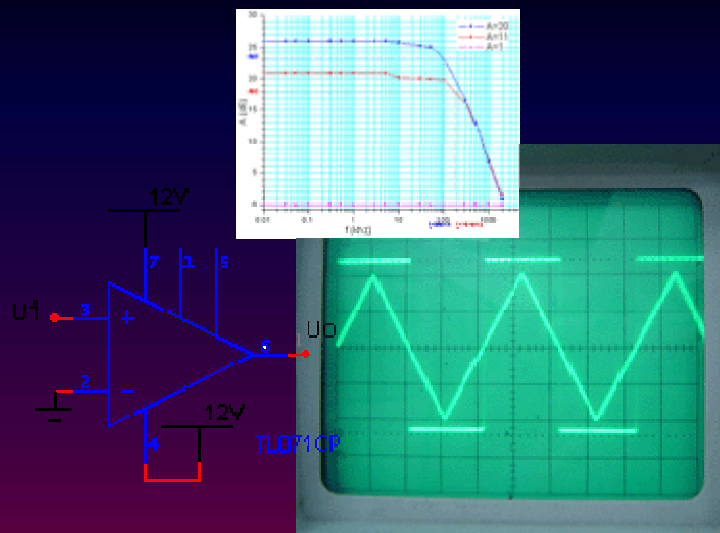


ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ



ΠΟΡΑΙΔΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

ΚΑΙ

ΜΕΘΟΔΟΙ

© 2009

Πορλιδάς Δημήτριος

www.porlidas.gr

dporli@physics.auth.gr

Τελεστικοί Ενισχυτές Κυκλώματα Πειραματικές Μετρήσεις και Μέθοδοι

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα.....	2
1. Τελεστικοί ενισχυτές σε γραμμική λειτουργία	3
1.1. Γενικά.....	3
1.2. Ενισχυτής τάσης με αναστροφή φάσης	5
1.3. Ενισχυτής τάσης χωρίς αναστροφή φάσης.....	6
1.4. Αθροιστής τάσης.....	8
1.4. Ενεργά φίλτρα.....	10
1.5. Ολοκληρωτής αναστροφής.....	13
1.6. Ολοκληρωτής χωρίς αναστροφή.....	17
2. Τελεστικοί ενισχυτές σε μη γραμμική λειτουργία	19
2.1. Γενικά.....	19
2.2. Συγκριτής τάσης.....	20
2.3. Κύκλωμα ανιχνευτή μηδενός.....	22
2.4. Συγκριτής τάσης με υστέρηση (Schmitt trigger)	24
2.5. Απλός ασταθής πολυδονητής.....	27
2.6. Ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής.....	30
2.7. Μονοσταθής πολυδονητής.....	33
2.8. Μονοσταθής πολυδονητής αρνητικού παλμού εξόδου.....	37
3. Γεννήτριες κυματομορφών – ταλαντωτές.....	39
3.1. Γεννήτρια κλιμακωτής τάσης	39
3.2. Γεννήτρια τριγωνικών – τετραγωνικών σημάτων	42
3.3. Γεννήτρια τριγωνικών – τετραγωνικών σημάτων με δύο τ.ε	46
3.4. Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση.....	49

ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

1. ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

1.1. Γενικά

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα προκατασκευασμένο μονολιθικό κύκλωμα μικρών διαστάσεων που συμπεριφέρεται ως ενισχυτής τάσης. Συνδυάζεται με ελάχιστα εξωτερικά εξαρτήματα σχηματίζοντας ενισχυτές τάσης, ακολουθητές τάσης, ενεργά φίλτρα και άλλα κυκλώματα. Τροφοδοτείται συνήθως με συμμετρική τροφοδοσία (+V, -V). Ο τελεστικός ενισχυτής έχει δύο εισόδους και μια έξοδο. Είναι ενισχυτής διαφοράς των τάσεων των εισόδων του. Η μια είσοδος συμβολίζεται με (-) και ονομάζεται είσοδος αναστροφής. Η άλλη συμβολίζεται με (+) και ονομάζεται είσοδος μη αναστροφής. Η τάση εισόδου στον τελεστικό ενισχυτή (v_i) είναι η διαφορά:

$$v_i = v_+ - v_- \quad (1.1)$$

Η τάση εξόδου v_o είναι:

$$v_o = Av_i \quad (1.2)$$

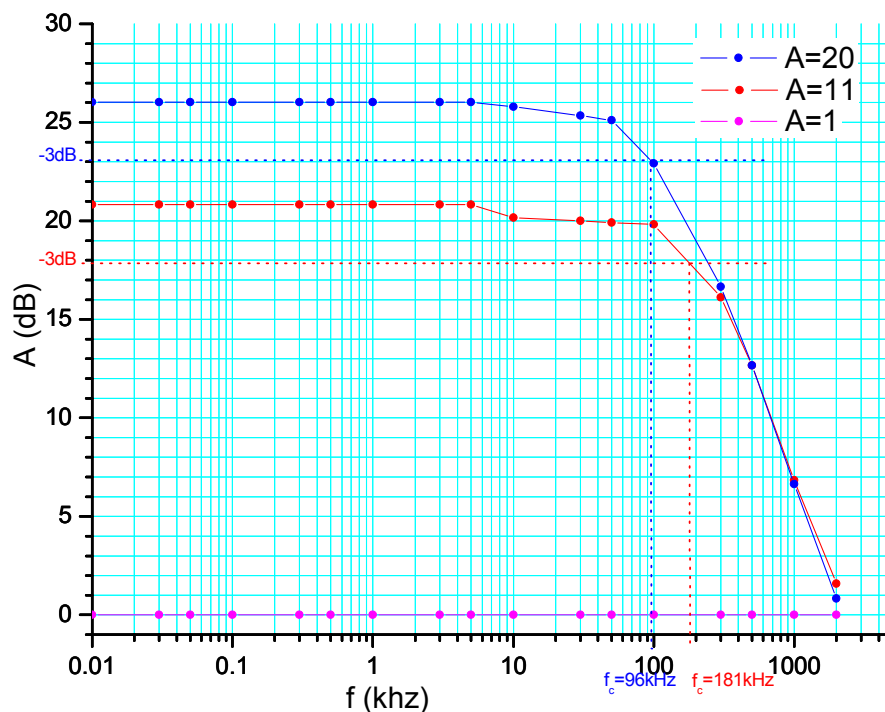
Όπου A είναι η ενίσχυση τάσης του τελεστικού ενισχυτή.

Επειδή η τροφοδοσία στον τελεστικό ενισχυτή είναι συμμετρική, υπάρχει μια μέγιστη θετική τάση εξόδου που ονομάζεται θετική τάση κόρου ($+v_{οκ}$) και μια

μέγιστη αρνητική τάση εξόδου που ονομάζεται αρνητική τάση κόρου ($-v_{ok}$). Οι δύο αυτές τιμές αντιστοιχούν σε μια μέγιστη επιτρεπτή τάση εισόδου, που πάνω από αυτήν το σήμα στην έξοδο εμφανίζεται παραμορφωμένο.

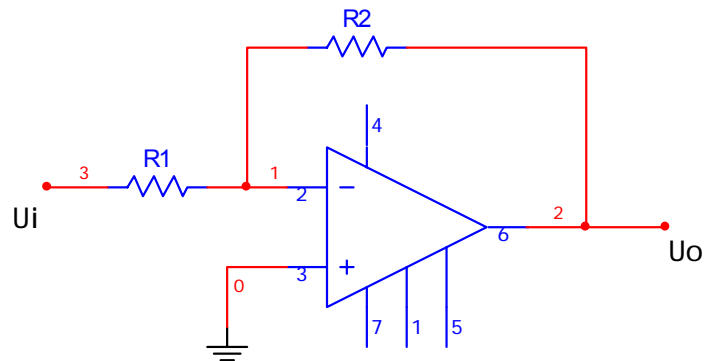
Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει άπειρη ενίσχυση τάσης, άπειρη αντίσταση εισόδου, μηδενική αντίσταση εξόδου και εύρος συχνοτήτων από 0 ως άπειρο. Στην πραγματικότητα οι παραπάνω τιμές είναι πεπερασμένες. Η ρύθμιση της ενίσχυσης γίνεται με αρνητική ανάδραση η οποία εξασφαλίζεται με κατάλληλη συνδεσμολογία αντιστάσεων από την έξοδο προς την είσοδο αναστροφής.

Οι τελεστικοί ενισχυτές δεν παρουσιάζουν την ίδια ενίσχυση σε όλες τις συχνότητες. Η συμπεριφορά τους σε χαμηλές συχνότητες είναι πολύ καλή και η ενίσχυση είναι η αναμενόμενη ακόμα και σε DC σήμα εισόδου. Σε υψηλές συχνότητες όμως παρουσιάζεται ελάττωση της ενίσχυσης. Η συχνότητα αποκοπής εξαρτάται από την ενίσχυση και αυξάνεται με την ελάττωση της ενίσχυσης. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα BODE με πειραματικές τιμές τριών ενισχυτών με διαφορετικό συντελεστή ενίσχυσης.



Σχήμα 1.1. Πειραματικό διάγραμμα BODE των τριών ενισχυτών

1.2. Ενισχυτής τάσης με αναστροφή φάσης



Σχήμα 1.2. Θεωρητικό κύκλωμα ενισχυτή τάσης με αναστροφή φάσης

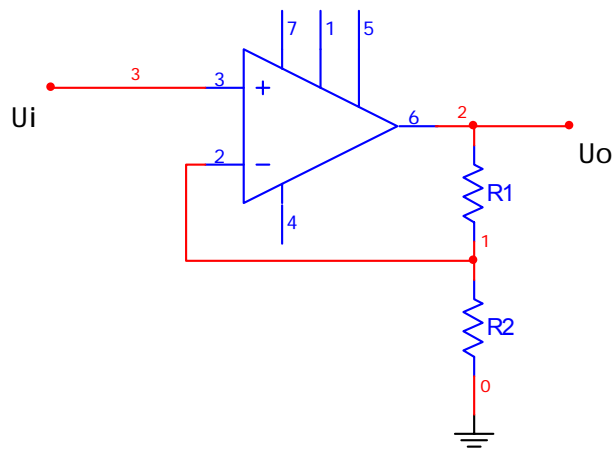
Στη συνδεσμολογία ενισχυτή τάσης με αναστροφή φάσης (σχήμα 1.2), το σήμα εισόδου οδηγείται μέσω της αντίστασης $R1$ στην είσοδο αναστροφής. Ένα μέρος της εξόδου οδηγείται ως αρνητική ανάδραση μέσω της $R2$ στην είσοδο αναστροφής επίσης. Η είσοδος μη αναστροφής συνδέεται σε δυναμικό 0. Η ενίσχυση τάσης (A) του ενισχυτή μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω τρόπο. Επειδή ο ενισχυτής έχει άπειρη αντίσταση εισόδου, το ρεύμα εισόδου i_i θα οδεύει μέσω της $R1$ προς την $R2$ και θα ισούται με:

$$\left. \begin{aligned} i_i &= \frac{v_i - v_+}{R1} = \frac{v_i - 0}{R1} = \frac{v_i}{R1} \\ i_i &= \frac{-v_+ - v_o}{R2} = \frac{0 - v_o}{R2} = -\frac{v_o}{R2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

(1.3)

$$\Rightarrow \frac{v_i}{R1} = -\frac{v_o}{R2} \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R2}{R1} = A$$

1.3. Ενισχυτής τάσης χωρίς αναστροφή φάσης



Σχήμα 1.3. Θεωρητικό κύκλωμα ενισχυτή τάσης χωρίς αναστροφή φάσης

Στη συνδεσμολογία ενισχυτή τάσης χωρίς αναστροφή φάσης (σχήμα 1.3) το σήμα εισόδου οδηγείται στην είσοδο μη αναστροφής. Ένα μέρος της εξόδου οδηγείται ως αρνητική ανάδραση μέσω του διαιρέτη τάσης $R2 - R1$ στην είσοδο αναστροφής. Η ενίσχυση τάσης (A) του ενισχυτή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής με τον παρακάτω τρόπο. Ο ενισχυτής έχει άπειρη αντίσταση εισόδου και έτσι η τάση στην είσοδο αντιστροφής θα είναι:

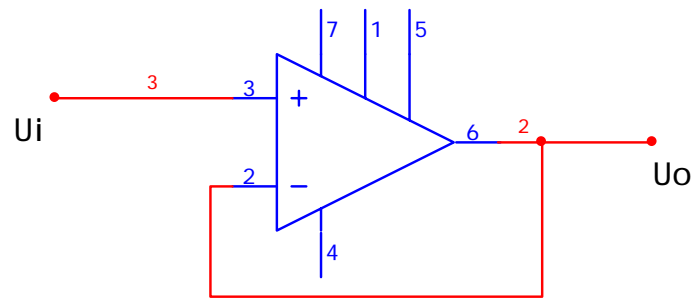
$$v_- = \frac{R2}{R1 + R2} v_o \quad (1.4)$$

Επίσης ισχύει: $v_- \approx v_+$ γιατί $v_- - v_+ = \varepsilon \approx 0$ και επειδή $v_i = v_+$:

$$v_i = \frac{R2}{R1 + R2} v_o \Rightarrow \quad (1.5)$$

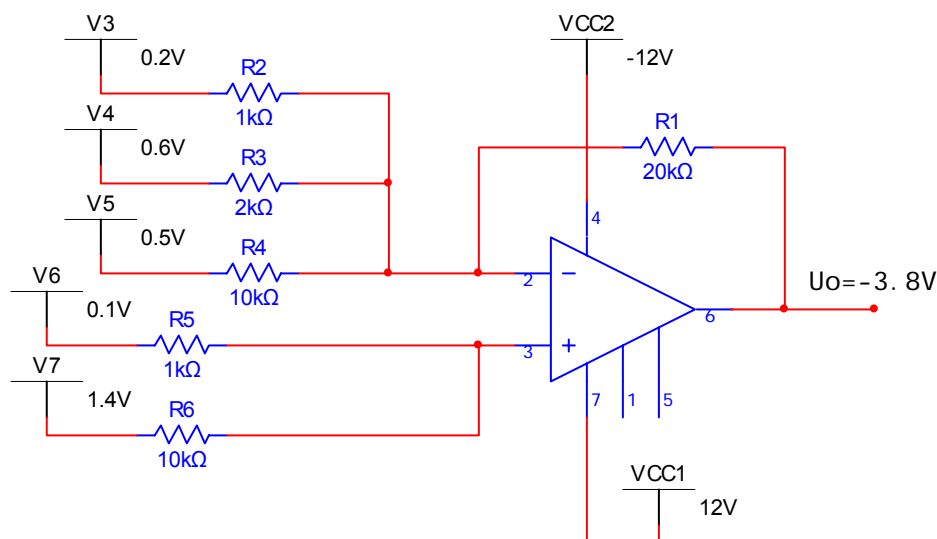
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R1 + R2}{R2} = 1 + \frac{R1}{R2} = A$$

Στην περίπτωση που η αντίσταση R_2 πάρει πολύ μικρή τιμή ή η R_1 πολύ μεγάλη, ώστε το κλάσμα R_2/R_1 να τείνει στο 0, τότε η ολική ενίσχυση είναι 1 και ο ενισχυτής συμπεριφέρεται ως ακολουθητής τάσης. Οι αντιστάσεις R_1 , R_2 σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να παραληφθούν από το κύκλωμα (σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4. Θεωρητικό κύκλωμα ακολουθητή τάσης

1.4. Αθροιστής τάσης



Σχήμα 1.5. Θεωρητικό κύκλωμα αθροιστής τάσης

Ο τελεστικός ενισχυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλώματα άθροισης τάσεων. Στο κύκλωμα του σχήματος 1.5 αθροίζονται οι τάσεις V_3 ως V_7 με κατάλληλο βάρος η κάθε μία, το οποίο εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων R_1 ως R_6 .

Οι τάσεις V_3 ως V_5 δημιουργούν κάποιο ρεύμα μέσω των αντιστάσεων R_2 ως R_4 . Τα ρεύματα αυτά αθροίζονται στον κόμβο της εισόδου αναστροφής και στη συνέχεια διαρρέουν την R_1 , συνεισφέροντας το καθένα στην τάση εξόδου. Οι τάσεις V_6 και V_7 συνεισφέρουν επίσης στην τάση εξόδου ως εισοδοί σε ενισχυτή μη αναστροφής. Η τελική τάση εξόδου μπορεί να υπολογιστεί αθροίζοντας τις επιμέρους τάσεις εξόδου που προκύπτουν από κάθε είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, αντιμετωπίζοντας την κάθε είσοδο ξεχωριστά.

Για την είσοδο αναστροφής, η τάση εξόδου προκύπτει από το άθροισμα των τάσεων εξόδου που προέρχονται από την κάθε μία τάση εισόδου, αγνοώντας όλες τις άλλες. Για να την υπολογίσουμε γειώνουμε τις τάσεις V_6 και V_7 , υπολογίζουμε την

τάση εξόδου για κάθε μία από τις V_3 ως V_5 σα να είναι μόνο αυτή συνδεδεμένη και στη συνέχεια τις αθροίζουμε:

$$v_{o-} = -V_3 \frac{R_1}{R_2} - V_4 \frac{R_1}{R_3} - V_5 \frac{R_1}{R_4} = -11V$$

Για την είσοδο μη αναστροφής, η τάση εξόδου προκύπτει από την επαλληλία των τάσεων V_6 και V_7 . Για να την υπολογίσουμε γειώνουμε όλες τις τάσεις εισόδου εκτός από την V_6 και υπολογίζουμε την έξοδο, στη συνέχεια γειώνουμε την V_6 , συνδέουμε κανονικά την V_7 και υπολογίζουμε και πάλι την έξοδο και αθροίζουμε τις δύο τιμές:

$$v_{o+} = V_6 \frac{R_6}{R_5 + R_6} \left(1 + \frac{R_1}{R_2 // R_3 // R_4} \right) + V_7 \frac{R_5}{R_5 + R_6} \left(1 + \frac{R_1}{R_2 // R_3 // R_4} \right) = 7.2V$$

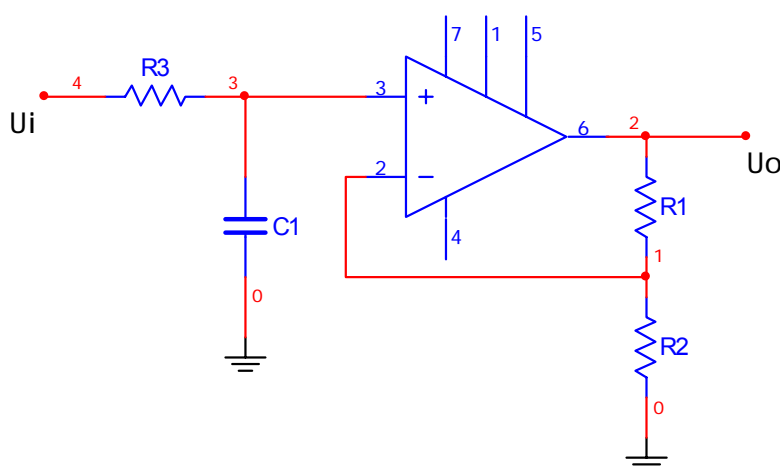
Η τελική τάση εξόδου είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους τάσεων που υπολογίσαμε:

$$v_o = v_{o-} + v_{o+} = -3.8V$$

1.4. Ενεργά φίλτρα

Οι τελεστικοί ενισχυτές μπορούν να συνδυαστούν με παθητικά στοιχεία και να κατασκευαστούν ενεργά φίλτρα με συγκεκριμένη συχνότητα αποκοπής. Η κλίση της καμπύλης της συχνотικής απόκρισης εξαρτάται από το είδος του κυκλώματος. Τα κυκλώματα με κλίση $-20dB/dec$ είναι τα απλούστερα και ονομάζονται βαθυπερατά φίλτρα πρώτης τάξης (σχήμα 1.6). Η συχνότητα αποκοπής σε αυτά δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (1.6)$$

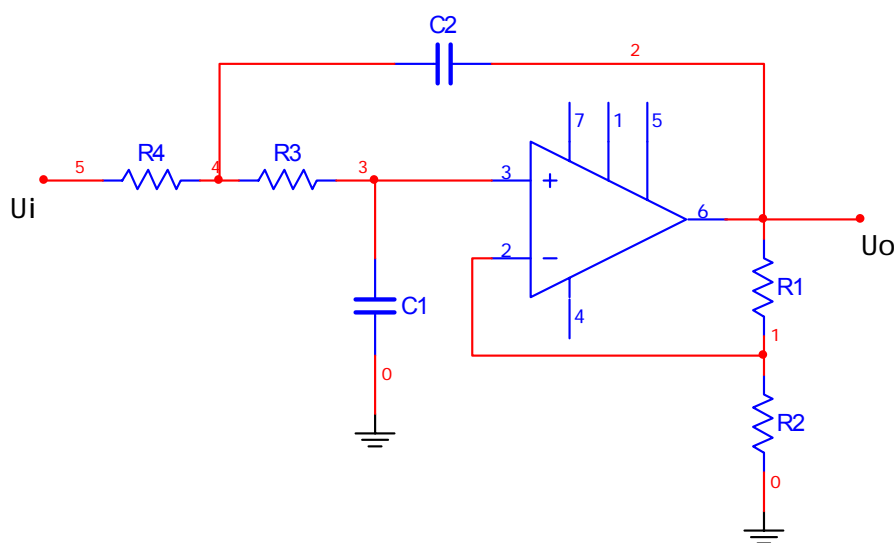


Σχήμα 1.6. Βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης με τελεστικό ενισχυτή

Όταν ενδιαφέρει η αύξηση της κλίσης της καμπύλης συχνотικής απόκρισης ώστε ο υποβιβασμός του πλάτους των σημάτων να είναι μεγαλύτερος των $20dB/dec$, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα όμοια δικτυώματα RC σε σειρά με την προσθήκη βαθμίδων απομόνωσης ενδιάμεσα ή να συνδεθούν πολλά φίλτρα πρώτης τάξης σε σειρά. Με κατάλληλη σύνδεση όμως δύο δικτυωμάτων RC μπορεί να

επιτευχθεί υποβιβασμός $40dB/dec$ με έναν μόνο τελεστικό ενισχυτή με το κύκλωμα του σχήματος 1.7. Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται βαθυπερατό κύκλωμα δεύτερης τάξης Sallen – Key. Η συχνότητα αποκοπής δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{R3 \cdot R4 \cdot C1 \cdot C2}} \quad (1.7)$$

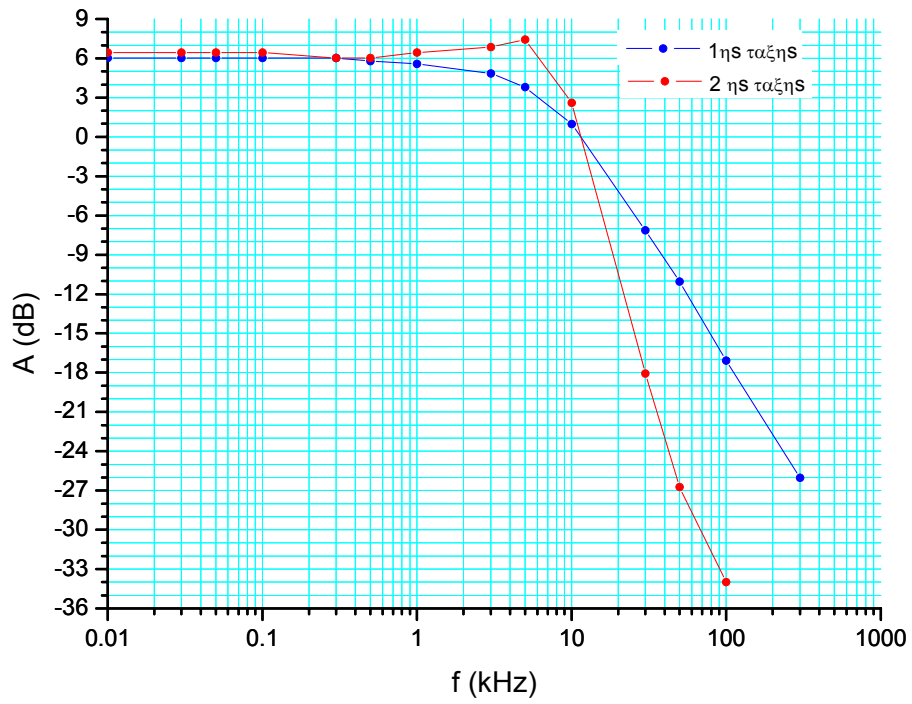


Σχήμα 1.7. Βαθυπερατό κύκλωμα δεύτερης τάξης Sallen – Key

Στο κύκλωμα αυτό υπάρχει μια θετική ανάδραση μέσω του πυκνωτή $C2$. Η συνολική ανάδραση του κυκλώματος σε μικρές ενισχύσεις είναι αρνητική. Σε μεγάλες ενισχύσεις όμως, υπερισχύει η θετική ανάδραση και το κύκλωμα δε λειτουργεί κανονικά. Η τιμή της ενίσχυσης καθορίζει συνεπώς τη μορφή της καμπύλης της συχνотικής απόκρισης. Το χαρακτηριστικό της κάθε καμπύλης είναι ο συντελεστής απόσβεσης (a) που δίνεται από τη σχέση:

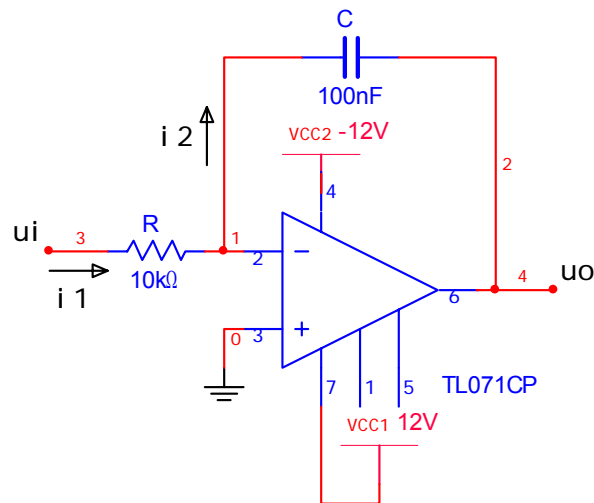
$$a = 3 - A \quad (1.8)$$

Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα BODE με πειραματικές τιμές ενεργών φίλτρων πρώτης και δεύτερης τάξης.



Σχήμα 1.8. Πειραματικό διάγραμμα BODE φίλτρων πρώτης και δεύτερης τάξης

1.5. Ολοκληρωτής αναστροφής



Σχήμα 1.9. Ολοκληρωτής αναστροφής

Οι τελεστικοί ενισχυτές με κατάλληλη συνδεσμολογία μπορούν να εκτελέσουν την πράξη της ολοκλήρωσης όπου η τάση εξόδου είναι το ολοκλήρωμα της τάσης εισόδου. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζεται ένας ολοκληρωτής αναστροφής. Το κύκλωμα περιγράφεται από τη γενική περίπτωση ενός αναστρέφοντα ενισχυτή με σύνθετες αντιστάσεις, Z_R και Z_C . Το κέρδος δίνεται από τη σχέση:

$$A = -\frac{Z_C}{Z_R} \quad (1.9)$$

Αν ο τελεστικός ενισχυτής είναι ιδανικός θα είναι $i_1 = i_2$ και επειδή $i_1 = \frac{u_i}{R}$

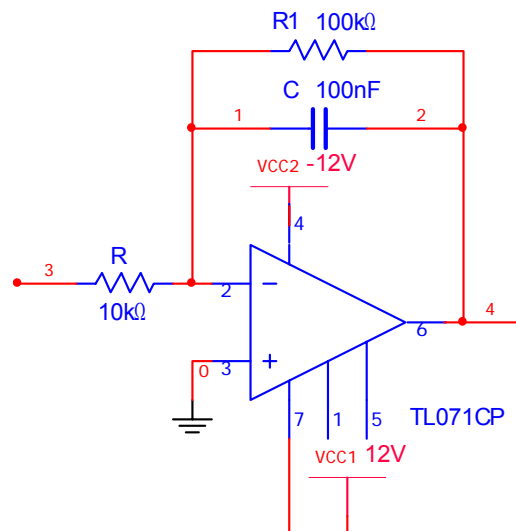
και $i_2 = \frac{dq}{dt}$, όπου $q = -Cu_o$, θα έχουμε:

$$\frac{u_i}{R} = -C \frac{du_o}{dt} \Rightarrow \quad (1.10)$$

$$\Rightarrow u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

Η σχέση (1.10) μας δίνει τη συνθήκη της ολοκλήρωσης όπου η τάση εξόδου είναι το ολοκλήρωμα της τάσης εισόδου ανεστραμένο.

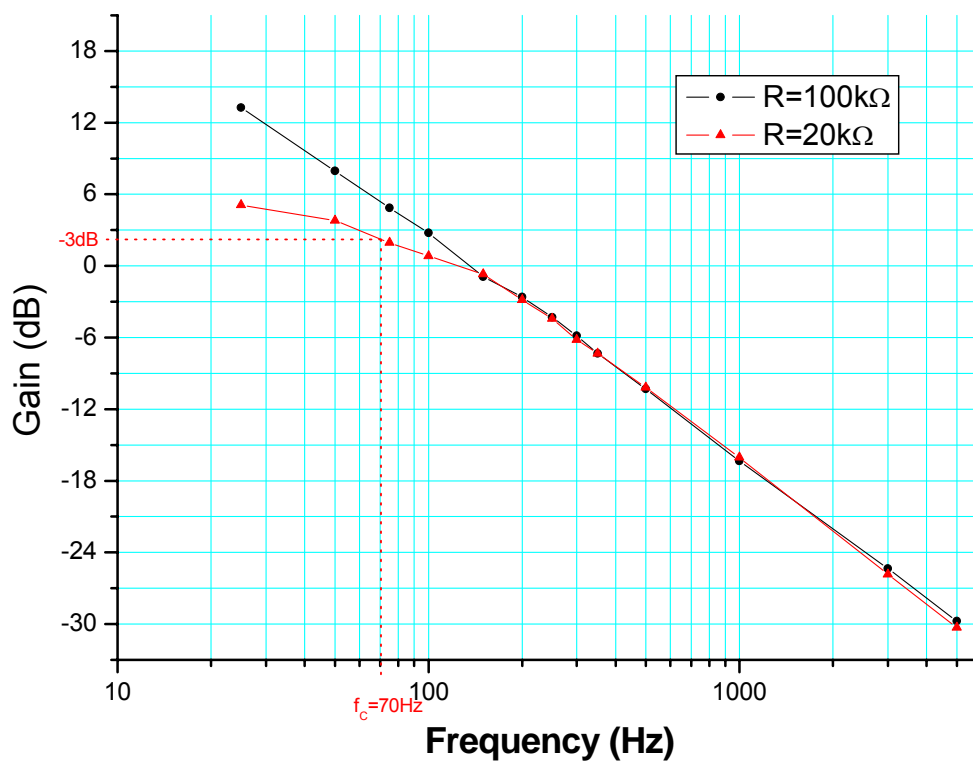
Στον ολοκληρωτή αναστροφής που περιγράφεται είναι πιθανό να παρατηρηθεί και μια DC συνιστώσα, η οποία οφείλεται στο δυναμικό απόκλισης εξόδου (output offset voltage). Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής δίνει μηδενική έξοδο όταν έχει ίδιο σήμα στις εισόδους του. Στην πραγματικότητα, όμως, εμφανίζεται μια μικρή διαφορά στα τρανζίστορ εισόδου του ενισχυτή, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μια μικρή τάση στην έξοδο της τάξεως μερικών mV με τη μορφή συνεχούς συνιστώσας. Η συνεχής αυτή συνιστώσα φορτίζει σιγά - σιγά τον πυκνωτή σε μια τάση. Το αποτέλεσμα είναι να φτάσει η έξοδος σχεδόν στο θετικό κόρο, αφού στο συνεχές ο πυκνωτής εμφανίζει άπειρη αντίσταση και έτσι η απολαβή του τελεστικού για τη συνεχή συνιστώσα μπορεί να πάρει πολύ μεγάλη τιμή. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προσθήκη μιας αντίστασης με μεγάλη τιμή παράλληλα στον πυκνωτή (σχήμα 1.10). Η αντίσταση αυτή ($R1$) δεν επιτρέπει την πόλωση του πυκνωτή με μια σταθερή τάση.



Σχήμα 1.10. Ολοκληρωτής αναστροφής με αντίσταση παράλληλα στον πυκνωτή

Η τιμή της αντίστασης $R1$ επηρεάζει τη συχνотική συμπεριφορά του κυκλώματος, αφού σε χαμηλές συχνότητες όπου ο πυκνωτής παρουσιάζει πολύ μεγάλη σύνθετη αντίσταση, εξασφαλίζει μια αρνητική ανάδραση με αποτέλεσμα να

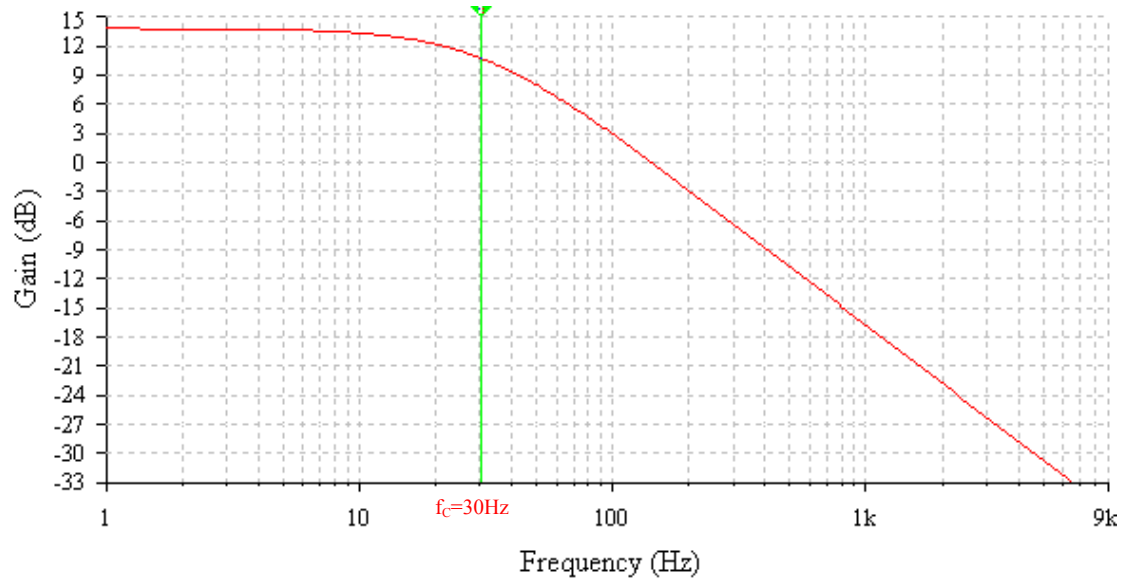
σταθεροποιείται η απολαβή του τελεστικού ενισχυτή σε μια ορισμένη τιμή και να εμφανίζεται έτσι ένα πλατό και μια ορισμένη συχνότητα αποκοπής. Το κύκλωμα τότε συμπεριφέρεται ως ένας απλός ενισχυτής αναστροφής και η τιμή του πλατό εξαρτάται από το λόγο των αντιστάσεων. Εφαρμόζοντας ημιτονικό σήμα ορισμένου πλάτους στην είσοδο του κυκλώματος μπορεί να γίνει συχνοτική ανάλυση. Στο σχήμα 1.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα BODE με πειραματικές τιμές από δύο κυκλώματα με διαφορετική τιμή αντίστασης παράλληλα στον πυκνωτή.



Σχήμα 1.11. Διάγραμμα BODE ολοκληρωτή αναστροφής με αντίσταση παράλληλα στον πυκνωτή

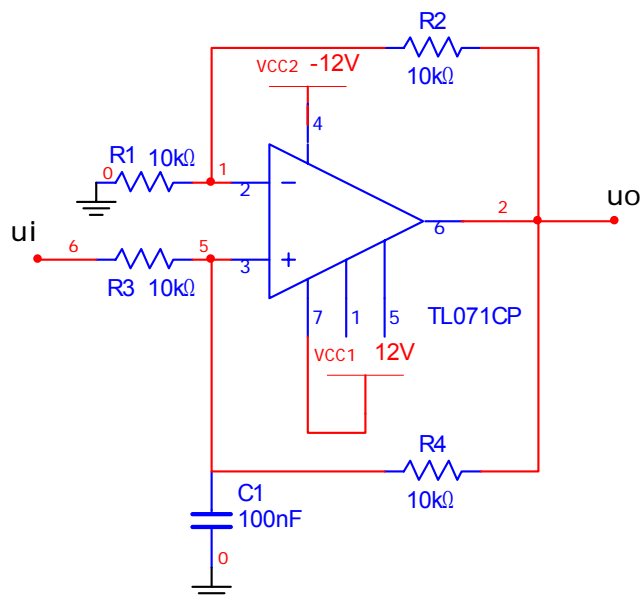
Στο διάγραμμα BODE του σχήματος 1.11 παρατηρούμε ότι η κλίση της καμπύλης και για τα δύο κυκλώματα είναι $-20dB/Dec$. Επίσης υπάρχει εμφανής παρουσία πλατό λίγο πάνω από τα $5dB$ στο κύκλωμα με αντίσταση $R1=20k\Omega$ και η συχνότητα αποκοπής προσδιορίζεται από το διάγραμμα στα $70Hz$ περίπου. Η συχνότητα αποκοπής στο κύκλωμα με αντίσταση $R1=20k\Omega$ προσδιορίστηκε με

προσομοίωση στα 30Hz. Το διάγραμμα BODE της προσομοίωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12. Διάγραμμα BODE από προσομοίωση του κυκλώματος του σχήματος 1.10 (σελ. 10) με αντίσταση $R1=100k\Omega$

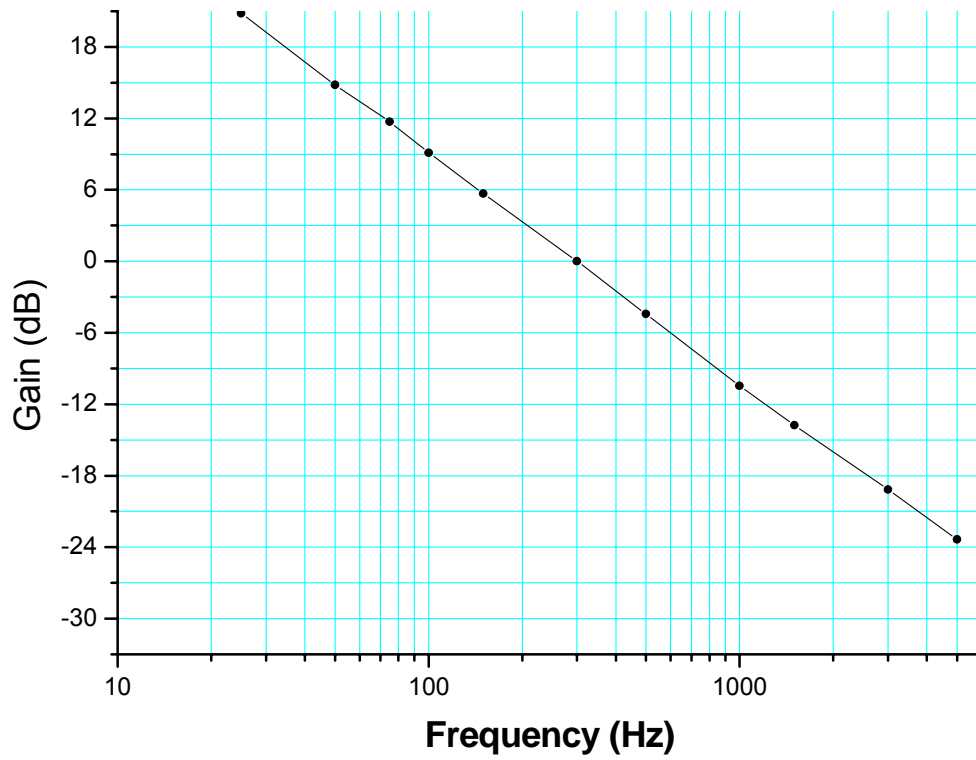
1.6. Ολοκληρωτής χωρίς αναστροφή



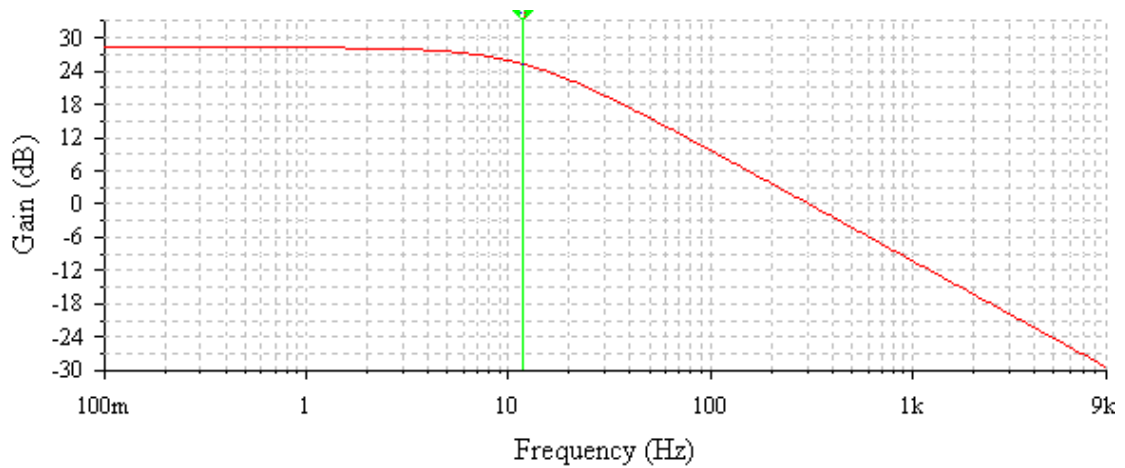
Σχήμα 1.13. Ολοκληρωτής χωρίς αναστροφή

Στο κύκλωμα του ολοκληρωτή χωρίς αναστροφή η τάση εξόδου ισούται με το ολοκλήρωμα της τάσης εξόδου και δεν εμφανίζεται καμία αναστροφή. Στην έξοδο του κύκλωμα είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα εμφανιστεί και μια DC συνιστώσα η οποία οφείλεται στο δυναμικό απόκλισης της εξόδου (output offset voltage). Το δυναμικό αυτό φορτίζει σιγά - σιγά τον πυκνωτή C με μια συνεχή τάση με αποτέλεσμα να φτάνει η έξοδος σχεδόν στο θετικό κόρο. Ο χρόνος που χρειάζεται να φορτιστεί ο πυκνωτής εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τελεστικού ενισχυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην πράξη.

Εφαρμόζοντας και σε αυτό το κύκλωμα ημιτονικό σήμα στην είσοδό του μπορεί να γίνει συχνοτική ανάλυση και να μελετηθεί η συμπεριφορά του. Στο σχήμα 1.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα BODE με πειραματικές τιμές και στο διάγραμμα 1.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα BODE από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος από όπου και προσδιορίστηκε η συχνότητα αποκοπής στα 11.7Hz .



Σχήμα 1.14. Διάγραμμα BODE ολοκληρωτή χωρίς αναστροφή



Σχήμα 1.15. Διάγραμμα BODE από προσομοίωση του κυκλώματος

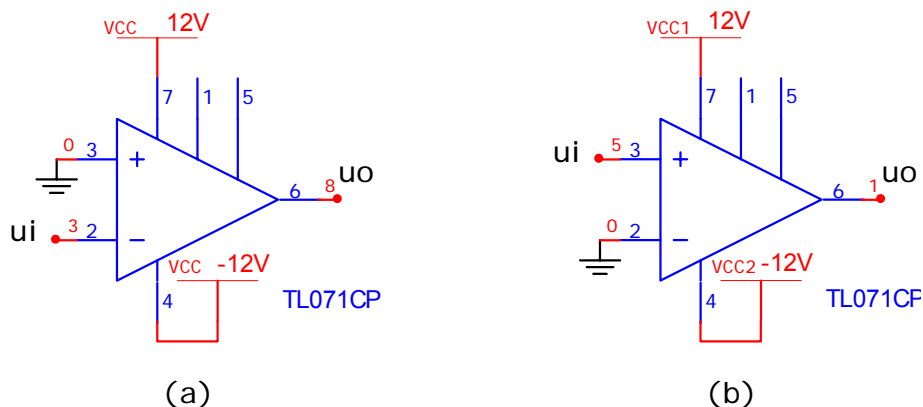
2. ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΣΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

2.1. Γενικά

Ο τελεστικός ενισχυτής εμφανίζει στην έξοδό του τη διαφορά τάσης των εισόδων του ενισχυμένη κατά έναν παράγοντα ενίσχυσης A ($v_o = Av_i$, $v_i = v_+ - v_-$). Η ενίσχυση τάσης A είναι θεωρητικά άπειρη. Στην πράξη όμως έχει μια πεπερασμένη πολύ μεγάλη τιμή (10^4 ή και μεγαλύτερη). Αν δεν εφαρμόσουμε καμιά ανάδραση, όταν η διαφορά των εισόδων του είναι της τάξης των mV τότε το πιο πιθανό είναι η έξοδος να βρίσκεται στον κόρο (θετικό ή αρνητικό). Σε ορισμένες περιπτώσεις για να εξασφαλίσουμε ότι η έξοδος θα βρίσκεται οπωσδήποτε στον κόρο, εφαρμόζουμε θετική ανάδραση στο κύκλωμα. Έτσι, μόλις η μία είσοδος ξεπεράσει ελάχιστα την άλλη, η έξοδος θα οδηγηθεί στον αντίστοιχο κόρο. Εκμεταλλευόμαστε αυτό το χαρακτηριστικό για να συγκρίνουμε δύο τάσεις έτσι ώστε να κατασκευάσουμε διάφορα κυκλώματα συγκριτών και ταλαντωτών.

Οι τελεστικοί ενισχυτές μπορούν να μεταβάλλουν την τάση εξόδου τους με μια ορισμένη ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή εκφράζεται ως η κλίση του τριγωνικού σήματος εξόδου, όταν στην είσοδο εφαρμόζεται υπεροδηγημένο ημιτονικό σήμα υψηλής συχνότητας. Το χαρακτηριστικό αυτό των τελεστικών ενισχυτών ονομάζεται ρυθμός ανόδου (slew rate). Μετρείται σε βολτ ανά δευτερόλεπτο με τυπικές τιμές γύρω στα $500V/\mu sec$.

2.2. Συγκριτής τάσης

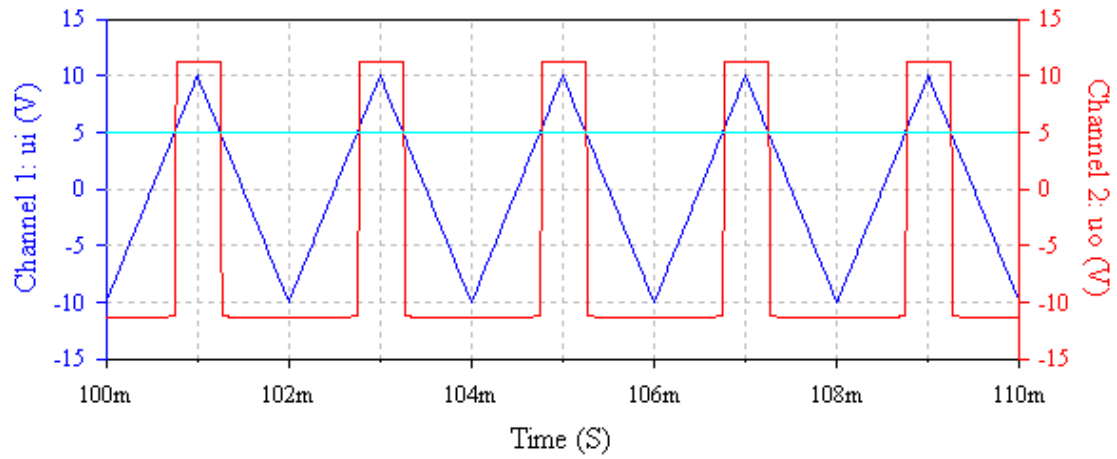


Σχήμα 2.1. Κύκλωμα συγκριτή τάσης με αναστροφή (a) και χωρίς αναστροφή (b)

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται ένα κύκλωμα συγκριτή τάσης με αναστροφή και ένα χωρίς 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 του σχήματος 2.1 η σύγκριση γίνεται με το δυναμικό της γείωσης αφού η δεύτερη είσοδος του κάθε κυκλώματος είναι γειωμένη). Στο κύκλωμα συγκριτή τάσης με αναστροφή (σχ. 2.1a) όταν η τάση εισόδου ξεπεράσει ελάχιστα το μηδέν, η έξοδος περνάει στον αρνητικό κόρο, ενώ όταν γίνει ελάχιστα αρνητική, η έξοδος θα περάσει στον θετικό κόρο. Το αντίστροφο συμβαίνει στο κύκλωμα συγκριτή τάσης χωρίς αναστροφή (σχ.2.1b).

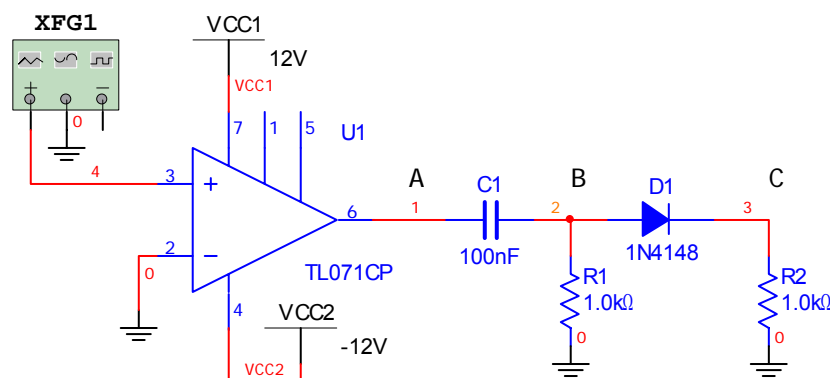
Τα κυκλώματα λειτουργούν πολύ καλά σε χαμηλές συχνότητες. Σε υψηλές συχνότητες, όμως, παρουσιάζουν μια καθυστέρηση στη μετάβαση από τη μια κατάσταση κόρου στην άλλη. Η αλλαγή στην κατάσταση της εξόδου γίνεται σε λίγο μεγαλύτερη θετική ή αρνητική τάση δίνοντας την εντύπωση διαφοράς φάσης εισόδου - εξόδου. 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.

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εισόδου - εξόδου συγκριτή τάσης χωρίς αναστροφή με τάση αναφοράς $V_{ref}=5V$, από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος 2.1a.



Σχήμα 2.2. Κυματομορφές εισόδου – εξόδου συγκριτή τάσης χωρίς αναστροφή ως προς τάση αναφοράς $5V$

2.3. Κύκλωμα ανιχνευτή μηδενός

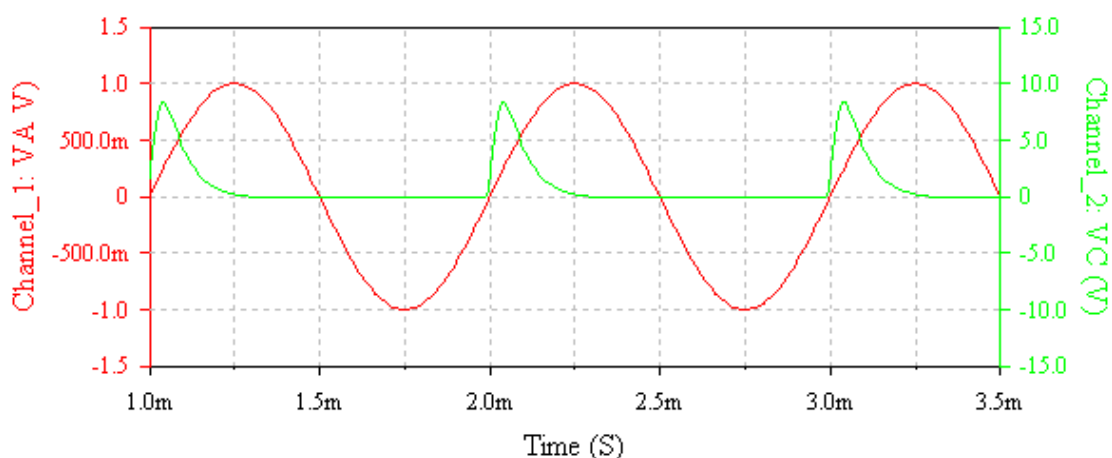


Σχήμα 2.3. Κύκλωμα ανιχνευτή μηδενός

Στο κύκλωμα του ανιχνευτή μηδενός του σχήματος 2.3 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). Όταν η τάση στην είσοδο μη αντιστροφής γίνεται θετική, η διαφορά τάσης των εισόδων ($v_i = v_+ - v_-$) 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 ($v_i = v_+ - v_-$) 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.

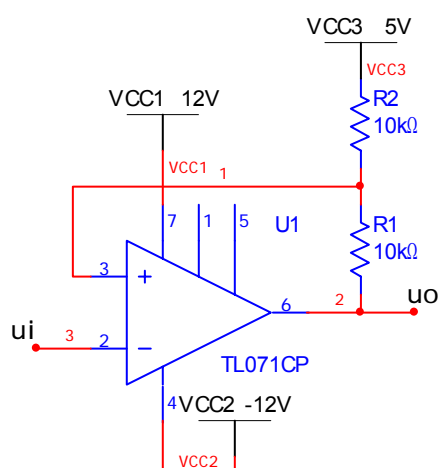
Στο τέλος η δίοδος αποκόπτει τα αρνητικά τμήματα, αφού κατά τη διάρκεια αυτών πολώνεται ανάστροφα και το τελικό αποτέλεσμα είναι να εμφανίζεται ένας σύντομος παλμός στην έξοδο του κυκλώματος κάθε φορά που η τάση εισόδου ανερχόμενη περνάει από το μηδέν. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζονται οι κυματομορφές εισόδου – εξόδου από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος.



Σχήμα 2.4. Κυματομορφές εισόδου (Vi κόκκινη) και εξόδου (VC πράσινη)

2.4. Συγκριτής τάσης με υστέρηση (Schmitt trigger)

Στα κυκλώματα συγκριτών με υστέρηση η τάση σύγκρισης είναι διαφορετική για το ανερχόμενο μέτωπο της τάσης εισόδου από ότι για το κατερχόμενο. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα κύκλωμα συγκριτή με υστέρηση. Η τάση σύγκρισης είναι η επαλληλία της τάσης εξόδου (u_o) και της τάσης αναφοράς (V_{CC3}) μέσα από το διαιρέτη τάσης R_1 - R_2 .



Σχήμα 2.5. Κύκλωμα συγκριτή τάσης με υστέρηση (Schmitt trigger)

Στο κύκλωμα του σχήματος 2.5, όταν η είσοδος βρίσκεται σε αρνητικό δυναμικό, η έξοδος είναι σε θετικό κόρο. Καθώς το δυναμικό εισόδου αυξάνει, η έξοδος παραμένει σε θετικό κόρο, μέχρι η είσοδος να ξεπεράσει το δυναμικό σύγκρισης. Το δυναμικό σύγκρισης (V_{refH}) σε αυτή την περίπτωση είναι η επαλληλία της τάσης του θετικού κόρου V_{+k} και της τάσης αναφοράς $V_{CC3}=5V$ μέσα από το διαιρέτη τάσης R_1 - R_2 :

$$V_{refH} = V_{CC3} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{+k} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

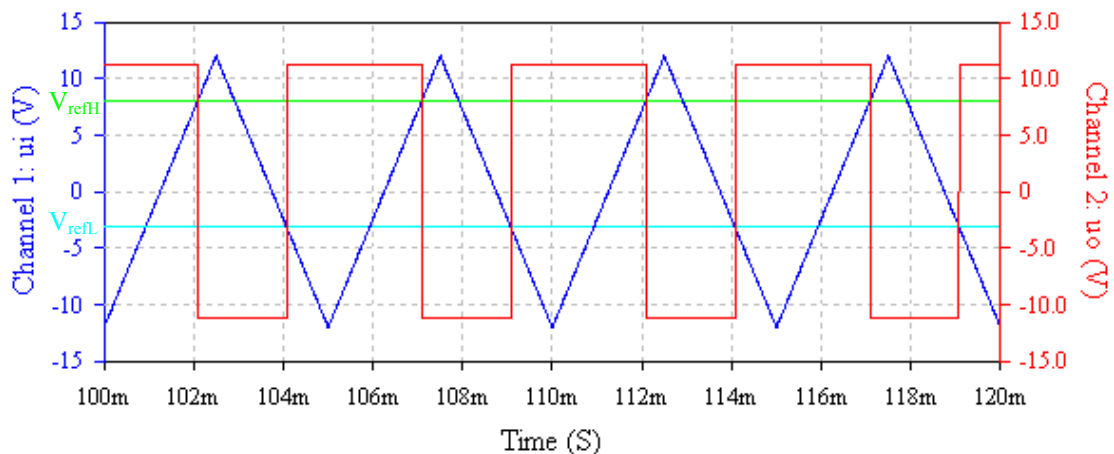
Μόλις η τάση εισόδου ξεπεράσει την τάση σύγκρισης (V_{refH}), το δυναμικό στην είσοδο αντιστροφής γίνεται μεγαλύτερο από το δυναμικό στην είσοδο μη αντιστροφής και η έξοδος περνάει στον αρνητικό κόρο. Η μεταβολή της εξόδου μεταβάλει και την τάση σύγκρισης, αφού γίνεται η επαλληλία της τάσης του

αρνητικού κόρου V_{-k} και της τάσης αναφοράς $V_{CC3}=5V$ μέσα από το διαιρέτη τάσης R_1-R_2 :

$$V_{refL} = V_{CC3} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + V_{-k} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

Έτσι για να αλλάξει πάλι κατάσταση η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή πρέπει η τάση στην είσοδο αναστροφής να γίνει μικρότερη από τη V_{refL} , η οποία είναι προφανώς μικρότερη από την προηγούμενη τάση αναφοράς V_{refH} .

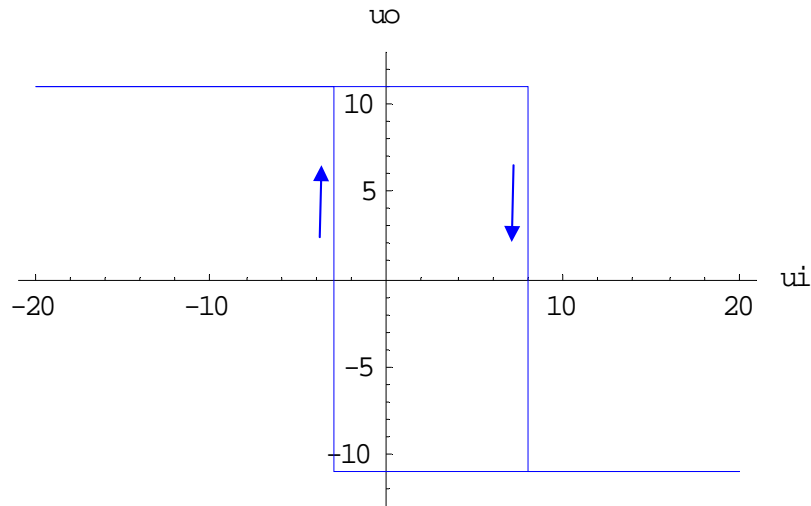
Οι κυματομορφές εισόδου – εξόδου από κατάλληλη προσομοίωση για το παραπάνω κύκλωμα παρουσιάζονται στο σχήμα 13. Στο σχέδιο προστέθηκαν και οι τάσεις σύγκρισης V_{refH} (πράσινη καμπύλη) και V_{refL} (γαλάζια καμπύλη) για καλύτερο έλεγχο.



Σχήμα 2.6. Κυματομορφές εισόδου - εξόδου συγκριτή τάσης με υστέρηση (Schmitt trigger)

Στο σχήμα 2.6 παρατηρούμε ότι οι η έξοδος μεταβαίνει από το θετικό κόρο στον αρνητικό, όταν η είσοδος, κατά την ανερχόμενη φάση της, ξεπεράσει τα $8V$. Παραμένει στον αρνητικό κόρο μέχρι η είσοδος να γίνει μικρότερη από $-3V$, οπότε και μεταβαίνει στο θετικό κόρο. Βασική προϋπόθεση, για να συμβαίνουν αλλαγές στην έξοδο, είναι να υπάρχει δυνατότητα η είσοδος να πάρει τιμές μεγαλύτερες των $8V$ και μικρότερες των $-3V$. Αν η τάση εισόδου μεταβάλλεται μεταξύ των δύο παραπάνω τιμών, τότε η έξοδος δεν αλλάζει αλλά παραμένει σε μια σταθερή κατάσταση σε θετικό ή αρνητικό κόρο.

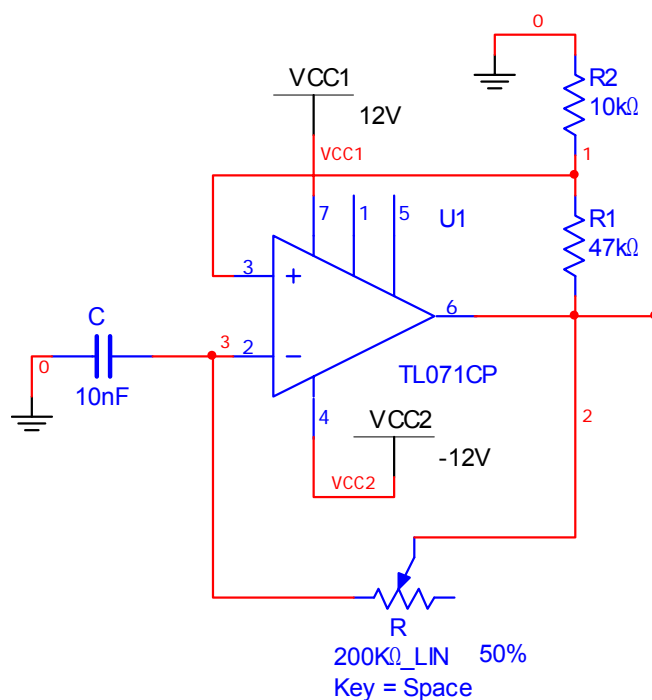
Βάζοντας στις σχέσεις (2.1) και (2.2) τιμές θετικού και αρνητικού κόρου $V_{+k}=11V$ και $V_{-k}=-11V$ και την τιμή της τάσης αναφοράς ($V_{CC3}=5V$) βρίσκουμε για τις δύο τιμές σύγκρισης : $V_{refH}=8V$ και $V_{refL}=-3V$. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική εισόδου - εξόδου του κυκλώματος.



Σχήμα 2.7. Χαρακτηριστική εισόδου - εξόδου του κυκλώματος συγκριτή τάσης με υστέρηση (Schmitt trigger)

Ο βρόγχος που σχηματίζεται στη χαρακτηριστική εισόδου – εξόδου ονομάζεται βρόγχος υστέρησης. Η τιμή της τάσης αναφοράς (V_{CC3}) καθορίζει τη θέση του βρόγχου, ενώ ο διαιρέτης τάσης R_1-R_2 καθορίζει το εύρος του βρόγχου, όπως άλλωστε είναι φανερό από τις σχέσεις (2.1) και (2.2).

2.5. Απλός ασταθής πολυδονητής



Σχήμα 2.8. Απλός ασταθής πολυδονητής

Οι πολυδονητές είναι αυτοδιεγερόμενα κυκλώματα, δηλαδή παράγουν συνεχόμενους τετραγωνικούς παλμούς χωρίς να χρειάζονται εξωτερική διέγερση για να ταλαντωθούν. Ο απλός ασταθής πολυδονητής παράγει συμμετρικές κυματομορφές τόσο στο χρόνο όσο και στην τάση. Η λειτουργία του κυκλώματος βασίζεται στη συνεχή σύγκριση των τάσεων v_- και v_+ , δηλαδή στον έλεγχο του πρόσημου της διαφοράς τάσης των εισόδων του τελεστικού ενισχυτή. Η είσοδος μη αναστροφής συνδέεται στο διαιρέτη τάσης εξόδου R_1 - R_2 και εξασφαλίζεται έτσι η θετική ανάδραση που θα αναγκάσει τον τελεστικό ενισχυτή να λειτουργεί σε καταστάσεις κόρου. Αν υποθέσουμε ότι οι τάσεις κόρου είναι ίσες κατά απόλυτη τιμή ($|V_{+k}| = |V_{-k}| = V_{ok}$), στην είσοδο μη αναστροφής μπορούν να υπάρξουν δύο τιμές

τάσης $v_+ = \pm(V_{ok}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \pm \beta V_{ok}$, 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.

Υποθέτουμε ότι η έξοδος βρίσκεται στο θετικό κόρο. Η τάση στην είσοδο μη αναστροφής θα είναι $+\beta V_{ok}$ λόγω του διαιρέτη τάσης R_1-R_2 . 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 $+\beta V_{ok}$. Ο χρόνος φόρτισης T_R δίνεται από τη σχέση:

$$\left. \begin{aligned} v_- = A + Be^{-t/RC} \Big|_{t=0}, \quad v_- = -\beta V_{ok} = A + B \\ t \rightarrow +\infty, \quad v_- = V_{ok} = A, \quad B = -V_{ok} - \beta V_{ok} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

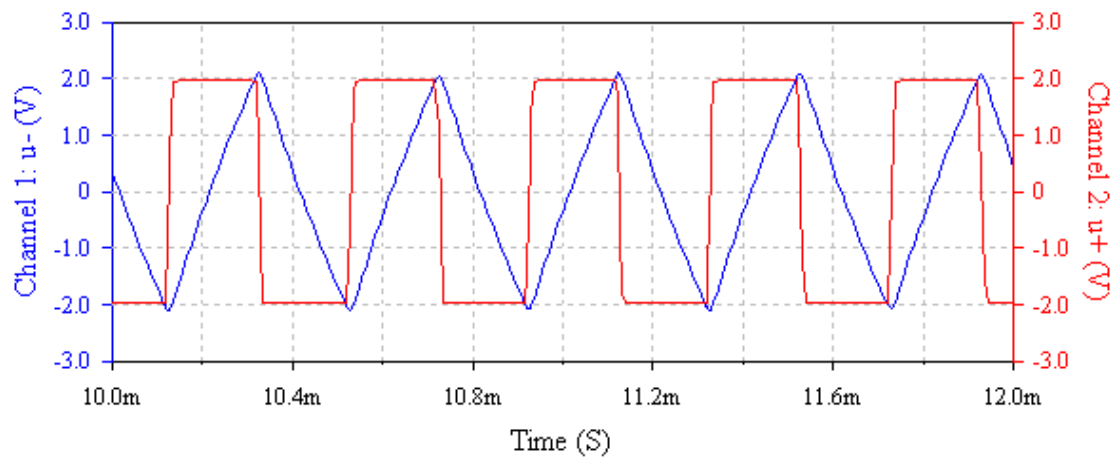
$$t = T_R, \quad v_- = \beta V_{ok} = V_{ok} + (-V_{ok} - \beta V_{ok})e^{-T_R/RC} \Rightarrow \quad (2.3)$$

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

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 2.1). Έτσι στην έξοδο προκύπτουν συμμετρικοί τετραγωνικοί παλμοί με περίοδο:

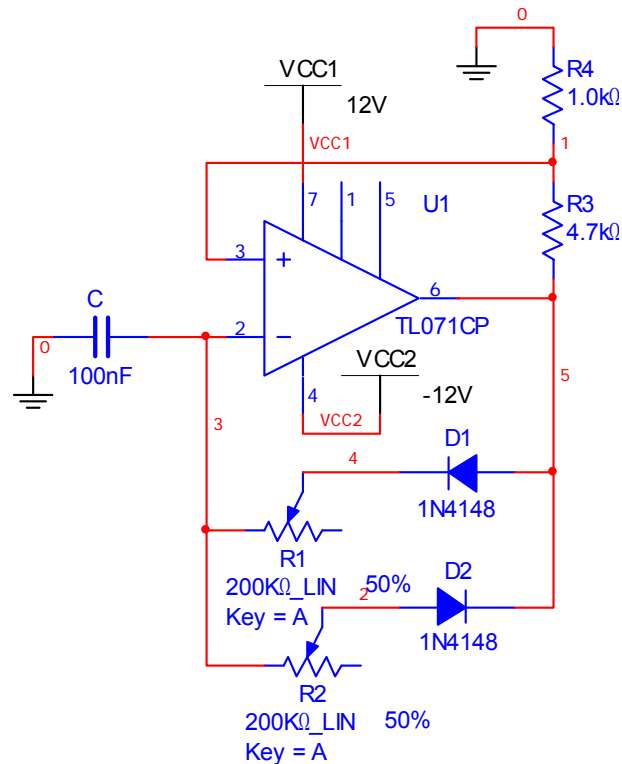
$$T = 2RC \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) \quad (2.4)$$

Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος του σχήματος 2.8 (σελ. 23).



Σχήμα 2.9. Κυματομορφές εισόδου μη αντιστροφής ($u+$ κόκκινη) και εισόδου αντιστροφής ($u-$ μπλε) του συμμετρικού πολυδονητή

2.6. Ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής



Σχήμα 2.10. Ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής.

Ο ασύμμετρος ασταθής πολυδονητής 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.

Στο κύκλωμα του σχήματος 2.10, όταν η έξοδος βρίσκεται στο θετικό κόρο, άγει η διάοδος D_1 και ο πυκνωτής C φορτίζει με σταθερά χρόνου R_1C . Όταν βρίσκεται στον αρνητικό κόρο, άγει η διάοδος 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.

Ο χρόνος φόρτισης T_R και κατά συνέπεια η διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού T_+ , δίνεται από τη σχέση:

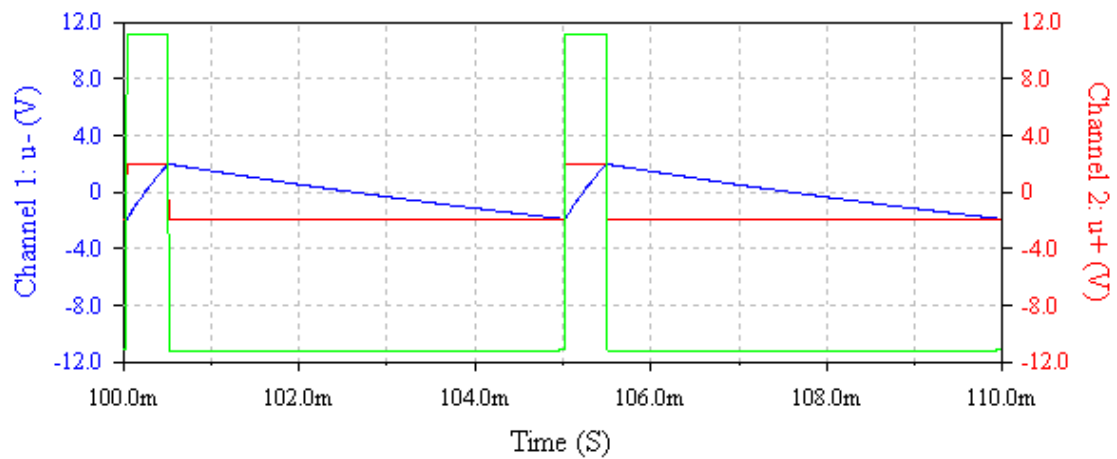
$$\begin{aligned}
 v_- &= A + Be^{-t/R_1C} \\
 \left. \begin{aligned}
 t = 0, \quad v_- &= -\beta V_{ok} = A + B \\
 t \rightarrow +\infty, \quad v_- &= V_{ok} - V_D = A, \quad B = V_D - (1 + \beta)V_{ok}
 \end{aligned} \right| \Rightarrow \\
 t = T_R, \quad v_- &= \beta V_{ok} = V_{ok} - V_D + (V_D - (1 + \beta)V_{ok})e^{-T_R/R_1C} \Rightarrow \\
 \Rightarrow T_R &= R_1C \ln \left(\frac{V_D - (1 + \beta)V_{ok}}{V_D - (1 - \beta)V_{ok}} \right) \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

Ο χρόνος εκφόρτισης T_F και κατά συνέπεια η διάρκεια του αρνητικού μέρους του παλμού T_- , προκύπτει με παρόμοιο τρόπο (αλλάζοντας τα πρόσημα των τάσεων στις αρχικές εξισώσεις της σχέσης 2.5):

$$T_F = R_2C \ln \left(\frac{V_D - (1 + \beta)V_{ok}}{V_D - (1 - \beta)V_{ok}} \right) \quad (2.6)$$

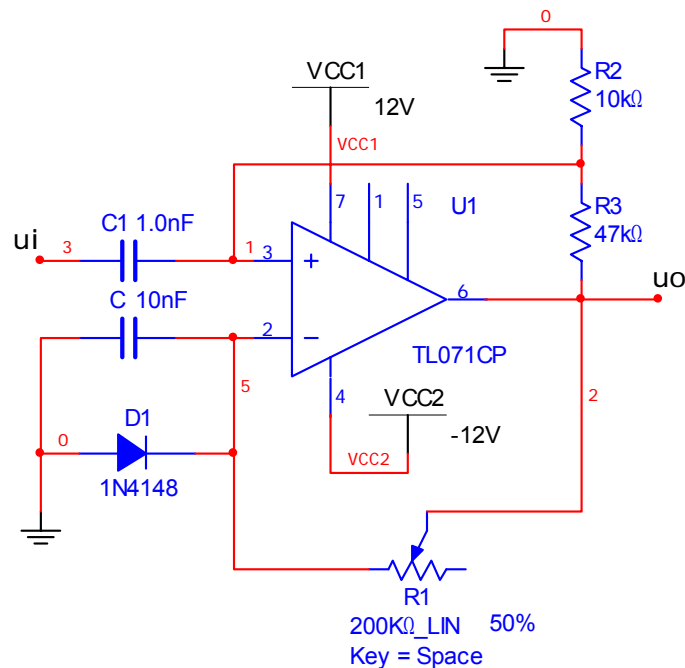
Η περίοδος του σήματος T είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους χρόνων ($T = T_+ + T_-$). Ο λόγος της διάρκειας του θετικού μέρους T_+ προς τη συνολική διάρκεια (περίοδο) του σήματος T , ονομάζεται κύκλος εργασίας κ (duty cycle) $\left(\kappa = \frac{T_+}{T} \right)$.

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή και στην έξοδο από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος του σχήματος 2.10 (σελ. 26).



Σχήμα 2.11. Κυματομορφές εισόδου μη αναστροφής ($u+$ κόκκινη), εισόδου αναστροφής ($u-$ μπλε) και εξόδου (πράσινη) του ασύμμετρου πολυδονητή

2.7. Μονοσταθής πολυδονητής



Σχήμα 2.12. Μονοσταθής πολυδονητής

Οι πολυδονητές, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι αυτοδιεγειρόμενα κυκλώματα, δηλαδή παράγουν συνεχόμενους τετραγωνικούς παλμούς χωρίς να χρειάζονται εξωτερική διέγερση για να ταλαντωθούν. Υπάρχει ωστόσο η ανάγκη παραγωγής ενός μόνο παλμού σταθερής διάρκειας μετά από εξωτερική διέγερση ανεξάρτητης διάρκειας. Αυτό επιτυγχάνεται στα κυκλώματα μονοσταθών πολυδονητών με τη προσθήκη μιας διόδου παράλληλα συνδεδεμένης με τον πυκνωτή στην είσοδο αναστροφής (σχήμα 2.12).

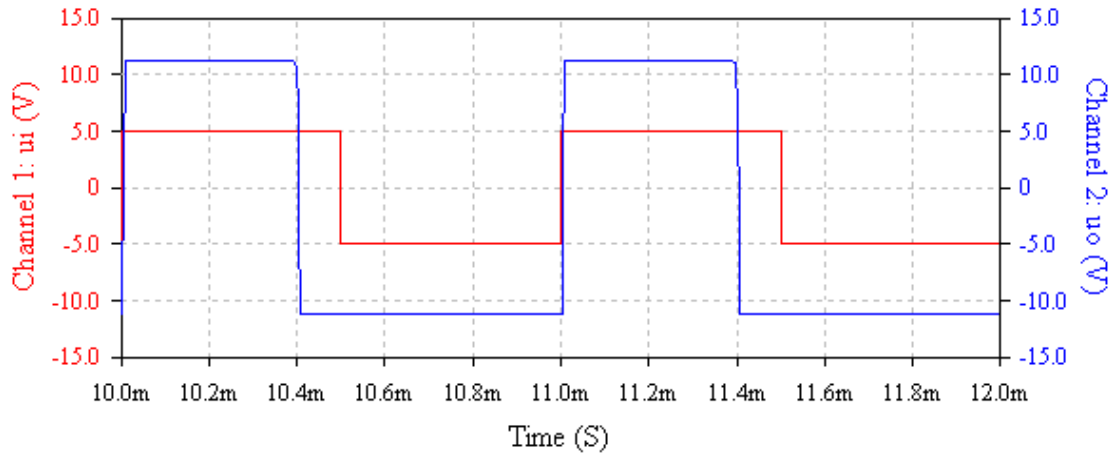
Στο κύκλωμα του μονοσταθούς πολυδονητή, όταν η έξοδος βρίσκεται στο αρνητικό κόρο, άγει η διάδος D_1 και η αναστρέφουσα είσοδος βρίσκεται σε δυναμικό $-V_D$. Αν έχουμε φροντίσει η είσοδος μη αναστροφής να βρίσκεται σε χαμηλότερο

δυναμικό μέσω του διαιρέτη τάσης R_2-R_3 ($-\beta V_{ok} < -V_D$), η έξοδος θα παραμείνει 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 (αιχμή) 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 $+\beta V_{ok}$. Ο χρόνος φόρτισης T_P δίνεται από τη σχέση:

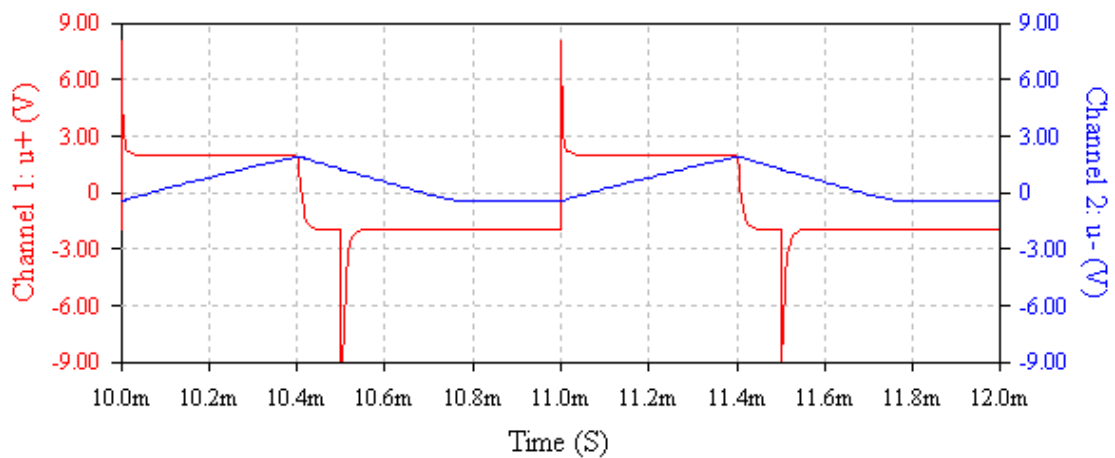
$$\begin{aligned}
 v_- &= A + B e^{-t/R_1 C} \\
 \left. \begin{aligned}
 t = 0, \quad v_- &= -V_D = A + B \\
 t \rightarrow +\infty, \quad v_- &= V_{ok} = A, \quad B = V_D - V_{ok}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \\
 t = T_P, \quad v_- &= \beta V_{ok} = V_{ok} + (-V_D - V_{ok}) e^{-T_P/R_1 C} \Rightarrow \\
 \Rightarrow T_P &= R_1 C \ln \left(\frac{V_D + V_{ok}}{(1-\beta)V_{ok}} \right) \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

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 R_1 , με την ίδια σταθερά χρόνου, μέχρι να φτάσει σε τάση $-V_D$. 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.

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στην είσοδο και στην έξοδο του κυκλώματος και στο σχήμα 2.14 οι κυματομορφές στις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος του σχήματος 2.12 (σελ. 29).



Σχήμα 2.13. Κυματομορφές εισόδου (u_i κόκκινη) και εξόδου (u_o μπλε) του μονοσταθούς πολυδονητή



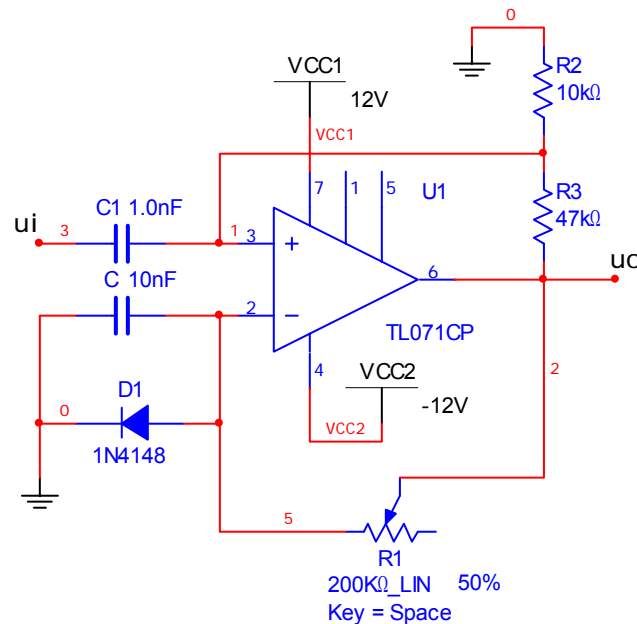
Σχήμα 2.14. Κυματομορφές εισόδου μη αναστροφής ($u+$ κόκκινη) και εισόδου αναστροφής ($u-$ μπλε) του μονοσταθούς πολυδονητή

Στα σχήματα 2.13 και 2.14 παρατηρούμε ότι όταν εφαρμόζεται το ανερχόμενο μέτωπο του τετραγωνικού σήματος στην είσοδο του κυκλώματος, στη μη αναστρέφουσα είσοδο εμφανίζεται μια στενή αιχμή, η οποία διεγείρει το μονοδονητή και η έξοδος μεταβαίνει σε θετικό κόρο. Επίσης παρατηρούμε και μια αρνητική αιχμή, η οποία εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο κατά το κατερχόμενο

μέτωπο του τετραγωνικού σήματος εισόδου. Η αιχμή αυτή στην παραπάνω περίπτωση δεν έχει καμιά επίδραση στο κύκλωμα, γιατί η έξοδος έχει ήδη περάσει σε αρνητικό κόρο λόγω θετικής τάσης στην αναστρέφουσα είσοδο από τα R_1 , C . Αν όμως η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι αρκετά υψηλή ή η διάρκεια του παλμού εξόδου είναι αρκετά μεγάλη, η αρνητική αιχμή εφαρμόζεται στην είσοδο μη αναστροφής πριν η τάση στην είσοδο αναστροφής γίνει ικανή να προκαλέσει μετάβαση της εξόδου σε αρνητικό κόρο. Η αιχμή αυτή είναι ικανή να μεταβάλει την έξοδο σε αρνητικό κόρο όταν το σήμα εισόδου έχει ικανό πλάτος. Έτσι η χρονική διάρκεια του θετικού παλμού εξόδου δεν εξαρτάται από τα R_1 , C αλλά από τη συχνότητα του σήματος εισόδου. Ο παράγοντας αυτός περιορίζει τη μέγιστη διάρκεια του τετραγωνικού παλμού της εξόδου για το συγκεκριμένο σήμα εισόδου και τη μέγιστη συχνότητα εισόδου για ορισμένο T_P .

Στο σχήμα 2.14 επίσης παρατηρούμε ότι μόλις η τάση στην είσοδο αναστροφής ξεπεράσει την τάση στην είσοδο μη αναστροφής, η έξοδος μεταβαίνει σε αρνητικό κόρο και οι πυκνωτές C και C_1 εκφορτίζονται, ο πρώτος μέσω της R_1 και ο δεύτερος μέσω των R_2 και R_3 . Η σταθερά χρόνου του C_1 είναι πολύ μικρότερη από του C στην παραπάνω περίπτωση. Αν όμως η αντίσταση R_1 γίνει πολύ μικρή, οι δύο σταθερές χρόνου είναι συγκρίσιμες. Υπάρχει μια οριακή τιμή αντίστασης, που κάτω από αυτή την τιμή, καθώς εκφορτίζονται οι C και C_1 , η αναστρέφουσα είσοδος γίνεται μικρότερη από τη μη αναστρέφουσα και έτσι η έξοδος μεταβαίνει και πάλι σε θετικό κόρο. Οδηγείται στη συνέχεια το κύκλωμα 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 C_1 αλλάζοντας τις αντιστάσεις R_2 και R_3 .

2.8. Μονοσταθής πολυδονητής αρνητικού παλμού εξόδου



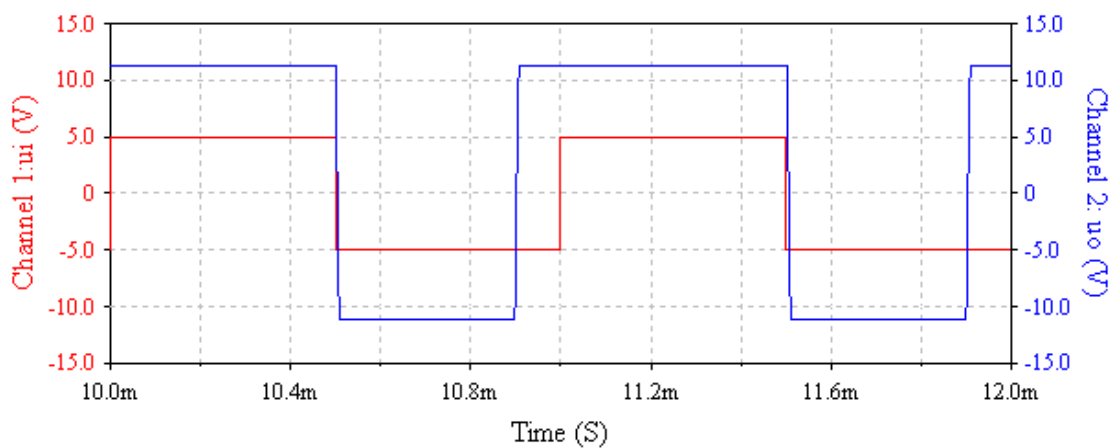
Σχήμα 2.15. Μονοσταθής πολυδονητής αρνητικού παλμού εξόδου

Το κύκλωμα σε αυτήν την περίπτωση λειτουργεί ως εξής: όταν η έξοδος βρίσκεται στο θετικό κόρο, άγει η διάοδος D_1 και η αναστρέφουσα είσοδος βρίσκεται σε δυναμικό V_D . Αν έχουμε φροντίσει η είσοδος μη αναστροφής να βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό μέσω του διαιρέτη τάσης R_2 - R_3 ($\beta V_{ok} > V_D$), η έξοδος θα παραμένει αμετάβλητη στο θετικό κόρο. Σε περίπτωση που επιδράσει ένας αρνητικός παλμός στην είσοδο του κυκλώματος, θα εμφανιστεί στην είσοδο μη αναστροφής, μέσω του πυκνωτή C_1 , ένας σύντομος αρνητικός παλμός (αιχμή) που θα οδηγήσει την έξοδο σε αρνητικό 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 $-\beta V_{ok}$.

Ο χρόνος φόρτισης T_p δίνεται από τη σχέση (2.7) όπως και στο προηγούμενο κύκλωμα. Μόλις η τάση στα άκρα του πυκνωτή C φτάσει σε τάση $-\beta V_{ok}$ και γίνει ελάχιστα πιο αρνητική, η είσοδος αναστροφής περνάει σε χαμηλότερο δυναμικό από τη μη αναστρέφουσα και έτσι η έξοδος οδηγείται στο θετικό κόρο. Όσο η έξοδος

είναι στον θετικό κόρο, στην είσοδο μη αναστροφής η τάση θα είναι $+ \beta V_{ok}$ και ο πυκνωτής C θα εκφορτίζεται (φορτίζει με αντίθετη όμως πολικότητα) μέσω της R , με την ίδια σταθερά χρόνου, μέχρι να φτάσει σε τάση $+V_D$. Σε αυτήν την τάση θα παραμείνει, με αποτέλεσμα να σταθεροποιηθεί το κύκλωμα με την έξοδό του στο θετικό κόρο, μέχρι να επιδράσει νέος παλμός στην είσοδο.

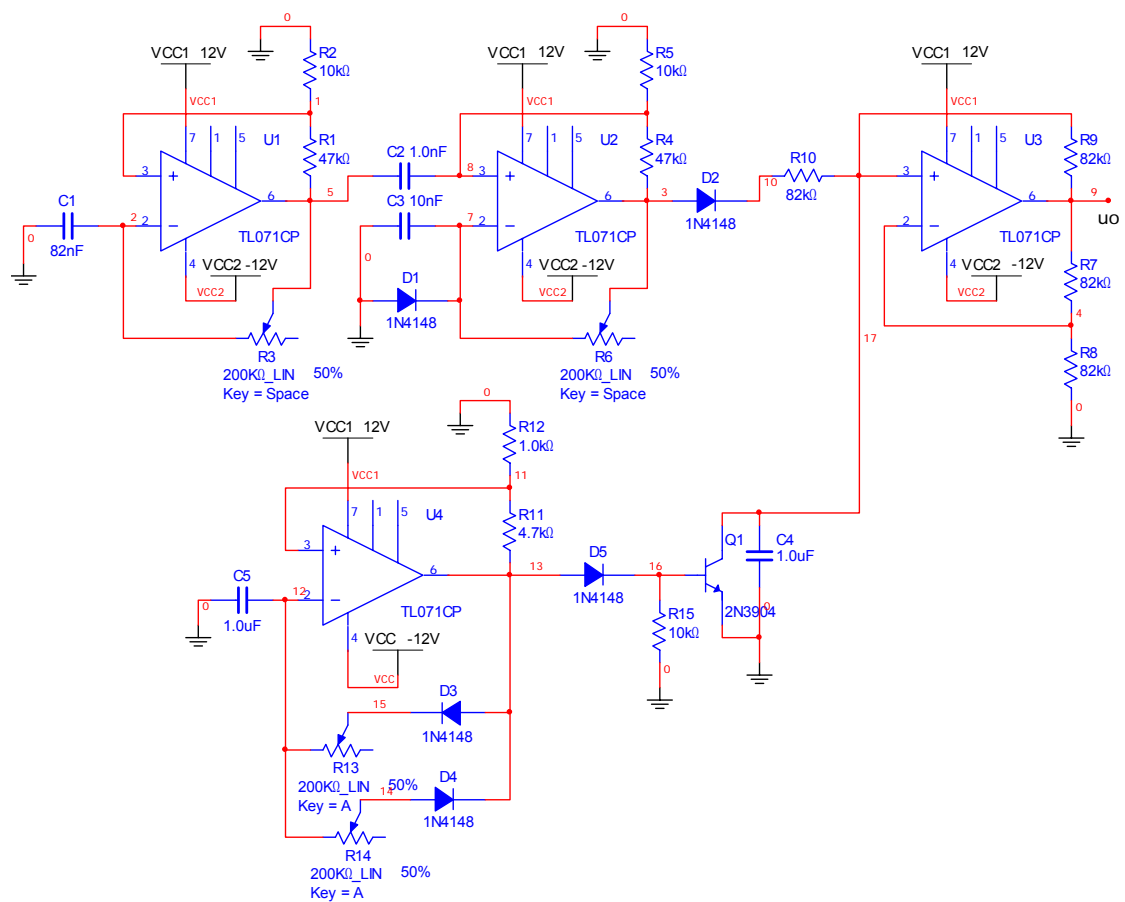
Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στην είσοδο και στην έξοδο του κυκλώματος από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος του σχήματος 2.15 (σελ. 33).



Σχήμα 2.16. Κυματομορφές εισόδου (u_i κόκκινη) και εξόδου (u_o μπλε) του μονοσταθούς πολυδονητή αρνητικού παλμού εξόδου

3. ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ - ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ

3.1. Γεννήτρια κλιμακωτής τάσης



Σχήμα 3.1. Γεννήτρια κλιμακωτής τάσης

Το κύκλωμα αυτό έχει τη δυνατότητα να αυξάνει την τάση εξόδου κατά βήματα μέχρι μια ορισμένη τιμή και μετά να μηδενίζει. Η διάρκεια του κάθε βήματος, το ύψος του κάθε βήματος, η συνολική διάρκεια του παλμού εξόδου καθώς και η

παύση ανάμεσα στους παλμούς εξόδου μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα, από τα ποντεσιόμετρα του κυκλώματος.

Ο τελεστικός ενισχυτής U_1 είναι συνδεδεμένος ως ασταθής πολυδονητής. Παράγει συμμετρικούς τετραγωνικούς παλμούς, οι οποίοι οδηγούνται στη συνέχεια στον τελεστικό ενισχυτή U_2 που είναι συνδεδεμένος ως μονοσταθής πολυδονητής. Παράγονται έτσι παλμοί ορισμένου πλάτους, οι οποίοι αφού ανορθωθούν οδηγούνται σε ένα κύκλωμα ολοκληρωτή (U_3). Ο πυκνωτής του κυκλώματος του ολοκληρωτή (C_4) φορτίζει σε κάθε παλμό, κατά τη διάρκεια του θετικού μέρους, κρατώντας το φορτίο του στα ενδιάμεσα τμήματα του παλμού. Η διόδος ανόρθωσης D_2 είναι απαραίτητη για να κρατάει το φορτίο του ο πυκνωτής.

Όταν η έξοδος του U_2 βρίσκεται σε αρνητικό κόρο, η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη και έτσι εμποδίζεται η εκφόρτιση του πυκνωτή C_4 . Έτσι η έξοδος του U_3 αυξάνει κατά βήματα σε κάθε παλμό εισόδου. Ο τελεστικός ενισχυτής U_4 είναι συνδεδεμένος ως ασύμμετρος πολυδονητής. Η διόδος D_5 αποκόπτει την αρνητική συνιστώσα, για να μη βρίσκεται η βάση του Q_1 σε αρνητικότερο δυναμικό από τον εκπομπό και η αντίσταση R_{15} εξασφαλίζει το δυναμικό της γείωσης στη βάση όταν η διόδος D_5 είναι σε αποκοπή.

Στο θετικό μέρος του παλμού της εξόδου του U_4 το τρανζίστορ Q_1 βρίσκεται στον κόρο και εκφορτίζεται έτσι ο πυκνωτής σε δυναμικό V_{CE} με αποτέλεσμα να μηδενίζεται σχεδόν η έξοδος του U_3 . Στο αρνητικό μέρος του παλμού της εξόδου του U_4 το τρανζίστορ Q_1 βρίσκεται σε αποκοπή και ο πυκνωτής φορτίζει όπως περιγράψαμε παραπάνω.

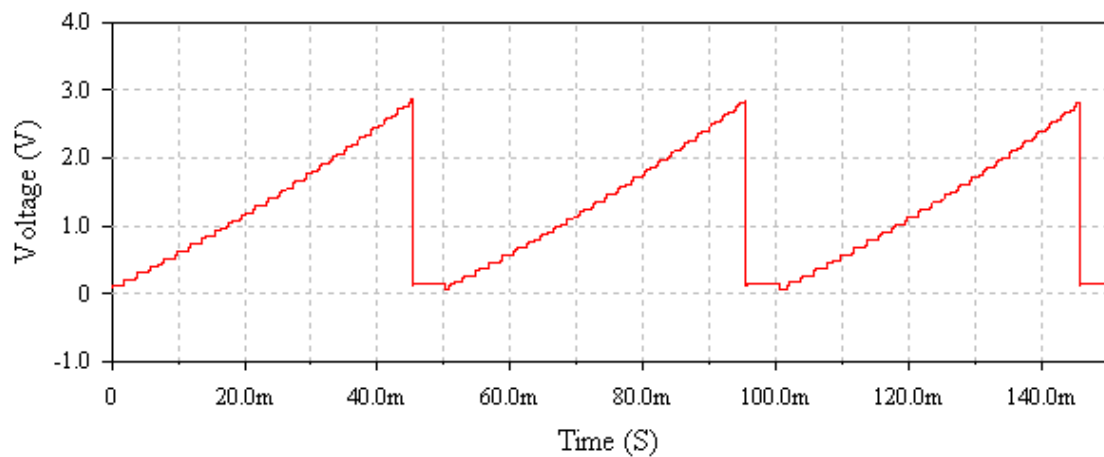
Η διάρκεια του βήματος ρυθμίζεται από την R_3 , η οποία αλλάζει την περίοδο ταλάντωσης του U_1 , με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται μόνο ο χρόνος του αρνητικού μέρους του παλμού στην έξοδο του U_2 και στην ουσία ο χρόνος που ο πυκνωτής C_4 παραμένει σε σταθερή τάση.

Το ύψος του βήματος ρυθμίζεται από την R_6 , η οποία καθορίζει τη χρονική διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού στην έξοδο του U_2 , δηλαδή το χρόνο που ο πυκνωτής C_4 φορτίζει και άρα αυξάνει η τάση στην έξοδο του U_3 .

Η χρονική διάρκεια του κλιμακωτού παλμού εξόδου ρυθμίζεται από την R_{14} , η οποία διαμορφώνει τη διάρκεια του αρνητικού μέρους του παλμού εξόδου του U_4 , με αποτέλεσμα να καθορίζει το χρόνο που το Q_1 βρίσκεται σε αποκοπή και άρα ο πυκνωτής C_4 φορτίζει.

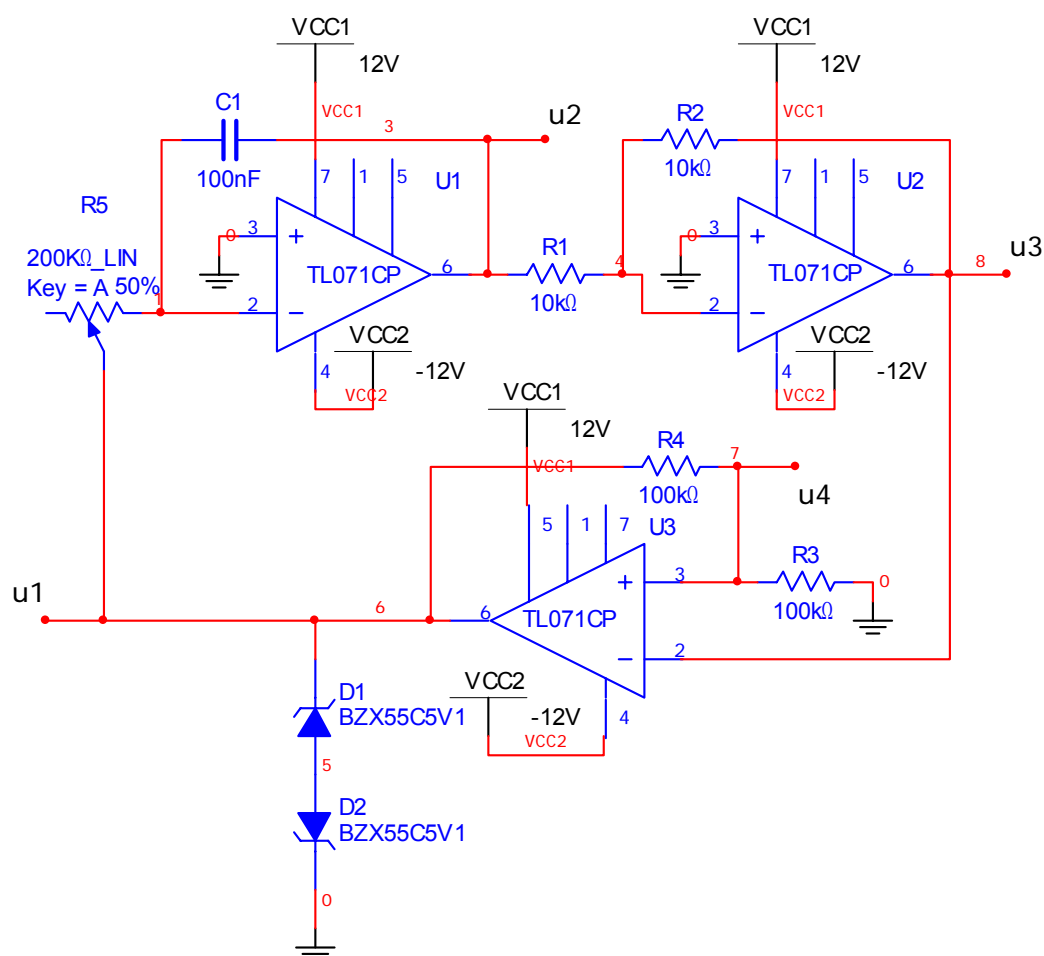
Η απόσταση μεταξύ των κυματομορφών ρυθμίζεται από την R_{13} , η οποία αλλάζει τη διάρκεια του θετικού μέρους του παλμού εξόδου του U_4 κατά την οποία το Q_1 βρίσκεται στον κόρο και ο πυκνωτής C_4 σε δυναμικό V_{CE} .

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η κυματομορφή εξόδου του κυκλώματος της γεννήτριας κλιμακωτής τάσης από κατάλληλη προσομοίωση του κυκλώματος του σχήματος 3.1 (σελ. 35).



Σχήμα 3.2. Κυματομορφή εξόδου γεννήτριας κλιμακωτής τάσης

3.2. Γεννήτρια τριγωνικών – τετραγωνικών σημάτων



Σχήμα 3.3. Βασικό κύκλωμα γεννήτριας τριγωνικών - τετραγωνικών σημάτων

Το κύκλωμα αυτό έχει τη δυνατότητα να παράγει τριγωνικά και τετραγωνικά σήματα. Ο τελεστικός ενισχυτής U_1 είναι συνδεδεμένος ως ολοκληρωτής αναστροφής, ο U_2 είναι συνδεδεμένος ως αναστροφέας τάσης και ο U_3 ως συγκριτής με υστέρηση. Η έξοδος του ολοκληρωτή μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο με σταθερή κλίση αντίθετου όμως πρόσημου από αυτό της τάσης εισόδου. Ο αναστροφέας τάσης είναι απαραίτητος για να επαναφέρει το πρόσημο της εξόδου του ολοκληρωτή μετά από την παραπάνω αναστροφή. Στο συγκριτή, συγκρίνεται η διορθωμένη έξοδος του ολοκληρωτή με ένα κλάσμα της τάσης εξόδου του συγκριτή, που ρυθμίζεται από τις διόδους zener και τις αντιστάσεις R_3 , R_4 . Η αλλαγή κατάστασης στην έξοδο του συγκριτή θα αλλάξει και το πρόσημο της τάσης στην είσοδο του ολοκληρωτή, με αποτέλεσμα να βρίσκεται το κύκλωμα συνεχώς σε

ταλάντωση. Οι δίοδοι zener είναι απαραίτητοι για να απαλείψουμε τυχόν διαφορές στις τάσεις κόρου του τ.ε. ώστε να εξασφαλίσουμε ίδιες τάσεις σύγκρισης θετικής και αρνητικής ημιπεριόδου και συμμετρικές κυματομορφές εξόδου.

Η περίοδος του σήματος εξαρτάται από τα RC του ολοκληρωτή και από την τάση σύγκρισης του συγκριτή. Στη γενική περίπτωση η τάση σύγκρισης είναι

$$u_3 = \pm \beta u_1 = \pm \beta (V_Z + V_D), \quad \beta = \frac{R_3}{R_3 + R_4}. \text{ Έτσι η περίοδος του σήματος εξόδου}$$

δίνεται από τη σχέση:

$$u_2(t) = u_2(0) - \frac{1}{R_5 C_1} \int_0^t u_1 dt = u_2(0) - \frac{u_1}{R_5 C_1} t$$

$$\left. \begin{aligned} u_2(T/2) &= u_2(0) - \frac{u_1}{2R_5 C_1} T, & u_1 &= V_Z + V_D \\ u_2(T/2) &= -u_2(0) = -u_3 = -\beta u_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T = 4\beta R_5 C_1 \quad (3.1)$$

Το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής μπορεί να ρυθμιστεί από τις αντιστάσεις R_3, R_4 . Μεταβάλλοντας το λόγο τους μεταβάλλεται και η τάση σύγκρισης στο συγκριτή και συνεπώς η τάση στην οποία γίνεται η αλλαγή κατάστασης στην έξοδό του.

Η αλλαγή του λόγου των αντιστάσεων επηρεάζει και τη συχνότητα του κυκλώματος όπως προκύπτει από τη σχέση (3.1). Η έξοδος του συγκριτή παραμένει στην ίδια κατάσταση (θετικού ή αρνητικού κόρου), μέχρι η τάση στην έξοδο του ολοκληρωτή αναστροφέα (U_2) να φτάσει την τάση σύγκρισης και να την ξεπεράσει ελάχιστα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση σύγκρισης, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της συγκεκριμένης κατάστασης και κατά συνέπεια η περίοδος του σήματος.

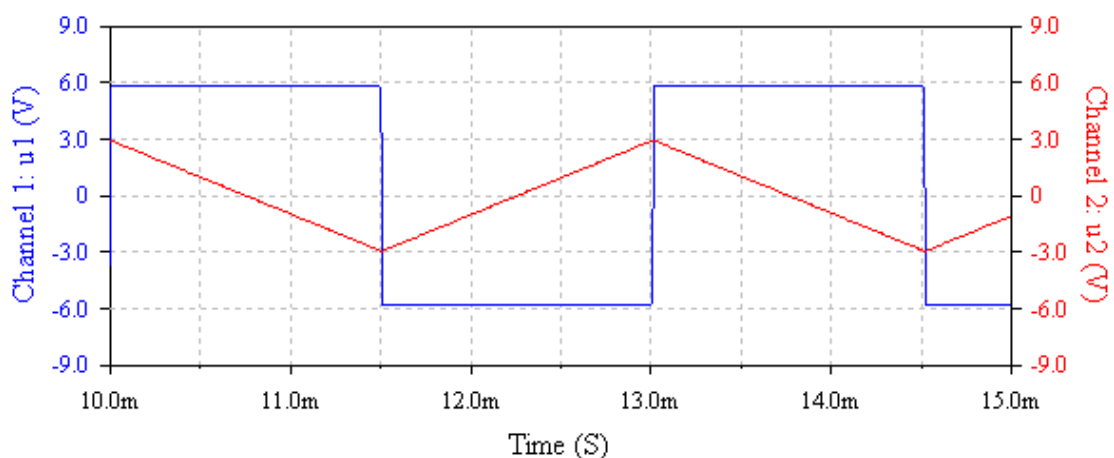
Η περίοδος του σήματος μπορεί επίσης να μεταβληθεί από την ενίσχυση του αναστροφέα (λόγος αντιστάσεων R_1, R_2). Επειδή η σύγκριση γίνεται με την τάση εξόδου του συγκριτή (u_3), αν αυτή είναι πολλαπλάσια της τάσης εξόδου του ολοκληρωτή (u_2), ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή C_1 προκύπτει υποπολλαπλάσιος και αντίστοιχα και η περίοδος.

Η συμμετρία των σημάτων μπορεί να μεταβληθεί αν γίνει χρήση διόδων zener με διαφορετική τιμή. Εμφανίζεται έτσι διαφορετικό πλάτος για την κάθε ημιπερίοδο στην έξοδο του συγκριτή (u_1), με αποτέλεσμα να υπάρχει διαφορετική τάση σύγκρισης κατά απόλυτη τιμή και διαφορετικά μέγιστα και ελάχιστα. Συνεπώς εμφανίζονται ασύμμετροι παλμοί σε όλα τα σημεία, τόσο στη διάρκεια όσο και στο πλάτος.

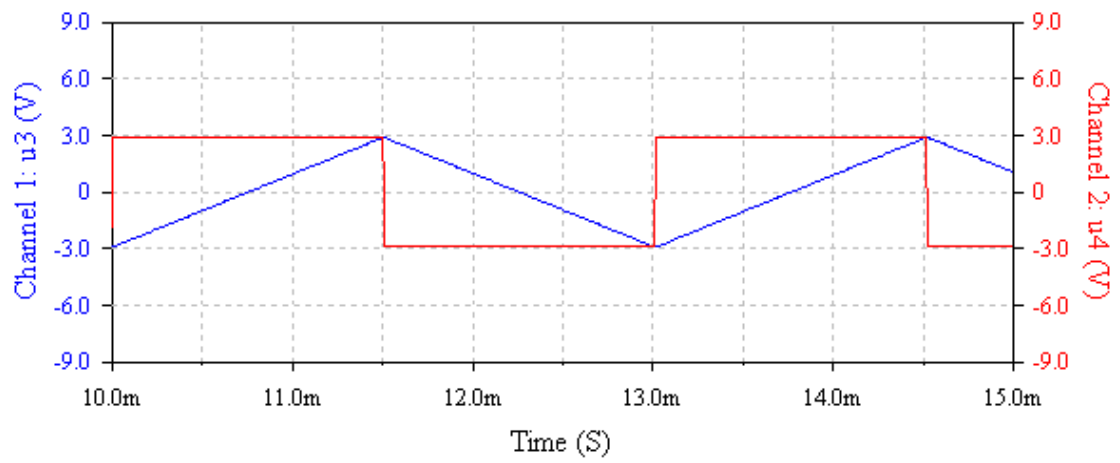
Ασύμμετρיות στο πλάτος μπορούν να εμφανιστούν αν εφαρμόσουμε τάση αναφοράς (V_{ref}) στις εισόδους μη αναστροφής του συγκριτή ή του αναστροφέα. Η τάση αναφοράς στον συγκριτή, θα μετατοπίσει τον βρόγχο υστέρησης, αλλάζοντας τις τάσεις σύγκρισης, εισάγοντας έτσι ένα DC offset στα σημεία u_2 , u_3 και u_4 (θετικό στα u_3 και u_4 , αρνητικό στο u_2). Η τάση αναφοράς στον αναστροφέα θα εμφανίσει ένα DC offset στην τάση του σημείου u_2 .

Ασύμμετρία στη διάρκεια μπορεί να εμφανιστεί αν εφαρμόσουμε τάση αναφοράς (V_{ref}) στην είσοδο μη αναστροφής του ολοκληρωτή. Η τάση αναφοράς θα προστεθεί στην τάση που εφαρμόζεται στον πυκνωτή, διαφοροποιώντας έτσι το ρεύμα φόρτισης από το ρεύμα εκφόρτισης, με αποτέλεσμα το μέτρο της κλίσης στη μεταβολή της εξόδου να είναι διαφορετικό όταν αυτή είναι θετική και διαφορετικό όταν είναι αρνητική.

Στα σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στα διάφορα σημεία του κυκλώματος του σχήματος 3.3 (σελ. 38) από κατάλληλη προσομοίωσή του.

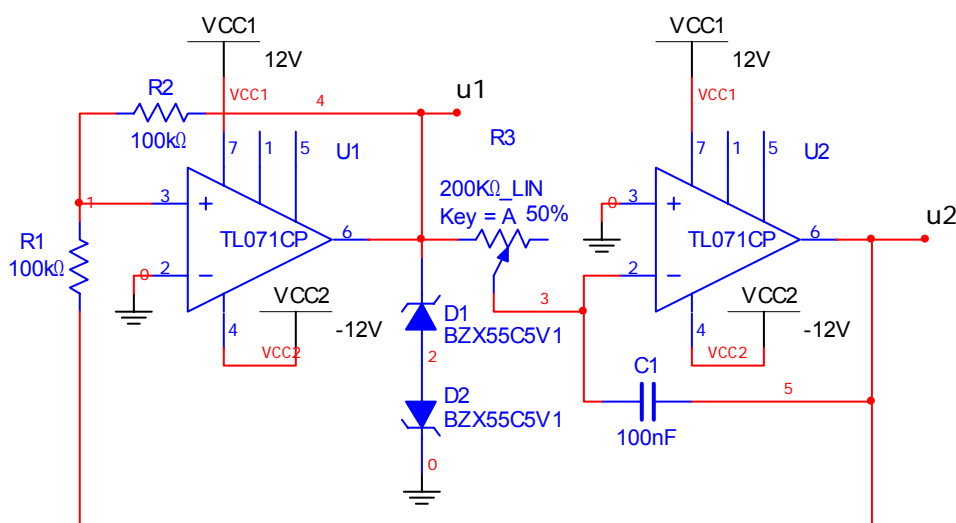


Σχήμα 3.4. Κυματομορφές λειτουργίας στα σημεία u_1 και u_2



Σχήμα 3.5. Κυματομορφές λειτουργίας στα σημεία u_3 και u_4

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



Σχήμα 3.6. Απλή γεννήτρια με δύο τελεστικούς ενισχυτές

Το κύκλωμα του σχήματος 3.3 (σελ. 38) έχει τρεις τελεστικούς ενισχυτές. Γίνεται χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή για αναστροφή του σήματος εξόδου του ολοκληρωτή. Με μια μικρή τροποποίηση είναι δυνατόν να παραλείψουμε τη βαθμίδα του αναστροφέα. Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται το απλούστερο κύκλωμα γεννήτριας με δύο τελεστικούς ενισχυτές.

Στο κύκλωμα του σχήματος 3.6 η έξοδος του ολοκληρωτή οδηγείται μέσω του διαιρέτη τάσης R_1 - R_2 στην είσοδο μη αναστροφής του συγκριτή και η είσοδος αναστροφής του συγκριτή συνδέεται στη γείωση (ή σε τάση αναφοράς). Μόλις τροφοδοτηθεί το κύκλωμα, ο τελεστικός ενισχυτής U_1 οδηγείται σε κατάσταση κόρου λόγω θετικής ανάδρασης. Υποθέτουμε ότι αρχικά οδηγείται σε θετικό κόρο. Η έξοδος του ολοκληρωτή αρχίζει να μεταβάλλεται γραμμικά με αρνητική κλίση. Όταν η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή γίνει μηδέν και ελάχιστα αρνητική, η έξοδος περνάει σε αρνητικό κόρο. Ο ολοκληρωτής στη συνέχεια αρχίζει να μεταβάλλεται γραμμικά με θετική κλίση, μέχρι η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή γίνει μηδέν και ελάχιστα θετική. Η έξοδος του ολοκληρωτή τότε θα μεταβεί σε θετικό κόρο συνεχίζοντας έτσι τον κύκλο.

Οι δίοδοι zener είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του κυκλώματος. Αν υποθέσουμε ότι η τάση θετικού κόρου του συγκριτή είναι μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή από την τάση αρνητικού κόρου του ολοκληρωτή, η τάση στην είσοδο μη αναστροφής του συγκριτή δεν θα μπορέσει σε καμία περίπτωση να γίνει ελάχιστα αρνητική στην αντίστοιχη φάση του κύκλου, ώστε να συνεχιστεί η ταλάντωση του κυκλώματος.

Η περίοδος του σήματος εξαρτάται από τα RC του ολοκληρωτή και από την τάση σύγκρισης του συγκριτή. Αν οι αντιστάσεις R_1 , R_2 είναι ίσες, αλλαγή της κατάστασης θα συμβαίνει όταν η τάση εξόδου του ολοκληρωτή γίνει ίση και αντίθετη με την τάση εξόδου του συγκριτή. Έτσι η περίοδος του σήματος εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$u_2(t) = u_2(0) - \frac{1}{R_3 C_1} \int_0^t u_1 dt = u_2(0) - \frac{u_1}{R_3 C_1} t$$

$$\left. \begin{aligned} u_2(T/2) &= u_2(0) - \frac{u_1}{2R_3 C_1} T, & u_1 &= V_Z + V_D \\ u_2(T/2) &= -u_2(0) = -u_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

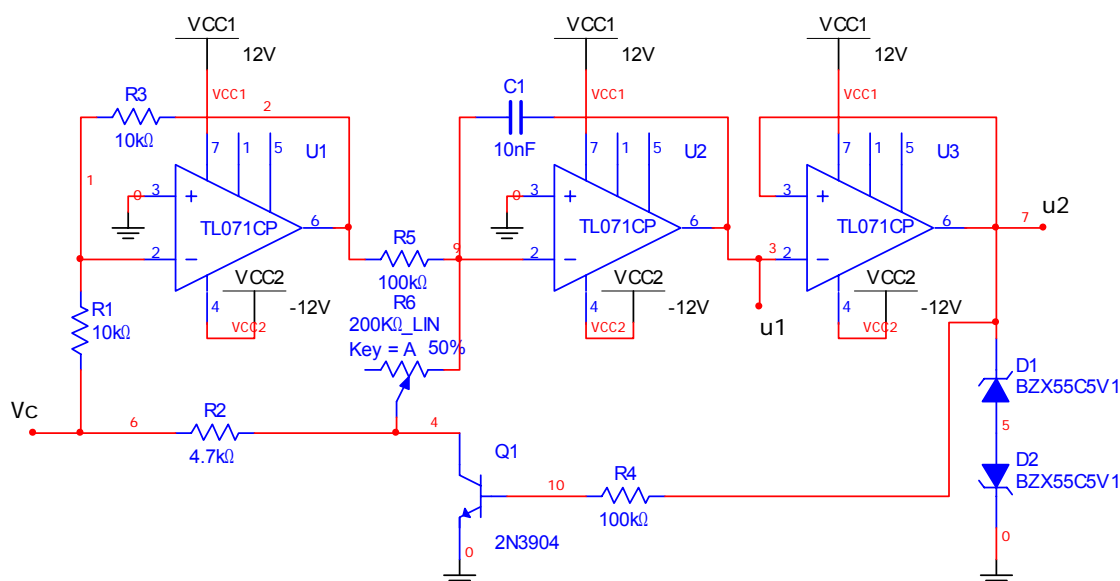
$$\Rightarrow T = 4R_3 C_1 \quad (3.2)$$

Το πλάτος των κυματομορφών εξαρτάται από τις δίοδους zener ($u_1 = u_2 = V_Z + V_D$) όταν αυτές είναι όμοιες. Αλλαγή τους με ζεύγος ανόμοιων δίοδων 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 $u_2 = 2\left(V_{ref} \pm \frac{u_1}{2}\right)$, εισάγοντας στην ουσία μια DC συνιστώσα πλάτους $2V_{ref}$ στην κυματομορφή του ολοκληρωτή.

3.4. Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση



Σχήμα 3.7. Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση

Στα κυκλώματα που μελετήσαμε, ο κύριος μηχανισμός ρύθμισης της συχνότητας ήταν κάποιο ποτενσιόμετρο συνδεδεμένο στον ολοκληρωτή, το οποίο ρυθμίζαμε χειροκίνητα. Υπάρχει ωστόσο η ανάγκη να γίνεται αυτόματα η ρύθμιση της συχνότητας παρακολουθώντας το κύκλωμα μια τάση ρύθμισης. Αυτά τα κυκλώματα ονομάζονται ταλαντωτές ελεγχόμενοι από τάση (Voltage Control Oscillator VCO). Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ένα απλό κύκλωμα τέτοιου ταλαντωτή.

Στο κύκλωμα του σχήματος 3.7 ο τελεστικός ενισχυτής U_1 είναι συνδεδεμένος ως αναστροφέας της τάσης ρύθμισης, το U_2 ως ολοκληρωτής και το U_3 ως συγκριτής με υστέρηση. Οι δίοδοι zener είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του κυκλώματος στην περίπτωση που οι τάσεις κόρου του συγκριτή είναι μεγαλύτερες από τις τάσεις κόρου του ολοκληρωτή ως χαρακτηριστικά των ολοκληρωμένων. Το τρανζίστορ Q_1 άγει κατά τη θετική ημιπερίοδο, με αποτέλεσμα ο πυκνωτής C_1 του ολοκληρωτή να φορτίζει από την έξοδο του U_1 μέσω της R_5 . Κατά την αρνητική ημιπερίοδο το Q_1 βρίσκεται σε αποκοπή, με αποτέλεσμα ο πυκνωτής C_1 του ολοκληρωτή να φορτίζει από δύο κλάδους: από την έξοδο του U_1 μέσω της R_5 και από την V_C μέσω των R_2 και

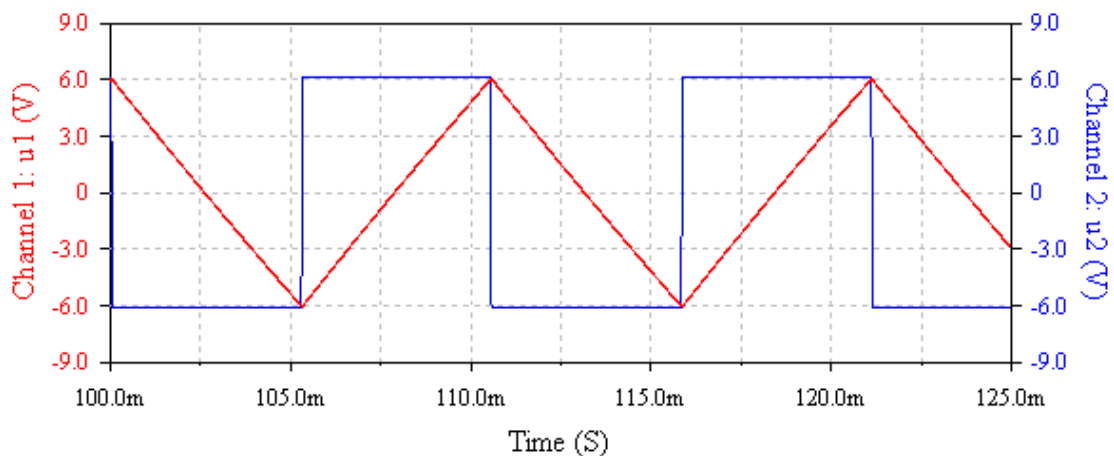
R_6 . Αν φροντίσουμε, με κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων R_5 , R_2 και R_6 , το ρεύμα δια μέσω των R_2 και R_6 να είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα δια μέσω της R_5 , τότε ο πυκνωτής θα φορτίζει μόνο από ρεύμα δια μέσω του πρώτου κλάδου. Αν επίσης φροντίσουμε, το ρεύμα δια μέσω των R_2 και R_6 να είναι ακριβώς διπλάσιο, τότε οι χρόνοι φόρτισης θα είναι ίσοι για τις δύο ημιπεριόδους και οι κυματομορφές συμμετρικές. Επειδή ο U_1 είναι συνδεδεμένος ως αναστροφέας με απολαβή 1, η τάση στην έξοδό του είναι ακριβώς ίση και αντίθετη με την τάση ρύθμισης. Έτσι η συνθήκη για να είναι οι κυματομορφές συμμετρικές, είναι η αντίσταση R_5 να είναι ακριβώς διπλάσια από το άθροισμα των αντιστάσεων R_2 και R_6 . Η περίοδος του σήματος εξόδου για συμμετρική κυματομορφή δίνεται από τη σχέση:

$$u_1(t) = u_1(0) - \frac{1}{R_5 C_1} \int_0^t V_c dt = u_1(0) - \frac{V_c}{R_5 C_1} t$$

$$\left. \begin{aligned} u_1(T/2) &= u_1(0) - \frac{V_c}{2R_5 C_1} T, & u_2 &= V_Z + V_D \\ u_1(T/2) &= -u_1(0) = -u_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T = \frac{4R_5 C_1 (V_Z + V_D)}{V_c} \quad (3.3)$$

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι κυματομορφές στα διάφορα σημεία του κυκλώματος του σχήματος 3.7 (σελ. 45) από κατάλληλη προσομοίωσή του.



Σχήμα 7. Κυματομορφές λειτουργίας στα σημεία u_1 και u_2

© 2009

Πορλιδάς Δημήτριος

www.porlidas.gr

dporli@physics.auth.gr

Τελεστικοί Ενισχυτές Κυκλώματα Πειραματικές Μετρήσεις και Μέθοδοι