

Τα υδροπνευματικά συστήματα στην 4η Βιομηχανική Επανάσταση

Η εξάπλωση των υδραυλικών και πνευματικών συστημάτων αυτοματισμού σε ένα ευρύ πεδίο τεχνολογικών εφαρμογών, τα τελευταία σαράντα χρόνια, έχει δώσει σημαντική ώθηση στην εξέλιξη της βιομηχανικής παραγωγής. Πλέον τα υδροπνευματικά συστήματα γίνονται αναπόσπαστο κομμάτι της 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0).

ΤΩΝ Κ. Κ. ΙΩΑΝΝΗ ΝΤΑΒΛΙΑΚΟΥ
& ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ*

Ως υδροπνευματικό σύστημα αυτοματισμού εννοείται κάθε διάταξη ή εγκατάσταση της οποίας τα βασικά δομικά συστατικά της αποτελούνται από υδραυλικά ή πνευματικά υποσυστήματα, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στον αυτόματο έλεγχο. Η επιστήμη των υδροπνευματικών συστημάτων αυτοματισμού έχει οικοδομηθεί στο συνδυασμό θεμελιωδών αρχών της κλασικής υδραυλικής και της θεωρίας του αυτόματου ελέγχου. Πληθώρα εφαρμογών συστημάτων υδροπνευματικών αυτοματισμών απαντώνται σε πολλά πεδία έρευνας και τεχνολογίας, όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, τα ενεργειακά συστήματα, η αεροναυπηγική και διαστημική τεχνολογία, οι τηλεπικοινωνίες, η βιομηχανία, η βιοϊατρική, η ρομποτική κτλ.

Είναι πλέον αντιληπτό ότι οι ταχύτατοι ρυθμοί ανάπτυξης και εξέλιξης στο πεδίο των υδροπνευματικών αυτοματισμών καθιστούν επιτακτική τη συνεργασία διαφορετικών κλάδων εφαρμοσμένων επιστημών, όπως της Μηχανολογίας, της Ηλεκτρολογίας / Ηλεκτρονικής και της Πληροφορικής. Συνεπώς, θα ήταν σκόπιμο, στο παρόν άρθρο να εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας στις εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής στο πλαίσιο της 4ης Βιομηχα-

νικής Επανάστασης (Industry 4.0). Θα αναφερθούμε σε ένα παράδειγμα μιας συγκεκριμένης εφαρμογής, αλλά και στις προεκτάσεις των προκλήσεων που θα προκύψουν από τη χρήση τέτοιων συστημάτων αυτοματισμού.

Τα υδροπνευματικά συστήματα στις βιομηχανικές επαναστάσεις

Σε παλαιότερο άρθρο[1] είχαμε κάνει εκτενή ιστορική αναδρομή για τα υδροπνευματικά συστήματα, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Εδώ θα επικεντρωθούμε σε μία σύντομη ανασκόπηση των φάσεων εξέλιξης των συστημάτων αυτών και των σημείων-σταθμών που αποτέλεσαν οι βιομηχανικές επαναστάσεις.

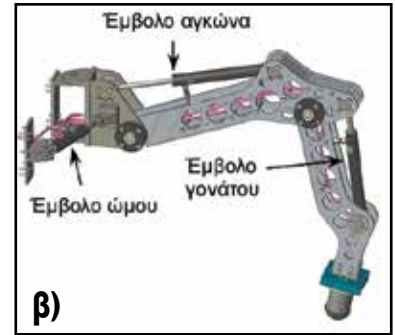
Η πρώτη βιομηχανική επανάσταση ουσιαστικά εκδηλώθηκε με την εκμηχάνιση της κλωστοϋφαντουργίας στα τέλη του 18ου αιώνα στη Βρετανία με τη χρήση ισχύος από νερό και ατμό, και στη συνέχεια επεκτάθηκε και στην υπόλοιπη Ευρώπη με ταχείς ρυθμούς. Αν και η τεχνολογία των υδροπνευματικών συστημάτων δεν έχει να επιδείξει αξιόλογα επιτεύγματα στο πλαίσιο της πρώτης βιομηχανικής επανάστασης, ωστόσο οι βάσεις της θεωρίας των συστημάτων αυτών αναπτύχθηκαν ευρέως και εδραιώθηκαν σε αυτή τη χρονική περίοδο. Ένα από τα πιο

αξιόλογα τεχνολογικά επιτεύγματα, μεταξύ πρώτης και δεύτερης βιομηχανικής επανάστασης (1882) θεωρείται αυτό της κατασκευής υδραυλικού συστήματος στο Λονδίνο, το οποίο διοχέτευε κάτω από τους δρόμους και μέσω δικτύου αγωγών νερό υπό πίεση, ως κινητήριο μέσο μηχανικού εξοπλισμού εργοστασίων.

Η δεύτερη βιομηχανική επανάσταση έκανε την εμφάνισή της στις αρχές του 20ου αιώνα, όταν ο Henry Ford (1863-1947) εμπνεύστηκε την κινητή γραμμή συναρμολόγησης και χάρις σ' αυτή ξεκίνησε η εποχή της μαζικής παραγωγής. Η ισχύς εδώ ήταν ηλεκτρικής μορφής. Σημείο-σταθμό για την κλασική υδραυλική κυρίως αποτελεί η δεκαετία του 1920, όταν ύστερα από συστηματική μελέτη και έρευνα αναπτύχθηκαν οι πρώτες ολοκληρωμένες υδραυλικές μονάδες αποτελούμενες από αντλία, κινητήρα, σωληνώσεις και χειριστήρια.

Ο επόμενος σημαντικός σταθμός των υδροπνευματικών συστημάτων ήταν η εξέλιξη στην κίνηση και τον έλεγχο εργαλειομηχανών, χρωματοουργικών και οικοδομικών βαρέων μηχανών, γεωργικών μηχανημάτων και μηχανημάτων ορυχείων. Πλέον, η υδροπνευματική ισχύς μπορεί να συναγωνιστεί με επιτυχία και να ξεπεράσει σε πολλές περιπτώσεις τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα. Κύρια πλεονεκτήματά της είναι η ευχρηστία και η ικανότητα πολλαπλασιασμού δυνάμεων με υψηλό συντελεστή απόδοσης. Χαρακτηρίζεται δε από ταχεία και ακριβή απόκριση στις εντολές ελέγχου. Στα μέσα του 20ου αιώνα εμφανίστηκαν νέες τεχνολογίες. Από την εποχή της κλασικής βιομηχανικής εποχής περάσαμε στην εποχή της πληροφορίας, της πληροφορικής και των επικοινωνιών. Ήταν ο πρόδρομος της ψηφιακής εποχής. Η ψηφιακή εποχή απετέλεσε την τρίτη βιομηχανική επανάσταση, επιτεύγματα της οποίας είναι π.χ. ηλεκτρονικά, αυτοματισμοί, έξυπνο λογισμικό, καινοτόμα υλικά, επιδέξια ρομπότ, τριδιάστατη εκτύπωση κτλ.

Στον τομέα των υδροπνευματικών συστημάτων αυτοματισμού εμφανίζεται ο νέος κλάδος της υδροτρονικής (hydrotronics), ο οποίος αποτελεί υποσύνολο των μηχανοτρονικών συστημάτων (mechatronics). Σερβοϋδραυλικά ρομποτικά συστήματα υψηλών επιδόσεων έχουν κατακλύσει τη βιομηχανία και τα ερευνητικά κέντρα (εικόνα 1), ενώ αποτελούν μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές σε όλες τις φάσεις βιομηχανικών, γεωργικών και αμυντικών δραστηριοτήτων.



ΕΙΚΟΝΑ 5: Ένα πόδι του ηλεκτροϋδραυλικού ρομπότ HexaTerra με τους τρεις υδραυλικούς επενεργητές διπλής δράσης. α) Πραγματικό σύστημα. β) Σχεδιαστική απεικόνιση.



ΕΙΚΟΝΑ 4: Μία από τις δύο συστοιχίες αναλογικών βαλβίδων 4 διαδρομών και 3 θέσεων του ηλεκτροϋδραυλικού ρομπότ HexaTerra.

Για παράδειγμα, όλα τα σύγχρονα μέσα μαζικής μεταφοράς χρησιμοποιούν υδροπνευματικά συστήματα ελέγχου για τα υποσυστήματα κατεύθυνσης και πέδησής τους, ενώ η μαζική παραγωγή σε πολλές βιομηχανίες στηρίζεται αποκλειστικά στη χρήση ανάλογων συστημάτων.

Στις μέρες μας έχουμε μεταβεί πλέον στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, χαρακτηριστικά της οποίας είναι η τεχνητή νοημοσύνη, ο σημασιολογικός ιστός (Web 3.0), το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things, IoT), η ναυοτεχνολογία, η βιοτεχνολογία, η εξελιγμένη ρομποτι-

ακρίβεια, την ευστάθεια, την ευρωστία και τον υψηλό βαθμό απόδοσης.

Σερβοϋδραυλικό ρομποτικό σύστημα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα παράδειγμα σερβοϋδραυλικού ρομποτικού συστήματος που ανήκει στην κατηγορία των υδροπνευματικών συστημάτων αυτοματισμού της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης. Πρόκειται για ένα εξάποδο ρομποτικό σερβοσύστημα (εικόνα 2) με υδραυλικές οδηγίες (HexaTerra), το μηχανολογικό και ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα του οποίου μελετήθηκε, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε από την ομάδα του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου (ΜΚ&ΑΕ) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ [2].

Οι διαστάσεις του ρομπότ είναι 2m x 3m x 2m (μήκος / πλάτος / μέγιστο ύψος) και αποτελείται από 18 βαθμούς ελευθερίας (τρεις για κάθε πόδι), καθένας από τους οποίους είναι ένας υδραυλικός επενεργητής (με έμβολα διπλής δράσης). Η χρήση του ρομποτικού συστήματος αυτού προορίστηκε για υποθαλάσσιες δραστηριότητες υψηλού βαθμού δυσκολίας. Συγκεκριμένα, το ρομπότ μπορεί να φέρει κατάλληλο εξοπλισμό εκσκαφικού τύπου, ενώ κατασκευάστηκε έτσι ώστε να ποντίζεται σε συγκεκριμένα βάθη δύσβατων θαλάσσιων περιοχών,

Όλα τα σύγχρονα μέσα μαζικής μεταφοράς χρησιμοποιούν υδροπνευματικά συστήματα ελέγχου για τα υποσυστήματα κατεύθυνσης και πέδησής τους

κή κ.ά. Η διείσδυση των ρομπότ στη βιομηχανία πλέον θα είναι καθολική.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τα υδροπνευματικά συστήματα αυτοματισμού πρόκειται να διαδραματίσουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις τεχνολογικές εξελίξεις των επόμενων δεκαετιών, αφού κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης θα είναι η άμεση και γρήγορη απόκριση των συστημάτων αυτοματισμού, σε συνδυασμό με την

με σκοπό να ανοίγει αυλάκια ακόμη και σε απόκρημνες ακτές, ώστε να τοποθετούνται καλώδια ισχύος προερχόμενα από ανεμογεννήτριες στη θάλασσα. Ο σχεδιασμός του ρομπότ πραγματοποιήθηκε με χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης, σύμφωνα με τις οποίες προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις και οι βασικές κατασκευαστικές παράμετροι του ρομπότ (π.χ. κυρίως σώμα, πόδια με γόνατο και πέλμα κ.ά.).

Ο βηματισμός, η ευστάθεια και η δυναμική ισορροπία του ρομπότ μελετήθηκαν έτσι ώστε να προβλέπονται τα πιο δυσμενή σενάρια κίνησής του (π.χ. τρίτοδος βηματισμός, απότομη αλλαγή κλίσης σε δύο επίπεδα, υψηλά εμπόδια, ισχυρά θαλάσσια ρεύματα κλπ.). Οι ταχύτητες που μπορεί να αναπτύξει το ρομπότ είναι της τάξης του 0,5 m/s.

Το τροφοδοτικό υδραυλικής ισχύος τοποθετήθηκε βάσει χωροταξικού σχεδιασμού, με απολύτως στεγανό τρόπο, μέσα στο κυρίως σώμα του ρομπότ. Η στεγανότητά του πιστοποιήθηκε ύστερα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή μεγάλων διαστάσεων του ΕΜΠ. Τα υδραυλικά δομικά στοιχεία επιλέχθηκαν με βάση την κινηματική και δυναμική ανάλυση του ρομποτικού μηχανισμού, από τυπικά σενάρια κίνησής του.

Τα κύρια εξαρτήματα του τροφοδοτικού υδραυλικής ισχύος είναι ένας επαγωγικός 3Φ κινητήρας στεγανού τύπου ισχύος 4 kW, μία εμβολοφόρος υδραυλική αντλία σταθερής πίεσης, ρυθμιζόμενη στα 110 bar λειτουργίας, ένα δοχείο λαδιού 40 L, δύο υδραυλικοί συσσωρευτές αζώτου χωρητικότητας 0,7 L και ένα σύστημα απαγωγής της θερμότητας, τόσο του υδραυλικού μέσου όσο και του κλειστού χώρου του σώματος του ρομπότ (εικόνα 3).

Ο ηλεκτροϋδραυλικός σερβομηχανισμός αποτελείται από 18 αναλογικές βαλβίδες (proportional valves) και ιαρίθμους υδραυλικούς επενεργητές (υδραυλικά έμβολα) διπλής δράσης. Οι αναλογικές βαλβίδες είναι υψηλής απόκρισης, 4 διαδρομών και 3 θέσεων, και τοποθετήθηκαν συμμετρικά, εκατέρωθεν του υδραυλικού τροφοδοτικού, εντός του στεγανού σώματος του ρομπότ, σε δύο όμοιους χαλύβδινους διανεμητές (manifolds) κατασκευασμένους κατά ειδική παραγγελία (εικόνα 4).

Πάνω στους χαλύβδινους διανεμητές τοποθετήθηκαν κατάλληλα και οι υδραυλικοί συσσωρευτές αζώτου. Οι υδραυλικοί επενεργητές είναι στεγανού τύπου και ενσωματώνονται στα πόδια του ρομπότ (τρεις ανά πόδι), όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Ο αυτόματος έλεγχος του ρομπότ βασίζεται



ΕΙΚΟΝΑ 3: Τροφοδοτικό υδραυλικής ισχύος του σερβοϋδραυλικού ρομπότ HexaTerra.

στο μοντέλο του συστήματος (model based controller) με εμφωλευμένη δομή ελεγκτή τύπου PID για κάθε βαθμό ελευθερίας, ενώ όλοι οι κώδικες ελέγχου, καθώς και η ανάκτηση δεδομένων από τα αισθητήρια όργανα, επικοινωνούν με λογισμικό πραγματικού χρόνου, που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Innova. Όλα τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα του συστήματος ελέγχου είναι τοποθετημένα εντός του σώματος του ρομπότ σε ειδικά προστατευμένο περιβάλλον από την υγρασία, αλλά και από μία πιθανή διαρροή του υδραυλικού μέσου.

Τα υδροπνευματικά συστήματα αυτοματισμού διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις τεχνολογικές εξελίξεις των επόμενων δεκαετιών ακόμα και στον τομέα της ψυχαγωγίας

Προκλήσεις της νέας εποχής

Οι σύγχρονες τάσεις της επιστήμης δεν θα μπορούσαν να αφήσουν αδιάφορη την τεχνολογία των υδροπνευματικών συστημάτων αυτοματισμού. Πολλές φορές τέτοια συστήματα είναι απαραίτητα σε εφαρμογές της ναυτεχνολογίας, της ενέργειας, της βιοϊατρικής, της ψυχαγωγίας κ.ά. οι οποίες εφαρμογές απαιτούν υψηλή ακρίβεια, μεγάλη αξιοπιστία, γρήγορη απόκριση συστήματος και περισσότερη αποτελεσματικότητα. Τα υδροπνευματικά συστήματα γίνονται πλέον μέρος της 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry

4.0). Έτσι, η ψηφιακή ανάδραση θέσης και κατάστασης των υδραυλικών επενεργητών, οι ενσωματωμένοι ψηφιακοί ενισχυτές, οι ταχύτατες on-off βαλβίδες και ο ψηφιακός έλεγχος ροής θα συναντήσουν τον έλεγχο από απόσταση, τη χρήση έξυπνων υδραυλικών αντλιών, επενεργητών και βαλβίδων, καθώς και την αυτοδιαγνωστική βλαβών ή αναγκών για συντήρηση, και θα οδηγήσουν στην αύξηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των υδροπνευματικών συστημάτων.

Οι απαιτήσεις της βιομηχανίας του άμεσου μέλλοντος για μεγαλύτερη αξιοπιστία και ακρίβεια των υλικών παραγωγής καθιστούν ολοένα και πιο επιτακτική την ανάγκη της δημιουργίας όλο και περισσότερο ευέλικτων αυτοματοποιημένων διαδικασιών και κέντρων κατεργασίας (CNC). Κάτι τέτοιο υπόσχονται τα υδροπνευματικά συστήματα αυτοματισμού, τα οποία έχουν ήδη εισβάλει τις τελευταίες δεκαετίες δυναμικά στο χώρο των βιομηχανικών εφαρμογών και έχουν αρχίσει πλέον να αντικαθιστούν σταδιακά τα συμβατικά ηλεκτρομηχανικά συστήματα.

Αποθήκευση και συσκευασία

Τα υδροπνευματικά συστήματα αυτοματισμού θα εφαρμοστούν σε μεγάλη κλίμακα στην αποθήκευση και συσκευασία των προϊόντων. Η ύπαρξη μεγάλων αποθηκευτικών χώρων, η ανάγκη για άμεση και εύκολη πρόσβαση στα αποθηκευμένα αντικείμενα, καθώς επίσης ο όγκος και το βάρος των προϊόντων αυτών οδηγούν στην ευρεία εξάπλωση των αυτοματο-

ποιημένων αποθηκών. Ήδη χρησιμοποιούνται με επιτυχία κατάλληλα σερβοϋδραυλικά οδηγούμενα ρομποτικά συστήματα για την παλετοποίηση προϊόντων. Ο απώτερος σκοπός στο πεδίο της αποθήκευσης είναι να εκτελούνται οι εργασίες εξ ολοκλήρου από τα ρομποτικά συστήματα, απαλλάσσοντας τον άνθρωπο από την κουραστική και επιβλαβή με την πάροδο του χρόνου εργασία της φορτοεκφόρτωσης.

Πέρα από την παραγωγή, τα υδροπνευματικά συστήματα αυτοματισμού προβλέπεται να διαδραματίσουν κυρίαρχο ρόλο στο άμεσο μέλλον στο χώρο της ψυχαγωγίας. Έτσι, για παράδειγμα, τα συμβατικά καθίσματα των μαζικών χώρων θέασης (π.χ. θεάτρου, κινηματογράφου) θα αντικατασταθούν από ειδικές ηλεκτροϋδραυλικά καθοδηγούμενες πλατφόρμες, πάνω στις οποίες θα μπορούν να βρίσκονται οι θεατές, όπου με τη βοήθεια της εικονικής πραγματικότητας θα συμμετέχουν ενεργά στη ροή του δράματος. Επίσης, τα τελευταία χρόνια, έχουν κάνει την εμφάνισή τους σερβοϋδραυλικοί εξομοιωτές σε ψυχαγωγικά θεματικά πάρκα, οι οποίοι τείνουν να εκπολύσουν ολοένα και περισσότερο τα συμβατικά συστήματα ψυχαγωγίας.

Ουσιαστικά, η 4η Βιομηχανική Επανάσταση ξεκίνησε με την έναρξη του 21ου αιώνα. Εστιάζοντας στην κοινωνική διάσταση αυτής της βιομηχανικής επανάστασης θα παρατηρούσαμε ότι έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την 1η Βιομηχανική Επανάσταση. Ενδεχομένως, μέρος της κρίσης και της οικονομικής ύφεσης που βιώνουμε τα τελευταία χρόνια σε παγκόσμια κλίμακα να αποτελεί αυτή η μετάβαση στη νέα βιομηχανική εποχή. Αν και η 4η Βιομηχανική Επανάσταση έχει την προοπτική να χειραφετήσει μεγάλο μέρος του πληθυσμού δημιουργώντας νέες ευκαιρίες σε πολλά επίπεδα, ωστόσο δεν είναι βέβαιο ότι οι κοινωνικές ανισότητες θα αμβλυνθούν.

Κάνει ιδιαίτερη αίσθηση μία έκθεση της Bank of America Merrill Lynch [3], η οποία προβλέπει αύξηση στην αυτοματοποίηση της παραγωγής μέσω των ρομπότ παγκοσμίως από 10% το 2015 σε 45% το 2025. Η ίδια έκθεση, επίσης, προειδοποιεί ότι θα χρειάζονται μόλις 66 ρομπότ για κάθε 10.000 εργάτες παγκοσμίως, καθώς και ότι η χρήση ρομπότ και τεχνητής νοημοσύνης θα μπορούσε να αυξήσει την παραγωγικότητα κατά 30% σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, ενώ θα μειώνει τα εργατικά έξοδα της παραγωγής κατά 18-33% μέχρι το 2020. Επιπλέον, στην τελευταία διοργάνωση του Παγκόσμιου Οικονομικού Φό-

ΕΙΚΟΝΑ 1:
Σύγχρονη γραμμή παραγωγής αυτοκινήτων με χρήση σερβοϋδραυλικών ρομποτικών συστημάτων.



ρουμ (Ιανουάριος 2018, Νταβός Ελβετίας), η 4η Βιομηχανική Επανάσταση ήταν το κεντρικό θέμα συζήτησης, στο πλαίσιο του οποίου επικυρώθηκαν οι βάσεις για την πλήρη αυτοματοποίη-

τιών, τη νανοτεχνολογία, τη γενετική, τη βιοτεχνολογία, την αντικατάσταση πολλών εργασιών των ανθρώπων από εξελιγμένες μηχανές κ.ά.

Οι προκλήσεις της νέας βιομηχανικής εποχής σίγουρα θα είναι μεγάλες. Ο σύγχρονος μηχανικός, λοιπόν, οφείλει να παρακολουθεί τις τρέχουσες εξελίξεις και να εναρμονίζεται με τις απαιτήσεις των νέων τεχνολογιών. ■

Τα υδροπνευματικά συστήματα είναι απαραίτητα σε εφαρμογές της νανοτεχνολογίας, της ενέργειας, της βιοϊατρικής, της ψυχαγωγίας

ση της βιομηχανικής παραγωγής, τη μαζική ένταξη νέων τεχνολογιών (π.χ. εξελιγμένης ρομποτικής, τεχνητής νοημοσύνης, οχημάτων χωρίς οδηγό, έξυπνων συσκευών και έξυπνων σπι-

***Ο κ. Ιωάννης Νταβλιάκος είναι διδάκτορας και μέλος του ειδικού διδακτικού προσωπικού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ενώ ο κ. Ευάγγελος Παπαδόπουλος είναι διδάκτορας και καθηγητής στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. .**

Βιβλιογραφία

1. Ι. Νταβλιάκος, Ε. Παπαδόπουλος, “Υδροπνευματικά Συστήματα Αυτοματισμού”, Μετάδοση Ισχύος, Αφιέρωμα «Αυτοματισμός», Δεκέμβριος 2008, σελ. 22-32.
2. Davliakos, I., Roditis, I., Lika, K., Breki, Ch.-M., and Papadopoulos, E., “Design, Development, and Control of a Tough Electrohydraulic Hexapod Robot for Subsea Operations,” Advanced Robotics, special issue on New Hydraulic Components for Tough Robots, accepted, February 2018.
3. Bank of America Merrill Lynch, “Robot Revolution – Global Robot & AI Primer”, Primer, Thematic Investing, Bank of America Merrill Lynch, December 2015.
4. Russell W. Henke, P.E., Fluid Power Systems & Circuits, Hydraulics & Pneumatics Magazine, 1983.
5. H. E. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley, 1967.
6. Ν. Β. Παναγιωτόπουλος, Υδροστατικές Μεταδόσεις Κίνησης, Εκδόσεις Ζήτη & Σία ΟΕ, 1985.
7. Θ. Ν. Κωστόπουλος, Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα, Εκδόσεις Συμεών, 1999.
8. Κ. Ε. Γιαννακόπουλος, Υδραυλική Ισχύς, Θεωρία & Πράξη, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, 1999.
9. Κ. Ε. Γιαννακόπουλος, Πνευματικοί Αυτοματισμοί, Θεωρία & Πράξη, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλη, 2002.