

# Τεχνολογίες επενεργητών για αυτοματισμούς

Ιωάννης Νταβλιάκος<sup>1</sup>, Παναγιώτης Χατζάκος<sup>2</sup>, Παναγιώτης Βαρθολομαίος<sup>3</sup>, Ευάγγελος Παπαδόπουλος<sup>4</sup>

## Εισαγωγή

Οι επενεργητές αποτελούν τις δρώσες διατάξεις των συστημάτων παραγωγής ισχύος. Συναντώνται στη βιομηχανία, σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, σε διατάξεις ακριβείας, σε μηχανοτρονικά συστήματα, σε καταναλωτικά προϊόντα, κτλ. Το έργο δε που επιτελούν είναι αφενός η μετατροπή ενέργειας από μία μορφή σε άλλη και αφετέρου η παραγωγή μηχανικού έργου. Τα συστήματα που περιλαμβάνουν τέτοια στοιχεία μπορεί να είναι ηλεκτρομηχανικά (ηλεκτρικοί επενεργητές), υδραυλικά (υδραυλικοί επενεργητές), πνευματικά (πνευματικοί επενεργητές), μικρορομπωτικά (επενεργητές βασιζόμενοι σε «έξυπνα» υλικά), κτλ.

## Ηλεκτρικοί επενεργητές

Οι επενεργητές αυτής της κατηγορίας αποτελούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο. Οι μηχανές αυτές είναι ευρύτατα διαδεδομένες και αποτελούν τη συντριπτική πλειονότητα έναντι των υπολοίπων επενεργητών. Απαντώνται τόσο στην καθημερινή ζωή (π.χ. βηματικούς κινητήρες υφολογίου quartz, οικιακές και καταναλωτικές συσκευές), όσο και στη βιομηχανία (π.χ. εργαλειομηχανές, αντλίες, ανεμιστήρες, ρομπότ) και άλλες δραστηριότητες (γεωργία, υπηρεσίες, έρευνα, άμυνα, κτλ.). Ενδεικτικά, το 1991 στις ΗΠΑ υπήρχαν περισσότερα από 125 εκατομμύρια κινητήρες ισχύος 1-120 hp που κατανάλωσαν το 53-58% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που παραγόταν στη χώρα αυτή. Επίσης, έχει υπολογισθεί ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες καταναλώνουν το 70% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται από τη βιομηχανία αναπτυγμένων χωρών. Αυτά τα στοιχεία κάνουν προφανές το γεγονός ότι οι σχεδιαστές κινητήρων καταβάλλουν ιδιαίτερη προσπάθεια προκειμένου να αυξήσουν την αποδοτικότητα τους και ιδίως αυτή των κινητήρων μεγάλης ισχύος. Ο διαχωρισμός των ηλεκτρικών κινητήρων εντάσσεται καταρχήν σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες ταξινομούνται περαιτέρω σύμφωνα με τα τυπικά χαρακτηριστικά τους γνωρίσματα, βλ. Σχ. 1. Πρόκειται για τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (KEP), του κινητήρες συνεχούς ρεύματος (ΚΣΡ) και τους βηματικούς κινητήρες (BK) που απαιτούν απαραίτητα ηλεκτρονική οδήγηση (drive).

Οι πλέον διαδεδομένοι KEP είναι οι σύγχρονοι και οι επαγωγικοί κινητήρες. Τα κύρια χαρακτηριστικά των σύγχρονων κινητήρων είναι οι σταθερές στροφές τους και ο μεταβλητός συντελεστής ισχύος, ελεγχόμενος από

τη διέγερσή τους. Οι περισσότεροι σύγχρονοι κινητήρες λειτουργούν στην περιοχή 100 kVA έως 100 MVA και στρέφονται μεταξύ 150-1500 rpm. Η χρήση τους απαντάται κυρίως στη βαριά βιομηχανία. Οι μεγαλύτεροι σύγχρονοι κινητήρες είναι αναστρέψιμες γεννήτριες υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν περίσσεια ενέργειας θερμικών ή πυρηνικών σταθμών για να αντλήσουν νερό από τη λίμνη του φράγματος κατά τη διάρκεια της νύκτας. Οι επαγωγικοί κινητήρες είναι οι περισσότερο διαδεδομένοι, κυρίως στη βιομηχανία, λόγω της αξιοπιστίας τους, της απλής και οικονομικής κατασκευής τους, αλλά και των μειωμένων αναγκών συντήρησής τους. Με την πρόοδο των ηλεκτρονικών οδηγήσεων, οι εφαρμογές τους επεκτείνονται σε νέους τομείς (βιοιατρική, ναυτεχνολογία, κα).

Οι ΚΣΡ μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ σε μορφή συνεχούς τάσης και ρεύματος σε μηχανική ισχύ και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος διακύμανσης στροφών και ανάπτυξη υψηλών ροπών, π.χ. ανυψωτικά μηχανήματα, πρέσες, παραγωγή χάρτου, αυτοματισμούς, ρομπότ, CNC εργαλειομηχανές, ανεμιστήρες και αντλίες κτλ. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η παρουσία τους σε κάθε είδους οχήματα (αυτοκίνητα, υποβρύχια, αεροπλάνα, διαστημόπλοια, κλπ.), όπου δεν υπάρχει ισχύς δικτύου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το διαστημικό όχημα Pathfinder που προεδαφίστηκε το 1998 στον Άρη, το οποίο διέθετε μεγάλη απόδοση ΚΣΡ μόνιμου μαγνήτη. Οι κινητήρες αυτού του είδους είναι επίσης οι συχνότερα απαντώμενοι σε αυτοκίνητα, σερβομηχανισμούς και μηχανοτρονικές διατάξεις.

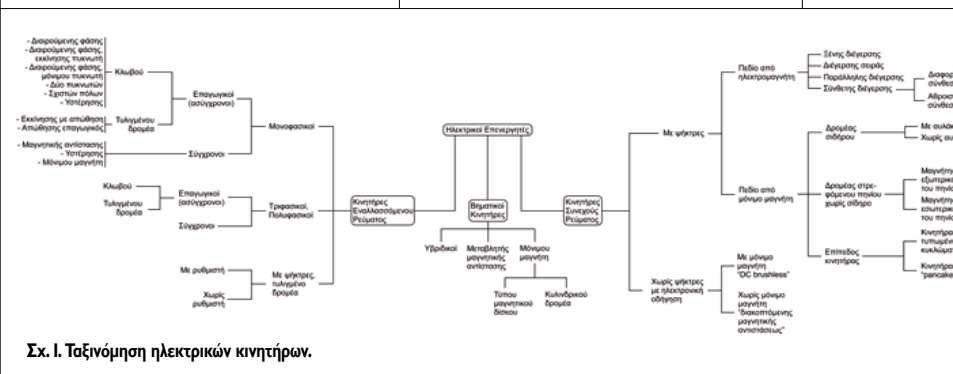
Οι βηματικοί κινητήρες είναι σχετικά χαμηλής ισχύος. Η οδήγησή τους μετατρέπει ψηφιακές εντολές σε διακριτούς παλμούς τάσης συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες μετατρέπουν αυτούς τους παλμούς σε διακριτή γωνιακή μετατόπιση του δρομέα ή γωνιακό βήμα. Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται μικρή αυξητική γωνιακή μετατόπιση του δρομέα ή επαναλαμβανόμενη κίνηση, χωρίς τη χρήση συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου. Συνήθεις εφαρμογές είναι ο ψηφιακός έλεγχος λειτουργιών μηχανών, ο έλεγχος θέσης εκτυπωτών, ψηφιοποιητών, ο έλεγχος θέσης ακτίνων laser κλπ.

Σήμερα πάντως, η κλασική αυτή διάκριση των κινητήρων στις τρεις κατηγορίες αρχίζει να χάνει τη σημασία της λόγω της ανάπτυξης των οδηγήσεων. Αυτές μπορούν και αλλάζουν τα χαρακτηριστικά των κινητήρων με την επιβολή κατάλληλων τάσεων ή ρευμάτων. Με

αυτές, μπορεί για παράδειγμα να χρησιμοποιηθεί ένας επαγωγικός κινητήρας σε εφαρμογή που θα απαιτούσε σερβοκινητήρα. Επιπλέον, οι οδηγήσεις εμφανίζονται συχνά ενσωματωμένες με τους κινητήρες, έτσι ώστε το μόνο που απαιτείται είναι μία εντολή τάσης 0-10V. Παραδείγματα είναι οι επαγωγικοί κινητήρες με ενσωματωμένο αντιστροφή και ελεγκτή της Siemens και οι ΚΣΡ χωρίς ψήκτες της οικογένειας Smart Motor της Animatics, βλ. Σχ. 2.

Στο Σχ. 3 εικονίζεται μία διάταξη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου (ΕΑΕ) της Σχολής Μηχανολόγων

ίδια ονομαστική ισχύ. Αυτή η διαφορά βάρους οφείλεται στις υψηλές πιέσεις των υδραυλικών συστημάτων, όπου πιέσεις μέχρι 300 bar είναι συνήθεις, ενώ ο μαγνητής ενός ηλεκτρικού κινητήρα μπορεί να ασκήσει ελκτική δύναμη που αντιστοιχεί σε πίεση μέχρι 20 bar. Ωστόσο, οι υδραυλικοί επενεργητές, υστερούν ως προς το συνολικό κόστος, το θόρυβο του τροφοδοτικού, την αποθήκευση του υδραυλικού μέσου (λάδι ή νερό), ή τον αυξημένο βαθμό επικινδυνότητας σε διαρροή. Το τελευταίο μειονέκτημα περιορίζεται σημαντικά στην περίπτωση όπου το υδραυλικό μέσο από υδραυλικό λάδι αντικατασταθεί με



Σχ. 1. Ταξινόμηση ηλεκτρικών κινητήρων.

Μηχανικών (ΜΜ) του ΕΜΠ, αποτελούμενη από έναν επενεργητή και ένα φορτίο αξονικά συζευγμένα. Ο επενεργητής είναι ένας επαγωγικός κινητήρας με οδήγηση αντιστροφή (inverter), ενώ το ρόλο του φορτίου αναλαμβάνει ένας ΚΣΡ ελεγχόμενος από οδήγηση τεσσάρων τεταρτημωρίων.

## Υδραυλικοί επενεργητές

Με τον όρο υδραυλικοί επενεργητές ορίζονται τα στοιχεία που μετατρέπουν την υδραυλική ενέργεια σε μηχανικό έργο. Συναντώνται μεταξύ άλλων στη βιομηχανία, στη ναυπηγική, σε μηχανισμούς κατασκευής γεφυρών και φραγμάτων, σε αυτοκινούμενα οχήματα, σε χρωματογραφικά μηχανήματα, σε σύνθετες κινήσεις τηλεσκοπίων και κερατών, σε πυρηνικούς σταθμούς, ενώ τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση τους έχει επεκταθεί και σε νέες εφαρμογές, όπως στη ρομπωτική, στους αυτοματισμούς, στη διαστημική, κτλ. Μερικά από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των επενεργητών αυτών είναι η ικανότητά τους για δημιουργία μεγάλων δυνάμεων και ροπών, ο υψηλός λόγος δύναμης προς βόρος και η άμεση απόκριση συστήματος. Έτσι για παράδειγμα, οι υδραυλικοί κινητήρες έχουν βόρος πολύ μικρότερο από αυτό των ηλεκτρικών κινητήρων για την

Μηχανικών (ΜΜ) του ΕΜΠ, αποτελούμενη από έναν επενεργητή και ένα φορτίο αξονικά συζευγμένα. Ο επενεργητής είναι ένας επαγωγικός κινητήρας με οδήγηση αντιστροφή (inverter), ενώ το ρόλο του φορτίου αναλαμβάνει ένας ΚΣΡ ελεγχόμενος από οδήγηση τεσσάρων τεταρτημωρίων.

Μηχανικών (ΜΜ) του ΕΜΠ, αποτελούμενη από έναν επενεργητή και ένα φορτίο αξονικά συζευγμένα. Ο επενεργητής είναι ένας επαγωγικός κινητήρας με οδήγηση αντιστροφή (inverter), ενώ το ρόλο του φορτίου αναλαμβάνει ένας ΚΣΡ ελεγχόμενος από οδήγηση τεσσάρων τεταρτημωρίων.



**Σχ. 2. Ελεγχόμενος επαγωγικός κινητήρας (Siemens) και Smart Motor (Animatronics).**

αυτών. Τέτοιοι κινητήρες απαντώνται στη βιομηχανία για την κίνηση ειδικών εργαλειομηχανών, στα πλοία για την περιστροφή του πηδάλιου τους, σε κινούμενες μηχανές για βοηθητικές κινήσεις κλπ. Γενικά, το κύριο πλεονέκτημα των υδραυλικών κινητήρων και δη των εμβολοφόρων είναι ότι μπορούν να αναπτύξουν μεγάλη στρεπτική ροπή ακόμα και κατά την εκκίνησή τους. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στους κινητήρες με οδοντωτούς τροχούς ή με πτερύγια, διότι λόγω των εξορροπητικών εδράνων και της χαμηλής πίεσης στο αρχικό στάδιο δεν είναι δυνατή η απαιτούμενη πρόσφυση και η δημιουργία της απαραίτητης στεγανότητας για την ανάπτυξη της

υψηλής στρεπτικής ροπής εκκίνησης. Έτσι, η κατασκευή που οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα φαίνεται να είναι αυτή με τα έμβολα, αξονικά ή ακτινικά.

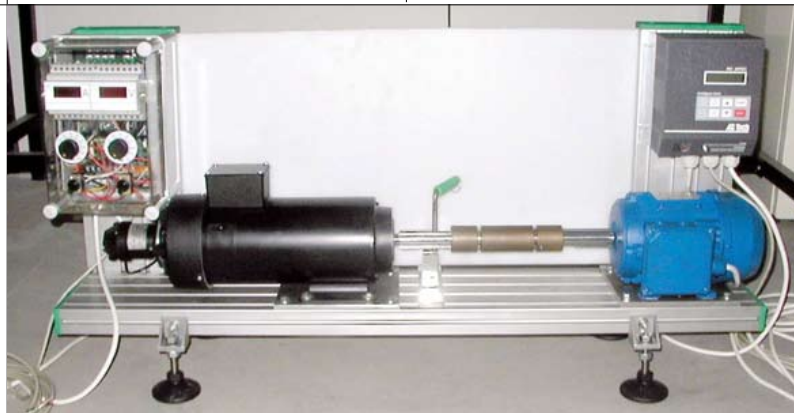
Οι υδραυλικοί κύλινδροι ταξινομούνται στους κύλινδρους απλής και διπλής ενέργειας, οι οποίοι είναι και οι πλέον χρησιμοποιούμενοι. Επιπλέον, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραλλαγών κυλίνδρων, που κάθε μία προορίζεται για ειδική χρήση. Εδώ, αναφερόμαστε σε δύο μόνο παραλλαγές, οι οποίες είναι και από τις πιο διαδεδομένες. Πρόκειται για τους τηλεσκοπικούς κύλινδρους, στους οποίους επιτυγχάνεται διαδρομή του βάρικου πολλαπλάσια του αρχικού μήκους και τους κύλινδρους δύο ταχυτήτων, όπου ακόμα και αν η παροχή ρευστού παραμένει σταθερή, αναπτύσσονται δύο ταχύτητες του εμβόλου.

Τα υδραυλικά συστήματα έχουν πλέον εισέλθει στην ψηφιακή εποχή, με ψηφιακή ανάδραση θέσης των εμβόλων, ενσωματωμένους ψηφιακούς ενισχυτές και με γρήγορες on-off βαλβίδες και ψηφιακό έλεγχο ροής. Στο Σχ. 5 εικονίζονται δύο ηλεκτροϋδραυλικά σερβוסυστήματα, τα οποία διαθέτει το ΕΑΕ της Σχολής ΜΜ, ΕΜΠ, για εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου. Πρόκειται για έναν υδραυλικό κύλινδρο διπλής ενέργειας, ο οποίος οδηγείται από σερβοβαλβίδα υψηλής απόδοσης, εύρους συχνότητας 100 Hz και για ένα τηλερομπωτικό σύστημα master-slave της SARCOS, με δέκα βαθμούς ελευθερίας στο κάθε ρομπότ που κινούνται με τη βοήθεια σερβούδραυλικών κινητήρων και ειδικών σερβοβαλβίδων jet-ripe.

**Πνευματικοί επενεργητές**

Οι πνευματικοί επενεργητές μετατρέπουν την ενέργεια του συμπιεσμένου αέρα σε μηχανική κίνηση. Η κίνηση μπορεί να είναι γραμμική ή περιστροφική ανάλογα με το εάν χρησιμοποιείται κύλινδρος ή κινητήρας. Οι συνθέστεροι τύποι πνευματικών κυλίνδρων είναι οι απλής ενέργειας, στους οποίους η επιστροφή του βάρικου επιτυγχάνεται με ελατήριο, οι διπλής ενέργειας, οι βαρέος τύπου με ενισχυτικές ράβδους παράλληλα με το σώμα του κυλίνδρου και οι συμπαιγείς για εφαρμογές με περιορισμό χώρου. Επίσης κατασκευάζονται χωρίς βάρικο, με οδηγούμενο βάρικο, με διπλό βάρικο, με αρπάγες, κλπ. Οι περιστροφικοί κινητήρες συνήθως κατασκευάζονται με πτερύγια. Υπάρχουν επίσης ημι-περιστροφικοί κινητήρες που συνδυάζουν την πνευματική εκτόνωση με μηχανισμό που μετατρέπει τη γραμμική κίνηση σε περιστροφική.

Οι πνευματικοί επενεργητές χρησιμοποιούνται σε συστήματα μέσης ισχύος, βλ. Σχ. 6. Συναντώνται ευρέως στη βιομηχανία σε εφαρμογές αυτοματισμών που σχετίζονται με τις γραμμές παραγωγής, το πακετάρισμα προϊόντων, τη διεύθυνση παλετών, κτλ. Οι πνευματικοί επενεργητές συνδυάζουν την ταχύτητα απόκριση των υδραυλικών επενεργητών με την καθαρότητα των ηλεκτρικών επενεργητών. Επιπλέον, οι πνευματικοί



**Σχ. 3. Ηλεκτρομηχανική διάταξη με ελεγχόμενο DC και επαγωγικό κινητήρα. ΕΑΕ Σχολής ΜΜ, ΕΜΠ.**



**Σχ. 4. Ταξινόμηση υδραυλικών επενεργητών.**

επενεργητές είναι ιδανικοί για επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως αυτά που υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης, είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στην υπερφόρτωση, το «στολάρισμα» και την παρατεταμένη λειτουργία καθώς δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση. Ο αέρας που χρησιμοποιείται ως μέσο ισχύος στα πνευματικά συστήματα παίζει και το ρόλο του λιπαντικού. Επίσης, η κίνηση τους είναι ομαλή αφού ο αέρας στο εσωτερικό τους προσδίδει απόσβεση στο σύστημα, με αποτέλεσμα φαινόμενα ταλαντώσεων και συντονισμών σε ένα πνευματικό σύστημα να παρουσιάζονται σπανιότερα. Τέλος, τα βασικά συστατικά της πνευματικής τεχνολογίας είναι σχετικά φθηνά και ο σχεδιασμός μιας πνευματικής εγκατάστασης ή η επιλογή ενός πνευματικού επενεργητή απλή, ενώ το τελικό σύστημα μπορεί εύκολα να επαναδιαμορφωθεί εάν παραστεί ανάγκη.

Οι πνευματικοί επενεργητές χρησιμοποιούνται στην πλειονότητά τους σε εφαρμογές ανοικτού βρόχου ελέγχου θέσης ή ταχύτητας και σε διαδικασίες όπου απαιτείται διαδοχική επεξεργασία on-off και αλληλουχία κινήσεων. Οι εφαρμογές κλειστού βρόχου που χρησιμοποιούν πνευματικά στοιχεία είναι ακόμα περιορισμένες, κυρίως

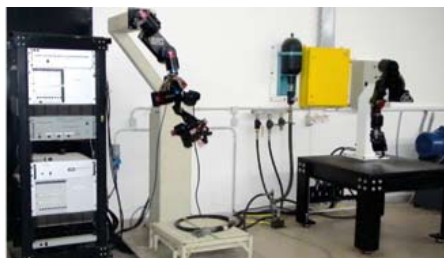
λόγω της συμπεστότητας του αέρα που εισάγει υψηλού βαθμού δυσκολία κατά τη μαθηματική μοντελοποίηση του επενεργητή και των στοιχείων οδήγησης του όσο και κατά τον έλεγχο του στην πράξη από αναλογικές πνευματικές βαλβίδες. Ωστόσο, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται σταθερές δυνάμεις εκτόνωσης, συμπίεσης ή συγκράτησης, ενδείκνυται η χρήση των πνευματικών επενεργητών, οδηγούμενων από ψηφιακές πνευματικές βαλβίδες ελέγχου.

**Επενεργητές έξυπνων υλικών (smart materials)**

Τα έξυπνα υλικά είναι συνήθως κεραμικά, πολυμερή ή κράματα μετάλλων, τα οποία αποκρίνονται καλύτερα από σύνθετες καταγερασίες. Τα υλικά αυτά είναι ευαίσθητα σε μεταβολές στις συνθήκες του περιβάλλοντα χώρου, όπως μεταβολές στη θερμοκρασία, πίεση, pH, ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο κτλ. και αποκρίνονται κατάλληλα σε αυτές. Τα περισσότερα από αυτά προκαλούν μεγάλες δυνάμεις και μικρές μετατοπίσεις, υπάρχουν όμως και έξυπνα υλικά τα οποία αποκρίνονται μεταβάλλοντας άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως το ιξώδες τους ή την δυσκαμψία τους. Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε



(α)



(β)

Σχ. 5. Εφαρμογές ηλεκτροϋδραυλικών σερβοσυστημάτων στο ΕΑΕ. (α) Πειραματικό σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας (υδραυλικός σερβοενεργητής και υδραυλική μονάδα τροφοδοσίας), (β) Τηλερομπτικό σύστημα master-slave της SARCOS.

συστήματα χαμηλής ισχύος και μικρών διαστάσεων, αλλά με πολύ υψηλές απαιτήσεις σε ακρίβεια κίνησης, όπως π.χ. σε χειρουργικά εργαλεία, κεφαλές μαγνητικών δίσκων, συστήματα μικροσκοπίου, βαλβίδες ακριβείας, κα. Επίσης, έχουν χρησιμοποιηθεί σε σύνθετες κατασκευές μεγάλης κλίμακας όπως γέφυρες, αντισεισμικά κτήρια, πτερύγια αεροσκαφών και οχήματα με κύριο σκοπό την ενεργητική απόσβεση κραδασμών. Τα έξυπνα υλικά είναι ήδη διαδεδομένα στον βιομηχανικό και κατασκευαστικό τομέα του εξωτερικού και η εισαγωγή τους στην ελληνική βιομηχανία θα οδηγήσει σε βελτίωση της ποιότητας παραγωγής και σε αύξηση της ασφάλειας και του χρόνου ζωής των κατασκευών.

Όπως τα πιο διαδεδομένα έξυπνα υλικά είναι τα πιεζοηλεκτρικά, τα οποία εμφανίζουν ηλεκτρικό πεδίο όταν εφαρμόζονται σε αυτά μηχανικές τάσεις (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) ή αντίστροφα, παραμορφώνονται όταν βρεθούν μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Είναι χαμηλού κόστους, προσφέρουν πολύ μεγάλες δυνάμεις επενέργειας και ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια μετατόπισης με εξαιρετική δυναμική απόκριση. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των επενεργητών αυτών είναι τα ακριβά και ογκώδη ηλεκτρονικά και οι υψηλές ηλεκτρικές τάσεις που απαιτούνται για την οδήγησή τους. Τα κυριότερα πεδία εφαρμογής των πιεζοηλεκτρικών επενεργητών είναι στους μηχανισμούς ακριβείας, τη μετρολογία, τη ναυτοτεχνολογία, τα οπτικά συστήματα, τα συστήματα μικροσκοπίου, κ.ά. Πλέον υπάρχουν πολλές ευρωπαϊκές και αμερικανικές εταιρείες οι οποίες εξειδικεύονται στην κατασκευή και εμπορία πιεζοηλεκτρικών επενεργητών. Επίσης, αρκετά διαδεδομένα είναι τα υλικά που παρουσιάζουν το φαινόμενο πλαστικής μνήμης κράματος (shape memory alloys-SMAs). Αυτά είναι κράματα νικελίου-τιτανίου (Nitinol) που έχουν την ιδιότητα να εφαρμόζουν μεγάλες δυνάμεις με μικρές μετατοπίσεις σε αντίθεση για παράδειγμα με τις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις που τείνουν να παράγουν μικρές δυνάμεις

(ροπές) με μεγάλες μετατοπίσεις (περιστροφές). Σύρματα από Nitinol μπορούν να εκταθούν εύκολα σε θερμοκρασία δωματίου με μικρές δυνάμεις. Εάν όμως περάσει ρεύμα μέσα από αυτά, το σύρμα θερμαίνεται και επιστρέφει στο αρχικό μήκος, εφαρμόζοντας ισχυρές δυνάμεις. Για παράδειγμα, ένα σύρμα μάζας 15 gr και μήκους 10 cm όταν συσταλεί με ρεύμα 0,2 A γίνεται 9,6 cm και εφαρμόζει δύναμη 1,3 N. Συνήθως, τα υλικά αυτά εφαρμόζουν 200 MN/m<sup>2</sup> και ο λόγος ισχύος ανά μονάδα μάζας είναι 50 kW/kg. Συνήθως το υλικό θερμαίνεται ταχύτερα με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά ψύχεται αρκετά αργά χρησιμοποιώντας εξωτερική ψύξη. Ο παραπάνω κύκλος λειτουργίας έχει μεγάλη επαναληψιμότητα. Τα κράματα πλαστικής μνήμης επιτυγχάνουν παραμορφώσεις 5% του φυσικού τους μήκους αλλά έχουν μικρή συχνότητα λειτουργίας λόγω του απαιτούμενου χρόνου ψύξης. Έχουν αρκετές εφαρμογές στην ιατρική (π.χ. ενεργητικό καθετήρ), τη ρομποτική (π.χ. μικροραρπάγη) και τις οικιακές συσκευές (π.χ. θερμοστατικοί μηχανισμοί σε βραστήρες).

Συναφείς ιδιότητες παρουσιάζουν τα shape memory polymers, τα οποία όμως ελέγχονται ευκολότερα. Τα πολυμερή αυτά μετατρέπουν χημική ή ηλεκτροχημική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια (δυνάμεις και μετατοπίσεις). Περιλαμβάνουν τα polyelectrolyte gels, το φυσικό και τεχνητό ελαστικό, και το cross-linked collagen. Τα υλικά αυτά εκτείνονται ή συστέλλονται σε μεγάλο βαθμό με μικρές αλλαγές σε εξωτερικές συνθήκες όπως το pH, το ηλεκτρικό πεδίο, η θερμοκρασία και ακόμη το φως. Συνήθως, τα υλικά αυτά εφαρμόζουν 100 - 300 kN/m<sup>2</sup> και ο λόγος ισχύος ανά μονάδα μάζας είναι 6 W/kg. Μεγάλη χρησιμότητα αρχίζουν να έχουν τα έξυπνα ρευστά τα οποία εμφανίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη ονομάζεται ηλεκτρορολογική (electrorheological) όπου το ιξώδες του ρευστού μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Η δεύτερη ονομάζεται μαγνητορολογική (magnetorheological), όπου το ιξώδες μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή



Σχ. 6. (α) Πνευματικοί κύλινδροι. (β) Πνευματικές βαλβίδες με διανεμητή.

εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τέτοιου τύπου υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενεργητικής απόσβεσης με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα αυτά των αναρτήσεων των αυτοκινήτων και των μηχανισμών για ιατρική αποκατάσταση αναπήρων. Επίσης, υπάρχουν υλικά που ενώ έχουν προς το παρόν μικρή χρηστική εμπειρία, προβλέπεται ότι στο μέλλον θα χρησιμοποιηθούν σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Το έξυπνο gel είναι πολυμερές το οποίο έχει τη δυνατότητα για διόγκωση/ συρρίκνωση ανάλογα με τις μεταβολές στην εξωτερική θερμοκρασία, το pH ή το ηλεκτρικό πεδίο. Οι μαγνητοσυστολικοί επενεργητές είναι σιδηρομαγνητικά υλικά τα οποία παραμορφώνονται παρουσία μαγνητικού πεδίου. Παρέχουν παραμορφώσεις 0,15-0,2% του φυσικού μήκους, μεγάλες δυνάμεις και μεγάλη ακρίβεια παραμόρφωσης αλλά απαιτούν μεγάλα ρεύματα για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου. Τέλος, τα θερμοσυστολικά υλικά παραμορφώνονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Προσφέρουν μεγάλες δυνάμεις αλλά μικρή συχνότητα λειτουργίας και μικρή ακρίβεια παραμόρφωσης. Στο Σχ. 7 εικονίζονται τρεις επενεργητές τύπου στοιβας, οι οποίοι με κατάλληλη ηλεκτρονική οδήγηση χρησιμοποιούνται σε μικρορομποτικά συστήματα.

**Βιβλιογραφία**

1. Ε. Παπαδόπουλος, Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1999.
2. H. E. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley, 1967.
3. N. B. Παναγιωτόπουλος, Υδροστατικές Μεταδόσεις Κίνησης, Εκδόσεις Ζήτη & Σία ΟΕ, 1985.
4. Θ. Ν. Κωστόπουλος, Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα, Εκδόσεις Συμείων, 1999.
5. H. T. Banks, R. C. Smith, Y. Wang, "Smart Material Structures: Modeling, Estimation and Control," Wiley,



Σχ. 7. Πιεζοηλεκτρικοί επενεργητές τύπου στοιβας για εφαρμογή σε μικροδιάταξη του ΕΑΕ, Σχολής ΜΜ, ΕΜΠ.

6. R. C. Smith, Smart Material Systems: Model Development, Frontiers in Applied Mathematics, No. 32, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2005.

- 1 Υποψήφιος Διδάκτορας, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, (ΕΑΕ), Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- 2 Υποψήφιος Διδάκτορας, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, (ΕΑΕ), Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- 3 Υποψήφιος Διδάκτορας, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, (ΕΑΕ), Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- 4 Αναπληρωτής Καθηγητής, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, (ΕΑΕ), Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ