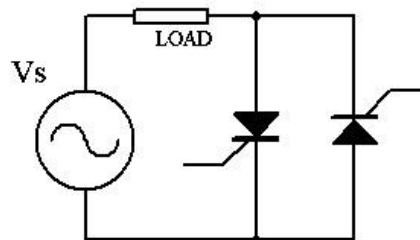
Η ΜΕΣΗ (AVERAGE) και η ΕΝΕΡΓΟΣ (RMS) τιμή της τάσης φορτίου ( $u_o$ ) για κύκλωμα ελέγχου δύο παλμών (πλήρους κύματος), δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις, (3) και (4) αντιστοίχως, πάντα σε συνάρτηση με τη γωνία καθυστέρησης έναυσης  $\alpha$ . [14]

$$V_o (AV) = \frac{V_{peak}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (3)$$

$$V_o (RMS) = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + (1/2) \sin 2\alpha} \quad (4)$$

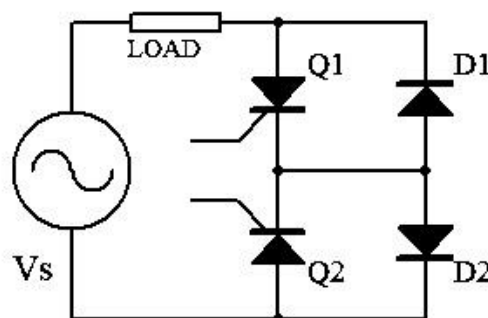
### 2.2.6 Συνδεσμολογίες φασικού ελέγχου με ρυθμιστές AC.

Απλή και πολύ αποδοτική μέθοδος φασικού ελέγχου είναι γενικά η συνδεσμολογία με ένα TRIAC του σχ. 5.7.2α, προορισμένη για κυκλώματα χαμηλής και μέσης ισχύος .



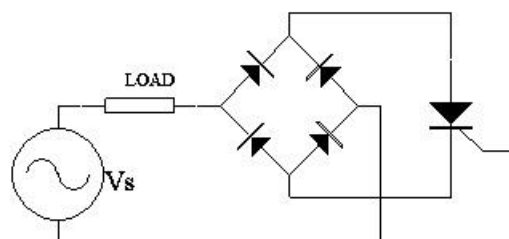
Σχήμα 5.7.2α. [14]

Σε κυκλώματα με ρεύμα φορτίου μεγαλύτερο των 30A, η σύνδεση αντιπαράλληλων SCR του σχ. 6.7.2α είναι αυτή που χρησιμοποιείται αντί του TRIAC του σχ. 5.7.1α. Βέβαια απαιτείται κατάλληλος συγχρονισμός και απομόνωση των μονάδων ή μονάδας σκανδαλισμού (*triggering unit*) στα GATES.



Σχήμα 5.7.2β.[14]

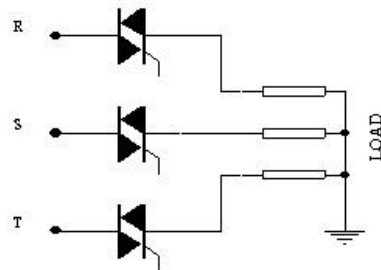
Στο κύκλωμα του σχ. 5.7.2β έχουμε το πλεονέκτημα στην απλότητα σύνδεσης του κυκλώματος σκανδαλισμού (κοινή κάθοδος και πύλη). Η εν σειρά προσθήκη κατά τη περίοδο αγωγιμότητας μιας διόδου στο αντίστοιχο SCR, π.χ. η D2 στο Q1, έχει σαν αποτέλεσμα μια ελάχιστη μείωση στην απόδοση του κυκλώματος σε σχέση με τα προηγούμενα. [14]



Σχήμα 5.7.2γ.[14]

## Κεφάλαιο 2

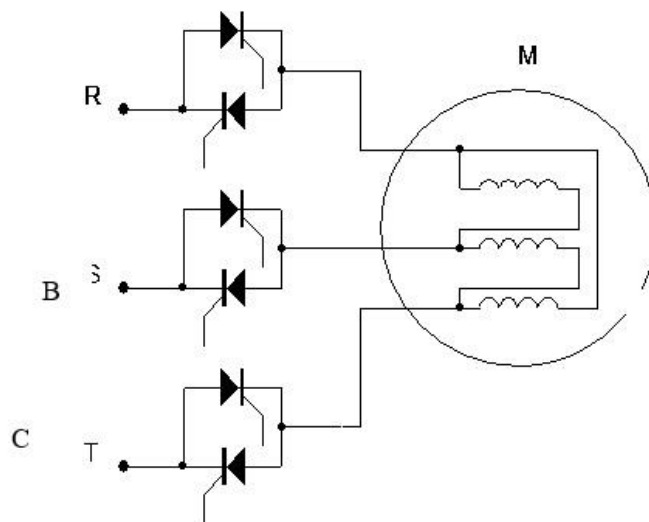
Το κύκλωμα του σχ. 5.7.2γ μας δείχνει ότι η σύνδεση του φορτίου είναι αυτή που κρίνει τον χαρακτηρισμό του κυκλώματος. Όταν το φορτίο συνδέεται στην είσοδο του κυκλώματος, τότε έχουμε ρυθμιστή AC, και όταν συνδέεται σε σειρά με το SCR τότε πρόκειται για μετατροπέα AC/DC δύο παλμών. [14]



Σχήμα 5.7.2δ.[14]

Στο σχήμα 5.7.2δ δίδεται μια γενική εφαρμογή ελέγχου ενός τριφασικού φορτίου σε σύνδεση αστέρα (Y), από τον αντίστοιχο ρυθμιστή AC με διακοπτικό στοιχείο το TRIAC. Το φορτίο μπορεί να έχει οποιαδήποτε συμπεριφορά (ωμικό, επαγωγικό ή χωρητικό), αλλά πρέπει να είναι συμμετρικό. Η συνδεσμολογία του φορτίου μπορεί να είναι και σε τρίγωνο(Δ).

Αντίστοιχο κύκλωμα τριφασικού ρυθμιστή με φορτίο συνδεδεμένο σε τρίγωνο (Δ) δίδεται στο σχήμα 5.7.2δ, όπου παρίσταται το κύκλωμα ισχύος *soft start* για τον έλεγχο ενός κινητήρα AC, τύπου βραχυκυκλωμένου δρομέα (*AC squirrel cage motor*). Το διακοπτικό στοιχείο εδώ είναι αντιπαράλληλα SCRs, αλλά για κινητήρες χαμηλότερης ισχύος μπορεί να είναι και TRIACs. Ανάλογα με τα κατασκευαστικά στοιχεία του κινητήρα, η σύνδεση των τυλιγμάτων του μπορεί να γίνει και σε αστέρα (Y).[14]



Σχήμα 5.7.2δ.[14]

## 2.3 Επίλογος

Ο φασικός έλεγχος χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές που εμπεριέχουν AC κινητήρες διότι κάθε εφαρμογή απαιτεί τον έλεγχο ταχύτητας περιστροφής του ώστε να επιτελεί ακριβώς την εργασία που του ανατίθεται.

## Κεφάλαιο 3

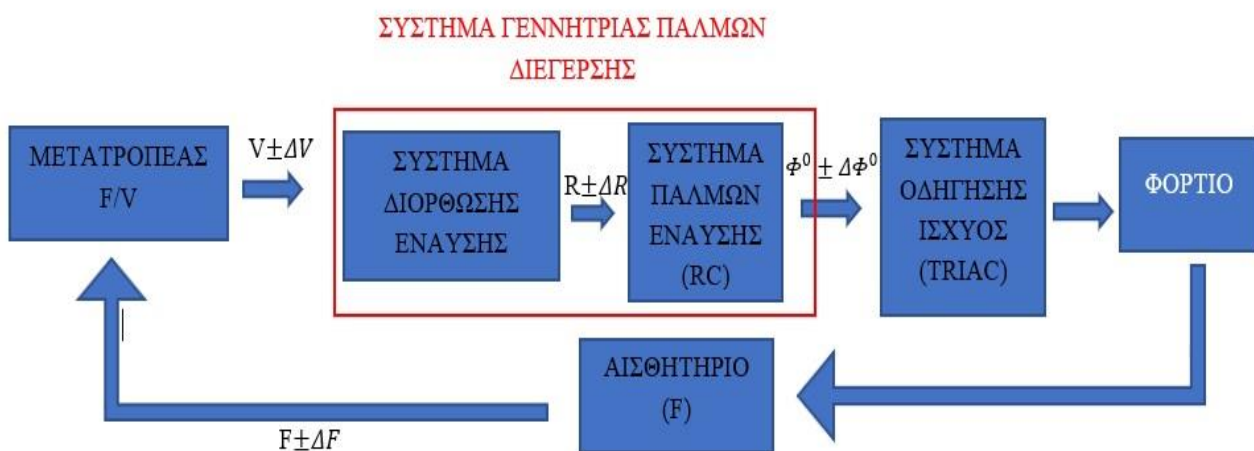
### Μελέτη των βαθμίδων του συστήματος αυτομάτου σταθεροποίησης των στροφών μονοφασικού κινητήρα με διακριτά αναλογικά ηλεκτρονικά.

#### 3.1 Εισαγωγή

Η γενική λειτουργία του κυκλώματος είναι κατά την λειτουργία ενός AC κινητήρα, να εντοπίζει την μεταβολή των στροφών του ,και αναλόγως να μεταβάλλει την γωνία έναυσης του TRIAC με σκοπό να τις διατηρεί σταθερές , ανεξαρτήτως του φορτίου που τον επιβαρύνει έως τα κατασκευαστικά όρια που του έχουμε θέσει.

#### 3.2 Το διάγραμμα ροής και γενική περιγραφή του κυκλώματος και των στοιχείων του.

Το κύκλωμα αποτελείται από, ένα οπτικό αισθητήριο ανίχνευσης παλμών , τον μονοσταθί πολυδονητή 555 ,όπου ο αρχικός παλμός μετατρέπεται σε τετραγωνικό, συνδεδεμένος στη συνέχεια στον μετατροπέα συχνότητας σε τάση με το ολοκληρωμένο LM331, την γεννήτρια παλμών διέγερσης με τη χρήση unijunction συνδεσμολογίας ,τον διακόπτη ισχύος TRIAC, τέλος το κύκλωμα τροφοδοσίας.



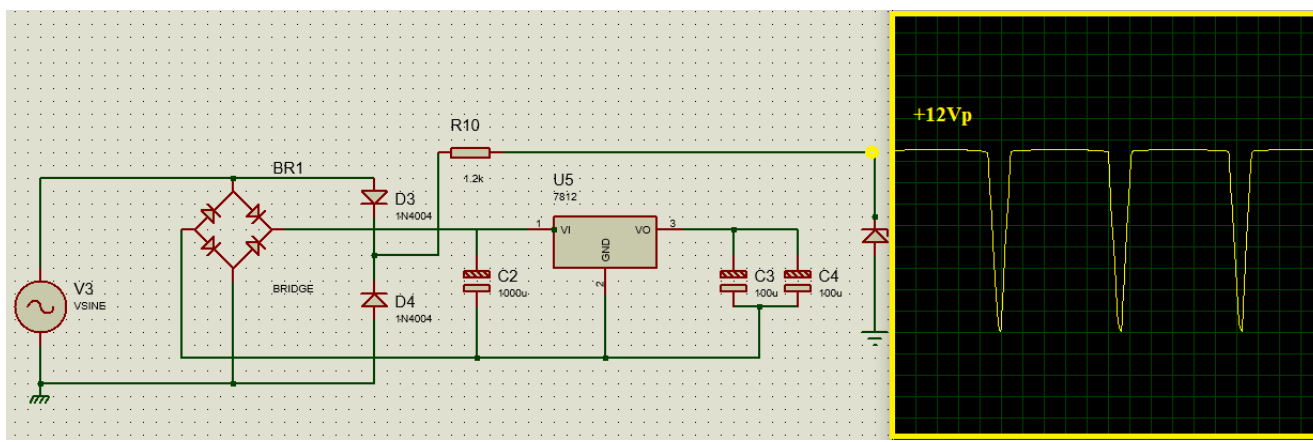
Εικόνα 13. Διάγραμμα ροής.

Για όλους του υπολογισμούς που ακολουθούν μελετήθηκαν οι εξής παράμετροι :

- Ταχύτητα περιστροφής
- Ανίχνευση της ταχύτητας περιστροφής
- Μετατροπή της συχνότητας περιστροφής σε σήμα ελέγχου διέγερσης του TRIAC
- Σταθερή κατάσταση κλειστή ανάδραση.

### 3.2.1 Κύκλωμα Τροφοδοσίας:

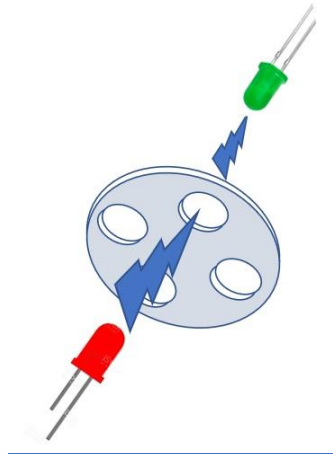
Το παρακάτω κύκλωμα τροφοδοσίας (Εικόνα 14) ,χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των επιμέρους κλάδων που αποτελούν το συνολικό κύκλωμα .Πιο συγκεκριμένα η πραγματική είσοδος του κυκλώματος είναι το δίκτυο (230V 50hz) συνδεδεμένο σε έναν μετασχηματιστή που υποβιβάζει την τάση στα 17Vp και έτσι δημιουργούνται δύο τάσεις ,μια +12Vdc για την τροφοδοσία του 555, του 1m331 , και του αισθητήρα στροφών , και μια +17Vp θετικών ημιπεριόδων για το κύκλωμα ελέγχου εισόδου του unijunction το οποίο θα αναλύσουμε εκτενώς παρακάτω. Ο πυκνωτής στην είσοδο του Regulator MC7812ACK χρησιμεύει για να υπάρχει συνεχώς μια σταθερή παροχή τάσης εισόδου ώστε να προκύπτει όσο το δυνατόν σταθερή έξοδος, φιλτραρισμένη απο τους δύο πυκνωτές που ακολουθούν.Η δίοδος zener D1, χρησιμοποιείται για να προστατέψει το ujt transistor 2n2646 από υπερτάσεις.



Εικόνα 14. Τροφοδοσία.

### 3.2.2 Αισθητήρας μέτρησης στροφών κινητήρα.

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση των στροφών του κινητήρα χρησιμοποιεί την παραπάνω γενική κατασκευή- αρχή .Κάθε φορά που παρεμβάλλεται μεταξύ του υπέρυθρου πομπού και δέκτη μια οπή , τότε δημιουργείται ένας παλμός και φυσικά η συχνότητα των παλμών είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής. Η κατασκευή και μελέτη του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο περιγραφής της κατασκευής.

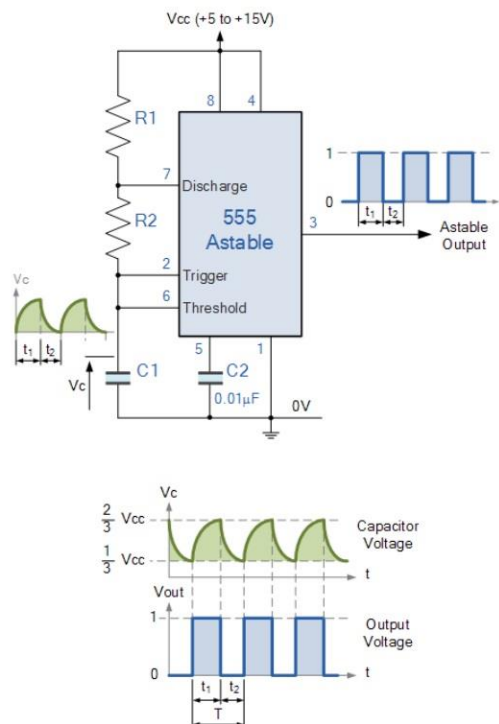


Εικόνα 15. Αισθητήρας.

### 3.2.3 LM555 (Προσομοίωση αισθητήρα στροφών κινητήρα):

Για λόγους πρακτικότητας και αμεσότητας για τις πρακτικές δοκιμές του κυκλώματος, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω συνδεσμολογία ασταθούς πολυδονητού με τον 555, για την παραγωγή τετραγωνικών παλμών σαν αντικαταστάτη του αισθητήρα στροφών του κινητήρα. Για την ρεαλιστική μελέτη του κυκλώματος, μετρήθηκε η συχνότητα των παλμών που παράγεται με τον κινητήρα και τον αισθητήρα στις μέγιστες στροφές λειτουργίας του, ήτοι 2.5 KHz. Με δεδομένο αυτή την συχνότητα, παρακάτω υπολογίζονται τα στοιχεία του 555 έτσι ώστε η έξοδος του να είναι όσο τον δυνατόν πλησιέστερη στην πραγματική συχνότητα που παράγει ο κινητήρας.

Basic Astable 555 Oscillator Circuit



Εικόνα 16. Ασταθής Πολυδονητής.[15]

Χρόνοι φόρτισης και αποφόρτισης :

$$t_1 = 0.693(R_1 + R_2) \cdot C \quad t_2 = 0.693 \cdot R_2 \cdot C$$

Περίοδος :

$$T = t_1 + t_2 = 0.693(R_1 + 2R_2) \cdot C$$

Συχνότητα:

$$F = 1/T = 1.44 / (R_1 + 2R_2) \cdot C$$

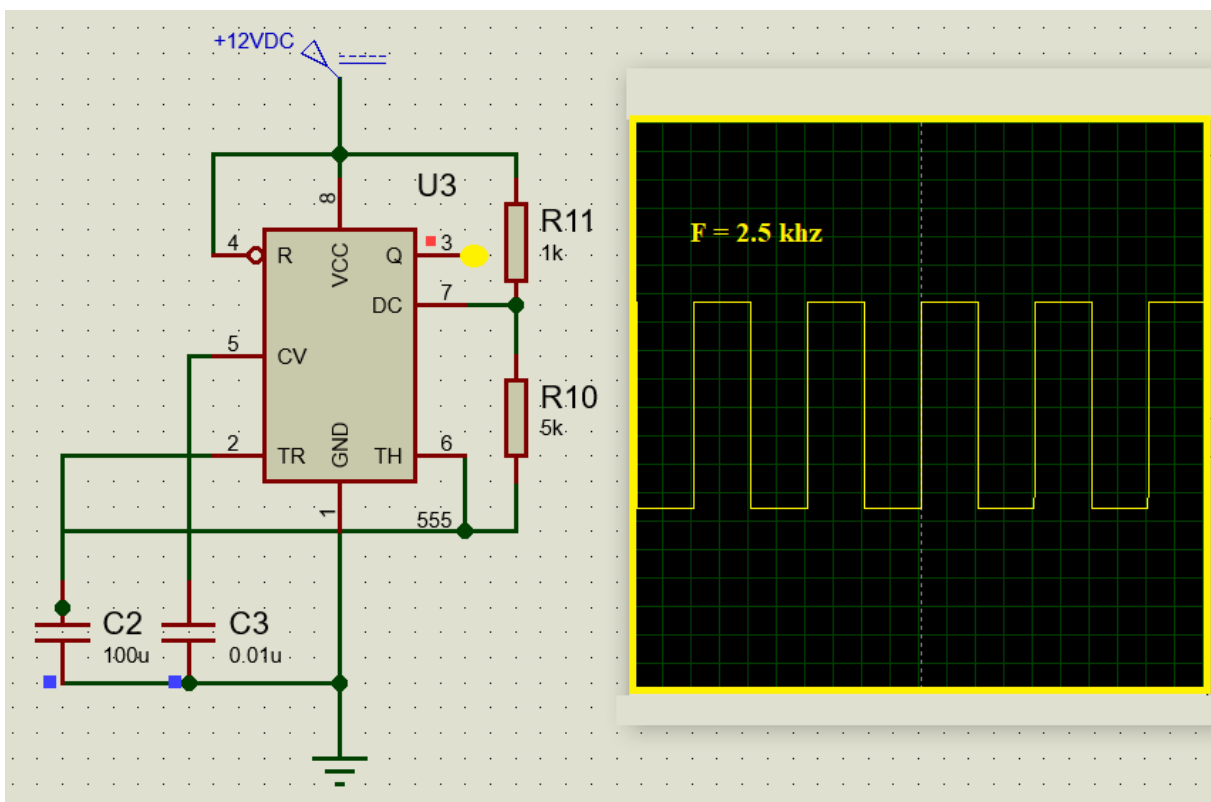
Κύκλος εργασίας (Duty Cycle):

$$DC\% = TON / (TOFF + TON) = (R_1 + R_2) / (R_1 + 2R_2) \%$$

$$F = 2.5 \text{Khz} \Rightarrow T = 0.4 \text{ms} = 400 \mu\text{s}.$$

Σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους, θέτω την  $R_1 = 1 \text{K}\Omega$ . Ο πυκνωτής  $C$  για κατασκευαστικούς λόγους θα έχει τιμή  $100 \mu\text{F}$ .

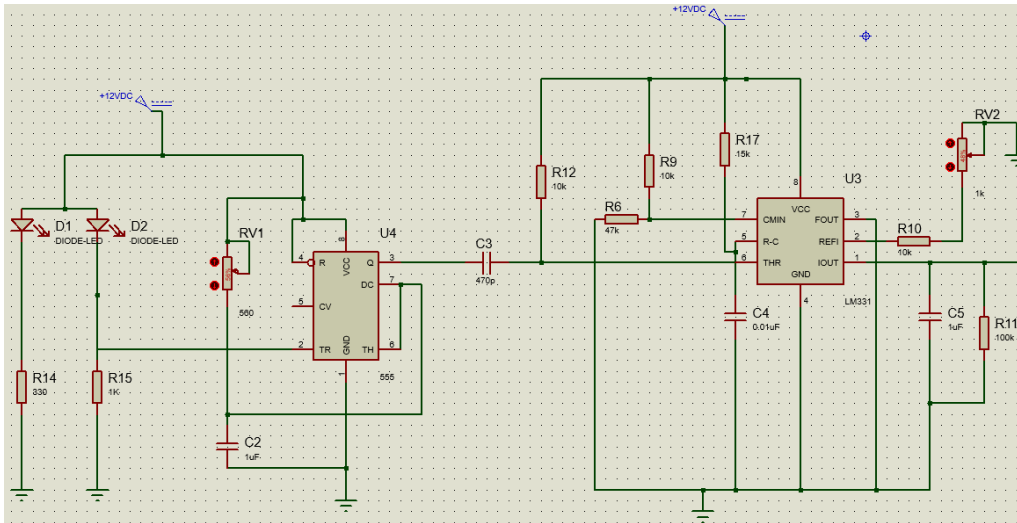
$$R_2 = (T - 0.693 \cdot R_1 \cdot C) / (2 \cdot 0.693 \cdot C) \Rightarrow R_2 = 5 \text{K}\Omega.$$



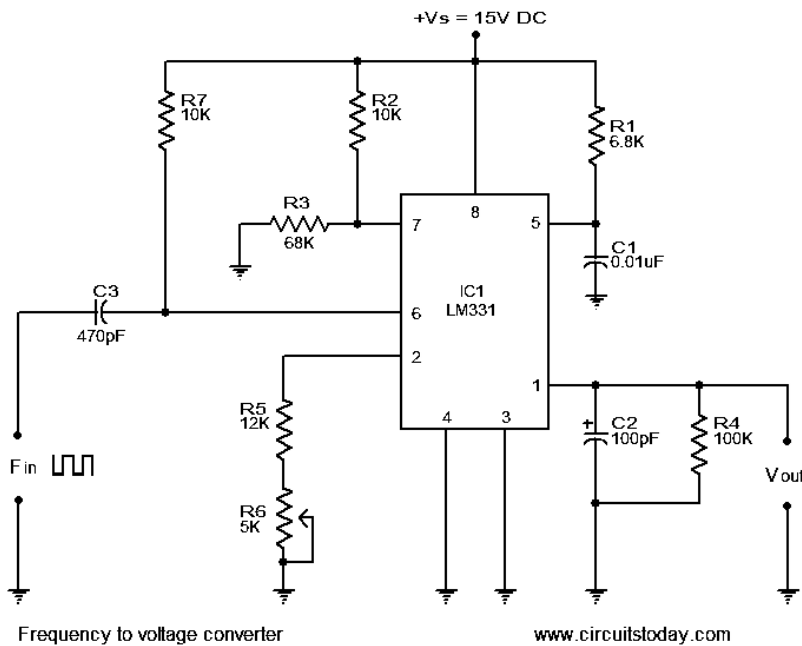
Εικόνα 17. Ασταθής Πολυδονητής. (Proteus)

### 3.2.4 Μετατροπέας συχνότητας σε τάση (frequency to voltage converter) :

Το ολοκληρωμένο LM331 γνωστό και ως «ταχύμετρο» εμπεριέχει στο datasheet του την παρακάτω συνδεσμολογία όπου ουσιαστικά ανάλογα με την συχνότητα των παλμών εισόδου (ταχύτητα), παράγει στην έξοδο ανάλογη συνεχής σταθερή τάση . Παρατηρείται ότι στην είσοδο του LM331 προηγείται ένας 555 σε συνδεσμολογία μονοσταθούς πολυδονητή , με σκοπό να μετατρέπει το σήμα του αισθητηρίου σε καθαρά τετραγωνικό ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα λειτουργίας του μετατροπέα.



Εικόνα 18. 555-lm331 (F to V).



Εικόνα 19. LM331 “Tachometer”. [16]

Η τάση στην έξοδο είναι ανάλογη με τη συχνότητα στην είσοδο. Η πηγή είναι συνδεδεμένη στον ακροδέκτη 8 και παρέχει τάση 15V DC. Οι ακροδέκτες 3 και 4 συνδέονται στη γείωση. Η συχνότητα εισόδου δίνεται στον ακροδέκτη 6 και η τάση εξόδου λαμβάνεται από τον ακροδέκτη 1. Η συχνότητα εισόδου διαφοροποιείται χρησιμοποιώντας την αντίσταση R7 και τον πυκνωτή C3 και στη συνέχεια η προκύπτουσα σειρά παλμών πηγαίνει στον ακροδέκτη 6.

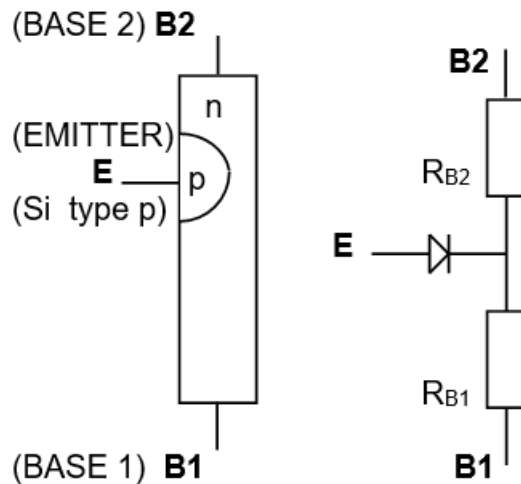
Το ρεύμα που ρέει από τον ακροδέκτη 6 είναι ανάλογο με τις τιμές του πυκνωτή C1 και της αντίστασης R1 (που είναι επίσης γνωστές ως στοιχεία χρονισμού) και της συχνότητας εισόδου. Επομένως παίρνουμε την τάση εξόδου στην αντίσταση R4 η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα της εισόδου. Σε αυτό το κύκλωμα χρησιμοποιείται 15 V DC, αλλά η τάση λειτουργίας του μπορεί να είναι μεταξύ 5 βολτ έως 30 βολτ συνεχούς ρεύματος. Η τιμή της αντίστασης R3 εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας.[15]

$$V_{out} = f_{IN} \times (R_L/R_S) \times (1.9V) \times (1.1R_tC_t) \quad (5)$$

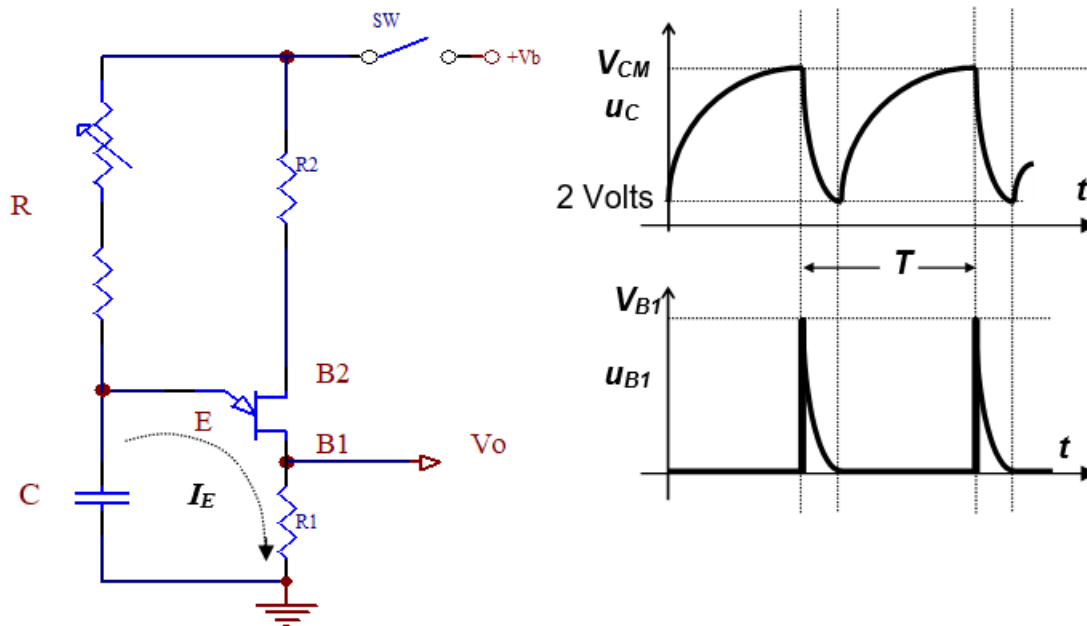
### 3.2.5 Κύκλωμα με Unijunction τρανζίστορ:

Ο συγκεκριμένος τύπος αυτού του τρανζίστορ αποτελεί τη καρδιά του ταλαντωτή παλμών αιχμής (spikes), και θεωρείται από τα πλέον κατάλληλα κυκλώματα για την αξιόπιστη διέγερση των SCRs. Η δομή και το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοεπαφικού τρανζίστορ (UJT) φαίνεται στο σχήμα 4 – 2.3.3α. Αποτελείται από μία ράβδο Si τύπου n, αντίστασης 5 – 10 K ( $R_{B2} + R_{B1}$ ), στα άκρα της οποίας υπάρχουν οι ακροδέκτες (Βάσεις) **B2** και **B1**. Υπάρχει επίσης και μία περιοχή τύπου p τοποθετημένη περίπου στα 2/3 του μήκους της ράβδου n με τον αντίστοιχο ακροδέκτη (Εκπομπό) **E**. Κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων R2 και R1 σε συνδεσμολογία με  $R_{B2} + R_{B1}$  (σχήμα 4 – 2.3.3β), χρησιμεύει για να υπάρχει μία ανάστροφη τάση στη δίοδο p – n (**E – B1**). Αυτή η ανάστροφη τάση κρατά τη δίοδο σε κατάσταση αποκοπής έως ότου η τάση του **E** σε σχέση με το **B1** αυξηθεί σε μία τιμή αρκετά υψηλή, ελαττώνοντας δραστικά την ενεργό αντίσταση  $R_{B1}$  μεταξύ **E** και **B1**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταβεί η δίοδος στην αγωγιμότητα και ο πυκνωτής να εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης R1.

Η σχεδίαση του ταλαντωτή με UJT έχει τη μορφή του σχήματος 4 – 2.3.3β και προσφέρει σαν γεννήτρια ιδανικούς παλμούς ρεύματος  $I_{GT}$  για την έναυση των SCRs, σε αντίθεση με ένα κύκλωμα έναυσης R – C, το οποίο δεν παρέχει τόσο αξιοπιστία. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4 – 2.3.3γ, με το κλείσιμο του διακόπτη SW, ο πυκνωτής C φορτίζεται εκθετικά μέσω της αντίστασης R και όταν η φόρτισή του λάβει τη τιμή  $V_{CM} = n \times V_{BI}$ , πολώνει ορθά την ισοδύναμη δίοδο **E – B1** φέροντάς την στη κατάσταση αγωγής. Τότε ένας οξύς παλμός ρεύματος  $I_E$  (που περιορίζεται από την R1) διαρρέει την επαφή **E – B1**, με αποτέλεσμα να εκφορτίζεται ο C μέσω της R1, με μία αρχική τάση  $V_{BI}$  στην R1, η οποία R1 μπορεί να είναι η ΠΥΛΗ ενός SCR. Όταν η τάση του C ελαττωθεί μέχρι μίας τιμής, περίπου 2 Volts, τότε το UJT μεταβαίνει στην κατάσταση αποκοπής και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.[14]



Σχήμα 3. UJT (1)[14]



Σχήμα 4. UJT(2) [14]

Η περίοδος των παλμών δίδεται από τη παρακάτω σχέση:

$$T = R.C.\ln\left(\frac{1}{1-n}\right) \quad (6)$$

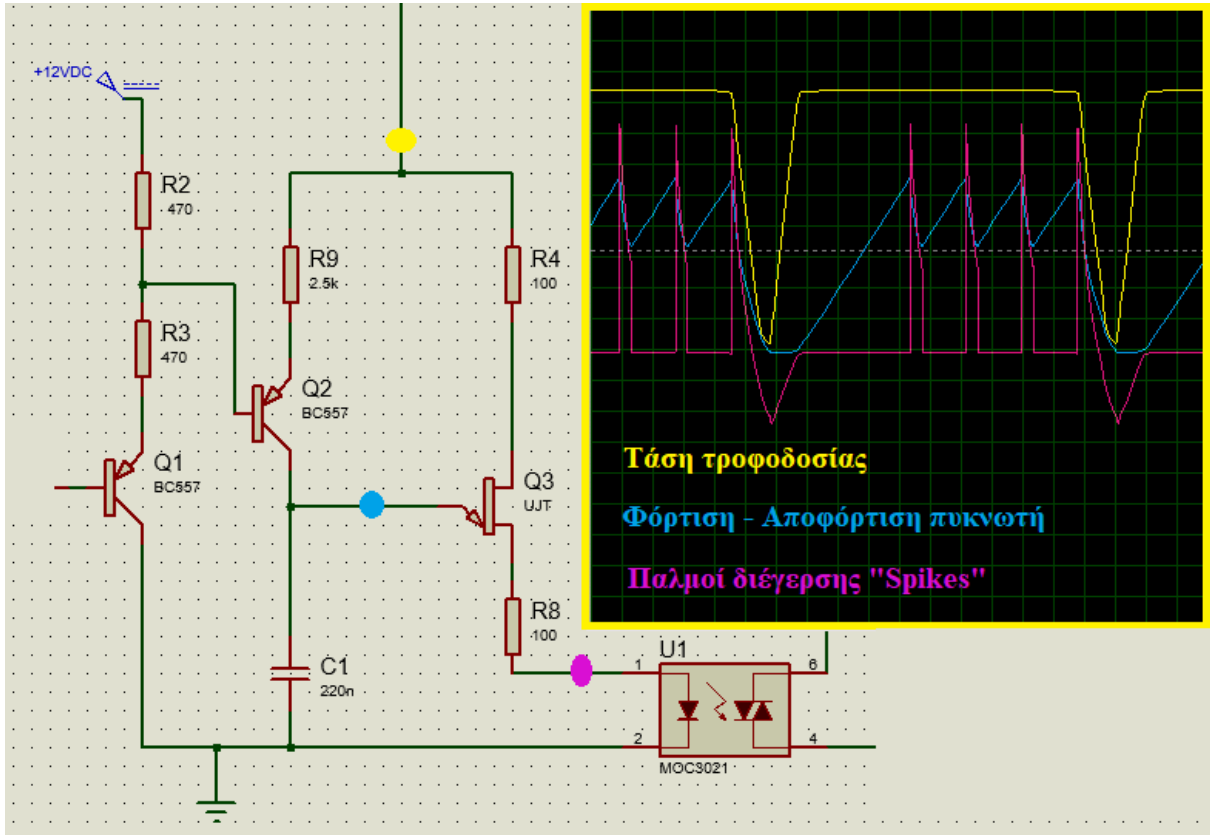
Όπου  $n$  = καθαρός αριθμός και ονομάζεται *ενδογενής λόγος φραγμού (intrinsic stand-off ratio)*. Εκφράζει τη θέση της ένωσης τύπου p σε σχέση με το μήκος της ημιαγωγού ράβδου τύπου n. Η παράμετρος  $n$  δίδεται από τον κατασκευαστή του UJT που χρησιμοποιούμε.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του τρανζίστορ αυτού, είναι:

α) Ο τρόπος που συγχρονίζεται αυτόματα με την AC τροφοδοσία. Στο τέλος κάθε ημιπεριόδου, ό,τι φορτίο παραμένει στον πυκνωτή C μηδενίζεται, με τον μηδενισμό της τροφοδοσίας.

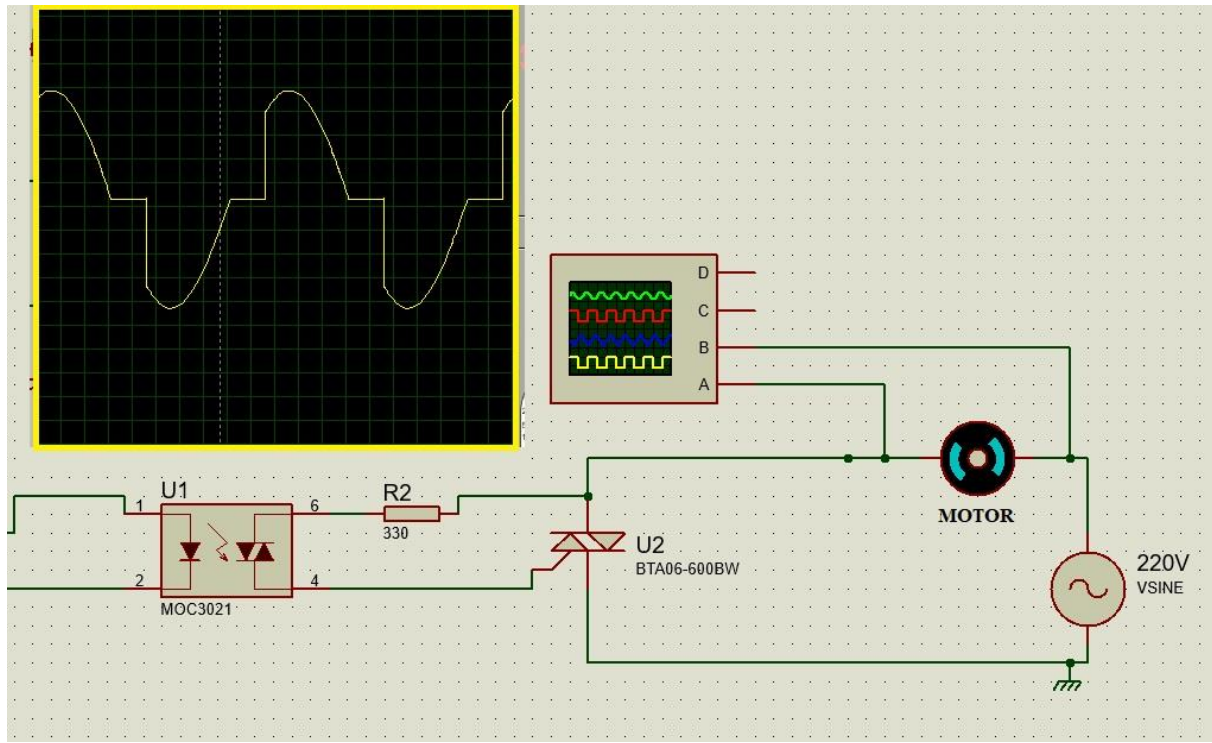
β) Προσφέρει ισχυρό ρεύμα διέγερσης σε SCRs, το οποίο απαιτεί η ΠΥΛΗ (GATE).

Το μειονέκτημά του είναι ότι για να λειτουργήσει, απαιτεί μόνο DC τάση και παράγει μόνο θετικούς παλμούς, οι οποίοι οδηγούνται κατευθείαν στο GATE των SCRs. Για την διέγερση του TRIAC ή αντιπαράλληλων SCRs χρειάζεται και η συνεργασία μετασχηματιστή ή πυκνωτών. [14]



Εικόνα 20. Unijunction, Q3.

## 3.2.6 TRIAC και Κινητήρας AC:



Εικόνα 21. Σύστημα σύζευξης διέγερσης του TRIAC.

Η σύζευξη μεταξύ του κυκλώματος διέγερσης και του κυκλώματος ισχύος γίνεται μέσω εκπομπής φωτός. Εκ μέρους του κυκλώματος διέγερσης, μία φωτοδιόδος (*Light Emitting Diode, LED*), εκπέμπει με υπέρυθρη ακτινοβολία τις εντολές ελέγχου, οι οποίες διεγείρουν ένα φωτοευαίσθητο ημιαγωγό (π.χ. photo – triac), ο οποίος είναι και μέρος του κυκλώματος της ΠΥΛΗΣ του SCR ή του TRIAC.

Οι τάσεις παλμών αιχμής “spikes” που προέρχονται από την έξοδο του κυκλώματος unijunction, απομονώνονται και μεταδίδονται μέσω του optocoupler (οπτικού απομονωτή) στην πύλη έναυσης του TRIAC, το οποίο διεγείρεται με τον πρώτο παλμό έναυσης που δέχεται και παραμένει διεγερμένο μέχρι το τέλος της κάθε ημιπεριόδου της τροφοδοσίας, έως ότου να διεγερθεί εκ νέου στην επόμενη ημιπερίοδο μεταβάλλοντας την γωνία έναυσης κάθε φορά, ανάλογα με το φορτίο που ασκείται στον κινητήρα, ώστε να διατηρηθούν σταθερές οι στροφές του, δηλαδή αυξάνει η μειώνει το συνολικό το  $v_{rms}$  που τροφοδοτείται ο κινητήρας ανάλογα με το φορτίο.

Γενική περιγραφή λειτουργίας:

Λόγω των οπών του διάτρητου δίσκου που περιστρέφεται ανάμεσα από τον πομπό – δέκτη, δημιουργούνται κάποιοι παλμοί, συχνότητας ανάλογης με αυτή της περιστροφής του κινητήρα. Αυτοί οι παλμοί διεγείρουν τον μονοσταθή πολυδονητή 555 από όπου προκύπτουν καθαροί τετραγωνικοί παλμοί ίδιας συχνότητας. Με αυτούς τους παλμούς τροφοδοτείται η είσοδος του μετατροπέα συχνότητας σε τάση 1m331, και στην έξοδο του εμφανίζεται μια γραμμική τάση συνεχούς ρεύματος που η τιμή της μεταβάλλεται ανάλογα με την συχνότητα των παλμών εισόδου. Έπειτα, αυτή η τάση πολώνει το τρανζίστορ bc557 ελέγχοντας έτσι το ρεύμα της βάσης του ηρη τρανζίστορ bc557, με αυτή τη συνδεσμολογία έχει κατασκευαστεί ουσιαστικά μια αντίσταση ελεγχόμενη από τάση, με αποτέλεσμα να ρυθμίζουμε έτσι την ταχύτητα φόρτισης του πυκνωτή στο κύκλωμα του  $u_{jt}$ , επηρεάζοντας τελικώς την χρονική στιγμή εμφάνισης του πρώτου παλμού που διεγείρει τον διακόπτη ισχύος και άρα το VRMS που καταλήγει στον κινητήρα. Το παραπάνω κύκλωμα αποτελεί έναν κλειστό βρόγχο αυτόματου ελέγχου, με αποτέλεσμα να διατηρεί τον αριθμό των στροφών που του έχουν τεθεί σταθερό ανεξάρτητα από το φορτίο.

Συνοψίζοντας, εάν το σύστημα μας ανιχνεύσει πτώση στροφών λόγω φορτίου πάνω στον κινητήρα, τότε με την διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω, η γωνία έναυσης του διακόπτη ισχύος θα ελαττωθεί και αρά θα αυξηθεί η ενεργός τάση vrms, που παρέχεται στον κινητήρα.

## Κεφάλαιο 4

### Πειραματική υλοποίηση του συστήματος και υπολογισμός των στοιχείων του.

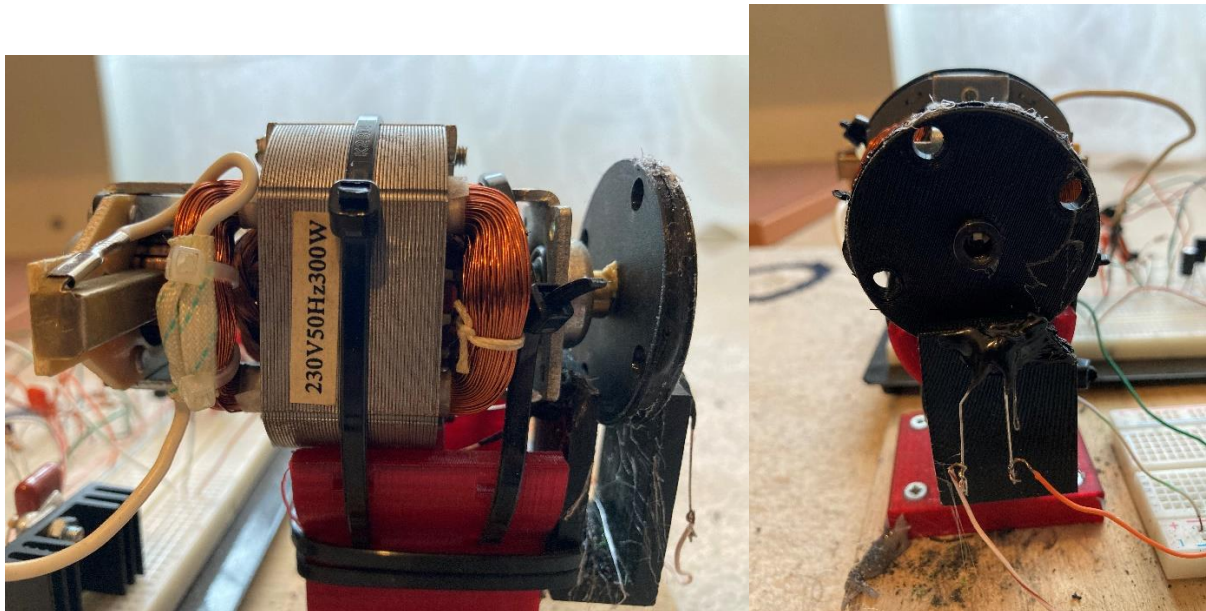
Για την πειραματική υλοποίηση του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε ένας μονοφασικός κινητήρας AC 230V 50hz ισχύος 300W , με προσαρμοσμένο στον άξονα του έναν διάτρητο δίσκο καθώς και μιας βάσης όπου έχει τοποθετηθεί αντικριστά το σύστημα του οπτικού αισθητηρίου πομπού δέκτη. Ο δίσκος, η βάση κινητήρα και η βάση του αισθητηρίου έχουν κατασκευαστεί μέσω εκτυπωτή τριών διαστάσεων.

Ο κινητήρας με βάση τα χαρακτηριστικά του . 2 πόλοι 50hz 230V , έχει μεγιστες στροφές χωρίς φορτίο περίπου 3000rpm.

Ο διάτρητος δίσκος θα μπορούσε να έχει μια οπή όμως επιλέχθηκε να έχει 4 οπές για να υπάρχει καλύτερη ακρίβεια στις μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής.

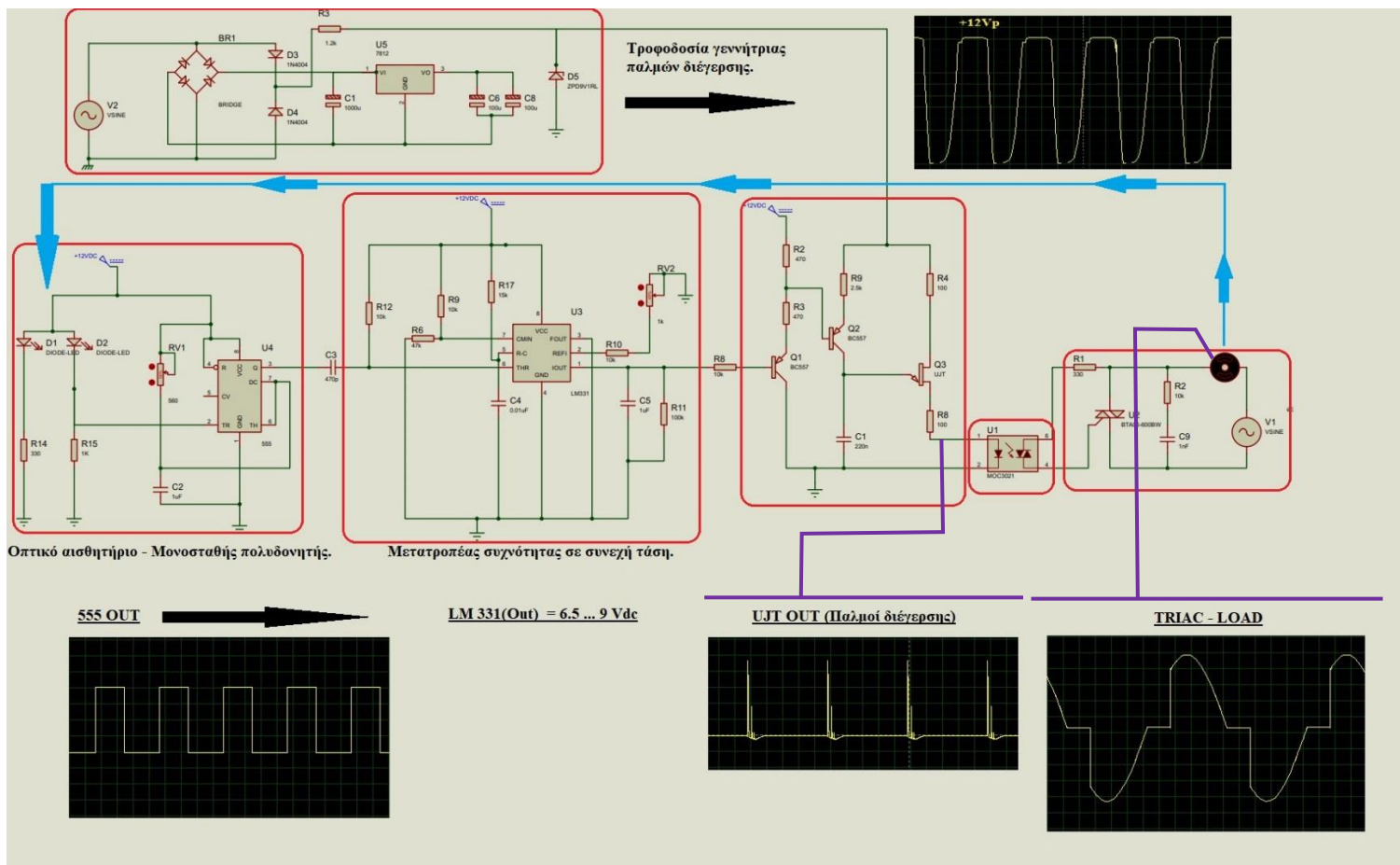
Οι βαθμίδες του συστήματος :

- Αισθητήριο.
- LM 555 σε συνδεσμολογία μονοσταθούς πολυδονητή.
- LM331 Frequency to Voltage converter
- Σύστημα γεννήτριας παλμών.
- Σύστημα οδήγησης παλμών.
- Φορτίο - Κινητήρας



Εικόνα 22. Κινητήρας με Αισθητήριο.

## 4.1 Γενικό Κύκλωμα :



Εικόνα 23. Γενικό κύκλωμα.

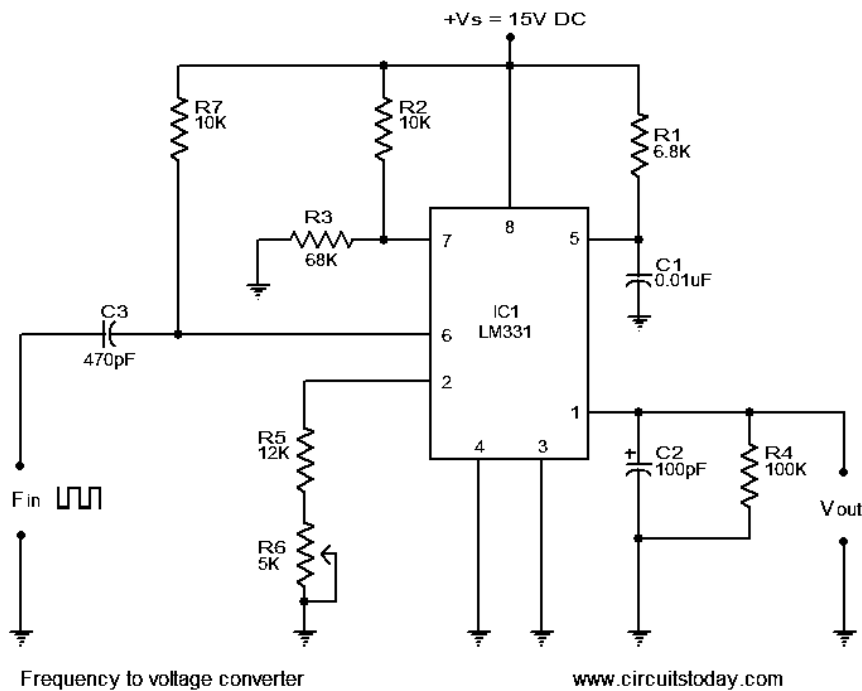
## 4.2 Μετατροπείας συχνότητας σε τάση (frequency to Voltage).

Ο κινητήρας ρυθμίστηκε σε λειτουργία με μια συγκεκριμένη ταχύτητα στροφών αναφοράς , η οποία εξυπηρετεί τις ανάγκες του πειράματος μας καλύτερα τόσο για την πρακτική υλοποίηση του ,όσο και για την παρατηρησιμότητα των μεταβολών που θέλουμε να μελετήσουμε. Σε αυτή την ταχύτητα με τον συγκεκριμένο δίσκο, η συχνότητα που μετρήθηκε στο αισθητήριο ήταν περίπου 1.6 khz.

Οι παλμοί του αισθητηρίου μας όμως έχουν την μορφή «ακίδας» διότι κατά την περιστροφή της οπής , η οπτική επαφή του πομπού με τον δέκτη δεν είναι στιγμιαία, με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να μην έχει καλή και σταθερή απόκριση στην έξοδο δημιουργώντας αστάθεια. Έτσι, επιλέξαμε οι παλμοί του αισθητηρίου να εισάγονται πρώτα σε έναν μονοσταθί πολυδονητή 555 παράγοντας έτσι στην έξοδο τετραγωνικούς παλμούς ανάλογης συχνότητας και έπειτα να τροφοδοτούν το κύριο αισθητήριο παρέχοντας σταθερή τάση εξόδου.

Εδώ να σημειωθεί ότι , τα επιθυμητά όρια τάσης εξόδου του LM331 που συνδέεται στο κύκλωμα γεννήτριας παλμών που ακολουθεί, προέκυψαν από την μελέτη του κυκλώματος αυτού ώστε να

ανταποκρίνεται ιδανικότερα με τις ανάγκες του πειράματος. Η ανάλυση του και οι υπολογισμοί θα περιγράφουν στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 24.LM331[16]

$$V_{out} = \frac{R4}{R5+R6} \times R1 \times C1 \times 2.09 \times fin \quad (7)$$

Στην περίπτωση μας χρειαζόμαστε η έξοδος για την δεδομένη συχνότητα να είναι έως 5V περίπου. Δεδομένου ότι όλα τα στοιχεία παραμένουν σταθερά και η τάση εξόδου εξαρτάται από το ποτενσιόμετρο στον ακροδέκτη 2, τότε λύνουμε ως προς το **Rpot** :

$$(R5 + R6) = R_{pot}$$

$$R_{pot} = \frac{R4 \times R1 \times C1 \times 2.09 \times fin}{V_{out}} \quad (8) \Rightarrow$$

$$R_{pot} = \frac{100k \times 6.8k \times 0.01u \times 2.09 \times 1.6k}{5} \Rightarrow$$

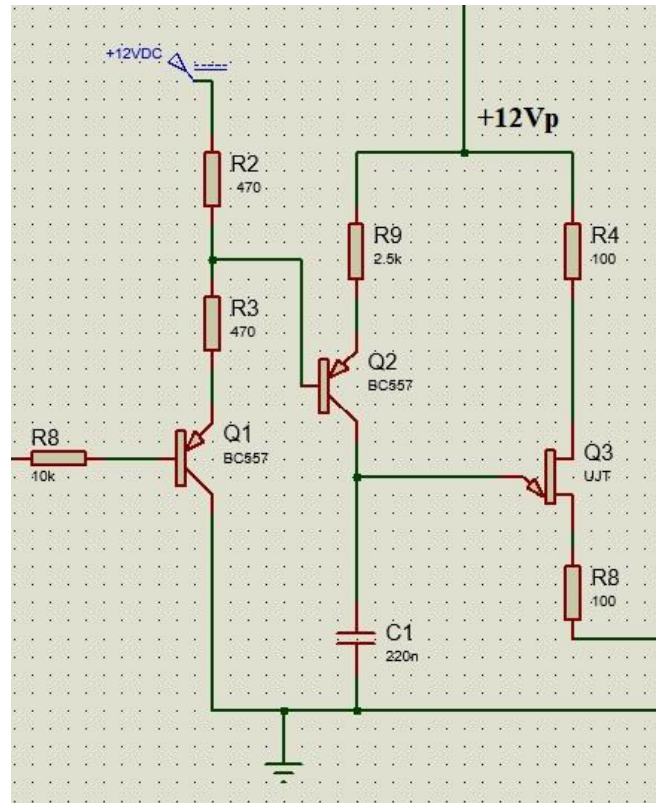
$$R_{pot} = 4.54k\Omega$$

Επομένως τοποθετούμε ένα ποτενσιόμετρο αντίστασης έως 10KΩ ρυθμισμένο στη τιμή 2.34k σε σειρά με μια αντίσταση 2.2kΩ για ασφάλεια , και αναλόγως των συνθηκών έχουμε την δυνατότητα να μεταβάλλουμε την έξοδο του κυκλώματος από 1.86V έως 10.33V.

### 4.3 Γεννήτρια παλμών διέγερσης

Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία αποτελεί ουσιαστικά ένα κύκλωμα Unijunction μεταβαλλόμενο από μια «αντίσταση» ελεγχόμενη από τάση. Πιο συγκεκριμένα , το τρανζίστορ Q1 bc557 πολώνει την βάση

του pnp transistor Q1 bc557 ανάλογα με την τάση που του εφαρμόζεται στη βάση του. Επειδή το 557 είναι pnp , το ρεύμα του συλλέκτη του είναι αντιστρόφως ανάλογο με την μεταβολή της τάσης στην βάση του. Δηλαδή , όταν αυξάνεται η τάση στη βάση του bc547 αυξάνεται το ρεύμα στη βάση του bc557 με αποτέλεσμα το ρεύμα που διαρρέει τον συλλέκτη να μειώνεται. Η παραπάνω αντιστρόφως ανάλογη διαδικασία, εξυπηρετεί την μεταβολή της ταχύτητας φόρτισης του πυκνωτή, έτσι ώστε ο παλμός διέγερσης που προκύπτει στη βάση 2 (R4) του UJT να συμβαίνει σε ελεγχόμενη χρονική στιγμή συγχρονισμένη με την πηγή τροφοδοσίας.



Εικόνα 25. Σύστημα γεννήτριας παλμών με το UJT (Q3)

Ακολουθούν οι υπολογισμοί των στοιχείων :

Η τάση στη βάση του Q1 bc557 που προέρχεται από τον μετατροπέα f - V , είναι μεταξύ 6.5 - 8.4 V ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής.

**Q1 BC557**

Επιλέγω την τάση:

$$VB(Q1) = 8.4V$$

$$VEq1 = 8.4 + 0.7 = 9.2V$$

$$V(R2 - R3) = Vcc - VEq1 = 12 - 9.1V = 2.9 \cong 3v$$

Επιλέγω ρεύμα λειτουργίας συλλέκτη εκπομπού :

$$IEQ1 \cong 3mA$$

Άρα προκύπτει ότι :

$$R2 + R3 = \frac{V(R2-R3)}{IEQ1} = \frac{2.9}{3 \times 10^{-3}} = 1k\Omega$$

(πρακτικά επιλέγονται δύο αντιστάσεις των 470Ω)

### Q2 BC557- 2N2646 (UJT)

Η περίπτωση επιθυμητής λειτουργίας που εξετάζεται , είναι ο παλμός διέγερσης της γωνίας έναυσης του διακόπτη ισχύος να συμβαίνει στο 5° ms της περιόδου της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα ώστε να λειτουργεί με διαχειρίσιμη ταχύτητα περιστροφής , στο μισό Vrms δηλαδή της μέγιστης τάσης λειτουργίας για τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής. Επομένως ,ο υπολογισμός των στοιχείων θα γίνει με βάση την λειτουργία με γωνία έναυσης του διακόπτη ισχύος τα 5 ms.

Οι παλμοί διέγερσης που αναφέραμε προηγουμένως δημιουργούνται με την αποφόρτιση του πυκνωτή στο κύκλωμα UJT(2n2646). Μεταβάλλοντας το ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή, μεταβάλλεται η περίοδος λειτουργίας του κύκλου φόρτισης – αποφόρτισης του. Δημιουργώντας έτσι παλμούς διέγερσης «νωρίτερα» ή «αργότερα» κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας. Ρυθμίζοντας έτσι το συνολικό VRMS που τροφοδοτεί τον κινητήρα.

Η σχέση (2) , ανταποκρίνεται στο βασικό κύκλωμα ujt, στο παρών κύκλωμα στο κύκλωμα συμμετέχει και ένα transistor το BC557 σαν πηγή ρεύματος. Με την σχέση (2) λοιπόν θέλουμε να υπολογίσουμε το μόνο το ελάχιστο ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή ώστε να επιτύχουμε παλμό διέγερσης κατά την αποφόρτιση του στα 5ms.

Η αντίσταση R4 επιλέγεται στα 100Ω σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή.

Η αντίσταση R8 επιλέγεται επίσης στα 100Ω έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερη αποφόρτιση του πυκνωτή του συστήματος < 0.1ms.

$$T = R9 \times C1 \times \ln\left(\frac{1}{1-n}\right) (2) \Rightarrow$$

$$0.5m = R9 \times 220n \times 0.9 \Rightarrow$$

$$R9 = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{220 \times 10^{-9}} \Rightarrow$$

$$R9 = 2.5K\Omega \text{ (κατόπιν ρύθμισης)}$$

$$IEQ2 = \frac{VCC - 11.4}{2.5K} = 0.24mA \text{ (ρεύμα φόρτισης πυκνωτή)}$$

$$Ib1b2(ujt) = 1.5mA$$

$$\frac{VCC}{Ib1b2} \cong 8K\Omega \Rightarrow RBB = 7k\Omega \text{ (απο datasheet)} + R8 + R9$$

### 4.4 Δικτύωμα προστασίας υπέρτασης snubber – TRIAC.

Το δικτύωμα RC snubber χρησιμοποιεί μια μικρή αντίσταση (R) σε σειρά με έναν μικρό πυκνωτή (C). Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταστολή της ταχείας αύξησης της τάσης σε ένα θυρίστορ , αποτρέποντας τη λανθασμένη ενεργοποίηση του θυρίστορ. Αυτό το κάνει περιορίζοντας

τον ρυθμό αύξησης της τάσης (dV/dt) κατά μήκος του θυρίστορ σε μια τιμή που δεν θα την ενεργοποιήσει. Ένα κατάλληλα σχεδιασμένο RC snubber μπορεί να χρησιμοποιηθεί με φορτία DC ή AC. Αυτό το είδος snubber χρησιμοποιείται συνήθως με επαγωγικά φορτία όπως ηλεκτρικούς κινητήρες. Η τάση σε έναν πυκνωτή δεν μπορεί να αλλάξει στιγμιαία, επομένως ένα φθίνον μεταβατικό ρεύμα θα ρέει μέσω αυτού για ένα κλάσμα του δευτερολέπτου, επιτρέποντας στην τάση στον διακόπτη να αυξάνεται πιο αργά όταν ανοίγει ο διακόπτης. Ο προσδιορισμός της ονομαστικής τάσης μπορεί να είναι δύσκολος λόγω της φύσης των μεταβατικών κυματομορφών και μπορεί να οριστεί απλώς από την ονομαστική ισχύ των εξαρτημάτων snubber και την εφαρμογή. Τα RC snubbers μπορούν να κατασκευαστούν διακριτικά και είναι επίσης κατασκευασμένα ως ένα μόνο εξάρτημα.[20]

Ο διακόπτης ισχύος TRIAC , έχει επιλεχθεί να είναι ο BTB-800CW , διότι σύμφωνα με τον κατασκευαστή το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας είναι τα 16 A και 800V. Στην παρούσα εφαρμογή, το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας έχει υπολογιστεί στα 1.25 A και η μέγιστη τάση λειτουργίας τα 230V , επομένως τα συγκεκριμένα στοιχεία καλύπτουν τα περιθώρια ασφαλείας ως εξής :

$$I_{max} = \frac{W_{max}}{V_{max}} = \frac{300}{230} = 1.25A$$

$$V(\text{αντοχής διακόπτη}) = 230 * 2 = 460V \text{ τουλάχιστον.}$$

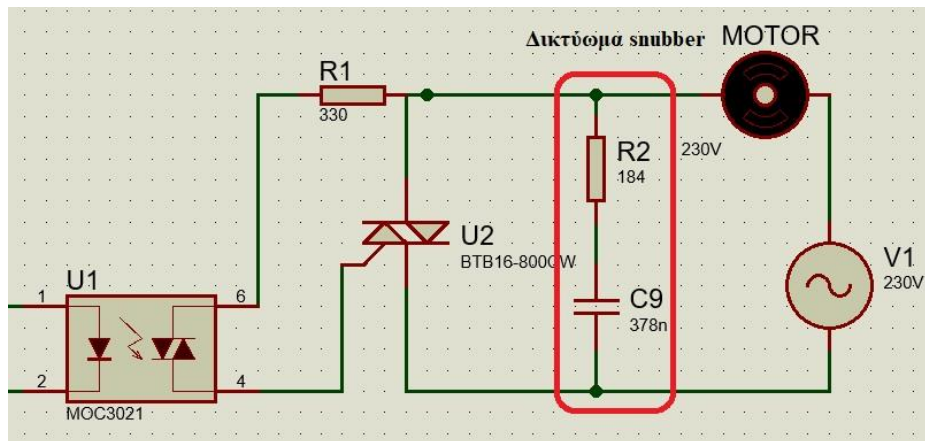
$$I(\text{αντοχής διακόπτη}) = 1.25A * 1.5 = 1.875A \text{ τουλάχιστον.}$$

Υπολογισμός δικτύου snubber :

$$I_{max} = 1.25A$$

$$R_{sn}(R2) = \frac{230V}{1.25A} = 184\Omega$$

$$C_{sn}(c9) = \frac{1}{230^2 \times 50hz} = 378nF$$

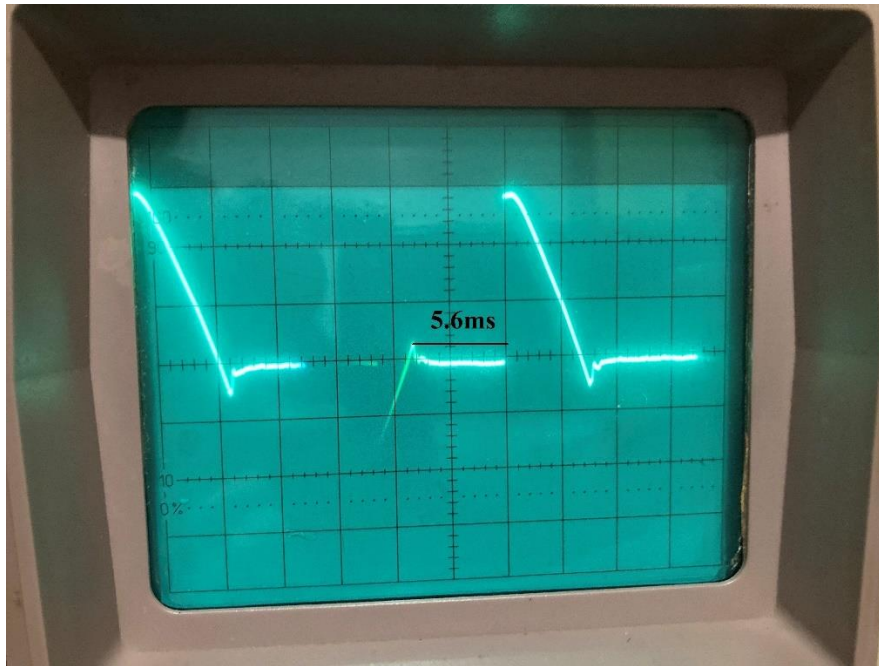


Εικόνα 26. Δικτύωμα Snubber.

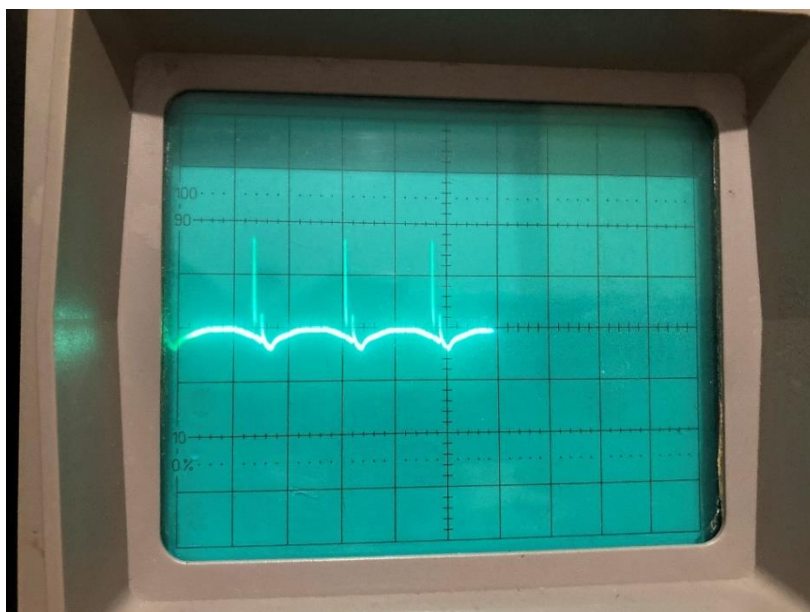
#### 4.5 Συνολική λειτουργία του Κυκλώματος.

Έστω ότι έχουμε θέσει τον κινητήρα σε μια ομαλή και διαχειρίσιμη ταχύτητα περιστροφής με συχνότητα 1.7 kHz.

Εκείνη τη στιγμή αυτή η συχνότητα δημιουργεί μια τάση της τάξεως των 8.4V περίπου στην βάση του Q1 bc557 , δηλαδή στην είσοδο της γεννήτριας παλμών έναυσης. Αυτό δημιουργεί με την διαδικασία που αναφέραμε προηγουμένως ,ένα ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή που τον αναγκάζει να φορτιστεί και να αποφορτιστεί (δηλαδή να εμφανιστεί η τάση αιχμής (spike) ) με μια καθυστέρηση τέτοια ώστε το TRIAC να διεγερθεί περίπου 5.6 ms μετά την έναρξη της θετικής Ημπεριόδου.

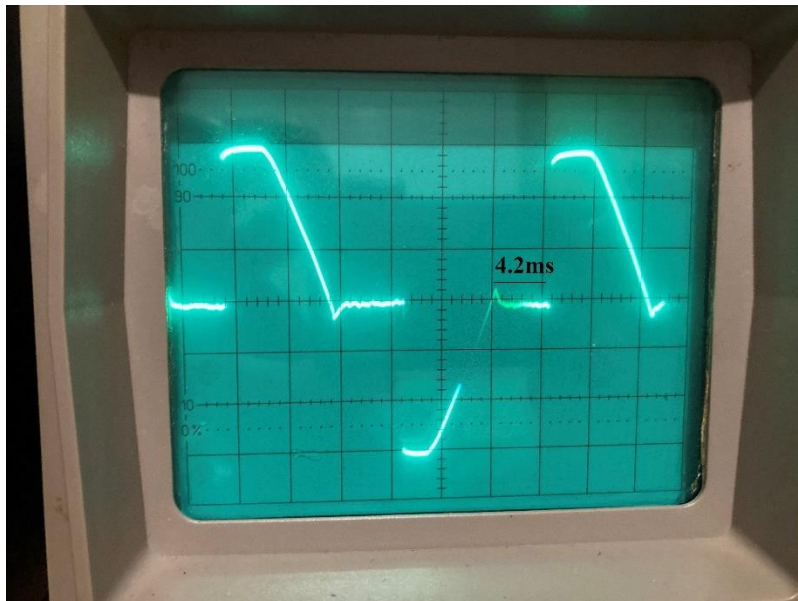


**Εικόνα 27.** Γωνία έναυσης με καθυστέρηση 5.6 ms

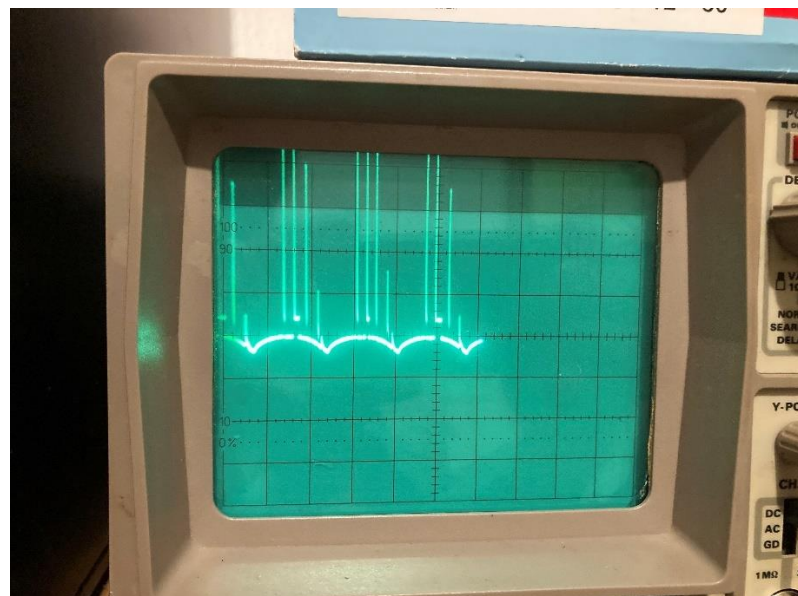


**Εικόνα 28.** Παλμοί έναυσης με καθυστέρηση 5.6 ms

Έστω ότι κατά την περιστροφή του κινητήρα με την ταχύτητα που του έχουμε θέσει, του εφαρμόζουμε ένα φορτίο με αποτέλεσμα την πτώση των στροφών του. Εκείνη τη στιγμή η τάση που προκύπτει από τον lm331 θα ελαττωθεί μειώνοντας την τάση στην βάση του Q1 bc557 άρα και του ρεύματος στο Q2 557, έτσι θα αυξήσει το ρεύμα του συλλέκτη του άρα και του εκπομπού του που φορτίζει τον πυκνωτή. Επομένως ο πυκνωτής θα φορτίσει γρηγορότερα και άρα θα αποφορτιστεί νωρίτερα σε σχέση με τη προηγούμενη κατάσταση, δημιουργώντας έναν παλμό διέγερσης που οδηγείται στον διακόπτη ισχύος και τον διεγείρει νωρίτερα. Έτσι, το TRIAC θα διεγερθεί νωρίτερα με αποτέλεσμα η γωνία έναυσης να «εμφανιστεί» νωρίτερα και το τελικό VRMS του κινητήρα να αυξηθεί επαναφέροντας και διατηρώντας περίπου τις αρχικές στροφές του. Ενδεικτικά, ακολουθεί η περίπτωση που του έχει εφαρμοστεί φορτίο σε σχέση με πριν :



Εικόνα 29. Γωνία έναυσης με καθυστέρηση 4.2 ms λόγω φορτίου.

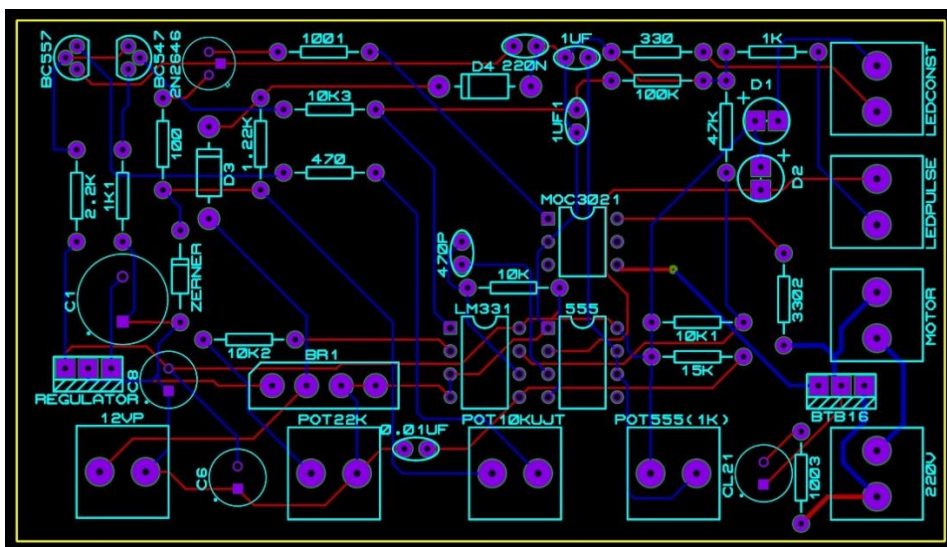


Εικόνα 30. Παλμοί διέγερσης με φορτίο καθυστέρησης 4.2 ms

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι , το σύστημα έχει μια μικρή απόκλιση της τάξεως έως 10% περίπου στη διατήρηση του αριθμού των στροφών του κινητήρα. Δηλαδή , σε μία ορισμένη ταχύτητα περιστροφής όταν ασκηθεί φορτίο , ή ταχύτητα περιστροφής θα ελαττωθεί ελαφρώς και θα διατηρηθεί σε ένα χαμηλότερο επίπεδο , όπου χωρίς το συγκεκριμένο σύστημα ο κινητήρας θα είχε σταματήσει εντελώς. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία του μετατροπέα συχνότητας σε τάση όπου απαιτεί μεγαλύτερες μεταβολές στην συχνότητα περιστροφής ώστε να μεταβληθεί η τάση στην έξοδο του αισθητά. Για το συγκεκριμένο ζήτημα προτείνεται εναλλακτική μέθοδος στο κεφάλαιο με τις βελτιώσεις.

## 4.6 Σχεδιασμός πλακέτας PCB

Για την σχεδίαση της πλακέτας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα proteus 8.12.



Εικόνα 31. Πλακέτα pcb.



Εικόνα 32. Πλακέτα PCB 3D view.

## Κεφάλαιο 5

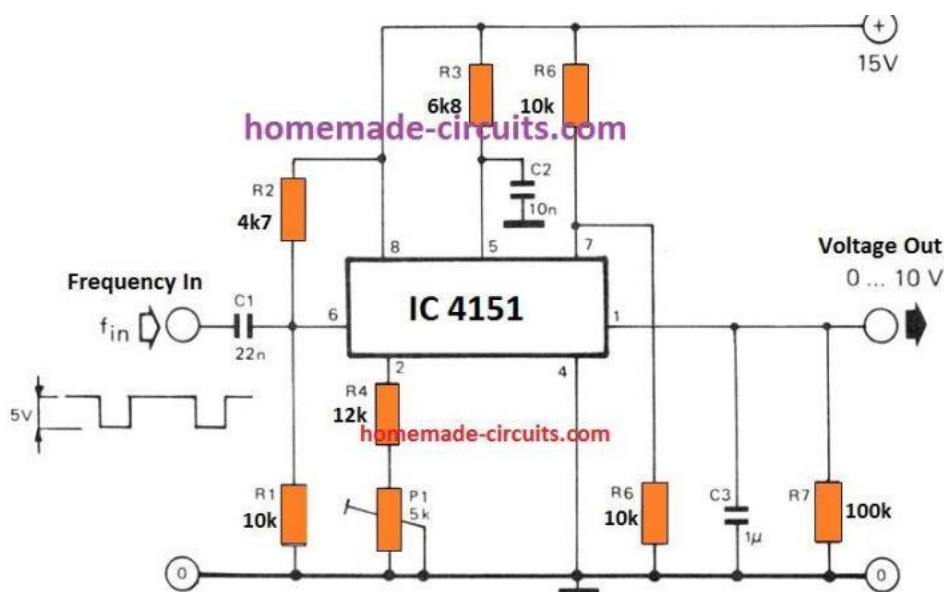
### Εναλλακτικές μέθοδοι υλοποίησης και βελτιώσεις.

Η παρούσα εργασία επιλέχθηκε να υλοποιηθεί αποκλειστικά με αναλογικά διακριτά στοιχεία. Ωστόσο, θα μπορούσε να υλοποιηθεί και διαφορετικά αντικαθιστώντας κάποια συγκεκριμένα εξαρτήματα ή χρησιμοποιώντας μια τελείως διαφορετική μέθοδο. Παρακάτω, αναλύονται κάποιες εναλλακτικές προτάσεις υλοποίησης.

#### 5.1 Μετατροπείς συχνότητας σε τάση (Frequency to voltage converter)

Στην συγκεκριμένη βαθμίδα του συστήματος δίνεται η δυνατότητα επιλογής στοιχείων, τα οποία ανάλογα με τις παραμέτρους της εφαρμογής που προορίζεται να επιτελέσει το σύστημα (ευαισθησία, τάση λειτουργίας κλπ.) επιλέγονται κατάλληλα.

- IC 4151



Εικόνα 33.F-V IC 4151[16]

Αυτό το κύκλωμα μετατροπέα τάσης συχνότητας που χρησιμοποιεί ο IC 4151 χαρακτηρίζεται από τον εξαιρετικά γραμμικό λόγο απόκρισης του. Με τις υποδεικνυόμενες τιμές εξαρτημάτων, η αναλογία μετατροπής του κυκλώματος αναμένεται να είναι περίπου 1 V/kHz.

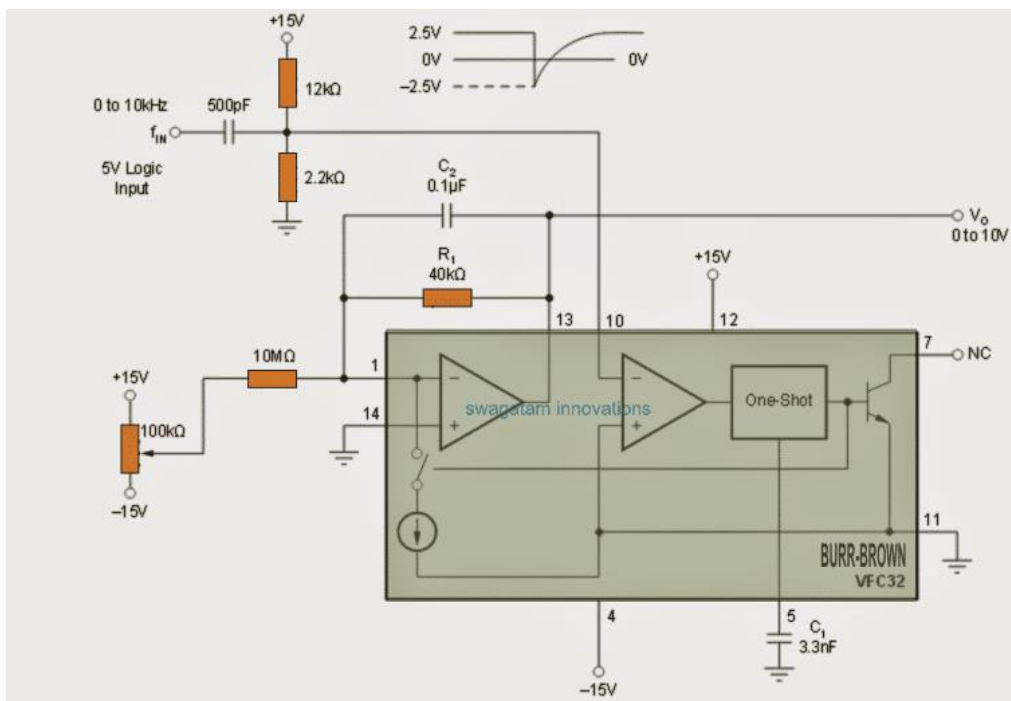
## Κεφάλαιο 5

Όταν χρησιμοποιείται μια τάση συνεχούς ρεύματος στην είσοδο με συχνότητα 0 Hz, η έξοδος παράγει μια αντίστοιχη τάση 0 V. Ο λόγος μετατροπής στην έξοδο δεν επηρεάζεται ποτέ από τον κύκλο λειτουργίας της τετραγωνικής συχνότητας εισόδου.

Αλλά, εάν εφαρμόζεται μια συχνότητα ημιτονοειδούς κύματος στην είσοδο, σε αυτήν την περίπτωση το σήμα πρέπει να περάσει μέσω ενός Schmitt trigger πριν το εισαγάγετε στην είσοδο IC 4151 ώστε ο παλμός να γίνει τετραγωνικός. [16]

$$V(\text{out}) / f(\text{in}) = R3 \times R7 \times C2 / 0.486(R4 + P1) \times [V/\text{Hz}] \quad (9) \quad T1 = 1.1 \times R3 \times C2 \quad (10)$$

- VFC 32



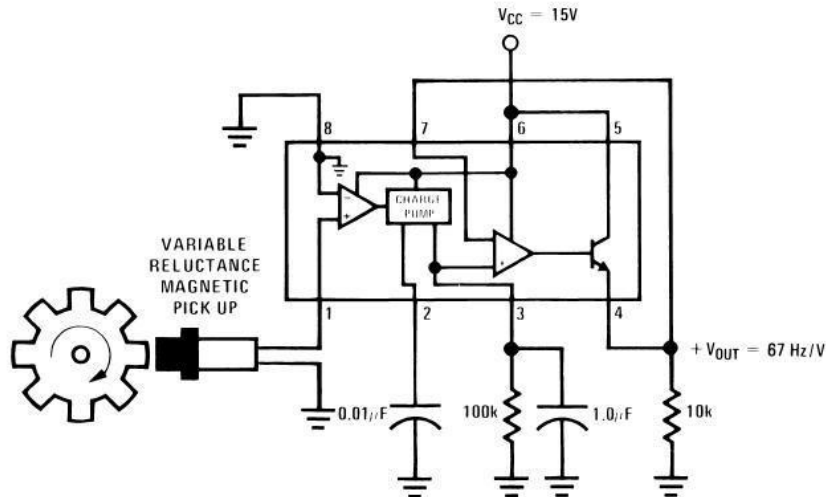
Εικόνα 34. VFC 32 CIRCUIT.[16]

Το όριο εισόδου τάσης αναφοράς που έχει οριστεί για τον συγκριτή ανιχνευτή είναι περίπου  $-0,7 \text{ V}$ . Σε περίπτωση που οι εισόδους συχνότητας μπορεί να είναι χαμηλότερη από  $5 \text{ V}$ , ο διαιρέτης τάσης  $R6/R7$  μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα για αλλαγή του επιπέδου αναφοράς και για τη δυνατότητα σωστής ανίχνευσης των εισόδων συχνότητας χαμηλής στάθμης από το opamp.

Ο  $C2$  γίνεται υπεύθυνος για το φιλτράρισμα και την εξομάλυνση της κυματομορφής της τάσης εξόδου, οι μεγαλύτερες τιμές του  $C2$  βοηθούν στον καλύτερο έλεγχο των κυματισμών τάσης στην παραγόμενη έξοδο, αλλά η απόκριση είναι αργή στις ταχέως μεταβαλλόμενες συχνότητες εισόδου, ενώ οι μικρότερες τιμές του  $C2$  προκαλούν κακή διήθηση αλλά προσφέρουν γρήγορη απόκριση και προσαρμογή με τις ταχέως μεταβαλλόμενες συχνότητες εισόδου. [16]

Η τιμή R1 θα μπορούσε να τροποποιηθεί για την επίτευξη ενός προσαρμοσμένου εύρους τάσης εξόδου εκτροπής πλήρους κλίμακας με αναφορά σε ένα δεδομένο εύρος συχνοτήτων εισόδου πλήρους κλίμακας.[16]

- LM2907



Εικόνα 35.LM2907[15]

Οι συσκευές LM2907 και LM2917 είναι μετατροπείς συχνότητας σε τάση με υψηλό κέρδος ορ ενισχυτής που έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σαν ρελέ, λαμπτήρα ή άλλο φορτίο όταν η συχνότητα εισόδου φτάνει ή υπερβαίνει το α επιλεγμένο ποσοστό. Το ταχύμετρο χρησιμοποιεί μια αντλία φόρτισης που προσφέρει διπλασιασμό συχνότητας για προστασία lowripple, πλήρους εισόδου σε δύο εκδόσεις (8-pin LM2907 και LM2917) και η έξοδος του μεταβάλλεται σε γείωση για είσοδο μηδενικής συχνότητας. Ο ενισχυτής λειτουργίας είναι πλήρως συμβατός με το στροφόμετρο και έχει ως έξοδο ένα floating τρανζίστορ. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει είτε ένα φορτίο γείωσης είτε παροχής έως 50 mA. Ο συλλέκτης μπορεί να ληφθεί πάνω από VCC μέχρι α μέγιστο VCE 28 V. Οι δύο βασικές διαμορφώσεις που προσφέρονται περιλαμβάνουν ένα 8-pin chip με είσοδο στροφόμετρου γείωσης και μια εσωτερική σύνδεση μεταξύ του στροφόμετρου την έξοδο και την μη αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή. Αυτή η έκδοση είναι κατάλληλη για σταθερή ταχύτητα ή ενδιάμεσες συχνότητες στη τάση που του εφαρμόζεται.[16]

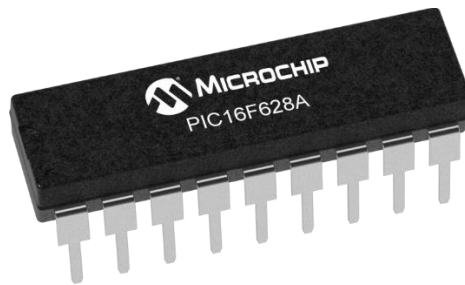
## 5.2 Αισθητήριο ανίχνευσης στροφών.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σαν αισθητήριο στροφών για την δημιουργία παλμών ένα υπέρυθρο οπτικό αισθητήριο πομπού δέκτη

Εξίσου αποτελεσματικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ένα μαγνητικό σύστημα, δηλαδή θα μπορούσε ένας μαγνήτης να εφαρμοστεί πάνω στον δίσκο σε τέτοιο σημείο ώστε κατά τη διάρκεια περιστροφής να «περνάει» από έναν σταθερό μαγνήτη δημιουργώντας έτσι παλμούς.

## 5.3 Διαφορετικές μέθοδοι ελέγχου

### 5.3.1 Έλεγχος μέσω microcontroller



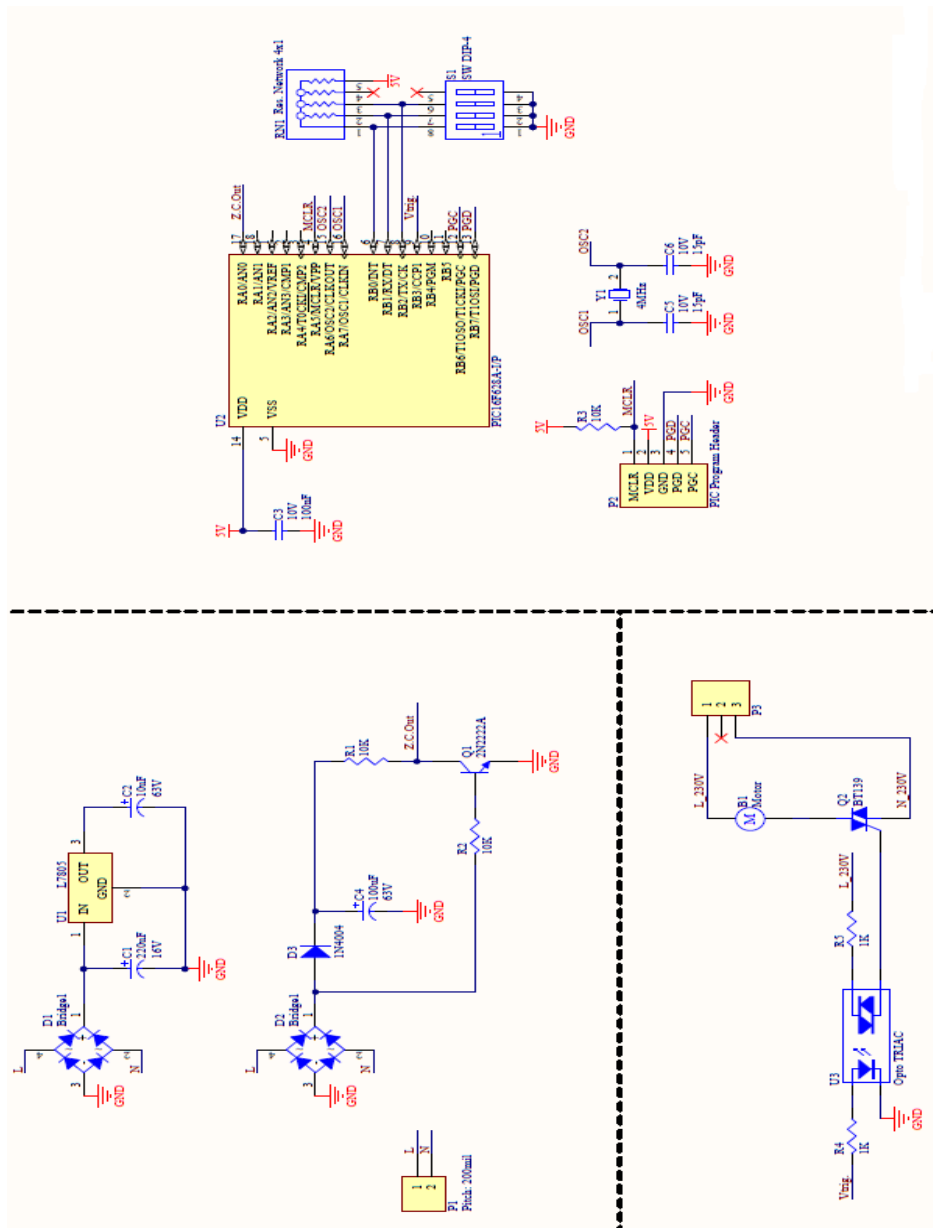
**Εικόνα 36.** PIC16F628A.[17]

Για την συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου στροφών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι controllers με διάφορα κριτήρια επιλογής ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Ενδεικτικά, αναφέρεται ο, λόγω της δημοφιλίας του, του χαμηλού κόστους, τις δυνατότητες για in-circuit programming, και της μεγάλης διαθεσιμότητας σε πληροφορίες και προγράμματα που υπάρχει. Ο PIC16F628A είναι ένας μικροελεγκτής με 18 ακροδέκτες, χαμηλού κόστους, υψηλής απόδοσης, τεχνολογίας CMOS, πλήρως στατικός και 8-bit. Διαθέτει flash memory και χρησιμοποιεί την αναβαθμισμένη αρχιτεκτονική RISC. Έχει προηγμένα χαρακτηριστικά πυρήνα, stack 8 επιπέδων, και πολλαπλές εσωτερικές και εξωτερικές πηγές για την χρήση τους σε διακοπές (interruptions). Περιέχει δύο ξεχωριστούς διαύλους, για εντολές και δεδομένα. Οι εντολές μπορούν να εκτελεστούν σε έναν κύκλο εργασίας, εκτός από τις διακλαδώσεις (branches) οι οποίες θέλουν δύο.[17]

Συνολικά, 35 εντολές είναι διαθέσιμες. Ο PIC16F628A μπορεί να επιτύχει μια συμπίεση προγράμματός 2:1 και μια αναβάθμιση της ταχύτητας 4:1 σε σχέση με τους άλλους 8-bit μικροελεγκτές της κατηγορίας τους. Διαθέτουν ολοκληρωμένα χαρακτηριστικά για να μειώσουν εξωτερικές παραβολές, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας, την κατανάλωση τάσης και αυξάνοντας, την αξιοπιστία του συστήματος.[17]

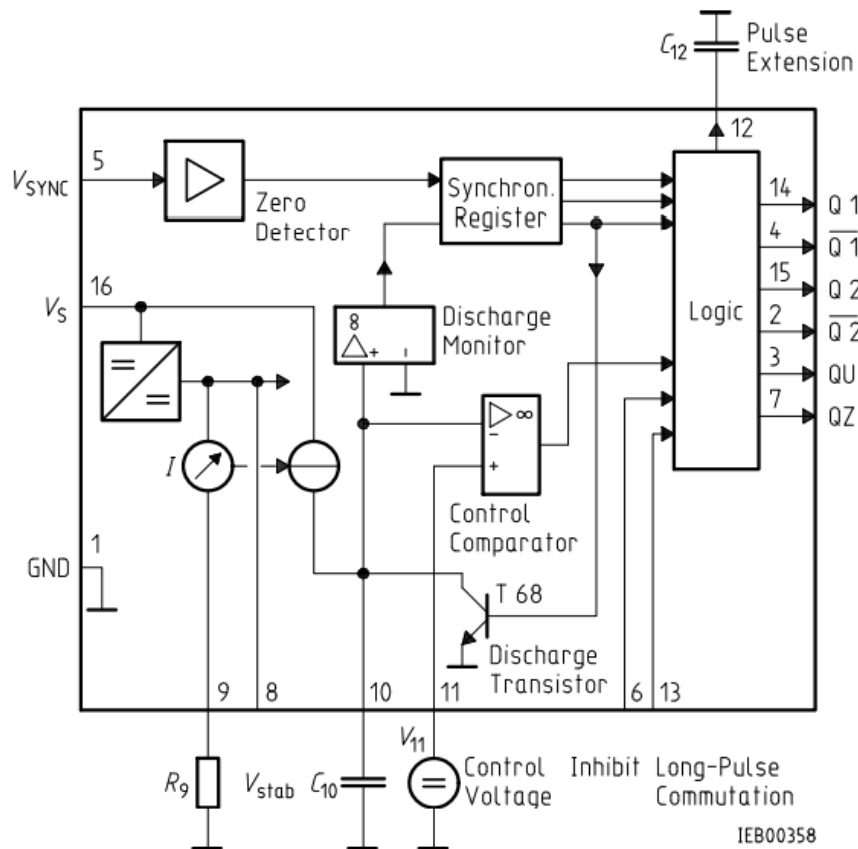
Ο PIC16F628A έχει 8 ρυθμίσεις ταλαντωτή. Ο ταλαντωτής RC είναι μια χαμηλού κόστους λύση. Ο ταλαντωτής LP ελαχιστοποιεί την κατανάλωση τάσης, ο XT είναι ένας τυπικός κρύσταλλος, και ο INTOSC είναι ένας ανεξάρτητος, διπλής ταχύτητας, εσωτερικός ταλαντωτής ακριβείας. Η μέθοδος HS απευθύνεται σε κρυστάλλους υψηλής ταχύτητας (High-Speed crystal). Η κατάσταση EC χρησιμοποιείται όταν έχουμε εξωτερικό ταλαντωτή. Η κατάσταση Sleep (power-down) προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας. Ο χρήστης μπορεί να “ξυπνήσει” τον μικροελεγκτή από την κατάσταση sleep με διάφορα εξωτερικά interrupts, εσωτερικά interrupts ή και resets. Ένας υψηλής αξιοπιστίας μετρητής Watchdog (Watchdog Timer), με τον δικό του ταλαντωτή RC, προσφέρει προστασία ενάντια στο κλείδωμα του λογισμικού. Ο μικροελεγκτής αυτός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, από φορτιστές μπαταρίας ως και σε χαμηλής κατανάλωσης ασύρματους αισθητήρες. Η τεχνολογία

μνήμης flash, κάνει τον χειρισμό και την προσαρμογή προγραμμάτων εξαιρετικά γρήγορα και βολικά. Το μικρό του μέγεθος επίσης το κάνει ιδανικό σε ανάλογες εφαρμογές.[17].



Εικόνα 37. Συνδεσμογία κυκλώματος με microcontroller. [17]

## 5.3.2 Φασικός έλεγχος με το ολοκληρωμένο TCA 785



Εικόνα 38. TCA 785.[21]

Το TCA 785 ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου φάσης, προορίζεται για τον έλεγχο θυρίστορ, Τριας και τρανζίστορ. Ο παλμός διέγερσης μπορεί να μετατοπιστεί εντός γωνίας φάσης μεταξύ  $0^\circ$  και  $180^\circ$ . Οι τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν κυκλώματα μετατροπών, ελεγκτές AC και ελεγκτές τριφασικού ρεύματος.

Το σήμα συγχρονισμού λαμβάνεται μέσω μιας υψηλής ωμικής αντίστασης από την τάση γραμμής (τάση  $V_5$ ). Ένας ανιχνευτής μηδενικής τάσης αξιολογεί τις μηδενικές διόδους και τις μεταφέρει στο μητρώο συγχρονισμού. Αυτός ο καταχωρητής συγχρονισμού ελέγχει μια γεννήτρια ράμπας, ο πυκνωτής  $C_{10}$  της οποίας είναι φορτισμένος από ένα σταθερό ρεύμα (που καθορίζεται από το  $R_9$ ). Εάν η τάση ράμπας  $V_{10}$  υπερβαίνει την τάση ελέγχου  $V_{11}$  (γωνία ενεργοποίησης  $\phi$ ), ένα σήμα επεξεργάζεται στη λογική. Ανάλογα με το μέγεθος του τάση ελέγχου  $V_{11}$ , η γωνία ενεργοποίησης  $\phi$  μπορεί να μετατοπιστεί εντός γωνίας φάσης από  $0^\circ$  έως  $180^\circ$ . Για κάθε μισό κύμα, ένας θετικός παλμός περίπου. Η διάρκεια 30  $\mu s$  εμφανίζεται στις εξόδους Q 1 και E 2. Η διάρκεια του παλμού μπορεί να παραταθεί έως και  $180^\circ$  μέσω ενός πυκνωτή  $C_{12}$ . Εάν η ακίδα 12 είναι συνδεδεμένη στη γείωση, θα προκύψουν παλμοί με διάρκεια μεταξύ  $\phi$  και  $180^\circ$ . Εξάγει και παρέχει τα αντίστροφα σήματα των Q 1 και Q 2. Ένα σήμα  $\phi + 180^\circ$  που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο μιας εξωτερικής λογικής, είναι διαθέσιμο στον ακροδέκτη 3. Ένα σήμα που αντιστοιχεί στη σύνδεση NOR των Q 1 και Q 2 είναι διαθέσιμο στην έξοδο Q Z (ακίδα 7). Η είσοδος αναστολής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απενεργοποίηση των εξόδων Q1, Q2 και , . Ο ακροδέκτης 13 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επέκταση των εξόδων και σε πλήρες μήκος παλμού ( $180^\circ - \phi$ ).[21]

## 5.3 Μελλοντικές εργασίες (Future Works).

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, αποτελεί αφετηρία για μελέτη της συμπεριφοράς των αναλογικών κυκλωμάτων σε ποικίλες εφαρμογές που απαιτούν εξειδικευμένες παραμέτρους , όπως οι υψηλές τάσεις , οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κ.α. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες εφαρμογές , για τις οποίες το παρόν σύστημα θα μπορούσε να αποτελέσει βάση για την επίτευξη τού ελέγχου και της ρύθμισης της λειτουργίας τους , με την δυνατότητα φυσικά να προσαρμοστούν διάφοροι παράμετροι όπως , η ευαισθησία του αισθητήρα , οι τάσεις λειτουργίας , οι θερμοκρασίες λειτουργίας κ.α.

- Ηλεκτρομεταλλουργικές και Ηλεκτροχημικές διεργασίες.
- Έλεγχοι αντιδραστήρων.
- Φορητά μηχανήματα χειρός.
- Βιομηχανικοί δίσκοι ευέλικτης ταχύτητας.
- Φορτίσεις μπαταριών.
- Έλεγχος βιομηχανικού ιμάντα μεταφοράς φορτίων.

Να σημειωθεί ότι , η συγκεκριμένη μέθοδος αυτορρύθμισης των στροφών του κινητήρα με τις κατάλληλες μετατροπές θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε τριφασικούς κινητήρες πραγματοποιώντας τριφασικό έλεγχο και όχι μονοφασικό.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]<https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5246/1/%CE%88%CE%BB%CE%B5%CE%B3%CF%87%CE%BF%CF%82%20%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CF%89%CE%BD%20%CE%BC%CE%B5%20%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE.pdf>
- [2][https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82\\_%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82)
- [3] [https://valiadis.gr/pool/ftp/attachments/LSIS\\_S100\\_IP66\\_Manual\\_GR.pdf](https://valiadis.gr/pool/ftp/attachments/LSIS_S100_IP66_Manual_GR.pdf)
- [4] “Σερβοκινητήρια Συστήματα (επαγωγικοί κινητήρες και σύγχρονοι κινητήρες μονίμου μαγνήτη)” Χρήστος Α.Μαδεμλής, ISBN 978-960-418-213-8
- [5] “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ,2<sup>Η</sup> ΕΚΔΟΣΗ ISBN: 978-960-418-522-1” Ιορδάνης Κιοσκερίδης.
- [6] Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC, Stephen J. Charman, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [7] Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων Ηλεκτρονικών Ισχύος , Παναγιώτης Α. Δημητριάδης, Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης.
- [8] Μονοφασικοί Κινητήρες [http://hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p285\\_320.pdf](http://hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p285_320.pdf)
- [9] Διάταξη γραμμικής τροφοδοσίας με δυνατότητα ρύθμισης της παρεχόμενης συνεχούς τάσης (0 – 400 Volt), Κωνσταντόπουλος Φ. Σπυρίδων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Διπλωματική Εργασία.  
[http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4663/3/constadopoulos\\_powersupply.pdf](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4663/3/constadopoulos_powersupply.pdf)
- [10] Μελέτη και εγκατάσταση συστήματος ασφαλείας σε ιδιωτικό χώρο στάθμευσης, Καραμούζης Αθανάσιος -Σαμολαδάς Ανδρέας, Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Πτυχιακή Εργασία.  
[http://eureka.lib.teithe.gr:8080/bitstream/handle/10184/1233/kar\\_sam\\_main.pdf?sequence=2](http://eureka.lib.teithe.gr:8080/bitstream/handle/10184/1233/kar_sam_main.pdf?sequence=2)
- [11] Μελέτη και Κατασκευή ηλεκτρονικού κυκλώματος για την οδήγηση και ρύθμιση των στροφών Μονοφασικού Κινητήρα AC ανάλογα με την θερμοκρασία, για Βιομηχανικό Εξαερισμό, με την χρήση Μικροελεγκτή, Μπομπότης Ιωάννης, Κρυώνας Κωνσταντίνος, Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, Πτυχιακή Εργασία.
- [12] Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ Σ.Τ.Ε.Φ. ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ “ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ” ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΡΑΪΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΚΩΤΣΙΝΗΣ ΑΛΚΗΣ , ΜΠΑΜΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
- [13] «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ» ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟΦΟΙΤΩΝ «ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ». Δ. Πυλαρινός
- [14] Σημειώσεις εργαστηριακές ασκήσεις Π. Δημητριάδη.
- [15] <https://microcontrollerslab.com/frequency-to-voltage-converter-circuits/>
- [16] <https://www.homemade-circuits.com/frequency-to-voltage-converter-circuit/>

[17] «Πτυχιακή εργασία ΑΤΕΙΘ τμημα ηλεκτρονικών Μηχανικών του φοιτητή Μπεκήρ Εμράχ 2013 με θέμα Μελέτη και Κατασκευή Συσκευής Ψηφιακής – Βαθμωτής Ρύθμισης Στροφών Μονοφασικού Κινητήρα AC, με Χρήση Μικροελεγκτή PIC»

[18] «<https://sites.google.com/site/elektrikesmechanesi/eide-elektrikon-mechanon/kineteres-elektrikou-reumatos>»

[19] <https://www.evworks.com.au/page/technical-information/ev-tech-info/motors/>

[20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Snubber>

[21] <http://www.farnell.com/datasheets/1836360.pdf>

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## Datasheets

### BTB16-800CW



## BTA16, BTB16 and T16 Series

SNUBBERLESS™, LOGIC LEVEL & STANDARD

16A TRIACs

Table 1: Main Features

Symbol	Value	Unit
$I_{T(RMS)}$	16	A
$V_{DRM}/V_{RRM}$	600, 700 and 800	V
$I_{GT} (Q_1)$	10 to 50	mA

### DESCRIPTION

Available either in through-hole or surface-mount packages, the **BTA16**, **BTB16** and **T16** triac series is suitable for general purpose AC switching. They can be used as an ON/OFF function in applications such as static relays, heating regulation, induction motor starting circuits... or for phase control operation in light dimmers, motor speed controllers, ...

The snubberless versions (BTA/BTB...W and T16 series) are specially recommended for use on inductive loads, thanks to their high commutation performances. By using an internal ceramic pad, the BTA series provides voltage insulated tab (rated at  $2500V_{RMS}$ ) complying with UL standards (File ref.: E81734).

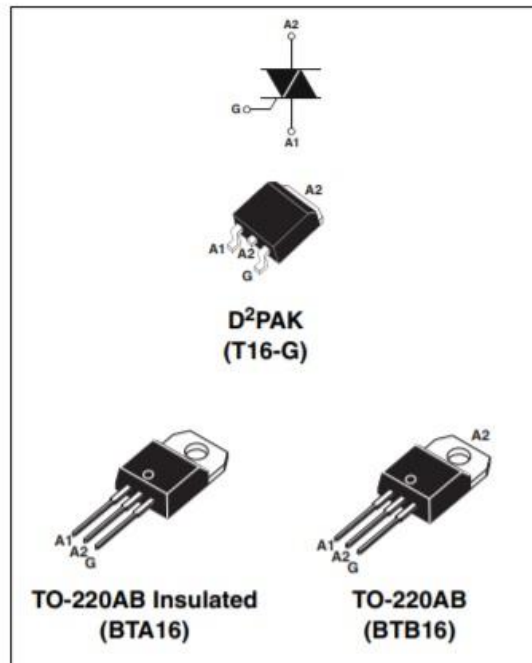


Table 2: Order Codes

Part Number	Marking
BTA16-xxxxxRG	See page table 8 on page 8
BTB16-xxxxxRG	
T16xx-xxxG	

**BTA16, BTB16 and T16 Series**
**Table 3: Absolute Maximum Ratings**

Symbol	Parameter		Value	Unit		
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current (full sine wave)	D <sup>2</sup> PAK / TO-220AB	$T_c = 100^\circ\text{C}$	16	A	
		TO-220AB Ins.	$T_c = 15^\circ\text{C}$			
$I_{TSM}$	Non repetitive surge peak on-state current (full cycle, $T_j$ initial = $25^\circ\text{C}$ )	F = 50 Hz	t = 20 ms	160	A	
		F = 60 Hz	t = 16.7 ms	168		
$i^2t$	$i^2t$ Value for fusing	$t_p = 10$ ms		144	A <sup>2</sup> s	
di/dt	Critical rate of rise of on-state current $I_G = 2 \times I_{GT}$ , $t_r \leq 100$ ns	F = 120 Hz	$T_j = 125^\circ\text{C}$	50	A/ $\mu\text{s}$	
$V_{DSM}/V_{RSM}$	Non repetitive surge peak off-state voltage	$t_p = 10$ ms	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$V_{DSM}/V_{RSM} + 100$	V	
$I_{GM}$	Peak gate current	$t_p = 20$ $\mu\text{s}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$	4	A	
$P_{G(AV)}$	Average gate power dissipation	$T_j = 125^\circ\text{C}$		1	W	
$T_{stg}$ $T_j$	Storage junction temperature range Operating junction temperature range				- 40 to + 150 - 40 to + 125	$^\circ\text{C}$

**Tables 4: Electrical Characteristics ( $T_j = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified)**
**■ SNUBBERLESS and Logic Level (3 quadrants)**

Symbol	Test Conditions	Quadrant		T16	BTA16 / BTB16			Unit
				T1635	SW	CW	BW	
$I_{GT}$ (1)	$V_D = 12$ V $R_L = 33$ $\Omega$	I - II - III	MAX.	35	10	35	50	mA
$V_{GT}$		I - II - III	MAX.	1.3				V
$V_{GD}$	$V_D = V_{DRM}$ $R_L = 3.3$ k $\Omega$ $T_j = 125^\circ\text{C}$	I - II - III	MIN.	0.2				V
$I_H$ (2)	$I_T = 500$ mA		MAX.	35	15	35	50	mA
$I_L$	$I_G = 1.2 I_{GT}$	I - III	MAX.	50	25	50	70	mA
		II		60	30	60	80	
dV/dt (2)	$V_D = 67\% V_{DRM}$ gate open	$T_j = 125^\circ\text{C}$	MIN.	500	40	500	1000	V/ $\mu\text{s}$
(di/dt)c (2)	(dV/dt)c = 0.1 V/ $\mu\text{s}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$	MIN.	-	8.5	-	-	A/ms
	(dV/dt)c = 10 V/ $\mu\text{s}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$		-	3.0	-	-	
	Without snubber	$T_j = 125^\circ\text{C}$		8.5	-	8.5	14	

■ Standard (4 quadrants)

Symbol	Test Conditions	Quadrant		BTA16 / BTB16		Unit
				C	B	
$I_{GT}$ (1)	$V_D = 12\text{ V}$ $R_L = 33\ \Omega$	I - II - III IV	MAX.	25 50	50 100	mA
$V_{GT}$		ALL	MAX.	1.3		V
$V_{GD}$	$V_D = V_{DRM}$ $R_L = 3.3\text{ k}\Omega$ $T_J = 125^\circ\text{C}$	ALL	MIN.	0.2		V
$I_H$ (2)	$I_T = 500\text{ mA}$		MAX.	25	50	mA
$I_L$	$I_G = 1.2\ I_{GT}$	I - III - IV	MAX.	40	60	mA
		II		80	120	
dV/dt (2)	$V_D = 67\% V_{DRM}$ gate open	$T_J = 125^\circ\text{C}$	MIN.	200	400	V/ $\mu\text{s}$
(dV/dt)c (2)	(di/dt)c = 7 A/ms	$T_J = 125^\circ\text{C}$	MIN.	5	10	V/ $\mu\text{s}$

Table 5: Static Characteristics

Symbol	Test Conditions			Value	Unit	
$V_T$ (2)	$I_{TM} = 22.5\text{ A}$	$t_p = 380\ \mu\text{s}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	MAX.	1.55	V
$V_{to}$ (2)	Threshold voltage		$T_J = 125^\circ\text{C}$	MAX.	0.85	V
$R_d$ (2)	Dynamic resistance		$T_J = 125^\circ\text{C}$	MAX.	25	m $\Omega$
$I_{DRM}$ $I_{RRM}$	$V_{DRM} = V_{RRM}$		$T_J = 25^\circ\text{C}$	MAX.	5	$\mu\text{A}$
			$T_J = 125^\circ\text{C}$		2	mA

Note 1: minimum  $I_{GT}$  is guaranteed at 5% of  $I_{GT}$  max.

Note 2: for both polarities of A2 referenced to A1.

Table 6: Thermal resistance

Symbol	Parameter		Value	Unit	
$R_{th(j-c)}$	Junction to case (AC)	D <sup>2</sup> PAK / TO-220AB	1.2	$^\circ\text{C/W}$	
		TO-220AB Insulated	2.1		
$R_{th(j-a)}$	Junction to ambient	S = 1 cm <sup>2</sup>	D <sup>2</sup> PAK	45	$^\circ\text{C/W}$
			TO-220AB / TO-220AB Insulated	60	

S = Copper surface under tab.

## MOC 3021

### MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document  
by MOC3020/D



## 6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output (400 Volts Peak)

The MOC3020 Series consists of gallium arsenide infrared emitting diodes, optically coupled to a silicon bilateral switch.

- *To order devices that are tested and marked per VDE 0884 requirements, the suffix "V" must be included at end of part number. VDE 0884 is a test option.* They are designed for applications requiring isolated triac triggering.

#### Recommended for 115/240 Vac(rms) Applications:

- Solenoid/Valve Controls
- Lamp Ballasts
- Interfacing Microprocessors to 115 Vac Peripherals
- Motor Controls
- Static ac Power Switch
- Solid State Relays
- Incandescent Lamp Dimmers

#### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
--------	--------	-------	------

#### INFRARED EMITTING DIODE

Reverse Voltage	$V_R$	3	Volts
Forward Current — Continuous	$I_F$	60	mA
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Negligible Power in Triac Driver Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	100	mW
		1.33	mW/ $^\circ\text{C}$

#### OUTPUT DRIVER

Off-State Output Terminal Voltage	$V_{DRM}$	400	Volts
Peak Repetitive Surge Current (PW = 1 ms, 120 pps)	$I_{TSM}$	1	A
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	300	mW
		4	mW/ $^\circ\text{C}$

#### TOTAL DEVICE

Isolation Surge Voltage <sup>(1)</sup> (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 Second Duration)	$V_{ISO}$	7500	Vac(pk)
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	330	mW
		4.4	mW/ $^\circ\text{C}$
Junction Temperature Range	$T_J$	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Ambient Operating Temperature Range <sup>(2)</sup>	$T_A$	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range <sup>(2)</sup>	$T_{stg}$	-40 to +150	$^\circ\text{C}$
Soldering Temperature (10 s)	$T_L$	260	$^\circ\text{C}$

**MOC3021**  
[IFT = 15 mA Max]  
**MOC3022**  
[IFT = 10 mA Max]  
**MOC3023\***  
[IFT = 5 mA Max]

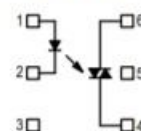
\*Motorola Preferred Device

#### STYLE 6 PLASTIC



STANDARD THRU HOLE  
CASE 730A-04

#### SCHEMATIC



1. ANODE
2. CATHODE
3. NC
4. MAIN TERMINAL
5. SUBSTRATE  
DO NOT CONNECT
6. MAIN TERMINAL

## MOC3021 MOC3022 MOC3023

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>INPUT LED</b>					
Reverse Leakage Current ( $V_R = 3\text{ V}$ )	$I_R$	—	0.05	100	$\mu\text{A}$
Forward Voltage ( $I_F = 10\text{ mA}$ )	$V_F$	—	1.15	1.5	Volts
<b>OUTPUT DETECTOR (<math>I_F = 0</math> unless otherwise noted)</b>					
Peak Blocking Current, Either Direction (Rated $V_{DRM}^{(1)}$ )	$I_{DRM}$	—	10	100	nA
Peak On-State Voltage, Either Direction ( $I_{TM} = 100\text{ mA Peak}$ )	$V_{TM}$	—	1.8	3	Volts
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage (Figure 7, Note 2)	$dv/dt$	—	10	—	$\text{V}/\mu\text{s}$
<b>COUPLED</b>					
LED Trigger Current, Current Required to Latch Output (Main Terminal Voltage = 3 V(3))	$I_{FT}$				$\text{mA}$
	MOC3021	—	8	15	
	MOC3022	—	—	10	
	MOC3023	—	—	5	
Holding Current, Either Direction	$I_H$	—	100	—	$\mu\text{A}$

1. Test voltage must be applied within  $dv/dt$  rating.
2. This is static  $dv/dt$ . See Figure 7 for test circuit. Commutating  $dv/dt$  is a function of the load-driving thyristor(s) only.
3. All devices are guaranteed to trigger at an  $I_F$  value less than or equal to max  $I_{FT}$ . Therefore, recommended operating  $I_F$  lies between max  $I_{FT}$  (15 mA for MOC3021, 10 mA for MOC3022, 5 mA for MOC3023) and absolute max  $I_F$  (60 mA).

### TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$

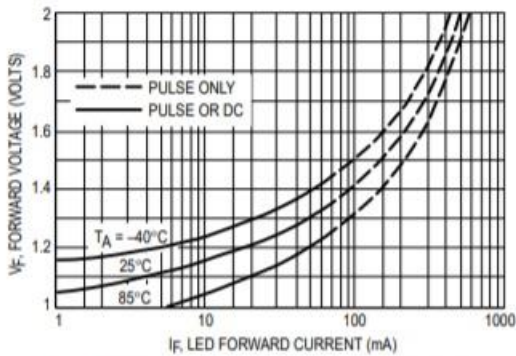


Figure 1. LED Forward Voltage versus Forward Current

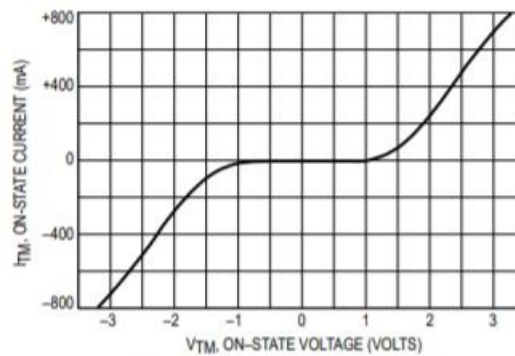


Figure 2. On-State Characteristics

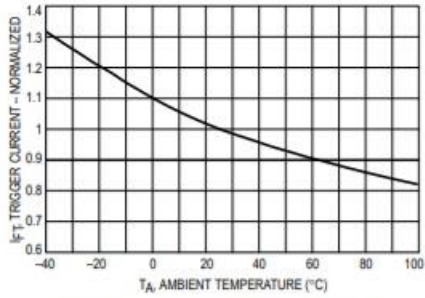


Figure 3. Trigger Current versus Temperature

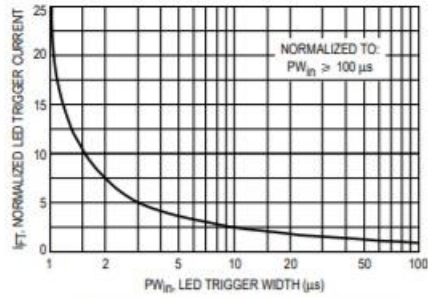


Figure 4. LED Current Required to Trigger versus LED Pulse Width

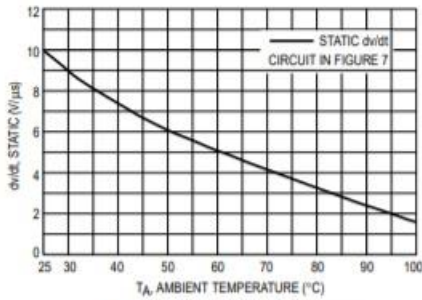


Figure 5. dv/dt versus Temperature

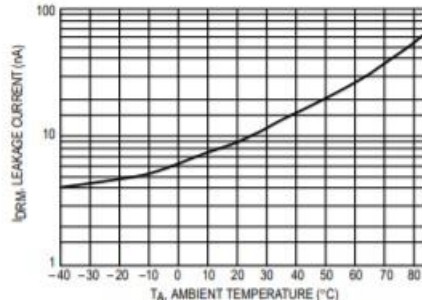
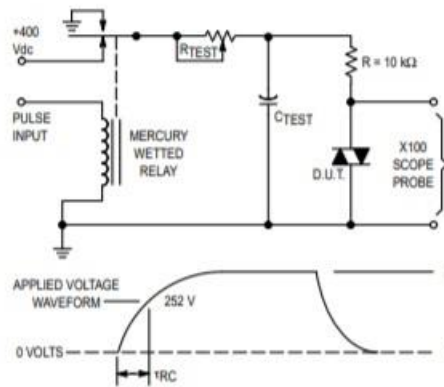


Figure 6. Leakage Current, I<sub>DRM</sub> versus Temperature



1. The mercury wetted relay provides a high speed repeated pulse to the D.U.T.
2. 100x scope probes are used, to allow high speeds and voltages.
3. The worst-case condition for static dv/dt is established by triggering the D.U.T. with a normal LED input current, then removing the current. The variable R<sub>TEST</sub> allows the dv/dt to be gradually increased until the D.U.T. continues to trigger in response to the applied voltage pulse, even after the LED current has been removed. The dv/dt is then decreased until the D.U.T. stops triggering. τ<sub>RC</sub> is measured at this point and recorded.

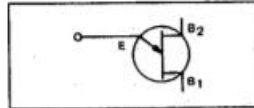
Figure 7. Static dv/dt Test Circuit

2N2646

**Boca Semiconductor Corp. (BSC)**  
**PN Unijunction Transistors**  
**Silicon PN Unijunction Transistors**

**2N2646**  
**2N2647**

**PN UJT's**



... designed for use in pulse and timing circuits, sensing circuits and thyristor trigger circuits. These devices feature:

- Low Peak Point Current — 2  $\mu$ A (Max)
- Low Emitter Reverse Current — 200 nA (Max)
- Passivated Surface for Reliability and Uniformity

**\*MAXIMUM RATINGS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Dissipation, Note 1	$P_D$	300	mW
RMS Emitter Current	$I_E(\text{RMS})$	50	mA
Peak Pulse Emitter Current, Note 2	$i_E$	2	Amps
Emitter Reverse Voltage	$V_{B2E}$	30	Volts
Interbase Voltage	$V_{B2B1}$	35	Volts
Operating Junction Temperature Range	$T_J$	-65 to +125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

\*Indicates JEDEC Registered Data.

Notes: 1. Derate 3 mW/ $^\circ\text{C}$  increase in ambient temperature. The total power dissipation (available power to Emitter and Base-Two) must be limited by the external circuitry.

2. Capacitor discharge — 10  $\mu$ F or less, 30 volts or less.

**3**

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Intrinsic Standoff Ratio ( $V_{B2B1} = 10\text{ V}$ ), Note 1	$\eta$	0.56 0.68	—	0.75 0.82	—
Interbase Resistance ( $V_{B2B1} = 3\text{ V}$ , $I_E = 0$ )	$r_{BB}$	4.7	7	9.1	k ohms
Interbase Resistance Temperature Coefficient ( $V_{B2B1} = 3\text{ V}$ , $I_E = 0$ , $T_A = -55^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$ )	$\alpha r_{BB}$	0.1	—	0.9	%/°C
Emitter Saturation Voltage ( $V_{B2B1} = 10\text{ V}$ , $I_E = 50\text{ mA}$ ), Note 2	$V_{EB1}(\text{sat})$	—	3.5	—	Volts
Modulated Interbase Current ( $V_{B2B1} = 10\text{ V}$ , $I_E = 50\text{ mA}$ )	$I_{B2}(\text{mod})$	—	15	—	mA
Emitter Reverse Current ( $V_{B2E} = 30\text{ V}$ , $I_{B1} = 0$ )	$I_{EB2O}$	—	0.005 0.005	12 0.2	$\mu\text{A}$
Peak Point Emitter Current ( $V_{B2B1} = 25\text{ V}$ )	$I_p$	—	1 1	5 2	$\mu\text{A}$
Valley Point Current ( $V_{B2B1} = 20\text{ V}$ , $R_{B2} = 100\text{ ohms}$ ), Note 2	$I_v$	4 8	6 10	— 18	mA
Base-One Peak Pulse Voltage (Note 3, Figure 3)	$V_{OB1}$	3 6	5 7	— —	Volts

\*Indicates JEDEC Registered Data.

Notes:

1. Intrinsic standoff ratio,

$\eta$ , is defined by equation:

$$\eta = \frac{V_p - V_f}{V_{B2B1}}$$

Where  $V_p$  = Peak Point Emitter Voltage

$V_{B2B1}$  = Interbase Voltage

$V_f$  = Emitter to Base-One Junction Diode Drop  
( $\approx 0.45\text{ V}$  @  $10\ \mu\text{A}$ )

2. Use pulse techniques:  $PW \approx 300\ \mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$  to avoid internal heating due to interbase modulation which may result in erroneous readings.

3. Base-One Peak Pulse Voltage is measured in circuit of Figure 3. This specification is used to ensure minimum pulse amplitude for applications in SCR firing circuits and other types of pulse circuits.

FIGURE 1  
UNI-JUNCTION TRANSISTOR SYMBOL  
AND NOMENCLATURE

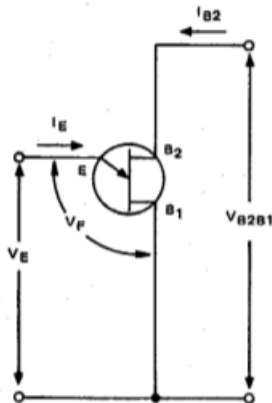


FIGURE 2  
STATIC EMITTER CHARACTERISTIC  
CURVES  
(Exaggerated to Show Details)

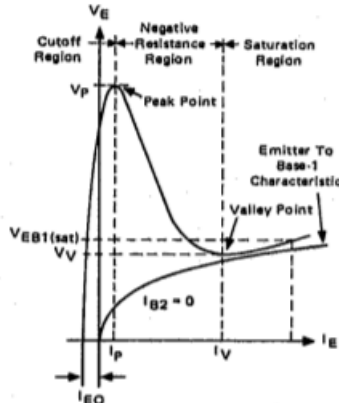
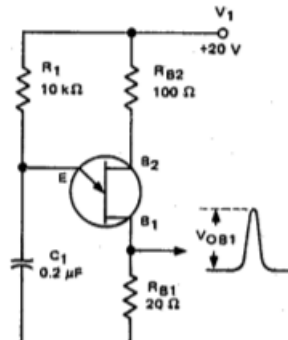


FIGURE 3 -  $V_{OB1}$  TEST CIRCUIT  
(Typical Relaxation Oscillator)





**BC556,B BC557A,B,C BC558B**
**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>ON CHARACTERISTICS</b>					
DC Current Gain ( $I_C = -10 \mu\text{A}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$ )	$h_{FE}$	—	90	—	—
	BC557A	—	150	—	—
	BC556B/557B/558B	—	270	—	—
	BC557C	—	—	—	—
( $I_C = -2.0 \text{ mA}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$ )	BC556	120	—	500	—
	BC557	120	—	800	—
	BC558	120	—	800	—
	BC557A	120	170	220	—
	BC556B/557B/558B	180	290	460	—
	BC557C	420	500	800	—
( $I_C = -100 \text{ mA}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$ )	BC557A	—	120	—	—
	BC556B/557B/558B	—	180	—	—
	BC557C	—	300	—	—
Collector–Emitter Saturation Voltage ( $I_C = -10 \text{ mA}$ , $I_B = -0.5 \text{ mA}$ ) ( $I_C = -10 \text{ mA}$ , $I_B = \text{see Note 1}$ ) ( $I_C = -100 \text{ mA}$ , $I_B = -5.0 \text{ mA}$ )	$V_{CE(\text{sat})}$	—	-0.075	-0.3	V
		—	-0.3	-0.6	
		—	-0.25	-0.65	
Base–Emitter Saturation Voltage ( $I_C = -10 \text{ mA}$ , $I_B = -0.5 \text{ mA}$ ) ( $I_C = -100 \text{ mA}$ , $I_B = -5.0 \text{ mA}$ )	$V_{BE(\text{sat})}$	—	-0.7	—	V
		—	-1.0	—	
Base–Emitter On Voltage ( $I_C = -2.0 \text{ mA}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ Vdc}$ ) ( $I_C = -10 \text{ mA}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ Vdc}$ )	$V_{BE(\text{on})}$	-0.55	-0.62	-0.7	V
		—	-0.7	-0.82	
<b>SMALL–SIGNAL CHARACTERISTICS</b>					
Current–Gain — Bandwidth Product ( $I_C = -10 \text{ mA}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$ , $f = 100 \text{ MHz}$ )	$f_T$	—	280	—	MHz
	BC556	—	320	—	
	BC557	—	360	—	
	BC558	—	—	—	
Output Capacitance ( $V_{CB} = -10 \text{ V}$ , $I_C = 0$ , $f = 1.0 \text{ MHz}$ )	$C_{ob}$	—	3.0	6.0	pF
Noise Figure ( $I_C = -0.2 \text{ mA}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$ , $R_S = 2.0 \text{ k}\Omega$ , $f = 1.0 \text{ kHz}$ , $\Delta f = 200 \text{ Hz}$ )	NF	—	2.0	10	dB
	BC556	—	2.0	10	
	BC557	—	2.0	10	
	BC558	—	2.0	10	
Small–Signal Current Gain ( $I_C = -2.0 \text{ mA}$ , $V_{CE} = -5.0 \text{ V}$ , $f = 1.0 \text{ kHz}$ )	$h_{fe}$	125	—	500	—
	BC556	125	—	900	—
	BC557/558	125	—	260	—
	BC557A	125	220	260	—
	BC556B/557B/558B	240	330	500	—
	BC557C	450	600	900	—

Note 1:  $I_C = -10 \text{ mA}$  on the constant base current characteristics, which yields the point  $I_C = -11 \text{ mA}$ ,  $V_{CE} = -1.0 \text{ V}$ .