

# ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

## Μέρος Α΄ Θεωρία

*Με απόφαση της ελληνικής κυβέρνησης τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου και του Λυκείου τυπώνονται από τον Οργανισμό Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων και διανέμονται δωρεάν.*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

Ν. Γ. ΘΕΟΦΑΝΟΥΣ

Χ. Δ. ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΣ

Σ. Α. ΠΑΚΤΙΤΗΣ

# ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

Μέρος Α΄ Θεωρία

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΘΗΝΑ

**ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ:**

**Ν. Γ. Θεοφάνους**

*Καθηγητής Πανεπιστημίου Αθηνών*

**Χ. Δ. Κανελλόπουλος,**

*Φυσικός-Ραδιοηλεκτρολόγος, Ph. D., S. Illinois Univ. Σύμβουλος Π.Ι.*

**Σ. Α. ΠΑΚΤΙΤΗΣ,**

*B. Sc. (Tech.), P. G.Dip., M. Phill., AMIEE, Επίκ. Καθηγητής ΤΕΙ Αθήνας*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Το επίπεδο των Τεχνικών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των Η.Π.Α. είναι πολύ υψηλό όπως φαίνεται και από τα βιβλία των διαφόρων ειδικοτήτων. Για το λόγο αυτό θα πρέπει και το αντίστοιχο επίπεδο των Ελλήνων Τεχνικών να είναι της ίδιας στάθμης ώστε να μπορούν να σταθούν ισάξια στο στίβο του ανταγωνισμού. Μ' αυτό το σκεπτικό λοιπόν γράφτηκε το βιβλίο αυτό.

Σκοπός του βιβλίου αυτού είναι να παρουσιάσει τις βασικές αρχές της λειτουργίας των Αναλογικών Ηλεκτρονικών όσο το δυνατόν πιο κατανοητές από τους σπουδαστές.

Το βιβλίο γράφτηκε σύμφωνα με το αναλυτικό πρόγραμμα του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου και τα μαθηματικά που χρησιμοποιήσαμε είναι σύμφωνα με το πρόγραμμα που διδάσκεται στην ειδικότητα του Ηλεκτρονικού των Τ.Ε.Ε.

Οι συγγραφείς

# Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

## ΠΟΛΩΣΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ



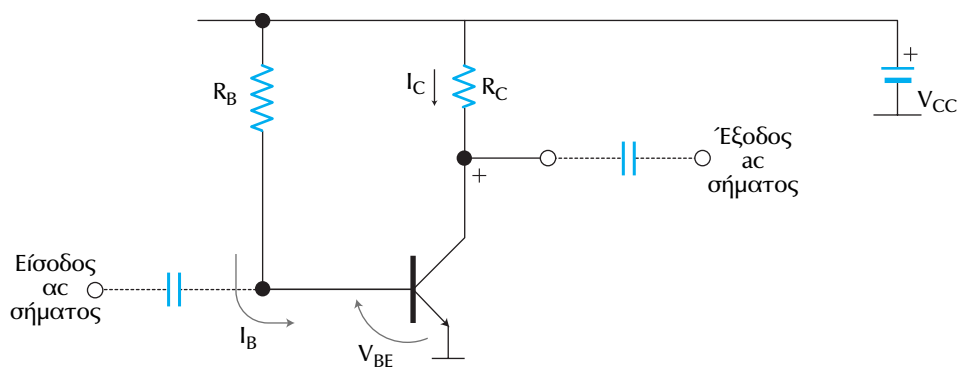
## 1.1 Εισαγωγή

□ Με τον όρο “**πόλωση**” (bias) εννοούμε την κατάλληλη συνεχή (dc) τάση (ή τάσεις) που πρέπει να εφαρμόσουμε στο κύκλωμα ενός ηλεκτρονικού στοιχείου, άρα και ενός τρανζίστορ, ώστε να εξασφαλίσουμε την ομαλή λειτουργία του στο συνεχές, αλλά και στην περίπτωση που θα εφαρμόζαμε και εναλλασσόμενο σήμα στην είσοδο του κυκλώματος.

Η συνεχής αυτή τάση (ή τάσεις) πόλωσης καθορίζει και την τιμή των αντιστάσεων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η κατάλληλη πόλωση, εφόσον είναι γνωστά τα ρεύματα. Στην πράξη όμως εργαζόμαστε συνήθως αντίστροφα. Μας δίνονται δηλαδή οι τάσεις των πηγών και οι διαθέσιμες αντιστάσεις και επιζητούμε να βρούμε τα ρεύματα στο κύκλωμα πόλωσης, καθώς και τις τάσεις που επικρατούν ή πρέπει να επικρατούν στις επαφές (διόδους) του τρανζίστορ.

## 1.2 Κύκλωμα πόλωσης σε συνδεσμολογία CE

Στη συνδεσμολογία κοινού-εκπομπού (CE), ο εκπομπός είναι κοινός στο κύκλωμα εισόδου και εξόδου. Ένα κύκλωμα πόλωσης σε συνδεσμολογία CE φαίνεται στο Σχ. 1.1. Στο κύκλωμα αυτό, επιθυμούμε να υπολογίσουμε τις τάσεις πόλωσης  $V_{BE}$  και  $V_{CE}$  που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία, καθώς και το σημείο ηρεμίας  $Q$ , γύρω από το οποίο πραγματοποιείται η λειτουργία.



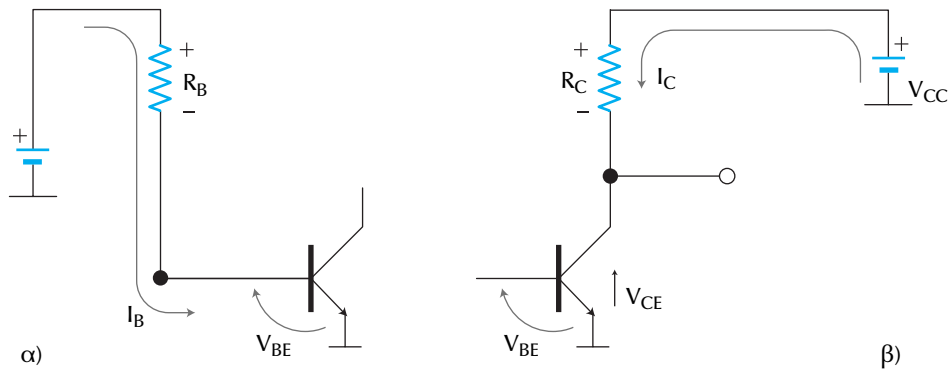
**Σχήμα 1-1.** Κύκλωμα σταθερής πόλωσης σε συνδεσμολογία CE

Το τρανζίστορ είναι τύπου NPN αλλά η ανάλυση που ακολουθεί ισχύει και για PNP, αρκεί να αντιστρέψουμε τις πολικότητες των τάσεων και τη



φορά των ρευμάτων. Για την ανάλυση, θεωρούμε ότι το όλο κύκλωμα του Σχ.1.1 αποτελείται από το κύκλωμα εισόδου και το κύκλωμα εξόδου, έτσι που να μπορούμε να τα αναλύσουμε ξεχωριστά.

Στο Σχ.1.2 εικονίζονται τα κυκλώματα εισόδου και εξόδου που συνιστούν το όλο κύκλωμα του Σχ.1.1.



Σχήμα 1-2. Κύκλωμα εισόδου (α) και εξόδου του κυκλώματος του Σχ.1.1.

### 1.2.1 Ανάλυση του Κυκλώματος Εισόδου

Για το κύκλωμα εισόδου, Σχ.1.2α, ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff (NTK) δίνει:

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0 \quad (1.2.1)$$

Λύνοντας ως προς  $I_B$  έχουμε

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (1.2.2)$$

Επειδή η  $V_{BE}$  είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την  $V_{CC}$ , μπορούμε με προσέγγιση να γράψουμε:

$$I_B \cong \frac{V_{CC}}{R_B} \quad (1.2.3)$$

Από τη σχέση αυτή, όταν έχουμε γνωστά τα  $V_{CC}$  και  $R_B$ , βρίσκουμε το  $I_B$ .

### 1.2.2 Ανάλυση του Κυκλώματος Εξόδου

Ειδικά για τα κυκλώματα πόλωσης, μπορούμε άνετα να υποθέσουμε  $I_E \cong I_C$ , αφού στο dc έχουμε  $\alpha_0 \cong 1$ . Όπως γνωρίζουμε όμως για τις υβριδικές παραμέτρους, τα ρεύματα  $I_C$  και  $I_B$  συνδέονται με τη σχέση:

$$I_C = \beta_0 I_B \quad (1.2.4)$$

Το  $\beta_0$  (στατικό  $\beta$  ή  $\beta$  στο dc) ταυτίζεται με την υβριδική παράμετρο  $h_{FE}$  (ενώ το  $\beta$  στο ac ταυτίζεται με το  $h_{fe}$ ).

Επειδή το  $\beta_0$  είναι γνωστό για το εκάστοτε συγκεκριμένο τρανζίστορ, καθώς και το  $I_B$ , έπεται ότι, με βάση την Εξ. (1.2.4), μπορούμε να υπολογίσουμε και το  $I_C$ , το οποίο μάλιστα είναι ανεξάρτητο της  $R_C$ .

Από το κύκλωμα εξόδου, εφαρμόζοντας το ΝΤΚ, έχουμε επίσης:

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0 \quad (1.2.5)$$

ή

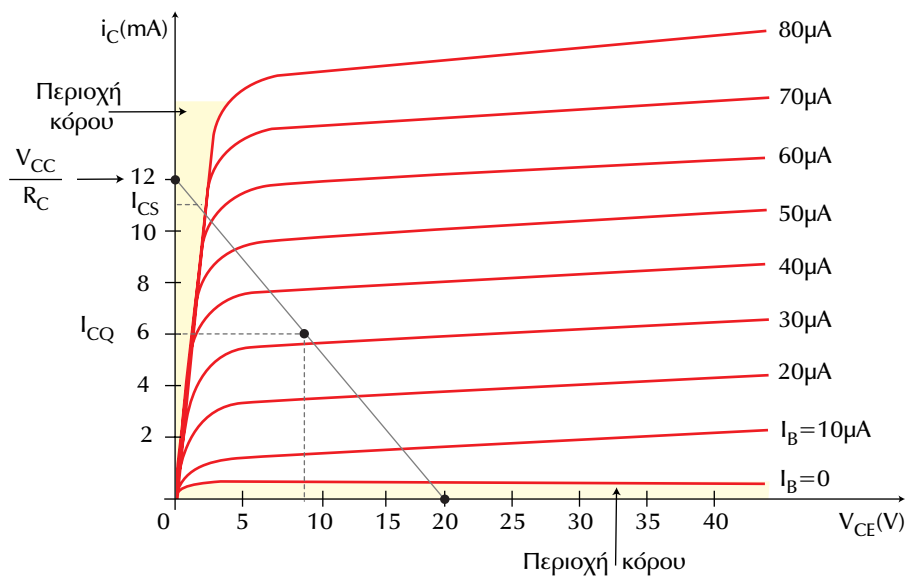
$$V_{CE} - V_{CC} - I_C R_C = 0 \quad (1.2.6)$$

Από τη σχέση αυτή προσδιορίζουμε την τάση πόλωσης  $V_{CE}$ , αφού τα άλλα μεγέθη της Εξ. (1.2.6) είναι γνωστά.

Συνεπώς, η παραπάνω ανάλυση μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε τα ρεύματα και τις τάσεις πόλωσης.

### 1.2.3 Ευθεία Φόρτου και Σημείο Λειτουργίας

Θεωρούμε τις χαρακτηριστικές εξόδου της συνδεσμολογίας CE για κάποιο τυπικό τρανζίστορ. Οι χαρακτηριστικές αυτές φαίνονται στο Σχ.1.3.



**Σχήμα 1-3.** Χαρακτηριστικές της συνδεσμολογίας CE και ευθεία φόρτου

Για να χαράξουμε την ευθεία φόρτου, θεωρούμε την Εξ.(1.2.6) και λύνουμε ως προς  $I_c$ :

$$I_c \cong \frac{V_{CE}}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (1.2.7)$$

Η εξίσωση αυτή, σε διάγραμμα με άξονες  $V_{CE} \rightarrow x$  και  $I_c \rightarrow y$ , είναι γραμμική σχέση της μορφής  $y = mx + \lambda$  και συνεπώς παριστάνει μια ευθεία γραμμή. Η ευθεία αυτή ονομάζεται **ευθεία φόρτου στο συνεχές (dc ευθεία φόρτου)**.

Για να χαράξουμε την παραπάνω ευθεία φόρτου, πρέπει να προσδιορίσουμε δυο σημεία της ή ένα σημείο και την κλίση της, που είναι ίση με

$$m = - \frac{1}{R_C}$$

Σαν τέτοια σημεία λαμβάνουμε συνήθως τα σημεία τομής της με τους άξονες. Οπότε, για το ένα σημείο έχουμε  $I_c = 0$  και  $V_{CE} = V_{CC}$ . Έτσι με το  $V_{CC}$  γνωστό, καθορίζεται το ένα σημείο. Για το άλλο σημείο έχουμε  $V_{CE} = 0$  άρα έπεται:

$$I_c = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Έτσι, με την  $R_C$  γνωστή, καθορίζεται το άλλο σημείο. Η τελική χάραξη της ευθείας φόρτου φαίνεται στο Σχ.1.3.

Με τη χάραξη της ευθείας φόρτου, μπορούμε να προσδιορίσουμε το **σημείο λει-τουργίας ή ηρεμίας Q**. Για την εύρεση του Q απαιτείται η γνώση της τιμής του  $I_B$ . Η τιμή του δίνεται από την Εξ.(1.2.3) και έστω ότι έχει την τιμή π.χ.  $I_B = 40 \mu A$ , όπως α-κριβώς δείχνει το Σχ.1.3. Η τομή της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική που αντιστοιχεί στο ρεύμα βάσης, καθορίζει το σημείο ηρεμίας Q. (Σημειώστε ότι κατά τη διάρκεια της λει-τουργίας στο ac, το σημείο λειτουργίας πηγενοέρχεται πάνω στη λεγόμενη ac ευθεία φόρτου).

#### 1.2.4 Ρεύμα Κόρου του Τρανζίστορ

Για την κανονική λειτουργία ενός τρανζίστορ χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής του, και επί πλέον με πιστή απόδοση του σήματος εισόδου στην έξοδο (δηλ. χωρίς εισαγωγή παραμόρφωσης), θα πρέπει το ρεύμα

συλλέκτη  $I_C$  να μην είναι πολύ μεγάλο, δηλ. να μην υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή  $I_{CS}$ .

Το **μέγιστο** ρεύμα συλλέκτη  $I_C$  βρίσκεται από την Εξ.(1.2.7) και είναι:

$$I_{CS} \cong \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (1.2.8)$$

Το ρεύμα αυτό επιτυγχάνεται, όταν:

$$V_{CE} = V_{CES} \cong 0 \quad (1.2.9)$$

Το ρεύμα αυτό, που λέγεται **ρεύμα κόρου** του τρανζίστορ, αντιστοιχεί στο επάνω ακρότατο σημείο της ευθείας φόρτου (γραμμοσκιασμένη περιοχή). Για παρόμοιο λόγο, η τάση  $V_{CES}$ , με την οποία επιτυγχάνεται το ρεύμα αυτό, λέγεται **τάση κόρου**. Στην πράξη η  $V_{CES}$  είναι της τάξης μερικών δέκατων του βολτ.

Όταν το  $I_C$  είναι πολύ μεγάλο, η επαφή του συλλέκτη του τρανζίστορ θερμαίνεται υπερβολικά και το τρανζίστορ καταστρέφεται. Επίσης, στην περίπτωση που το κύκλωμα εργάζεται ως ενισχυτής, όταν το  $I_C$  είναι πολύ μεγάλο, δεν έχουμε πιστή αναπαραγωγή του σήματος εισόδου στην έξοδο. Δηλαδή, έχουμε *παραμόρφωση* του σήματος στην έξοδο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ό,τι το κύκλωμα εργάζεται στα μη **γραμμικά τμήματα** των χαρακτηριστικών καμπυλών του Σχ.1.3.

Για τη βέλτιστη λοιπόν λειτουργία, δηλ. για να έχουμε γραμμική περιοχή, θα πρέπει να ισχύει με προσέγγιση:

$$V_{CE} > 0,5V, \text{ οπότε και } I_C < I_{CS} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (1.2.10)$$

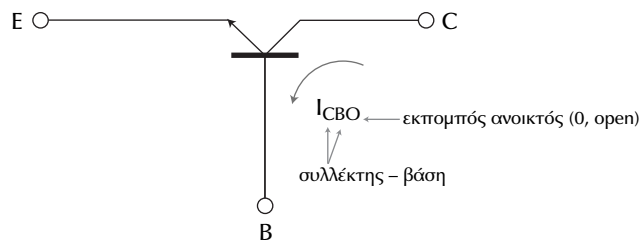
### 1.2.5 Ρεύμα Αποκοπής του Τρανζίστορ

Με βάση την Εξ.(1.2.4), για να *αποκοπεί* ένα τρανζίστορ, δηλ. να γίνει το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$  μηδέν, θα γίνει (περίπου) μηδέν και το  $I_B$ . Το ρεύμα αυτό  $I_B (\cong 0)$ , για το οποίο  $I_C = 0$  ονομάζεται **ρεύμα αποκοπής** του τρανζίστορ.

Η Εξ.(1.2.4), όμως, ισχύει κατά προσέγγιση και κατ' αντιστοιχία όταν το  $I_B$  γίνει μη-δέν, το  $I_C$  δεν είναι ακριβώς μηδέν και αντίστροφα. Αποδεικνύεται ότι η ακριβής έκφραση της Εξ.(1.2.4) είναι:

$$I_C = \frac{I_{CO}}{1 - \alpha_0} + \beta_0 I_B = \frac{I_{CO}}{1 - \alpha_0} + \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} I_B \quad (1.2.11)$$

Το μέγεθος  $I_{CO}$  αποτελεί μια νέα παράμετρο του τρανζίστορ και ονομάζεται **ανά-στροφο ρεύμα κόρου**. Το ρεύμα αυτό ορίζεται ως το ρεύμα που ρέει από το συλ-λέκτη στη βάση του τρανζίστορ, όταν η είσοδος είναι ανοικτή, δηλαδή  $I_E=0$  σε συνδεσμολογία CB. Γι' αυτό το λόγο, το ρεύμα  $I_{CO}$  συμβολίζεται και με το  $I_{CBO}$ . Το Σχ.1.4 δείχνει πως ορίζεται το ρεύμα αυτό.



Σχήμα 1-4. Ανάστροφο ρεύμα κόρου

Το  $I_{CO}$ , ως παράμετρος του τρανζίστορ, δίνεται στα δεδομένα των κατασκευαστών του τρανζίστορ και είναι πολύ μικρό. Εξάλλου, από την Εξ.(1.2.1) βρίσκουμε ότι, για να έχουμε αποκοπή, δηλ.  $I_C = 0$  πρέπει να έχουμε  $I_B = -I_{CO}/\alpha_0 \equiv -I_{CO}$ . Συνεπώς, το ρεύμα αποκοπής θα είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσο με το  $I_{CO}$ , άρα πολύ μικρό αλλά όχι μηδενικό.

### 1.2.6 Επίδραση της Θερμοκρασίας στην Πόλωση

Το κύκλωμα σταθερής πόλωσης του Σχ.1.1 μπορεί να δώσει μεγάλη απολαβή αν εργασθεί ως ενισχυτής. Υπάρχουν όμως δυσκολίες στο να διατηρείται η πόλωση σταθερή, π.χ. να παραμείνει αμετάβλητο το σημείο ηρεμίας Q. Αυτό οφείλεται στο ότι το  $I_C$  μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, το  $I_C$  μεταβάλλεται επειδή μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και τα τρία παρακάτω μεγέθη, με τα οποία σχετίζεται:

1. Το ανάστροφο ρεύμα κόρου,  $I_{CO}$ , το οποίο διπλασιάζεται σε κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $10^0$  C.

2. Η τάση πόλωσης βάσης-εκπομπού,  $V_{BE}$ , η οποία, με αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $1^0$  C, ελαττώνεται κατά 2.5 mV [βλέπε και Εξ.(1.2.2) με αύξηση του  $I_B$ ].

3. Η απολαβή  $\beta_0$  του τρανζίστορ, η οποία αυξάνει με τη θερμοκρασία.

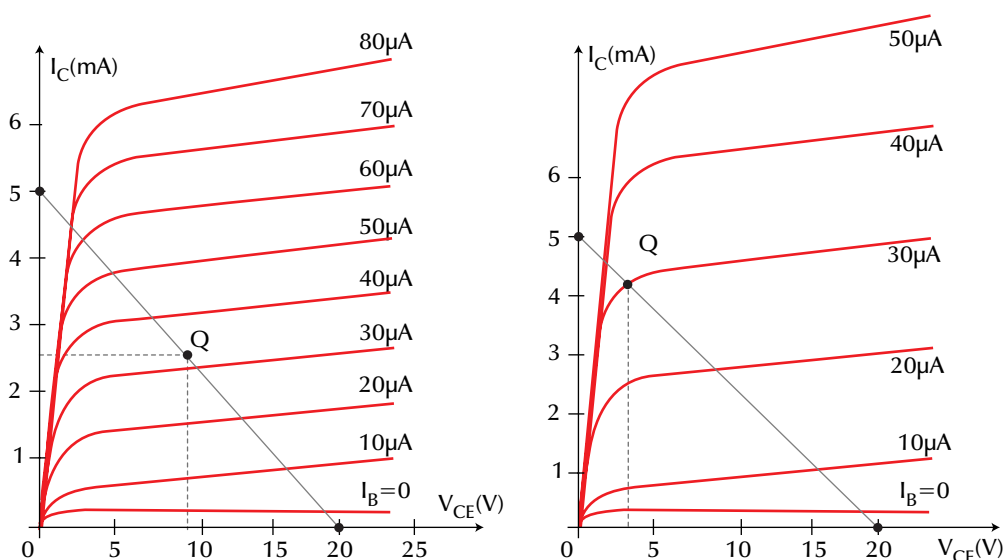
Οι τιμές των μεγεθών αυτών, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, για ένα τυπικό τραν-ζίστορ πυριτίου (Si), φαίνονται στον Πίνακα 1.2.1.

$T \rightarrow ^\circ\text{C}$	$I_{CO} \rightarrow \text{nA}$	$\beta_0$	$V_{BE} \rightarrow \text{V}$
-65	$0.2 \times 10^{-3}$	20	0.85
25	0.1	50	0.65
100	20	80	0.48
175	$3.3 \times 10^3$	120	0.3

**Πίνακας 1.2.1.** Μεταβολή των  $I_{CO}$ ,  $\beta_0$  και  $V_{BE}$  ως συνάρτηση της θερμοκρασίας σε τρανζίστορ Si

Αν λάβουμε υπόψη τις τιμές του πίνακα και την Εξ.(1.2.11), συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλει εύκολα τις αρχικές συνθήκες πόλωσης. Συγκεκριμένα, μεταβάλλονται οι χαρακτηριστικές του τρανζίστορ και το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$  που αντιστοιχεί στο σημείο ηρεμίας Q.

Για να επιδείξουμε την επίδραση που επιφέρουν τα  $I_{CO}$  και  $\beta_0$  στις συνθήκες πόλωσης, όταν αυτά μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, θεωρούμε τις χαρακτηριστικές του Σχ.1.5. Οι χαρακτηριστικές αυτές έχουν ληφθεί σε θερμοκρασίες  $25^\circ\text{C}$  και  $100^\circ\text{C}$  για το ίδιο τρανζίστορ.



**Σχήμα 1-5.** Μετάθεση του σημείου Q λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας  $25^\circ\text{C}$  (α),  $100^\circ\text{C}$  (β)

Από το σχήμα αυτό βλέπουμε, ότι το σημείο ηρεμίας Q μετατοπίστηκε πάνω στην ευθεία φόρτου προς μεγαλύτερες τιμές του  $I_C$  και μάλιστα στους  $100^\circ\text{C}$  βρίσκεται κοντά στην περιοχή κόρου. Αυτό οφείλεται στο ότι τόσο το  $I_{CO}$ , όσο και το  $\beta_0$ , αυξήθηκαν με τη θερμοκρασία. Η αύξηση του  $\beta_0$  με τη θερμοκρασία, φαίνεται από την αύξηση των αποστάσεων των χαρακτηριστικών κατά μήκος της ευθείας φόρτου. Για να το πιστοποιήσουμε αυτό, θεωρούμε το γενικό ορισμό του δυναμικού  $\beta$ , (δηλ.  $\beta$  στο ac ή το  $h_{fe}$ ) για το οποίο έχουμε:

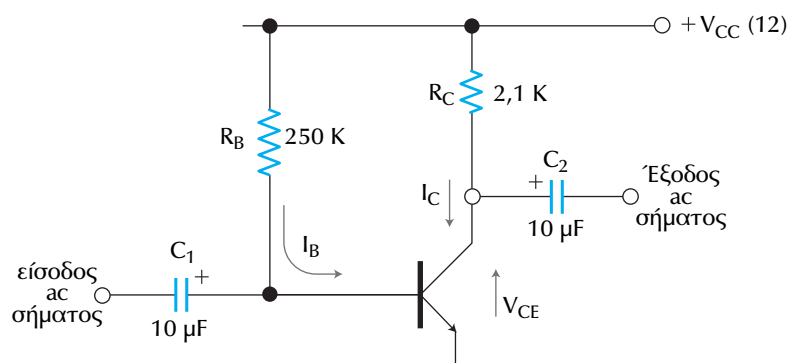
$$\beta = h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Για την ίδια μεταβολή  $\Delta I_B$  στις χαρακτηριστικές (α) και (β), το  $\Delta I_C$  στις (β) είναι μεγαλύτερο από ό,τι στις (α). Κατά την παραπάνω σχέση, αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση του  $\beta$  με τη θερμοκρασία, όπως άλλωστε δείχνει και ο Πίνακας 1.2.1.

Η μεταβολή του  $V_{BE}$  με τη θερμοκρασία δεν έχει τόσο μεγάλη επίδραση στις συνθήκες πόλωσης (π.χ. θέση του σημείου Q), όσο έχει η μεταβολή του  $\beta_0$ . Αναφέρουμε μόνο ότι, για να περιορίσουμε την επίδραση του  $V_{BE}$  στις συνθήκες πόλωσης, συνδέουμε συχνά μια αντίσταση  $R_E$  μεταξύ εκπομπού και γείωσης.

### ⇒ Παράδειγμα 1-1

Να υπολογίσετε τις τάσεις και τα ρεύματα πόλωσης για το κύκλωμα CE του Σχ.1.6. Το τρανζίστορ είναι τύπου NPN και έχει  $\beta_0=50$ .



**Σχήμα 1-6.** Κύκλωμα σταθερής πόλωσης σε συνδεσμολογία CE

### Λύση

Ακολουθούμε την πορεία που αναφέραμε προηγουμένως, οπότε με βάση τις Εξ. (1.2.2), (1.2.4) και (1.2.6), έχουμε:

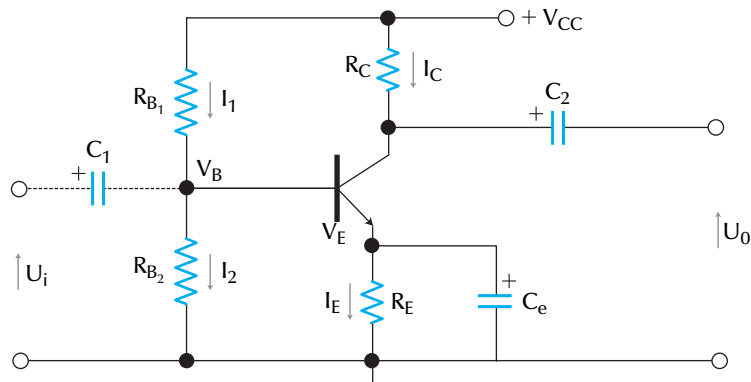
$$\alpha) \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \cong \frac{V_{CC}}{R_B} = \frac{12}{250} = 48 \mu\text{A}$$

$$\beta) I_C = \beta_0 I_B = 50 \times 48 \mu\text{A} = 2.4 \text{ mA}$$

$$\gamma) V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 2.4 \times 2.1 = 12 - 5 = 7 \text{ V}.$$

### 1.3 ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΟΛΩΣΗΣ CE ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΟ ΤΟΥ $\beta_0$

Όπως είδαμε στα προηγούμενα, το ρεύμα  $I_C$ , καθώς και οι συνθήκες πόλωσης γενικά μεταβάλλονται, όταν μεταβληθεί η θερμοκρασία, επειδή μεταβάλλονται κυρίως τα  $I_{CO}$ ,  $V_{BE}$  και  $\beta_0$ . Με τη σύγχρονη όμως τεχνική κατασκευής των τρανζίστορ έχει επιτευχθεί, ώστε η παράμετρος  $I_{CO}$ , να είναι μηδαμινή. Με τον τρόπο αυτό, ακόμα και σε υψηλότερες θερμοκρασίες ( $\sim 100^\circ \text{C}$ ), μπορεί να θεωρηθεί ότι το  $I_{CO}$  έχει ελάχιστη επίδραση στις αρχικές συνθήκες πόλωσης. Εξάλλου, όπως ήδη είπαμε, η τάση πόλωσης  $V_{BE}$  μπορεί να καταστεί ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία, αν ο εκπομπός γειωθεί μέσω της αντίστασης εκπομπού  $R_E$ . Επομένως το  $\beta_0$  είναι το μέγεθος εκείνο το οποίο ουσιαστικά μεταβάλλει τις συνθήκες πόλωσης, όταν μεταβληθεί η τιμή του. Το  $\beta_0$  όπως είναι γνωστό, αυξάνει μαζί με τη θερμοκρασία, αλλά ακόμα και για τρανζίστορ που έχουν καταχωρηθεί με τον ίδιο αριθμό στους καταλόγους μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικό. (Έχει παρατηρηθεί ότι τρανζίστορ με τον ίδιο αριθμό



Σχήμα 1-7. Κύκλωμα πόλωσης ανεξάρτητο του  $\beta_0$  (συνδεσμολογίας CE)



καταχώρησης μπορεί να έχουν  $\beta_0$  από 125-300 στην ίδια θερμοκρασία. Ιδιαίτερα μάλιστα για τρανζίστορ πυριτίου, το  $\beta_0$  παρουσιάζει με τη θερμοκρασία μεγαλύτερες μεταβολές από ό,τι στα τρανζίστορ γερμανίου). Για να περιοριστεί η επίδραση του  $\beta_0$  στις συνθήκες πόλωσης, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ή αντικαθίσταται το τρανζίστορ ή χρησιμοποιούμε το κύκλωμα του Σχ.1.7.

Οι αντιστάσεις  $R_{B1}$  και  $R_{B2}$  σχηματίζουν διαιρέτη τάσης και επομένως η τάση  $V_B$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (1.3.1)$$

Αν τώρα η  $V_E$  παριστάνει την τάση στα άκρα της  $R_E$  και η  $V_{BE}$  την τάση μεταξύ βάσης-εκπομπού, θα έχουμε:

$$V_E = I_E R_E = V_B - V_{BE} \quad (1.3.2)$$

Το ρεύμα  $I_E$  υπολογίζεται από την τάση αυτή, ως εξής:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \quad (1.3.3)$$

Επειδή δε  $I_B \cong 0$ , έπεται ότι

$$I_C \cong I_E \quad (1.3.4)$$

Η τάση  $V_{RC}$  στα άκρα της  $R_C$  θα είναι :

$$V_{RC} = I_C R_C \quad (1.3.5)$$

Η τάση μεταξύ συλλέκτη-γείωσης θα είναι:

$$V_C = V_{CC} - V_{RC} = V_{CC} - I_C R_C \quad (1.3.6)$$

Η τάση  $V_{CE}$  μεταξύ συλλέκτη-εκπομπού θα είναι:

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (1.3.7)$$

ή

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c R_c - I_e R_e \cong V_{cc} - I_c (R_c + R_e) \quad (1.3.8)$$

Σε όλη την προηγούμενη ανάλυση δεν χρησιμοποιήθηκε πουθενά το  $\beta_0$ . Συνεπώς, αυτό το κύκλωμα πόλωσης είναι στην πράξη ανεξάρτητο του  $\beta_0$  του τρανζίστορ καθώς και των μεταβολών της θερμοκρασίας, οι οποίες δεν επηρεάζουν ούτε τη  $V_B$  ούτε τη  $V_E$ . Πράγματι, όπως είδαμε, η τάση της βάσης  $V_B$  καθορίζεται μόνο από τις  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  και από την τάση της πηγής  $V_{CC}$ . Επίσης, η τάση εκπομπού  $V_E$  είναι σταθερή, επειδή και η  $V_B$  είναι σταθερή και περίπου ίση με αυτή, καθόσον  $V_B \gg V_{BE}$  με  $V_{BE} @ 0.3$  V (Ge) και  $V_{BE} @ 0.7$  V (Si).

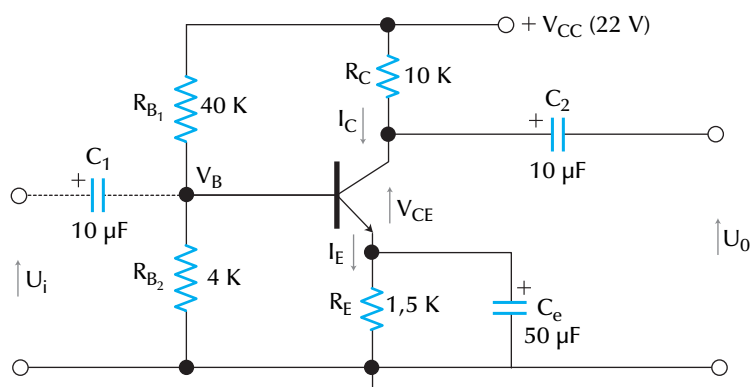
Η αντίσταση  $R_E$  καθορίζει τις τιμές των ρευμάτων  $I_E$  και  $I_C$ . Τέλος, η αντίσταση  $R_C$  καθορίζει την τάση του συλλέκτη  $V_C$  και συνεπώς την τάση πόλωσης συλλέκτη-εκπομπού  $V_{CE}$ .

Η τάση της βάσης  $V_B$  ρυθμίζεται από την  $R_{B2}$ , το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$  από την  $R_E$  και η τάση συλλέκτη-εκπομπού από την  $R_C$ . Μεταβολή οποιουδήποτε άλλου στοιχείου του κυκλώματος, θα έχει μικρή επίδραση στις αρχικές συνθήκες πόλωσης. Ο πυκνωτής  $C_E$  αποτελεί ενεργό μέρος του κυκλώματος μόνο όταν το κύκλωμα εργάζεται ως ενισχυτής, δηλαδή με εναλλασσόμενο σήμα στην είσοδο. Ωστόσο, η παρουσία του δεν μεταβάλλει τις συνθήκες πόλωσης.

Το κύκλωμα που περιγράψαμε λέγεται και **κύκλωμα πόλωσης με διαιρέτη τάσης** είναι και το πιο συνηθισμένο στις πρακτικές εφαρμογές.

### ⇒ Παράδειγμα 1-2

Να υπολογίσετε τις τάσεις και τα ρεύματα πόλωσης στο κύκλωμα του Σχ.1.8, αν το τρανζίστορ είναι πυριτίου.



**Σχήμα 1-8.** Κύκλωμα πόλωσης CE με διαιρέτη τάσης

**Λύση**

Από τις Εξ. (1.3.1) έως (1.3.8) λαμβάνουμε κατά σειρά:

$$\alpha) V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{4}{40 + 4} 22 = 2V$$

$$\beta) V_E = V_B - V_{BE} = 2 - 0.7 = 1.3V$$

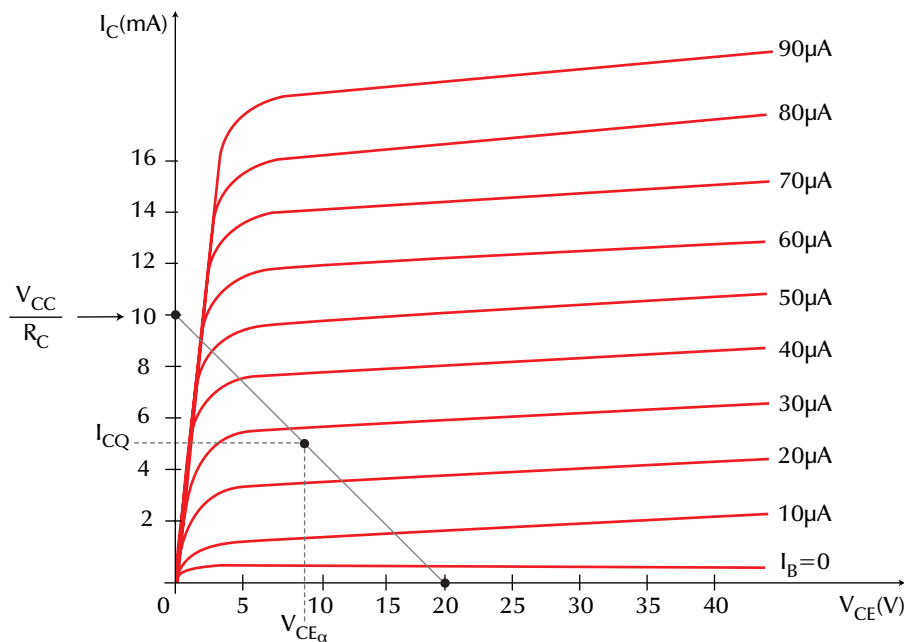
$$\gamma) I_E \cong I_C = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1.3}{1.5} = 0.87 \text{ ΚΩ}$$

$$\delta) V_C = V_{CC} - I_C R_C = 22 - 0.87 \times 10 = 13.3V$$

$$\epsilon) V_{CE} = V_C - V_E = 13.3 - 1.3 = 12V$$

**1.3.1 Πόλωση CE με Αντίσταση RE**

Εκτός από τα προηγούμενα, ένα άλλο κύκλωμα πόλωσης σε συνδεσμολογία CE, που χρησιμοποιείται συχνά, είναι το κύκλωμα CE με αντίσταση  $R_E$  στον εκπομπό, Σχ.1.9.



**Σχήμα 1-9.** Κύκλωμα πόλωσης CE με αντίσταση  $R_E$

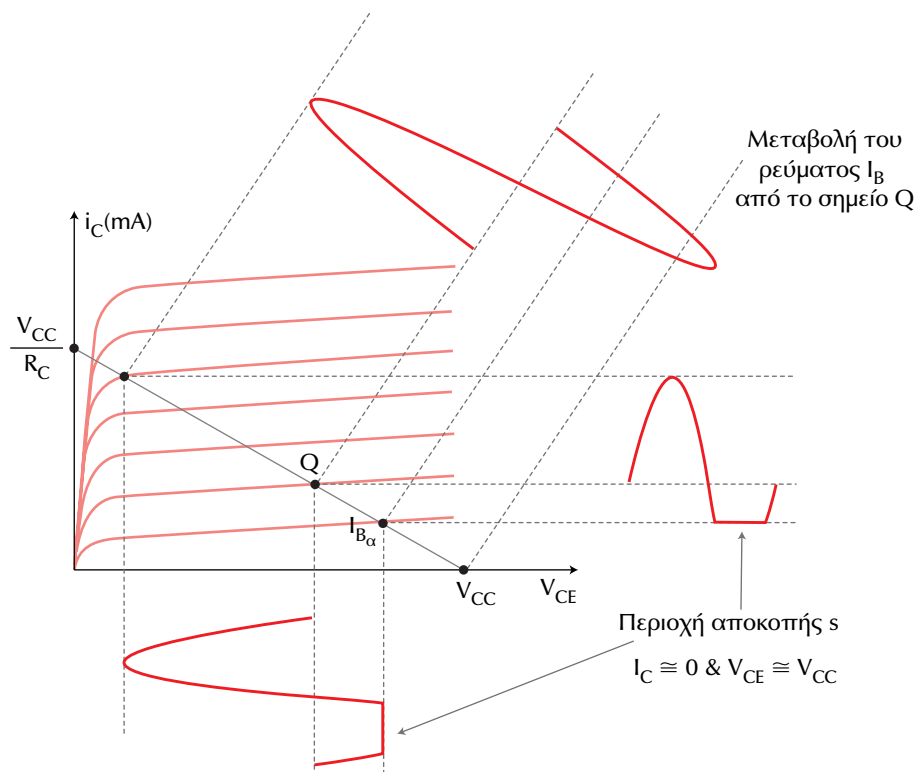
Αποδεικνύεται, ότι το ρεύμα βάσης δίνεται από τη σχέση:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B - (\beta_0 + 1) R_E} \cong \frac{V_{CC}}{R_B + \beta_0 R_E} \quad (1.3.9)$$

όπου έχουμε κάνει την παραδοχή  $V_{BE} \ll V_{CC}$ , η οποία ισχύει συνήθως στην πράξη. Άρα, με την παραδοχή αυτή, το ρεύμα  $I_B$  προκύπτει πρακτικά ανεξάρτητο της  $V_{BE}$ .

## 1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Στην πράξη, η παραμόρφωση σημαίνει τη μη πιστή απόδοση της κυματομορφής του σήματος εισόδου στην έξοδο μιας βαθμίδας, π.χ ενός ενισχυτή. Με τον όρο “σήμα” εν-νοούμε κάθε μεταβαλλομένη (βασικά, εναλλασσόμενη) τάση, την οποία εφαρμόζουμε στην είσοδο ενός ενισχυτή ή τη λαμβάνουμε στην έξοδό του. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους



**Σχήμα 1-10.** Ευθεία φόρτου και σημείο ηρεμίας Q στις χαρακτηριστικές εξόδου ενός BJT

οποίους το σήμα εισόδου δεν αποδίδεται πιστά στην έξοδο. Ένας από τους κυριώτερους αφορά τη μη εξασφάλιση των κατάλληλων συνθηκών πόλωσης. Για να είμαστε βέβαιοι ότι το σήμα δεν θα υποστεί παραμόρφωση, πρέπει οι αρχικές συνθήκες πόλωσης να διατηρούνται σχεδόν αμετάβλητες καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας του ενισχυτή.

Για τη μελέτη της παραμόρφωσης, σε σχέση με την πόλωση, ξεκινάμε με τη μαθηματική έκφραση της ευθείας φόρτου σε συνδεσμολογία CE, που δίνεται από την Εξ. (1.2.7).

Αν τώρα θεωρήσουμε ότι τα μεγέθη  $V_{CC}$  και  $R_C$  είναι γνωστά, π.χ.  $V_{CC}=20\text{ V}$  και  $R_C=2\text{ k}\Omega$ , τότε η ευθεία φόρτου χαράσσεται στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών ενός τυ-πικού τρανζίστορ όπως φαίνεται στο Σχ.1.10.

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 1.2.3, για να βρούμε το σημείο ηρεμίας Q, το οποίο ορίζεται ως το κεντρικό σημείο γύρω από το οποίο επιτελείται η λειτουργία του ενισχυτή, πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα πόλωσης της βάσης  $I_B$ . Το ρεύμα αυτό βρίσκεται από την Εξ.(1.2.3). Αν λοιπόν, για να έχουμε άριστες συνθήκες λειτουργίας, θέλουμε το σημείο ηρεμίας Q να βρίσκεται στο μέσο περίπου της ευθείας φόρτου, πρέπει να επιλέξουμε την  $R_B$ , έτσι ώστε:

$$I_B \cong \frac{V_{CC}}{R_B} \cong 30\text{ }\mu\text{A}$$

Η τομή της δεδομένης ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική που αντιστοιχεί σε  $I_B=30\text{ }\mu\text{A}$  προσδιορίζει το σημείο ηρεμίας Q. Η τάση  $V_{CE}$  που αντιστοιχεί στο σημείο ηρεμίας λέγεται και τάση ηρεμίας συλλέκτη-εκπομπού και συμβολίζεται συχνά με το  $V_{CEQ}$ . Ομοίως, το ρεύμα ηρεμίας του συλλέκτη συμβολίζεται  $I_{CQ}$ , όπως φαίνεται στο Σχ.1.10.

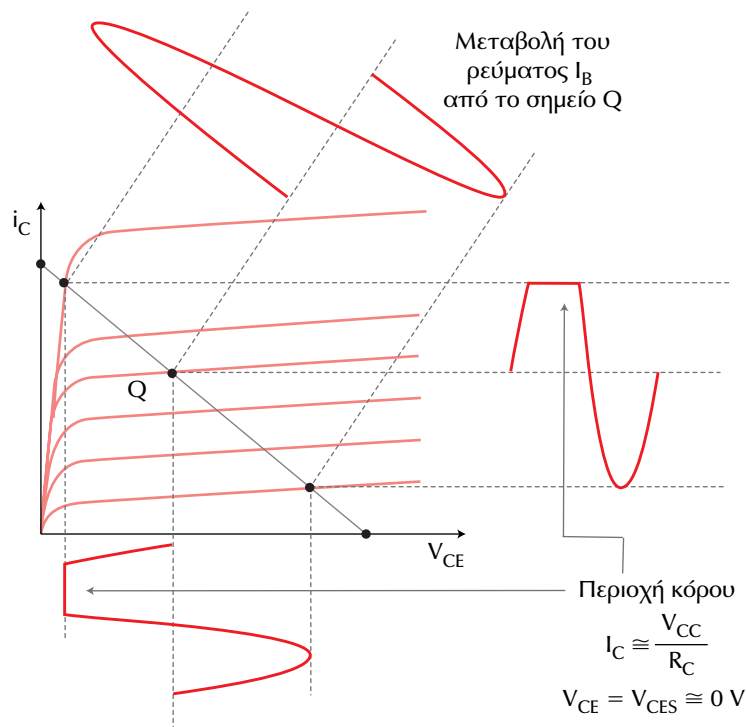
Αν τώρα στην είσοδο του ενισχυτή, συγκεκριμένα του ενισχυτή του Σχ.1.6, εφαρμόσουμε ένα σήμα, τότε η στιγμιαία τάση  $V_{ce}$  θα μεταβάλλεται γύρω από την τάση ηρεμίας  $V_{CEQ}$ . Με τη μεταβολή όμως της  $V_{ce}$ , θα μεταβάλλεται και το στιγμιαίο ρεύμα συλλέκτη  $I_c$  γύρω από τη σταθερή τιμή του  $I_{CQ}$ .

Εφόσον το σημείο Q έχει επιλεγεί στο μέσο περίπου της ευθείας φόρτου και το σήμα εισόδου είναι μικρό, οι διακυμάνσεις της  $V_{ce}$  δεν θα υπερβαίνουν τη μέγιστη τιμή της, δηλ. την τάση  $V_{CC}$ , ούτε και την ελάχιστη, δηλ. τη  $V_{ce}=V_{CES}\cong 0$ . Έτσι, και οι αντίστοιχες διακυμάνσεις του  $I_c$  γύρω από

το σταθερό  $I_{CQ}$  δεν θα υπερβαίνουν την ελάχιστη τιμή  $I_C \approx 0$  και τη μέγιστη τιμή  $I_C \approx V_{CC}/R_C$ . Σε κάθε χρονική στιγμή η τάση εξόδου, δηλαδή η τάση στα άκρα της  $R_C$ , εκφράζεται από το γινόμενο του στιγμιαίου ρεύματος  $I_C$  επί την αντίσταση  $R_C$ . Τότε με τις προϋποθέσεις που μόλις αναφέραμε, η τάση εξόδου θα αποτελεί πιστή απόδοση του σήματος της τάσης εισόδου. Επομένως, το σήμα της τάσης εξόδου θα είναι απαλλαγμένο παραμόρφωσης.

Αν όμως το σημείο ηρεμίας  $Q$  τοποθετηθεί στα χαμηλά της ευθείας φόρτου (μικρές τιμές του  $I_B$ ) ή μετακινηθεί προς τα κάτω λόγω μεταβολής των αρχικών συνθηκών πόλωσης, τότε, σήματα μεγάλου πλάτους στην είσοδο ενδέχεται να εμφανίζονται παραμορφωμένα στην έξοδο.

Για την καλύτερη κατανόηση του θέματος, θεωρούμε τη γραφική μέθοδο που απεικονίζει το Σχ.1.11.

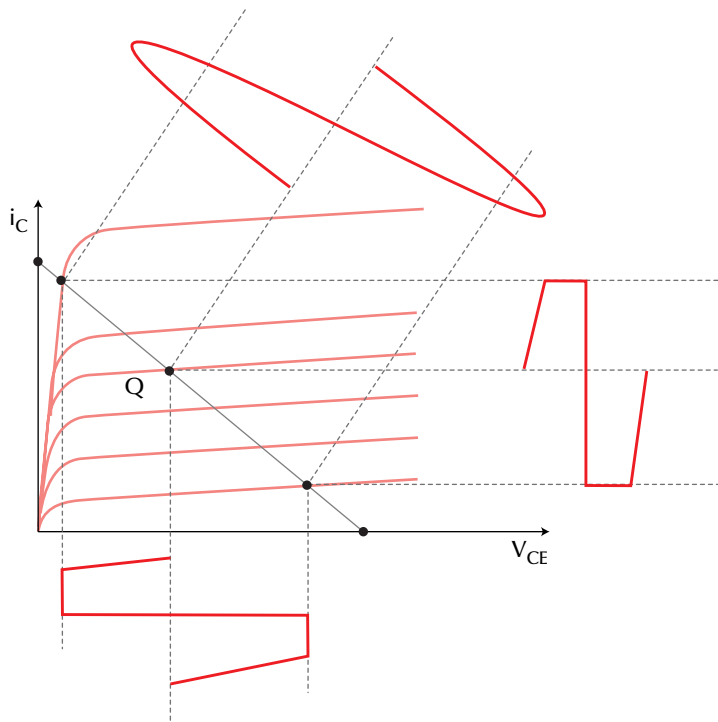


**Σχήμα 1-11.** Επίδραση του σημείου ηρεμίας  $Q$  στην παραμόρφωση του σήματος εισόδου. Το  $Q$  βρίσκεται κοντά στην περιοχή αποκοπής

Όπως δείχνει το σχήμα, το σημείο ηρεμίας  $Q$  έχει αρχικά τοποθετη-

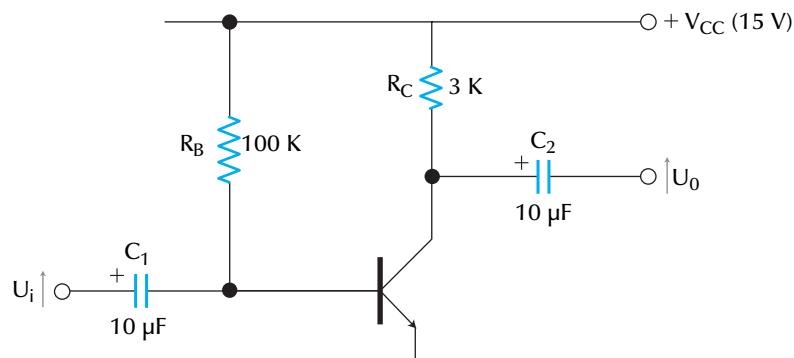
θεί κοντά στην *περιοχή αποκοπής*. Αν το σήμα εισόδου έχει μεγάλο πλάτος, τότε η τάση  $V_{CE}$  καθίσταται περίπου ίση με την τάση της πηγής  $V_{CC}$ , ή και μεγαλύτερη αυτής, οπότε και το ρεύμα εξόδου  $I_C$  θα γίνεται περίπου μηδέν. Επομένως, κάθε στιγμιαία τιμή της τάσης  $V_{CE}$  μεγαλύτερη της  $V_{CC}$  θα αποκόπτεται (ψαλιδίζεται). Έτσι, και το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου  $I_C$  σε όλη αυτή τη χρονική περίοδο, διατηρεί σταθερά τιμή περίπου μηδέν. Η πλήρης ημιτονοειδής καμπύλη στο επάνω μέρος του Σχ.1.11, παριστάνει τις διακυμάνσεις του ρεύματος της βάσης  $I_B$  γύρω από το σημείο ηρεμίας, δηλαδή γύρω από την τιμή  $I_{BQ}$ .

Αν τώρα θεωρήσουμε, ότι το Q έχει τοποθετηθεί κοντά στην *περιοχή κόρου* (μεγάλες τιμές του  $I_B$ ), τότε, όπως φαίνεται στο γραφικό διάγραμμα του Σχ.1.12, κάθε τάση μικρότερη της  $V_{CE} = V_{CES} \approx 0$  θα αποκόπτεται (ψαλιδίζεται). Επομένως, σε όλη τη χρονική αυτή διάρκεια κατά την οποία η  $V_{CE}$  θα έπαιρνε τιμές μικρότερες της τιμής περίπου μηδέν, το ρεύμα εξόδου  $I_C$  διατηρείται σταθερά ίσο προς τη μέγιστη τιμή  $I_C \approx V_{CC}/R_C$ . Δηλαδή, το ρεύμα εξόδου έχει υποστεί *ψαλιδισμό* στη στάθμη  $I_C \approx V_{CC}/R_C$ .



**Σχήμα 1-12.** Επίδραση της θέσης του σημείου ηρεμίας Q στην παραμόρφωση του σήματος εισόδου. Το σημείο ηρεμίας βρίσκεται κοντά στην περιοχή κόρου

Με την παραπάνω ανάλυση είδαμε ότι η τοποθέτηση του σημείου ηρεμίας Q έχει μεγάλη σημασία για την παραμόρφωση, την οποία υφίσταται το σήμα εισόδου. Ωστόσο, ακόμη κι αν το Q τοποθετηθεί σωστά (δηλ. περίπου στο μέσο της ευθείας φόρτου), πρέπει και το πλάτος του σήματος εισόδου να είναι επαρκώς μικρό, ώστε η  $V_{CE}$  να μην υπερβαίνει τις ακρότατες τιμές της  $V_{CE} \approx 0$  και  $V_{CE} \approx V_{CC}$ . Το Σχ.1.13 δείχνει τη γραφική μέθοδο απεικόνισης της παραμόρφωσης του σήματος, όταν το Q βρίσκεται στη σωστή θέση, αλλά το πλάτος του σήματος εισόδου είναι πολύ μεγάλο.



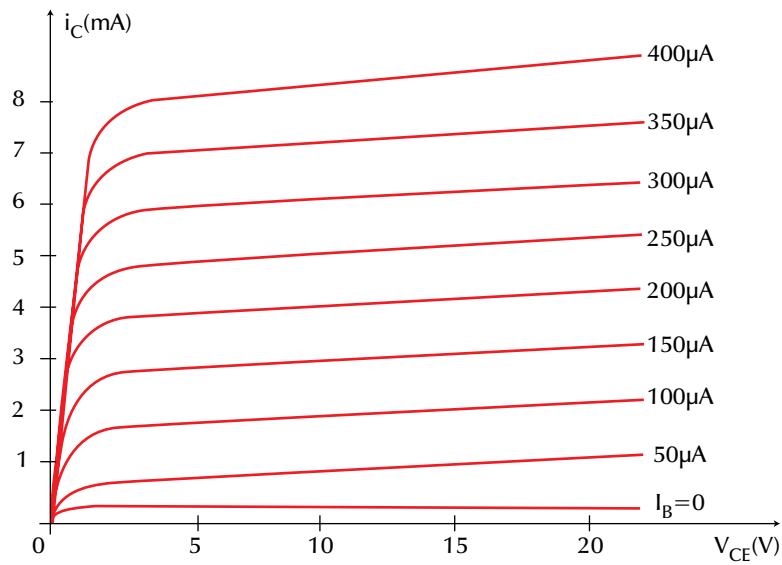
**Σχήμα 1-13.** Παραμόρφωση του σήματος εισόδου λόγω υπερδιέγερσης. Σωστή τοποθέτηση του σημείου Q, αλλά με μεγάλο σήμα εισόδου

### ⇒ Παράδειγμα 1-3

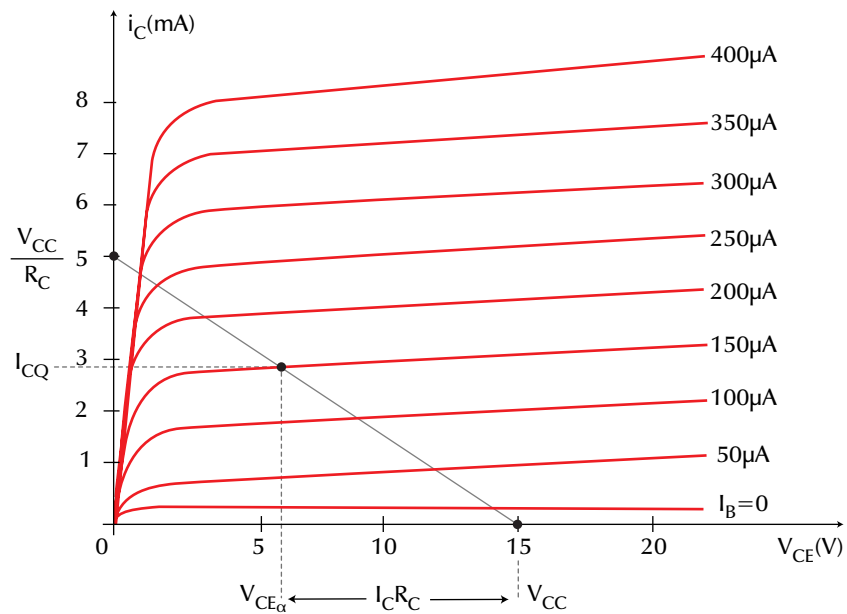
Δίνεται το κύκλωμα του Σχ.1.14 και οι χαρακτηριστικές συλλέκτη του τρανζίστορ, Σχ. 1.15. Να υπολογίσετε:

- Την ευθεία φόρτου στο συνεχές (dc) και το σημείο ηρεμίας Q.
- Τα μεγέθη  $V_{CE}$ ,  $I_C$ ,  $I_C R_C$  και  $I_E$  που αντιστοιχούν στο σημείο ηρεμίας Q (γραφική μέθοδος).





**Σχήμα 1-14.** Πρακτικό κύκλωμα σταθερής πόλωσης CE



**Σχήμα 1-15.** Χαρακτηριστικές συλλέκτη του BJT του Σχ. 1.14

### Λύση

Για να χαράξουμε την ευθεία φόρτου, πρέπει να προσδιορίσουμε δυο τουλάχιστον σημεία της. Το ένα έχει συντεταγμένες:

$$I_C = 0, V_{CE} = V_{CC} = 15 \text{ V}$$

και το άλλο,

$$V_{CE} = 0, I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{15}{3} = 5 \text{ mA}$$

Η ευθεία που ενώνει τα σημεία αυτά φαίνεται στο Σχ.1.14 και αποτελεί την ευθεία φόρτου στο συνεχές, για το κύκλωμα που δόθηκε.

Για να καθορισθεί το σημείο ηρεμίας Q, πρέπει να υπολογισθεί το ρεύμα βάσης  $I_B$ .

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \cong \frac{V_{CC}}{R_B} = \frac{15}{100} = 150 \mu\text{A}$$

Η τομή της ευθείας φόρτου με τη χαρακτηριστική που αντιστοιχεί σε  $I_B = 150 \mu\text{A}$  ορίζει το σημείο ηρεμίας Q.

Από το σχήμα αυτό, βρίσκουμε γραφικά τα ζητούμενα μεγέθη που αντιστοιχούν στο σημείο Q.

$$V_{CE} = 7\text{V}, I_C = 2.6 \text{ mA}, I_C R_C = 8\text{V} \text{ και } I_E \cong 2.6 \text{ mA}.$$

### ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

- 1-1.** Τι εννοούμε με τον όρο “πόλωση”; Πώς επιτυγχάνεται γενικά αυτή;
- 1-2.** Να σχεδιάσετε ένα κύκλωμα σταθερής πόλωσης CE.
- 1-3.** Να σχεδιάσετε ένα κύκλωμα πόλωσης ανεξάρτητο του  $\beta_0$  του τρανζίστορ.
- 1-4.** Να θεωρήσετε ως γνωστά, όσα μεγέθη σας χρειάζονται και να χαράξετε μια ευθεία φόρτου πάνω στις χαρακτηριστικές συλλέκτη ενός τυπικού τρανζίστορ.
- 1-5.** Με βάση την προηγούμενη ερώτηση, να προσδιορίσετε το κατάλληλο σημείο η-ρεμίας Q για τη σωστή λειτουργία του τρανζίστορ.
- 1-6.** Να εξηγήσετε τον τρόπο με τον οποίο η θέση του σημείου ηρεμίας Q σχετίζεται με την παραμόρφωση.