

2015



Σχολή Εφαρμοσμένων
Επιστημών
ΤΕΙ Κρήτης
Τμήμα Ηλεκτρονικών
Μηχανικών Τ.Ε.

[ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΣΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ]

Πτυχιακή Εργασία του Ρετζίνου Νικόλαου
Εισηγητής καθηγητής: Πλίακης Δημητριος

Ευχαριστήριο

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλα την οικογένεια μου για την ηθική και οικολογική στήριξη που μου παρείχε όλη την διάρκεια των σπουδών μου

Επίσης, οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες στον εισηγητή και επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Πλιάκη Δημήτριο ο οποίος με τις παρατηρήσεις του και την πολύτιμη βοήθεια του.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	1
Ευρετήριο Εικόνων.....	4
Εισαγωγή.....	7
Κεφάλαιο 1 ^ο – Τελεστικοί Ενισχυτές και μη γραμμικά κυκλώματα	9
1.1 Ιστορική αναδρομή Τ.Ε.....	9
1.2 Ο Τελεστικός Ενισχυτής.....	10
1.3 Ο Πραγματικός Τελεστικός ενισχυτής	12
1.4 Ο Ιδανικός Τελεστικός ενισχυτής	13
1.5 Μη γραμμικά κυκλώματα	15
Κεφάλαιο 2 ^ο - Γενικά Χαρακτηριστικά Σχεδίασης Τ.Ε.....	18
2.1 Αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του τελεστικού ενισχυτή	18
2.2 Κέρδος Τελεστικού Ενισχυτή	19
2.3 Απόκριση συχνότητας.....	20
2.4 Ρυθμός Ανόδου (slew rate).....	21
2.5 Ροή ρεύματος στους τελεστικούς ενισχυτές	22
Κεφάλαιο 3 ^ο – Βασικά μη γραμμικά κυκλώματα με Τελεστικό Ενισχυτή.....	25
3.1 Τελεστικός ενισχυτής σε μη γραμμικά κυκλώματα.....	25
3.2 Συγκριτής Τάσης	26
3.3 Απλός ασταθής πολυδονητής.....	30
3.4 Μονοσταθής πολυδονητής	32
3.5 Ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής.....	35
3.6 Κύκλωμα ανιχνευτή του μηδενός	36

3.7 Γεννήτρια κλιμακωτής τάσης - Ταλαντωτής	38
3.8 Γεννήτρια τριγωνικών – τετραγωνικών σημάτων με δύο τ.ε.	41
3.9 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από την τάση	43
3.10 Συγκριτής τάσης με υστέρηση	45
Κεφάλαιο 4ο – Εφαρμογές του Τελεστικού Ενισχυτή...Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
4.1 Εφαρμογές και χρήσεις του τελεστικού ενισχυτή. Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
4.2 Αναστρέφον τελεστικός ενισχυτής	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.3 Μη αναστρέφον ενισχυτής.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.4 Αθροιστής ενισχυτής.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.5 Διαφοριστής και ολοκληρωτής ενισχυτής	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.5.1 Διαφοριστής ενισχυτής	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.5.2 Ολοκληρωτής τελεστικός ενισχυτής.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.6 Αφαιρέτης Ενισχυτής	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
4.7 Λογαριθμικός Ενισχυτής.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Κεφάλαιο 5^ο - Παραδείγματα Προηγμένων Σχεδιάσεων Τ.Ε	
.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.1 Προηγμένες τεχνικές σχεδίασης Τ.Ε.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
5.2 Σχεδίαση Τελεστικού Ενισχυτή με χαμηλή τάσης τροφοδοσίας	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Συμπεράσματα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Βιβλιογραφία	47

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Τελεστικός ενισχυτής κατασκευασμένος το 1962 με όλα τα διακριτά του στοιχεία.....	9
Εικόνα 2: Εξωτερική μορφή του Τελεστικού ενισχυτή.....	10
Εικόνα 3: Τελεστικός ενισχυτής.....	11
Εικόνα 4: Συμβολισμός του τελεστικού ενισχυτή.....	11
Εικόνα 5: Πραγματικός τελεστικός ενισχυτής και ιδανικός τελεστικός ενισχυτής.....	13
Εικόνα 6: Συμβολισμός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή.....	14
Εικόνα 7: Χαρακτηριστικές γραμμικού και μη γραμμικού κυκλωμάτος.....	16
Εικόνα 8: Αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του T.E.....	18
Εικόνα 9: Τελεστικός Ενισχυτής 3 σταδίων και το κύκλωμα πόλωσης.....	19
Εικόνα 10: Μέγιστος ρυθμός ανόδου T.E.....	21
Εικόνα 11: Ροή ρεύματος για την μη αναστρέφουσα τοπολογία του τελεστικού ενισχυτή.....	24
Εικόνα 12: Ροή ρεύματος για την αναστρέφουσα τοπολογία του τελεστικού ενισχυτή.....	24
Εικόνα 13: Κύκλωμα ανιχνευτή του μηδενός.....	27
Εικόνα 14 : Κυματομορφές εισόδου (V_i κόκκινη) και εξόδου (V_C πράσινη).....	28
Εικόνα 15: Κύκλωμα συγκριτή τάσης με τελεστικό ενισχυτή με αναστροφή (a) και χωρίς αναστροφή (b).....	29
Εικόνα 16: Κυματομορφές εισόδου – εξόδου συγκριτή τάσης χωρίς αναστροφή ως προς τάση αναφοράς 5V.....	30
Εικόνα 17: Κύκλωμα απλού ασταθούς πολυδονητή.....	30
Εικόνα 18: Κυματομορφές εισόδου μη αντιστροφής (u^+ κόκκινη) και εισόδου αντιστροφής (u^- μπλε) του συμμετρικού πολυδονητή.....	32
Εικόνα 19: Μονοσταθής πολυδονητής.....	33
Εικόνα 20: Κυματομορφές εισόδου μη αναστροφής (u^+ κόκκινη) και εισόδου αναστροφής (u^- μπλε) του μονοσταθούς πολυδονητή.....	34
Εικόνα 21: Ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής.....	35
Εικόνα 22: Κυματομορφές εισόδου μη αναστροφής (u^+ κόκκινη), εισόδου αναστροφής (u^- μπλε) και εξόδου (πράσινη) του ασύμμετρου πολυδονητή.....	36
Εικόνα 23: Κύκλωμα ανιχνευτή του μηδενός.....	36

Εικόνα 24: Κυματομορφές εισόδου (V _i κόκκινη) και εξόδου (V _C πράσινη)	38
Εικόνα 25: Κύκλωμα γεννήτριας κλιμακωτής τάσης	39
Εικόνα 26: Κυματομορφή εξόδου της γεννήτριας κλιμακωτής τάσης.....	41
Εικόνα 27: Κύκλωμα γεννήτριας τριγωνικών-τετραγωνικών σημάτων με 2 T.E.....	42
Εικόνα 28: Κύκλωμα ταλαντωτή ελεγχόμενου από τάση	43
Εικόνα 29: Κυματομορφές λειτουργίας στα σημεία του κυκλώματος U ₁ και U ₂	45
Εικόνα 30: Συγκριτής τάσης με υστέρηση	45
Εικόνα 31: Κυματομορφές εισόδου και εξόδου του συγκριτή τάσης με υστέρηση....	46
Εικόνα 32: Κύκλωμα αναστρέφον ενισχυτή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 33: Κύκλωμα μη αναστρέφοντος ενισχυτή	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 34: Κύκλωμα αθροιστή με τελεστικού ενισχυτή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 35: Κύκλωμα Διαφοριστή Ενισχυτή	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 36: Κύκλωμα ολοκληρωτή ενισχυτή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 37: Κύκλωμα αφαιρέτη ενισχυτή ...	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 38: Κύκλωμα λογαριθμικού τελεστικού ενισχυτή ...	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 39: Τελεστικός ενισχυτής προηγμένης σχεδίασης ...	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 40: Floating gate τρανζίστορ	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

Εισαγωγή

Ο Τελεστικός ενισχυτής αποτελεί μέρος ενός πολύ μεγάλου αριθμού ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συσκευών και για αυτό τον λόγο συμπεριλαμβάνεται μεταξύ των πιο διαδεδομένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σήμερα.

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής τάσης με διαφορετικές εισόδους και συνήθως μονή έξοδο και παράγει τάση εξόδου που πολλές φορές είναι εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από την διαφορά τάσης μεταξύ των τερματικών σταθμών εισόδου του.

Ο τελεστικός ενισχυτής βρίσκει εφαρμογή σε μια πολύ μεγάλη ποικιλία κυκλωμάτων όπως προαναφέρθηκε και έχουν την ικανότητα να πραγματοποιούν

μαθηματικές τελέσεις σε σήματα αναλογικού χαρακτήρα και από εκεί έχει πάρει και το όνομα του.

Είναι ένας ενισχυτής συνεχούς σύζευξης και τα κυριότερα πλεονεκτήματα του είναι η υψηλή αξιοπιστία του, το χαμηλό κόστος, το μικρό του μέγεθος και η πολύ μεγάλη σταθεροποίηση που παρουσιάζει.

Κυριαρχεί στον σχεδιασμό των αναλογικών συστημάτων και εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν είναι πολύ διαδεδομένος σε ένα μεγάλο αριθμό γραμμικών και μη γραμμικών κυκλωμάτων.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση της παρουσίας του τελεστικού ενισχυτή σε μη γραμμικά κυκλώματα και η ανάλυση των κυκλωμάτων αυτών. Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα σε πανεπιστημιακά βιβλία και συγγράμματα καθώς και σε δημοσιεύσεις του εξωτερικού με στόχο την όσο το δυνατόν πληρέστερη παρουσίαση των τελεστικών ενισχυτών μέσα στα μη γραμμικά κυκλώματα.

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τελεστικός ενισχυτής και γίνεται και ανάλυση του τι θεωρείτε σήμερα ιδανικός τελεστικός ενισχυτής και τι πραγματικός τελεστικός ενισχυτής. Πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή των τελεστικών ενισχυτών και γίνεται μια μικρή παρουσίαση των μη γραμμικών κυκλωμάτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα γενικά χαρακτηριστικά της σχεδίασης του τελεστικού ενισχυτή δίνοντας έμφαση στην αντίσταση εισόδου και εξόδου του τελεστικού ενισχυτή, στην απόκριση συχνότητας του και στην ροή ρεύματος μέσα στον τελεστικό ενισχυτή.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα μη γραμμικά κυκλώματα με τελεστικό ενισχυτή όπου αναλύονται και παρουσιάζονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και δίνονται και οι μαθηματικοί τύποι που τα διέπουν αυτά. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα κυκλώματα του συγκριτή ενισχυτή, του απλού ασταθή πολυδονητή, το κύκλωμα του ανιχνευτή του μηδενός και άλλα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφαρμογές του τελεστικού ενισχυτή δίνοντας μεγαλύτερη βάση στα κυκλώματα που εκτελούν μαθηματικές πράξεις όπως είναι του διαφοριστή και ολοκληρωτή ενισχυτή, του αφαιρέτη και του λογαριθμικού τελεστικού ενισχυτή καθώς επίσης και του αθροιστή τελεστικού ενισχυτή.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή αναφορά στις προηγμένες τεχνικές σχεδίασης των τελεστικών ενισχυτών και παρουσιάζεται η μέθοδος της σχεδίασης του τελεστικού ενισχυτή με καθρέφτες ρεύματος.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα μας από αυτή την βιβλιογραφική παρουσίαση των μη γραμμικών κυκλωμάτων με τελεστικό ενισχυτή.

Κεφάλαιο 1^ο – Τελεστικοί Ενισχυτές και μη γραμμικά κυκλώματα

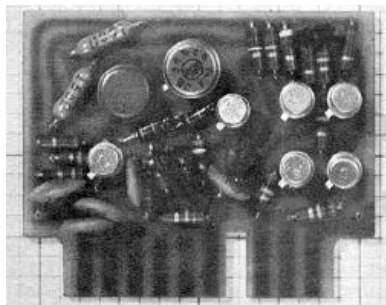
1.1 Ιστορική αναδρομή Τ.Ε

Ο Τελεστικός Ενισχυτής ξεκίνησε να ερευνάται σαν κατασκευή το 1928 όταν ο H.S.Black προσπάθησε να κατασκευάσει έναν ενισχυτή με αρνητική ανατροφοδότηση και να κατοχυρώσει την πατέντα αυτή. Το 1947 ο Ragazzini έδωσε για πρώτη φορά τον όρο «Τελεστικός Ενισχυτής» (Operational Amplifier) σε μια εργασία που δημοσίευσαν και χρησιμοποιούσαν διάφορους τύπους ανατροφοδότησης με την χρήση τέτοιων ενισχυτών. Η εργασία αυτή είχε βασιστεί σε μελέτες του

Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας και Άμυνας των ΗΠΑ κατά την διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου. (Καλαϊτζής,2007)

Η ανάπτυξη των τελεστικών ενισχυτών σηματοδότηκε από το γεγονός της εφεύρεσης του διπολικού τρανζίστορ, μιας ημιαγωγικής διάταξης που άλλαξε τελείως την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας.

Ο πρώτος εμπορικά διαθέσιμος τελεστικός ενισχυτής κατασκευάστηκε το 1950 από την εταιρία G.A Phil Brick Researches Ink, και περιελάμβανε ένα τελεστικό ενισχυτή με τριόδους λυχνίες. Η ίδια εταιρία κατασκεύασε το 1962 τον πρώτο τελεστικό ενισχυτή με ημιαγωγία στοιχεία και ήταν το βασικό στοιχείο στον σχεδιασμό των πρώτων αναλογικών ηλεκτρονικών υπολογιστών. Στην εικόνα 1 φαίνεται ένας τέτοιος τελεστικός ενισχυτής, κατασκευασμένος το 1962, στον οποίο φαίνονται όλα τα διακριτά στοιχεία του. Η κύρια λειτουργία του ήταν να εκτελεί μαθηματικές πράξεις όπως άθροισμα, διαφόριση, ολοκλήρωση κτλ.



Εικόνα 1: Τελεστικός ενισχυτής κατασκευασμένος το 1962 με όλα τα διακριτά του στοιχεία

Η κατασκευή αυτή, το 1962 άνοιξε τον δρόμο για την κατασκευή μεγάλης ποικιλίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Integrated Circuits) και οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών ολοκλήρωσης μεγαλύτερης κλίμακας με αποτέλεσμα σήμερα να κατασκευάζονται ολοκληρωμένα κυκλώματα εκατοντάδων χιλιάδων τρανζίστορ και διόδων.

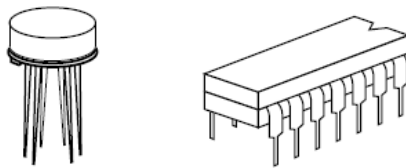
1.2 Ο Τελεστικός Ενισχυτής

Ο Τελεστικός ενισχυτής είναι ένα πλήρες ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο αποτελείται από εκατοντάδες στοιχεία όπως αντιστάσεις, διόδους, τρανζίστορ κτλ.

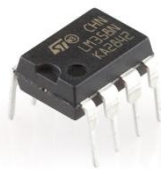
Έχει την λειτουργία ενός ενισχυτή διαφοράς σημάτων τάσης με πολύ μεγάλο συντελεστή ενίσχυσης.

Με τις κατάλληλες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί τα στοιχεία αυτά όπως οι αντιστάσεις, οι δίοδοι και τα τρανζίστορ αναπτύσσονται σε ένα λεπτό φύλλο κρυσταλλικού πυριτίου το οποίο έχει διαστάσεις λιγότερο από 1 mm^2 . Το φύλλο αυτό στην συνέχεια τοποθετείται μόνο του ή με άλλα αντίστοιχα μέσα σε ένα παραλληλεπίπεδο περίβλημα ή κυλινδρικό περίβλημα και έχει την μορφή των εικόνων 2 και 3.

Ο τελεστικός ενισχυτής έχει 2 εισόδους και μια έξοδο ενώ απαιτούνται και δυο ακροδέκτες για την τροφοδοσία του. Επιπροσθέτως μπορούν να υπάρχουν και άλλοι ακροδέκτες οι οποίοι να επιτρέπουν την προσπέλαση στο εσωτερικό κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή. Έτσι λοιπόν προκύπτει πως στην ελάχιστη μορφή του ένας τελεστικός ενισχυτής απαιτεί πέντε ακροδέκτες και τοποθετείται σε ένα παραλληλεπίπεδο κέλυφος με οκτώ ακροδέκτες οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε 2 σειρές όπως φαίνεται και στην εικόνα 2. (Dual in Line)



Εικόνα 2: Εξωτερική μορφή του Τελεστικού ενισχυτή



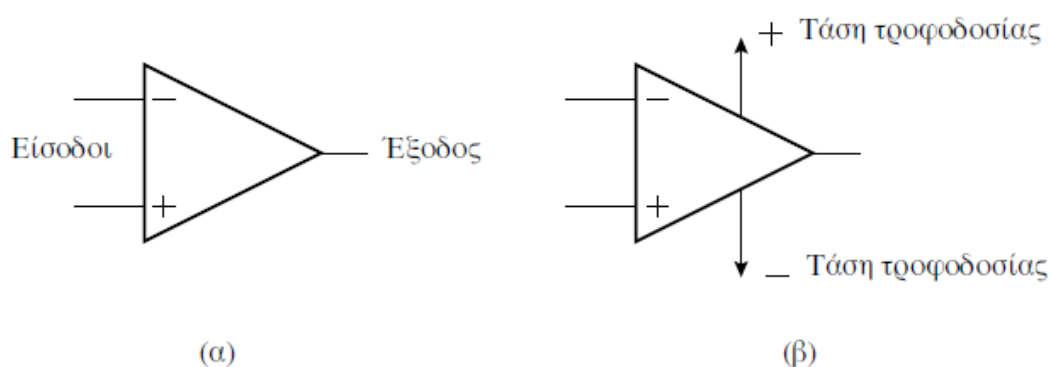
Εικόνα 3: Τελεστικός ενισχυτής

Όπως φαίνεται και στις εικόνες 2 και 3 από το παραλληλεπίπεδο περίβλημα προεξέχουν μεταλλικοί ακροδέκτες μέσω των οποίων συνδέεται εσωτερικά με ένα

συγκεκριμένο σημείο του κυκλώματος όπως τα σημεία εφαρμογής τάσεων τροφοδοσίας ή τα άκρα εισόδου και εξόδου. (Τσιατούχας,2011)

Στην πράξη ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα αυτόνομο ηλεκτρονικό εξάρτημα το οποίο χρησιμοποιείται ως δομική μονάδα διαφόρων τύπων απλών ή σύνθετων κυκλωμάτων και διατάξεων και θεωρείται ένα σύνθετο ενεργό ηλεκτρονικό στοιχείο το οποίο έχει ένα ιδιαίτερο σύμβολο.

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι συμβολισμού των τελεστικών ενισχυτών φαίνονται στην εικόνα 4 όπου η πρώτη εικόνα είναι το σύμβολο του απλού τελεστικού ενισχυτή με τους βασικούς ακροδέκτες εισόδου και εξόδου ενώ στην δεύτερη εικόνα, στο σύμβολο, περιλαμβάνονται και οι ακροδέκτες της τάσης τροφοδοσίας. Οι πέντε ακροδέκτες που φαίνονται στην δεύτερη εικόνα της εικόνας 4 αποτελούν τον ελάχιστο αριθμό ακροδεκτών ενός τυπικού τελεστικού ενισχυτή.



Εικόνα 4: Συμβολισμός του τελεστικού ενισχυτή

1.3 Ο Πραγματικός Τελεστικός ενισχυτής

Ο πραγματικός τελεστικός ενισχυτής είναι αυτός που χρησιμοποιείται στην πραγματικότητα και πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο είναι τοποθετημένο σε μια ψηφίδα πυριτίου.

Η αντίσταση, το εύρος ζώνης και τα υπόλοιπα στοιχεία του πραγματικού τελεστικού ενισχυτή είναι πεπερασμένα ενώ οι χαρακτηριστικές παράμετροι του πραγματικού τελεστικού ενισχυτή σύμφωνα και με τον Πακτίτη (2005) είναι οι ακόλουθοι:

- Η τάση αποστάθμισης εισόδου είναι ίση με το μέτρο της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ των εισόδων έτσι ώστε να μηδενιστεί η τάση εξόδου
- Το ρεύμα αποστάθμισης εισόδων ισούται με την διαφορά των ρευμάτων πόλωσης των 2 εισόδων
- Ο ρυθμός μεταβολής της τάσης εξόδου που δηλώνει την μέγιστη ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η τάση εξόδου
- Ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου που ισούται με την απολαβή τάσης που εκδηλώνεται όταν ένα σήμα εφαρμόζεται ταυτόχρονα και στις 2 εισόδους

Οι διαφορές του πραγματικού τελεστικού ενισχυτή με τον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή είναι ότι, οι πραγματικοί τελεστικοί ενισχυτές έχουν πολύ μεγάλη διαφορική ενίσχυση αλλά όχι άπειρη όπως έχουν οι ιδανικοί τελεστικοί ενισχυτές. Στους ιδανικούς τελεστικούς ενισχυτές η αντίσταση εισόδου είναι άπειρη ενώ στους πραγματικούς τελεστικούς ενισχυτές η αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγάλη αλλά όχι άπειρη.

Επιπροσθέτως η αντίσταση εξόδου στους ιδανικούς τελεστικούς ενισχυτές είναι μηδέν ενώ στους πραγματικούς τελεστικούς ενισχυτές είναι πολύ μικρή αλλά όχι μηδέν ενώ και το εύρος διέλευσης συχνοτήτων είναι μικρό στον πραγματικό τελεστικό ενισχυτή αλλά όχι άπειρο όπως ισχύει στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή. Με λίγα λόγια η λειτουργία του πραγματικού τελεστικού ενισχυτή πλησιάζει πάρα πολύ την λειτουργία του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή αλλά δεν είναι ίδια.

Η τάση εξόδου του πραγματικού τελεστικού ενισχυτή δίνεται από την σχέση:

$$U_o = A_o U_{id} = A_o (u_2 - u_1)$$

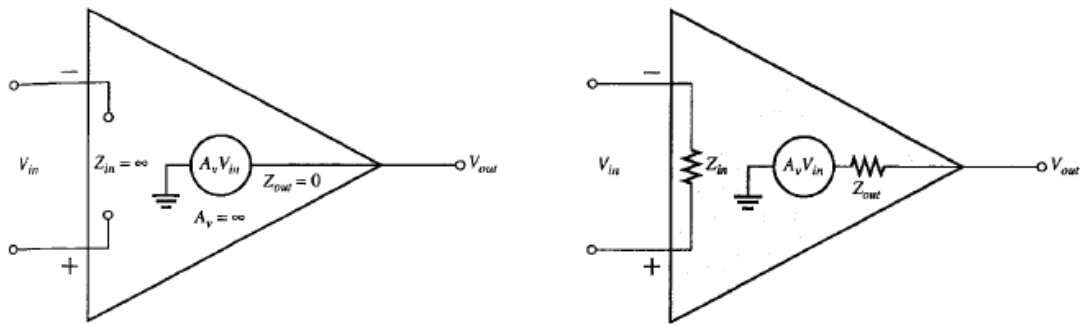
Όπου A_o = η ενίσχυση τάσης ή διαφορικής απολαβής ανοικτού βρόχου

U_{id} = Η διαφορική τάση εισόδου

u_1 = Η τάση της μη αναστρέφουσας εισόδου προς την γη

u_2 = Η τάση της αναστρέφουσας εισόδου προς την γη

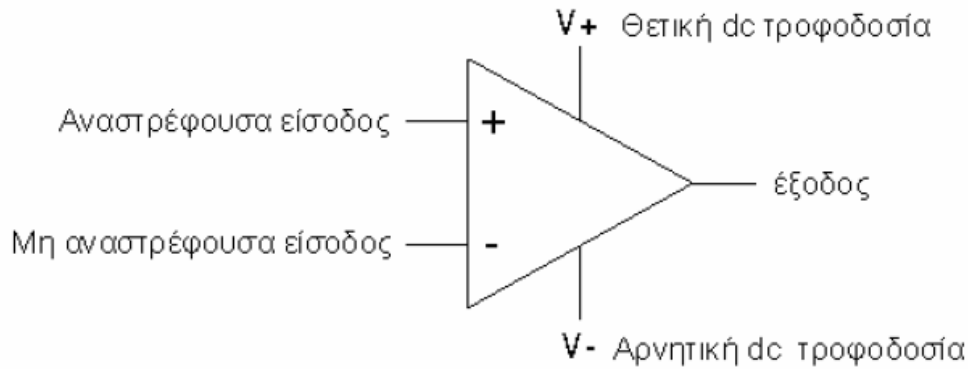
Από την παραπάνω εξίσωση εξάγεται το συμπέρασμα πως η τάση εξόδου u_o είναι ανάλογη της αλγεβρικής διαφοράς των 2 τάσεων εισόδου. Με άλλα λόγια ο τελεστικός ενισχυτής ενισχύει την διαφορά μεταξύ των 2 τάσεων εισόδου και όχι τις ίδιες τις τάσεις. (Τσιατούχας, 2011) Στην εικόνα 5 φαίνεται ένας πραγματικός και ένας ιδανικός τελεστικός ενισχυτής.



Εικόνα 5: Πραγματικός τελεστικός ενισχυτής και ιδανικός τελεστικός ενισχυτής

1.4 Ο Ιδανικός Τελεστικός ενισχυτής

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής προσομοιάζει έναν τέλειο ενισχυτή τάσης ο οποίος συχνά ονομάζεται πηγή τάσης ελεγχόμενη από την τάση. Το σύμβολο που εμφανίζεται στην εικόνα 6 είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύμβολο με τους 5 πιο σημαντικούς ακροδέκτες. Η μη αναστρέφουσα είσοδος συμβολίζεται με (+), η αναστρέφουσα είσοδος συμβολίζεται με (-) ενώ η θετική και η αρνητική τροφοδοσία συμβολίζονται με (V+) και (V-). Η δεξιά κορυφή του τριγώνου είναι η έξοδος του ενισχυτή ενώ το δυναμικό της αναστρέφουσας εισόδου προς την γη συμβολίζεται με v_2 ενώ της μη αναστρέφουσας εισόδου με v_1 και της εξόδου με v_{out} .



Εικόνα 6: Συμβολισμός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή

Σύμφωνα με τον Καγιάφα(2011) ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει άπειρο κέρδος τάσης, άπειρη συχνότητα μοναδιαίου κέρδους, άπειρη σύνθετη αντίσταση εισόδου και άπειρο CMRR. Παράλληλα έχει μηδενική αντίσταση εξόδου, μηδενικά παραμένοντα και μηδενικό ρεύμα πόλωσης.

Θεωρητικά λοιπόν, το κέρδος τάσης χωρίς φορτίο θεωρείται άπειρο ενώ η R_o θεωρείται μηδενική. Η έξοδος V_o ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση:

$$V_{out} = A_d(V_2 - V_1)$$

Και θα πρέπει να ικανοποιεί και την διπλή ανισότητα $-V_{cc} \leq V_{out} \leq +V_{cc}$. Στον παρακάτω πίνακα 1 γίνεται μια σύγκριση των κυριότερων χαρακτηριστικών του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή με τον πραγματικό τελεστικό ενισχυτή που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Χαρακτηριστική Παράμετρος	Πραγματικός T.E	Ιδανικός T.E	Μονάδες
Αντίσταση εισόδου	2	∞	MΩ

Αντίσταση εξόδου	75	0	Ω
Απολαβή τάσης	200.000	∞	
Απόκριση συχνότητας	∞	1,5	MHz
Ρεύμα πόλωσης εισόδου	80	0	nA
Ρεύμα αποστάθμισης εισόδου	20	0	nA
Τάση αποστάθμισης εισόδου	2	0	mV
Λόγος απόρριψης κοινού τρόπου	90	∞	dB
Ρυθμός μεταβολής τάσης εξόδου	0,5	∞	V/ μ s

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ πραγματικού και ιδανικού τελεστικού ενισχυτή

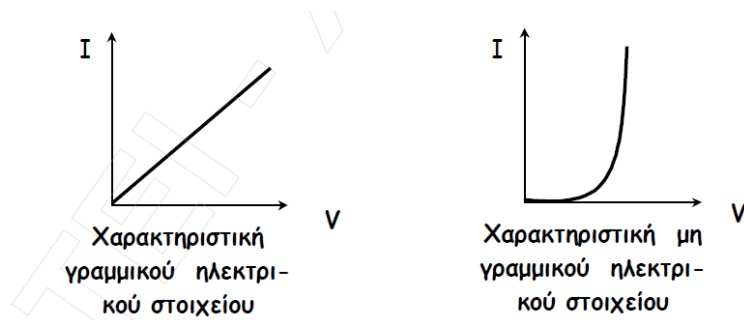
1.5 Μη γραμμικά κυκλώματα

Τα μη γραμμικά κυκλώματα περιέχουν μη γραμμικά ηλεκτρικά στοιχεία όπως είναι η διόδος και το ρεύμα και η τάση που παράγουν αυτά τα κυκλώματα δεν είναι ανάλογα. (Χαλκιάδης,2012)

Από τα μη γραμμικά κυκλώματα τελεστικών ενισχυτών, ο λογαριθμικός και ο αντιλογαριθμικός ενισχυτής είναι εκείνα που έχουν χρησιμοποιηθεί στη χημική οργανολογία. Ως κύρια μη γραμμικά στοιχεία ανατροφοδότησης χρησιμοποιούνται επαφές p-n . Στα μη γραμμικά κυκλώματα περιλαμβάνεται και ο συγκριτής, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρύτατα στους εργαστηριακούς αυτοματισμούς.

Η μη γραμμικές συμπεριφορές στα μη γραμμικά κυκλώματα προέρχεται κατά κύριο λόγο από την ύπαρξη μη γραμμικών συμπεριφορών από τα ηλεκτρικά στοιχεία του μη γραμμικού κυκλώματος. Ο Σταυρινίδης (2007) προσδιόρισε τα στοιχεία αυτά, τα οποία είναι:

- Οι επαφές p-n των διόδων και των τρανζίστορ
- Τα θυρίστορ
- Τα ψηφιακά κυκλωματικά στοιχεία
- Οι τελεστικοί ενισχυτές
- Τα πηνία και τους πυκνωτές



Εικόνα 7: Χαρακτηριστικές γραμμικού και μη γραμμικού κυκλώματος

Η συμπεριφορά των μη γραμμικών κυκλωμάτων μπορεί να προσδιοριστεί με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά σύμφωνα με τον Καλόγηρο(2010):

- Όλες οι λύσεις συγκλίνουν σε ένα από τα πολλά σημεία ισορροπίας του
- Όλες οι λύσεις συγκλίνουν σε μια μοναδική περιοδική λύση
- Όλες οι λύσεις συγκλίνουν σε ένα μοναδικό σημείο λειτουργίας όπως συμβαίνουν και με τα γραμμικά κυκλώματα

Τα μη γραμμικά κυκλώματα παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά και στις πιο απλές περιπτώσεις οι λύσεις συγκλίνουν σε ένα σημείο ισορροπίας τότε το κύκλωμα έχει μια λύση συνεχούς ρεύματος το οποίο μπορεί να διαπιστωθεί σε ένα παλμογράφο.

Όσον αφορά τη χαοτική συμπεριφορά ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, αυτή διακρίνεται εύκολα, καθώς η χρονοσειρά του σήματος μοιάζει «τυχαία». Επίσης, στην XY λειτουργία του παλμογράφου, εμφανίζεται στην οθόνη η τροχιά, η οποία γεμίζει το επίπεδο με περίεργο τρόπο. Η απεικόνιση Poincaré αποτελείται, από ένα πλήθος άπειρων σημείων που σχηματίζουν τον ελκυστή, ενώ το φάσμα ισχύος είναι συνεχές. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η διαδικασία που ακολουθείται σήμερα προκειμένου να μελετηθεί ένα χαοτικό ηλεκτρικό - ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι η εξής:

- Η μοντελοποίηση του κυκλώματος και η εύρεση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων που το περιγράφουν, είναι το πρώτο βήμα, προκειμένου να μελετηθεί αναλυτικά η συμπεριφορά του.

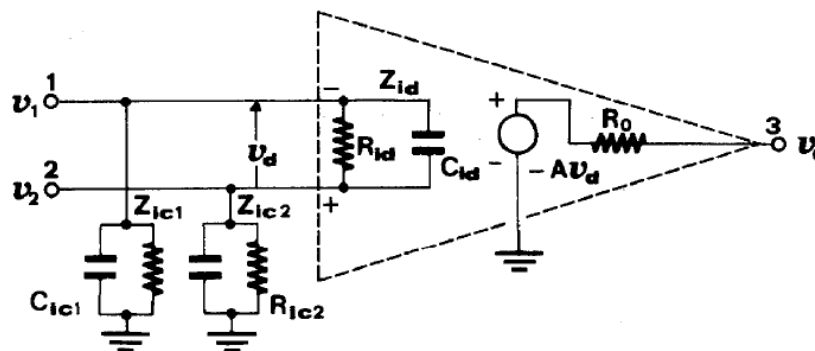
- Η προσομοίωση του κυκλώματος με τη βοήθεια γνωστών εργαλείων (φασικά πορτρέτα, απεικονίσεις Poincaré φάσματα ισχύος, διάγραμμα διακλάδωσης) είναι το δεύτερο βήμα
- Και το τρίτο βήμα, είναι η υλοποίηση του κυκλώματος, η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς του και η ανάλυση των εξαγόμενων πειραματικών δεδομένων. (Καλόγηρος,2010)

Κεφάλαιο 2^ο- Γενικά Χαρακτηριστικά Σχεδίασης Τ.Ε

2.1 Αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του τελεστικού ενισχυτή

Λόγω των χωρητικοτήτων οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου είναι σύνθετες στον τελεστικό ενισχυτή.

Η διαφορική σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{id} είναι η αντίσταση που φαίνεται στα δύο άκρα εισόδου στην εικόνα 8. Αυτή αποτελείται από μία ωμική αντίσταση R_{id} μεγάλης τιμής (π.χ. 300KΩ) και από μία μικρή χωρητικότητα C_{id} , συνήθως μερικών pF, παράλληλη προς την R_{id} . Η σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζεται μεταξύ του κάθε άκρου των εισόδων και της γης αποτελεί την κοινή σύνθετη αντίσταση εισόδου. Συνήθως είναι $Z_{ic1}=Z_{ic2}$. Η κάθε κοινή αντίσταση εισόδου περιλαμβάνει μία μεγάλη ωμική αντίσταση και μία μικρή χωρητικότητα παράλληλα με την ωμική αντίσταση. Πολύ υψηλές αντιστάσεις εισόδου έχουν οι τελεστικοί ενισχυτές που έχουν διαφορικό ενισχυτή εισόδου με FET. Η αντίσταση εξόδου R_o είναι αυτή που φαίνεται μεταξύ της εξόδου και της γης και είναι σε σειρά με την ισοδύναμη πηγή τάσης $-A_u u_d$ του ενισχυτή, όπως φαίνεται στην εικόνα 8. Η R_o κυμαίνεται συνήθως στα όρια μερικών εκατοντάδων ohm.



Εικόνα 8: Αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του Τ.Ε

2.2 Κέρδος Τελεστικού Ενισχυτή

Το συνολικό κέρδος ενός τελεστικού ενισχυτή είναι μια από τις κρισιμότερες παραμέτρους του κυκλώματος του τελεστικού ενισχυτή ιδιαίτερα σε εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων. Στην παρακάτω εικόνα 9 φαίνεται ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή όπου διακρίνονται 3 στάδια καθώς και το κύκλωμα πόλωσης.

Ο Γράσσο(2010) αναφέρει πως στο πρώτο στάδιο είναι ένας διαφορικός ενισχυτής ενώ στο δεύτερο στάδιο είναι ένας ενισχυτής κοινής πηγής. Το τρίτο στάδιο είναι ένας ακόλουθος πηγής.

Το συνολικό κέρδος του ενισχυτή θα ισούται με το γινόμενο των 3 επιμέρους κερδών των 3 σταδίων, δηλαδή:

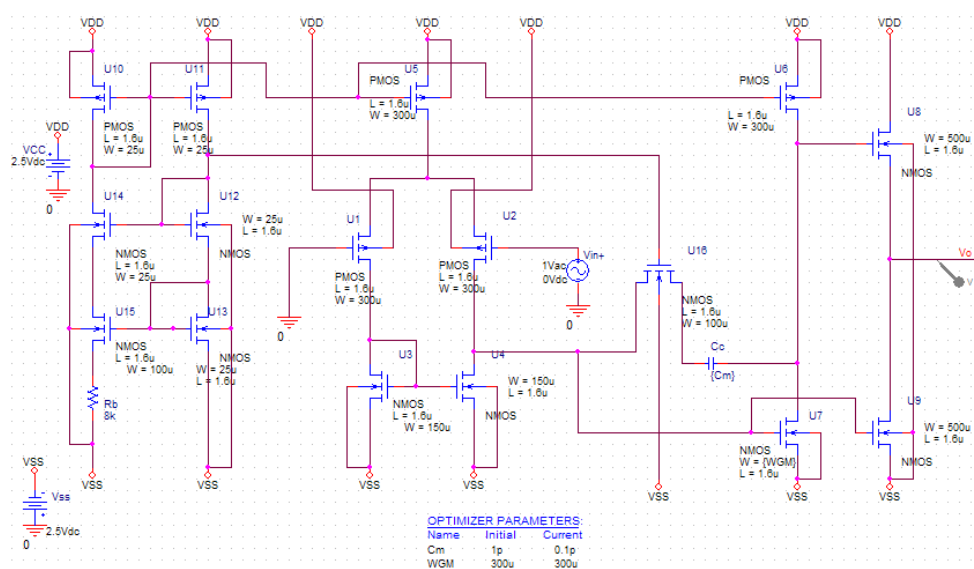
$$A_v = A_{v1} * A_{v2} * A_{v3}$$

Τα επιμέρους κέρδη τάσεως των 3 σταδίων υπολογίζονται από τους ακόλουθους τύπους σύμφωνα πάντα και με τον Γράσσο(2010):

$A_{v1} = g_{m1}(r_{ds2} // r_{ds4})$ Κέρδος διαφορικού ενισχυτή

$A_{v2} = - g_{m7}(r_{ds6} // r_{ds7})$ Κέρδος ενισχυτή κοινής πηγής

$A_{v3} = 0.85 * V/V$ Κέρδος ακόλουθου πηγής



Εικόνα 9: Τελεστικός Ενισχυτής 3 σταδίων και το κύκλωμα πόλωσης

2.3 Απόκριση συχνότητας

Το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δεν είναι σταθερό σε διαφορετικές συχνότητες αλλά παραμένει σταθερό μέχρι κάποιο εύρος της συχνότητας και έπειτα αρχίζει και μειώνεται λόγω της εισαγωγής πόλου από τον πυκνωτή.

Στο κύκλωμα της εικόνας 9 ο πυκνωτής C_c προκαλεί την μείωση του κέρδους του ενισχυτή αλλά σε μικρότερες συχνότητες από την συχνότητα του μοναδιαίου κέρδους του ενισχυτή.

Ο Γράσσο(2010) αναλύοντας το κύκλωμα, υποθέτει πως το τρανζίστορ Q16 δεν υπάρχει καθώς επίσης δεν υπάρχουν και οι υπόλοιποι πυκνωτές εκτός του C_c . Ο πυκνωτής C_c κάνει σύζευξη μεταξύ εισόδου και εξόδου και για αυτό τον λόγο ονομάζεται πυκνωτής Miller.

Εάν χρησιμοποιηθεί το θεώρημα του Miller υπολογίζεται πως:

$$C_{eq} = C_c(1+A_2) = C_c * A_2$$

Το συνολικό κέρδος του τελεστικού ενισχυτή μπορεί να γραφτεί από τον τύπο:

$$A_V = A_3 A_2 A_1 = A_3 A_2 \frac{g_{m1}}{s C_c A_2} = A_3 \frac{g_{m1}}{s C_c}$$

και υποθέτοντας ότι $A_3 = 1$ έχουμε τελικά ότι $A_V(s) = \frac{g_{m1}}{s C_c}$.

Η παραπάνω σχέση μας χρησιμεύει στο να υπολογιστεί χωρίς μεγάλη ακρίβεια η συχνότητα μοναδιαίου κέρδους του ενισχυτή.

Η τιμή αυτή είναι προσεγγιστική επειδή αγνοήθηκαν όλοι οι υπόλοιποι πυκνωτές εκτός του C_c αλλά και επειδή θεωρήθηκε το τρανζίστορ Q16 πως δεν υπάρχει στο κύκλωμα. Επιπροσθέτως η υπόθεση πως το κέρδος του τρίτου σταδίου $A_3=1$ μας δίνει αυτή την προσεγγιστική τιμή.

Θέτοντας λοιπόν $A_V(j\omega_{ta}) = 1$ υπολογίζουμε ότι η συχνότητα μοναδιαίου κέρδους θα είναι:

$$\omega_{ta} = \frac{g_{m1}}{C_C}$$

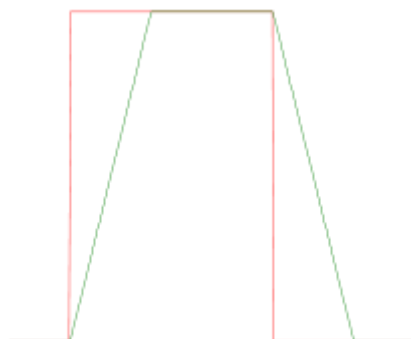
Αυτή η σχέση είναι πολύ σημαντική γιατί μας δίνει την πληροφορία ότι η συχνότητα μοναδιαίου κέρδους είναι ανάλογη του g_{m1} και αντιστρόφως ανάλογη του πυκνωτή αντιστάθμισης C_C .

2.4 Ρυθμός Ανόδου (slew rate)

Ο ρυθμός ανόδου του τελεστικού ενισχυτή ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τους τελεστικούς ενισχυτές.

Ένα θέλαμε να δώσουμε έναν ορισμό στον ρυθμό ανόδου, τότε σύμφωνα και με τον Jung(2012), ρυθμός ανόδου είναι ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο η έξοδος αλλάζει όταν είναι πολύ υψηλά τα σήματα εισόδου. Η λειτουργία ενός κυκλώματος, όταν αυτή εμποδίζεται από τον ρυθμό ανόδου φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 10.

Στην εικόνα 10 η πράσινη γραμμή δείχνει την λειτουργία του κυκλώματος και πως αυτή μεταμορφώνεται όταν εμποδίζεται η λειτουργία του κυκλώματος από τον ρυθμό ανόδου ενώ η κόκκινη γραμμή δείχνει την ιδανική απόκριση λειτουργίας.



Εικόνα 10: Μέγιστος ρυθμός ανόδου T.E

Το κύκλωμα της εικόνας 9 που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο επηρεάζεται από τον ρυθμό ανόδου αλλά και το ρεύμα πόλωσης από το Q5 κατευθύνεται ολόκληρο σε ένα από τους Q1 και Q2. Το που θα πάει το ρεύμα πόλωσης, δηλαδή είτε στον Q1 είτε στον Q2 εξαρτάται με το εάν η τάση εισόδου είναι αρνητική ή θετική.

Όταν η τάση είναι θετική περνάει από τον Q1 και το ρεύμα του βγαίνει από τον πυκνωτή αντιστάθμισης C_c και ισούται με το I_{D5} αφού την ίδια στιγμή το Q2 βρίσκεται στην αποκοπή.

Από τον ορισμό του Jung(2012) και παρατηρώντας ότι $v_2 = v_{out}$ τότε ο ρυθμός ανόδου ισούται με:

$$SR = \frac{dv_{out}}{dt} = \frac{I_{C_{c-max}}}{C_c} = \frac{I_{D5}}{C_c}$$

όπου χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις $q=CV$ και $I = dq / dt = C(dv / dt)$.

Ο Γράσσο(2010) αναφέρει πως για να βελτιωθεί ο ρυθμός ανόδου του τελεστικού ενισχυτή θα πρέπει να αυξηθεί ο V_{effl} . Αλλά μια αύξηση του V_{effl} προκαλεί την μείωση της διαγωγιμότητας του πρώτου σταδίου του κυκλώματος της εικόνας 9. Το αποτέλεσμα αυτής της μείωσης της διαγωγιμότητας είναι η αύξηση του θερμικού θορύβου και η μείωση του κέρδους τάσης.

2.5 Ροή ρεύματος στους τελεστικούς ενισχυτές

Ένα από τα σημαντικότερα σημεία της λειτουργίας του τελεστικού ενισχυτή είναι η ροή του ρεύματος. Οι τελεστικοί ενισχυτές τροφοδοτούνται από 2 τάσεις, τις +VCC και -VEE. (Πορλίδας,2009)

Η τάση + Vcc είναι η πηγή ρεύματος που έχει στην διάθεση του ο τελεστικός ενισχυτής ενώ η διαφορά δυναμικού είναι η στρόφιγγα όπως αναφέρει και ο Δημητρακόπουλος (2013) που εμφανίζεται στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Οι τάσεις τροφοδοσίας +VCC και -VEE έχουν 2 ρόλους:

- Ο πρώτος είναι να παρέχουν το απαραίτητο ρεύμα στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή το οποίο θα μοιραστεί μεταξύ του φορτίου της εξόδου και του δικτύου ανάδρασης
- Ο δεύτερος ρόλος είναι να πολώσουν τα τρανζίστορ που περιέχονται στον τελεστικό ενισχυτή στο κατάλληλο σημείο λειτουργίας

Όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες 12 και 13 το ρεύμα της εξόδου i_O μπορεί να κυλάει είτε έξω είτε μέσα από τον τελεστικό ενισχυτή ανάλογα με τις συνθήκες του κυκλώματος.

Ο Δημητρακόπουλος(2013) αναφέρει πως όταν το ρεύμα κυλάει προς τα έξω από τον τελεστικό ενισχυτή τότε ισχύει πως:

$$i_{CC} = i_{EE} + i_O$$

Αντίθετα, όταν το ρεύμα κυλάει μέσα στον τελεστικό ενισχυτή τότε ισχύει πως:

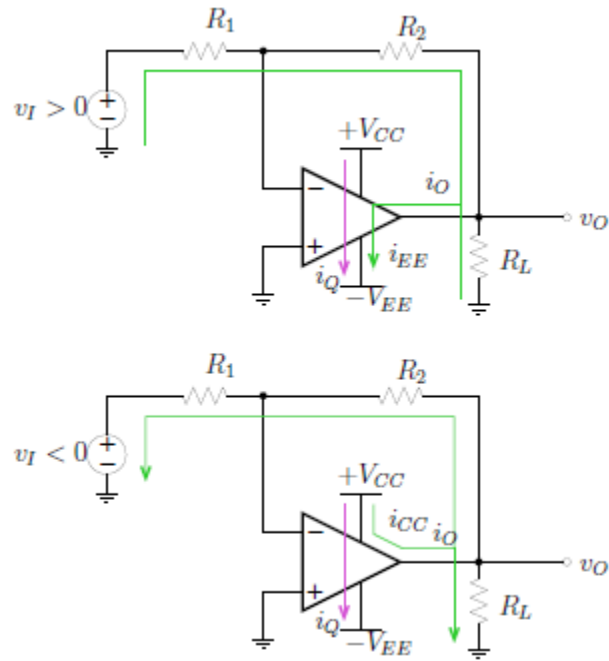
$$i_{EE} = i_{CC} + i_O$$

Το στατικό ρεύμα που χρειάζεται έτσι ώστε να πολωθούν κατάλληλα τα τρανζίστορ του τελεστικού ενισχυτή συμβολίζεται με i_Q .

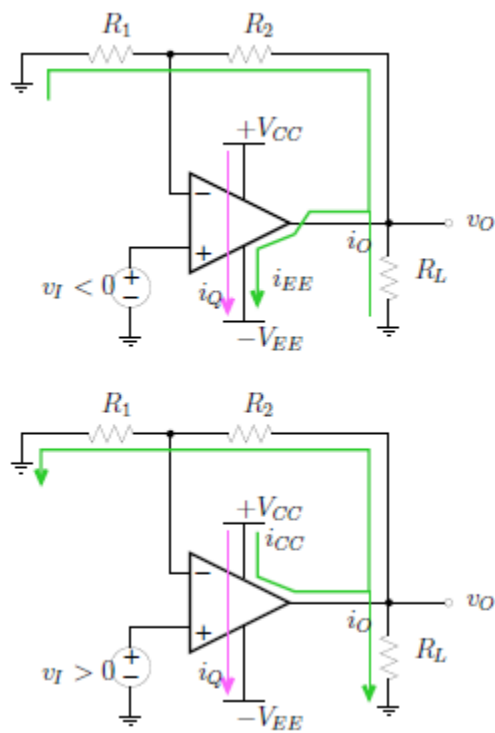
Στις ιδανικές συνθήκες, το στατικό ρεύμα i_Q θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρό γίνεται.

Στις εικόνες 11 και 12 φαίνεται με πράσινο χρώμα η ροή του ρεύματος ανάλογα με το πρόσημο της τάσης εισόδου v_I για την μη αναστρέφουσα και για την αναστρέφουσα τοπολογία του ενισχυτή.

Σε κάθε περίπτωση το ρεύμα εξόδου του τελεστικού ενισχυτή i_Q μοιράζεται σε 2 μέρη με το ένα να κυλάει προς το δίκτυο ανάδρασης και το άλλο από ή προς το φορτίο RL.



Εικόνα 11: Ροή ρεύματος για την μη αναστρέφουσα τοπολογία του τελεστικού ενισχυτή



Εικόνα 12: Ροή ρεύματος για την αναστρέφουσα τοπολογία του τελεστικού ενισχυτή

Κεφάλαιο 3ο – Βασικά μη γραμμικά κυκλώματα με Τελεστικό Ενισχυτή

3.1 Τελεστικός ενισχυτής σε μη γραμμικά κυκλώματα

Ο τελεστικός ενισχυτής όταν χρησιμοποιείται σε μη γραμμικά κυκλώματα εμφανίζει στην έξοδο του την διαφορά τάσης των εισόδων, ενισχυμένη όμως κατά ένα παράγοντα ενίσχυσης A ($U_0 = Au_i$, $U_i = U_+ - U_-$).

Θεωρητικά η ενίσχυση τάσης A είναι άπειρη αλλά επί του πρακτέου έχει μια πολύ μεγάλη τιμή που κυμαίνεται στο 10^4 ή ακόμα και μεγαλύτερη.

Ο Πορλιδάς(2009) σημειώνει πως εάν δεν εφαρμοστεί καμία ανάδραση, όταν η διαφορά των εισόδων είναι της τάξης των mV τότε το πιθανότερο είναι η έξοδος να βρίσκεται σε θετικό ή αρνητικό κόρο. Για να εξασφαλίσουμε ότι η έξοδος θα είναι σε κόρο τότε εφαρμόζουμε θετική ανάδραση στο κύκλωμα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε ότι η έξοδος θα οδηγηθεί σε έναν κόρο μόλις η μία είσοδος ξεπεράσει έστω και ελάχιστα την άλλη.

Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό των τελεστικών ενισχυτών μας βοηθάει να συγκρίνουμε 2 τάσεις με αποτέλεσμα να μπορούμε να κατασκευάσουμε διάφορα κυκλώματα όπως ο συγκριτής ή ο ταλαντωτής.

Οι τελεστικοί ενισχυτές μπορούν να μεταβάλλουν μια τάση εξόδου με ορισμένη ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή εκφράζεται ως η κλίση του τριγωνικού σήματος εξόδου, όταν στην είσοδο εφαρμόζεται υπεροδηγημένο ημιτονικό σήμα υψηλής συχνότητας.

Αυτό το χαρακτηριστικό των τελεστικών ενισχυτών ονομάζεται ρυθμός ανόδου και μετρείται σε βολτ ανά δευτερόλεπτο και οι τιμές που παίρνει είναι γύρω στα 500 V/ μ sec.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιάσουμε τις λειτουργίες του τελεστικού ενισχυτή ως:

- Συγκριτή τάσης
- Απλό ασταθή πολυδομητή
- Μονοσταθή πολυδομητή
- Ασύμμετρο πολυδομητή
- Κύκλωμα ανιχνευτή του μηδενός
- Γεννήτρια κλιμακωτής τάσης – πολυδομητής
- Γεννήτρια τριγωνικών και τετραγωνικών σημάτων με 2 τελεστικούς ενισχυτές
- Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση
- Συγκριτής τάσης με υστέρηση

3.2 Συγκριτής Τάσης

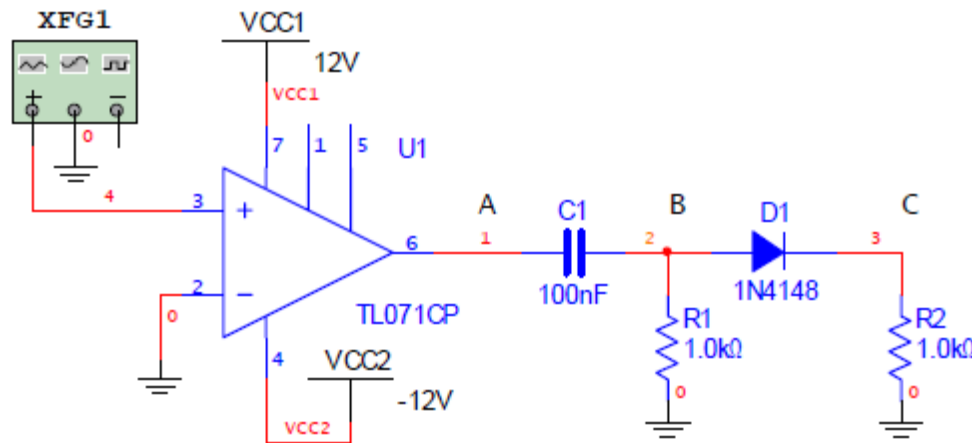
Ο Τελεστικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συγκριτής τάσης 2 σημάτων και σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς ανάδραση με την τάση εισόδου να εισέρχεται στην μια είσοδο και η τάση αναφοράς να εισέρχεται στην άλλη.

Ο Κυριακόπουλος (2012) σημειώνει πως υπάρχουν 2 χαρακτηριστικές διατάξεις οι οποίες είναι:

- Ο Ανιχνευτής μηδενός όπου η μια είσοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι η γείωση με συνέπεια όταν η είσοδος του διέρχεται από το μηδέν να αλλάζει η πολικότητα της εξόδου
- Η δεύτερη χαρακτηριστική διάταξη είναι η ανιχνευτής βαθμίδας διάφορος του μηδενός όπου ανιχνεύονται επίπεδα τάσεων διάφορα του μηδενός. Αυτό συμβαίνει όταν συνδέσουμε την τάση αναφοράς στην αναστρέφουσα είσοδο και το σήμα εισόδου στην μη-αναστρέφουσα.

Στο κύκλωμα του ανιχνευτή μηδενός της εικόνας 13 παράγεται στην έξοδο (σημείο C) μια αιχμή τάσης κάθε φορά που η ανερχόμενη τάση εισόδου διέρχεται από το μηδέν. Η είσοδος αναστροφής χρησιμοποιείται ως είσοδος αναφοράς και στο συγκεκριμένο κύκλωμα συνδέεται στη γείωση, δηλαδή σε δυναμικό μηδέν (μπορεί να

συνδεθεί σε οποιαδήποτε τάση αναφοράς V_{ref} και η αιχμή τάσης να εμφανίζεται κάθε φορά που η ανερχόμενη τάση εισόδου διέρχεται από αυτήν).



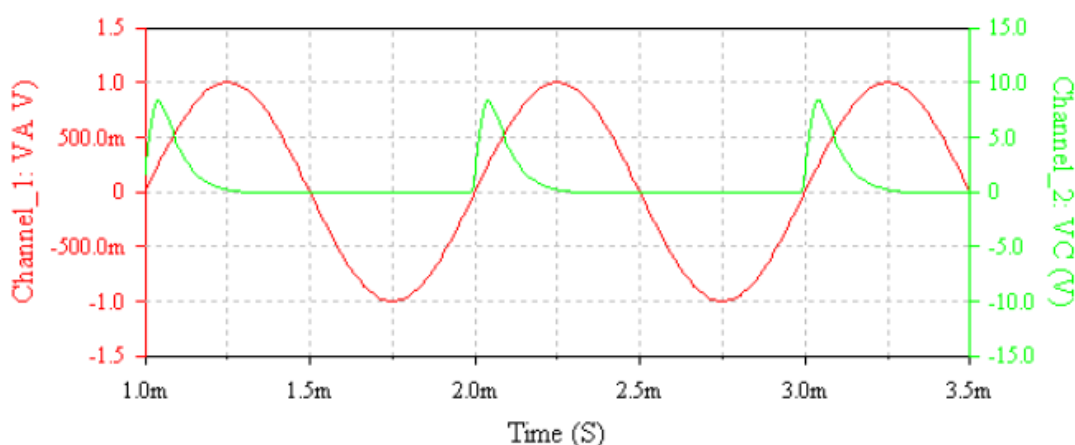
Εικόνα 13: Κύκλωμα ανιχνευτή του μηδενός

Όταν η τάση στην είσοδο μη αντιστροφής γίνεται θετική, η διαφορά τάσης των εισόδων $U_i = U_+ - U_-$ προκύπτει και αυτή θετική και έτσι η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή (σημείο A του κυκλώματος), λόγω της μεγάλης ενίσχυσης, μεταβαίνει στο θετικό κόρο και διατηρείται εκεί όσο η διαφορά δυναμικού των εισόδων του παραμένει θετική, δηλαδή σε όλη τη διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου. Όταν η τάση εισόδου περάσει στο αρνητικό τμήμα της ημιπεριόδου, η διαφορά τάσης των εισόδων $U_i = U_+ - U_-$ γίνεται αρνητική με αποτέλεσμα και η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή (σημείο A του κυκλώματος), λόγω της μεγάλης ενίσχυσης, να οδηγηθεί σύντομα στον αρνητικό κόρο και να διατηρηθεί εκεί όσο η διαφορά δυναμικού των εισόδων του είναι αρνητική, δηλαδή σε όλη τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου. Στο σημείο A συνεπώς εμφανίζεται μια κυματομορφή σχεδόν τετραγωνική και σε φάση με το σήμα εισόδου.

Η έξοδος στη συνέχεια οδηγείται σε έναν πυκνωτή. Κατά τη θετική ημιπερίοδο ο πυκνωτής φορτίζει με σταθερά χρόνο $\tau=R1 \cdot C1$ και το ρεύμα φόρτισης δημιουργεί στα άκρα της αντίστασης R1 (σημείο B) μια διαφορά δυναμικού, η οποία ελαττώνεται εκθετικά. Το ίδιο συμβαίνει και κατά την αρνητική ημιπερίοδο με αντίθετη πολικότητα ώστε να δημιουργούνται στο σημείο B αιχμές οι οποίες εμφανίζουν εναλλάξ αντίθετη πολικότητα. Επειδή στο σημείο A η κυματομορφή

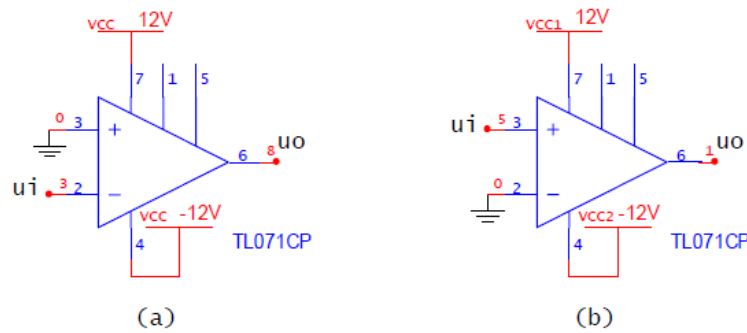
είναι σχεδόν τετραγωνική, η μετάβαση από το θετικό δυναμικό στο αρνητικό είναι απότομη, με αποτέλεσμα, στον ήδη φορτισμένο από τη θετική ημιπερίοδο πυκνωτή, να εμφανίζεται αντίστροφη διαφορά δυναμικού, αναγκάζοντας έτσι τον τελεστικό ενισχυτή να δίνει υψηλό σχετικά ρεύμα, ώστε να φορτιστεί ο πυκνωτής, μέσω της $R1$, με αυτήν την πολικότητα. Το φαινόμενο αυτό κάνει τις αιχμές να εμφανίζονται με μεγάλο πλάτος, μεγαλύτερο από πλάτος της τάσης κόρου.

Στο τέλος η διόδος αποκόπτει τα αρνητικά τμήματα, αφού κατά τη διάρκεια αυτών πολώνεται ανάστροφα και το τελικό αποτέλεσμα είναι να εμφανίζεται ένας σύντομος παλμός στην έξοδο του κυκλώματος κάθε φορά που η τάση εισόδου ανερχόμενη περνάει από το μηδέν. Μετά από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος, στην εικόνα 13 φαίνονται οι κυματομορφές της εισόδου και της εξόδου του κυκλώματος.



Εικόνα 14 : Κυματομορφές εισόδου (V_i κόκκινη) και εξόδου (V_C πράσινη)

Ο Πορλιδάς(2009) σημειώνει πως υπάρχουν 2 κυκλώματα συγκριτών τάσης με τελεστικό ενισχυτή. Αυτά είναι όταν υπάρχει ένα κύκλωμα συγκριτή τάσης με αναστροφή και ένα χωρίς αναστροφή όπως φαίνεται και στην εικόνα 15.

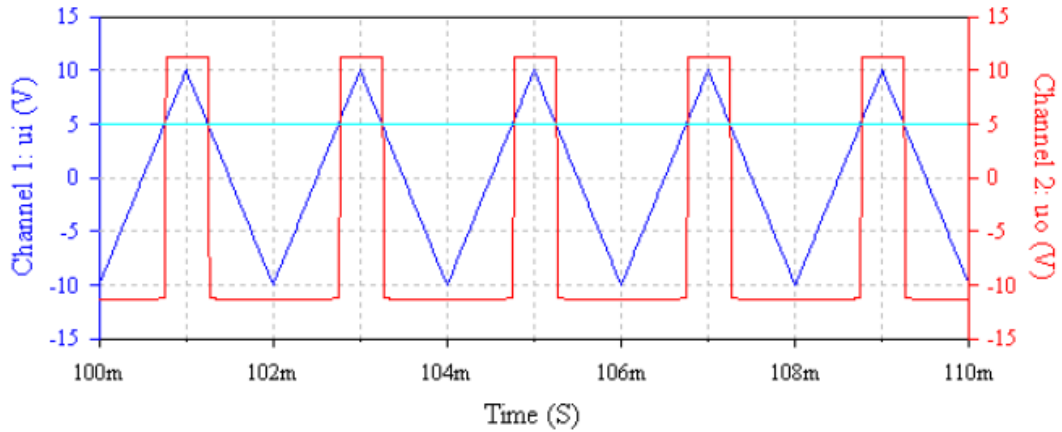


Εικόνα 15: Κύκλωμα συγκριτή τάσης με τελεστικό ενισχυτή με αναστροφή (a) και χωρίς αναστροφή (b)

Στο κύκλωμα του συγκριτή τάσης με αναστροφή η σύγκριση της τάσης εισόδου u_i γίνεται με την τάση αναφοράς V_{ref} η οποία είναι συνδεδεμένη στην άλλη είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Στα κυκλώματα της εικόνας 13 η σύγκριση γίνεται με το δυναμικό της γείωσης αφού η δεύτερη είσοδος του κάθε κυκλώματος είναι γειωμένη. Όταν η τάση εισόδου ξεπεράσει έστω και ελάχιστα το μηδέν, η έξοδος περνάει τον αρνητικό κόρο ενώ όταν γίνει ελάχιστα αρνητική η έξοδος θα περάσει στον θετικό κόρο. Ακριβώς το αντίστροφο συμβαίνει στο κύκλωμα b της εικόνας 13b όπου είναι ο συγκριτής τάσης χωρίς αναστροφή.

Ο Πορλιδάς(2009) επιπροσθέτως αναφέρει πως τα κυκλώματα λειτουργούν πολύ καλά σε χαμηλές συχνότητες. Σε υψηλές συχνότητες, όμως, παρουσιάζουν μια καθυστέρηση στη μετάβαση από τη μια κατάσταση κόρου στην άλλη. Η αλλαγή στην κατάσταση της εξόδου γίνεται σε λίγο μεγαλύτερη θετική ή αρνητική τάση δίνοντας την εντύπωση διαφοράς φάσης εισόδου - εξόδου. Επίσης η μεταβολή από τη μια κατάσταση στην άλλη δεν γίνεται ακαριαία, αλλά το μέτωπο της μετάβασης παρουσιάζει μια κλίση. Το φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο έντονο σε μεγαλύτερες συχνότητες σήματος εισόδου.

Εάν γίνει η προσομοίωση του κυκλώματος της εικόνας 15a θα παρουσιαστούν οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου της εικόνας 16 με τάση αναφοράς τα 5V.



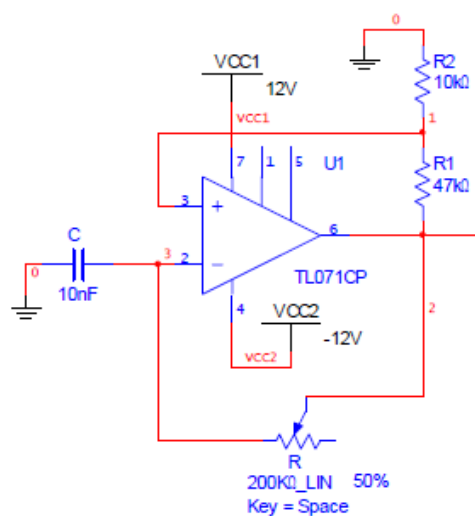
Εικόνα 16: Κυματομορφές εισόδου – εξόδου συγκριτή τάσης χωρίς αναστροφή ως προς τάση αναφοράς 5V

3.3 Απλός ασταθής πολυδονητής

Οι πολυδονητές είναι κυκλώματα τα οποία παράγουν συνεχόμενους τετραγωνικούς παλμούς χωρίς να χρειάζονται εξωτερική διέγερση για να ταλαντωθούν. Για αυτό τον λόγο χαρακτηρίζονται και αυτοδιεγείρομενα κυκλώματα.

Ο απλός ασταθής πολυδονητής που παρουσιάζεται στην παρούσα παράγραφο παράγει κυματομορφές οι οποίες είναι συμμετρικές τόσο στην τάση όσο και στον χρόνο.

Στην παρακάτω εικόνα 17 φαίνεται ένα κύκλωμα ενός απλού ασταθούς πολυδονητή.



Εικόνα 17: Κύκλωμα απλού ασταθούς πολυδονητή

Ο Πορλιδάς(2009) αναφέρει πως η λειτουργία του κυκλώματος ενός ασταθούς πολυδονητή βασίζεται στην συνεχόμενη σύγκριση των τάσεων u_- και u_+ . Πρακτικά αυτό σημαίνει πως η λειτουργία ενός απλού ασταθούς πολυδονητή βασίζεται στον έλεγχο του πρόσημου της διαφοράς τάσης του τελεστικού ενισχυτή.

Η είσοδος της μη αναστροφής συνδέεται με τον διαιρέτη τάσης εξόδου που είναι R1-R2 και με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η θετική ανάδραση που θα κάνει τον τελεστικό ενισχυτή να λειτουργεί σε καταστάσεις κόρου. Ο Κυριακόπουλος(2012) αναφέρει πως υποθετικά, οι τάσεις κόρου είναι ίσες κατά απόλυτη τιμή και ισούνται με:

$$(|V_{+k}| = |V_{-k}| = V_{ok}), \quad 3.3.1$$

τότε στην είσοδο μη αναστροφής μπορούν να υπάρξουν δύο τιμές τάσης:

$$V_+ = \pm(V_{ok}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \pm \beta V_{ok}, \quad 3.3.2$$

Αυτές οι τιμές τάσης είναι οι τιμές με τις οποίες συγκρίνεται το σήμα που εφαρμόζεται στην είσοδο αναστροφής. Η είσοδος αναστροφής συνδέεται στο άκρο του πυκνωτή C, ο οποίος φορτίζει μέσω της R από την τάση εξόδου.

Εάν υποθεθεί πως η έξοδος βρίσκεται στο θετικό κόρο. Η τάση στην είσοδο μη αναστροφής θα είναι $+ \beta V_{ok}$ λόγω του διαιρέτη τάσης R1-R2. Η αναστρέφουσα είσοδος θα βρίσκεται σε δυναμικό $- \beta V_{ok}$ από τον προηγούμενο κύκλο και ο πυκνωτής C θα αρχίζει να φορτίζει μέσω της R, με σταθερά χρόνου $\tau=R \cdot C$, μέχρι να φτάσει σε τάση $+ \beta V_{ok}$

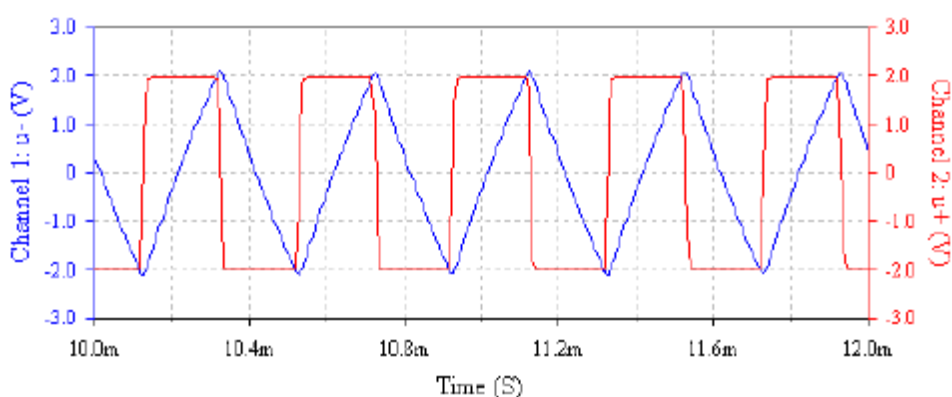
Μόλις η τάση στα άκρα του πυκνωτή C φτάσει σε τάση $+ \beta V_{ok}$ και την ξεπεράσει ελάχιστα, η είσοδος αναστροφής περνάει σε υψηλότερο δυναμικό από τη μη αναστρέφουσα και έτσι η έξοδος οδηγείται στον αρνητικό κόρο. Όσο η έξοδος είναι στον αρνητικό κόρο, στην είσοδο μη αναστροφής η τάση θα είναι $- \beta V_{ok}$ και ο πυκνωτής C εκφορτίζεται (φορτίζει με αντίθετη όμως πολικότητα) μέσω της R, με την ίδια σταθερά χρόνου, μέχρι να φτάσει σε τάση $- \beta V_{ok}$. Ο χρόνος εκφόρτισης T_F προκύπτει ίσος με το χρόνο φόρτισης με παρόμοιο τρόπο (αλλάζοντας τα πρόσημα

των τάσεων στις αρχικές εξισώσεις της σχέσης 3.3.1). Έτσι στην έξοδο προκύπτουν συμμετρικοί τετραγωνικοί παλμοί με περίοδο:

$$T = 2RC \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right)$$

3.3.3

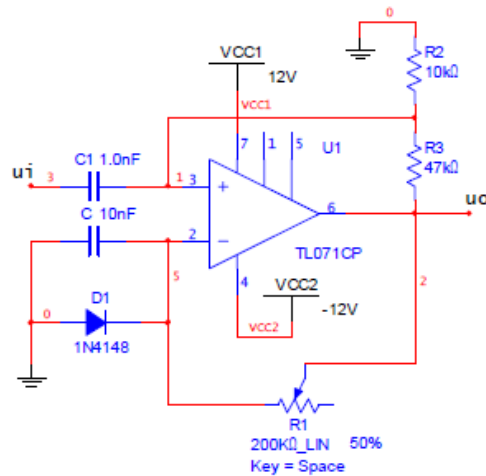
Στην εικόνα 18 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος της εικόνας 17.



Εικόνα 18: Κυματομορφές εισόδου μη αντιστροφής (u+ κόκκινη) και εισόδου αντιστροφής (u- μπλε) του συμμετρικού πολυδονητή

3.4 Μονοσταθής πολυδονητής

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο από τον Πορλιδά(2009) οι πολυδονητές είναι κυκλώματα που παράγουν συνεχόμενους τετραγωνικούς παλμούς χωρίς να χρειάζονται εξωτερική διέγερση για να ταλαντωθούν. Όμως πολλές φορές δημιουργείται η ανάγκη για παραγωγή ενός και μόνο παλμού σταθερής διάρκειας μετά από εξωτερική διέγερση ανεξάρτητης διάρκειας. Αυτό επιτυγχάνεται με τα κυκλώματα του μονοσταθιού πολυδονητή όπως αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα 19.



Εικόνα 19: Μονοσταθής πολυδονητής

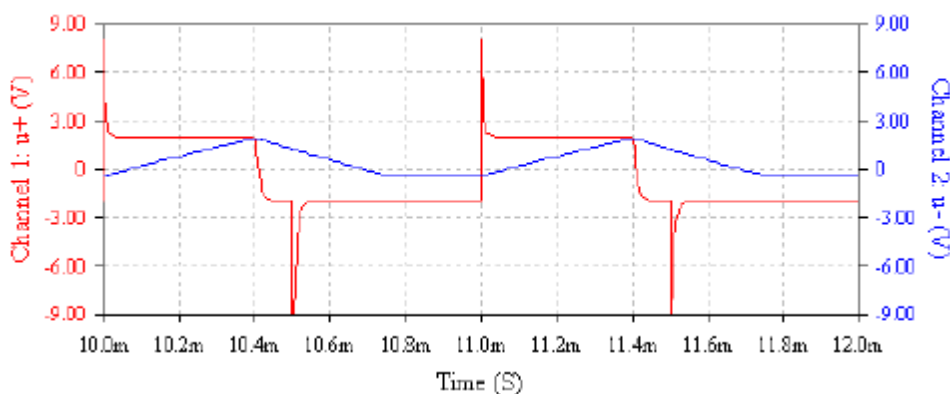
Ο Δημητρακόπουλος(2013) σημειώνει πως στα κυκλώματα του μονοσταθούς πολυδονητή με τη προσθήκη μιας διόδου παράλληλα συνδεδεμένης με τον πυκνωτή στην είσοδο αναστροφής όπως φαίνεται και στην εικόνα 19 επιτυγχάνεται η παραγωγή ενός και μόνο παλμού μετά από εξωτερική διέγερση ανεξάρτητης διάρκειας.

Στο κύκλωμα του μονοσταθούς πολυδονητή, όταν η έξοδος βρίσκεται στο αρνητικό κόρο, άγει η διάοδος D_1 και η αναστρέφουσα είσοδος βρίσκεται σε δυναμικό $-V_D$. Αν η είσοδος μη αναστροφής βρίσκεται σε χαμηλότερο δυναμικό μέσω του διαιρέτη τάσης $R_2 - R_3$ ($-\beta V_{ok} < -V_D$) τότε η έξοδος θα παραμένει αμετάβλητη στον αρνητικό κόρο. Σε περίπτωση που επιδράσει ένας θετικός παλμός στην είσοδο του κυκλώματος, θα εμφανιστεί στην είσοδο μη αναστροφής, μέσω του πυκνωτή C_1 , ένας σύντομος παλμός που θα οδηγήσει την έξοδο σε θετικό κόρο. Η είσοδος μη αναστροφής θα βρεθεί τότε μέσω του διαιρέτη τάσης R_2-R_3 σε δυναμικό $+\beta V_{ok}$. Η διάοδος D_1 θα είναι σε αποκοπή και ο πυκνωτής C θα φορτίζει μέσω της R_1 , με σταθερά χρόνου $\tau=R_1 \cdot C$, μέχρι να φτάσει σε τάση $+\beta V_{ok}$. (Πορλιδάς,2009)

Μόλις η τάση στα άκρα του πυκνωτή C φτάσει σε τάση $+\beta V_{ok}$ και την ξεπεράσει ελάχιστα, η είσοδος αναστροφής περνάει σε υψηλότερο δυναμικό από τη μη αναστρέφουσα και έτσι η έξοδος οδηγείται στον αρνητικό κόρο. Όσο η έξοδος είναι στον αρνητικό κόρο, στην είσοδο μη αναστροφής η τάση θα είναι $-\beta V_{ok}$ λόγω του διαιρέτη τάσης R_2-R_3 και ο πυκνωτής C θα εκφορτίζεται (φορτίζει με αντίθετη

όμως πολικότητα) μέσω της RI , με την ίδια σταθερά χρόνου, μέχρι να φτάσει σε τάση . Σε αυτήν την τάση θα παραμείνει, με αποτέλεσμα να σταθεροποιηθεί το κύκλωμα με την έξοδό του στον αρνητικό κόρο, μέχρι να επιδράσει νέος παλμός στην είσοδο.

Στην εικόνα 20 οι κυματομορφές στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος της εικόνας 19.



Εικόνα 20: Κυματομορφές εισόδου μη αναστροφής (u+ κόκκινη) και εισόδου αναστροφής (u- μπλε) του μονοσταθούς πολυδονητή

Όπως αναφέρει και ο Δημητρακόπουλος(2013), στην εικόνα 20 παρατηρείται ότι μόλις η τάση στην είσοδο αναστροφής ξεπεράσει την τάση της εισόδου μη αναστροφής, η έξοδος μεταβαίνει σε αρνητικό κόρο και οι πυκνωτές C και $C1$ εκφορτίζονται μέσω της $R1$ ο C και μέσω των $R2$ και $R3$ ο $C1$.

Στην προαναφερόμενη περίπτωση, η σταθερά του χρόνου $C1$ είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη σταθερά του χρόνου C . Στην περίπτωση όμως που η αντίσταση $R1$ γίνει πολύ μικρή, οι δυο σταθερές χρόνου γίνονται συγκρίσιμες.

Ο Πορλιδάς(2009) όμως, αναφέρει πως υπάρχει μια οριακή τιμή αντίστασης που κάτω από αυτή την τιμή και ενώ παράλληλα οι C και η $C1$ εκφορτίζονται, η αναστρέφουσα είσοδος γίνεται μικρότερη από την μη αναστρέφουσα και έτσι με αυτό τον τρόπο η έξοδος μεταβαίνει και πάλι σε θετικό κόρο.

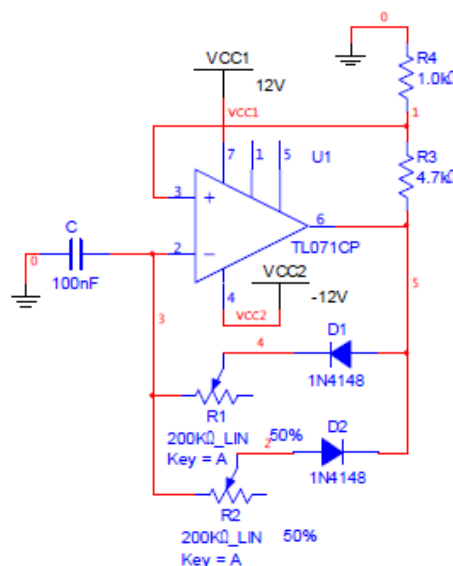
Με αυτό τον τρόπο το κύκλωμα οδηγείται σε μια ταλάντωση με απόσβεση στη γραμμική περιοχή λειτουργίας, εξισώνοντας τις δύο εισόδους κοντά στο δυναμικό απόκλισης εισόδου και την έξοδο στο μηδέν, μέχρι να επιδράσει η αρνητική αιχμή στην είσοδο μη αναστροφής που θα οδηγήσει την έξοδο σε αρνητικό κόρο. Ο παράγοντας αυτός περιορίζει την ελάχιστη διάρκεια του παλμού εξόδου. Ωστόσο

μπορεί να ελαττωθεί και άλλο η διάρκεια του παλμού εξόδου αν μεταβάλλουμε τη σταθερά χρόνου του $C1$ και αλλάζοντας τις αντιστάσεις $R2$ και $R3$.

3.5 Ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής

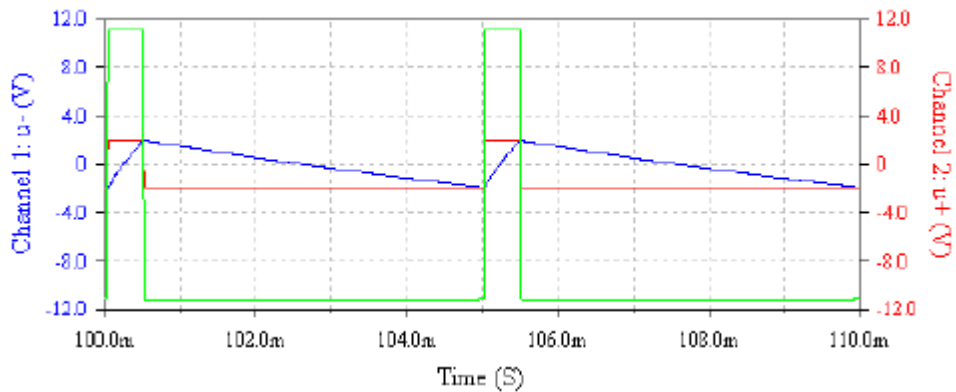
Για τον ασύμμετρο ασταθή πολυδονητή ο Κυριακόπουλος(2012) αναφέρει πως καλύπτει την ανάγκη ανεξάρτητης ρύθμισης της χρονικής διάρκειας του θετικού μέρους του παλμού από τον αρνητικό. Για να επιτευχθεί αυτή η ασυμμετρία τοποθετείται στο κύκλωμα του ασταθούς πολυδονητή ένας συνδυασμός αντιστάσεων και διόδων, ώστε ο πυκνωτής C να φορτίζει με διαφορετική σταθερά χρόνου για θετική τάση εξόδου και διαφορετική για αρνητική.

Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται ένα τέτοιο κύκλωμα ασύμμετρου ασταθής πολυδονητή στον οποίο όταν η έξοδος βρίσκεται στο θετικό κόρο, άγει η διάδος D_1 και ο πυκνωτής C φορτίζει με σταθερά χρόνου R_1C . Όταν βρίσκεται στον αρνητικό κόρο, άγει η διάδος D_2 και ο πυκνωτής C φορτίζει με σταθερά χρόνου R_2C . Έτσι μπορεί να ρυθμιστεί ανεξάρτητα η διάρκεια του κάθε μέρους του παλμού και να εμφανίζεται ο παλμός ασύμμετρος.



Εικόνα 21: Ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής

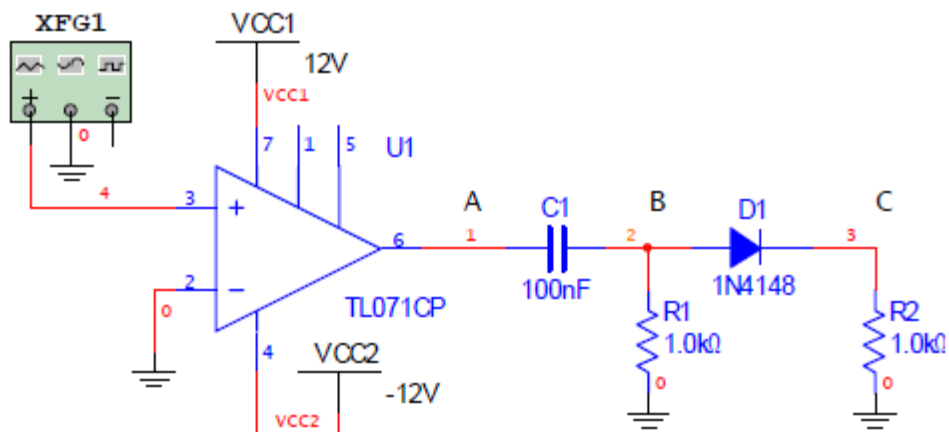
Στην εικόνα 22 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή και στην έξοδο από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος της εικόνας 21.



Εικόνα 22: Κυματομορφές εισόδου μη αναστροφής (u+ κόκκινη), εισόδου αναστροφής (u- μπλε) και εξόδου (πράσινη) του ασύμμετρου πολυδονητή

3.6 Κύκλωμα ανιχνευτή του μηδενός

Στο κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή του ανιχνευτή του μηδενός παράγεται στην έξοδο μια αιχμή τάσης κάθε φορά που η ανερχόμενη τάση εισόδου διέρχεται από το μηδέν. Ως είσοδος αναφοράς χρησιμοποιείται η είσοδος αναστροφής και στο κύκλωμα της εικόνας 23 συνδέεται στην γείωση δηλαδή σε μηδενικό δυναμικό.



Εικόνα 23: Κύκλωμα ανιχνευτή του μηδενός

Ο Πορλίδας (2009) αναφέρει πως όταν η τάση στην είσοδο μη αντιστροφής είναι θετική τότε η διαφορά τάσης των εισόδων $U_i = u_+ - u_-$ προκύπτει και αυτή θετική και έτσι η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή λόγω της μεγάλης ενίσχυσης μεταβαίνει στον θετικό κόρο και διατηρείται εκεί όσο η διαφορά δυναμικού των εισόδων παραμένει θετική. Αυτό φαίνεται στο σημείο A του κυκλώματος.

Ο Χαλκιάδης(2012) αναφέρει πως όταν η τάση εισόδου περάσει στο αρνητικό τμήμα της ημιπεριόδου, η διαφορά τάσης των εισόδων $U_i = u_+ - u_-$ γίνεται αρνητική με αποτέλεσμα η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή λόγω της μεγάλης ενίσχυσης να οδηγείται στον αρνητικό κόρο και να διατηρείται εκεί πέρα όσο η διαφορά δυναμικού των εισόδων παραμένει αρνητική. Στο σημείο A του κυκλώματος εμφανίζεται μια κυματομορφή σχεδόν τετραγωνική και σε φάση με το σήμα εισόδου.

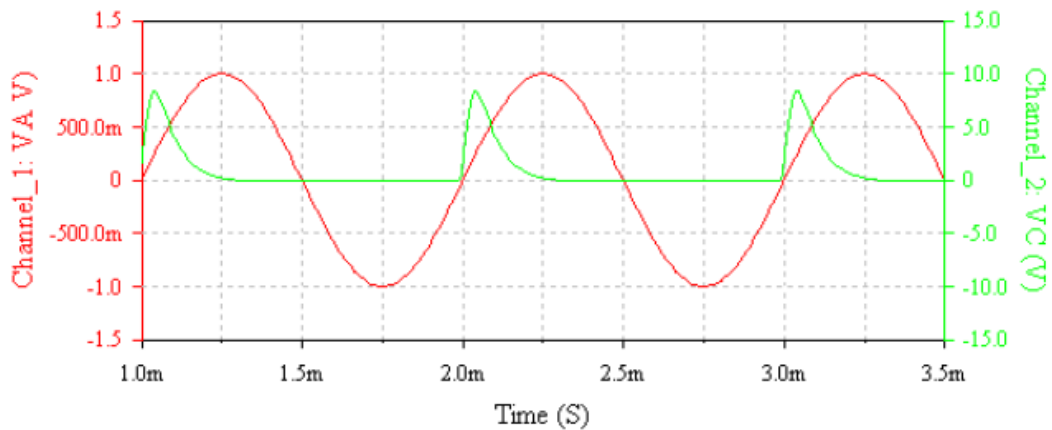
Κατόπιν η έξοδος οδηγείται σε ένα πυκνωτή και ο πυκνωτής όταν βρίσκεται στην θετική ημιπερίοδο φορτίζει με σταθερά χρόνο

$$\tau = R1 * C1$$

Το ρεύμα φόρτισης δημιουργεί στα άκρα της αντίστασης $R1$ (στο σημείο B του κυκλώματος της εικόνας 23) μια διαφορά δυναμικού η οποία όμως ελαττώνεται εκθετικά.

Επειδή στο σημείο A η κυματομορφή είναι σχεδόν τετραγωνική, η μετάβαση από το θετικό δυναμικό στο αρνητικό είναι απότομη, με αποτέλεσμα, στον ήδη φορτισμένο από τη θετική ημιπερίοδο πυκνωτή, να εμφανίζεται αντίστροφη διαφορά δυναμικού, αναγκάζοντας έτσι τον τελεστικό ενισχυτή να δίνει υψηλό σχετικά ρεύμα, ώστε να φορτιστεί ο πυκνωτής, μέσω της $R1$, με αυτήν την πολικότητα. Το φαινόμενο αυτό κάνει τις αιχμές να εμφανίζονται με μεγάλο πλάτος, μεγαλύτερο από πλάτος της τάσης κόρου.

Στο τέλος η δίοδος αποκόπτει τα αρνητικά τμήματα, αφού κατά τη διάρκεια αυτών πολώνεται ανάστροφα και το τελικό αποτέλεσμα είναι να εμφανίζεται ένας σύντομος παλμός στην έξοδο του κυκλώματος κάθε φορά που η τάση εισόδου ανερχόμενη περνάει από το μηδέν. Στην εικόνα 24 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εισόδου – εξόδου από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος της εικόνας 23.

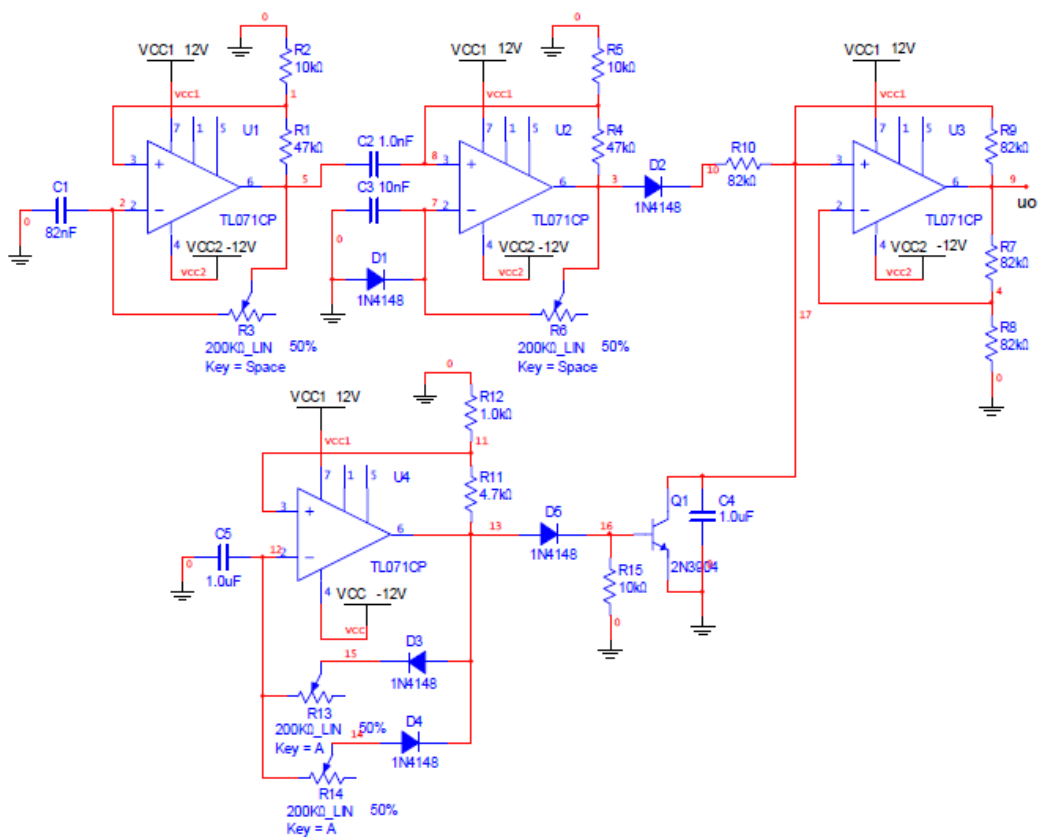


Εικόνα 24: Κυματομορφές εισόδου (Vi κόκκινη) και εξόδου (VC πράσινη)

3.7 Γεννήτρια κλιμακωτής τάσης - Ταλαντωτής

Το κύκλωμα της γεννήτριας της κλιμακωτής τάσης έχει την δυνατότητα να αυξάνει την τάση εξόδου προοδευτικά μέχρι μια πεπερασμένη τιμή και μετά να μηδενίζει. Η διάρκεια που έχει αυτή η προοδευτική αύξηση, το ύψος της αύξησης, η συνολική διάρκεια του παλμού εξόδου καθώς και η παύση ανάμεσα στους παλμούς εξόδου μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα μέσω ποντενσιομέτρων που υπάρχουν στο κύκλωμα. (Χαλκιάδης,2012)

Το κύκλωμα της γεννήτριας κλιμακωτής τάσης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 25.



Εικόνα 25: Κύκλωμα γεννήτριας κλιμακωτής τάσης

Στην γεννήτρια κλιμακωτής τάσης ο τελεστικός ενισχυτής U_1 έχει συνδεθεί ως ασταθής πολυδονητής. Ο τελεστικός ενισχυτής U_1 παράγει συμμετρικούς τετραγωνικούς παλμούς οι οποίοι στην συνέχεια οδηγούνται στον τελεστικό ενισχυτή U_2 ο οποίος είναι συνδεδεμένος σαν μονοσταθής πολυδονητής. (Πορλιδάς,2009). Με αυτό τον τρόπο μπορούν να παράγονται παλμοί ορισμένοι πλάτους οι οποίοι οδηγούνται σε ένα κύκλωμα ολοκληρωτή που συμβολίζεται με U_3 στο κύκλωμα της εικόνας 25.

Κάθε παλμός φορτίζεται μέσω του πυκνωτή του κυκλώματος του ολοκληρωτή C_4 κατά την διάρκεια του θετικού μέρους. Προκειμένου ο πυκνωτής να κρατάει το φορτίο μια διάοδος ανόρθωσης D_2 είναι απαραίτητη.

Στην περίπτωση που η έξοδος U_2 βρίσκεται σε αρνητικό κόρο, η διάοδος D_2 είναι ανάστροφα πολωμένη και με αυτό τον τρόπο εμποδίζεται η εκφόρτιση του πυκνωτή C_4 . Με αυτό τον τρόπο η έξοδος U_3 αυξάνει κατά βήματα σε κάθε παλμό εισόδου. Ο τελεστικός ενισχυτής U_4 είναι συνδεδεμένος στο κύκλωμα σαν ασύμμετρος πολυδονητής ενώ η διάοδος D_5 αποκόπτει την αρνητική συνιστώσα έτσι

ώστε η βάση του Q_1 να μην βρίσκεται σε αρνητικότερο δυναμικό από τον εκπομπό ενώ η αντίσταση R_{15} να εξασφαλίζει το δυναμικό της γείωσης στην βάση όταν η διάοδος D_5 βρίσκεται σε αποκοπή.

Ο Κυριακόπουλος (2012) αναφέρει στην συνέχεια, πως στο θετικό μέρος της εξόδου του U_4 , το τράνζιστορ Q_1 βρίσκεται σε κόρο έτσι ώστε να εκφορτίζεται ο πυκνωτής σε δυναμικό V_{ce} με αποτέλεσμα να μηδενίζεται η έξοδος U_3 .

Ο Πορλίδας(2009) ορίζει την αύξηση της τάσης η οποία πραγματοποιείται προοδευτικά ή κατά βήμα.

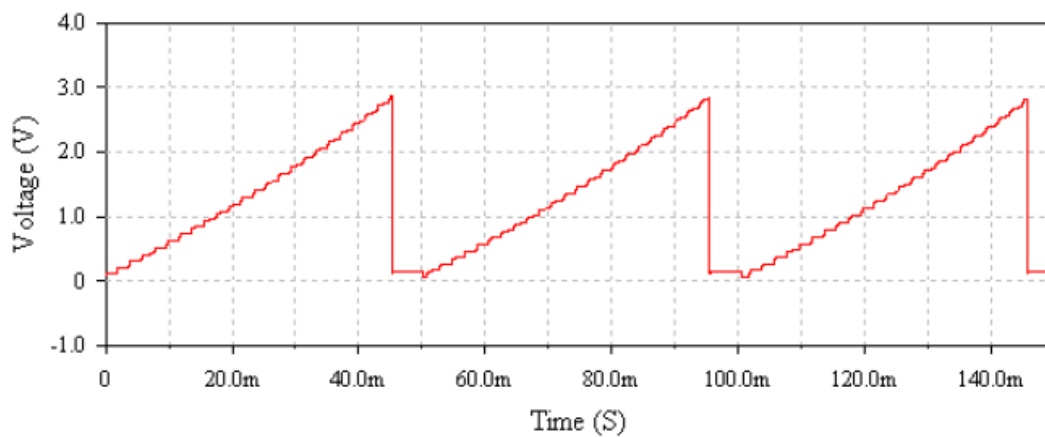
Η διάρκεια της αύξησης της τάσης ρυθμίζεται από την αντίσταση R_3 η οποία αλλάζει την περίοδο της ταλάντωσης U_1 με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται μόνο ο χρόνος του αρνητικού μέρους παλμού εξόδου του U_2 και στην ουσία τον χρόνο που ο πυκνωτής C_4 παραμένει σε σταθερή τάση.

Το ύψος του βήματος της αύξησης της τάσης ρυθμίζεται από την αντίσταση R_6 η οποία καθορίζει την χρονική διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού στην έξοδο του U_2 , δηλαδή τον χρόνο κατά τον οποίο φορτίζεται ο πυκνωτής C_4 και άρα αυξάνεται η τάση εξόδου του U_3 .

Η χρονική διάρκεια του παλμού εξόδου ο οποίος είναι κλιμακωτός ρυθμίζεται από την R_{14} , η οποία διαμορφώνει την διάρκεια του αρνητικού μέρους του παλμού εξόδου του U_4 με αποτέλεσμα να καθορίζεται ο χρόνος που το Q_1 βρίσκεται σε αποκοπή και άρα ο πυκνωτής C_4 φορτίζεται.

Η απόσταση μεταξύ των κυματομορφών ρυθμίζεται από την R_{13} η οποία αλλάζει την διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού εξόδου του U_4 κατά την οποία το Q_1 βρίσκεται στον κόρο και ο πυκνωτής C_4 σε δυναμικό V_{ce} .

Στην εικόνα 26 παρουσιάζεται η κυματομορφή εξόδου του κυκλώματος της γεννήτριας κλιμακωτής τάσης μέσω της προσομοίωσης του κυκλώματος της εικόνας 25.



Εικόνα 26: Κυματομορφή εξόδου της γεννήτριας κλιμακωτής τάσης

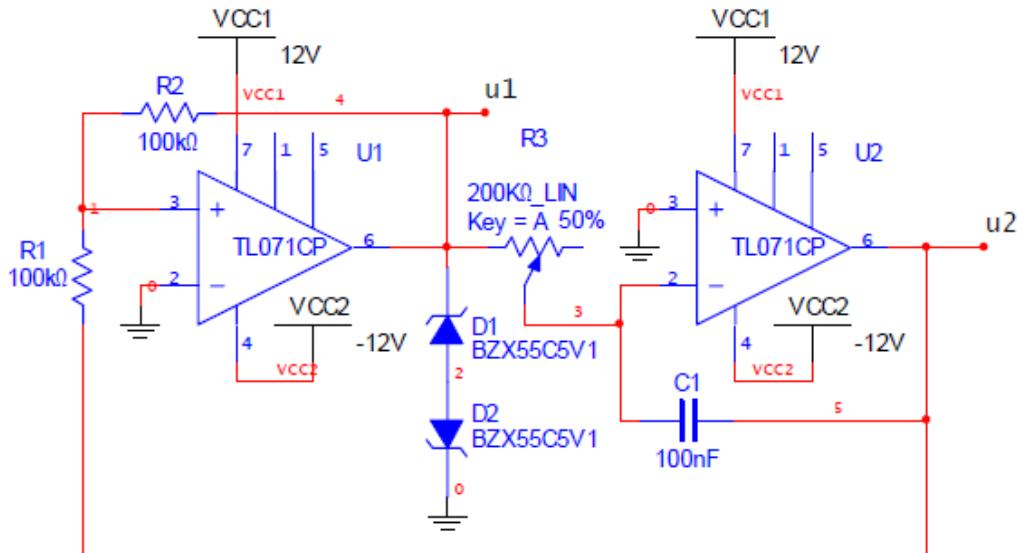
3.8 Γεννήτρια τριγωνικών – τετραγωνικών σημάτων με δύο τ.ε.

Στο κύκλωμα της γεννήτριας τριγωνικών – τετραγωνικών σημάτων με 2 τελεστικούς ενισχυτές που φαίνεται στην εικόνα 27 η έξοδος του ολοκληρωτή καθοδηγείται μέσω του διαιρέτη R_1 - R_2 στην είσοδο μη αναστροφής του συγκριτή και η είσοδος αναστροφής του συγκριτή συνδέεται στην τάση αναφοράς.(γείωση) Ο Κυριακόπουλος(2012) αναφέρει πως μόλις το κύκλωμα τροφοδοτηθεί ο τελεστικός ενισχυτής U_1 οδηγείται σε κατάσταση κόρου λόγω της θετικής ανάδρασης. Η έξοδος του ολοκληρωτή αρχίζει σιγά σιγά να μεταβάλλεται με αρνητική κλίση γραμμικά και μόλις η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή γίνει ελάχιστη αρνητική η έξοδος περνάει σε άλλο κόρο. Κατόπιν ο ολοκληρωτής μεταβάλλεται με θετική κλίση, πάντα γραμμικά μέχρι η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή γίνει ελάχιστη θετική. Έπειτα η έξοδος του ολοκληρωτή θα μεταβεί σε θετικό κόρο συνεχίζοντας τον κύκλο.

Οι δίοδοι zener που βρίσκονται στο κύκλωμα είναι απαραίτητη για την λειτουργία του κυκλώματος. Για να συνεχιστεί η ταλάντωση του κυκλώματος, θα πρέπει η τάση του θετικού κόρου του συγκριτή είναι έστω και ελάχιστα μικρότερη από την τάση του αρνητικού κόρου του ολοκληρωτή έτσι ώστε η τάση στην είσοδο μη αναστροφής του συγκριτή να γίνει ελάχιστη αρνητική.

Η περίοδος του σήματος εξαρτάται από τις RC του κυκλώματος του ολοκληρωτή και από την τάση σύγκρισης του συγκριτή. Εφόσον οι αντιστάσεις R_1

και R_2 είναι ίσες, η αλλαγή της κατάστασης θα συμβεί όταν η τάση εξόδου του ολοκληρωτή γίνει ίση και αντίθετη με την τάση εξόδου του συγκριτή.



Εικόνα 27: Κύκλωμα γεννήτριας τριγωνικών-τετραγωνικών σημάτων με 2 T.E

Το πλάτος των κυματομορφών εξαρτάται από τις διόδους zener ($u_1 = u_2 = V_z + V_d$) που όπως προαναφέρθηκε είναι απαραίτητες για την λειτουργία του κυκλώματος, όταν αυτές είναι όμοιες. Αλλαγή τους με ζεύγος ανόμοιων διόδων θα αλλάξει τη συμμετρία των κυματομορφών τόσο στη διάρκεια όσο και στο πλάτος. Αυτό θα συμβεί γιατί το πλάτος του θετικού μέρους του τετραγωνικού παλμού θα γίνει διαφορετικό κατά απόλυτη τιμή από το αρνητικό, με αποτέλεσμα να διαφοροποιηθεί το ρεύμα φόρτισης από το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή στον ολοκληρωτή. Έτσι το μέτρο της κλίσης στη μεταβολή της εξόδου του ολοκληρωτή θα είναι διαφορετικό όταν αυτή είναι θετική και διαφορετικό όταν είναι αρνητική.

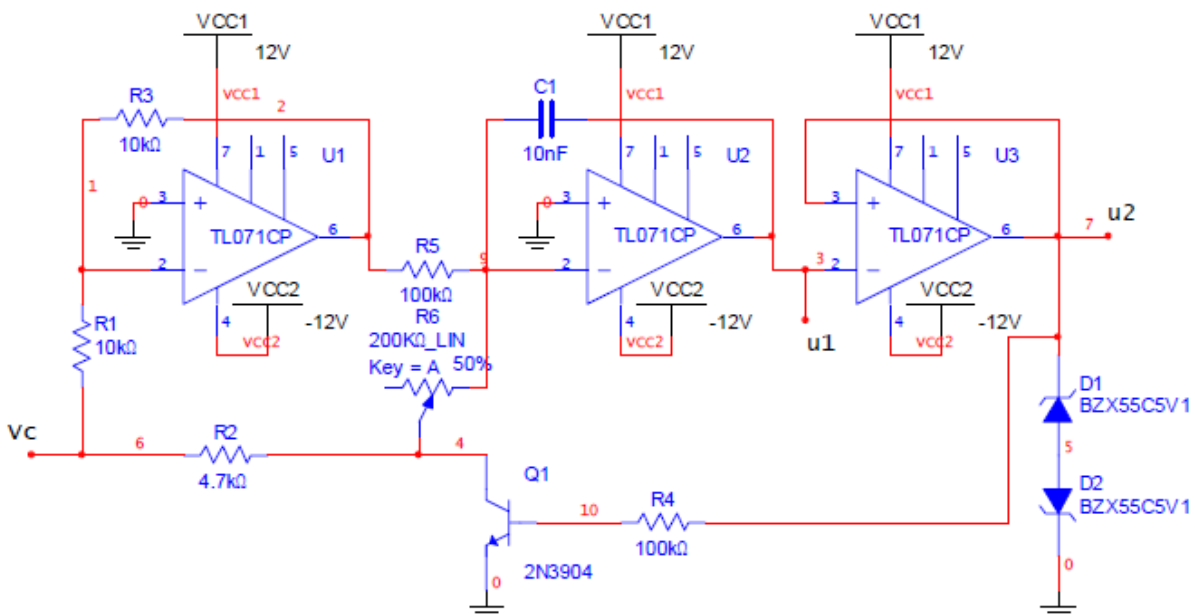
Αν στην είσοδο αναστροφής του συγκριτή συνδεθεί μια τάση αναφοράς διαφορετικής της γείωσης, το αποτέλεσμα θα είναι να εμφανιστεί μία DC συνιστώσα στην τριγωνική κυματομορφή. Επειδή η τάση σύγκρισης θα είναι η τάση αναφοράς V_{ref} αλλαγή της κατάστασης θα συμβαίνει όταν η τάση στην έξοδο του ολοκληρωτή παίρνει τις τιμές:

$$u_2 = 2 \left(V_{ref} \pm \frac{u_1}{2} \right),$$

Με αυτόν τρόπο εισάγεται επί της ουσίας μια DC συνιστώσα πλάτους $2V_{ref}$ στην στην κυματομορφή του ολοκληρωτή.(Πορλιδάς,2009)

3.9 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από την τάση

Στο κύκλωμα της γεννήτριας κλιμακωτής τάσης που παρουσιάστηκε προηγουμένως αυτό που διαπιστώθηκε είναι πως ο μηχανισμός ρύθμισης της συχνότητας ήταν το ποτενσιόμετρο που ήταν συνδεδεμένο πάνω στον ολοκληρωτή και μέσω του οποίου ρυθμιζόταν χειροκίνητα η συχνότητα. Η ανάγκη όμως της αυτόματης ρύθμισης της συχνότητας από ένα κύκλωμα με μια τάση ρύθμισης, οδήγησε στην δημιουργία των ταλαντωτών που ελέγχονται από την τάση όπως αυτός της εικόνας 28.



Εικόνα 28: Κύκλωμα ταλαντωτή ελεγχόμενου από τάση

Στο κύκλωμα της εικόνας 28 ο τελεστικός ενισχυτής U_1 είναι συνδεδεμένος ως αναστροφέας τάσης ρύθμισης, ο τελεστικός ενισχυτής U_2 ως ολοκληρωτής και ο τελεστικός ενισχυτής U_3 ως συγκριτής με υστέρηση.

Το τρανζίστορ Q_1 άγει κατά την θετική ημιπερίοδο με αποτέλεσμα ο πυκνωτής C_1 του ολοκληρωτή να φορτίζει από την έξοδο του U_1 μέσω της αντίστασης R_5 . Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, το Q_1 βρίσκεται σε αποκοπή με αποτέλεσμα ο πυκνωτής C_1 του ολοκληρωτή να φορτίζει από 2 κλάδους του κυκλώματος:

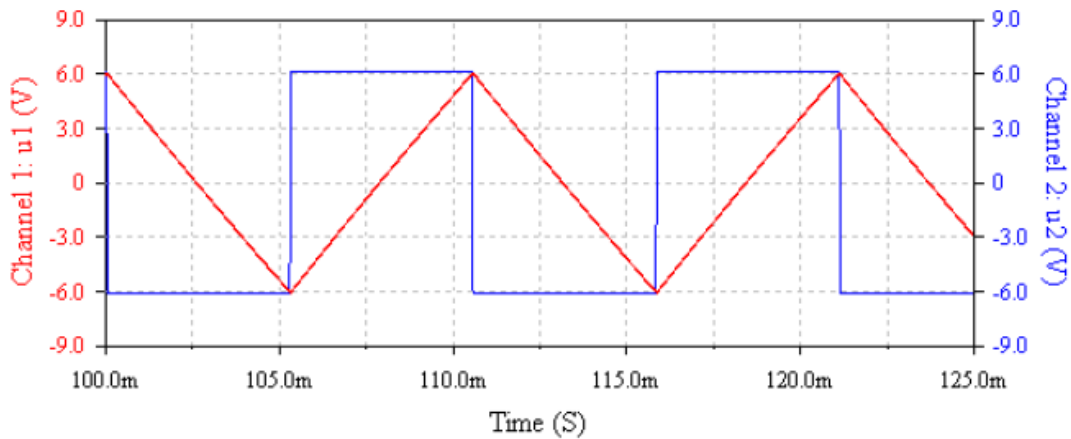
- Από την έξοδο U_1 μέσω της αντίστασης R_5
- και από την VC μέσω των αντιστάσεων R_2 και R_6

Στην περίπτωση που γίνει η κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων R_2, R_5 και R_6 και το ρεύμα που περνάει μέσω των αντιστάσεων R_2 και R_6 είναι μεγαλύτερο από αυτό που περνάει την αντίσταση R_5 , τότε ο πυκνωτής θα φορτίζει μόνο από ρεύμα μέσω του πρώτου κλάδου.

Εάν το ρεύμα που περνάει μέσω των αντιστάσεων R_2 και R_6 είναι ακριβώς το διπλάσιο από αυτό που περνάει μέσα από την αντίσταση R_5 , τότε οι χρόνοι φόρτισης θα είναι ίσοι για τις 2 ημιπεριόδους και οι κυματομορφές θα είναι συμμετρικές. (Χαλκιάδης, 2012)

Για να είναι οι κυματομορφές συμμετρικές σύμφωνα με τον Κυριακόπουλο (2012) θα πρέπει η αντίσταση R_5 να είναι διπλάσια από το άθροισμα των αντιστάσεων R_2 και R_6 .

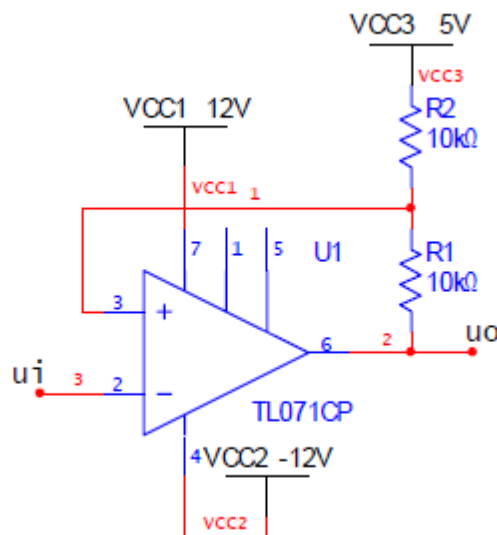
Στην εικόνα 29 παρουσιάζονται οι κυματομορφές, στα διάφορα σημεία του κυκλώματος από την προσομοίωση του κυκλώματος της εικόνας 26 που πραγματοποίησε ο Πορλίδας (2009).



Εικόνα 29: Κυματομορφές λειτουργίας στα σημεία του κυκλώματος U1 και U2

3.10 Συγκριτής τάσης με υστέρηση

Το κύκλωμα του συγκριτή τάσης με υστέρηση παρουσιάζεται στην εικόνα 30.



Εικόνα 30: Συγκριτής τάσης με υστέρηση

Η τάση σύγκρισης είναι η επαλληλία της τάσης εξόδου u_o και της τάσης αναφοράς V_{cc3} μέσα από τον διαιρέτη τάσης R_1 - R_2

Όταν η είσοδος είναι σε αρνητικό δυναμικό, η έξοδος είναι σε θετικό κόρο. Όταν το δυναμικό εισόδου αυξάνει, η έξοδος παραμένει σε θετικό κόρο μεχρι να ξεπεραστεί το δυναμικό σύγκρισης. Θα πρέπει να αναφερθεί πως το δυναμικό σύγκρισης είναι η επαλληλία της τάσης του θετικού κόρου V_{+k} και της τάσης

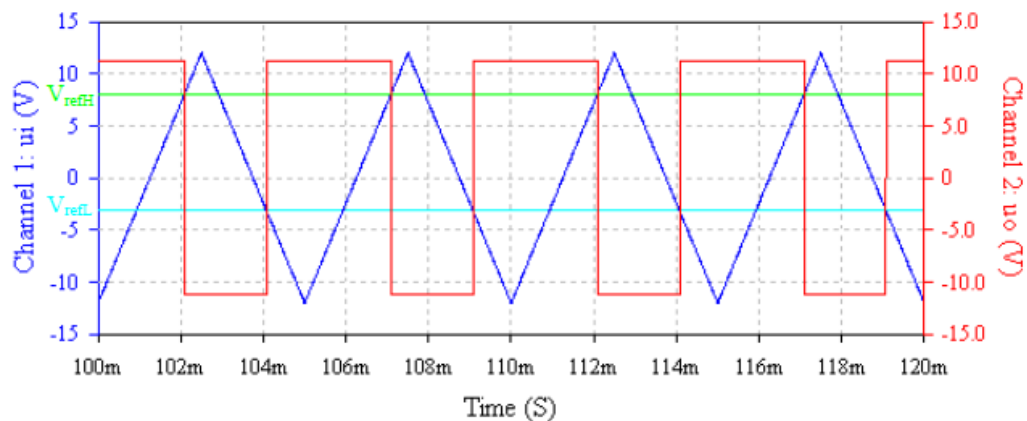
αναφοράς $V_{CC3} = 5V$ όπως διαμορφώνεται μέσα από τον διαιρέτη τάσης R1-R2 και ισούται με:

$$V_{refH} = V_{CC3} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{+k} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad 3.10.1$$

Μόλις η τάση σύγκρισης ξεπεραστεί από την τάση εισόδου, το δυναμικό της εισόδου αναστροφής γίνεται μεγαλύτερο από το δυναμικό εισόδου μη αναστροφής και η έξοδος περνάει στον αρνητικό κόρο.

Για να αλλάξει ξανά κατάσταση η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή θα πρέπει η τάση στην είσοδο της αναστροφής να γίνει μικρότερη από την V_{refL} , η οποία είναι προφανώς μικρότερη από την προηγούμενη τάση αναφοράς.

Ο Πορλιδάς(2009) μετά από εξομοίωση του κυκλώματος του συγκριτή τάσης με υστέρηση της εικόνας 31 κατέληξε στις κυματομορφές εισόδου της εικόνας 31, όπου με πράσινο χρώμα φαίνεται η τάση σύγκρισης και με γαλάζιο χρώμα η V_{refL}



Εικόνα 31: Κυματομορφές εισόδου και εξόδου του συγκριτή τάσης με υστέρηση

Βιβλιογραφία

- 1) Πακτίτης Σ., Τελεστικοί ενισχυτές και γραμμικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 2005
- 2) Λυριωτάκης Α., Ψηφιακά κυκλώματα, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 1997
- 3) Γράσσο Α., Σχεδίαση τελεστικού ενισχυτή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2010
- 4) Χαλκιάδης Ι., Εισαγωγικά στοιχεία ηλεκτρονικών, Σημειώσεις μαθήματος Ηλεκτρονικών, ΤΕΙ Χαλκίδας, Χαλκίδα, 2012
- 5) Καγιάφας Κ., Σημειώσεις μαθήματος ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ΕΜΠ, Αθήνα, 2011
- 6) Κυριακόπουλος Ι., Βιομηχανική ηλεκτρονικά, ΕΜΠ, Αθήνα, 2012
- 7) Πορλίδας Δ., Τελεστικοί ενισχυτές - Κυκλώματα, πειραματικές μετρήσεις και μέθοδοι, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2009

- 8) Σταυρινίδης Σ., Χαρακτηρισμός συμπεριφοράς μη γραμμικού ηλεκτρονικού ταλαντωτή για την παραγωγή χαοτικών σημάτων, Διδακτορική Διατριβή για το τμήμα Φυσικής ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη,2007
- 9) Δημητρακόπουλος Γ., Ηλεκτρονικά κυκλώματα, σημειώσεις μαθήματος, ΤΕΙ Αθήνας, Αθήνα,2013
- 10)Καλαϊτζής Κ., Μελέτη και κατασκευή τελεστικού ενισχυτή με διακριτά στοιχεία, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη,2007
- 11)Καλόγηρος Π., Κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς συζευγμένων μη – γραμμικών ηλεκτρονικών ταλαντωτών Chua, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη,2010
- 12)Τσιατούχας Γ., Τελεστικοί Ενισχυτές, Σημειώσεις μαθήματος Βασικά Ηλεκτρονικά – Μικροηλεκτρονική, Πανεπίστημιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2011
- 13)Boylestad R., Electronic Devices and Circuit Theory, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα,2013
- 14)Meade Russel., Αναλογικά ηλεκτρονικά, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα,1999
- 15)Jung, Walter G. "Chapter 8: Op Amp History". Op Amp Applications Handbook, 2012