

# Ταλαντωτές HCMOS

## Γρήγοροι και οικονομικοί

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα τεχνολογίας HCMOS προορίζονται αρχικά για τη σχεδίαση ψηφιακών κυκλωμάτων ταχείας απόκρισης και χαμηλής κατανάλωσης. Στην πράξη αποδείχτηκε ότι τα εξαρτήματα αυτά, είναι κατάλληλα και για πληθώρα άλλων εφαρμογών. Το παρόν άρθρο περιγράφει με ποιόν τρόπο τα ολοκληρωμένα κυκλώματα τεχνολογίας HCMOS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σχεδίαση απλών αλλά αξιόπιστων ταλαντωτών με χρήση δικτυώματος RC ή κρυστάλλου.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα HCMOS, εκτός από την υψηλή ταχύτητα απόκρισης και τη χαμηλή τους κατανάλωση, εμφανίζουν επίσης ομαλή λειτουργία μέσα σε

αρκετά ευρεία περιοχή τάσεων τροφοδοσίας, και έχουν τάση κατωφλίου, η οποία διατηρεί εξαιρετική σταθερότητα ακόμα και σε μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας λειτουργίας. Χάρη στα δύο αυτά χαρακτηριστικά, οι πύλες τεχνολογίας HCMOS είναι κατάλληλες για τη σύνθεση ταλαντωτών με υψηλή σταθερότητα και υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται ταλαντωτές τύπου RC, ενώ όπου απαιτείται αυστηρά καθορισμένη συχνότητα και υψηλή σταθερότητα, το δίκτυο RC αντικαθίσταται από ένα κρύσταλλο.

Λόγω της πολύ υψηλής αντίστασης εισόδου των πυλών HCMOS το δίκτυο ταλάντωσης RC μπορεί να περιλαμβάνει πυκνωτή με πολύ μεγάλο εύρος

τιμών χωρητικότητας. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, όταν απαιτείται χρήση πυκνωτών πολύ μικρής τιμής για υποβίβαση της κατανάλωσης.

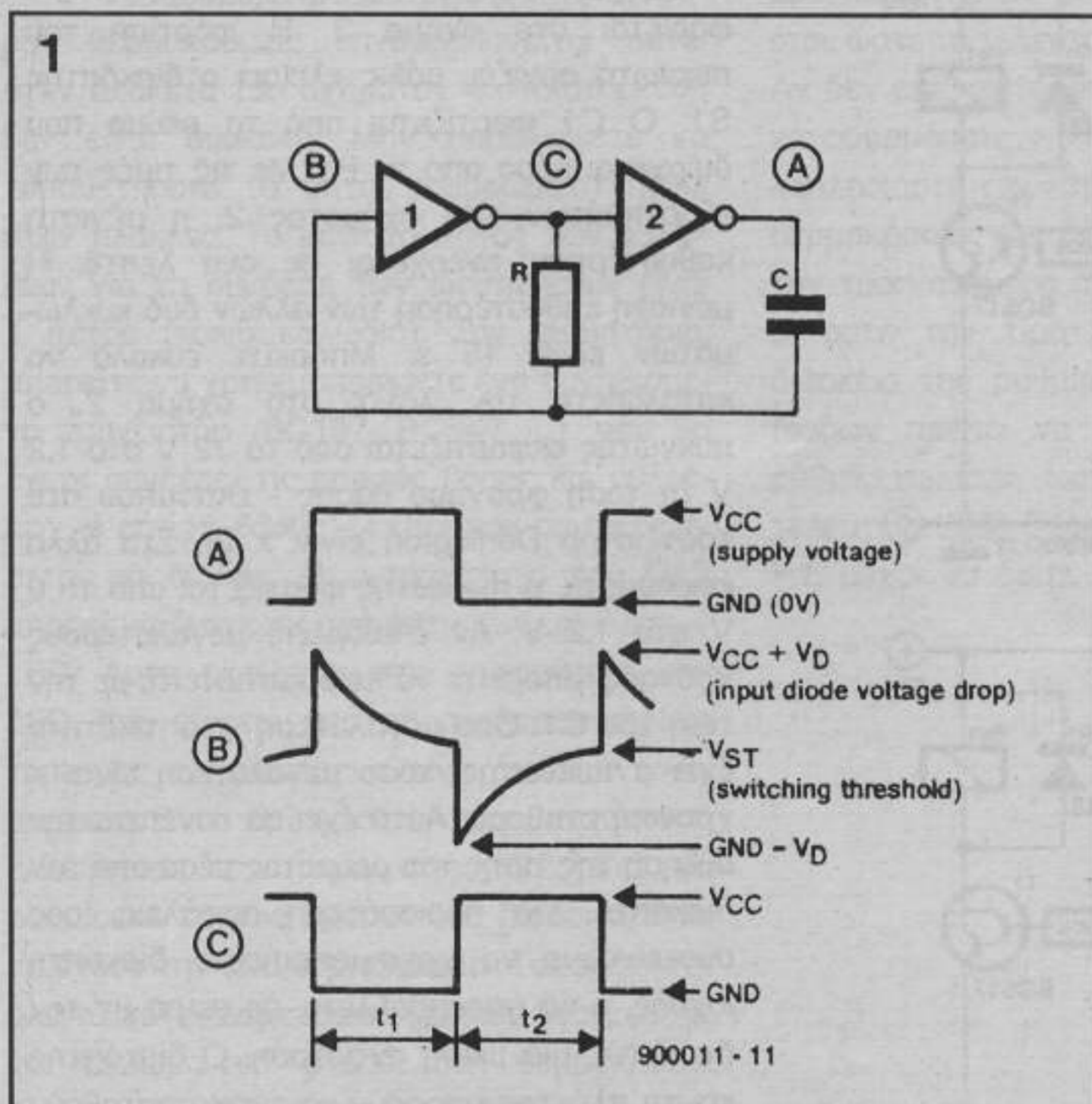
### Το βασικό κύκλωμα

Το βασικό κύκλωμα ενός ταλαντωτή που αποτελείται από δύο αναστροφείς, καθώς και οι προκύπτουσες κυματομορφές φαίνονται στο σχήμα 1. Λόγω της αναστροφής που γίνεται στις δύο πύλες, είναι προφανές ότι οι πολικότητες των τάσεων στα σημεία A και B είναι αντίθετες απ' αυτές του σημείου C.

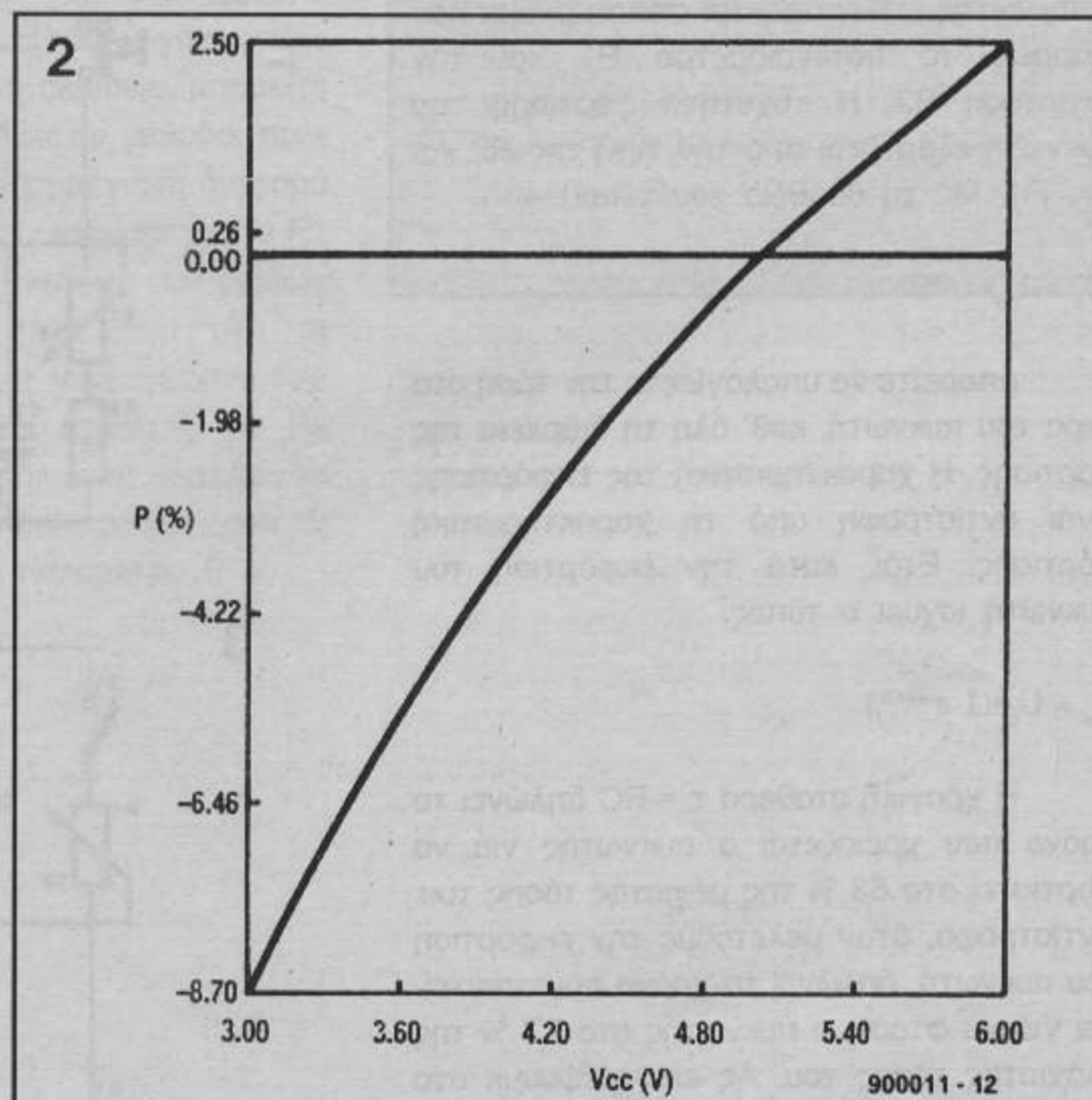
Για απλούστευση της παρουσίασης, ας υποθέσουμε ότι σε κάποια χρονική στιγμή το δυναμικό των σημείων A και B είναι χαμηλό και έτσι το δυναμικό του σημείου C είναι υψηλό, προκαλώντας τη φόρ-

τιση του πυκνωτή C μέσω της αντίστασης R. Όταν η τάση στο σημείο B φθάσει το κατώφλι μεταγωγής λογικής στάθμης ( $V_{ST}$ ) τότε το δυναμικό των σημείων A και B γίνεται υψηλό ενώ αντίθετα του σημείου C χαμηλό.

Εφόσον η στάθμη της εξόδου κάθε πύλης μεταβάλλεται ακαριαία μετά από κάθε υπέρβαση του κατωφλίου της εισόδου θα έπρεπε να αναμένεται η εμφάνιση στο σημείο B τάσης ίσης προς  $V_{ST} + V_{CC}$ . Ωστόσο, η είσοδος κάθε αναστροφέα περιλαμβάνει διόδους προστασίας, έτσι ώστε η τάση που εμφανίζεται εκεί να μην υπερβαίνει την τιμή  $V_{CC} + V_D$ , όπου  $V_D$  είναι η πτώση τάσης ορθής πόλωσης της διόδου προστασίας. Αντίστοιχα, η μέ-



Σχήμα 1 : Βασικό κύκλωμα ταλαντωτή RC με δύο ψηφιακούς αναστροφείς



Σχήμα 2 : Συνάρτηση της συχνότητας ταλαντώσεων από την τάση τροφοδοσίας

γιστη αρνητική τάση που εμφανίζεται στο κύκλωμα, δεν υπερβαίνει την τιμή 0-VD, πράγμα που παρατηρείται όταν η έξοδος του αναστροφέα 2 μεταγεται σε χαμηλή λογική στάθμη. Η τάση του σημείου B ανυψώνεται απ' αυτήν την τιμή μέχρι την τάση κατωφλίου Vst και μόνον όταν φθάσει την τιμή κατωφλίου, η λογική στάθμη της εξόδου του αναστροφέα 1 γίνεται πάλι χαμηλή.

Η σταθερά χρόνου  $\tau = RC$ , καθορίζει τις περιόδους φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή χρονισμού.

$$\tau_1 = -RC \ln [V_{st} / (V_{cc} + V_D)] \quad (1)$$

$$\tau_2 = -RC \ln [(V_{cc} - V_{st}) / (V_{cc} + V_D)] \quad (2)$$

$$f = 1 / (\tau_1 + \tau_2) \quad (3)$$

Οι τιμές του  $\tau$  είναι σε δευτερόλεπτα ενώ η τιμή της συχνότητας λειτουργίας του ταλαντωτή (f) είναι σε Hertz.

### Εξωτερικές επιδράσεις

Για τις πύλες της οικογένειας 74HC/HCU οι κατασκευαστές υποστηρίζουν ότι η τυπική τιμή της Vst είναι η μισή από την τάση τροφοδοσίας Vcc. Εφόσον  $V_D = 0,7 \text{ V}$ , ένας γρήγορος

υπολογισμός αποδεικνύει ότι το σφάλμα συχνότητας που παρατηρείται ως προς τους πύ πάνω υπολογισμούς, μεταβάλλεται από +9% μέχρι -2.5% όταν η τάση τροφοδοσίας (τυπική τιμή 5V) μεταβάλλεται αντίστοιχα από 3V έως 6V. Η άνιση απόκλιση του σφάλματος για τις μικρές και μεγάλες τιμές της τάσης τροφοδοσίας, οφείλεται προφανώς στη σταθερότητα της πτώσης τάσης ορθής πόλωσης της διόδου, ανεξάρτητα από την τιμή της τάσης τροφοδοσίας. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για τον καθορισμό του χρόνου  $\tau_1$ , διότι εισάγει ένα σταθερό όρο στον παρονομαστή του τύπου (1) ενώ αντίστοιχα ο αριθμητής (Vst) είναι απλώς ένα καθορισμένο ποσοστό της τάσης τροφοδοσίας. Η συμπεριφορά της συχνότητας σε συνάρτηση με την τάση τροφοδοσίας φαίνεται στο σχήμα 2.

Παρά τον ισχυρισμό των κατασκευαστών ότι η τυπική τιμή της τάσης κατωφλίου είναι 0,5 Vcc, η πράξη αποδεικνύει ότι η τιμή αυτή βρίσκεται κάπου μεταξύ 0,3 και 0,7 στην περίπτωση της οικογένειας HC και μεταξύ 0,2 και 0,8 για την οικογένεια HCU. αυτό σημαίνει ότι το ανα-

μενόμενο σφάλμα συχνότητας ενός ταλαντωτή με πύλες HC, δεν αναμένεται μεγαλύτερο από 9,5% ενώ αν χρησιμοποιηθούν πύλες HCU μπορεί να φθάσει και το 21,5%.

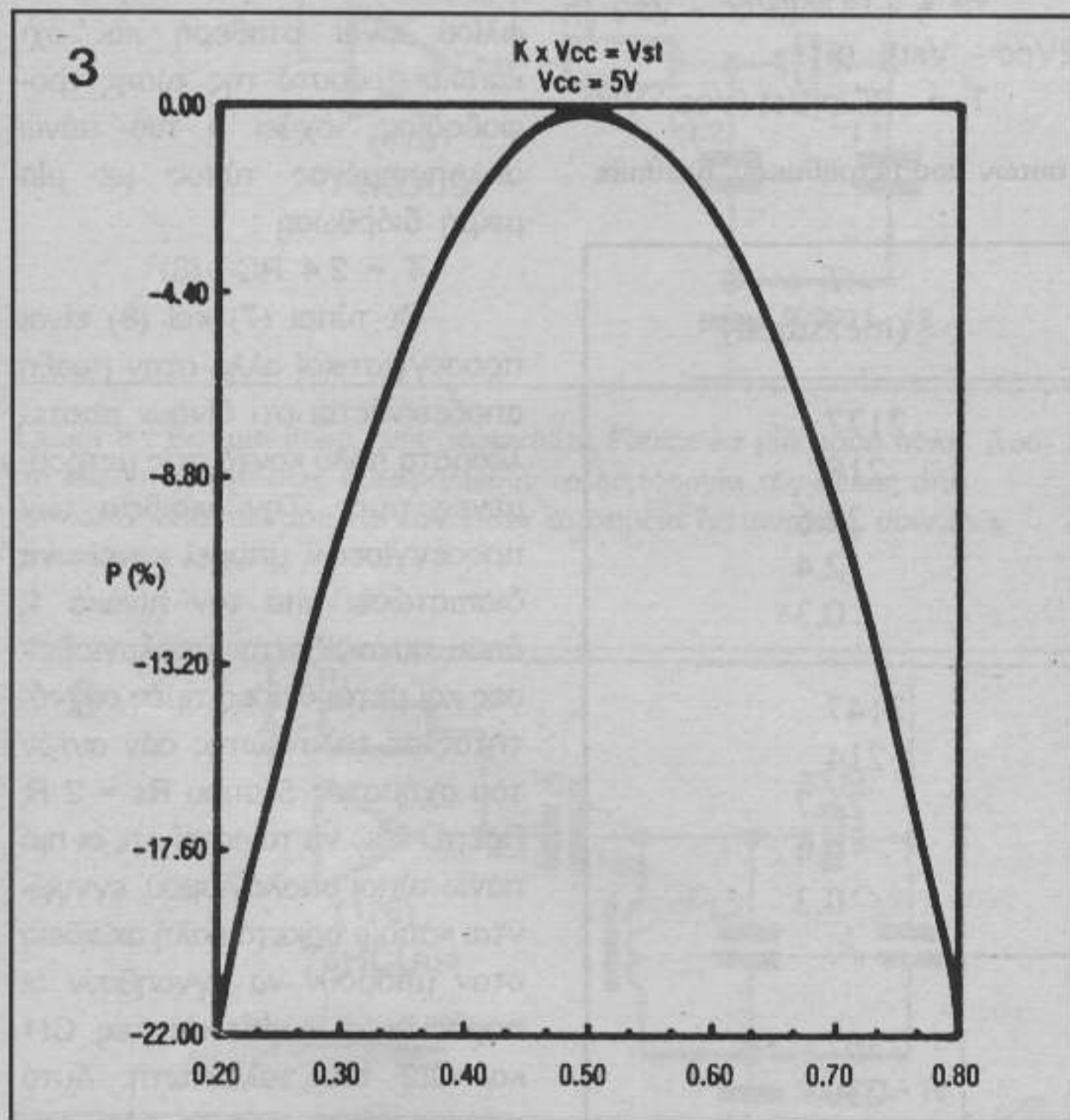
Η εξάρτηση της συχνότητας ταλάντωσης από την τάση κατωφλίου, παρίσταται στο σχήμα 3. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οποιαδήποτε απόκλιση της τάσης κατωφλίου από την ονομαστική της τιμή, πάντοτε έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της συχνότητας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4, από την ίδια απόκλιση επηρεάζεται και ο λόγος διάρκειας παλμών. Μόνο στην ιδανική περίπτωση, όπου η τιμή τάσης κατωφλίου είναι το μισό της τάσης τροφοδοσίας, ο λόγος διάρκειας παλμών είναι 50%.

Στη μέχρι τώρα ανάλυση δεν έγινε αναφορά στις πύλες της οικογένειας HCT, διότι η οικογένεια αυτή εμφανίζει περισσότερο ακριβή χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τις άλλες δύο οικογένειες. Επιπλέον, τα κυκλώματα HCT μπορούν να τροφοδοτηθούν μόνον από τάσεις τροφοδοσίας μεταξύ 4,5 V και 5,5 V πράγμα που δεν επιτρέπει μεγά-

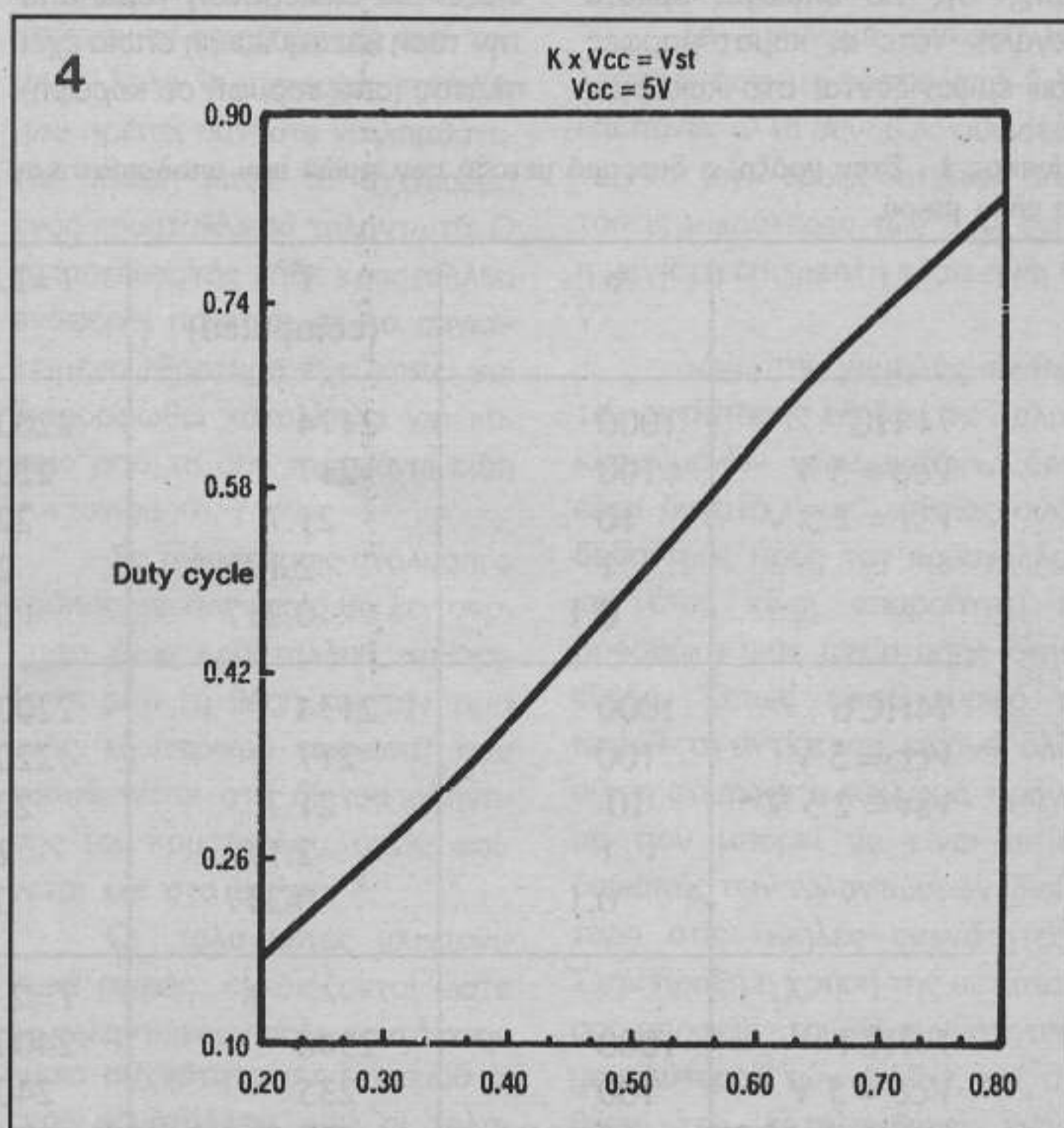
λες μεταβολές και στις τάσεις κατωφλίου. Όλα τα πύ πάνω, έχουν σαν αποτέλεσμα οι ταλαντωτές που χρησιμοποιούν πύλες HCT να εμφανίζουν σφάλμα συχνότητας +/- 0,8% ή λιγότερο, ενώ ο λόγος διάρκειας παλμών παραμένει εξαιρετικά σταθερός στην τιμή 75% περίπου. Η ασύμμετρη συμπεριφορά εδώ οφείλεται στο γεγονός ότι η τάση κατωφλίου δεν είναι πλέον ισοροπημένη στο μισό της τάσης τροφοδοσίας αλλά σε κάποιο άλλο ποσοστό. Επίσης οι αποκλίσεις του κατωφλίου από την τυπική τιμή, όταν η τάση τροφοδοσίας είναι 5 V, βρέθηκε ότι είναι υπεύθυνες για σφάλματα συχνότητας όχι μεγαλύτερα από 16%.

### Βελτίωση της σταθερότητας

Προσθέτοντας στο αρχικό κύκλωμα μία αντίσταση Rs στην είσοδο της πύλης 1, όπως φαίνεται στο σχήμα 5, παρατηρείται σημαντική βελτίωση της σταθερότητας. Η πρόσθετη αυτή αντίσταση, αυξάνει την περίοδο εκφόρτισης του πυκνωτή χρονισμού, και ελαττώνει την επίδρα-

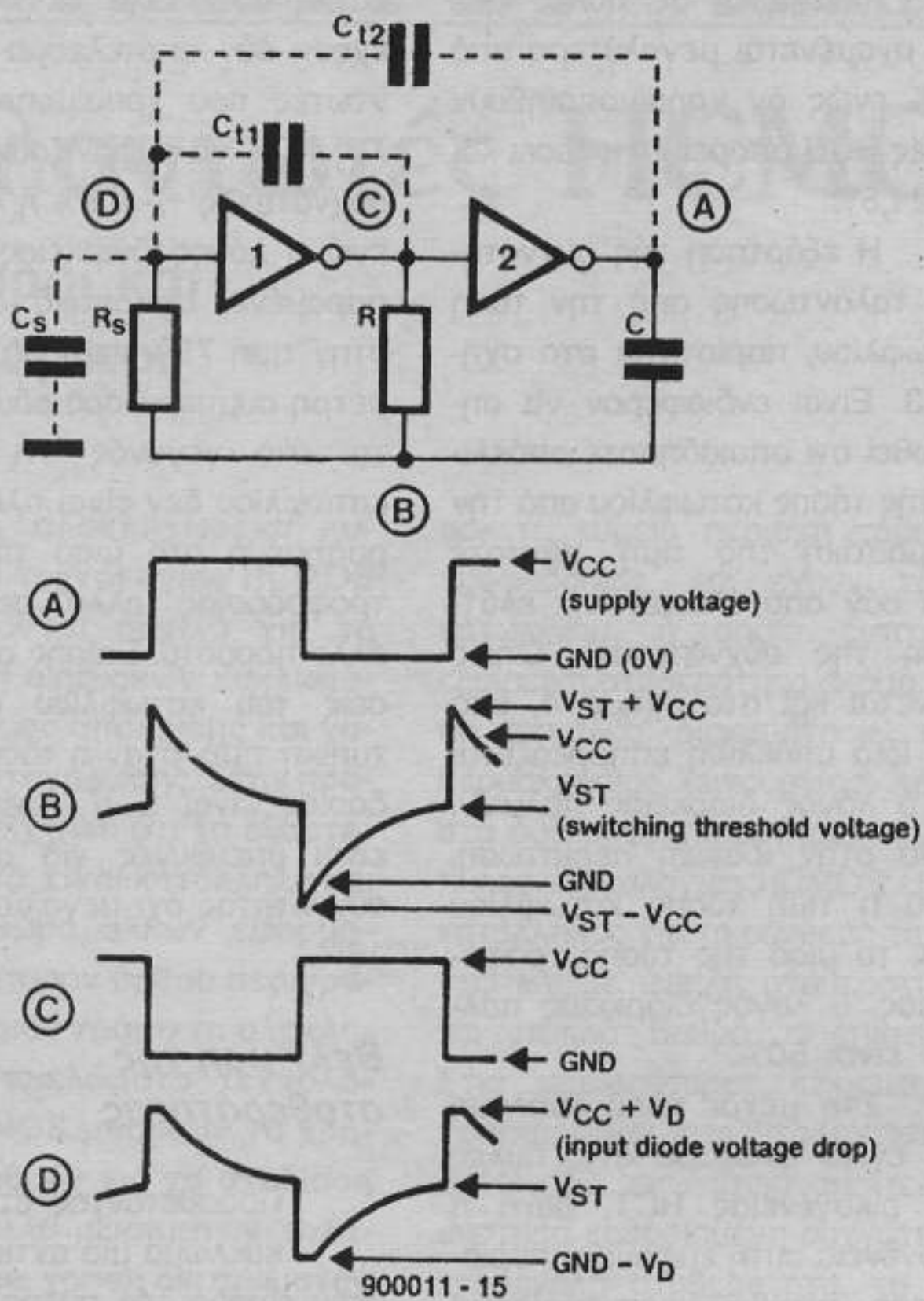


Σχήμα 3 : Επηρεασμός της συχνότητας ταλαντώσεων από μεταβολές της τάσης κατωφλίου



Σχήμα 4 : Οι ταλαντωτές RC που χρησιμοποιούν πύλες της οικογένειας HC ή HCU παρουσιάζουν ισχυρή εξάρτηση του λόγου διάρκειας παλμών από την τιμή της τάσης κατωφλίου.

5



Σχήμα 5 : Η προσθήκη μίας αντίστασης βελτιώνει τη σταθερότητα του ταλαντωτή.

ση της τάσεως ορθής πόλωσης της διόδου προστασίας, στη λειτουργία του κυκλώματος. 'Αν η τιμή της  $R_s$  επιλεγεί αρκετά μεγάλη, τότε οι κυματομορφές που εμφανίζονται στο κύκλωμα,

μοιάζουν πολύ με αυτές του σχήματος 5. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τάση του σημείου Β παρουσιάζει μία διακύμανση γύρω από την τάση κατωφλίου, η οποία έχει πλάτος (από κορυφή σε κορυφή)

Πίνακας 1 : Στην πράξη, η διαφορά μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν και αυτών που μετρήθηκαν, βρέθηκε να είναι μικρή.

	$\tau$	$T$ (computed)	$T=2.2\tau$	$T$ (measured)
74 HC $V_{CC} = 5\text{ V}$ $V_{ST} = 2.5\text{ V}$	1000	2174	2200	2177
	100	217	220	218
	10	21.7	22	22.6
	1	2.17	2.2	2.4
	0.1	0.217	0.22	0.3
74HCU $V_{CC} = 5\text{ V}$ $V_{ST} = 2.5\text{ V}$	1000	2174	2200	2147
	100	217	220	214
	10	21.7	22	21.7
	1	2.17	2.2	2.4
	0.1	0.217	0.22	0.3
74HCT $V_{CC} = 5\text{ V}$ $V_{ST} = 1.415\text{ V}$	1000	2348	$T=2.4\tau$ 2400	2362
	100	235	240	236
	10	23.5	24	24.4
	1	2.35	2.4	2.6
	0.1	0.235	0.24	0.3

διπλάσιο από την τάση τροφοδοσίας  $V_{CC}$ . 'Αν λοιπόν η τιμή της αντίστασης  $R_s$  είναι πολύ χαμηλή, αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τον ψαλιδισμό των αιχμών τάσης, ενώ αντίθετα μία πολύ μεγάλη τιμή της  $R_s$  θα είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση παρασιτικών ταλαντώσεων, σε συνδυασμό με την παρασιτική χωρητικότητα  $C_{t1}$ . Με μία προσεκτικά επιλεγμένη τιμή για την αντίσταση  $R_s$ , τα σφάλματα συχνότητας και λόγου διάρκειας παλμών, ελαττώνονται κατά 30% περίπου ανεξάρτητα από την οικογένεια πυλών (HC, HCT ή HCU) στην οποία εφαρμόζεται η τροποποίηση.

Για τους τύπους ταλαντωτών που προαναφέρθηκαν, έχει παρατηρηθεί ότι η πιο κατάλληλη οικογένεια για χρήση είναι η 74HCU γιατί δεν περιλαμβάνει απομονωτές εξόδου στις πύλες που διαθέτει.

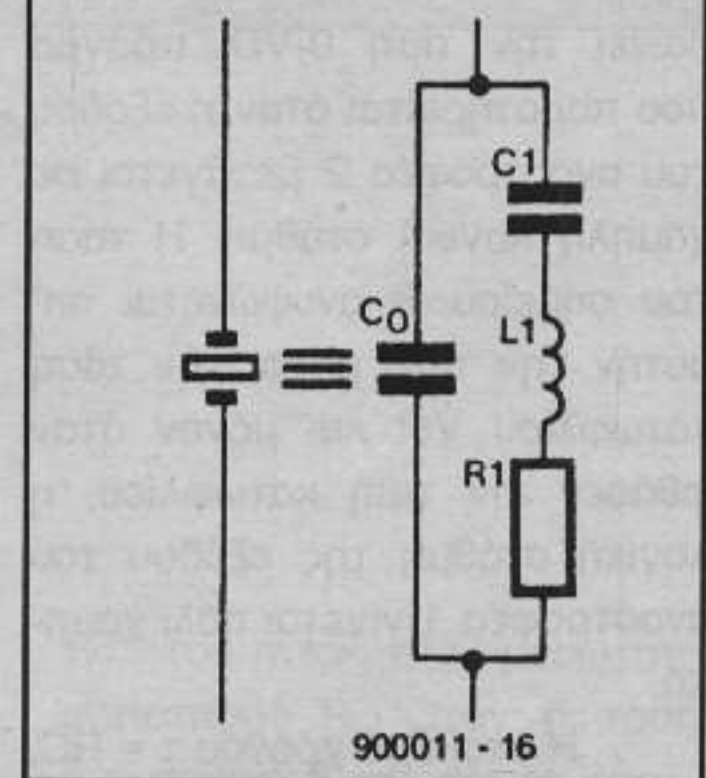
Γενικά, η βέλτιστη τιμή της αντίστασης  $R_s$ , φαίνεται να είναι περίπου διπλάσια από την αντίσταση χρονισμού ( $R$ ). Με αυτή την τιμή, οι σταθερές χρόνου είναι :

$$\tau_1 = -RC \ln[V_{ST} / (V_{CC} + V_{ST})] \quad (4)$$

$$\tau_2 = -RC \ln[(V_{CC} - V_{ST}) / (2V_{CC} - V_{ST})] \quad (5)$$

$$T = -RC \ln[V_{ST} (V_{CC} - V_{ST})]$$

6



Σχήμα 6 : Ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός κρυστάλλου

$$/ (V_{CC} + V_{ST}) (2V_{CC} - V_{ST}) \quad (6)$$

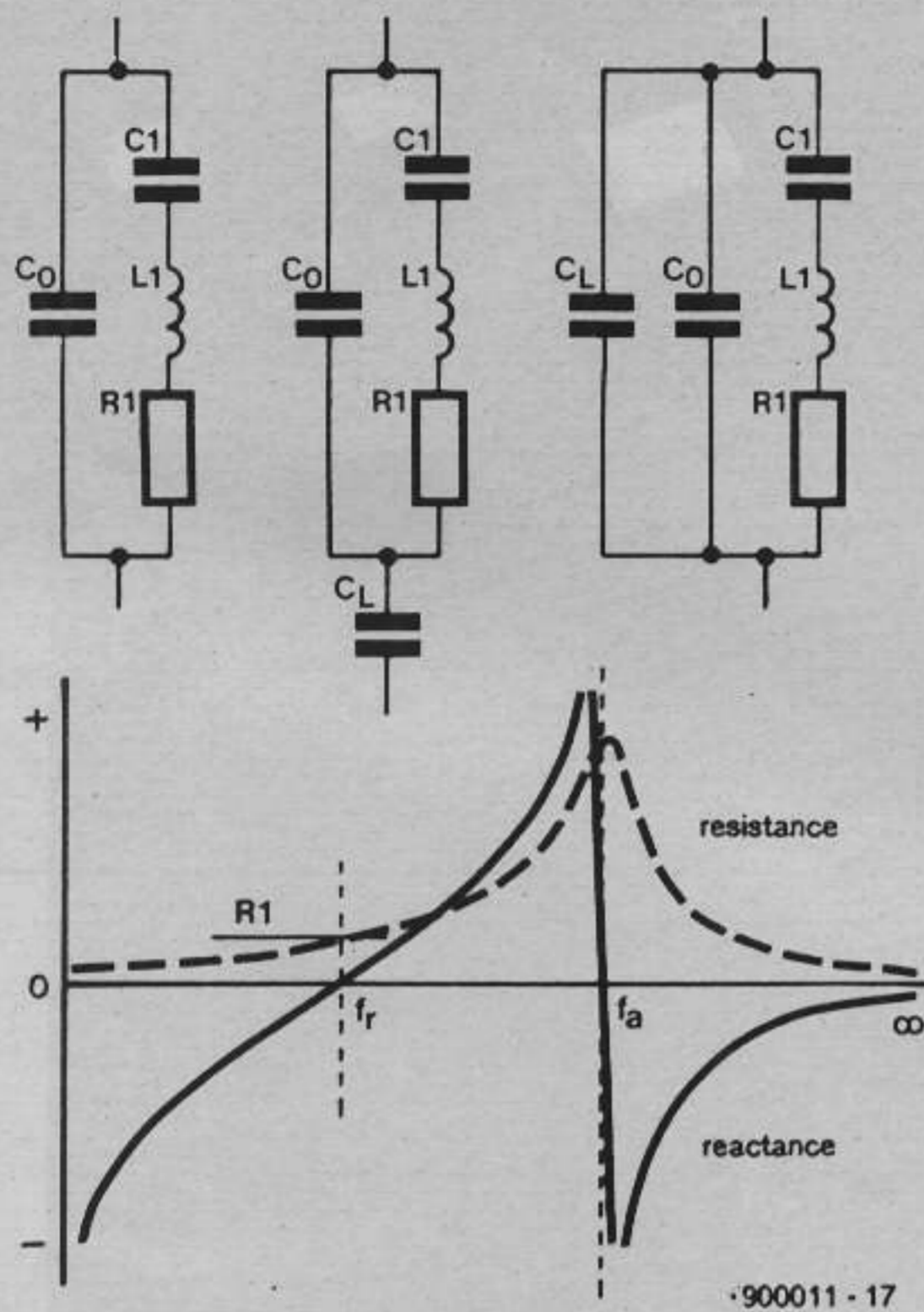
όπου  $T$  είναι η περίοδος της ταλαντώσεως. Από τον τελευταίο τύπο φαίνεται ότι η τάση ορθής πόλωσης της διόδου δεν επηρεάζει πλέον τη συχνότητα. 'Αν για τη σύνθεση του ταλαντωτή χρησιμοποιηθούν ολοκληρωμένα κυκλώματα των οικογενειών 74HC ή 74HCU, όπου η τάση κατωφλίου είναι περίπου  $V_{ST} = 0,5 V_{CC}$ , τότε ο τύπος της περιόδου απολοποιείται σε

$$T = 2,2 RC \quad (7)$$

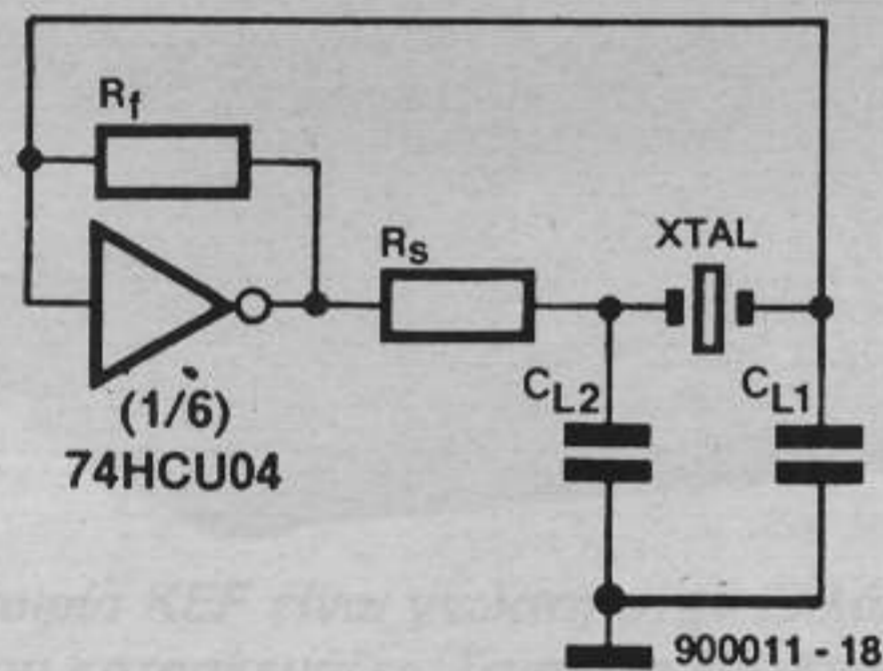
Αντίστοιχα, στα ολοκληρωμένα κυκλώματα της οικογένειας HCT επειδή η τάση κατωφλίου είναι σταθερή και όχι κάποιο ποσοστό της τάσης τροφοδοσίας, ισχύει ο πιο πάνω απλοποιημένος τύπος με μία μικρή διόρθωση :

$$T = 2,4 RC \quad (8)$$

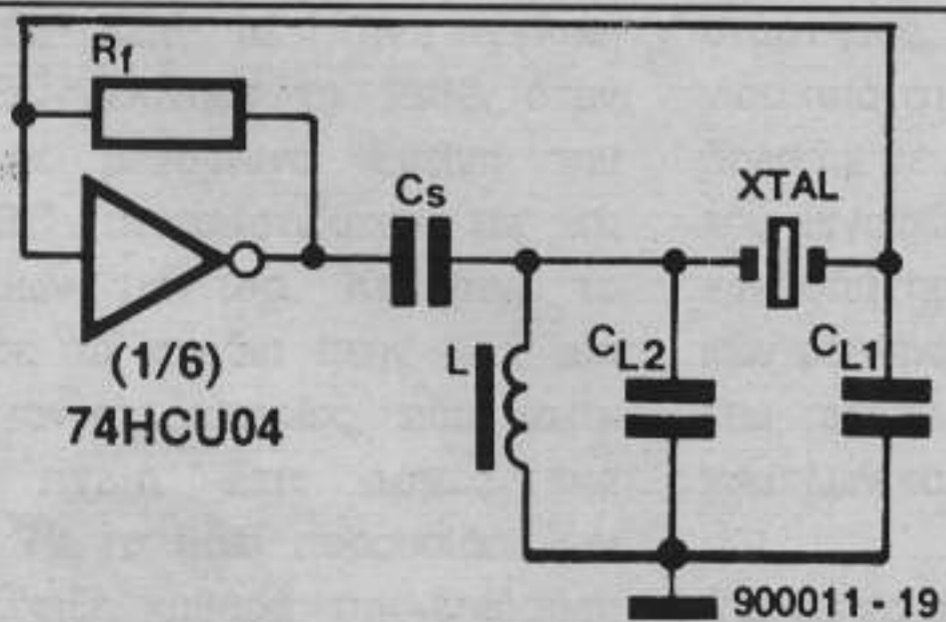
Οι τύποι (7) και (8) είναι προσεγγιστικοί αλλά στην πράξη αποδεικνύεται ότι δίνουν αποτελέσματα πολύ κοντά στις μετρούμενες τιμές. Την ακρίβεια των προσεγγίσεων μπορεί κανείς να διαπιστώσει από τον πίνακα 1, όπου συνοψίζονται υπολογισθείσες και μετρηθείσες τιμές συχνότητας σε ταλαντωτές σαν αυτόν του σχήματος 5 όπου  $R_s = 2 R$ . Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι, οι πιο πάνω τύποι υπολογισμού, εγγυώνται κάποια αρκετά καλή ακρίβεια όταν μπορούν να αγνοηθούν οι παρασιτικές χωρητικότητες  $C_{t1}$  και  $C_{t2}$  του ταλαντωτή. Αυτό γίνεται μόνον όταν η τιμή του πυκνωτή χρονισμού είναι μεγαλύτερη από 10 nF. Για χαμηλότερες τιμές του πυκνωτή  $C$ , η συχνότη-



Σχήμα 7 : Ανάλογα με τον τρόπο που φορτίζεται ένας κρύσταλλος μπορεί να μεταπηδήσει από τον παράλληλο στον εν σειρά συντονισμό. Αριστερά το ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός κρυστάλλου. Στο κέντρο το ισοδύναμο κύκλωμα της λειτουργίας συντονισμού σειράς και δεξιά το αντίστοιχο κύκλωμα παράλληλου συντονισμού.



Σχήμα 8 : Βασική δομή ενός ταλαντωτή Pierce σε μία μόνο πύλη. Δύο επί πλέον αντιστάσεις εξασφαλίζουν τη λειτουργία της πύλης σαν ενισχυτή. Η αντίσταση Rf καθορίζει το σημείο λειτουργίας συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 9 : Η μικρή αυτή μετατροπή εξασφαλίζει την ικανοποιητική λειτουργία του ταλαντωτή με κρυστάλλους ανωτέρων αρμονικών.

τα ταλάντωσης θα είναι πάντοτε μικρότερη από την υπολογιζόμενη, ενώ για τιμές μικρότερες από 100 pF η λειτουργία του ταλαντωτή καθίσταται προβληματική. Η τιμή της αντίστασης χρονισμού μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 1 KΩ και 1 MΩ.

### Κρυσταλλικοί ταλαντωτές.

Αν για κάποια εφαρμογή απαιτείται η χρήση εξαιρετικά σταθερού ταλαντωτή, τότε αυτός πρέπει να ελέγχεται από κρύσταλλο παρά από δίκτυο RC. Επιπλέον, ένας κρύσταλλος είναι πιο κατάλληλος από ένα δίκτυο RC για τη ταλάντωση σε υψηλές συχνότητες, και αν χρησιμοποιείται γι' αυτό το λόγο ένα κύκλωμα με ολοκληρωμένα κυκλώματα τεχνολογίας HCMOS η ισχύς που απαιτείται για τη δημιουργία ταλαντώσεων είναι ελάχιστη. Το γεγονός αυτό εξηγεί την ευρεία διάδοση των κρυσταλλικών ταλαντωτών με τεχνολογία HCMOS.

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός κρυστάλλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 6, αποτελείται από μία αυτεπαγωγή, μία αντίσταση και δύο χωρητικότητες. Το κύκλωμα αυτό διαθέτει δύο συχνότητες συντονισμού, μία που προκύπτει από τον εν σειρά και μία από τον παράλληλο συντονισμό, πράγμα που πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός κρυσταλλικού ταλαντωτή. Ο κατασκευαστής κάθε κρυστάλλου αναφέρει πάντοτε αν το συγκεκριμένο εξάρτημα έχει κοπεί και διαμορφωθεί κατάλληλα για κάποιο από τα δύο πιο πάνω είδη συντονισμού.

Σε τελική όμως ανάλυση, ο τρόπος με τον οποίο θα λειτουργήσει ένας κρύσταλλος, καθορίζεται από τη θέση και την τιμή ενός εξωτερικού πυκνωτή που τοποθετείται στο δίκτυο οδήγησης του κρυστάλλου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.

Οι ταλαντωτές συντονισμού σειράς, σχεδιάζονται ώστε να ταλαντώνουν πολύ κοντά στην κύρια συχνότητα συντονισμού  $f_r$  ενός κρυστάλλου, ενώ οι ταλαντωτές παράλληλου συντονισμού λειτουργούν σε μία συχνότητα η οποία εξαρτάται από τον πυκνω-

τή που τοποθετείται παράλληλα στον κρύσταλλο, και η τιμή της οποίας βρίσκεται κάπου μεταξύ της κύριας συχνότητας συντονισμού  $f_r$  και της λεγόμενης "συχνότητας αντισυντονισμού"  $f_a$ . Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο σε μερικά κυκλώματα, ένα μέρος της παράλληλης χωρητικότητας αποτελείται από ένα μεταβλητό πυκνωτή.

Ο ταλαντωτής Pierce που φαίνεται στο σχήμα 8, χρησιμοποιεί ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα 74HCU04 (χωρίς απομονωτή εξόδου, εφόσον τυχόν απομόνωση της εξόδου θα δημιουργούσε προβλήματα συντήρησης των ταλαντώσεων). Υπό άλλη οπτική γωνία, το ίδιο κύκλωμα μπορεί ν' αντιμετωπιστεί σαν ταλαντωτής Colpitts στον οποίο, το πηνίο έχει αντικατασταθεί από τον κρύσταλλο, αλλά το σημαντικό είναι ότι αυτός ο τύπος ταλαντωτή, απαιτεί ελάχιστη ισχύ για τη λειτουργία του και προσφέρει ικανοποιητική συμπίεση των ανωτέρων αρμονικών, πράγμα ιδιαίτερα σημαντικό αφού, αρκετοί κρυσταλλικοί ταλαντωτές παρουσιάζουν "αρμονική αστάθεια" δηλαδή τάση να μεταπηδούν σε συχνότητες ταλάντωσης πολλαπλάσιες της θεμελιώδους.

Το κύκλωμα μπορεί να λειτουργήσει με τάσεις από 2 V και πάνω, αλλά συνήθως συνιστάται να μην τροφοδοτείται από τάσεις μικρότερες των 3 V, ενώ η μέγιστη επιτρεπτή τάση είναι 6 V.

Λόγω της χαμηλής σύνθετης αντίστασης εξόδου των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, δεν είναι δυνατή η απ' ευθείας σύνδεση τους προς τον κρύσταλλο, και έτσι, είναι απαραίτητη η προσθήκη μίας αντίστασης στην έξοδο. Όπως είναι φυσικό η πρόσθετη αντίσταση, εισάγει ολίγη φάση στο κύκλωμα, πράγμα που μπορεί να είναι αιτία διακοπής των ταλαντώσεων ιδιαίτερα στις υψηλές συχνότητες. Στην πράξη η χρήση της αντίστασης αποφεύγεται για συχνότητες μεγαλύτερες των 4 MHz, και τη θέση της καταλαμβάνει ένας πυκνωτής, η τιμή του οποίου, για τους περισσότερους κρυστάλλους είναι περίπου 30 pF. Στο κύκλω-

μα τού σχήματος 8 οι πυκνωτές CL1 και CL2 βρίσκονται σε σειρά και έτσι ο πυκνωτής απομόνωσης Cs πρέπει να έχει κάπως μεγαλύτερη τιμή χωρητικότητας, δηλαδή περίπου 56 pF.

Για τη βέλτιστη λειτουργία του ταλαντωτή Pierce, πρέπει η σύνθετη αντίσταση εξόδου του, να είναι ίση με τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου που καθορίζει τη συχνότητα. Η τελευταία αυτή σύνθετη αντίσταση είναι :

$$Z_1 = X^2 C_L / R_f \quad (9)$$

όπου  $X C_L$  είναι η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή CL2 ενώ  $R_f$  είναι η αντίσταση του κρυστάλλου στην κατάσταση συντονισμού, και συνήθως έχει τιμή 75 Ω.

Σύμφωνα με τη θεωρία, η βέλτιστη τιμή της  $R_s$  για ένα ταλαντωτή 4 MHz είναι 5900 Ω ενώ η σύνθετη αντίσταση εξόδου μίας πύλης HCMOS είναι μόλις 40 Ω. Θά έπρεπε λοιπόν να επιλεγεί αντίσταση διόρθωσης 5600 Ω η οποία αναμφισβήτητα θα προκαλούσε πολύ μεγάλη ολίσθηση φάσης. Προτείνεται επομένως μία πιο συμβιβαστική τιμή αντίστασης  $R_s = 2200 \Omega$ .

Η αντίσταση  $R_f$  καθορίζει το σημείο λειτουργίας συνεχούς ρεύματος της πύλης, η οποία πλέον αντιμετωπίζεται σαν αναστρέφων ενισχυτής με υψηλό κέρδος. Η τιμή της  $R_f$  δεν είναι κρίσιμη. Στην πράξη οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 1 MΩ και 10 MΩ θα λειτουργήσει το ίδιο καλά.

### Καθυστέρηση διάδοσης

Κάθε πύλη σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, παρουσιάζει μία συγκεκριμένη καθυστέρηση διάδοσης  $t_p$ , η οποία ακόμη και στις πολύ γρήγορες πύλες της οικογενείας HCMOS ανέρχεται στα 14 ns και είναι υπεύθυνη για μία μικρή διαφορά φάσης  $\Phi$  μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου, η οποία όμως δεν μπορεί να αγνοηθεί στις υψηλές συχνότητες. Η διαφορά φάσης υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\Phi = f t_p \times 360 \quad (10)$$

Για συχνότητα ταλαντώσεων  $f = 6 \text{ MHz}$  η καθυστέρηση διάδοσης εισάγει μία διαφορά

φάσης 30 περίπου, η οποία μαζί με την ολίσθηση που εισάγεται από την  $R_s$  είναι δυνατόν να αναστείλει την παραγωγή ταλαντώσεων. 'Αν στη θέση της αντίστασης  $R_s$  χρησιμοποιηθεί πυκνωτής με τιμή ίση μ' αυτή του CL2 τότε η συνολική ολίσθηση φάσης, συγκρατείται σε μία τιμή που επιτρέπει συντήρηση των ταλαντώσεων.

### Τελικά

Οι κατασκευαστές κρυστάλλων, κόβουν και διαμορφώνουν κρυστάλλους υψηλών συχνοτήτων, με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να ταλαντώνουν σε κάποια αρμονική της βασικής τους συχνότητας. Για παράδειγμα, κρύσταλλοι οι οποίοι λειτουργούν στην περιοχή 10 - 75 MHz συνήθως ταλαντώνουν στην τρίτη αρμονική. Σε ακόμη μεγαλύτερες συχνότητες 50 - 125 MHz χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι πέμπτης αρμονικής.

Για να χρησιμοποιηθούν με το σωστό τρόπο παρόμοιοι κρύσταλλοι, είναι απαραίτητη μία μικρή τροποποίηση στο κύκλωμα όπως φαίνεται στο σχημ.9. Η τροποποίηση αυτή εξασφαλίζει ικανοποιητική συμπίεση της θεμελιώδους συχνότητας με δύο τρόπους : Πρώτον, ο πυκνωτής Cs έχει χωρητικότητα περίπου ίση με αυτή του CL και έτσι παρουσιάζει υψηλότερη αντίσταση στη θεμελιώδη συχνότητα παρά στην τρίτη αρμονική. Δεύτερον, η παραγωγή της τρίτης αρμονικής υποβοηθείται από το κύκλωμα Cs - L το οποίο συντονίζει σε μία συχνότητα ελαφρώς μικρότερη από την τρίτη αρμονική. Ο λεπτομερής συντονισμός του πηνίου ώστε να επιτευχθεί μέγιστο πλάτος ταλαντώσεων είναι δυνατόν να προκαλέσει μία μικρή μεταβολή στη συχνότητα του ταλαντωτή αλλά αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί με ρύθμιση του CL ο οποίος όπως προαναφέρθηκε αποτελείται συνήθως από ένα σταθερό και ένα μεταβλητό πυκνωτή.

