



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.: 7721099, FAX: 7721057

Αρ.Πρωτ.: 4425

Αθήνα, 2-7-2013

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της**  
**Σχολής Μηχ/γων**  
**Μηχ/κών**

**ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ**

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του κ. **Παύλου Αθανασάτου**, διπλωματούχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, που θα πραγματοποιηθεί την Πέμπτη 4 Ιουλίου 2013 και ώρα 12:30, στην Αίθουσα Συνεδριάσεων του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου, κτίριο Μ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνειούπολη - Ζωγράφου.

**ΘΕΜΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

«Αναγνώριση Βλαβών Λειτουργίας Υδραυλικών Συστημάτων Υψηλών Πιέσεων»

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής.

**Ο εκτελών χρέη Κοσμήτορα**

**Δ. Ε. Παπαντώνης**  
**Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**  
**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**  
**ΠΑΥΛΟΥ ΑΘΑΝΑΣΑΤΟΥ**

**Αναγνώριση Βλαβών Λειτουργίας Υδραυλικών Συστημάτων**  
**Υψηλών Πίεσεων**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως αντικείμενο την αναγνώριση βλαβών λειτουργίας στα υδραυλικά κυκλώματα υψηλής πίεσης με τη χρήση της μοντελοποίησης μέσω Η/Υ. Το συγκεκριμένο γνωστικό πεδίο παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον, δεδομένου ότι, παρά τη διάδοση και τις συνεχώς αυξανόμενες εφαρμογές των υδραυλικών κυκλωμάτων, παρατηρείται μια υστέρηση σε ο,τι αφορά την πρόοδο και την εξέλιξη των τεχνικών αναγνώρισης βλαβών σε αυτά. Ακόμη και σήμερα, και παρά τα διαθέσιμα μέσα, η αναγνώριση βλαβών στα υδραυλικά κυκλώματα παραμένει μια διαδικασία εν πολλοίς εμπειρική, με τον υποκειμενικό παράγοντα να παίζει σημαντικό ρόλο στην ποσοτικοποίηση των ευρημάτων.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για την χρήση τεχνικών ελέγχου των συνθηκών λειτουργίας (condition monitoring) για την αναγνώριση βλαβών στα υδραυλικά κυκλώματα. Οι μέθοδοι αυτές έχουν το μειονέκτημα ότι δεν συσχετίζουν μαθηματικά την επίδραση στην απόκριση του κυκλώματος με τη βλάβη καθαυτή, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αρκούνται στην παρακολούθηση μιας ή περισσότερων παραμέτρων λειτουργίας του κυκλώματος και το κατά πόσο αυτές είναι «εντός» ή «εκτός» ορίων, τα οποία επίσης στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν οριστεί εμπειρικά. Προκειμένου να καλυφθεί το κενό στις μεθόδους αναγνώρισης βλαβών, η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται με τη χρήση της μοντελοποίησης μέσω Η/Υ ως εργαλείου για το σκοπό αυτό. Με τη χρήση της μοντελοποίησης μπορούμε να προσομοιώσουμε τη λειτουργία ενός κυκλώματος, καθώς και τις βλάβες που μπορεί να προκύψουν. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί όχι μόνο γίνει άμεσα αντιληπτό το πώς η κάθε βλάβη επιδρά στην λειτουργία του κυκλώματος, αλλά και να υπάρξει μαθηματική συσχέτιση ανάμεσα στο αίτιο (βλάβη) και το αποτέλεσμα (επίδραση στην απόκριση του κυκλώματος). Έτσι, η αναζήτηση και η αναγνώριση των βλαβών μπορεί να γίνει αμεσότερα και αποτελεσματικότερα.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μοντελοποίησης των Διαγραμμάτων Δεσμών (Bond Graphs) προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση που έχουν στη λειτουργία ενός υδραυλικού κυκλώματος οι βλάβες της αύξησης της εσωτερικής διαρροής στον υδραυλικό κύλινδρο και στη βαλβίδα 4/2 επιλογής φοράς κίνησης για διάφορα φορτία. Η μέθοδος των Διαγραμμάτων Δεσμών επελέγη λόγω των πλεονεκτημάτων που έχει σε σύγκριση με άλλες μεθόδους όπως η σαφής μοντελοποίηση της ροής ισχύος, η ομοιογενής αντιμετώπιση των διαφόρων φυσικών συστημάτων, η οπτική διεπιφάνειά της και η δυνατότητα ξεχωριστής μοντελοποίησης των εξαρτημάτων του κυκλώματος με διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Το



υδραυλικό κύκλωμα που μοντελοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής ήταν η εγκατάσταση υψηλής πίεσης "Herion" του Εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών. Στόχος ήταν να δημιουργηθεί ένα αρκετά λεπτομερές μοντέλο και για το λόγο αυτό στη μοντελοποίηση συνυπολογίστηκαν παράμετροι όπως η πτώση πίεσης λόγω ροϊκών απωλειών, η εσωτερική διαρροή της αντλίας, η τριβή και η αδράνεια των κινούμενων μερών του κυλίνδρου και η συμπιεστότητα του ρευστού στις σωληνώσεις και στον κύλινδρο, καθώς και το πώς αυτή μεταβάλλεται με τη μεταβολή του όγκου του υδραυλικού ρευστού μέσα στους θαλάμους του κυλίνδρου κατά την κίνησή του. Το κάθε εξάρτημα της υδραυλικής εγκατάστασης μοντελοποιήθηκε ξεχωριστά, με διαφορετικό βαθμό λεπτομέρειας ανάλογα με τις απαιτήσεις χρησιμοποιώντας τα δομικά στοιχεία των διαγραμμάτων δεσμών όπως πηγές ροής (ηλεκτροκινητήρας), πηγές σθένους με θετικό ή αρνητικό πρόσημο (σταθερές πτώσεις πίεσης), στοιχεία διάχυσης ενέργειας (τριβές, αντιστάσεις ροής), στοιχεία αποθήκευσης δυναμικής ενέργειας (συμπιεστότητα ρευστού), στοιχεία αποθήκευσης κινητικής ενέργειας (αδράνεια κινούμενων μερών), μετασχηματιστές ισχύος (υδραυλική αντλία) κ.ο.κ. Οι εσωτερικές διαρροές του υδραυλικού κυλίνδρου και της βαλβίδας μοντελοποιήθηκαν σαν δύο «βραχυκυκλώματα» ροής που το καθένα είναι τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο κόμβους κοινού σθένους του μοντέλου. Η αντίσταση ροής διαμέσου των βραχυκυκλωμάτων αυτών υπολογίζεται σαν συνάρτηση του εσωτερικού διακένου ανάμεσα στο έμβολο και το σώμα του υδραυλικού κυλίνδρου και ανάμεσα στο έμβολο και το σώμα της βαλβίδας 4/2 και συνδέεται με το αντίστοιχο «βραχυκύκλωμα» μέσω ενός κόμβου κοινής ροής. Τα μοντέλα των επιμέρους εξαρτημάτων στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση του συνολικού μοντέλου της υδραυλικής εγκατάστασης. Επόμενο βήμα ήταν η απόδοση αιτιότητας στους δεσμούς ισχύος του μοντέλου τόσο για την κίνηση του εμβόλου προς τ'αριστερά όσο και για την κίνηση προς τα δεξιά, με βάση τη σύμβαση που ισχύει στη μοντελοποίηση με τη χρήση Διαγραμμάτων Δεσμών ότι το στοιχείο που έχει τη μπάρα αιτιότητας καθορίζει τη μεταβλητή της ροής του δεσμού, ενώ το άλλο στοιχείο καθορίζει τη μεταβλητή σθένους του δεσμού.

Στην αρχική της μορφή, η υδραυλική εγκατάσταση "Herion" είχε περιορισμένη λειτουργικότητα και δυνατότητες σε σχέση με τις πειραματικές απαιτήσεις. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγινε μια εκτεταμένη αναβάθμιση της υδραυλικής εγκατάστασης και τοποθετήθηκαν διατάξεις προσομοίωσης της εσωτερικής διαρροής του υδραυλικού κυλίνδρου και της βαλβίδας 4/2, μια διάταξη προσομοίωσης φορτίου μέσω ενός ηλεκτρικά ελεγχόμενου ασφαλιστικού δύο σταδίων καθώς και ένα πλήρες σύστημα ψηφιακής λήψης δεδομένων. Με τη χρήση του συστήματος μετρήσεων υπολογίστηκαν και διάφορες παράμετροι του υδραυλικού κυκλώματος, όπως η εσωτερική διαρροή της αντλίας, η τριβή στον υδραυλικό κύλινδρο και οι πτώσεις πίεσης σε διάφορα τμήματα της εγκατάστασης, όπως και τα εσωτερικά διάκενα του κυλίνδρου και της βαλβίδας, τα οποία υπολογίστηκαν πειραματικά. Μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτών, το επόμενο βήμα ήταν ο προκαταρκτικός έλεγχος της λειτουργικότητας και της ακρίβειας του μοντέλου μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που δίνει με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα κατά τη διάρκεια ενός δοκιμαστικού κύκλου λειτουργίας της εγκατάστασης χωρίς φορτίο. Τα μεγέθη

που επελέγησαν προς σύγκριση ήταν η μετατόπιση του βάκτρου του υδραυλικού κυλίνδρου, η ταχύτητά του, καθώς και η πίεση στον αριστερό και στον δεξιό θάλαμο του, όπου διαπιστώθηκε εξαιρετικά καλή σύμπτωση των πειραματικών δεδομένων με αυτά του μοντέλου τόσο στα ελάχιστα/μέγιστα όσο και στο σχήμα των καμπυλών. Ακολούθησε ο πειραματικός προσδιορισμός των εσωτερικών «ισοδύναμων» διακένων του υδραυλικού κυλίνδρου και της βαλβίδας για τα διάφορα επίπεδα εσωτερικής διαρροής τους.

Για τη μελέτη πάνω στη χρήση της μοντελοποίησης μέσω της μεθόδου των Διαγραμμάτων Δεσμών για την αναγνώριση βλαβών λειτουργίας στα υδραυλικά κυκλώματα υψηλής πίεσης, εκτελέστηκαν κύκλοι συγκριτικών δοκιμών ανάμεσα στο μοντέλο και την υδραυλική εγκατάσταση για διάφορα φορτία και επίπεδα εσωτερικής διαρροής τόσο στον υδραυλικό κύλινδρο όσο και στη βαλβίδα 4/2, όπως αυτά εκφράζονται από τα αντίστοιχα ισοδύναμα διάκενά τους. Πιο συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν δοκιμές για ισοδύναμο φορτία 2, 1kN, 4, 2kN και 6, 3kN και για ισοδύναμο διάκενα από 83μm έως 151μm για τον υδραυλικό κύλινδρο και από 34μm έως 73μm για τη βαλβίδα 4/2. Σε όλες τις δοκιμές, τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά στα μέγιστα, τα ελάχιστα και το σχήμα των καμπυλών για τις κυριότερες παραμέτρους λειτουργίας του κυκλώματος, όπου προέκυψε εξαιρετικά καλή σύμπτωση και συσχέτισή τους.

Για την επαλήθευση της συσχέτισης των θεωρητικών με τα πειραματικά δεδομένα, το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην παροχή εσωτερικής διαρροής του κυλίνδρου και της βαλβίδας ως μέγεθος άμεσα συνδεδεμένο με τη βλάβη, (δηλαδή την αύξηση του εσωτερικού διακένου των εξαρτημάτων), αλλά και στο λόγο της μέσης ταχύτητας στη φάση εργασίας προς τη μέση ταχύτητα κατά τη φάση επιστροφής, ως δείκτη της επίδρασης της εσωτερικής διαρροής στη λειτουργία του κυκλώματος. Για κάθε κύκλο δοκιμών με αντίστοιχο ισοδύναμο φορτίο υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης  $r$  ανάμεσα στα θεωρητικά και τα πειραματικά δεδομένα, ο οποίος σε όλες τις περιπτώσεις ήταν εξαιρετικά υψηλός, ξεπερνώντας το 99%. Επίσης, για κάθε ομάδα δεδομένων, τόσο πειραματικών όσο και θεωρητικών, υπολογίστηκαν καμπύλες αναδρομής μορφής πολυωνύμου τρίτου βαθμού και ο αντίστοιχος συντελεστής συσχέτισης (correlation index)  $R^2$ , ο οποίος και αυτός ήταν πολύ υψηλός, ξεπερνώντας σε όλες τις περιπτώσεις το 90%. Με τον τρόπο αυτό, επιβεβαιώθηκε ότι το μοντέλο της υδραυλικής εγκατάστασης που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο των Διαγραμμάτων Δεσμών μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία και να προβλέψει την απόκρισή της όχι μόνο κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο και με τον υδραυλικό κύλινδρο και τη βαλβίδα 4/2 σε κανονική κατάσταση, αλλά και υπό διάφορα φορτία και με διάφορα επίπεδα εσωτερικής διαρροής τόσο στον υδραυλικό κύλινδρο όσο και στη βαλβίδα, και μάλιστα με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Με τον τρόπο αυτό, αποδεικνύεται ότι η μοντελοποίηση με τη χρήση της μεθόδου των Διαγραμμάτων Δεσμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο προσομοίωσης και αναγνώρισης βλαβών στα υδραυλικά κυκλώματα, κάτι που αναμφίβολα είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε πολλές ουσιαστικές πρακτικές εφαρμογές.

Συνοψίζοντας, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής συντελέστηκαν οι παρακάτω δράσεις οι οποίες συνιστούν βασική έρευνα και προσφέρουν πρωτότυπη επιστημονική γνώση (ήδη δημοσιευθείσα σε Journals και conferences):

α) Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Διαγραμμάτων Δεσμών για τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση και τη μελέτη βλαβών στα υδραυλικά κυκλώματα υψηλής πίεσης, γνωστικό πεδίο πάνω στο οποίο μέχρι στιγμής υπάρχει σχετικά περιορισμένη επιστημονική έρευνα.

β) Για την πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε διάταξη προσομοίωσης βλαβών και φορτίων σε υδραυλική εγκατάσταση, η οποία συμπεριελάμβανε και σύστημα λήψης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

γ) Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκαν βλάβες στον υδραυλικό κύλινδρο και τη βαλβίδα επιλογής φοράς κίνησης 4/2 του κυκλώματος, εξαρτήματα που συγκεντρώνουν δυσανάλογα μικρό ερευνητικό έργο στο πεδίο της αναγνώρισης βλαβών σε σύγκριση με το αντίστοιχο έργο που αφορά άλλα εξαρτήματα λ.χ. τις υδραυλικές αντλίες.

δ) Με τη χρήση του μοντέλου (και την ακόλουθη επαλήθευση των αποτελεσμάτων με τη χρήση της υδραυλικής εγκατάστασης) μελετήθηκε η επίδραση που έχει στην απόκριση και τη λειτουργία της εγκατάστασης η αύξηση της εσωτερικής διαρροής του υδραυλικού κυλίνδρου και της βαλβίδας επιλογής φοράς κίνησης 4/2 συναρτήσεως του φορτίου. Ταυτόχρονα, υπήρξε συσχέτιση τόσο της αύξησης της εσωτερικής διαρροής ως συνάρτηση της αύξησης του εσωτερικού διακένου στον κύλινδρο και στη βαλβίδα όσο και της επίδρασης στην απόκριση του κυκλώματος με την αιτία της βλάβης. Επιπλέον, με τη χρήση της πολυωνυμικής αναδρομής η παραπάνω συσχέτιση μπορεί να λάβει και δύναται να λάβει μαθηματική μορφή, η οποία μπορεί να χρησιμεύσει περαιτέρω σε περιπτώσεις αναγνώρισης βλαβών σε υδραυλικά κυκλώματα υψηλής πίεσης.

