



**ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :  
Αθήνα

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Π ρ ο ς  
τα μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

**Π Ρ Ο Σ Κ Λ Η Σ Η**

Παρακαλείστε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση και εξέταση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ ο Υποψήφιος Διδάκτορας κ. **Καλλίγερος Χρίστος του Εμμανουήλ**, διπλωματούχος της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί **την Παρασκευή 12 Ιουλίου 2024 και ώρα από 12:00 έως 14:00** στην Αίθουσα Πολυμέσων της Βιβλιοθήκης του ΕΜΠ.

Ο τίτλος της διδακτορικής του διατριβής είναι:

**«Σχεδιασμός κατατομών οδοντωτών τροχών για τη βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης και της δυναμικής τους συμπεριφοράς»**

Ο Κοσμήτορας

Ioannis Antoniadis    Ioannis Antoniadis  
05.07.2024 16:42

Ι. Αντωνιάδης  
Καθηγητής ΕΜΠ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη μεθόδων για τον βέλτιστο σχεδιασμό των κατατομών μετωπικών οδοντωτών τροχών με στόχο τη βελτίωση των επιδόσεών τους σε τομείς όπως ο βαθμός απόδοσης και η δυναμική συμπεριφορά. Αν και οι οδοντωτοί τροχοί είναι ένα από τα αρχαιότερα και πλέον διαδεδομένα συστήματα μετάδοσης κίνησης και ισχύος, οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις, με κορυφαία τη στροφή προς την ηλεκτροκίνηση και τα ηλεκτρικά οχήματα που επιχειρείται πλέον και σε νομοθετικό πλαίσιο, έχουν οδηγήσει στη διαμόρφωση νέων απαιτήσεων σχετικά με τα ζητούμενα χαρακτηριστικά των τροχών, που αφορούν κυρίως την ανάγκη για ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος και την επίτευξη αθόρυβης λειτουργίας. Όπως αποδείχθηκε μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα, ο κύριος πυλώνας της σύγχρονης έρευνας πάνω στους οδοντωτούς τροχούς συμβαδίζει με αυτές τις ανάγκες της βιομηχανίας, καθώς αφορά τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των τροχών μέσω της ανάπτυξης εύρωστων και αξιόπιστων εργαλείων προσομοίωσης της λειτουργίας τους.

Προκειμένου να συνεισφέρει σε αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στον βέλτιστο σχεδιασμό των κατατομών των οδόντων των τροχών, οι οποίες καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους. Μελετώντας κανείς τη σχετική βιβλιογραφία μπορεί να συμπεράνει ότι η βελτιστοποίηση των κατατομών των οδοντωτών τροχών χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τη βελτιστοποίηση που γίνεται με επίκεντρο την εξειλιγμένη καμπύλη και τη βελτιστοποίηση που αφορά την αξιοποίηση εναλλακτικών καμπυλών ως κατατομές των τροχών. Στον τομέα των τροχών εξειλιγμένης, η διατριβή επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μακρο-γεωμετρίας τους (π.χ. αριθμός οδόντων, module, πλάτος), ενώ στον τομέα των τροχών μη-εξειλιγμένης η διατριβή εμβαθύνει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας βέλτιστου σχεδιασμού κατατομών ελευθέρως μορφής.

Η κύρια προσπάθεια που έγινε στο πλαίσιο της μακρο-γεωμετρικής βελτιστοποίησης των τροχών εξειλιγμένης ήταν η ενσωμάτωση της δυναμικής απόκρισης των τροχών στα κριτήρια σχεδιασμού της βελτιστοποίησης. Η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των τροχών επιχειρείται μέσω της ελαχιστοποίησης του πλάτους του στατικού σφάλματος μετάδοσης (*Static Transmission Error - STE*). Για τον υπολογισμό του STE αναπτύσσεται ένα αριθμητικό μοντέλο που περιλαμβάνει τον υπολογισμό της τροχιάς επαφών (*tooth contact analysis*), των ενδοτικωτήτων των οδόντων και της κατανομής του φορτίου. Παρότι το αριθμητικό μοντέλο προσφέρει μεγάλη ακρίβεια και ανταγωνιστικό υπολογιστικό κόστος, επιχειρήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής η δημιουργία ενός ισοδύναμου μοντέλου για την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους που είναι κρίσιμο για την κατάστροψη μίας εύρωστης διαδικασίας βελτιστοποίησης. Για την κατασκευή του ισοδύναμου μοντέλου εξετάστηκε η αξιοποίηση νευρωνικών δικτύων και συγκεκριμένα νευρωνικών δικτύων πρόσθιας τροφοδότησης (*Feed Forward Neural Network - FFNN*) για την πρόβλεψη του συνόλου της καμπύλης του STE με δεδομένες τις γεωμετρικές και λειτουργικές παραμέτρους του ζεύγους των τροχών. Το νευρωνικό δίκτυο που σχεδιάστηκε πετυχαίνει ένα μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα πρόβλεψης του STE της τάξης του 0,395%, που όπως αποδείχθηκε είναι ικανοποιητικό για τη χρήση του STE ως κριτήριο για τη δυναμική συμπεριφορά των τροχών, καθώς οδηγεί σε ένα μέσο σφάλμα κατά την προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης των τροχών της τάξης μόλις του 0,05%. Παράλληλα, οδήγησε σε βελτίωση του χρόνου υπολογισμού κατά τρεις τάξεις μεγέθους, μειώνοντας το χρόνο υπολογισμού από τα 3 δευτερόλεπτα στα 0,001 δευτερόλεπτα (χρόνοι για έναν συμβατικό προσωπικό υπολογιστή). Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε βασίζεται στη χρήση του NSGA-II για τη διεξαγωγή πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με στόχο την ταυτόχρονη μείωση του βάρους, των απωλειών ισχύος και του επιπέδου του θορύβου και των ταλαντώσεων. Μέσα από τις μελέτες περίπτωσης που εξετάστηκαν προέκυψαν πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με τη συσχέτιση των κριτηρίων και των μεταβλητών σχεδιασμού και γενικευμένες κατευθύνσεις για την επιλογή των μακρο-γεωμετρικών παραμέτρων κατά τον σχεδιασμό μίας οδοντωτής μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα σε συγκεκριμένες εφαρμογές επιτεύχθηκε μείωση των απωλειών ισχύος έως και 40,8% και μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων έως και 72,3%. Η μείωση του πλάτους του STE (*peak-to-peak error*) αποδείχθηκε πολύ αποτελεσματική μέθοδος της βελτίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των τροχών ιδιαίτερα σε

λειτουργία με υψηλές στροφές και υψηλό φορτίο, ενώ διαπιστώθηκε ότι για τη μείωση του πλάτους των ταλαντώσεων είναι απαραίτητη η εξασφάλιση υψηλού λόγου επικάλυψης. Επιπλέον, κατά τη διαδικασία επιλογής των παραμέτρων μίας βαθμίδας οδοντωτών τροχών διαπιστώθηκε πως ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ των κριτηρίων σχεδιασμού επιτυγχάνεται μέσω της μεγιστοποίησης του αριθμού των οδόντων, που αποτελεί τον ρυθμιστικό παράγοντα κατά τη βελτιστοποίηση των τροχών, και της επακόλουθης μείωσης του module και του πλάτους των τροχών για να αντισταθμιστεί η αύξηση των διαστάσεων και του βάρους της μετάδοσης. Επίσης, σημαντική μείωση των απωλειών ισχύος και του πλάτους του STE μπορεί να επιτευχθεί με την ταυτόχρονη αύξηση των συντελεστών μετατόπισης των τροχών.

Στον τομέα των τροχών μη-εξειλιγμένης παρουσιάστηκε στο πλαίσιο της διατριβής για πρώτη φορά **μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού κατατομών ελευθέρας μορφής**. Η βελτιστοποίηση κατατομών ελευθέρας μορφής διακρίνεται από τις άλλες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης καθώς δεν προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός δεδομένου προφίλ (εξειλιγμένης ή μη) για τη βελτίωση των επιδόσεων των τροχών, αλλά αντιμετωπίζει την ίδια τη γεωμετρία της κατατομής ως μεταβλητή σχεδιασμού. Για την αποτελεσματική τροποποίηση της γεωμετρίας της κατατομής κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, **η κατατομή του pinion παριστάνεται από μία παραμετρική καμπύλη B-spline**, τα σημεία ελέγχου της οποίας χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές σχεδιασμού. Κάθε διαφορετικό προφίλ της κατατομής του pinion αντιστοιχίζεται μονοσήμαντα σε ένα συγκεκριμένο προφίλ για τον συνεργαζόμενο τροχό. Ωστόσο, ο τρόπος υπολογισμού της συνεργαζόμενης γεωμετρίας με αρχικό προφίλ την κατατομή του pinion παρουσιάζει προβλήματα, με κορυφαίο την ανάγκη αριθμητικής επίλυσης πεπλεγμένης εξίσωσης όταν ακολουθείται η κλασική αναλυτική θεωρία οδόντωσης. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, **αναπτύχθηκε μία νέα προσέγγιση για τον υπολογισμό των συνεργαζόμενων γεωμετριών** (όταν αρχική γεωμετρία είναι το προφίλ του pinion), η οποία γίνεται πλήρως αναλυτικά και αξιόπιστα. Η πιο σημαντική όμως συνεισφορά της διατριβής στην ανάπτυξη μίας εύρωστης διαδικασίας βελτιστοποίησης των κατατομών ελευθέρας μορφής είναι **η διατύπωση σαφών και μαθηματικώς αυστηρά ορισμένων γεωμετρικών περιορισμών** που αφορούν τη συμμόρφωση των παραγόμενων κατατομών στο βασικό νόμο οδόντωσης και την αποφυγή σχηματισμού ακμών και ασυνεχειών στο σώμα των συνεργαζόμενων κατατομών. Στο πλαίσιο της έρευνας αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν κλειστές αναλυτικές σχέσεις που επιτρέπουν τη διαπίστωση της συμμόρφωσης στους γεωμετρικούς περιορισμούς ήδη από τη στιγμή που παράγεται η καμπύλη ελευθέρας μορφής, οδηγώντας και στην εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων για την επιτρεπόμενη μορφή τους. Όπως αποδείχθηκε από τις μελέτες περίπτωσης που εξετάστηκαν, **η βελτίωση στα κριτήρια σχεδιασμού ξεπερνούσε κατά πολύ το 50% συγκριτικά με τη χρήση συμβατικών τροχών εξειλιγμένης**. Πιο συγκεκριμένα, οι βελτιστοποιημένες κατατομές που σχεδιάστηκαν μπορούν να επιτύχουν μείωση της μέσης τιμής της σχετικής καμπυλότητας έως και 65,4%, μείωση της μέγιστης τιμής της έως και 82,9%, μείωση της τυπικής της απόκλισης έως και 99,9%, μείωση της μέσου βάθους φθοράς κατά μήκος της τροχιάς επαφών έως και 54% και μείωση της μέγιστης τιμής του βάθους φθοράς έως και 69%. **Η ανωτερότητα των χαρακτηριστικών των τροχών ελευθέρας μορφής αποδείχθηκε και μέσω πειραμάτων** που έγιναν για τον έλεγχο της φθοράς τους συγκριτικά με τους αντίστοιχους συμβατικούς τροχούς εξειλιγμένης και παρουσίασαν βελτίωση στο μέσο βάθος φθοράς της τάξης του 44,1%. Επιπλέον, αν και η μείωση του λόγου επικάλυψης είναι κατά κανόνα αναπόφευκτη συνέπεια της χρήσης τροχών μη-εξειλιγμένης, η μέθοδος βελτιστοποίησης κατατομών ελευθέρας μορφής μπορεί να οδηγήσει στον σχεδιασμό κατατομών που συνδυάζουν μεγάλη βελτίωση των χαρακτηριστικών των τροχών και ταυτόχρονα στην **εξασφάλιση λόγων επικάλυψης αντίστοιχων ή μεγαλύτερων από εκείνους των αντίστοιχων τροχών εξειλιγμένης**. Τέλος, ένα γενικότερο συμπέρασμα της έρευνας που ισχύει και για τους τροχούς εξειλιγμένης, είναι ότι **για τη βελτίωση των περισσότερων βασικών χαρακτηριστικών των τροχών** (απώλειες ισχύος, φθορά, αντοχή και σε λιγότερο βαθμό πλάτος STE) **οι κατατομές έχουν την τάση να αυξάνουν την κλίση τους**. Άμεση συνέπεια της μορφής αυτής των κατατομών είναι η μείωση του λόγου επικάλυψης οδηγώντας ανάδειξη της ανάγκης επίτευξης του

κατάλληλου συμβιβασμού μεταξύ του βαθμού κλίσης των κατατομών και του λόγου επικάλυψης ως ένα από τα βασικότερα ζητούμενα της βελτιστοποίησης των οδοντωτών τροχών.