

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ

7.1 Εισαγωγή

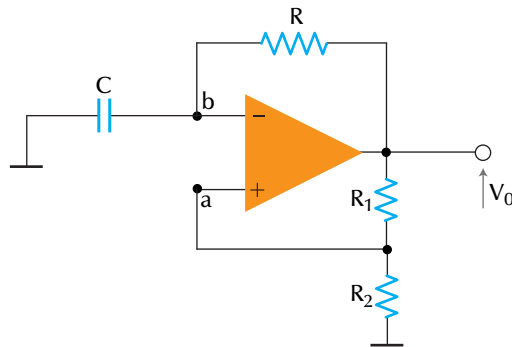
Στα ηλεκτρονικά συστήματα συχνά χρειάζονται και άλλες μορφές σημάτων εκτός από ημιτονικές κυματομορφές/σήματα. Συνήθεις κυματομορφές είναι οι απλοί (μεμονομένοι) παλμοί σταθερής διάρκειας, οι περιοδικές τετραγωνικές κυματομορφές και οι τριγωνικές κυματομορφές. Οι τετραγωνικές κυματομορφές αποτελούνται από μια σειρά τετραγωνικών παλμών. Τυπικό παράδειγμα τέτοιων παλμών είναι οι **ωρολογιακοί παλμοί** (clock) των ψυφιακών υπολογιστών. Οι τριγωνικές κυματομορφές αποτελούνται από σειρά τριγωνικών παλμών και είναι ιδιαίτερως σημαντικές για τη σάρωση των παλμογράφων, στους δέκτες της τηλεόρασης καθώς και στα ραντάρ.

Οι **γεννήτριες ημιτονικών** (αρμονικών) κυματομορφών βασίζονται κυρίως στα κυκλώματα **αρμονικών ταλαντωτών** που γνωρίσαμε στο Κεφ. 6. Αντίθετα, οι ηλεκτρονικές γεννήτριες που δημιουργούν **μη ημιτονικές κυματομορφές**, όπως απλούς παλμούς, τετραγωνικές κυματομορφές και τριγωνικές κυματομορφές, βασίζονται κυρίως στα κυκλώματα των **πολυδονητών**. Οι πολυδονητές χαρακτηρίζονται από πολύ γρήγορες μεταβάσεις μεταξύ δύο διακεκριμένων καταστάσεων εξόδου και ταξινομούνται σε τέσσερις βασικές κατατηγορίες οι οποίες καθορίζονται από τη χρονική σταθερότητα των καταστάσεων εξόδου. Οι κατηγορίες αυτές είναι ο αυτοδιεγειρόμενος πολυδονητής, ο πολυδονητής μιας βολής, ο δισταθής πολυδονητής και τέλος, οι ταλαντωτές ανατροπής. Όλοι οι πολυδονητές είναι **μη γραμμικοί ταλαντωτές** και επομένως στην έξοδό τους δε δίνουν ημιτονικό σήμα, αλλά, επειδή τα ενεργά τους στοιχεία οδηγούνται στον κόρο, δίνουν στην έξοδό τους είτε τετραγωνικούς είτε τριγωνικούς παλμούς. Στα όσα ακολουθούν θα εξετάσουμε διάφορους βασικούς τύπους πολυδονητών μαζί με **τυπικές γεννήτριες κυματομορφών**, όπως οι γεννήτριες τριγωνικών ή πριονωτών κυματομορφών, ο διεγέρτης Schmitt και ο χρονιστής 555. Τέλος, θα εξετάσουμε ειδικούς τύπους κυκλωμάτων, όπως ο ταλαντωτής ο ελεγχόμενος από τάση (**VCO**) και το σύστημα **PLL**.

7.2 Αυτοδιεγειρόμενος πολυδονητής με TE

Το Σχ.7.1 δείχνει ένα διαφορικό ενισχυτή με TE που λειτουργεί σαν **αυτοδιεγειρόμενος πολυδονητής**. Οι δυο καταστάσεις του κυκλώματος μεταξύ των οποίων αυτο-ταλαντώνεται είναι αυτές στις οποίες η έξοδος

του ενισχυτή μπαίνει στο θετικό και στον αρνητικό κόρο αντίστοιχα. Η έξοδος του ενισχυτή είναι *τετραγωνικοί παλμοί*, η περίοδος αυτών καθορίζεται από τη σταθερά χρόνου RC και από το συντελεστή ανασύζευξης που δημιουργεί ο διαιρέτης τάσης R_1 , R_2 .



Σχήμα 7.1. Αυτοδιεγερόμενος πολυδονητής με TE

Η λειτουργία του κυκλώματος εξηγείται με βάση τις κυματομορφές του Σχ.7.2. Ξεκινώντας από ένα χρόνο t_0 όπου, όπως βλέπουμε από τα Σχ.7.2 α, β, ο ενισχυτής είναι στον *αρνητικό κόρο*, ενώ η τάση στο σημείο α είναι $-\beta V_{sat}$ όπου,

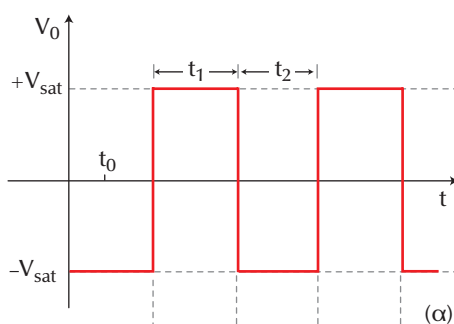
$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.2.1)$$

είναι ο συντελεστής ανασύζευξης.

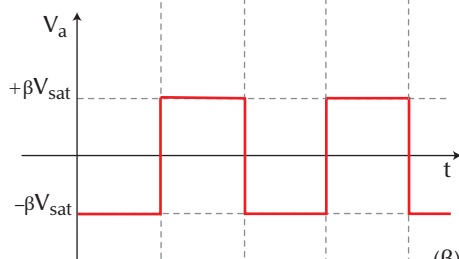
Σ' αυτή την κατάσταση, το σημείο b είναι θετικό ως προς το a και η τάση του ελαττώνεται καθώς ο πυκνωτής C *εκφορτίζεται* μέσω της αντίστασης R. Όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο σημείων (a, b) πλησιάζει στο μηδέν, ο ενισχυτής εξέρχεται από τον κόρο, αλλά η *ανασύζευξη* από την έξοδο στο σημείο a (που είναι τώρα θετική) οδηγεί τον ενισχυτή στο *θετικό κόρο*. Επειδή η τάση στα άκρα του πυκνωτή, που είναι σε σειρά με την αντίσταση, δεν μπορεί να αλλάξει απότομα, η τάση στο σημείο b παραμένει ουσιαστικά σταθερή κατά τη διάρκεια της παραπάνω μετάβασης. Τώρα ο πυκνωτής C *φορτίζεται* μέσω της R και η τάση στο σημείο b αυξάνει εκθετικά (βλ. Σχ.7.2 γ). Όταν η τάση αυτή φτάσει στην τιμή $+\beta V_{sat}$ το κύκλωμα επιστρέφει πάλι στην κατάσταση που είχε ο ενισχυτής όταν ήταν στον αρνητικό κόρο, κ.ο.κ.

Για συμμετρικό παλμό, δηλ. $t_1=t_2$, αποδεικνύεται, ότι η περίοδος T δίνεται από τη σχέση:

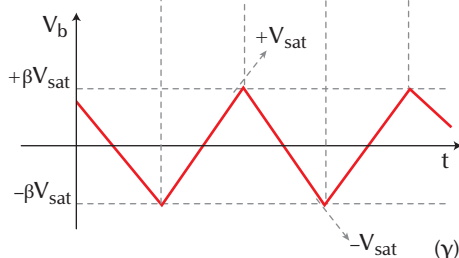
$$T = \frac{1}{f_0} = 2RC \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (7.2.2)$$



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 7.2. Κυματομορφές του αυτοδιεγερμένου πολυδονητή με TE

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η συχνότητα των παλμών f_0 δεν είναι μόνο συνάρτηση της σταθεράς χρόνου $\tau=RC$, αλλά και του λόγου μεταξύ των R_2 και R_1 . Όταν $R_1=1.16R_2$, η πιο πάνω εξίσωση απλουστεύεται στην εξής μορφή:

$$f_0 = \frac{1}{2RC} \quad (7.2.3)$$

⇒ Παράδειγμα 7-1

Με βάση τον αυτοδιεγερμένο πολυδονητή με TE, υπολογίστε γεννήτρια/ταλαντωτή τετραγωνικών συμμετρικών παλμών με συχνότητα ταλάντωσης 500 Hz χρησιμοποιώντας τον TE 741 και τάσεις τροφοδοσίας ± 12 V.

Σχεδιάστε τις κυματομορφές της εξόδου και του πυκνωτή.

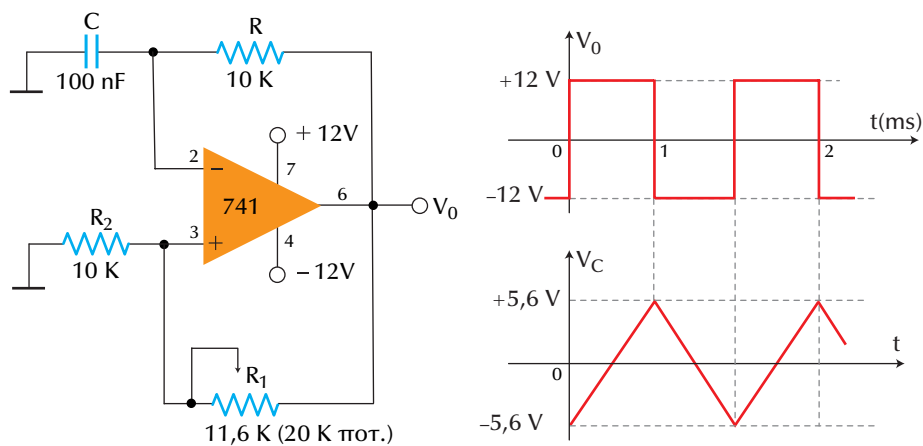
Λύση

Δεχόμαστε $R_2=10$ kΩ. Για απλούστευση των υπολογισμών, δεχόμαστε τη συνθήκη $R_1=1.16$

$R_2 = 1.16 \times 10 \text{ k}\Omega = 11.6 \text{ k}\Omega$. Στη συνέχεια επιλέγουμε μια τιμή $C = 100 \text{ nF}$ για τον πυκνωτή C και υπολογίζουμε την αντίσταση R με βάση την Εξ.(7.2.3). Επομένως,

$$R = \frac{1}{2f_0 C} = \frac{1}{2 \times 500 \times 100 \times 10^{-9}} = 10 \text{ k}\Omega$$

Το Σχ.7.3 δείχνει το κύκλωμα και τις κυματομορφές του.



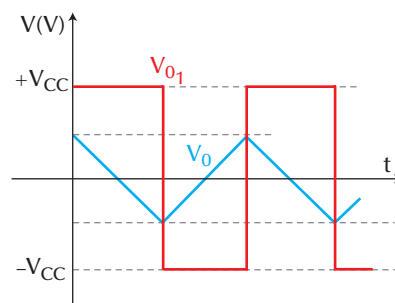
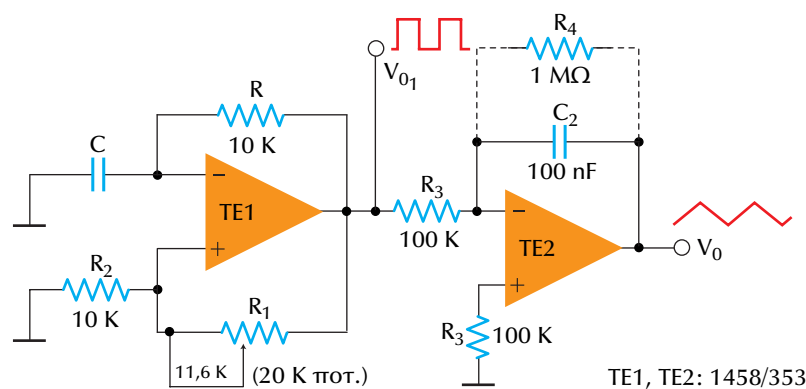
Σχήμα 7.3. Γεννήτρια τετραγωνικών παλμών και κυματομορφές της

7.3 Γεννήτρια τριγωνικών παλμών

Υπενθυμίζουμε κατ' αρχή ότι όταν ένας ολοκληρωτής διεγείρεται από τετραγωνικό παλμό δίνει στην έξοδό του τριγωνικό παλμό. Αυτό σημαίνει, ότι μπορούμε να δημιουργήσουμε μια γεννήτρια τριγωνικών παλμών συνδέοντας σε σειρά **μία γεννήτρια τετραγωνικών παλμών** με έναν **ολοκληρωτή**, όπως δείχνει το Σχ.7.4.

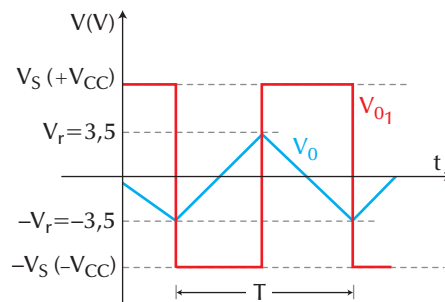
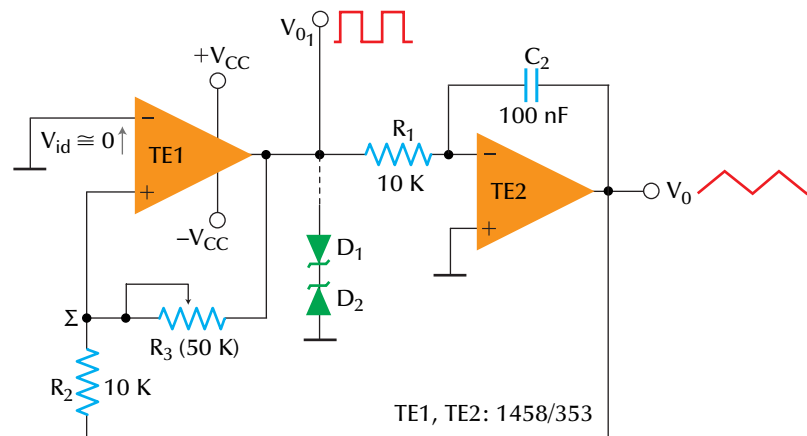
Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιεί 2 ΤΕ. Ο πρώτος ΤΕ δημιουργεί στην έξοδό του τετραγωνικούς παλμούς, ενώ ο δεύτερος συνδεσμοποιείται ως ολοκληρωτής και έτσι δημιουργεί την τριγωνική κυματομορφή. Για να είναι ωστόσο η έξοδος του δεύτερου ΤΕ κανονική τριγωνική κυματομορφή, θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη $5R_3C_2 > T/2$, όπου T είναι η περίοδος της τετρα-

γωνικής κυματομορφής της εισόδου του. Σα γενικό κανόνα, που να ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη, απαιτούμε μια σταθερά χρόνου $R_3 C_2 = T$. Επίσης, για να πετύχουμε σταθερή τριγωνική κυματομορφή θα πρέπει παράλληλα προς τον πυκνωτή C_2 να συνδέσουμε μια αντίσταση $R_4 = 10 R_3$, όπου R_3 είναι μια αντίσταση αντιστάθμισης που βάζουμε στη μη αναστρέφουσα είσοδο του δεύτερου TE. Αν θέλουμε σχετικά μεγάλη συχνότητα ταλάντωσης θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε TE με μεγάλο ρυθμό κλίσης (SR), όπως π.χ. το LM301.



Σχήμα 7.4. Γεννήτρια τριγωνικών κυματομορφών και κυματομορφές του

Μια άλλη μορφή γεννήτριας τριγωνικών κυματομορφών εικονίζεται στο Σχ.7.5. Η γεννήτρια αυτή αποτελείται από ένα **συγκριτή** με τον TE1 ακολουθούμενο από έναν **ολοκληρωτή** με τον TE2. Ο συγκριτής συγκρίνει συνεχώς την τάση στο σημείο Σ με την τάση της αναστρέφουσας εισόδου που είναι μόνιμα σε δυναμικό 0 V. Όταν η τάση στο σημείο Σ συμβεί να γίνει λίγο μικρότερη ή λίγο μεγαλύτερη από 0 V, η έξοδος του TE1 οδηγείται είτε στο θετικό είτε στον αρνητικό κόρο αντίστοιχα.



Σχήμα 7.5. Γεννήτρια τριγωνικών παλμών με συγκριτή και κυματομορφές του

Η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής: Ας δεχθούμε ότι, κάποια στιγμή, η έξοδος του TE1 είναι στο θετικό κόρο $+V_s$ ($\approx +V_{CC}$). Επειδή η τάση αυτή είναι είσοδος του ολοκληρωτή TE2, η έξοδός του θα είναι μια αρνητική γραμμική τάση. Άρα στο ένα άκρο του διαιρέτη τάσης R_2 - R_3 θα υπάρχει η θετική τάση κόρου $+V_s$ του TE1 και στο άλλο η αρνητική γραμμική τάση του TE2. Όταν αυτή η αρνητική γραμμική τάση φτάσει την τιμή $-V_r$, το σημείο Σ αποκτά τάση ελαφρά κάτω από 0 V και επομένως, η έξοδος του TE1 θα μεταπέσει από το θετικό κόρο στον αρνητικό κόρο V_s ($\approx -V_{CC}$). Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος του TE2 θα σταματήσει να οδεύει αρνητικά και θα αρχίσει να οδεύει προς τα θετικά. Η έξοδος αυτή θα συνεχίσει να αυξάνει μέχρις ότου φτάσει την τιμή $+V_r$. Αυτή τη χρονική στιγμή το σημείο Σ αποκτά τάση ελαφρά πάνω από το 0 V και επομένως, η έξοδος του TE1 επιστρέφει πάλι στη θετική τάση κόρου $+V_s$. Η

διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς και οι παραγόμενες κυματομορφές έχουν τη μορφή που εικονίζονται στο Σχ.7.5.

Είναι προφανές και από το σχήμα, ότι η συχνότητα του τετραγωνικού παλμού και η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής θα είναι ίδιες μεταξύ τους. Το πλάτος της τετραγωνικής κυματομορφής είναι συνάρτηση της dc τάσης τροφοδοσίας. Ωστόσο, μπορούμε να επιτύχουμε σταθεροποιημένο το επιθυμητό πλάτος της κυματομορφής χρησιμοποιώντας στην έξοδο του TE1 τις κατάλληλες διόδους Zener, όπως δείχνει το σχήμα.

Αποδεικνύεται, ότι η τάση εξόδου (τιμή peak-to-peak) και η συχνότητα ταλάντωσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$v_{0(p-p)} = \frac{2R_2}{R_3} V_s \quad (7.3.1)$$

$$f_0 = \frac{R_3}{4R_1C_1R_2} \quad (7.3.2)$$

⇒ Παράδειγμα 7-2

Θα υπολογίσουμε μια γεννήτρια τριγωνικών κυματομορφών, με συχνότητα $f_0 = 1$ kHz και τάση εξόδου $v_{0(p-p)} = 7$ V. Ο τελεστικός ενισχυτής που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ο 1458/772 για τον οποίο $V_s = 14$ V και η τάση τροφοδοσίας είναι ± 15 V.

Λύση

Αφού, η $V_s = 14$ V από την Εξ. (7.3.1), έχουμε:

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{2V_s}{v_{0(p-p)}} = \frac{2 \times 14}{7} = 4$$

Αν δεχθούμε $R_2 = 10$ KΩ, βρίσκουμε $R_3 = 40$ KΩ

Έχοντας δεχθεί $C_1 = 100$ nF, υπολογίζουμε την R_1 από την Εξ.(7.3.2):

$$R_1 = \frac{R_3}{4R_2C_1f_0} = \frac{40 \times 10^3}{4 \times 10 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-9} \times 10^3} = 10 \text{ k}\Omega$$

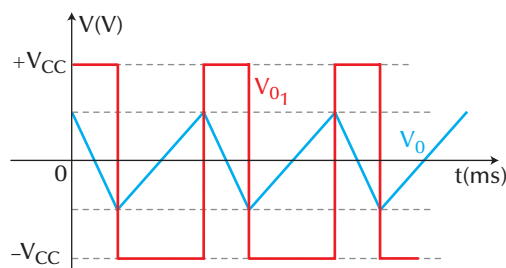
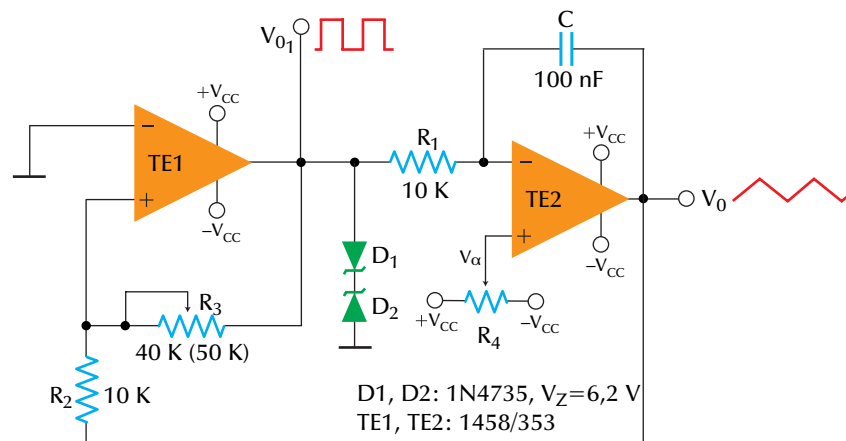
7.4 Γεννήτρια πριονωτής κυματομορφής

Η διαφορά μεταξύ της τριγωνικής και της πριονωτής κυματομορφής είναι ότι η τριγωνική κυματομορφή είναι συμμετρική ως προς τον άξονα του χρόνου, ενώ η πριονωτή όχι. Δηλ. στον τριγωνικό παλμό χρειάζεται ο ίδιος χρόνος για τη μετάβαση από το $-V_s$ στο $+V_s$ και από το $+V_s$ στο $-V_s$. Αντίθετα, στον πριονωτό παλμό οι χρόνοι αυτοί είναι διαφορετικοί και μάλιστα ο χρόνος που ο παλμός ανεβαίνει (χρόνος ανόδου) είναι πολύ πιο μεγάλος από το χρόνο που κατεβαίνει (χρόνος καθόδου) ή το αντίστροφο.

Η τριγωνική κυματομορφή του Σχ.7.5 μετατρέπεται εύκολα σε πριονωτή αν εφαρμόσουμε μια μεταβλητή dc τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο του TE2 του κυκλώματος της γεννήτριας τριγωνικών του προηγούμενου Σχ.7.5. Αυτό πραγματοποιείται με ένα ποτενσιόμετρο που το συνδέουμε ανάμεσα στις dc τροφοδοσίες $+V_{cc}$ και $-V_{cc}$, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.6.

Η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής:

Ανάλογα με τη θέση του ποτενσιομέτρου R_4 , μια dc τάση V_α εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του TE2, πράγμα που δημιουργεί μια dc στάθμη τάσης V_o στην έξοδό του. Αυτό σημαίνει, ότι η κυματομορφή εξόδου του TE2, που ήταν πιο πριν τριγωνική κυματομορφή, θα ανεβαίνει ή θα κατεβαίνει σε κάποια μέση dc στάθμη η οποία είναι συνάρτηση της θέσης της μεσαίας λήψης του R_4 . Όταν η μεσαία λήψη του ποτενσιομέτρου R_4 είναι στη μέση, δηλ. $V_\alpha = 0$, η κυματομορφή εξόδου του TE2 είναι τριγωνική. Για κάθε άλλη θέση της μεσαίας λήψης του ποτενσιομέτρου η έξοδος αυτή θα είναι πριονωτή κυματομορφή. Αν η μεσαία λήψη είναι πιο κοντά στην τάση $-V_{cc}$ ο χρόνος ανόδου της κυματομορφής θα είναι μεγαλύτερος από το χρόνο καθόδου, όπως εικονίζεται στο Σχ.7.6. Αντίθετα, αν η μεσαία λήψη του ποτενσιομέτρου είναι πιο κοντά στην τάση $+V_{cc}$ ο χρόνος καθόδου θα είναι μεγαλύτερος. Επίσης, η συχνότητα της πριονωτής κυματομορφής ελαττώνεται όσο η μεσαία λήψη πλησιάζει προς την $+V_{cc}$ ή την $-V_{cc}$. Το πλάτος όμως, της πριονωτής κυματομορφής είναι ανεξάρτητο από τη θέση του ποτενσιομέτρου R_4 .



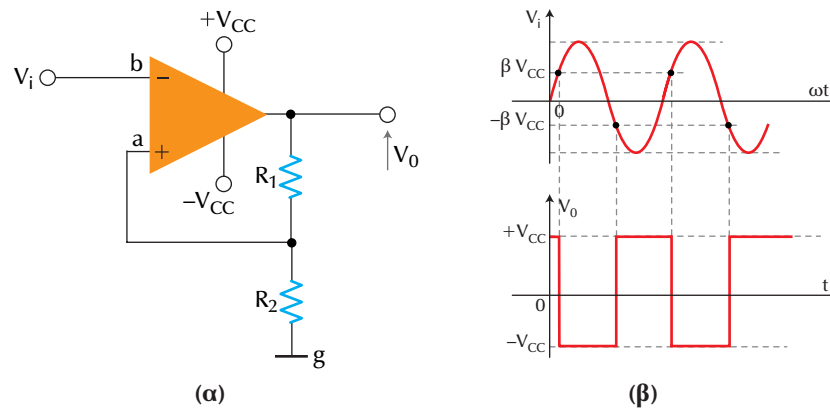
Σχήμα 7.6. Γεννήτρια πριονοτής κυματομορφής

7.5 Διεγέρτης Schmitt με TE

Ένας τρόπος για να δημιουργήσουμε παλμούς τετραγωνικής μορφής είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα ειδικό κύκλωμα που ονομάζεται **διεγέρτης Schmitt** (Schmitt trigger). Το κύκλωμα αυτό μετατρέπει ένα ημιτονικό σήμα εισόδου σε τετραγωνική κυματομορφή ίδιας συχνότητας με το ημιτονικό σήμα.

Το Σχ.7.7 εικονίζει το κύκλωμα ενός διεγέρτη Schmitt με τελεστικό ενισχυτή (TE). Σε αυτό το απλούστατο κύκλωμα παραγωγής κυματομορφών σημαντικό ρόλο παίζει η ανασύζευξη από την έξοδο προς τη μη-αναστρέφουσα είσοδο του TE (θετική ανασύζευξη). Σύμφωνα με τα όσα είδαμε στο Κεφ. 4, ο λόγος ή συντελεστής ανασύζευξης θα δίνεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.5.1)$$



Σχήμα 7.7. Διεγέρτης Schmitt με ΤΕ και οι κυματομορφές του

Το παραπάνω κύκλωμα λειτουργεί ως εξής:

Υποθέτουμε ότι αρχικά, για $v_i = 0$ η τάση εξόδου v_o βρίσκεται στην άνω στάθμη κόρου $+V_{CC}$. Όταν η ημιτονική τάση αυξανόμενη φτάσει στην τιμή $+\beta V_{CC}$ η έξοδος του ΤΕ θα μεταπέσει στην κατάσταση $-V_{CC}$, επειδή η τάση v_{ob} θα έχει γίνει τότε αρνητική. Επειδή τώρα η $V_{ag} = -\beta V_{CC}$, η v_o δε θα αλλάξει κατάσταση, όταν η v_i , ελαττούμενη πέσει πάλι στο $+\beta V_{CC}$ αλλά θα περιμένει μέχρις ότου η v_i φτάσει το $-\beta V_{CC}$, οπότε και η v_o θα επιστρέψει ξανά στο $-V_{CC}$. Μετά, η v_o θα επιστρέψει στο $+V_{CC}$ όταν η τάση εισόδου φτάσει την τιμή $+\beta V_{CC}$ κ.ο.κ. Η έξοδος λοιπόν θα είναι η τετραγωνική κυματομορφή που φαίνεται στο Σχ.7.7.

⇒ Παράδειγμα 7-3

Θα υπολογίσουμε διεγέρτη Schmitt με ΤΕ, με τάση εξόδου $\pm 12\text{ V}$ και λόγο ανασύζευξης $\beta = 0.1$.

Λύση

Η Εξ.(7.5.1) δίνει

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0.1$$

Άρα,

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = 10 \therefore 1 + \frac{R_2}{R_1} = 10 \therefore \frac{R_1}{R_2} = 9 \therefore R_1 = 9 R_2$$

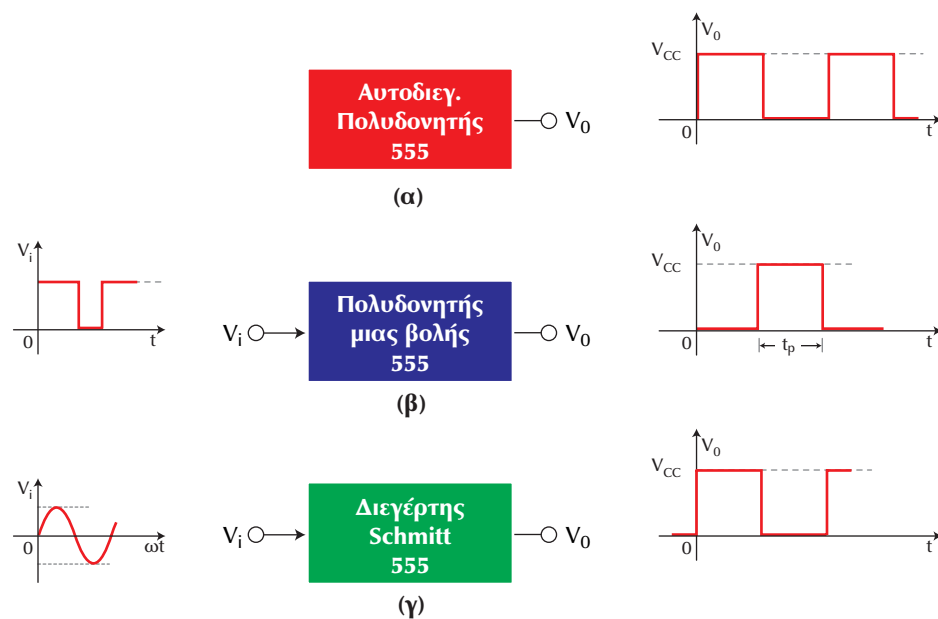
Δεχόμαστε την τιμή $R_2 = 2.2 \text{ k}\Omega$. Συνεπώς, βρίσκουμε

$$R_1 = 19.8 \text{ k}\Omega \approx 20 \text{ k}\Omega$$

Σημειώστε ότι χρησιμοποιούμε τον TE 301.

7.6 Ο Χρονιστής 555

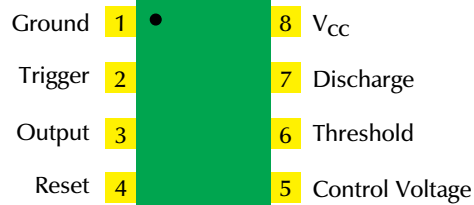
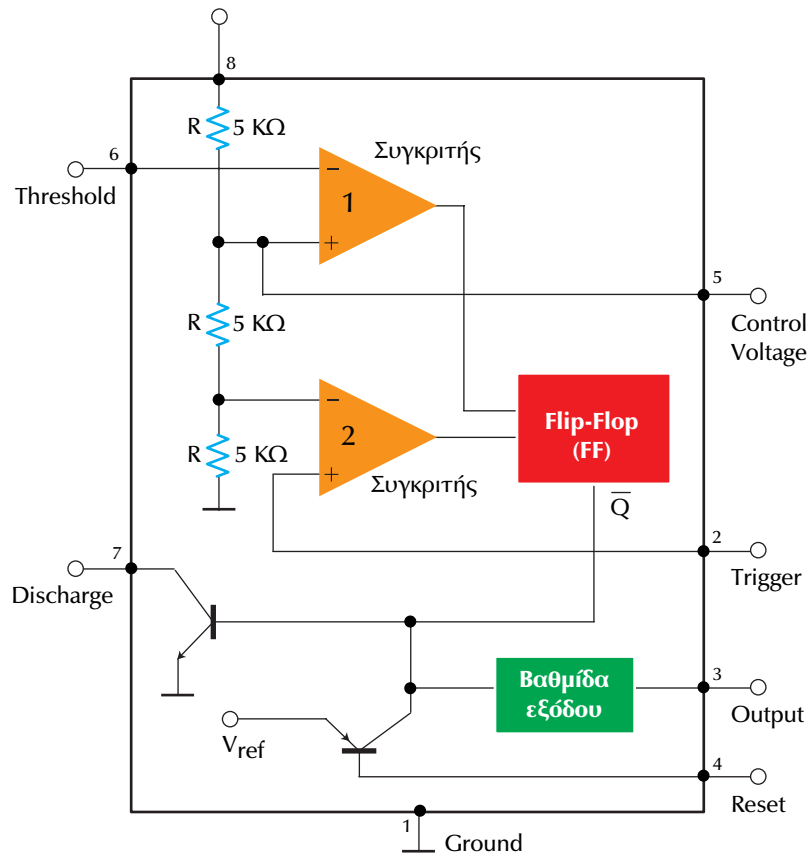
Ο **χρονιστής 555** είναι ολοκληρωμένο κύκλωμα και κατασκευάζεται σήμερα από πολλές εταιρίες. Ο χρονιστής αυτός, ανάλογα με τη συνδεσμότητα και διέγερσή του μπορεί να λειτουργεί ως αυτοδιεγερμένος πολυδονητής, Σχ.7.8α, ως πολυδονητής μιας βολής, Σχ.7.8β και ως διεγέρτης Schmitt, Σχ.7.8γ.



Σχήμα 7.8. Διάφοροι τρόποι λειτουργίας του χρονιστή 555.
Αυτοδιεγερμένος πολυδονητής (α), πολυδονητής μιας βολής (β), Διεγέρτης Schmitt (γ)

Το Σχ.7.9 δείχνει το δομικό διάγραμμα του χρονιστή 555 καθώς και τους ακροδέκτες του σε βάση DIP (υπάρχει και σε βάση TO-99). Οι κυριότεροι από τους ακροδέκτες αυτούς είναι ο ακροδέκτης διέγερσης (2), για σύγκριση της διέγερσης εισόδου με μέρος της τάσης τροφοδοσία, ο ακροδέκτης κατωφλιού (6), για σύγκριση της τάσης κατωφλιού εισόδου

με μέρος της τάσης τροφοδοσίας, ο ακροδέκτης μηδενισμού (4), που τοποθετεί στο 0 τη θέση λειτουργίας και ο ακροδέκτης εκφόρτισης (7), για τη εκφόρτιση ενός εξωτερικού πυκνωτή.



Σχήμα 7.9. Δομικό διάγραμμα του χρονοστή 555 (α), ακροδέκτες (β)

Ας δούμε αναλυτικότερα τους διάφορους ακροδέκτες του 555.

Ο **συγκριτής διέγερσης** (*trigger comparator*) συγκρίνει μια τάση $V_{cc}/3$ με την τάση εισόδου διέγερσης. Όταν η τάση διέγερσης γίνει ίση ή μικρότερη από την $V_{cc}/3$, ο συγκριτής αυτός δημιουργεί έξοδο που οδηγεί το *flip-flop* (FF) στην κατάσταση L (Low), οπότε το FF αποκόβει το τρανζίστορ εκφόρτισης T (*discharge*) και οδηγεί την έξοδο στην κατάσταση H (High) μέσω της βαθμίδας εξόδου (*output stage*, απομονωτής-αντιστροφέας).

Ο **συγκριτής κατωφλίου** (*threshold comparator*) συγκρίνει συνεχώς μια τάση $2V_{cc}/3$ με την τάση εισόδου κατωφλίου. Όταν η τάση κατωφλίου γίνει ίση ή μεγαλύτερη από την τάση $2V_{cc}/3$, ο συγκριτής αυτός δίνει τάση που οδηγεί την έξοδο του FF στην κατάσταση H. Έτσι, το FF οδηγεί τη βάση του τρανζίστορ εκφόρτισης T (*discharge*) και το οδηγεί στον κόρο, όταν το κύκλωμα του συλλέκτη είναι κλειστό (υπάρχει εξωτερική αντίσταση). Ο ακροδέκτης εισόδου είναι τώρα στην κατάσταση L. Αν στην είσοδο εφαρμοσθεί μια χαμηλή τάση (*reset*), η έξοδος οδηγείται στην κατάσταση L.

Ο ακροδέκτης **μηδενισμού** (*reset*) επιτρέπει στο 555 να μηδενίζει τη λειτουργία του που έχει λόγω της διέγερσής του από την είσοδο διέγερσης (*trigger*). Όταν η είσοδος αυτή δε χρησιμοποιείται πρέπει να *συνδέεται στην τάση V_{cc}* . Όταν η είσοδος *reset* γειωθεί, ή όταν η τάση της είναι κάτω από 0.4 V, η έξοδος και ο ακροδέκτης *discharge* είναι περίπου στο δυναμικό γης, δηλ. η έξοδος είναι στην κατάσταση L.

Ο ακροδέκτης **εκφόρτισης** (*discharge*) χρησιμεύει για να εκφορτίζει έναν πυκνωτή, που έχουμε συνδέσει εξωτερικά, κατά τη διάρκεια που η έξοδος είναι στην κατάσταση L. Όταν η έξοδος είναι στην κατάσταση H, ο ακροδέκτης *discharge* ενεργεί σαν ανοικτό κύκλωμα και επιτρέπει στον πυκνωτή να φορτίζεται με ρυθμό που καθορίζεται από μια εξωτερική αντίσταση και τον πυκνωτή.

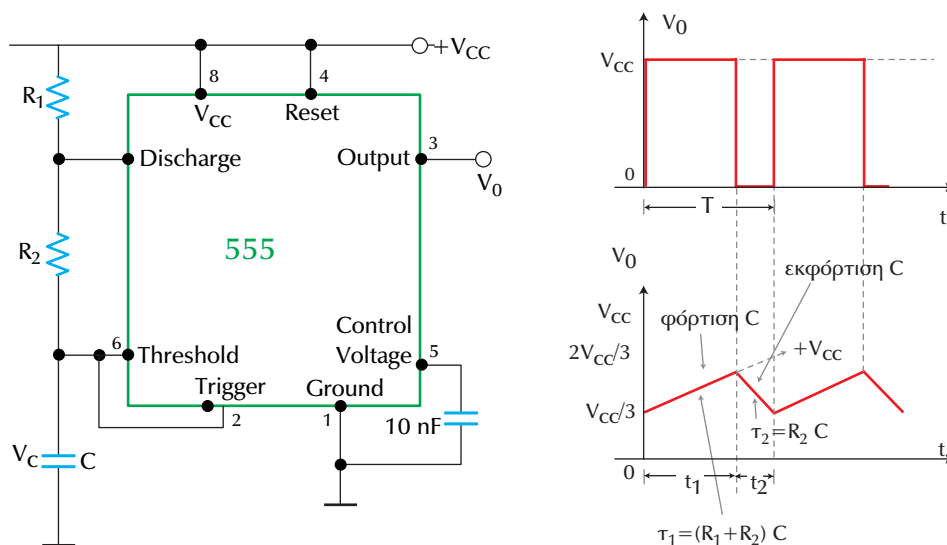
Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχει και ένας ακροδέκτης **ρύθμισης τάσης** (*control voltage*). Μεταξύ του ακροδέκτη αυτού και της γης συνήθως συνδέουμε, ως φίλτρο, έναν πυκνωτή 10 nF. Από τον πυκνωτή αυτό διαρρέουν προς τη γη ο θόρυβος ή και η τάση κυμάτωσης του τροφοδοτικού, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδρασή τους στην τάση *threshold*. Ο ακροδέκτης αυτός μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αλλάξει τόσο η στάθμη της τάσης *threshold*, όσο και η στάθμη της τάσης *trigger*. Π.χ αν συνδέσουμε αντίσταση 5 KΩ μεταξύ του ακροδέκτη *control voltage* και

του V_{cc} (ακροδέκτης 8) αλλάζουμε την τάση *threshold* σε $0.8V_{cc}$ και την τάση *trigger* σε $0.2V_{cc}$. Αν εφαρμόσουμε εξωτερική τάση στον ακροδέκτη *control voltage*, θα αλλάξει τόσο η τάση *threshold* όσο και η τάση *trigger*. Μ' αυτό τον τρόπο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το 555 για να διαμορφώσουμε την κυματομορφή εξόδου.

Στα παρακάτω θα αναπτύξουμε πιο αναλυτικά τους 3 κύριους τρόπους λειτουργίας του χρονιστή 555. Ο χρονιστής αυτός, που χρησιμοποιεί τάση τροφοδοσίας 4 έως 18 V, μπορεί να δώσει ρεύμα εξόδου μέχρι 200 mA.

7.6.1 Αυτοδιεγερμένος Πολυδονητής με το IC 555

Το Σχ.7.10 δείχνει το χρονιστή 555 συνδεσμολογημένο σαν **αυτοδιεγερμένο πολυδονητή** καθώς και τις κυματομορφές του. Η τάση v_c του πυκνωτή C (ακροδέκτης 6) συνδέεται απ' ευθείας στην είσοδο *trigger* (ακροδέκτης 2). Η τάση v_c μεταβάλλεται μεταξύ $V_{cc}/3$ και $2V_{cc}/3$.



Σχήμα 7.10. Αυτοδιεγερμένος πολυδονητής και οι κυματομορφές του

Όταν συνδέσουμε την τάση τροφοδοσίας V_{cc} , ο πυκνωτής C φορτίζεται προς την τάση V_{cc} μέσω των αντιστάσεων R_1 και R_2 . Όταν όμως η τάση του πυκνωτή, αυξανόμενη, φτάσει τα $2V_{cc}/3$, ο συγκριτής *threshold*

διεγείρει το flip-flop (FF), κάνει αγωγίμο το τρανζίστορ T, (βλ. Σχ.7.9), και ο πυκνωτής C αρχίζει να εκφορτίζεται μέσω της R_2 . Όταν, λόγω της εκφόρτισης, η τάση του πυκνωτή πέσει στα $V_{cc}/3$, διεγείρεται ο συγκριτής trigger και η έξοδος Q του FF οδηγείται στην κατάσταση L (Low) και έτσι οδηγείται σε αποκοπή το τρανζίστορ T, με αποτέλεσμα ο πυκνωτής C να αρχίζει να φορτίζεται πάλι προς την τάση V_{cc} , και συνεπώς όλος ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Αποδεικνύεται ότι οι χρόνοι φόρτισης και εκφόρτισης t_1 και t_2 δίνονται από τις σχέσεις:

$$t_1 = 0.69 (R_1 + R_2)C \quad (7.6.1)$$

και

$$t_2 = 0.69 R_2 C \quad (7.6.2)$$

Η αντίστοιχη περίοδος T, θα είναι:

$$T = t_1 + t_2 = 0.69 (R_1 + 2R_2)C \quad (7.6.3)$$

Οπότε η συχνότητα ταλάντωσης του πολυδονητή θα είναι:

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.69 (R_1 + 2R_2)C} = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C} \quad (7.6.4)$$

Τέλος, ο κύκλος εργασίας d, θα δίνεται από τη σχέση:

$$d = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \quad (7.6.5)$$

Αν $R_1 \gg R_2$, ο κύκλος εργασίας αυτός θα είναι μέγιστος (100%) ενώ αν $R_1 \ll R_2$, ο κύκλος εργασίας είναι ελάχιστος και ίσος με 50%.

⇒ Παράδειγμα 7-4

Θα υπολογίσουμε αυτοδιεγειρόμενο πολυδονητή με το 555, με $t_1=0.7$ ms και $t_2=0.3$ ms. Επίσης, θα προσδιορίσουμε τον κύκλο εργασίας καθώς και τη συχνότητα ταλάντωσής του.

Λύση

Δεχόμαστε $C=100 \text{ nF}$, Εξ.(7.6.2) και (7.6.1)

$$R_2 = \frac{t_2}{0,69 C} = \frac{0,3 \times 10^{-3}}{0,69 \times 100 \times 10^{-9}} = 4,3 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 + R_2 = \frac{t_1}{0,69 C} = \frac{0,7 \times 10^{-3}}{0,69 \times 100 \times 10^{-9}} = 10,1 \text{ k}\Omega$$

Άρα, $R_1 = 5,8 \text{ k}\Omega$

Εξάλλου, οι Εξ.(7.6.5) δίνουν

$$d = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{0,7}{0,3 + 0,7} = 0,7 \quad \text{ή}$$

$$d = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} = \frac{5,8 + 4,3}{5,8 + 2 \times 4,3} = \frac{10,1}{14,4} = 0,7,$$

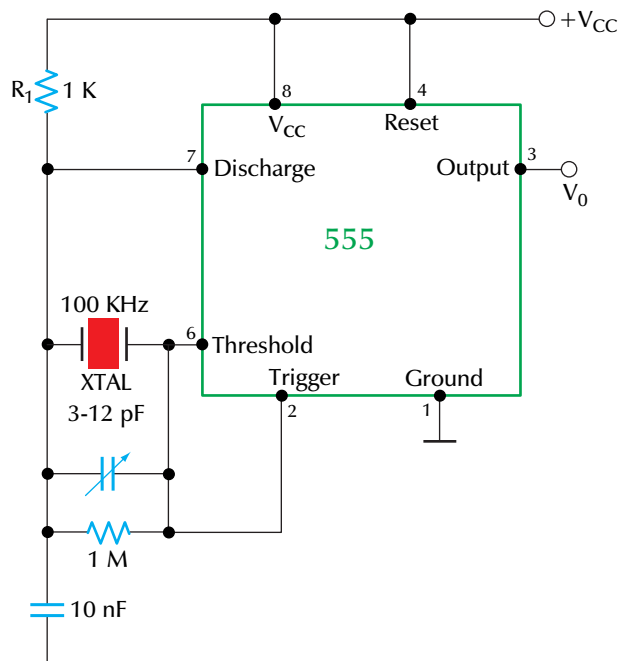
οι δε Εξ.(7.6.4) δίνουν

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{(0,7 + 0,3) \times 10^{-9}} = 1000 \text{ Hz} \quad \text{ή}$$

$$f_0 = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C} = \frac{1,44}{(5,8 + 2 \times 4,3) \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-9}} = 1000 \text{ Hz}$$

7.6.2 Κρυσταλλικός Ταλαντωτής με το 555

Ο πολυδονητής του Σχ.7.10 χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές ως *ταλαντωτής/ρολόι* (clock), με μέγιστη συχνότητα ταλάντωσής του, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ίση με 1 MHz. Αν θέλουμε η συχνότητα ταλάντωσης να έχει μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα χρησιμοποιούμε κρύσταλλο, κατά το Σχ.7.11 όπου ο κρύσταλλος συνδέεται μεταξύ του χρονοκυκλώματος RC και του συγκριτή κατωφλιού. Η φόρτιση-εκφόρτιση του πυκνωτή C γίνεται όπως ήδη περιγράφηκε, αλλά το σήμα ελέγχου και των δύο συγκριτών (ακροδέκτες 2 και 6) διέρχεται μέσω του κρυστάλλου κάνοντάς τον να ταλαντώνεται στη φυσική του συχνότητα ή σε υποπολλαπλάσιο της συχνότητας συντονισμού του.



Σχήμα 7.11. Κρυσταλλικός ταλαντωτής με το IC 555

Οι τιμές των R και C εκλέγονται έτσι ώστε με βραχυκυκλωμένο τον κρύσταλλο να έχουμε συντήρηση των ταλαντώσεων κοντά στη συχνότητα συντονισμού του κρυστάλλου. Η συχνότητα συντονισμού του ταλαντωτή δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1.44}{RC} \quad (7.6.6)$$

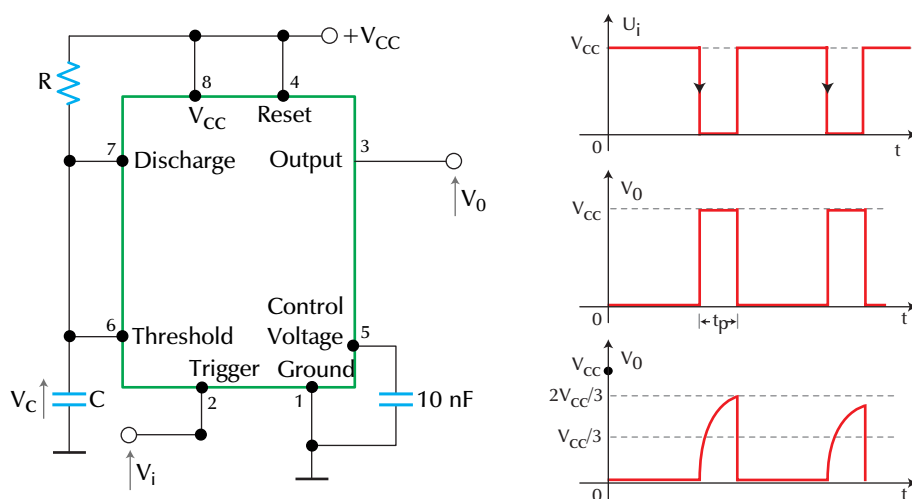
Οι τιμές των R και C μπορούν να μεταβληθούν κατά 25% ή και περισσότερο χωρίς να επηρεαστεί η συχνότητα ταλάντωσης του κρυστάλλου. Ο χρονισμός των τάσεων φόρτισης-εκφόρτισης του πυκνωτή αλλάζει ώστε να συμβιβάζεται με τις τιμές των R και C που εκλέξαμε για να διατηρείται σταθερή η συχνότητα ταλάντωσης που δίνει η Εξ.(7.6.6).

Αν διπλασιάσουμε τη σταθερά χρόνου, έχοντας τον ίδιο κρύσταλλο, η συχνότητα ταλάντωσης θα γίνει η μισή της συχνότητας του κρυστάλλου. Διάφορες άλλες αλλαγές στη σταθερά χρόνου δίνουν υποαρμονικές 1/3, 1/4, 1/5, κτλ. της συχνότητας συντονισμού του κρυστάλλου.

Ο μεταβλητός πυκνωτής στα άκρα του κρυστάλλου επιτρέπει τη ρύθμιση της συχνότητας ταλάντωσης με ακρίβεια. Η αντίσταση $1\text{ M}\Omega$ επιτρέπει dc διέξοδο των εισόδων του συγκριτή, ώστε να αρχίσουν οι ταλαντώσεις μόλις εφαρμοστεί η τάση V_{cc} .

7.6.3 Πολυδονητής μιας βολής με το IC 555

Το Σχ.7.12 δείχνει το χρονιστή 555 συνδεσμολογημένο σαν πολυδονητή μιας βολής. Η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής: Στη μόνιμη κατάσταση το FF κρατάει το τρανζίστορ T αγωγίμο (on) με αποτέλεσμα να γειώνει τον πυκνωτή C. Κατά τη διάρκεια αυτή, η έξοδος είναι στο δυναμικό της γης, δηλ. σε κατάσταση L (Low). Εφόσον ο συγκριτής threshold είναι πολωμένος στην τάση $V_{cc}/3$ παραμένει στην κατάσταση ηρεμίας όσο χρόνο η είσοδος trigger διατηρείται πάνω από την τάση $V_{cc}/3$. Όταν η είσοδος trigger διεγερθεί από το αρνητικό μέτωπο του παλμού εισόδου, ο συγκριτής threshold οδηγεί το FF στην κατάσταση reset κι έτσι το τρανζίστορ T οδηγείται στην κατάσταση αποκοπής (off), η οποία αποβραχυκυκλώνει τον C με αποτέλεσμα να οδηγείται η έξοδος στην κατάσταση H (High: V_{cc}). Μέσω της R, η τάση στα άκρα του πυκνωτή αυξάνει εκθετικά προς την τάση V_{cc} με σταθερά χρόνου RC. Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει τα $2V_{cc}/3$, ο συγκριτής trigger θα οδηγήσει το FF στην κατάσταση 1 (set). Αυτό, με τη σειρά του, θα οδηγήσει το τρανζίστορ T στον κόρο κι έτσι θα εκφορτίσει τον πυκνωτή C. Η κατάσταση αυτή εκφράζει την αρχική συνθήκη, δηλ. αποτελεί τη σταθερή κατάσταση.

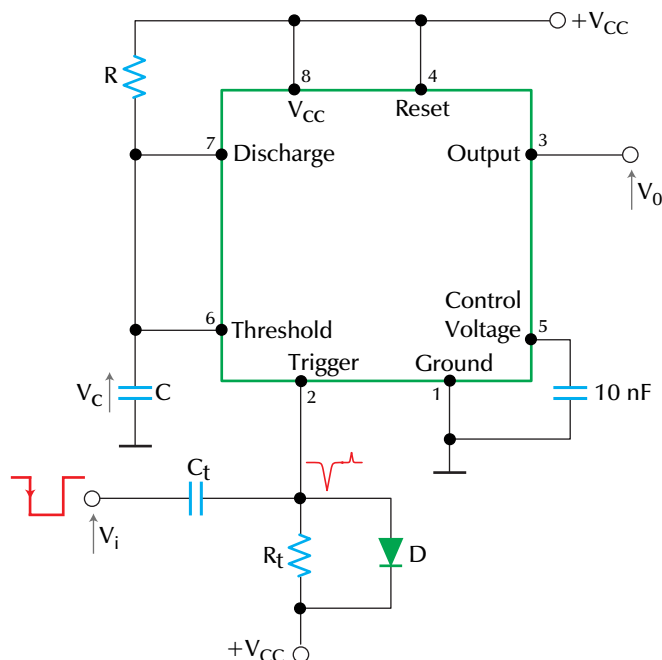


Σχήμα 7.12. Ο χρονιστής 555 ως πολυδονητής μιας βολής και οι κυματομορφές του

Αποδεικνύεται, ότι η διάρκεια του παλμού εξόδου (t_p) δίνεται από τη σχέση:

$$t_p \cong 1.1 RC \quad (7.6.7)$$

Μερικές φορές το κύκλωμα του Σχ.7.12 διεγείρεται ανεπιθύμητα από το θετικό μέτωπο του παλμού εισόδου, ακόμα κι αν ο ακροδέκτης control voltage έχει πυκνωτή διαρροής. Για να αποφύγουμε μια τέτοια κατάσταση διαφορίζουμε τον παλμό εισόδου, με το δικτύωμα που εικονίζεται στο Σχ.7.13.



Σχήμα 7.13. Πολυδονητή μιας βολής με διέγερση με δικτύωμα διαφορίσης

Η διάοδος προστατεύει το IC 555 από το να διεγερθεί από το θετικό μέτωπο του παλμού εισόδου.

⇒ Παράδειγμα 7-5

Να υπολογιστεί πολυδονητής μιας βολής, με το 555, με διάρκεια παλμού 1 ms.

Λύση

Κατ' αρχή, επιλέγουμε $C=100 \text{ nF}$.

Τότε, από την Εξ. (7.6.7) έχουμε

$$R = \frac{t_p}{1.1C} = \frac{10^{-3}}{1.1 \times 10^2 \times 10^{-9}} = 9.09 \text{ k}\Omega \approx 9.1 \text{ k}\Omega$$

Η διάρκεια της σταθεράς χρόνου πρέπει να είναι πολύ πιο μικρή από τη διάρκεια του παλμού εξόδου. Επομένως, διαλέγουμε

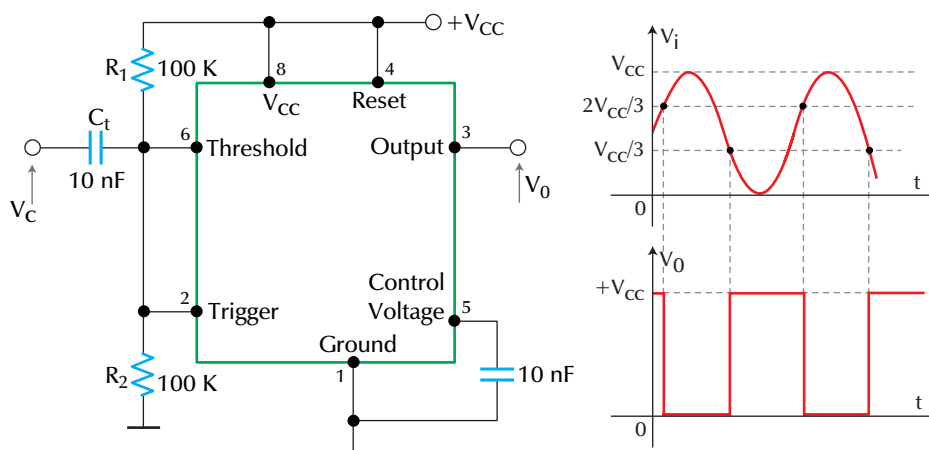
$$\tau = \frac{t_p}{10} \therefore \tau = 0.1 \times 10^{-3} = 10^{-4} \text{ s}$$

Τέλος, διαλέγουμε $R_t=10 \text{ k}\Omega$ και από τη σχέση $\tau = R_t C_t$ βρίσκουμε:

$$C_t = \frac{\tau}{R_t} = \frac{10^{-4}}{10^4} = 10^{-8} \text{ F} = 10 \text{ nF}$$

7.6.4 Διεγέρτης Schmitt με το IC 555

Το κύκλωμα του Σχ.7.14 δείχνει το χρονιστή 555 συνδεσμοποιημένο ως **διεγέρτη Schmitt** (*Schmitt trigger*, ST). Οι είσοδοι των δύο συγκριτών, που αντιστοιχούν στους ακροδέκτες διέγερσης (2) και κατωφλιού (6), συνδέονται μαζί και πολώνονται εξωτερικά σε τάση $V_{cc}/2$, μέσω των δύο ίσων αντιστάσεων R_1 και R_2 .



Σχήμα 7.14. Ο χρονιστής 555 ως διεγέρτης Schmitt και κυματομορφές του

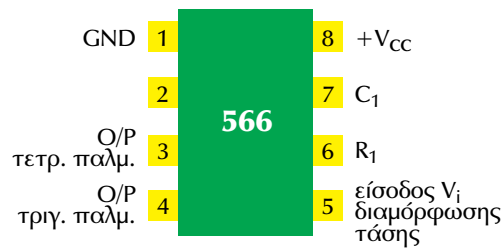
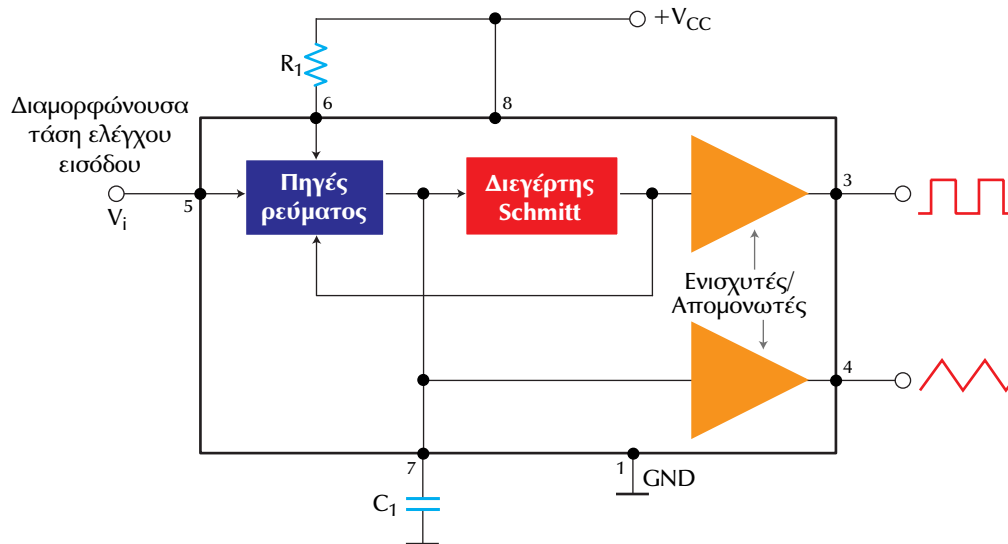
Επειδή ο συγκριτής threshold, που βρίσκεται στον ακροδέκτη κατωφλιού (6), διεγείρεται σε $2V_{cc}/3$ και ο συγκριτής trigger, του ακροδέκτη διέγερσης (6), σε (αναφοράς) $V_{cc}/3$, η πόλωση που δημιουργούν οι αντιστάσεις R_1 και R_2 βρίσκεται στο μέσο μεταξύ των δυο αυτών τιμών, άρα σε τάση $V_{cc}/2$.

Όταν το κύκλωμα διεγείρεται από ημιτονικό σήμα κατάλληλου πλάτους (ύψους) ώστε να υπερβαίνουν οι στάθμες αναφοράς, μεταπίπτει από αγωγιμότητα σε αποκοπή και αντίστροφα, οπότε στην έξοδο παίρνουμε τετραγωνικό παλμό. Αν $R_1=R_2=R$ το 555 πολώνεται αυτόματα για τάσεις τροφοδοσίας που μπορεί να έχουν τιμές V_{cc} από 5 έως 15 V.

7.7 Ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση

❑ Ο **ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση** (Voltage-Controlled Oscillator, VCO) είναι ένα κύκλωμα που δημιουργεί μια τετραγωνική ή τριγωνική κυματομορφή της οποίας η περίοδος, άρα και συχνότητα, ρυθμίζεται από μια dc τάση (ελέγχου).

Ένας τυπικός **ταλαντωτής VCO** είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα **566**, το οποίο περιέχει κυκλώματα που δημιουργούν ταυτόχρονα τετραγωνικούς και τριγωνικούς παλμούς των οποίων η συχνότητα ορίζεται βασικά από έναν εξωτερικό πυκνωτή C_1 και από μια εξωτερική αντίσταση R_1 , επηρεάζεται δε από μια dc τάση εισόδου V_c . Το Σχ.7.15 δείχνει το δομικό διάγραμμα του ολοκληρωμένου 566, σε απλή συνδεσμολογία γεννήτριας συναρτήσεων, καθώς και τους ακροδέκτες του. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το 566 αποτελείται από **πηγές/γεννήτριες ρεύματος**, από ένα **διεγέρτη Schmitt** και από δύο **ενισχυτές/απομονωτές**. Οι γεννήτριες ρεύματος φορτίζουν και εκφορτίζουν τον εξωτερικό πυκνωτή C_1 με ρυθμό που καθορίζεται από την εξωτερική αντίσταση R_1 και από τη διαμορφώνουσα dc τάση εισόδου (ή ελέγχου) V_c . Ο διεγέρτης Schmitt χρησιμοποιείται για να κάνει μεταγωγή στις πηγές ρεύματος μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή και μεταξύ των τάσεων εξόδου των απομονωτών, δηλ. της τριγωνικής κυματομορφής που αναπτύσσεται στα άκρα του πυκνωτή και της τετραγωνικής κυματομορφής που προέρχεται από το διεγέρτη Schmitt.



Σχήμα 7.15. Δομικό διάγραμμα του VCO ή γεννήτριας συναρτήσεων 566 και ακροδέκτες του

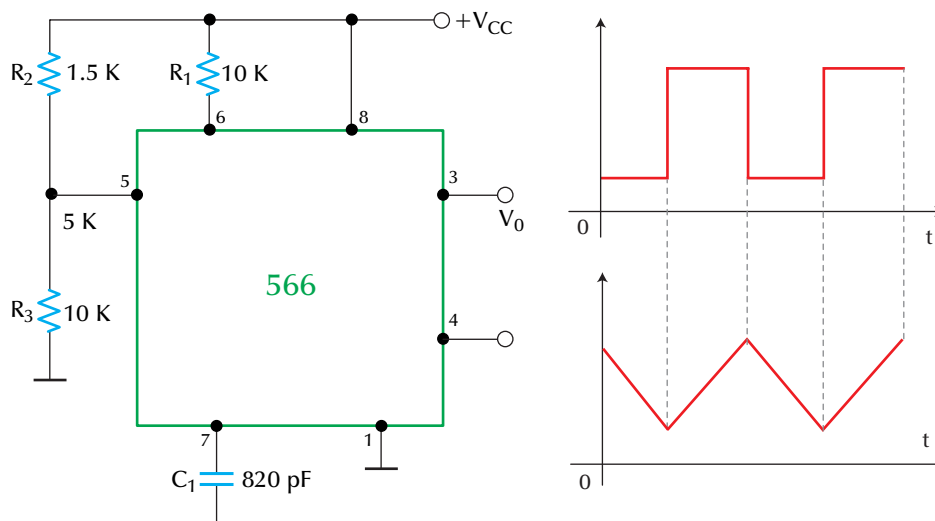
Η συχνότητα ταλάντωσης ή κεντρική συχνότητα λειτουργίας f_0 , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{2}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{V_c}{V_{cc}} \right) \quad (7.7.1)$$

με τους εξής πρακτικούς περιορισμούς:

1. Η R_1 πρέπει να είναι στην περιοχή $2\text{k}\Omega \leq R_1 \leq 20\text{ k}\Omega$
2. Η V_c πρέπει να είναι στην περιοχή $(3/4)V_{cc} \leq V_c \leq V_{cc}$.
3. Η f_0 πρέπει να είναι κάτω από 1 MHz.
4. Η V_{cc} πρέπει να είναι μεταξύ 10 και 24 V.

Το Σχ.7.16 δείχνει το **566** συνδεσμολογημένο ως **ρυθμιζόμενη γεννήτρια συναρτήσεων** που μας δίνει ταυτόχρονα τετραγωνικούς και τριγωνικούς παλμούς με σταθερή συχνότητα που καθορίζεται από τα R_1 , C_1 και V_c . Η τάση ελέγχου ή διαμόρφωσης V_c και συνεπώς η συχνότητα των κυματομορφών, f_0 , ρυθμίζεται κατά βούληση μέσω του διαιρέτη τάσης R_2 , R_3 .



Σχήμα 7.16. Το 566 ως ρυθμιζόμενη γεννήτρια τετραγωνικών και τριγωνικών κυματομορφών

⇒ Παράδειγμα 7-6

Αν στο κύκλωμα του Σχ.7.16 είναι: $R_1=10\text{ k}\Omega$, $R_2=1.5\text{ k}\Omega$, $R_3=10\text{ k}\Omega$, $C_1=820\text{ pF}$ και η $V_{cc}=12\text{ V}$, να βρεθεί η τάση ελέγχου V_c και η συχνότητα ταλάντωσης των κυματομορφών εξόδου του.

Λύση

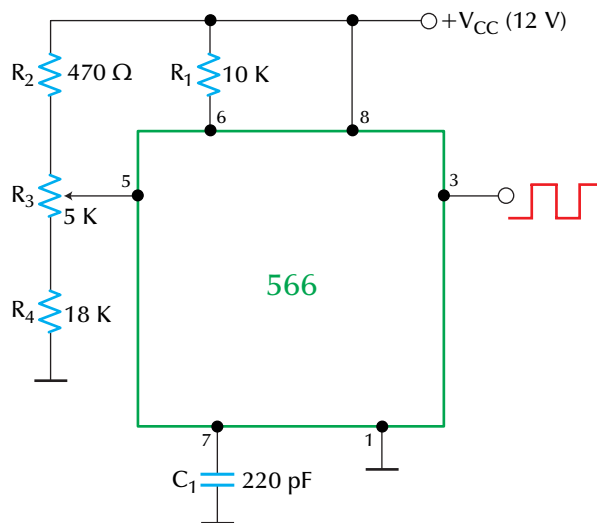
Από το διαιρέτη τάσης R_2 , R_3 έχουμε

$$V_c = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{cc} = \frac{10}{1.5 + 10} \times 12 \approx 10.4\text{ V}$$

οπότε η Εξ.(7.7.1) δίνει

$$f_0 = \frac{2}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{V_c}{V_{cc}} \right) = \frac{2}{10^4 \times 820 \times 10^{-12}} \left(1 - \frac{10.4}{12} \right) \approx 32.5\text{ kHz}$$

Το Σχ.7.17 δείχνει με πιο τρόπο μπορεί να ρυθμίζεται η συχνότητα των τετραγωνικών ή των τριγωνικών παλμών χρησιμοποιώντας μεταβλητή τάση V_c , ώστε να μεταβάλουμε τη συχνότητα f_0 . Η μεσαία λήψη του ποτενσιομέτρου R_3 μετατακινείται μέσα στην πλήρη περιοχή 10:1.



Σχήμα 7.17. Συνδεσμολόγηση του 566 ως μονάδα VCO

⇒ Παράδειγμα 7-7

Αν το κύκλωμα του Σχ.7.17 έχει τιμές $R_1=10\text{ k}\Omega$, $R_2=470\text{ }\Omega$, $R_3=5\text{ k}\Omega$, $C_1=220\text{ pF}$, $R_4=18\text{ k}\Omega$ και $V_{cc}=12\text{ V}$, να βρεθούν οι δύο ακραίες δυνατές συχνότητες ταλάντωσης, ανάλογα με τη θέση του ποτενσιομέτρου.

Λύση

Όταν η μεσαία λήψη του ποτενσιομέτρου είναι στο πάνω άκρο του, θα έχουμε:

$$V_c = \frac{R_3 + R_4}{R_2 + R_3 + R_4} V_{cc} = \frac{5 + 18}{0.47 + 5 + 18} \times 12 \approx 11.76\text{ V}$$

Άρα,

$$f_0 = \frac{2}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{V_c}{V_{cc}} \right) = \frac{2}{10^4 \times 220 \times 10^{-12}} \left(1 - \frac{11.76}{12} \right) \approx 18.2\text{ kHz}$$

Όταν η μεσαία λήψη του ποτενσιόμετρου είναι στην κάτω θέση, θα έχουμε:

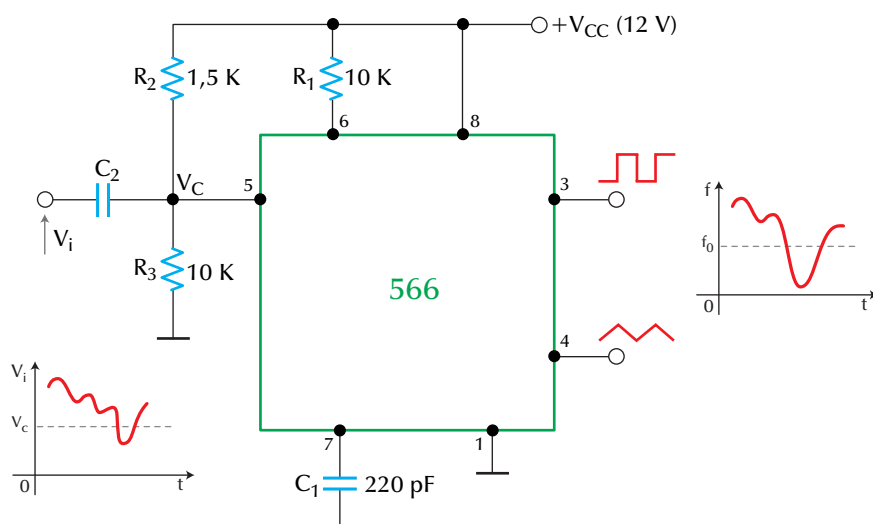
$$V_C = \frac{R_4}{R_2 + R_3 + R_4} V_{CC} = \frac{18}{0.47 + 5 + 18} \times 12 \approx 9.2 \text{ V}$$

Άρα,

$$f_0 = \frac{2}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{V_C}{V_{CC}} \right) = \frac{2}{10^4 \times 220 \times 10^{-8}} \left(1 - \frac{9.2}{12} \right) \approx 212.1 \text{ kHz}$$

7.7.1 Ο VCO για Διαμόρφωση Συχνότητας

Αντί να μεταβάλλουμε ένα ποτενσιόμετρο για να αλλάζουμε την τάση V_C , μπορούμε να εφαρμόσουμε στην είσοδο μια διαμορφώνουσα τάση v_i , όπως δείχνεται στο Σχ.7.18, όπου $V_C = V_{dc} + v_i$. Στο σχήμα αυτό ο διαιρέτης τάσης δημιουργεί τάση V_C γύρω στα 10 V, με πόλωση $V_{dc} = 10.4 \text{ V}$. Μια (επιπροστιθέμενη) ac τάση εισόδου γύρω στο 1.4 V (τιμή κορυφής) κάνει την τάση V_C να μεταβάλλεται από 9 V έως 11.8 V, εξαναγκάζοντας τη συχνότητα εξόδου να μεταβάλλεται αντίστοιχα, μέσα σε μια δυναμική περιοχή 10:1. Επομένως το σήμα εισόδου v_i θα διαμορφώνει την έξοδο ως προς τη συχνότητα γύρω από μια κεντρική συχνότητα f_0 η οποία καθορίζεται από την τιμή της πόλωσης $V_{dc} = 10.4 \text{ V}$ ($f_0 = 121.2 \text{ kHz}$).

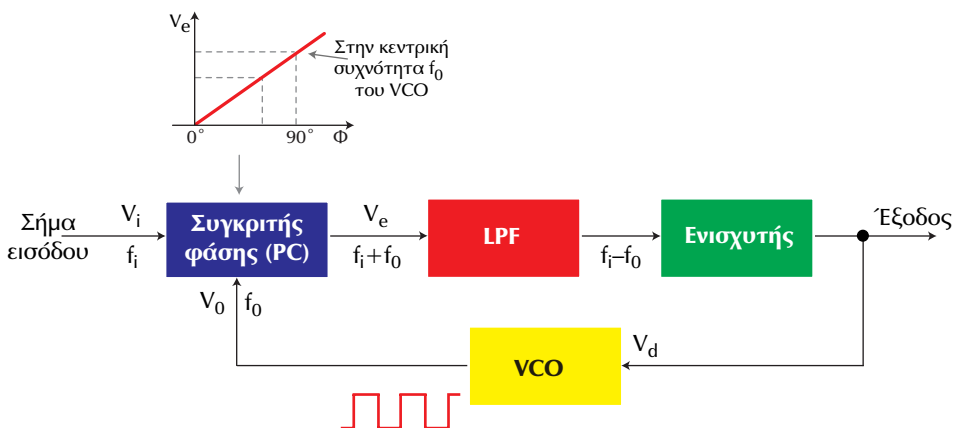


Σχήμα 7.18. Λειτουργία του VCO με διαμορφώνουσα τάση εισόδου για διαμόρφωση συχνότητας

Το VCO χρησιμοποιείται συχνά στο να μετατρέπουμε σήματα πολύ χαμηλών συχνοτήτων, όπως αυτά που λαμβάνονται στα ηλεκτροεγκεφαλογράφηματα (EEG) ή τα ηλεκτροκαρδιογράφηματα (EKG), σε σήματα διαμορφωμένης συχνότητας που ανήκουν στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων. Τα ακουστικά αυτά σήματα στη συνέχεια μπορούν να μεταδοθούν μέσω τηλεφωνικών γραμμών για διαγνωστικούς (τηλεϊατρικούς) σκοπούς ή μπορούν να καταγραφούν σε κάποιο μαγνητικό μέσο για περαιτέρω επεξεργασία.

7.8 Βρόχος κλειδωσης φάσης

□ Ο βρόχος κλειδωσης φάσης (Phase Locked Loop, PLL) είναι ένα ευέλικτο ηλεκτρονικό κύκλωμα παρατήρησης της συχνότητας ή της φάσης κυματομορφών και αποτελείται από ένα συγκριτή ή φωρατή φάσης (PC), ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων (LPF) και έναν ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση (VCO) που συνδέονται όπως εικονίζει το Σχ.7.19.



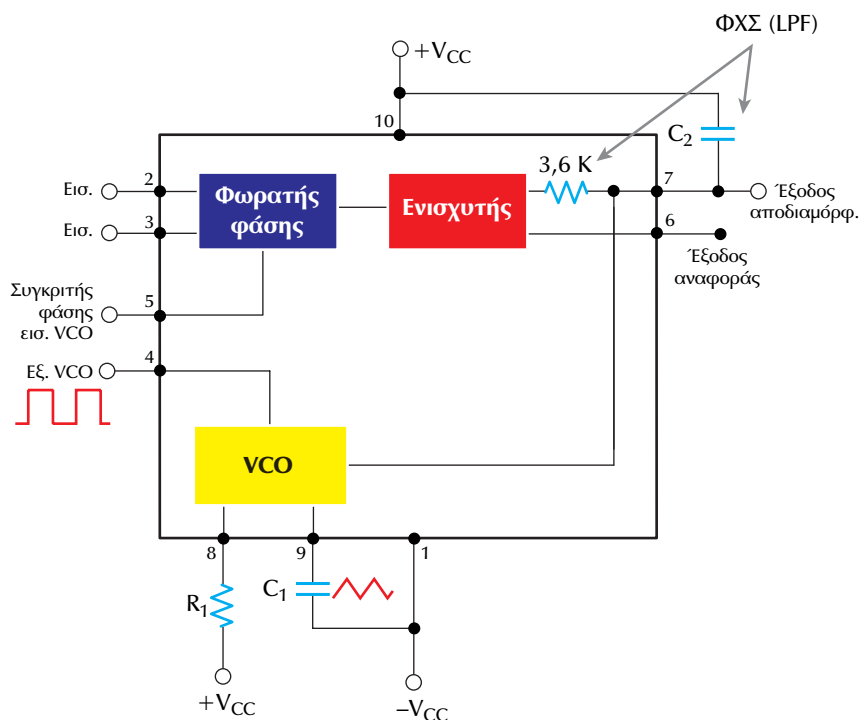
Σχήμα 7.19. Δομικό διάγραμμα του βρόχου κλειδωσης φάσης (PLL)

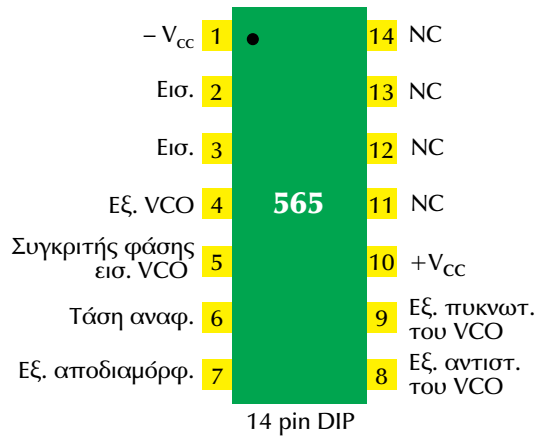
Τυπικά ο συγκριτής ή φωρατής φάσης συγκρίνει τη συχνότητα εισόδου f_i με τη συχνότητα f_0 του VCO ως εξής: Η έξοδος του φωρατή φάσης είναι ανάλογη της διαφοράς φάσης των σημάτων v_i και v_o . Η τάση εξόδου του φωρατή φάσης είναι μια dc τάση που ονομάζεται τάση σφάλματος (v_e). Η έξοδος του φωρατή φάσης εφαρμόζεται στο ΦΧΣ, το οποίο καταστέλλει τις υψηλές συχνότητες ($f_i + f_0$) και δημιουργεί μια καθαρή dc

τάση. Αυτή η dc τάση με τη σειρά της, είναι η είσοδος του VCO. Αφού η συχνότητα εξόδου του VCO είναι ανάλογη της dc στάθμης εισόδου, η συχνότητα του VCO γίνει είναι ίση με τη συχνότητα εισόδου.

Συνολικά, ο βρόχος κλειδωσης φάσης οδεύει μέσω τριών καταστάσεων: αυτοδιέγερσης, σύλληψης και κλειδωσης φάσης. Πριν εφαρμοσθεί το σήμα εισόδου, ο βρόχος κλειδωσης φάσης είναι στην κατάσταση αυτοδιέγερσης. Όταν εφαρμοσθεί σήμα με τη συχνότητα εισόδου f_i , η συχνότητα του VCO αρχίζει να αλλάζει και σ' αυτή την περίπτωση ο βρόχος κλειδωσης φάσης βρίσκεται στην κατάσταση σύλληψης. Η συχνότητα VCO συνεχίζει να αλλάζει μέχρις ότου γίνει ίση με τη συχνότητα εισόδου και τότε ο βρόχος κλειδωσης φάσης έχει μπει στην κατάσταση κλειδωσης φάσης. Όταν η φάση κλειδώσει, ο βρόχος παρακολουθεί οποιαδήποτε αλλαγή της συχνότητας εισόδου μέσω της επαναληπτικής δράσης του.

Επειδή το κύκλωμα του PLL δεν απαιτεί αυτεπαγωγές κατασκευάζεται εύκολα με τη μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος. Το συνηθέστερο από αυτά τα κυκλώματα βρόχου κλειδωσης φάσης είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα PLL 565. Το Σχ.7.20 δείχνει το δομικό διάγραμμα αυτού του ολοκληρωμένου καθώς και τη βάση μαζί με τους ακροδέκτες του.





Σχήμα 7.20. Δομικό διάγραμμα βρόχου κλειδωσης φάσης PLL 565

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

1. Περιοχή λειτουργία συχνότητας: 0.001 Hz μέχρι 500 kHz.
2. Περιοχή λειτουργίας τάσης: ± 6 V έως ± 12 V.
3. Στάθμη εισόδου: 10 mV rms έως 3 V p-p.
4. Η αντίσταση R_1 πρέπει να είναι μεταξύ 2 K Ω και 20 K Ω .

Η κεντρική συχνότητα του PLL καθορίζεται από τη συχνότητα αυτοδιέγερσης του VCO, η οποία, για το PLL αυτό, δίνεται από τη σχέση:

$$f_0 = \frac{1.2}{4R_1C_1} \text{ Hz} \quad (7.8.1)$$

όπου R_1 και C_1 είναι εξωτερικά στοιχεία που συνδέονται στους ακροδέκτες 8 και 9, αντίστοιχα. Η συχνότητα f_0 αυτοδιέγερσης ρυθμίζεται εξωτερικά, από τα στοιχεία R_1 και C_1 , ώστε να είναι στο κέντρο της περιοχής συχνοτήτων της εισόδου. Ο πυκνωτής C_2 πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εξαλείφει τις διακυμάνσεις της τάσης εξόδου κι έτσι να σταθεροποιείται η συχνότητα του VCO.

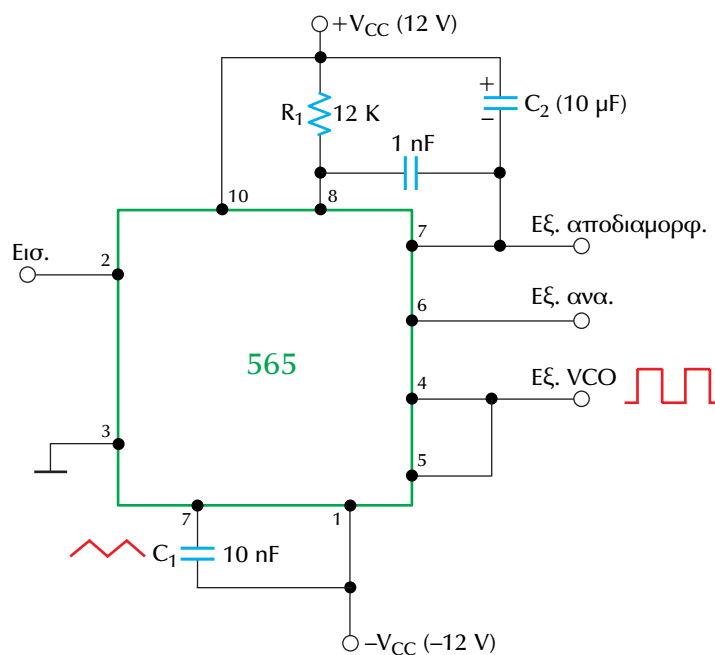
Το PLL 565 μπορεί να κλειδώνει και να ανιχνεύει ένα σήμα μέσα σε μια περιοχή $\pm 60\%$ του εύρους διέλευσης συχνοτήτων, με την f_0 σαν κεντρική συχνότητα. Η περιοχή κλειδωσης f_L και η περιοχή σύλληψης f_c αυτού του PLL δίνονται από τις πιο κάτω σχέσεις:

$$f_L = \pm \frac{8f_0}{V} \text{ Hz} \quad (7.8.2)$$

όπου f_0 είναι η συχνότητα αυτοδιέγερσης του VCO (σε Hz) και το $V = +V_{CC} - (-V_{CC}) = 2V_{CC}$, σε Volt.

$$f_c = \pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_L}{R_2 C_2}} \quad (7.8.3)$$

όπου το R_2 είναι σε Ω και το C_2 σε F, οι δε f σε Hz.



Σχήμα 7.21. Το 565 συνδεσμολογημένο σαν κύκλωμα διαμόρφωσης συχνότητας

Το PLL είναι ένα σημαντικό κύκλωμα σα βάση για μια σειρά εφαρμογών. Χρησιμοποιείται για διαμόρφωση συχνότητας (FM), για σύνθεση συχνοτήτων και για τον πολλαπλασιασμό και τη διαίρεση συχνοτήτων. Επίσης, το PLL χρησιμοποιείται και ως αποκωδικοποιητής FSK (Frequency-Shift Keyed).

⇒ Παράδειγμα 7-7

Για το κύκλωμα του Σχ.7.21, βρείτε τη συχνότητα αυτοδιέγερσης f_0 , την περιοχή κλείδωσης f_L και την περιοχή σύλληψης f_c .

Λύση

Από τις Εξ.(7.8.1), (7.8.2) και (7.8.3) έχουμε:

$$f_0 = \frac{1.2}{4R_1 C_1} = \frac{1.2}{4 \times 12 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9}} = 2.5 \text{ kHz}$$

$$f_L = \pm \frac{8f_0}{V} = \pm \frac{8 \times 2.5}{24} = \pm 0.83 \text{ kHz}$$

$$f_C = \pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_L}{R_2 C_2}} = \pm \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi \times 0.833 \times 10^3}{3.6 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}}} = \pm 60.68 \text{ Hz}$$

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- 7-1.** Υπολογίστε ταλαντωτή τετραγωνικών συμμετρικών παλμών συχνότητας 1 KHz με τον TE741 και τάση τροφοδοσίας $\pm 10 \text{ V}$. Σχεδιάστε τις κυματομορφές του.
- 7-2.** Ένας αυτοδιεγερμένος πολυδονητής με TE έχει τα εξής στοιχεία: $C=6.8 \text{ nF}$, $R=22 \text{ k}\Omega$, $R_1=22 \text{ k}\Omega$ και $R_2=8.2 \text{ k}\Omega$. Να βρεθεί η συχνότητα, η περίοδος ταλάντωσης και το ποσοστό ανασύζευξης, αν τροφοδοτείται από πηγή $\pm 10 \text{ V}$. Να σχεδιαστούν οι κυματομορφές του.
- 7-3.** Να υπολογιστεί γεννήτρια τριγωνικών κυματομορφών με $f_0=3 \text{ kHz}$, τάση εξόδου $v_{o(p-p)}=5 \text{ V}$ και $V_{CC}=\pm 15 \text{ V}$.
- 7-4.** Μια γεννήτρια τριγωνικών κυματομορφών έχει $R_1=6.8 \text{ k}\Omega$, $R_2=12 \text{ k}\Omega$, $R_3=68 \text{ k}\Omega$ και $C_1=8.2 \text{ nF}$. Να βρεθεί η συχνότητα και η τάση εξόδου του. Πάρτε $V_s=14 \text{ V}$.
- 7-5.** Να υπολογισθεί διεγέρτης Schmitt χρησιμοποιώντας τον TE301, με τάση εξόδου $\pm 10 \text{ V}$ και $\beta=0.15$.
- 7-6.** Ένας διεγέρτης Schmitt έχει $R_1=33 \text{ k}\Omega$ και $R_2=10 \text{ k}\Omega$. Να βρεθεί το ποσοστό ανασύζευξης του.
- 7-7.** Να υπολογισθεί αυτοδιεγερμένος πολυδονητής με το ολοκληρωμένο 555, συχνότητας 100 kHz και κύκλο εργασίας 50%. Η τάση $V_{CC}=12 \text{ V}$.
- 7-8.** Ένας αυτοδιεγερμένος πολυδονητής με το 555 έχει $C=10 \text{ nF}$, $R_1=2.2 \text{ k}\Omega$ και $R_2=5.6 \text{ k}\Omega$. Να βρεθούν τα t_1 , t_2 , T , f_0 και το d.

- 7-9.** Ένας πολυδονητής μιας βολής με το 555 έχει $R=10\text{ k}\Omega$ και $C=1\text{ nF}$. Να βρεθεί η διάρκεια του παλμού εξόδου του.
- 7-10.** Να υπολογισθεί πολυδονητής μιας βολής με το 555, διάρκειας παλμού 0.5 ms .
- 7-11.** Αν στο κύκλωμα του Σχ.7.16 είναι $R_1=15\text{ k}\Omega$, $R_2=2.2\text{ k}\Omega$, $R_3=15\text{ k}\Omega$, $C_1=1\text{ nF}$ και $V_{cc}=10\text{ V}$, να βρεθούν η f_0 και η V_c .
- 7-12.** Το κύκλωμα του Σχ.7.17 έχει $R_1=5.6\text{ k}\Omega$, $R_2=680\text{ }\Omega$, $R_3=10\text{ k}\Omega$, $C=330\text{ pF}$ και $V_{cc}=10\text{ V}$. Να βρεθούν οι δυο ακραίες συχνότητες ταλάντωσης.
- 7-13.** Το κύκλωμα του Σχ.7.18 έχει $R_1=12\text{ k}\Omega$, $R_2=2.7\text{ k}\Omega$, $R_3=12\text{ k}\Omega$, $V_{cc}=10\text{ V}$ και $C_1=470\text{ pF}$. Να βρεθεί η πόλωση V_c και η f_0 .
- 7-14.** Το κύκλωμα του Σχ.7.21 έχει $R_1=15\text{ k}\Omega$, $R_2=10\text{ k}\Omega$, $C_1=22\text{ nF}$, $C_2=1\text{ }\mu\text{F}$. Να βρεθούν η συχνότητα f_0 , η περιοχή κλειδώσης f_L και η περιοχή σύληψης f_C . Η τάση τροφοδοσίας είναι $\pm 10\text{ V}$.