

1. Να περιγράφετε την αρχή λειτουργίας των μετατροπέων D/A.
2. Να ορίζετε τα κύρια χαρακτηριστικά των μετατροπέων D/A και να επιλέγετε τον μετατροπέα D/A με τις κατάλληλες προδιαγραφές ανάλογα με την εφαρμογή.
3. Να σχεδιάζετε μετατροπείς D/A τύπου R/2R.
4. Να μπορείτε να μελετάτε τα data sheets των μετατροπέων D/A σε ολοκληρωμένο κύκλωμα.
5. Να μπορείτε να χρησιμοποιείτε σε μία εφαρμογή μετατροπέα D/A σε ολοκληρωμένο κύκλωμα.
6. Να περιγράφετε την αρχή λειτουργίας των μετατροπέων A/D.
7. Να περιγράφετε τις αρχές της κβάντισης και της δειγματοληψίας.
8. Να ορίζετε τα κύρια χαρακτηριστικά των μετατροπέων A/D και να επιλέγετε τον A/D με τις κατάλληλες προδιαγραφές ανάλογα με την εφαρμογή.
9. Να μπορείτε να μελετάτε τα data sheets O.K. μετατροπέων A/D.
10. Να μπορείτε να χρησιμοποιείτε σε μία εφαρμογή O.K. μετατροπέων A/D.

# 11

## κεφάλαιο

ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ D/A ΚΑΙ A/D

## 11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων δόθηκε η δυνατότητα της ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων τα οποία αναπαριστούν φυσικές παραμέτρους (μεγέθη) όπως θερμοκρασία, πίεση, κλπ. Συστήματα ελέγχου (control systems) και συλλογής δεδομένων (data acquisition), τα οποία βασίζονται σε αναλογικά ηλεκτρονικά, αντικαθίστανται σε μεγάλο βαθμό από ψηφιακά συστήματα (digital systems).

Τα αναλογικά συστήματα (analog systems) χαρακτηρίζονται από το ότι τα σήματα τα οποία αναπαριστούν κάποια φυσική ποσότητα μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή σε μια περιοχή τιμών. Στα ψηφιακά συστήματα (digital systems), τα σήματα τα οποία αναπαριστούν κάποια φυσική ποσότητα εκφράζονται με αριθμούς περιορισμένου μεγέθους και επομένως μπορούν να πάρουν μόνο συγκεκριμένες τιμές σε μια περιοχή τιμών. Ένα παράδειγμα αναλογικού συστήματος αποτελεί ένα μονοπάτι σε ένα ύψωμα, όπου υπάρχει άπειρος αριθμός σημείων που μπορεί κανείς να πατήσει για να ανέβει. Αντίθετα, μια σκάλα είναι ένα ψηφιακό διακριτό σύστημα, αφού υπάρχει συγκεκριμένος αριθμός θέσεων που μπορεί κανείς να πατήσει.

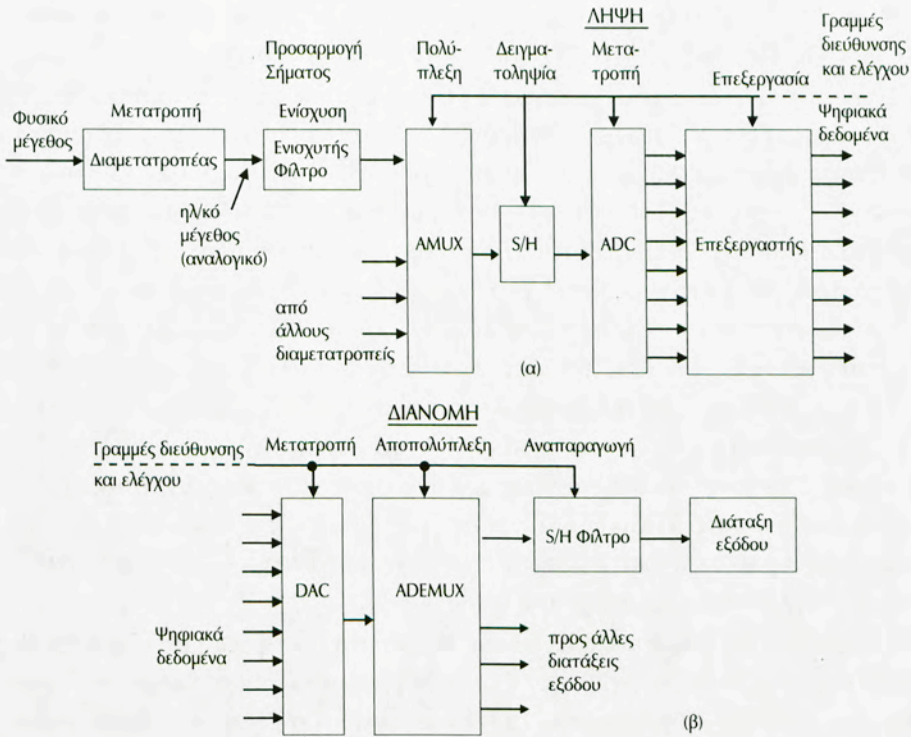
Στα ψηφιακά συστήματα δύο είναι τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα για τη μετατροπή των σημάτων από αναλογικά σε ψηφιακά και αντίστροφα, ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter ή ADC ή A/D) και ο μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (Digital to Analog Converter ή DAC ή D/A). Οι τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (digital signal processing) βασίζονται σε υπολογιστικά συστήματα και δίνουν επιδόσεις οι οποίες είναι δύσκολο ή αδύνατο να προσεγγισθούν με τα αναλογικά συστήματα με αποτέλεσμα τα ψηφιακά συστήματα να εκτοπίζουν τα αναλογικά με γοργούς ρυθμούς. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ραγδαία επικράτηση του CD για την αναπαραγωγή ήχου, συγκριτικά με τα αναλογικά συστήματα των μαγνητοφώνων και των δίσκων “πικάπ”.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τους μετατροπείς A/D και D/A, τα βασικά τους χαρακτηριστικά, τα κυκλώματα με τα οποία υλοποιούνται οι πιο συνηθισμένοι τύποι, καθώς και τις βασικές αρχές σχεδιασμού των ψηφιακών συστημάτων ελέγχου και συλλογής-επεξεργασίας δεδομένων.

## 11.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΗΨΗΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το Σχήμα 11.2.1.(α) αναπαριστά ένα σύστημα λήψης και επεξεργασίας δεδομένων (data acquisition and signal processing). Οι μετατροπείς A/D και D/A αποτελούν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα με τα οποία συνήθως γίνεται η διασύνδεση (interface)

του αναλογικού φυσικού κόσμου και ενός ψηφιακού συστήματος. Η φυσική παράμετρος (ποσότητα) η οποία θέλουμε να μετρηθεί (για παράδειγμα η θερμοκρασία του περιβάλλοντος) θα πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε ένα αναλογικό ηλεκτρικό μέγεθος (ρεύμα ή τάση). Αυτή η μετατροπή γίνεται με το διαμετατροπέα (transducer) ο οποίος συνήθως περιέχει έναν αισθητήρα (sensor) και τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα.



**Σχήμα 11.2.1** (α) Σύστημα λήψης και επεξεργασίας δεδομένων  
 (β) Σύστημα επεξεργασίας και διανομής δεδομένων

Ο αισθητήρας είναι συνήθως ένα στοιχείο του οποίου μεταβάλλεται κάποιο από τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά (ηλεκτρική αντίσταση, χωρητικότητα, αυτεπαγωγή) με τη μεταβολή κάποιου φυσικού μεγέθους (πίεση, θερμοκρασία, υγρασία κλπ.). Αισθητήρες για τη μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία και παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα ανάλογα με την εφαρμογή. Παραδείγματα αισθητήρων αποτελούν τα φωτοκύτταρα (photocells), οι φωτοδίοδοι (photodiodes), τα thermistors, τα θερμοζεύγη (thermocouples), τα μικρόφωνα (microphones).

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του παραδείγματός μας χρησιμοποιείται αισθητήρας πλατίνας του οποίου η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Με την χρησιμοποίηση κατάλληλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων κατασκευάζεται διαμετροπέας με τον οποίο η μεταβολή της αντίστασης του αισθητήρα μετατρέπεται σε μεταβολή ηλεκτρικής τάσης (ή ρεύματος). Η έξοδος του διαμετατροπέα είναι στο παράδειγμά μας μια αναλογική τάση ανάλογη της θερμοκρασίας. Αν η θερμοκρασία μεταβάλλεται από τους  $0^{\circ}\text{C}$  έως τους  $40^{\circ}\text{C}$ , η αντίσταση του αισθητήρα θα μεταβάλλεται από  $500\Omega$  μέχρι  $1500\Omega$  και η έξοδος του διαμετατροπέα θα είναι μια τάση από  $0\text{-}50\text{ mV}$ .

Το επόμενο στάδιο του συστήματος συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων είναι τα ηλεκτρονικά κυκλώματα προσαρμογής του σήματος (signal conditioning) του διαμετατροπέα. Με τα κυκλώματα προσαρμογής τα χαρακτηριστικά του αναλογικού σήματος εξόδου του διαμετατροπέα (εύρος πλάτους, περιοχή συχνοτήτων κλπ.) προσαρμόζονται στα χαρακτηριστικά του σήματος που μπορεί να μετατρέψει ο μετατροπέας A/D. Για παράδειγμα η περιοχή της τάσης που μπορεί να μετατρέψει ένας μετατροπέας A/D είναι σταθερή και εξαρτάται από τον κατασκευαστή του Ο.Κ. του μετατροπέα A/D. Στο παράδειγμά μας ο μετατροπέας A/D μετατρέπει τάσεις στην περιοχή από  $0\text{-}5\text{V}$ . Το κύκλωμα προσαρμογής θα πρέπει να ενισχύσει το σήμα εξόδου του διαμετατροπέα επί 100, ώστε να ταιριάζει με την περιοχή των τάσεων που ο μετατροπέας A/D μπορεί να μετατρέψει. Συνήθως το κύκλωμα προσαρμογής περιλαμβάνει και ένα φίλτρο απόρριψης υψηλών συχνοτήτων, το οποίο έχει επικρατήσει να ονομάζεται φίλτρο αποφυγής αναδίπλωσης (anti-aliasing filter).

Το επόμενο στάδιο είναι ο **αναλογικός πολυπλέκτης (analog multiplexer AMUX)** σήματος. Η λειτουργία του είναι παρόμοια με αυτήν του ψηφιακού πολυπλέκτη με τη διαφορά ότι τα σήματα είναι αναλογικά και παίρνουν οποιαδήποτε τιμή σε μία περιοχή τιμών. Με την εφαρμογή της διεύθυνσης επιλογής καναλιού του πολυπλέκτη επιλέγουμε ένα μόνο από τα σήματα εισόδου να εμφανιστεί στην έξοδό του και να ψηφιοποιηθεί από τον μετατροπέα A/D. Χρησιμοποιείται για να αυξήσουμε τον αριθμό των αναλογικών εισόδων τις οποίες μπορούμε να ψηφιοποιήσουμε με ένα μετατροπέα A/D.

Το επόμενο στάδιο είναι το κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης (Sample and Hold - S/H). Το κύκλωμα S/H μπορούμε να το φανταστούμε σαν ένα πυκνωτή του οποίου το ένα άκρο είναι σταθερά συνδεδεμένο στη γείωση του συστήματος, ενώ το άλλο του άκρο συνδέεται τότε στο αναλογικό σήμα που θα ψηφιοποιηθεί και τότε στην είσοδο του μετατροπέα A/D. Το αποτέλεσμα αυτής της μεταγωγής είναι ο μετατροπέας A/D να έχει στην είσοδό του πάντα ένα αναλογικό σήμα που δεν μεταβάλλεται και που **αντιπροσωπεύει** το αναλογικό σήμα που θέλουμε να ψηφιοποιηθεί σε κάποια χρονική στιγμή.

Ο μετατροπέας A/D στην είσοδό του δέχεται ένα αναλογικό σήμα και στην έξοδο του παράγει ένα ψηφιακό σήμα, δηλαδή μία ψηφιακή λέξη. Η ψηφιακή λέξη που παράγεται αποτελείται πάντα από ένα συγκεκριμένο αριθμό bits. Ο αριθμός των bits κατά τη μετατροπή, το πλάτος του εφαρμοζόμενου αναλογικού σήματος, καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος για τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό αποτελούν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός μετατροπέα A/D.

Στη συνέχεια ο επεξεργαστής του συστήματος θα επεξεργαστεί ή/και θα αποθηκεύσει τα ψηφιακά δεδομένα, ανάλογα με το πρόγραμμα λειτουργίας του. Σε πολλές περιπτώσεις, κυρίως συστημάτων ελέγχου, ψηφιακά δεδομένα χρησιμοποιούνται από τον επεξεργαστή με μία ακριβώς συμμετρική διαδικασία παραγωγής ψηφιακού σήματος σε αναλογικό. Το Σχήμα 11.2.1.(β) δείχνει τα διάφορα τμήματα ενός συστήματος διανομής σήματος σε διατάξεις εξόδου, το οποίο έχει μετατραπεί από ψηφιακό σε αναλογικό. Οι διατάξεις εξόδου, συνήθως, ελέγχουν διαδικασίες, όπως η λειτουργία κινητήρων, η παραγωγή κυματομορφών κλπ.

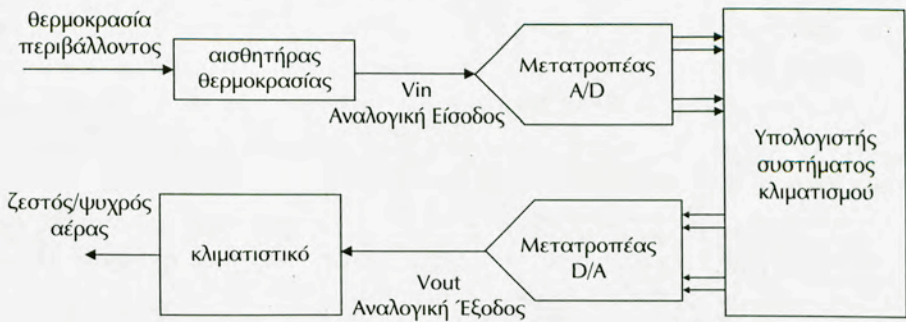
Το πρώτο στάδιο μετά τη μετατροπή του σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό είναι ο αναλογικός αποπολυπλέκτης (Analog DEMUltiplexer - ADEMUX), ο οποίος μεταφέρει στην επιλεγμένη έξοδο το σήμα του μετατροπέα D/A. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να ελέγξουμε περισσότερες από μία διατάξεις με έναν μόνο μετατροπέα D/A.

Το επόμενο στάδιο είναι το κύκλωμα S/H με το οποίο η αναλογική έξοδος του παραμένει σταθερή για το χρονικό διάστημα που η έξοδος του μετατροπέα D/A δεν έχει ακόμη σταθεροποιηθεί. Χρησιμοποιούμε στη συνέχεια κυκλώματα προσαρμόγής σήματος με τα οποία τα χαρακτηριστικά του σήματος εξόδου προσαρμόζονται σ' αυτά της διάταξης εξόδου την οποία θα οδηγήσουν. Συνήθως το κύκλωμα προσαρμόγής περιλαμβάνει και ένα φίλτρο απόρριψης υψηλών συχνοτήτων (που οφείλονται στην μετατροπή D/A), το οποίο έχει επικρατήσει να ονομάζεται φίλτρο ανακατασκευής (reconstruction filter).

### Παράδειγμα

Στο Σχήμα 11.2.1.(α) το σύστημα λήψης και επεξεργασίας δεν φαίνεται να συνδέεται άμεσα με το Σχήμα 11.2.1.(β) του συστήματος επεξεργασίας και διανομής. Συνήθως, σε ένα μεγάλο πλήθος συστημάτων ελέγχου τα δύο συστήματα συνδυάζονται σε ένα, με την χρήση ενός κοινού υπολογιστικού συστήματος και ονομάζονται **συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου (closed loop control systems)**. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ένα σύστημα κλιματισμού ενός χώρου. Το σύστημα αυτό μετρά τη θερμοκρασία με τη χρήση κατάλληλου αισθητήρα. Η αναλογική έξοδος του συστήματος είναι ανάλογη της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια γίνεται ψηφιοποίηση του σήματος εξόδου του αισθητήρα με τη χρήση ενός μετατροπέα A/D και η μέτρηση της θερμοκρασίας αναπαρίσταται πλέον ψηφιακά ως ένας δυαδικός αριθμός.

Η ψηφιακή τιμή της θερμοκρασίας μπορεί να επεξεργαστεί από ένα υπολογιστικό σύστημα με βάση ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα λειτουργίας. Σύμφωνα με το πρόγραμμα αυτό η θερμοκρασία του χώρου συγκρίνεται με δύο τιμές οι οποίες έχουν δοθεί από το χρήστη και έχουν αποθηκευθεί στη μνήμη του υπολογιστή. Η μία θερμοκρασία ορίζει την ελάχιστη θερμοκρασία και η δεύτερη τη μέγιστη θερμοκρασία που θέλουμε να έχει ο κλιματιζόμενος χώρος. Αν η θερμοκρασία του χώρου είναι μικρότερη από την ελάχιστη επιθυμητή, τότε θα πρέπει να ξεκινήσει η διαδικασία θέρμανσης του χώρου, ενώ αν είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιθυμητή, τότε θα πρέπει να ξεκινήσει η διαδικασία ψύξης. Το σύστημά μας για τον έλεγχο των διαδικασιών διαθέτει μετατροπείς D/A οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα με τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Ο υπολογιστής του συστήματος δίνει τα κατάλληλα ψηφιακά δεδομένα στους μετατροπείς D/A, ώστε ανάλογα με τη μετρούμενη θερμοκρασία να ενεργοποιείται η κατάλληλη διαδικασία (θέρμανση ή ψύξη) και στην κατάλληλη ένταση. Σ' αυτό το παράδειγμα γίνεται κατανοητό ότι το σύστημά μας μετρά συνεχώς το αποτέλεσμα των διαδικασιών τις οποίες ελέγχει (ή όπως συνήθως λέγεται υπάρχει ανατροφοδότηση (feedback) από το ελεγχόμενο σύστημα). Στο Σχήμα 11.2.2 φαίνεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας.



**Σχήμα 11.2.2.** Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας

## 11.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ D/A

Ένας μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (D/A ή DAC) δέχεται στις ψηφιακές εισόδους του μία ψηφιακή λέξη και παράγει στην αναλογική του έξοδο μία ανάλογη προς τις εισόδους τάση ή ρεύμα.

Στο σχήμα 11.3.1 δίνονται οι εισόδους και η έξοδος ενός μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό. Στις  $N$  ψηφιακές εισόδους τοποθετούμε τα δυαδικά ψηφία ενός αριθμού και στην έξοδο παίρνουμε μία τάση (ή ρεύμα) ανάλογη αυτού του αριθμού.



Σχήμα 11.3.1 Μετατροπέας D/A

Η τάση εξόδου του μετατροπέα D/A γράφεται ως το δεκαδικό ισοδύναμο του αριθμού που εφαρμόζεται σε δυαδική μορφή στις N ψηφιακές εισόδους:

$$V_{out} = V_{mes} \times (b_0 \cdot 2^0 + b_1 \cdot 2^1 + b_2 \cdot 2^2 + \dots + b_{N-1} \cdot 2^{N-1}) \quad (11.2.1)$$

Στη σχέση αυτή η τάση εξόδου  $V_{out}$  είναι ανάλογη του δυαδικού αριθμού  $b_{N-1} \dots b_2 b_1 b_0$  που εφαρμόζεται στις εισόδους του μετατροπέα και για αυτό το λόγο ο μετατροπέας ονομάζεται γραμμικός.

Ο όρος  $V_{mes}$  είναι η **ελάχιστη μεταβολή της αναλογικής τάσης εξόδου** λόγω της αλλαγής της ψηφιακής εισόδου κατά το λιγότερο σημαντικό bit (LSB) και ονομάζεται **ανάλυση μέτρησης του μετατροπέα D/A**. Η ανάλυση μέτρησης υπολογίζεται από τη σχέση (11.2.1) θέτοντας  $b_{N-1} \dots b_2 b_1 b_0 = 1 \dots 111$ :

$$V_{mes} = \frac{\Delta V}{2^N - 1} \quad (11.2.2)$$

όπου  $\Delta V$  είναι η διαφορά μέγιστης από ελάχιστη τάση λειτουργίας του μετατροπέα και N είναι ο αριθμός των bits του μετατροπέα.

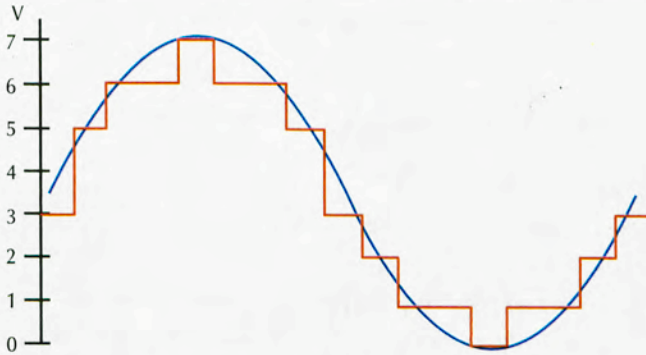
### Παράδειγμα 1

Έστω ότι έχουμε ένα μετατροπέα D/A των τριών bits με ανάλυση μέτρησης 1 V και η περιοχή τάσης λειτουργίας του είναι από 0 V έως 7 V. Θα δώσουμε τις διαφορετικές τάσεις εξόδου του D/A για όλες τις δυνατές ψηφιακές λέξεις. Για κάθε συνδυασμό των τριών bits εφαρμόζουμε τη σχέση 11.2.1, οπότε προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

b2	b1	b0	Vout (V)
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω μετατροπέα D/A μπορεί να παραχθεί μία αναλογική (ημιτονοειδής) κυματομορφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.3.2.

Ψηφιακές λέξεις	011	101	110	110	111	110	110	101	001	010	001	001	000	001	001	010	011
Vout (V)	3	5	6	6	7	6	6	5	3	2	1	1	0	1	1	2	3



**Σχήμα 11.3.2** Παραγωγή αναλογικού σήματος με μετατροπέα D/A

### Παράδειγμα 2

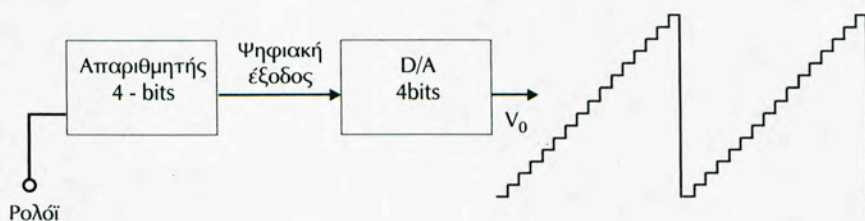
Έστω ότι έχουμε ένα μετατροπέα D/A των τεσσάρων bits ο οποίος όταν η δυαδική του είσοδος μεταβάλλεται κατά ένα LSB η τάση εξόδου του μεταβάλλεται κατά 0.1 V. Ποια είναι η αναλογική του έξοδος για την ψηφιακή είσοδο 1011;

Η ανάλυση μέτρησης του D/A είναι 0.1 V. Σύμφωνα με τη σχέση 11.2.1, η αναλογική του έξοδος θα είναι:

$$V_{out} = 0.1V \times (1 \times 1 + 1 \times 2 + 0 \times 4 + 1 \times 8) = 1.1 V.$$

### Παράδειγμα 3

Στο Σχήμα 11.3.3 φαίνεται η τάση εξόδου ενός μετατροπέα D/A των τεσσάρων bits με ελάχιστη μεταβολή της αναλογικής τάσης εξόδου 0.1 V, ο οποίος δέχεται στις ψηφιακές εισόδους του τις εξόδους ενός δυαδικού απαριθμητή των 4 bits. Καθώς ο απαριθμητής απαριθμεί τους παλμούς του ρολογιού, οι έξοδοί του θα ξεκινήσουν από την τιμή 0000 και θα φθάσουν έως την τιμή 1111 και ξανά από την αρχή. Η έξοδος του μετατροπέα D/A θα είναι μία κλιμακωτή τάση της οποίας τα «σκαλοπάτια» θα είναι 0.1 V. Όταν ο απαριθμητής φτάσει στην μέγιστη τιμή του 1111, τότε η έξοδος του μετατροπέα D/A θα είναι 1.5 V (σχέση 11.2.1). Αυτή η τιμή είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να δώσει στην έξοδό του ο συγκεκριμένος μετατροπέας D/A. Στη συνέχεια ο απαριθμητής επιστρέφει στην τιμή 0000 και η έξοδος του D/A στα 0 V και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 11.3.3 Παραγωγή κλιμάκωτης τάσης με μετατροπέα D/A

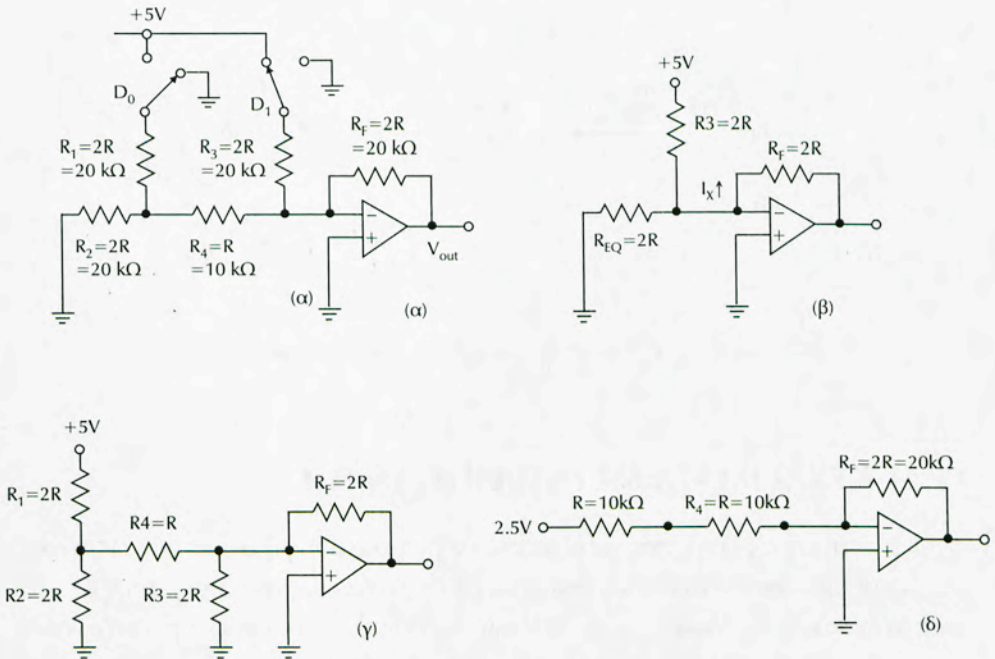
## 11.4 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ D/A

Οι μετατροπείς D/A υπάρχουν σε ολοκληρωμένη μορφή και σε μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών. Για να κατανοήσουμε όμως τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τις βασικές αρχές λειτουργίας τους είναι απαραίτητο να αναλύσουμε τον τρόπο κατασκευής των μετατροπέων D/A.

### 11.4.1 Μετατροπέας D/A τύπου R/2R

Στο Σχήμα 11.4.1 φαίνεται το κύκλωμα ενός μετατροπέα D/A τύπου R/2R των δύο bits, αποτελούμενο από ένα τελεστικό ενισχυτή (TE) και αντιστάσεις δύο τιμών  $R=10K\Omega$  και  $2R=20K\Omega$ .

Για να αναλύσουμε το κύκλωμα αυτού του σχήματος θα θυμίσουμε μερικά σημαντικά στοιχεία για τους TE. Ένας TE έχει πολύ μεγάλο κέρδος (gain), συνήθως περισσότερο από 100000, μικρή αντίσταση εξόδου και μεγάλη αντίσταση εισόδου και συμβολίζεται με ένα τρίγωνο. Έχει δύο εισόδους: την είσοδο αναστροφής φάσης, που συμβολίζεται με πλην (-) στο τρίγωνο, και την είσοδο μη αντιστροφής φάσης που συμβολίζεται με συν (+). Το σημαντικότερο που πρέπει να θυμάται κανείς για τους TE είναι ότι: όταν ένα μέρος της τάσης εξόδου επιστρέφει στην είσοδο αναστροφής (ή όπως έχει επικρατήσει ανατροφοδοτείται στην αναστρέφουσα είσοδο (αρνητική ανατροφοδότηση negative feedback), τότε οι δύο εισοδοί θα βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό (ή ισοδύναμα η διαφορά δυναμικού μεταξύ τους θα είναι 0). Η έξοδος του TE θα δώσει ή θα τραβήξει την απαραίτητη ποσότητα ρεύματος έτσι ώστε οι δύο τάσεις να διατηρηθούν ίσες. Στο κύκλωμα του Σχήματος 11.4.1.(α) μη αναστρέφουσα είσοδος είναι γειωμένη, συνεπώς η αναστρέφουσα είσοδος διατηρείται στα 0V. Επειδή αυτή η είσοδος δεν είναι στην πραγματικότητα γειωμένη, για αυτό η κατάσταση αυτή ονομάζεται εικονική γη (virtual ground).



**Σχήμα 11.4.1** Μετατροπές D/A τύπου R/2R

- (α) Πλήρες σχηματικό διάγραμμα, (β) ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης του D1 είναι στα 5V  
 (γ) ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης του D0 είναι στα 5V  
 (δ) ισοδύναμο κατά Thevenin κύκλωμα όταν ο διακόπτης του D0 είναι στα 5V

Υποθέτουμε ότι όλοι οι διακόπτες αρχικά βρίσκονται στην γη. Στη συνέχεια ο διακόπτης D1 που αντιστοιχεί στο περισσότερο σημαντικό bit, συνδέεται στα 5V. Η τάση αυτή ονομάζεται **τάση αναφοράς (reference voltage)**. Ο διακόπτης D0 παραμένει συνδεδεμένος στη γη. Τότε, οι αντιστάσεις R1 και R2 είναι συνδεδεμένες παράλληλα και ισοδυναμούν με μία αντίσταση R. Αυτή η αντίσταση R και η αντίσταση R4 που είναι σε σειρά ισοδυναμούν με μία αντίσταση 2R, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.4.1.(β). Λόγω της εικονικής γης, τα άκρα αυτής της αντίστασης 2R έχουν δυναμικό μηδέν και επομένως κανένα ρεύμα δεν τη διαρρέει (την αγνοούμε). Η τάση των 5V στην άκρη της αντίστασης R3 = 20 kΩ παράγει ρεύμα 0.25 mA, που διαρρέει την R<sub>f</sub> = 20 kΩ (λόγω του ότι η αντίσταση εισόδου του ΤΕ είναι πολύ μεγάλη, επομένως το ρεύμα «προτιμά» τη διαδρομή με τη μικρότερη αντίσταση). Η τάση εξόδου που παράγεται από το περισσότερο σημαντικό bit θα είναι:

$$V_o = -I_x R_f = -0.25 \text{mA} \times 20 \text{k}\Omega = -5\text{V}$$

Για να βρούμε την τάση που παράγεται από το λιγότερο σημαντικό bit, γειώνουμε ξανά τον διακόπτη D1 και συνδέουμε τον διακόπτη D0 στα 5V, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.4.1.(γ).

Το κύκλωμα απλοποιείται με το ισοδύναμο κατά Thevenin κύκλωμα του διαιρέτη τάσης που σχηματίζεται από την αντίσταση R1 και την αντίσταση R2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.4.1.(δ).

Σύμφωνα με το θεώρημα του Thevenin ένα κύκλωμα μπορεί να αντικατασταθεί από μία πηγή και μία αντίσταση σε σειρά. Η αντίσταση Thevenin προκύπτει αν υποθετικά βραχυκυκλώσουμε όλες τις πηγές τάσης. Η τάση Thevenin προκύπτει ως η τάση στον κόμβο όπου το κύκλωμα συνδέεται με άλλα κυκλώματα. Η τάση Thevenin είναι ακριβώς η τάση στον κόμβο, δηλαδή  $5V/2 = 2.5 V$ , επειδή έχουμε δύο ίσες αντιστάσεις. Η αντίσταση Thevenin ισούται με την τιμή των δύο αντιστάσεων σε παράλληλη σύνδεση, δηλαδή με R. Η R3 μπορεί να αγνοηθεί, γιατί και τα δύο άκρα της είναι γειωμένα. Η ολική αντίσταση μεταξύ της αναστρέφουσας εισόδου του TE και της ισοδύναμης τάσης κατά Thevenin των 2.5 V είναι 2R, δηλαδή 20KΩ. Το ρεύμα προς την αναστρέφουσα είσοδο θα είναι 0.125 mA. Το ρεύμα αυτό (λόγω της υψηλής αντίστασης εισόδου του TE) διέρχεται από την αντίσταση ανάδρασης  $R_f = 20K\Omega$  και παράγει μία τάση εξόδου -2.5 V.

Για οποιοδήποτε συνδυασμό των διακοπών μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση εξόδου, απλά αθροίζοντας τις τάσεις που προκύπτουν για τον κάθε ένα διακόπτη. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός D1D0=11 δίνει σαν αποτέλεσμα τάση εξόδου:

$$V_o = (-5.0 - 2.5)V = -7.5V$$

Γενικά η μαθηματική έκφραση της τάσης εξόδου σε συνάρτηση με την ψηφιακή λέξη D1D0 που εφαρμόζουμε είναι:

$$V_o = -R_f \times (D1/2R + D0/4R) \times 5V = -5V \times (D1 + D0/2) = -2.5V \times (D0 \times 2^0 + D1 \times 2^1) \quad (11.4.1)$$

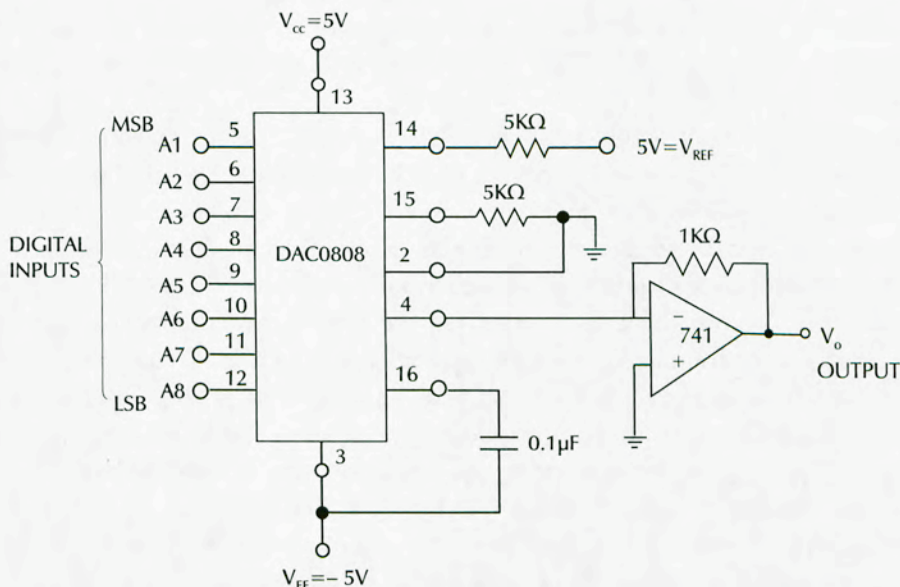
Συγκρίνοντας τις σχέσεις 11.2.1. και 11.4.1, παρατηρούμε ότι η ελάχιστη μεταβολή της αναλογικής τάσης εξόδου του μετατροπέα D/A είναι 2.5V.

Σήμερα οι κατασκευαστές των μετατροπέων D/A χρησιμοποιούν, αντί για αντιστάσεις, δικτυώματα πυκνωτών. Η λογική λειτουργίας τους όμως παραμένει ίδια με αυτήν που περιγράψαμε παραπάνω.

## 11.4.2 Μετατροπέας D/A σε ολοκληρωμένο κύκλωμα

Οι μετατροπείς D/A στο εμπόριο υπάρχουν σε μια μεγάλη ποικιλία ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (αριθμός bits, μέγιστη τάση εξόδου, διακριτική ικανότητα, ταχύτητα κλπ.) καθώς και του κώδικα για την είσοδο των ψηφιακών δεδομένων (δυαδικό, συμπλήρωμα ως προς δύο, BCD κλπ.).

Ένας κοινός μετατροπέας D/A των 8 bits είναι ο DAC0808 της εταιρίας National Semiconductors, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 11.4.2. Η αναλογική έξοδος του DAC0808 είναι ρεύμα και όχι τάση και για το λόγο αυτό συνδέουμε εξωτερικά τον TE 741 με την αντίσταση ανάδρασης  $R_f = 5K\Omega$  για τη μετατροπή της εξόδου του σε τάση.



Σχήμα 11.4.2 Μετατροπέας D/A σε Ο.Κ.

Η τάση εξόδου  $V_o$  δίνεται από την εξίσωση:

$$V_o = (V_{REF}/R_{REF}) \times R_F (A1/2 + A2/4 + A3/8 + A4/16 + A5/32 + A6/64 + A7/128 + A8/256) \quad (11.4.2)$$

Το A1 είναι το MSB και το A8 το LSB. Η τάση αναφοράς  $V_{REF}$  τοποθετείται εξωτερικά στα 5V, ενώ αρκετοί μετατροπείς D/A την παράγουν εσωτερικά στο Ο.Κ. Επίσης, σε αρκετά Ο.Κ. μετατροπέων D/A, ο Τ.Ε. κατασκευάζεται στο εσωτερικό του Ο.Κ. και η έξοδός τους είναι σε τάση.

## 11.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ D/A

Η επιλογή ενός μετατροπέα D/A σε ολοκληρωμένη μορφή γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά τα οποία απαιτούνται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μετατροπέων D/A είναι:

✓ **Διακριτική ικανότητα (resolution).** Είναι ο αριθμός των bits της λέξης εισόδου που χρησιμοποιεί ο μετατροπέας D/A για την παραγωγή του αναλογικού σήματος στην έξοδό του. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική του ικανότητα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των υποδιαιρέσεων της περιοχής τάσης λειτουργίας του και επομένως τόσο μικρότερο το βήμα ("σκαλοπάτι") της τάσης που μπορεί να παράγει. Φυσικά, το κόστος αυξάνεται με τον αριθμό των bits και επιλέγουμε πάντα τον μετατροπέα D/A με τη διακριτική ικανότητα που ταιριάζει στην εφαρμογή. Για παράδειγμα ένας μετατροπέας των 8 bits έχει διακριτική ικανότητα

8 bits, οπότε ο αριθμός των υποδιαιρέσεων της περιοχής τάσης λειτουργίας του είναι  $256 (2^8)$  και το βήμα (“σκαλοπάτι”) της τάσης που μπορεί να παράγει είναι  $1/256$  της περιοχής τάσης λειτουργίας του. Η διακριτική ικανότητα των D/A σε O.K. κυμαίνεται από 6 bits έως 20 bits.

✓ **Ακρίβεια (accuracy).** Με τον όρο αυτό εννοούμε τη διαφορά της πραγματικής εξόδου από την ιδανική. Η ακρίβεια καθορίζεται ως ένα ποσοστό της περιοχής τάσης λειτουργίας (Full Scale Range - FSR) του μετατροπέα D/A. Αν ένας μετατροπέας D/A έχει περιοχή τάσης λειτουργίας 10 V (για παράδειγμα από 0 V έως 10 V ή από -5 V έως +5 V) και ακρίβεια 0.2% της περιοχής τάσης λειτουργίας, τότε το μέγιστο σφάλμα για οποιαδήποτε έξοδο θα είναι 20 mV ( $= 10V \times 0.2/100$ ). Αυτό σημαίνει ότι για οποιαδήποτε τάση εξόδου μπορεί να έχουμε ένα σφάλμα  $\pm 20$  mV.

✓ **Χρόνος αποκατάστασης (Settling time).** Ορίζεται ως ο χρόνος από τη στιγμή που εφαρμόζεται στις εισόδους του μετατροπέα D/A μία ψηφιακή λέξη μέχρι την εμφάνιση της αντίστοιχης αναλογικής εξόδου του. Ο χρόνος αποκατάστασης αποτελεί ένα μέτρο της ταχύτητας ενός μετατροπέα D/A. Ο χρόνος αποκατάστασης των D/A σε O.K. κυμαίνεται από  $\mu\text{sec}$  έως nsec.

## 11.6 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ A/D

Ένας μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D ή ADC) δέχεται στην αναλογική του είσοδο μία αναλογική τάση και παράγει στις ψηφιακές του εξόδους έναν δυαδικό αριθμό ανάλογο της τάσης εισόδου.

Στις προηγούμενες παραγράφους αναλύσαμε πώς με τους μετατροπείς D/A μία ψηφιακή λέξη μετατρέπεται σε τάση ή ρεύμα. Στις επόμενες παραγράφους θα μελετήσουμε την αντίστροφη διαδικασία από αυτήν των μετατροπέων D/A, της μετατροπής μιας αναλογικής τάσης στην ψηφιακή λέξη που την αντιπροσωπεύει καλύτερα.



Σχήμα 11.6.1 Μετατροπέας A/D

Στο σχήμα 11.6.1 δίνονται η είσοδος και οι εξοδοι ενός μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Στην είσοδο του μετατροπέα A/D τοποθετούμε την αναλογική τάση και στις N ψηφιακές εξόδους παίρνουμε έναν αριθμό ανάλογο της τάσης εισόδου. Για κάθε σταθερή τάση εισόδου  $V_{in}$ , έχουμε στις ψηφιακές εξόδους μετά τη μετατροπή ένα δυαδικό αριθμό, ώστε να ισχύει για το δεκαδικό του ισοδύναμο η σχέση:

$$V_{in} = q \times (b_0 \times 2^0 + b_1 \times 2^1 + b_2 \times 2^2 + \dots + b_{N-1} \times 2^{N-1}) \quad (11.6.1)$$

Ο όρος  $q$  εκφράζει την **ελάχιστη μεταβολή της αναλογικής τάσης εισόδου** η οποία μετατρέπεται σε μεταβολή του λιγότερο σημαντικού bit (LSB) και ονομάζεται **βήμα κβάντισης (quantisation step) του μετατροπέα A/D**. Το βήμα κβάντισης υπολογίζεται από τη σχέση (11.6.1) θέτοντας  $b_{N-1} \dots b_2 b_1 b_0 = 1 \dots 111$ :

$$q = \frac{\Delta V}{2^N - 1} \quad (11.6.2)$$

όπου  $\Delta V$  είναι η διαφορά μέγιστης από ελάχιστη τάση λειτουργίας του μετατροπέα και  $N$  είναι ο αριθμός των bits του μετατροπέα.

Εκτός από την αναλογική είσοδο της τάσης και τις ψηφιακές εξόδους της μετατροπής, υπάρχει μία ψηφιακή είσοδος έναρξης της μετατροπής (Start Of Conversion - SOC) και μία ψηφιακή έξοδος λήξης της μετατροπής (End Of Conversion - EOC). Η είσοδος SOC είναι είσοδος ελέγχου, με την ενεργοποίηση της οποίας ξεκινά η διαδικασία μετατροπής του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό. Συνήθως στους περισσότερους μετατροπείς A/D η ενεργοποίηση γίνεται με την εφαρμογή ενός παλμού σ' αυτήν την είσοδο.

### Παράδειγμα

Έστω ότι έχουμε ένα μετατροπέα A/D των τεσσάρων bits, στον οποίο όταν η τάση εισόδου του μεταβάλλεται κατά 0.1 V η ψηφιακή λέξη της εξόδου του μεταβάλλεται κατά ένα LSB. Ποια είναι η ψηφιακή έξοδος για αναλογική είσοδο 1.1 V; Ποια είναι η ψηφιακή έξοδος για αναλογική είσοδο 1.03 V;

Το βήμα κβάντισης του μετατροπέα A/D είναι 0.1 V. Σύμφωνα με τη σχέση 11.6.1, για είσοδο 1.1 V, το πηλίκο της διαίρεσης της τάσης εισόδου διά του βήματος κβάντισης είναι  $1.1V/0.1V = 11$  που αντιστοιχεί στον δυαδικό  $b_3b_2b_1b_0 = 1011$  και ο οποίος αποτελεί την έξοδο του A/D μετατροπέα.

Για είσοδο 1.03 V, το πηλίκο της διαίρεσης της τάσης εισόδου διά του βήματος κβάντισης είναι  $1.03V/0.1V = 10.3$ . Ο πλησιέστερος ακέραιος του 10.3 είναι ο 10 που αντιστοιχεί στον δυαδικό  $b_3b_2b_1b_0 = 1010$ , ο οποίος είναι το αποτέλεσμα στην έξοδο του A/D μετατροπέα.

Βλέπουμε πως το σφάλμα της μετατροπής για την πρώτη περίπτωση είναι 0V, ενώ για τη δεύτερη περίπτωση είναι -0.03V.

## 11.7 ΚΒΑΝΤΙΣΗ ΚΑΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

Θα αναλύσουμε δύο βασικά θέματα τα οποία είναι αναπόσπαστα από τη διαδικασία της μετατροπής ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, την κβάντιση και την δειγματοληψία σήματος.

Ένα αναλογικό σήμα, όπως έχουμε πει, μπορεί να πάρει άπειρες τιμές πλάτους σε μία περιοχή τιμών. Χρησιμοποιώντας όρους από τα μαθηματικά, λέμε πως ένα αναλογικό σήμα είναι μια συνεχής συνάρτηση στο πεδίο του πλάτους.

Αν στην κάθε τιμή αντιστοιχίσουμε ένα δυαδικό αριθμό με συγκεκριμένο μήκος (περιορισμένος αριθμός bits), τότε το σήμα έχει μετατραπεί σε ψηφιακό. Η ψηφιακή του αναπαράσταση (κβάντιση) όμως θα γίνεται με αριθμούς συγκεκριμένου μήκους και επομένως το πλήθος των διαφορετικών τιμών θα είναι συγκεκριμένο και όχι άπειρο. Οι άπειρες τιμές που μπορεί να πάρει ένα αναλογικό σήμα περιορίζονται με τον καθορισμό περιοχών συγκεκριμένου πλάτους. Για κάθε τέτοια περιοχή αντιστοιχεί μία μόνο ψηφιακή τιμή. Το πλάτος της κάθε περιοχής είναι το βήμα κβάντισης. Η διαδικασία αντιστοίχισης του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ονομάζεται **κβάντιση (quantisation)** του σήματος και το κύκλωμα με το οποίο πραγματοποιείται είναι  $\epsilon$  μετατροπέας A/D.

Ένα αναλογικό σήμα εκτός από άπειρες τιμές πλάτους, παίρνει και άπειρες τιμές σε συνάρτηση με το χρόνο. Χρησιμοποιώντας όρους από τα μαθηματικά λέμε πως ένα αναλογικό σήμα είναι μια συνεχής συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου. Δηλαδή, μπορούμε να παρατηρούμε το σήμα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές οι οποίες απέχουν μεταξύ τους όσο θέλουμε.

Η ψηφιακή αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος θα γίνεται με δείγματα σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές συγκεκριμένου μήκους και η διαδικασία αυτή με την οποία το αναλογικό σήμα αναπαρίσταται με δείγματα σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ονομάζεται **δειγματοληψία (sampling)** του σήματος. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα με το οποίο γίνεται η δειγματοληψία είναι το κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης S/H, που αναφέραμε στην παράγραφο 11.1. Συνήθως τα δείγματα ισαπέχουν, όποτε έχουμε ένα σταθερό αριθμό δειγμάτων στη μονάδα του χρόνου, ο οποίος ονομάζεται **ρυθμός δειγματοληψίας (sampling frequency)** και μετριέται σε δείγματα ανά δευτερόλεπτο (samples/sec). Σαν παράδειγμα, μπορούμε να σκεφθούμε μία κινηματογραφική ταινία η οποία αποτελείται από διαδοχικές φωτογραφίες (στιγμιότυπα) που ισαπέχουν χρονικά μεταξύ τους (περίπου 50 msec).

Η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με μετατροπέα A/D περιλαμβάνει πάντα δύο διαδικασίες:

**1. Τη δειγματοληψία**, με την οποία το αναλογικό σήμα από συνεχές στο πεδίο του χρόνου γίνεται διακριτό (παίρνει τιμές σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές) και η οποία υλοποιείται με το κύκλωμα της δειγματοληψίας και συγκράτησης (S/H).

**2. Την κβάντιση**, με την οποία το αναλογικό σήμα από συνεχές στο πεδίο του πλάτους γίνεται διακριτό (παίρνει συγκεκριμένες τιμές), και η οποία υλοποιείται με τον μετατροπέα A/D.

Τα κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιούμε για να ψηφιοποιήσουμε ένα αναλογικό σήμα είναι:

- ☛ Το κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης S/H
- ☛ Ο μετατροπέας A/D

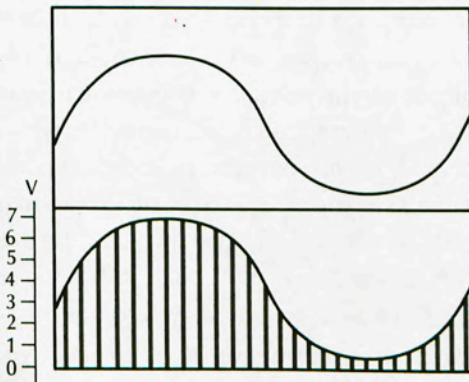
Το συνολικό αποτέλεσμα των δύο διαδοχικών διαδικασιών της δειγματοληψίας και της κβάντισης είναι η μετατροπή του αναλογικού σήματος το οποίο είναι συνεχές στο χρόνο και στο πλάτος σε ένα σήμα το οποίο είναι διακριτό στο πλάτος και στο χρόνο.

**Παράδειγμα**

Έστω ότι έχουμε ένα μετατροπέα A/D των τριών bits με βήμα κβάντισης 1 V. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι έξοδοι του μετατροπέα A/D για κάθε αναλογική είσοδο από 0 V μέχρι 7 V:

V <sub>in</sub> (V)	b <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>0</sub>
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Στο Σχήμα 11.7.1 φαίνεται η δειγματοληψία μίας αναλογικής (ημιτονοειδούς) κυματομορφής χρησιμοποιώντας τον παραπάνω μετατροπέα A/D.



**Σχήμα 11.7.1** Δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος με μετατροπέα A/D

Ψηφιακές λέξεις	3	5	6	6	7	6	6	5	3	2	1	1	0	1	1	2	3
V <sub>out</sub> (V)	011	101	110	110	111	110	110	101	001	010	001	001	000	001	001	010	011

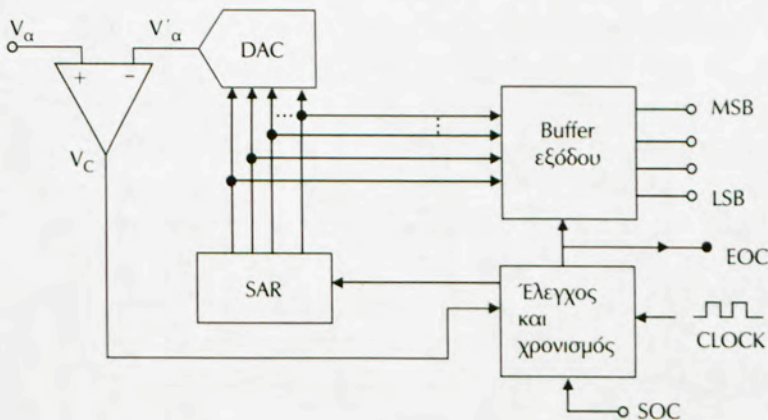
## 11.8 ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ A/D

Οι μετατροπείς A/D υπάρχουν σε ολοκληρωμένη μορφή σε μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών. Για να κατανοήσουμε όμως τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τις βασικές αρχές λειτουργίας τους είναι απαραίτητο να αναλύσουμε κυκλωματικά τον τρόπο κατασκευής τους. Θα δούμε λοιπόν την αρχή λειτουργίας του A/D διαδοχικών προσεγγίσεων, ο οποίος είναι και ο πλέον συνηθισμένος τύπος που χρησιμοποιείται σε ολοκληρωμένη μορφή στις διάφορες εφαρμογές.

### 11.8.1 Μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων

Στο σχήμα 11.8.1 έχουμε το σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα A/D διαδοχικών προσεγγίσεων (successive approximation). Η καρδιά του κυκλώματος είναι ο καταχωρητής διαδοχικών προσεγγίσεων (Successive Approximation Register - SAR) ο οποίος λειτουργεί ως εξής: Στην αρχή του κύκλου μετατροπής, με τον πρώτο παλμό του ρολογιού λειτουργίας, ο SAR θέτει το περισσότερο σημαντικό bit στην λογική τιμή "1" και ενημερώνει τον μετατροπέα D/A με το περιεχόμενό του. Στη συνέχεια ο SAR περιμένει σήμα από το συγκριτή, ο οποίος συγκρίνει την έξοδο του μετατροπέα D/A  $V_{\alpha'}$  με το σήμα εισόδου  $V_{\alpha}$ .

Ο συγκριτής είναι ένας TE χωρίς ανάδραση, ο οποίος παίρνει τη λογική τιμή "1", αν  $V_{\alpha} \geq V_{\alpha'}$ , διαφορετικά παίρνει τη λογική τιμή "0". Αν η έξοδος του συγκριτή είναι "1", τότε αυτό σημαίνει ότι η έξοδος του D/A μετατροπέα είναι μικρότερη από την τάση εισόδου και ο SAR κρατάει το περισσότερο σημαντικό bit σε λογική κατάσταση "1". Αν η έξοδος του συγκριτή είναι "0", τότε αυτό σημαίνει ότι η έξοδος του D/A μετατροπέα είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου και ο SAR μηδενίζει το πιο σημαντικό bit. Με τον επόμενο παλμό του ρολογιού λειτουργίας, ο SAR θα εξετάσει



Σχήμα 11.8.1 Μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων

το επόμενο (δεύτερο) πιο σημαντικό bit. Θα το κρατήσει σε λογική κατάσταση «1» ή θα το μηδενίσει ανάλογα με την έξοδο του συγκριτή. Έτσι ο SAR θα εξετάζει το ένα μετά το άλλο όλα τα bits προχωρώντας προς το LSB. Κρατάει ένα bit σε λογική κατάσταση «1», αν η έξοδος του D/A μετατροπέα είναι μικρότερη από την τάση εισόδου, και το μηδενίζει αν η έξοδος του D/A μετατροπέα είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Για την εξέταση του κάθε bit χρειάζεται και ένας παλμός του ρολογιού λειτουργίας. Όταν έχουν εξεταστεί όλα τα bits, τότε η έξοδος EOC δηλώνει το τέλος της μετατροπής. Το σήμα EOC δηλώνει ότι στις παράλληλες γραμμές εξόδου υπάρχει μια έγκυρη δυαδική λέξη που αντιπροσωπεύει το μέγεθος του αναλογικού σήματος εισόδου. Αν η έξοδος EOC συνδεθεί με την είσοδο ελέγχου SOC έναρξης της δειγματοληψίας, τότε ο μετατροπέας θα δουλεύει συνεχώς. Διαφορετικά στην είσοδο SOC συνδέουμε το κύκλωμα παραγωγής της συχνότητας δειγματοληψίας με την οποία θέλουμε να δειγματοληψήσουμε το αναλογικό σήμα.

Η μέθοδος των διαδοχικών προσεγγίσεων μοιάζει με τη διαδικασία υπολογισμού του ύψους ενός τραπέζιου, τοποθετώντας χάρακες (δυαδικά σταθμισμένους), τον έναν πάνω στον άλλο των 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2 και 1 cm σε ύψος και χρησιμοποιώντας μία φορά τον κάθε χάρακα. Ο πιο σημαντικός χάρακας των 128cm δοκιμάζεται πρώτα. Αν είναι υψηλότερος από το τραπέζι, τότε δεν χρησιμοποιείται και για αυτό το bit σημειώνουμε "0", διαφορετικά τον κρατάμε και σημειώνουμε "1". Κατόπιν, ο επόμενος σημαντικός χάρακας τοποθετείται πάνω από τους προηγούμενους και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Κάθε φορά που ένας καινούργιος χάρακας κάνει το σωρό υψηλότερο από το τραπέζι, δεν χρησιμοποιείται και για την αντίστοιχη θέση bit βάζουμε "0", διαφορετικά τον κρατάμε και σημειώνουμε "1". Όταν θα έχουν δοκιμασθεί όλοι οι χάρακες, το αποτέλεσμα θα είναι μία δυαδική λέξη των 8 bits που θα αντιπροσωπεύει το ύψος του τραπέζιου.

### Παράδειγμα

Έστω ένας μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων των 5 bits με βήμα κβάντισης 0.1 V. Αν η αναλογική τάση στην είσοδο είναι 2.52 V, να περιγράψετε τα βήματα της μετατροπής.

Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφονται τα βήματα της μετατροπής με κάθε γραμμή να αντιστοιχεί σε έναν παλμό του ρολογιού λειτουργίας του μετατροπέα A/D,  $V_a$  είναι η τάση εισόδου και  $V_a'$  είναι η τάση εξόδου του μετατροπέα που οδηγείται στον συγκριτή.

Στην τρίτη και τέταρτη σύγκριση βλέπουμε ότι τα αντίστοιχα bits του SAR γίνονται στιγμιαία "1", αλλά λόγω του ότι  $V_a' > V_a$ , μηδενίζονται ξανά.

Όταν EOC = "1", τότε στην έξοδο υπάρχει το τελικό αποτέλεσμα της μετατροπής, που στο παράδειγμα είναι 11001.

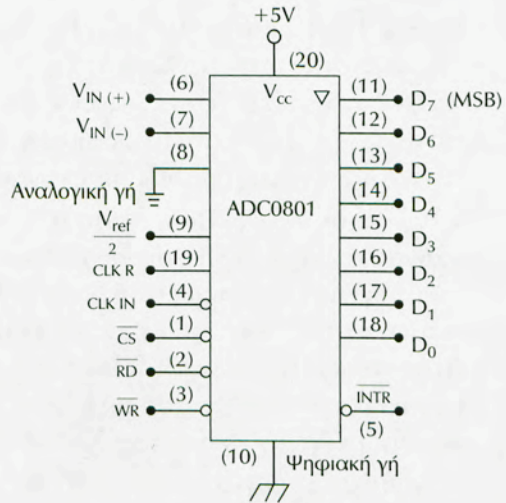
SAR	Vα'	Vα	Συγκριτής	EOC
10000	1.6	2.52	1	0
11000	2.4	2.52	1	0
11100	2.8	2.52	0	0
11000	2.4	2.52	1	0
11010	2.6	2.52	0	0
11000	2.4	2.52	1	0
11001	2.5	2.52	1	0
11001	2.5	2.52	1	1

### 11.8.2 Μετατροπέας A/D σε ολοκληρωμένο κύκλωμα

Στο Σχήμα 11.8.2 παρουσιάζεται ο Μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων των 8 bits ADC0801, ο οποίος κατασκευάζεται από την εταιρεία National Semiconductors.

**Οι ακροδέκτες  $V_{in}(+)$  και  $V_{in}(-)$**  χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του αναλογικού σήματος. Στην απλούστερη χρήση του η αναλογική τάση εισόδου που πρόκειται να μετατρέψουμε συνδέεται στον ακροδέκτη  $V_{in}(+)$  ενώ ο ακροδέκτης  $V_{in}(-)$  συνδέεται στην αναλογική γη (ακροδέκτης 8). Όταν η τάση τροφοδοσίας  $V_{CC}$  του Ο.Κ. είναι 5 V τότε η αναλογική είσοδος μπορεί να μεταβάλλεται από 0 έως 5V.

**Είσοδος επιλογής  $\overline{CS}$ .** Η ενεργοποίηση γίνεται με λογική τιμή "0". Όταν αυτή η είσοδος είναι "1" τότε ο μετατροπέας A/D συμπεριφέρεται σαν να έχει αποσυνδεθεί ηλεκτρικά από οποιοδήποτε κύκλωμα και οι έξοδοι των δεδομένων βρίσκονται σε κατάσταση υψηλής σύνθετης αντίστασης (Hi-Z).



Σχήμα 11.8.2 Ο ADC0801

Τα ψηφιακά δεδομένα της μετατροπής εμφανίζονται στους ακροδέκτες 11 (D7 MSB) έως 18 (D0 LSB). Αυτές είναι έξοδοι υψηλής σύνθετης αντίστασης έτσι ώστε ο μετατροπέας A/D να μπορεί να συνδεθεί σε διαύλους δεδομένων υπολογιστικών συστημάτων.

**Είσοδος  $\overline{WR}$ .** Η είσοδος αυτή αντιστοιχεί στην είσοδο SC έναρξης της μετατροπής. Όταν επιλεγεί ο μετατροπέας A/D ( $\overline{CS} = "0"$ ) και  $\overline{WR} = "0"$  τότε αρχίζει η διαδικασία και στην συνέχεια όταν γίνει  $\overline{WR} = "1"$  μετατρέπεται η αναλογική τάση εισόδου στην ισοδύναμη (από τη μετατροπή) ψηφιακή λέξη.

**Είσοδος  $\overline{RD}$ .** Η είσοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανάγνωση (Read) των δεδομένων από τον μετατροπέα A/D. Όταν επιλεγεί ο μετατροπέας A/D ( $\overline{CS} = "0"$ ) και  $\overline{RD} = "0"$ , τότε οι έξοδοι των δεδομένων παύουν να βρίσκονται σε κατάσταση υψηλής αντίστασης και εμφανίζουν το αποτέλεσμα της μετατροπής.

Το Ο.Κ. διαθέτει εσωτερική γεννήτρια για το ρολοί λειτουργίας του. Για να το ενεργοποιήσουμε συνδέουμε εξωτερικά μία αντίσταση και έναν πυκνωτή στις εισόδους CLK R και CLK IN. Οι τιμές τους καθορίζουν τη συχνότητα λειτουργίας ως  $f = 1/(1.1RC)$ . Αν θέλουμε να συνδέσουμε εξωτερικά μία γεννήτρια, τη συνδέουμε στην είσοδο CLK IN. Οι συχνότητες λειτουργίας μπορούν να είναι από 100 KHz έως 640 KHz.

**Έξοδος  $\overline{INTR}$ .** Αυτή η έξοδος αντιστοιχεί στην EOC και δηλώνει το τέλος της μετατροπής, όταν πάρει τη λογική τιμή "0".

Το Ο.Κ. διαθέτει ξεχωριστές γειώσεις για τα αναλογικά του κυκλώματα (ακροδέκτης 8) και για τα ψηφιακά του κυκλώματα (ακροδέκτης 10). Ο λόγος ύπαρξής τους είναι να αποφεύγεται οι θόρυβοι της ψηφιακής γείωσης να επηρεάζουν τη λειτουργία των αναλογικών τμημάτων, με αποτέλεσμα μείωση των επιδόσεων του Ο.Κ.

**Είσοδος  $V_{ref}/2$ :** Αυτή η είσοδος χρησιμοποιείται, όταν η μέγιστη προς μετατροπή τάση είναι μικρότερη από 5 V. Όταν αυτός ο ακροδέκτης δεν συνδέεται (ανοικτός), τότε η τάση του είναι 2.5 V. Εφαρμόζοντας εξωτερικά μία συνεχή τάση, η εσωτερική τάση αναφοράς γίνεται το διπλάσιο αυτής της τιμής και αυτή θα είναι και η μέγιστη τιμή της τάσης εισόδου. Αν για παράδειγμα στην είσοδο  $V_{ref}/2$  συνδέσουμε μια τάση 2 V, τότε η μέγιστη προς μετατροπή τάση θα είναι 4 V.

Το βήμα κβάντισης του ADC0801 για μέγιστη τάση εισόδου 5 V θα είναι:  $5V/(2^8-1) = 19.6 \text{ mV}$ .

## 11.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ A/D

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μετατροπέων A/D είναι:

✚ **Διακριτική ικανότητα (resolution).** Είναι ο αριθμός των bits που χρησιμοποιεί ο μετατροπέας A/D για να αναπαραστήσει ένα αναλογικό σήμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική του ικανότητα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των

υποδιαιρέσεων της περιοχής τάσης λειτουργίας του και επομένως τόσο μικρότερο το βήμα κβάντισης. Για παράδειγμα ένας μετατροπέας των 8 bits έχει διακριτική ικανότητα 8 bits, ο αριθμός των υποδιαιρέσεων της περιοχής τάσης λειτουργίας του είναι  $256 (2^8)$  και το βήμα κβάντισης για περιοχή τάσης λειτουργίας 4 V είναι:  $4V/255=15 \text{ mV}$ . Η διακριτική ικανότητα των μετατροπέων A/D σε Ο.Κ. κυμαίνονται από 6 bits έως 24 bits.

**Ακρίβεια (accuracy).** Με τον όρο αυτό εννοούμε τη διαφορά της πραγματικής εξόδου από την ιδανική. Η ακρίβεια καθορίζεται ως ένα ποσοστό της περιοχής τάσης λειτουργίας (Full Scale Range - FSR) του μετατροπέα A/D. Αν ένας μετατροπέας A/D έχει περιοχή τάσης λειτουργίας 10 V (για παράδειγμα από 0 V έως 10 V ή από -5 V έως +5 V) και ακρίβεια 0.2% της περιοχής τάσης λειτουργίας, τότε το μέγιστο σφάλμα για οποιαδήποτε είσοδο θα είναι  $20 \text{ mV} (=10V \times 0.2/100)$ . Αυτό σημαίνει ότι για οποιαδήποτε τάση εισόδου μπορεί να έχουμε ένα σφάλμα  $\pm 20 \text{ mV}$ .

**Χρόνος μετατροπής (Conversion time).** Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την ψηφιοποίηση της αναλογικής τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετατροπέα A/D. Ο χρόνος μετατροπής είναι συνήθως ανάλογος του αριθμού των bits του μετατροπέα. Ο χρόνος μετατροπής αποτελεί ένα μέτρο της ταχύτητας ενός μετατροπέα A/D. Ο χρόνος μεταξύ των διαδοχικών δειγμάτων της εισόδου του θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο μετατροπής (ή ισοδύναμα η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας θα πρέπει να είναι μικρότερη από το αντίστροφο του χρόνου μετατροπής του). Ο χρόνος μετατροπής των μετατροπέων A/D σε Ο.Κ. κυμαίνεται από msec έως nsec.

## 11.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ D/A ΚΑΙ A/D

Οι μετατροπείς A/D και D/A αποτελούν τα κυκλώματα προσαρμογής των ψηφιακών συστημάτων με τον αναλογικό κόσμο. Οποιοδήποτε ψηφιακό σύστημα το οποίο αλληλεπιδρά με τον εξωτερικό αναλογικό κόσμο θα έχει είτε έναν μετατροπέα A/D, είτε έναν μετατροπέα D/A, είτε και τους δύο.

### Συστήματα ελέγχου (control systems)

Στα συστήματα αυτά το ψηφιακό σύστημα παίρνει πληροφορίες από το σύστημα το οποίο ελέγχει μετρώντας κάποιες παραμέτρους. Οι παράμετροι που ενδιαφέρουν (για παράδειγμα πίεση, θερμοκρασία, συγκέντρωση κάποιου αερίου, κατάσταση κάποιου διαδικασίας) συνήθως ψηφιοποιούνται με ένα μετατροπέα A/D. Στη συνέχεια τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή και μπορούμε να τα επεξεργασθούμε με υπολογιστικά συστήματα, χρησιμοποιώντας κατάλληλα για την εφαρμογή προγράμματα. Το ψηφιακό σύστημα με βάση τις μετρήσεις και ανάλογα με το πρόγραμμα λειτουργίας επεμβαίνει με τη χρήση

μετατροπέα D/A στο σύστημα ρυθμίζοντας (αλλάζοντας) κάποιες παραμέτρους. Με βάση αυτές τις αρχές λειτουργούν είτε απλά συστήματα όπως η μηχανή ενός αυτοκινήτου, είτε πολύπλοκα όπως η λειτουργία ενός αεροπλάνου ή η αυτόματη παραγωγή ενός εργοστασίου.

Για παράδειγμα τα συστήματα ABS (Anti blocking System) στα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν αισθητήρες με τους οποίους το ψηφιακό σύστημα ελέγχου γνωρίζει την ταχύτητα περιστροφής των τροχών, καθώς και την πορεία του αυτοκινήτου σε κάθε χρονική στιγμή. Οι παράμετροι αυτοί ψηφιοποιούνται με τη χρήση μετατροπέων A/D και επεξεργάζονται από μικροεπεξεργαστή. Σε περίπτωση που ο οδηγός φρενάρει, το σύστημα ρυθμίζει αυτόματα το φρενάρισμα (πέδηση) του κάθε τροχού έτσι ώστε να μην ακινητοποιείται και το αυτοκίνητο να παραμένει στην πορεία του. Για τον έλεγχο του φρεναρίσματος χρησιμοποιούνται μετατροπείς D/A και ειδικοί ηλεκτρομηχανικοί μηχανισμοί.

### **Συστήματα συλλογής δεδομένων (data acquisition systems)**

Στα συστήματα αυτά ενδιαφέρει κυρίως η συλλογή μετρήσεων από κάποιες παραμέτρους (π.χ. σεισμική δραστηριότητα, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου, ένταση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων). Οι παράμετροι που ενδιαφέρουν ψηφιοποιούνται με μετατροπείς A/D και είτε επεξεργάζονται και αποθηκεύονται σε τοπικό υπολογιστικό σύστημα, είτε μεταδίδονται σε απομακρυσμένα κεντρικά υπολογιστικά συστήματα. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων αποτελούν οι σταθμοί καταγραφής και παρακολούθησης σεισμικής δραστηριότητας, μετεωρολογικοί σταθμοί, ωκεανογραφικοί σταθμοί. Αυτοί οι σταθμοί είτε συλλέγουν τα δεδομένα τοπικά, είτε τα μεταδίδουν ενσύρματα ή ασύρματα σε απομακρυσμένους κεντρικούς σταθμούς.

### **Συστήματα μετρήσεων**

Τα συστήματα εργαστηριακών μετρήσεων σήμερα χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό μετατροπείς A/D και D/A. Στα εργαστηριακά συστήματα ηλεκτρονικών μετρήσεων συναντάμε ψηφιακά πολύμετρα με πολύ υψηλές αναλύσεις, ψηφιακούς παλμογράφους (DSO Digital Storage Oscilloscopes) με δυνατότητες ψηφιοποίησης έως και 8 Gsamples/sec, και ψηφιακές γεννήτριες σήματος. Τα αναλογικά συστήματα εκτοπίζονται με γοργούς ρυθμούς, αφού τα ψηφιακά προσφέρουν συνήθως υψηλότερες επιδόσεις με μικρότερο κόστος. Τα συστήματα μετρήσεων για ιατρικούς σκοπούς χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό μετατροπείς A/D και D/A με παραδείγματα όπως η αξονική τομογραφία, η μαγνητική τομογραφία, τα υπερηχογραφήματα, τα συστήματα αυτόματης ανάλυσης αίματος, μέτρησης σακχάρου κλπ.

### **Συστήματα επικοινωνίας**

Στα συστήματα επικοινωνιών τα ψηφιακά συστήματα έχουν επικρατήσει λόγω της αξιοπιστίας που εξασφαλίζει η ψηφιακή μετάδοση και λήψη πληροφο-

ριών. Τα ψηφιακά σήματα επειδή έχουν μόνο δύο στάθμες, επηρεάζονται λιγότερο από θορύβους, συγκριτικά με τα αναλογικά. Σήμερα σχεδόν όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα τηλεφωνίας είναι ψηφιακά, στα οποία η φωνή του κάθε συνδρομητή ψηφιοποιείται με μετατροπείς A/D (οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στα κέντρα του τηλεπικοινωνιακού οργανισμού), μεταδίδεται ενσύρματα ή ασύρματα ψηφιακά και τελικά ξαναμετατρέπεται σε αναλογικό σήμα με τη χρήση μετατροπέων D/A. Επίσης οι συσκευές των ψηφιακών κινητών τηλεφώνων (τύπου GSM) έχουν ενσωματωμένους μετατροπείς A/D και D/A για την ψηφιοποίηση και την αναπαραγωγή της φωνής των συνομιλητών.

Επιπλέον για τη σύνδεση των υπολογιστικών συστημάτων μέσω του τηλεφωνικού δικτύου χρησιμοποιούνται τα modem. Με τα modem γίνεται δυνατή η διακίνηση της ψηφιακής πληροφορίας μέσα από το τηλεφωνικό δίκτυο το οποίο κατασκευάστηκε για τη μετάδοση αναλογικών σημάτων. Τα βασικά κυκλώματα ενός modem για τη μετατροπή του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό και αντίστροφα είναι οι μετατροπείς D/A και A/D αντίστοιχα.

### **Συσκευές πολυμέσων**

Στην καθημερινή μας ζωή τα συστήματα εγγραφής και αναπαραγωγής ήχου και εικόνας από αναλογικά μετατρέπονται σε ψηφιακά. Μετατροπείς A/D χρησιμοποιούνται για την ψηφιοποίηση του ήχου και την αποθήκευσή του (για παράδειγμα σε CD ήχου) και για την αναπαραγωγή του χρησιμοποιούνται μετατροπείς D/A.

Στον τομέα της φωτογραφίας με γοργούς ρυθμούς εξαπλώνεται η χρήση ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών οι οποίες συνδυάζουν τους αισθητήρες φωτός τύπου CCD, με μετατροπέα A/D για την ψηφιοποίηση της εικόνας, η οποία στην συνέχεια αποθηκεύεται σε μνήμες FLASH. Στο χώρο του video σύντομα θα επικρατήσει η ψηφιακή τεχνολογία DVD (Digital Versatile ή Video Disk) η οποία συνδυάζει μετατροπείς A/D για την ψηφιοποίηση της εικόνας από αισθητήρες CCD και μετατροπείς D/A για την αναπαραγωγή της. Τέλος τα κυκλώματα οδήγησης των οθονών υπολογιστών χρησιμοποιούν μετατροπείς D/A.

## **11.11 ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

1. Ο μετατροπέας D/A ψηφιακού σήματος σε αναλογικό μετατρέπει μια ψηφιακή λέξη σε ένα αναλογικό σήμα εξόδου (τάση ή ρεύμα). Ο μετατροπέας A/D εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία από τον D/A, μετατρέποντας ένα αναλογικό σήμα στην είσοδό του (τάση) σε μία ανάλογη ψηφιακή λέξη εξόδου.
2. Ο μετατροπέας D/A τύπου R/2R κατασκευάζεται με αντιστάσεις δύο τιμών και έναν τελεστικό ενισχυτή. Σε μορφή Ο.Κ. υπάρχουν μετατροπείς D/A με 8, 10, 12, 14 και 16 bits εισόδου, και εξόδους τάσης ή ρεύματος.

3. Η διακριτική ικανότητα ενός μετατροπέα D/A είναι ο αριθμός των bits της λέξης εισόδου που χρησιμοποιεί ο μετατροπέας για την παραγωγή του αναλογικού σήματος στην έξοδό του.
4. Η ακρίβεια ενός μετατροπέα D/A είναι η διαφορά της πραγματικής εξόδου από την ιδανική.
5. Ο χρόνος αποκατάστασης ενός μετατροπέα D/A είναι ο χρόνος από τη στιγμή που εφαρμόζεται στις εισόδους του μετατροπέα D/A μία ψηφιακή λέξη μέχρι την εμφάνιση της αντίστοιχης αναλογικής εξόδου του.
6. Οι μετατροπείς D/A χρησιμοποιούνται σε όλες τις εφαρμογές στις οποίες ένα ψηφιακό σύστημα οδηγεί μια αναλογική διάταξη. Αποτελούν το κύκλωμα διασύνδεσης (interface) από τον ψηφιακό προς τον αναλογικό κόσμο.
7. Η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό γίνεται με δύο διαδοχικές διαδικασίες, τη δειγματοληψία και την κβάντιση. Για τη δειγματοληψία χρησιμοποιείται το κύκλωμα S/H, ενώ για την κβάντιση χρησιμοποιείται ο μετατροπέας A/D. Το τελικό αποτέλεσμα της δειγματοληψίας και της κβάντισης είναι ότι ένα αναλογικό σήμα συνεχές στο πλάτος και στο χρόνο μετατρέπεται σε ένα ψηφιακό σήμα διακριτό στο πλάτος και στο χρόνο.
8. Ο μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων κατασκευάζεται με ένα συγκριτή, έναν μετατροπέα D/A και τον καταχωρητή διαδοχικών προσεγγίσεων (SAR).
9. Η διακριτική ικανότητα του ενός μετατροπέα A/D είναι ο αριθμός των bits που χρησιμοποιεί ο μετατροπέας A/D για να αναπαραστήσει ένα αναλογικό σήμα.
10. Η ακρίβεια ενός μετατροπέα A/D είναι η διαφορά της πραγματικής εξόδου από την ιδανική.
11. Ο χρόνος μετατροπής ενός μετατροπέα A/D είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ψηφιοποίηση της αναλογικής τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετατροπέα A/D.
12. Οι μετατροπείς A/D χρησιμοποιούνται σε όλες τις εφαρμογές στις οποίες ένα ψηφιακό σύστημα χρειάζεται να εισάγει δεδομένα από τον αναλογικό κόσμο. Αποτελούν το κύκλωμα διασύνδεσης (interface) από τον αναλογικό κόσμο προς τον ψηφιακό.

## 11.12 ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ – ΑΣΚΗΣΕΙΣ – ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

1. Να ορίστε την διακριτική ικανότητα, την ακρίβεια και το χρόνο αποκατάστασης ενός μετατροπέα D/A.
2. Ποια είναι η διακριτική ικανότητα ενός μετατροπέα D/A των 12 bits; Εάν η περιοχή τάσης λειτουργίας του είναι 10 V, ποια είναι η ελάχιστη μεταβολή της αναλογικής τάσης εξόδου του;

3. Ένας μετατροπέας D/A των 4 bits παράγει μια τάση εξόδου 8 V με ψηφιακή λέξη εισόδου 1000. Αν η ελάχιστη τάση που παράγει ο μετατροπέας D/A είναι 0 V, ποια θα είναι η τάση εξόδου του για την ψηφιακή λέξη εισόδου 1111; Ποια είναι η διακριτική ικανότητα του μετατροπέα D/A.
4. Σε μία εφαρμογή πρέπει να επιλέξετε ένα μετατροπέα D/A με ανάλυση μέτρησης 1 V και περιοχή τάσης λειτουργίας 0 V έως 15 V. Να καθορίσετε τη διακριτική ικανότητα του μετατροπέα D/A που θα επιλέξετε.
5. Να ορίσετε τη διακριτική ικανότητα, την ακρίβεια και το χρόνο μετατροπής ενός μετατροπέα A/D.
6. Ποια είναι η διακριτική ικανότητα ενός μετατροπέα A/D των 12 bits; Εάν η συνολική τάση εισόδου του είναι 10 V, ποιο είναι το βήμα κβάντισης του μετατροπέα A/D;
7. Ένας μετατροπέας A/D των 4 bits παράγει για τάση εισόδου 1 V την ψηφιακή λέξη 1000. Αν η ελάχιστη τάση που ψηφιοποιεί ο μετατροπέας A/D είναι τα 0 V, ποια θα είναι η ψηφιακή του έξοδος για την τάση εισόδου των 1.25 V; Να βρείτε το βήμα κβάντισης του μετατροπέα A/D.
8. Αν η ελάχιστη είσοδος ενός μετατροπέα A/D είναι 0 V και η μέγιστη 10 V, ποια διακριτική ικανότητα πρέπει να έχει ο μετατροπέας A/D ώστε το βήμα κβάντισης να είναι μικρότερο από 20 mV;
9. Σε μία εφαρμογή πρέπει να επιλέξετε έναν μετατροπέα A/D με βήμα κβάντισης 1 V και περιοχή τάσης λειτουργίας 0 V έως 15 V. Να καθορίσετε τη διακριτική ικανότητα του μετατροπέα A/D που θα επιλέξετε.
10. Σε μία εφαρμογή μέτρησης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος θέλουμε την ψηφιοποίηση της εξόδου ενός κυκλώματος προσαρμογής ενός αισθητήρα θερμοκρασίας. Η περιοχή των θερμοκρασιών που θέλουμε να μετρήσουμε είναι από  $-30^{\circ}\text{C}$  έως  $+70^{\circ}\text{C}$  σε βήματα των  $1^{\circ}\text{C}$ . Ποια η διακριτική ικανότητα του μετατροπέα A/D που θα επιλέξουμε για την εφαρμογή αυτή;
11. Σε μία εφαρμογή κατασκευής μιας ηλεκτρονικής ψηφιακής ζυγαριάς θέλουμε να ψηφιοποιείται η έξοδος του αισθητήρα ζύγισης. Αν η ζυγαριά πρέπει να ζυγίζει βάρη έως 120 Kgr σε βήματα του 0,5 Kgr, ποια η διακριτική ικανότητα του μετατροπέα A/D που θα επιλέξουμε;