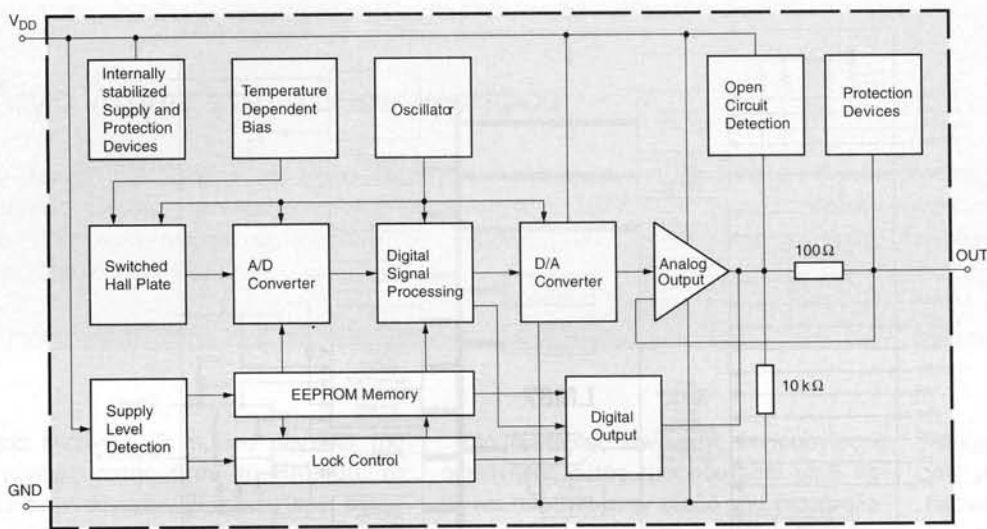


του Helmut Lemme

# Αισθητήρες

περισσότερες μετρήσεις φυσικών μεγεθών,  
και περισσότερα ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά

Χάρη στις εντατικές ερευνητικές προσπάθειες, σήμερα είναι πλέον εφικτό να μετρούμε ηλεκτρονικά διάφορα φυσικά μεγέθη, γεγονός το οποίο πριν από μερικά μόλις χρόνια θεωρούνταν απλά αδιανόητο. Ταυτόχρονα, διατάξεις αισθητήρων με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα επεξεργασίας σήματος εξελίσσονται σε σύγχρονα συστήματα μετρήσεων. Στο άρθρο αυτό εξετάζονται μερικοί αισθητήρες ως αντιπροσωπευτικοί τύποι μιας εξαιρετικά μεγάλης γκάμας νέων προϊόντων.



Σχήμα 1. Λειτουργικό διάγραμμα του αισθητήρα φαινομένου Hall, HAL805. Οι παράμετροι των μετρήσεων μπορούν να διαμορφωθούν από τον χρήστη (Micronas).

Κάτω από ένα καθεστώς πίεσης χρόνου και κόστους που επιβάλλεται στον χώρο ανάπτυξης των συστημάτων μετρολογίας, η κατασκευή προενισχυτικών διατάξεων για αισθητήρες έχει αρχίσει να θεωρείται ολοένα και περισσότερο μια δευτερεύουσα και σχετικά ενοχλητική εργασία. Οι ενισχυτικές αυτές διατάξεις θα πρέπει να είναι απόλυτα προσαρμοσμένες στα σήματα εξόδου των αισθητήρων, τα οποία είναι συνήθως εξαιρετικά ασθενή και σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ένας διαφορετικός τύπος αισθητήρα θα πρέπει να επαναληφθεί όλη η σχετική διαδικασία από την αρχή. Μια προσέγγιση κατά πολύ πιο φιλική στον χρήστη αφορά την διάθεση νέων αισθητήριων διατάξεων των οποίων τα σήματα εξόδου υπόκεινται σε κατάλληλη προεπεξεργασία έτσι ώστε σχεδόν να εκμηδενίζονται διάφοροι παράγοντες παραμόρφωσής τους (όπως εξάρτηση από την θερμοκρασία, φαινόμενα εκτροπής και άλλοι παρόμοιοι), ενώ παράλληλα λαμβάνουν μια τυποποιημένη μορφοποίηση σήματος, όπως αυτή των 0-10 V ή 4-20 mA. Με τον τρόπο αυτόν διευκολύνεται η διαδικασία αντικατάστασης των αισθητήρων.

Εδώ και πολύ καιρό έχει γίνει πλέον κοινή πρακτική η ενσωμάτωση αισθητήριων διατάξεων και ηλεκτρονικών συστημάτων μετρήσεων στην ίδια συσκευασία. Με σκοπό την περαιτέρω μείωση του κόστους, η τάση που αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο οδηγεί προς την κατεύθυνση της ταυτόχρονης ολοκλήρωσης και των δύο παραπάνω στοιχείων σε ένα και μοναδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η κατασκευή των αισθητήριων στοιχείων θα γίνεται από πυρίτιο. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό έχει ήδη επι-

τευχθεί. Ιδιαίτερα για αισθητήρες θερμοκρασίας είναι αρκετά εύκολο. Στην περίπτωση των αισθητήρων πίεσης στους οποίους η μεμβράνη συχνά αποτελείται ήδη από μια δομή πυριτίου που ασκεί μια πίεση σε πιεζοηλεκτρικά κανάλια, η λύση είναι επίσης απλή. Ακόμη και όταν ένα τέτοιο αισθητήριο σύστημα φαίνεται αρχικά ακριβό, το συνολικό κόστος ελαττώνεται χάρη στην οικονομοτεχνική προσέγγιση κατά την διάρκεια της ανάπτυξης. Ένας άλλος λόγος που συνηγορεί στην λύση της ολοκλήρωσης είναι και η αποφυγή βλαβών. Η ασφάλεια ανθρώπινων ζώων εξαρτάται συχνά από το επίπεδο της αξιοπιστίας των αισθητήρων, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις των συστημάτων ABS και ESP στα σύγχρονα αυτοκίνητα. Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας οι αντίστοιχες απαιτήσεις από τα συστήματα αυτά αγγίζουν τα όρια της πρόκλησης εξαιτίας μιας ευρείας κλίμακας θερμοκρασιών η οποία εκτείνεται από τους -20 °C μέχρι την υψηλή θερμοκρασία της μηχανής του αυτοκινήτου που φθάνει τους +125 °C. Όπως έχει δείξει η εμπειρία, βλάβες όπως αυτές που εμφανίζονται σε συγκολλήσεις είναι πάρα πολύ συχνότερες σε σχέση με πιθανές βλάβες στο εσωτερικό των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Έτσι στις διάφορες προσπάθειες για την αύξηση του επιπέδου ολοκλήρωσης συνηγορούσαν κυρίως η αξιοπιστία και η ασφάλεια. Από την άλλη πλευρά, η μείωση του συνολικού κόστους (λαμβάνοντας υπόψη παραγωγές πολύ μεγάλης κλίμακας) αποτελεί μια μάλλον ευχάριστη παρενέργεια. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της σύγχρονης αυτής μεθόδου αποτελεί και η αυξημένη επιδεκτικότητα των αντίστοιχων συστημάτων στις διάφορες

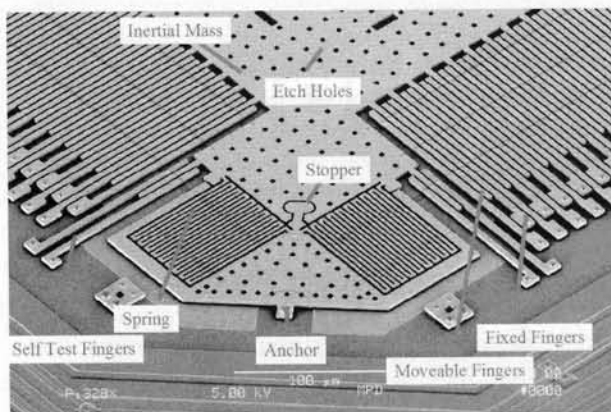
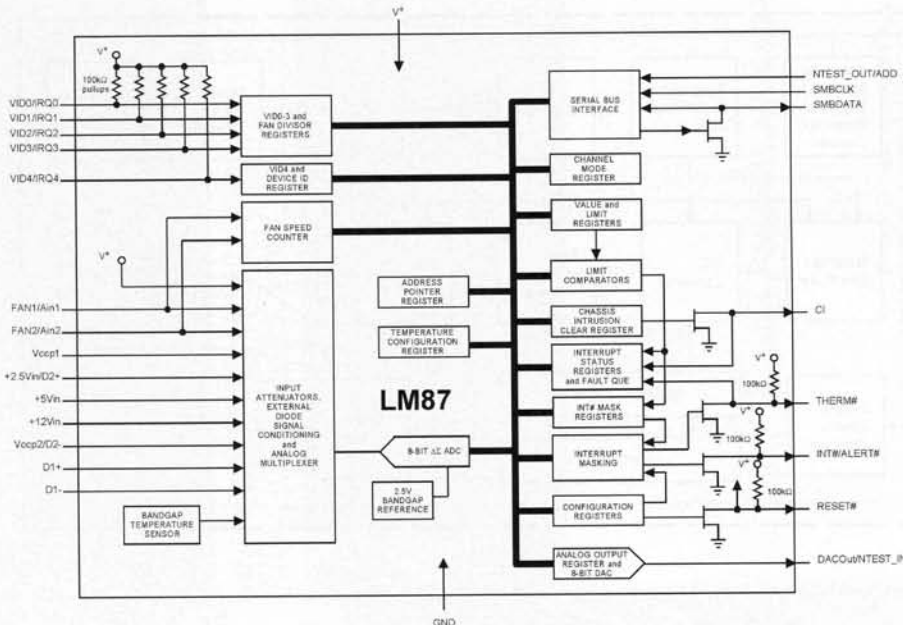
πηγές παρεμβολών. Αν τα σήματα εξόδου των αισθητήρων έπρεπε να περάσουν μέσα από καλώδια μεγάλου μήκους πριν ενισχυθούν, όπως συνέβαινε παλαιότερα, αλλοιώνονταν από διάφορες παρεμβολές. Ένας τέτοιος κίνδυνος περιορίζεται σημαντικά όταν όλα τα στοιχεία ενός συστήματος βρίσκονται στο ίδιο ολοκληρωμένο.

## Επεξεργασία σήματος

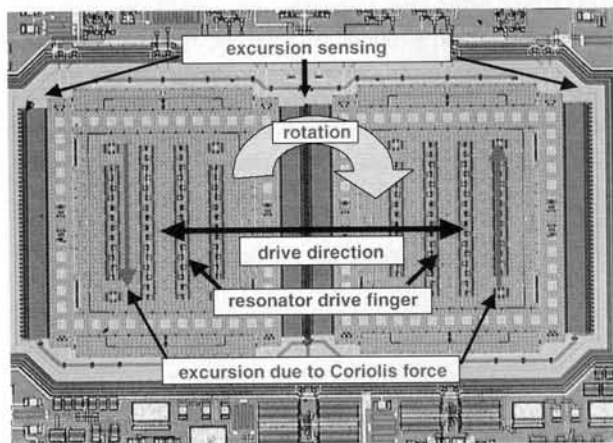
Η ενίσχυση ενός σήματος δεν αποτελεί την μόνη επεξεργασία που απαιτείται. Πολλά από τα φυσικά φαινόμενα τα οποία εκμεταλλευόμαστε κατά την λειτουργία των αισθητήρων εξαρτώνται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Για την αντιστάθμιση του παράγοντα αυτού μπορούμε να προσθέσουμε στο σύστημα έναν αισθητήρα θερμοκρασίας με την βοήθεια του οποίου θα επιτυγχάνεται μια κατάλληλη ρύθμιση του κέρδους. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις οι διάφορες χαρακτηριστικές μεταφορές είναι μη γραμμικές και για τον λόγο αυτόν θα πρέπει να γίνουν γραμμικές. Αυτό ισχύει ειδικότερα στις περιπτώσεις τυπικών αισθητήρων θερμοκρασίας, όπως είναι τα NTC και οι αντιστάσεις πλατίνας, καθώς επίσης και τα θερμοζεύγη.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η γραμμικότητα τέτοιων στοιχείων, κάνοντας χρήση απλών αναλογικών κυκλωμάτων ή λογισμικού σε επεξεργαστές σήματος, απαιτείται πάντοτε πρόσθετη προσπάθεια και κόστος. Αν υπάρχει διαθέσιμος ένας αισθητήρας θερμοκρασίας με βάση το πυρίτιο, τότε αυτός μπορεί να τοποθετηθεί στο ίδιο ολοκληρωμένο και η διαδικασία γραμμικότητας μπορεί να υλοποιηθεί απευθείας δίπλα στο αισθητήριο στοιχείο. Τέτοιου είδους εξαρτήμα-

Σχήμα 2. Λειτουργικό διάγραμμα του ολοκληρωμένου επιτηρητή LM87. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που βρίσκεται εντός του ολοκληρωμένου (κάτω αριστερά) παίζει έναν δευτερεύοντα ρόλο. (πηγή: National Semiconductor).



Σχήμα 3. Συνδυασμός δομών ευαίσθητων στην κίνηση στο εσωτερικό του μικρομηχανικού αισθητήρα επιτάχυνσης ADXL2Q2. (πηγή: Analog Devices).



Σχήμα 4. Στον αισθητήρα ρυθμού περιστροφής ADXR150 οι διαδρομές των δονούμενων μηχανικών δομών μεταβάλλονται κατά την περιστροφή της διάταξης. (πηγή: Analog Devices).

τα βρίσκουν σήμερα ευρεία χρήση. Ένα παράδειγμα αποτελεί ο αισθητήρας LM35 της National Semiconductor ο οποίος κατασκευάζεται εδώ και αρκετά χρόνια. Στην έξοδό του παράγει ένα σήμα ακριβείας το οποίο αυξάνεται γραμμικά με την θερμοκρασία σε ρυθμό 10 mV/K. Στα χρόνια που μεσολάβησαν από την πρώτη παραγωγή του, το εξάρτημα αυτό αποτέλεσε μέλος μιας ολοκληρης οικογένειας παρόμοιων στοιχείων που λειτουργούν με τον ίδιο περίπου τρόπο (για περισσότερες πληροφορίες επισκεφθείτε την σελίδα,

[www.national.com/appinfo/tempsensors/products.html](http://www.national.com/appinfo/tempsensors/products.html)).

### Συνδυασμός αισθητήρων και ελεγκτών

Όταν ένα αισθητήριο στοιχείο έχει ήδη γίνει ολοκληρωμένο κύκλωμα, το επόμενο βήμα είναι η ολοκλήρωση διαφόρων λειτουργιών οι οποίες παλαιότερα υλοποιούνταν με διασύνδεση εξωτερικών κυκλωμάτων. Παράδειγμα τέτοιων λειτουργιών αποτελούν οι συ-

γκριτές των οποίων η έξοδος μεταγεται όταν η ελεγχόμενη θερμοκρασία ξεπεράσει κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι. Οι τιμές κατωφλίου της θερμοκρασίας μπορούν να παρέχονται εξωτερικά σε αναλο-

γική ή ψηφιακή μορφή. Αρκετά συχνή είναι και η παρουσία μετατροπέν αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), συνήθως με μια σειριακή έξοδο δεδομένων έτσι ώστε να εξοικονομούνται οι ακροδέκτες της διάταξης. Το επόμενο λογικό βήμα αφορά την προσθήκη ενός μικροελεγκτή στο ολοκληρωμένο. Με τον τρόπο αυτόν η συνολική διάταξη γίνεται πολύ πιο ευέλικτη έχοντας την δυνατότητα επιπλέον λειτουργιών όπως τον εξωτερικό προγραμματισμό παραμέτρων της ευαισθησίας ή της κλίμακας μέτρησης, ή την βαθμονόμηση και πολλές άλλες. Τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην βαθμονόμηση του συστήματος μπορούν να αποθηκεύονται σε μια μνήμη τύπου EEPROM (επίσης ενσωματωμένη στο ίδιο ολοκληρωμένο). Με τον τρόπο αυτό ένας αισθητήρας μετατρέπεται ουσιαστικά σε έναν μικροσκοπικό υπολογιστή.

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα που απορρέει από την παραγωγή τέτοιων 'ευφυών' αισθητήριων διατάξεων είναι και η ελάττωση του αριθμού των διαφορετικών τύπων. Έτσι, αντί να κατασκευάζονται πολλοί και ποικίλοι τύποι τέτοιων διατάξεων οι οποίοι θα διαφέρουν μόνον σε ότι αφορά λεπτομερείς προδιαγραφές, οι κατασκευαστές μπορούν να κατασκευάζουν μερικούς βασικούς τύπους, οι οποίοι στην συνέχεια θα παράγονται σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες. Οι παράμετροι που απαιτούνται για μια λειτουργική χρήση των διατάξεων αυτών μπορούν να εισαχθούν στο σύστημα από τον χρήστη και στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούν ακόμη και να τροποποιηθούν περαιτέρω.

Τυπικό παράδειγμα του τύπου αυτών των αισθητήρων αποτελεί η οικογένεια των αισθητήρων του φαινομένου Hall από την

## Λίγα λόγια για τον συγγραφέα

Ο Helmut E.W. Lemme σπουδάζει Φυσική και Οικονομικά στο Munster, Saarbrücken και το Μόναχο. Έχοντας ξεκινήσει την καριέρα του σαν ηλεκτρονικός σχεδιαστής έγινε το 1978 εκδότης ενός περιοδικού για τα βιομηχανικά ηλεκτρονικά. Από το 1986 αρθρογραφεί ως ανεξάρτητος δημοσιογράφος ειδικευμένος σε θέματα επιστήμης και τεχνολογίας.  
Email: hewlemme@aol.com

εταιρία Micronas. Το πρώτο μοντέλο της οικογένειας αυτής ήταν το HAL800, το οποίο στην συνέχεια μετεξελίχθηκε στους νεότερους τύπους HAL805, HAL810 και HAL815. ([www.micronas.com/products/overview/sensors/index.php](http://www.micronas.com/products/overview/sensors/index.php))

Στην περίπτωση των αισθητήρων αυτών η επεξεργασία του αντίστοιχου σήματος είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Η τάση του σήματος που προέρχεται από το στοιχείο Hall είναι εξαιρετικά μικρή και υπερτίθεται πάνω σε μια σχετικά μεγάλη τάση εκτροπής. Επιπλέον και οι δύο τάσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Η αντιστάθμιση της θερμοκρασίας απαιτεί πολύπλοκα κυκλώματα και τα βέλτιστα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν μόνον με χρήση κάποιας διακοπτικής τεχνικής παρόμοιας με την αρχή λειτουργίας του ενισχυτή κερματισμού (chopper amplifier).

Με τους αισθητήρες αυτούς οι χρήστες μπορούν να ρυθμίσουν κατά βούληση οποιαδήποτε λειτουργική παράμετρο: ευαισθησία, άνω και κάτω όρια της κλίμακας μέτρησης, το εύρος ζώνης των μετρήσεων και την ποσότητα της θερμοκρασιακής αντιστάθμισης. Στο σημείο αυτό αναφέρεται μια ιδιότητα σύμφωνα με την οποία η εξάρτηση από την θερμοκρασία μπορεί είτε να κατασταλεί εντελώς (λαμβάνοντας υπόψη ακόμη και την μη γραμμικότητα, όπου για αυτόν τον σκοπό θα πρέπει να συμπεριληφθεί ένα δικτύωμα αντιστάθμισης δεύτερης τάξης), είτε να διατηρηθεί σκόπιμα κάποιο συγκεκριμένο ποσοστό θερμοκρασιακής εξάρτησης. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο αν (για παράδειγμα) ο αισθητήρας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με έναν μαγνήτη τα χαρακτηριστικά του οποίου μεταβάλλονται με την θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτόν η εξάρτηση ολόκληρου του συστήματος από τις μεταβολές της θερμοκρασίας (και επομένως και η θερμοκρασιακή εξάρτηση της απόστασης των παλμών, για παράδειγμα) μπορεί να ελαττωθεί περίπου στο μηδέν.

Υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας ο αισθητήρας αυτός τροφοδοτείται με 5 Volts και παράγει στην έξοδό του ένα αναλογικό σήμα το οποίο είναι ανάλογο με την πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Μπορεί να προγραμματιστεί αυξάνοντας την τάση τροφοδοσίας σε υψηλότερα επίπεδα και διαμορφώνοντας ανάλογα την τάση. Μια τάση μεταξύ των τιμών 5.6 - 6 V αντιστοιχεί σε Χαμηλή λογική στάθμη (λογικό '0'), ενώ μια τάση μεταξύ 6.8 - 8.5 V αντιστοιχεί σε Υψηλή λογική στάθμη (λογικό '1'). Τα δεδομένα εγγράφονται σειριακά. Κατά την λειτουργία του είδους αυτού ο αισθητήρας λειτουργεί ψηφιακά και οι εσωτερικά αποθηκευμένες τιμές των παραμέτρων μπορούν να διαβαστούν σειριακά. Ο αισθητήρας 'κλειδώνει' ηλεκτρονικά μετά το πέρας της προγραμματικής διαδικασίας και οποιοσδήποτε περαιτέρω προγραμματισμός δεν είναι πλέον εφικτός. Το σήμα εξόδου είναι και πάλι αναλογικό μετά την διαδικασία προγραμματισμού.

Η προσέγγιση αυτή διατηρεί τον αριθμό των ακροδεκτών της διάταξης σε ένα απόλυτο ελάχιστο: ακροδέκτης γείωσης (ground), ακροδέκτης τροφοδοσίας (supply voltage) και ακροδέκτης εξόδου (output). Με τον τρόπο αυτόν το συνολικό κόστος διατηρείται χαμηλό αφού κατά βάση εξαρτάται από τον τύπο της συσκευασίας της διάταξης και επομένως από τον αριθμό των ακροδεκτών. Ο αισθητήρας στην κανονική του συσκευασία, διαστάσεων 4x4x1.5 mm, μοιάζει με ένα κοινό τρανζίστορ σε πλαστική συσκευασία. Το λειτουργικό διάγραμμα των εσωτερικών του μονάδων φαίνεται στο **Σχήμα 1**.

### Σύνδεση διαύλου

Σε διάφορα συστήματα τα οποία διαθέτουν πολλούς αισθητήρες είναι οικονομικότερο να συνδέονται όλοι μαζί στον ίδιο υπολογιστή μέσω ενός κοινού διαύλου επικοινωνίας, αντί να χρησιμοποιούνται ξεχωριστές καλωδιώσεις για τον καθένα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε αισθητήρας θα πρέπει

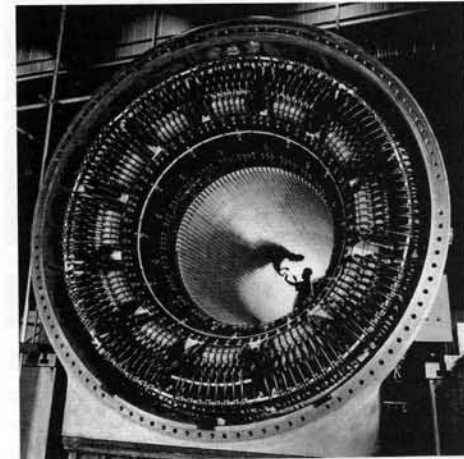
να έχει ένα δικό του κύκλωμα προσαρμογής με τον δίαυλο, το οποίο μπορεί στις περισσότερες περιπτώσεις να βρίσκεται ενσωματωμένο στο ίδιο ολοκληρωμένο του αισθητήρα. Ένα από τα πρώτα εξαρτήματα του τύπου αυτού που κυκλοφόρησαν αρχικά ήταν το LM75 της National Semiconductor, το οποίο περιλαμβάνει έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό με τεχνική δέλτα-σίγμα και μια μονάδα προσαρμογής διαύλου I2C στο ίδιο ολοκληρωμένο. Ακολούθησε μια πολύ μεγάλη ζήτηση για ολοκληρωμένα κυκλώματα του τύπου αυτού και έτσι άρχισαν να αναπτύσσονται συνεχώς πολλοί νέοι τύποι με ολοένα και ευρύτερη κλίμακα λειτουργιών η οποία ικανοποιούσε τις απαιτήσεις των ενδιαφερομένων. Τελικά η εξέλιξη αυτή οδήγησε σε σύνθετες διατάξεις συστημάτων παρακολούθησης οι οποίες (για παράδειγμα) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με έναν προσωπικό υπολογιστή για την επιτήρηση όχι μόνον της θερμοκρασίας αλλά και πολλών άλλων φυσικών ποσοτήτων, όπως η ταχύτητα περιστροφής ενός ανεμιστήρα. Στο **Σχήμα 2** δίνεται το λειτουργικό διάγραμμα των εσωτερικών μονάδων του LM87, το οποίο έχει την δυνατότητα πολλών λειτουργιών έτσι ώστε να καθιερωθεί ως ένα γενικής χρήσης 'σύστημα πρόωρης ειδοποίησης' για τους περισσότερους τύπους βλαβών. Στην περίπτωση της διάταξης αυτής ο αισθητήρας θερμοκρασίας (στο διάγραμμα κάτω αριστερά) αποτελεί ένα απλό στοιχείο του κύριου συστήματος.

### Μικροηλεκτρομηχανικό σύστημα

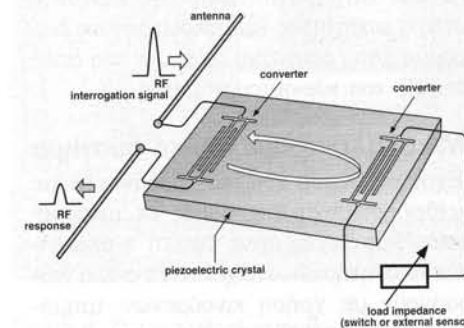
Έχοντας γνώση του πως παράγονται με ακρίβεια οι μηχανικές δομές σε μικρομετρικές διαστάσεις, έγινε εφικτή η ολοκλήρωση αισθητήρων στοιχείων τα οποία λειτουργούν με χρήση κινούμενων τμημάτων, όπως οι αισθητήρες πίεσης, δύναμης, επιτάχυνσης και περιστροφικής κίνησης. Όπου προηγούμενα συναντούσαμε μεταλλικά ή κεραμικά μέρη διαστάσεων της τάξης των χιλιοστών ή και εκατοστών,

τώρα βρίσκουμε μικροσκοπικές δομές από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο συνδυασμένες με τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά στοιχεία που είναι ανεπτυγμένα σε ένα μονολιθικό τμήμα. Ο συνδυασμός αυτός των μικρομηχανικών και μικροηλεκτρονικών στοιχείων οδηγεί στο λεγόμενο μικροηλεκτρομηχανικό σύστημα (microelectromechanical system ή MEMS).

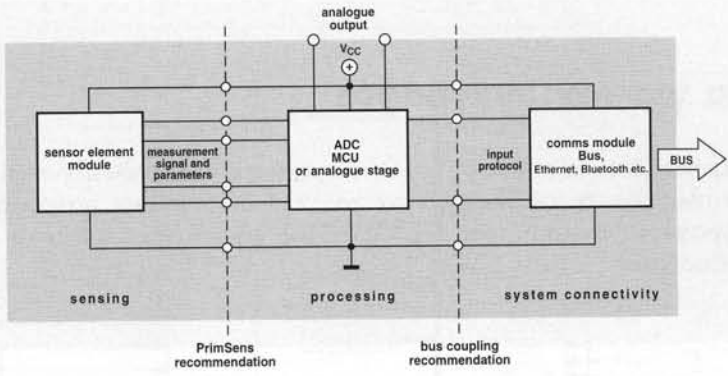
Τα πρώτα προϊόντα του τύπου αυτού που κατασκευάστηκαν σε μεγάλες ποσότητες ήταν οι αισθητήρες επιτάχυνσης για την ενεργοποίηση των αερόσακων στα αυτοκίνητα. Οι διατάξεις αυτές περιλαμβάνουν δύο διαστρωματικά συνδυασμένες δομές από πυρίτιο, η μια εκ των οποίων είναι σταθερά τοποθετημένη ενώ η άλλη τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να κινείται. Οι χωρητικότητες που αναπτύσσονται ανάμεσα στα στρώματα των δομών αυτών είναι της τάξης των femtofarad (1 femtofarad=10-15 F). Όταν ο αισθητήρας υπόκειται σε κάποιας μορφής



Σχήμα 6. Μέτρηση θερμοκρασίας με χρήση οπτικών ινών εντός μιας γεννήτριας 1300 MW όπου αναπτύσσονται εξαιρετικά υψηλές τιμές εντάσεων μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου. (Φωτο: Siemens).



Σχήμα 7. Ένας αισθητήρας ασύρματου τύπου με χρήση ακουστικών κυμάτων επιφανείας. Το σήμα απόκρισης επηρεάζεται από το προσαρμοσμένο αισθητήριο στοιχείο.



Σχήμα 5. Τμηματική τεχνική κατασκευής μικροαισθητήρων με χρήση τυποποιημένων διαύλων διασύνδεσης (PrimSens και Buscoupler). (AMA Fachverband for Sensorik e.V.)

μηχανική σύγκρουση το κινούμενο τμήμα μετατοπίζεται ελαφρά εξαιτίας της αδρανειακής του μάζας. Το γεγονός αυτό προκαλεί την αύξηση της μιας χωρητικότητας και την μείωση της άλλης, φαινόμενο το οποίο ανιχνεύεται ηλεκτρονικά με την βοήθεια ενός κυκλώματος γέφυρας. Τέτοιου είδους αισθητήρες έχουν αποδείξει ότι είναι εξαιρετικά αξιόπιστοι και μέχρι σήμερα έχουν παραχθεί συνολικά πάνω από 100 εκατομμύρια τεμάχια. Μερικοί από αυτούς είναι ευαίσθητοι και προς τις δύο κατευθύνσεις όπως ο ADXL202 της Analog Devices που φαίνεται στο Σχήμα 3 (www.analog.com).

Οι αερόσακοι των αυτοκινήτων έχουν ήδη σώσει πολλές ζωές αλλά τα ηλεκτρονικά συστήματα σταθεροποίησης μπορούν να παρέχουν ακόμη περισσότερα. Με την βοήθεια των συστημάτων αυτών είναι δυνατό να ανιχνευτεί ο ρυθμός περιστροφής του οχήματος ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας και εφόσον διαπιστωθεί ότι ξεπερνά κάποια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή εκτελούνται αυτόματι ελιγμοί στο σύστημα πέδησης και κατεύθυνσης. Σε περίπτωση περιστροφής περί τον οριζόντιο άξονα (αναποδογύρισμα) οι αερόσακοι θα πρέπει να ανοίξουν άμεσα.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα διάφορα συστήματα των αυτοκινήτων θα πρέπει να παράγονται σε μεγάλες ποσότητες με χαμηλό κόστος. Τα γυροσκόπια από ίνα γυαλιού που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά συστήματα των αεροσκαφών και των ανάλογων συστημάτων των διαστημοπλοίων είναι οικονομικά ασύμφορα. Και πάλι στην περίπτωση αυτή εξαρτήματα που περιλαμβάνουν κινητές μικρομηχανικές δομές έχει αποδειχθεί ότι είναι τα πλέον κατάλληλα, για αυτόν τον λόγο παράγονται ήδη από πολλούς κατασκευαστικούς οίκους. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο της δύναμης του Coriolis: όταν ένα υλικό σώμα σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα μετατοπιστεί γραμ-

μικά κατά την διεύθυνση της ακτίνας περιστροφής, τότε συμβαίνει μια εκτροπή κατά την διεύθυνση της εφαπτομένης της τροχιάς. Στο ολοκληρωμένο ADXRS150 της Analog Devices, μια ελαφρά αιωρούμενη μάζα διεγείρεται εκτελώντας συντονιζόμενες παλμικές κινήσεις από ηλεκτροστατικές δυνάμεις, με πλάτος ±3.5μm και συχνότητα περίπου 15 kHz. Αν το ολοκληρωμένο υποστεί περιστροφή τότε στο κινούμενο στοιχείο ασκείται μια δύναμη κάθετη στην διεύθυνση των ταλαντώσεων και με έναν τρόπο παρόμοιο με εκείνον που περιγράφηκε πιο πάνω για τον αισθητήρα επιτάχυνσης, προκαλείται μια μεταβολή της χωρητικότητας που μετράται ανάμεσα στις εσωτερικές διαδοχικές στρώσεις που συνδέονται με τους ακροδέκτες.

Στα πλαίσια μιας πρακτικής υλοποίησης, το ολοκληρωμένο κύκλωμα χρησιμοποιεί δύο αισθητήρια τμήματα των οποίων οι κινούμενες μάζες δονούνται με διαφορά φάσης. Η τεχνική αυτή όχι μόνον εξουδετερώνει την δόνηση στο εξωτερικό του ολοκληρωμένου αλλά το καθιστά επίσης και λιγότερο ευαίσθητο σε τυχόν παρεμβολές από τις δονήσεις του ίδιου του οχήματος. Στο Σχήμα 4 φαίνεται ένα μόνον τμήμα του ολοκληρωμένου με διαστάσεις μόλις 3x3 mm. Τοποθετείται σε μια συσκευασία τύπου BGA διαστάσεων 7x7x3 mm.

**Τμηματική κατασκευή**  
Παρά την σημαντική επιτυχία που έχει σημειωθεί, υπάρχει ένα πρόβλημα με την τεχνολογία των μικροσυστημάτων το οποίο αφορά το γεγονός ότι το υψηλό κόστος της ανάπτυξης και σχεδίασης μπορεί να εξουδετερωθεί μόνον αν τα συγκεκριμένα εξαρτήματα υψηλής τεχνολογίας παράγονται σε πολύ μεγάλες ποσότητες. Κάτι τέτοιο φυσικά είναι αρκετά δύσκολο για μικρομεσαίες ή και μεσαίες κατασκευαστικές εταιρίες.

Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η κα-

τασκευή των αισθητήριων διατάξεων υπό τμηματική μορφή κάνοντας χρήση διάφορων ανεξάρτητων λειτουργικών βαθμίδων, οι οποίες στην συνέχεια μπορούν εύκολα να αναπαραχθούν σε μεγάλες ποσότητες. Στο **Σχήμα 5** φαίνεται η βασική ιδέα με βάση την οποία χρησιμοποιούνται τρεις βαθμίδες, που αναπτύχθηκε από την εταιρία AMA Fachverband fur Sensorik e.V. ([www.ama-sensorik.de](http://www.ama-sensorik.de)) σε στενή συνεργασία με την βιομηχανία.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τις εξής βαθμίδες:

1) την βαθμίδα μέτρησης με το αισθητήριο στοιχείο και το κύκλωμα επεξεργασίας σήματος,

2) έναν μικροελεγκτή για πρόσθετη επεξεργασία σήματος (συμπεριλαμβανομένης και της μονάδας ψηφιοποίησης) και

3) μια μονάδα προσαρμογής σε δίαυλο επικοινωνίας, αν είναι απαραίτητη. Οι βαθμίδες χωρίζονται με δύο τυποποιημένες μονάδες προσαρμογής. Η πρώτη μονάδα καλείται 'PrimSens' ενώ η δεύτερη 'Buscoupler'. Τα πρώτα προϊόντα του τύπου αυτού εμφανίστηκαν στην Έκθεση του Ανόβερου.

Μια άλλη τεχνική τμηματικής κατασκευής ορίζει την διάταξη ενός συστήματος με την μορφή μικρών τετράγωνων πλακετών διαστάσεων από 10x10 έως και 45x45 mm, η οποίες μπορούν να τοποθετηθούν η μια πάνω στην άλλη ([www.match-x.org](http://www.match-x.org)).

## Μετρήσεις ανεπηρέαστες από παρεμβολές χωρίς ηλεκτρισμό

Οι αισθητήρες που εξετάσαμε έως τώρα αποτελούν όλοι τις 'κανονικές' αισθητήριες διατάξεις οι οποίες για να λειτουργήσουν συνδέονται με ηλεκτρικά καλώδια. Υπάρχουν εντούτοις κάποιοι χώροι στους οποίους δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση τέτοιων καλωδίων, όπως χώροι με εκρηκτικό περιβάλλον, ή σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης όπου υπάρχει μεγάλος κίνδυνος εκφορτίσεων, ή ακόμη και σε χώρους όπου αναπτύσσονται ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ή παράδειγμα κοντά σε ραδιοπομπούς ή ηλεκτρικές γεννήτριες.

Σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να υιοθετείται μια διαφορετική προσέγγιση. Μια αρκετά υποσχόμενη τεχνική είναι οι λεγόμενες οπτικές μετρήσεις στις οποίες χρησιμοποιείται φως αντί του ηλεκτρισμού. Το φως μεταφέρεται μέσω μιας γυάλινης ή πλαστικής οπτικής ίνας στον χώρο της πραγματικής μέτρησης, όπου πρόκειται να μεταβληθεί η προς μέτρηση ποσότητα και στην συνέχεια επιστρέφει μέσω της ίδιας οπτικής ίνας ή ακόμη και μέσω μιας δεύ-

τερης. Το αντίστοιχο όργανο αντιλαμβάνεται την τιμή μέτρησης από την επιστρεφόμενη ποσότητα φωτός. Ένα παράδειγμα αποτελεί το όργανο Lumitherm, που κατασκευάστηκε από την Αμερικανική εταιρία Iritek, το οποίο εκπέμπει φωτεινούς παλμούς από μια δίοδο LED μέσω μιας οπτικής ίνας στον ακροδέκτη μέτρησης και διεγείρει μια φθορίζουσα επιφάνεια. Η χρονική διάρκεια της φωτοβολίας εξαρτάται από την θερμοκρασία και το φαινόμενο αυτό το εκμεταλλευόμαστε για να κάνουμε μετρήσεις με την βοήθεια του ανακλώμενου φωτός πίσω στο όργανο μέτρησης. Συστήματα του είδους αυτού, στα οποία μια οπτική ίνα χρησιμοποιείται μόνον για την μεταφορά του φωτός, ονομάζονται 'έξωγενή' ('extrinsic') συστήματα οπτικών ινών.

Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιήσουμε και την ίδια την οπτική ίνα ως στοιχείο εκτέλεσης μιας μέτρησης. Σε τέτοια 'ενδογενή' ('intrinsic') συστήματα οπτικών ινών εκμεταλλευόμαστε την μικροσκοπική αλλά όχι αμελητέα επίδραση των εξωτερικών φυσικών φαινομένων στην διάδοση του φωτός μέσω της ίνας.

Αν επιπλέον ληφθεί υπόψη ότι το ίδιο το φως είναι κύμα τότε, μπορούμε να επιτύχουμε πολύ υψηλά επίπεδα ευαισθησίας και ανάλυσης. Σύμφωνα με μια ευρύτητα χρησιμοποιούμενη τεχνική μπορούμε να εγγράψουμε στα εσωτερικά τοιχώματα μια οπτικής ίνας ένα πλέγμα τύπου 'Bragg'. Ένα πλέγμα 'Bragg' αποτελείται από περιοδικά επαναλαμβανόμενες περιοχές με ανεβασμένο δείκτη ανάκλασης που δημιουργείται με την βοήθεια υπεριώδους ακτινοβολίας. Μια φωτεινή δέσμη μήκους κύματος που αντιστοιχεί ακριβώς στο διπλάσιο της βασικής απόστασης μεταξύ των περιοχών του παραπάνω πλέγματος, ανακλάται πίσω στην πηγή της δέσμης, ενώ οποιoδήποτε άλλο μήκος κύματος περνά χωρίς να υποστεί καμία επίδραση. Αν τεντώσουμε την οπτική ίνα τότε θα υποστεί ανάκλαση μια φωτεινή δέσμη με σχετικά μεγαλύτερο μήκος κύματος και το γεγονός αυτό μπορεί να μετρηθεί οπτικά. Αυτό οδηγεί σε ένα εξαιρετικά ευαίσθητο είδος αισθητήρα επιμηκυνσης ο οποίος λειτουργεί χωρίς ηλεκτρισμό και δεν μπορεί να επηρεαστεί από ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία όπως και δεν μπορεί να αποτελέσει πηγή παρεμβολών.

Πολλά φυσικά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν την διάδοση του φωτός μέσα από μια οπτική ίνα. Μεγέθη τα οποία μπορούν να μετρηθούν με τον τρόπο αυτό είναι η επιμήκυνση, τάση εφελκυσμού, δόνηση, ροή, στάθμη υγρών, πίεση, γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, ακτινοβολία ιόντων

και πολλά άλλα. Το γεγονός αυτό καθιστά εφικτή μια μεγάλη γκάμα διαφορετικών μετρήσεων κάτω από δυσμενείς συνθήκες, σε περιπτώσεις όπου η μέτρηση παλαιότερα θεωρούνταν αδύνατη - όπως για παράδειγμα η μέτρηση μέσα σε μια γεννήτρια 1300 MW που φαίνεται στο **Σχήμα 6**.

## Παθητικοί αισθητήρες υψηλών συχνοτήτων

Σε τμήματα μηχανών που περιστρέφονται με πολύ μεγάλες ταχύτητες, ένας σύνδεσμος αισθητήρα μέσω ενός μονωμένου δακτυλιοειδούς αγωγού πάνω στον άξονα συχνά δεν είναι ικανοποιητικά αξιόπιστος. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δυνατό να γίνει χρήση μιας εναλλακτικής τεχνολογίας αισθητήρων οι οποίοι δεν απαιτούν τοπική πηγή ηλεκτρικής τροφοδοσίας: ολοκληρωμένο κύκλωμα ακουστικών κυμάτων επιφανείας (surface acoustic wave). Τα εξαρτήματα αυτά, που κατασκευάζονται από πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους (όπως λιθίου νιόβιου), χρησιμοποιούνται ως φίλτρα διέλευσης ζώνης σε ραδιοφωνικούς δέκτες. Μια εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια εισόδου (σε συχνότητες μεταξύ μερικών εκατοντάδων MHz έως και μερικών GHz) παράγει ένα εξωτερικό μηχανικό κύμα στην επιφάνεια του κρυστάλλου. Το κύμα αυτό διαδίδεται κατά μήκος του κρυστάλλου έως ότου ανακλαστεί στο άλλο άκρο και να επιστρέψει πίσω στα ηλεκτρόδια, όπου θα δημιουργήσει ξανά μια εναλλασσόμενη τάση η οποία θα έχει μια μικρή χρονική καθυστέρηση σε σχέση με τον παλμό διέγερσης. Αν ένας αισθητήρας (για παράδειγμα ένας χωρητικός αισθητήρας πίεσης) συνδεθεί σε ένα δεύτερο ζευγάρι ηλεκτροδίων στο τέρμα του κρυστάλλου, η ανάκλαση των κυμάτων θα επηρεάζεται από τον αισθητήρα αυτόν με έναν τρόπο που θα εξαρτάται από την πίεση. Η πίεση στην περίπτωση αυτή θα μπορεί να προσδιορίζεται εκτιμώντας το επιστρεφόμενο σήμα (**Σχήμα 7**). Αν στην είσοδο συνδεθεί μια κατάλληλη κεραία τότε η επικοινωνία με τον αισθητήρα μπορεί να πραγματοποιηθεί με ραδιοκύματα.

Η τεχνολογία αυτή έχει μελετηθεί από τα τμήματα ερευνηών εταιριών κατασκευής ελαστικών αυτοκινήτων με σκοπό την συλλογή δεδομένων μετρήσεων στα ελαστικά των περιστρεφόμενων τροχών (πίεση, θερμοκρασία και τριβή) χωρίς την χρήση μπαταρίας ως πηγή τροφοδοσίας. Για περισσότερες πληροφορίες δείτε το άρθρο με τίτλο αντίστοιχο στην παρούσα έκδοση του περιοδικού.

(040129-1)