

Έλεγχος Κατανομής Φορτίου σε Πολυκινητήριο Σύστημα Χαρτοποιητικής Μηχανής – Ανάλυση Στατικής και Δυναμικής Συμπεριφοράς

Κ. ΜΙΧΑΗΛ

Μηχανολόγος - Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Α. ΣΑΦΑΚΑΣ

Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Περίληψη

Στην εργασία αυτή κατ' αρχήν προτείνεται μία μέθοδος ελέγχου της λειτουργίας του πολυκινητήριου συστήματος των χαρτοποιητικών μηχανών, το οποίο κατά κανόνα αποτελείται από κινητήρες συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενους από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος οδηγούμενους από τριφασικό δίκτυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τέσσερις κινητήρες συνεχούς ρεύματος οδηγούν δύο πρέσες και ένα στεγνωτικό τύμπανο. Προτείνεται ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου μέσω του οποίου ελέγχεται η ορθολογική κατανομή του μηχανικού φορτίου στους κινητήρες ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χαρτοποιητικού συστήματος διακρίνονται δύο φάσεις λειτουργίας. Κατά την πρώτη φάση δυο κινητήρες συνεχούς ρεύματος οδηγούν δύο πρέσες, χωρίς να εμπλέκονται με το στεγνωτικό τύμπανο, το οποίο οδηγείται από δύο άλλους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Όταν τα δύο συστήματα συγχρονιστούν, τότε αρχίζει η δεύτερη φάση, όπου τα δυο παραπάνω τμήματα εμπλέκονται μηχανικά, στρεφόμενα απολύτως με την ίδια γραμμική ταχύτητα. Το κινούμενο υγρό χαρτί ερχόμενο σε επαφή με το θερμό στεγνωτικό τύμπανο ξηραίνεται και κατόπιν τυλίγεται υπό μορφή ρόλου για την τελική του χρήση. Δηλαδή, σ' αυτή τη βιομηχανική παραγωγική διαδικασία έχουμε ένα συνδυασμό γραμμικής και περιστροφικής κίνησης για τη μορφοποίηση του υγρού φύλλου χαρτιού και στη συνέχεια για την ξήρασή του. Η προτεινόμενη μέθοδος στοχεύει στον ακριβή έλεγχο της κινητικής συμπεριφοράς των δύο τμημάτων συντονίζοντας τη λειτουργία των πρεσών και του στεγνωτικού τυμπάνου. Λόγω της δομής του συστήματος είναι αναπόφευκτες μεταβατικές καταστάσεις, γι' αυτό στην παρούσα εργασία δίνεται ιδιαίτερο βάρος στη διερεύνηση της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς αυτού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μία χαρτοποιητική μηχανή αποτελείται από τέσσερα τμήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Για την κατανόηση της λειτουργίας του κινητήριου συστήματος ακολουθεί μια

εκτενής περιγραφή της χαρτοποιητικής μηχανής. Το πρώτο τμήμα της χαρτοποιητικής μηχανής ονομάζεται τμήμα μορφοποιητή και σ' αυτό σχηματίζεται το χαρτί σε μορφή βρεγμένου φιλμ. Περιλαμβάνει δύο πλαστικά πλέγματα (το πίσω και το μπροστινό), ένα μεταλλικό ρόλο που ονομάζεται ρόλος μορφοποιητή, δέκα άλλους μικρότερους μεταλλικούς ρόλους και το κιβώτιο ροής. Τα δύο πλέγματα "αγκαλιάζουν" σ' ένα τόξο περίπου 150° το μεταλλικό ρόλο και είναι ταυτισμένα για να μη μπορούν να ολισθαίνουν πάνω σ' αυτόν. Ο μεταλλικός ρόλος του μορφοποιητή περιστρέφεται μέσω ενός μειωτήρα από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το κιβώτιο ροής είναι ένα πεπλατυσμένο ακροφύσιο που εκτοξεύει νερό με μεγάλη ταχύτητα.

Ο σχηματισμός του χαρτιού αρχίζει με την εκτόξευση από το κιβώτιο ροής μίας δέσμης νερού (στην υπό διερεύνηση χαρτοποιητική μηχανή έχει μήκος 2,80 m), που περιέχει ίνες χαρτιού σε περιεκτικότητα 0,2% (δηλ. 2 gr ινών χαρτιού σε 1 lt νερού) [19]. Η δέσμη αυτή προσπίπτει μεταξύ των δύο πλεγμάτων καθώς αυτά κινούνται (σημείο Α, Σχήμα 1). Το νερό μαζί με ένα μεγάλο ποσοστό ινών διαπερνά το πίσω πλαστικό πλέγμα και απομακρύνεται, ενώ οι υπόλοιπες ίνες εγκλωβίζονται μεταξύ των δύο πλεγμάτων και θα αποτελέσουν το χαρτί που θα παραχθεί. Οι ίνες που παρέμειναν μεταξύ των δύο πλεγμάτων προσκολλώνται πάνω στο μπροστινό πλαστικό πλέγμα.

Ακολούθως το χαρτί μεταφέρεται με την πάνω πλευρά του μπροστινού πλαστικού πλεγματος στο δεύτερο τμήμα που είναι το τμήμα των πρεσών. Το τμήμα αυτό αποτελείται από δύο πρέσες, την απορροφητική και την "τυφλή" πρέσα που έχουν μορφή ρόλου, την τσόχα η οποία είναι τυλιγμένη στις δύο πρέσες, μία συσκευή κενού και μερικούς άλλους μικρότερους ρόλους. Η απορροφητική πρέσα είναι ένας μεταλλικός ρόλος επενδυμένος με ελαστικό και διάτρητος για να μπορεί να απορροφά σημαντικές ποσότητες νερού, έτσι ώστε να βοηθά στην ξήρανση του χαρτιού. Η άλλη ονομάζεται "τυφλή" πρέσα, διότι σε σύγκριση με την προηγούμενη πρέσα δεν έχει καθόλου οπές. Είναι και αυτή ένας μεταλλικός ρόλος επενδυμένος με ελαστικό.

Βοηθά και αυτή στην ξήρανση του χαρτιού, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό.

Το μπροστινό πλέγμα και η τσόχα εφάπτονται σ' ένα τμήμα περίπου 20 cm (Σχήμα 1, σημείο Β). Σε αυτό το τμήμα και πάνω από την τσόχα υπάρχει μία συσκευή κενού (δεν φαίνεται) που αναρροφά μέσω της τσόχας το χαρτί από την πάνω πλευρά του πλέγματος και το προσκολλά στην κάτω πλευρά της τσόχας. Έτσι το χαρτί μεταφέρεται από την πάνω πλευρά του μπροστινού πλέγματος στην κάτω πλευρά της τσόχας.

Σημειώνεται ότι η γραμμική ταχύτητα του πλέγματος πρέπει να είναι ίση με την γραμμική ταχύτητα της τσόχας. Αφού περάσει το χαρτί στην τσόχα στο σημείο Β, μεταφέρεται από αυτήν στην απορροφητική πρέσα, όπου λόγω της αναρρόφησης το χαρτί αποβάλλει σημαντικές ποσότητες νερού. Στη συνέχεια το χαρτί συμπιέζεται από την απορροφητική πρέσα πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο στο σημείο C (Σχήμα 1). Επειδή το στεγνωτικό τύμπανο είναι ζεστό, το χαρτί προσκολλάται πάνω στην επιφάνειά του. Από το σημείο αυτό αρχίζει η ξήρασή του.

Το τρίτο τμήμα είναι εκείνο, όπου το χαρτί στεγνώνει. Αποτελείται από ένα στεγνωτικό τύμπανο και δύο χοάνες. Το χαρτί ξηραίνεται ερχόμενο σε επαφή με την επιφάνεια του θερμού στεγνωτικού τυμπάνου (περίπου 100 °C) σε ένα τόξο 270°. Το στεγνωτικό τύμπανο είναι ένας μεταλλικός κύλινδρος, ο οποίος περιστρέφεται μέσω δυο κινητήρων συνεχούς ρεύματος με κοινό μειωτήρα και μέσα στον οποίο κυκλοφορεί ατμός υπό πίεση 6 – 8 bar για τη θέρμανση του (περίπου στους 100 °C).

Το χαρτί στη συνέχεια περνά από την “τυφλή” πρέσα. Πιο πάνω είναι οι χοάνες, οι οποίες καλύπτουν μεγάλο μέρος της περιμέτρου του στεγνωτικού τυμπάνου. Παρέχουν ζεστό αέρα με μεγάλη ταχύτητα και έτσι συνεισφέρουν και αυτές στην ξήρανση του χαρτιού. Με αυτόν τον τρόπο το χαρτί ξηραίνεται και η υγρασία του πέφτει στο 6% περίπου ανάλογα με τον επιθυμητό τύπο χαρτιού. Το χαρτί πλέον ξηρό απομακρύνεται από το τύμπανο με μία μεταλλική ξύστρα (Σχήμα 1, σημείο D), η οποία πιέζεται πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο από έναν αεροθάλαμο. Η διαδρομή του χαρτιού από το σχηματισμό του μέχρι την περιτύλιξη του υπό μορφή ρόλου φαίνεται στο Σχήμα 1 με έντονη μαύρη γραμμή και η διαδρομή που ακολουθεί είναι η ABCDE.

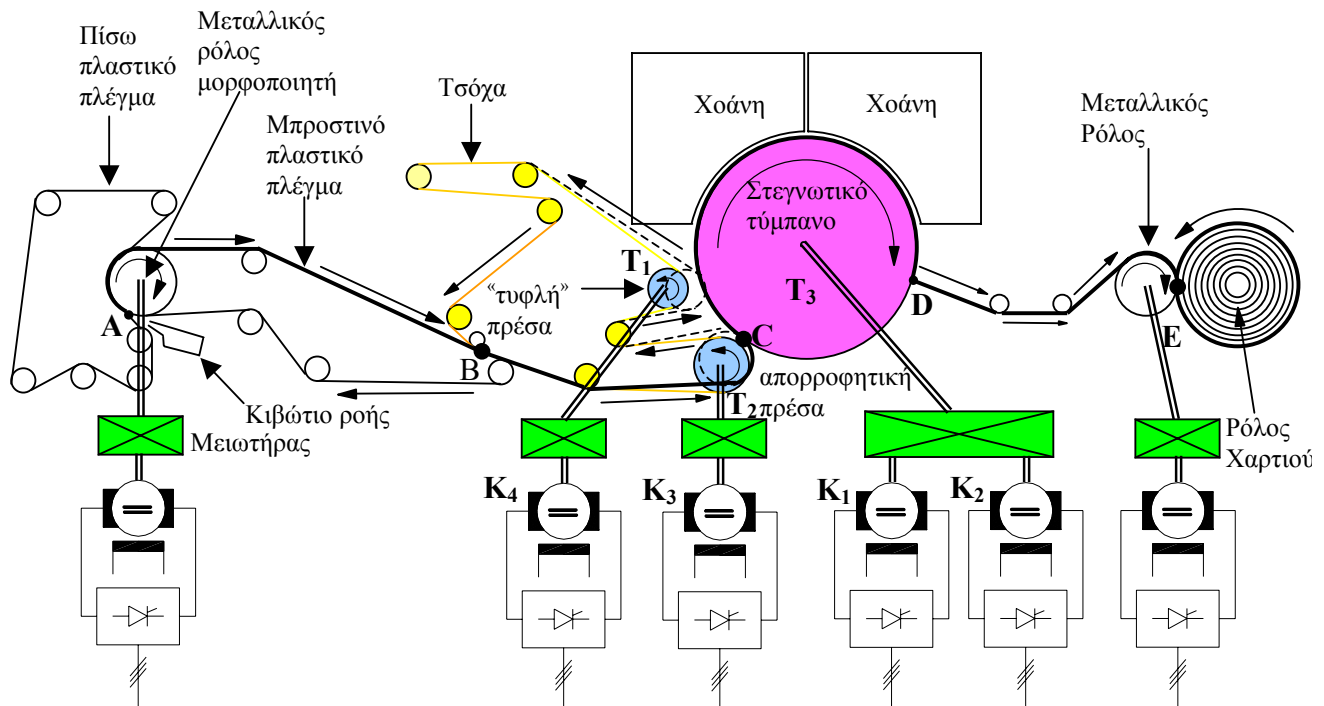
Το τμήμα του πολυκινητήριου συστήματος της χαρτοποιητικής μηχανής που εκ του ρόλου του αποτελεί το κύριο μέρος του κινητήριου συστήματος και ερευνάται στην παρούσα εργασία, είναι το στεγνωτικό τύμπανο και οι πρέσες. Το στεγνωτικό τύμπανο οδηγείται μέσω ενός κοινού μειωτήρα από τους κινητήρες K_1 και K_2 . Οι πρέσες οδηγούνται από τους κινητήρες K_3 και K_4 αντίστοιχα.

Αρκετές φορές κατά το ξεκίνημα της χαρτοποιητικής μηχανής και ειδικά κατά τη συμπίεση των πρεσών πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο εμφανίζεται ένα σοβαρό πρόβλημα σύμφωνα με τις εμπειρίες από τη λειτουργία συστημάτων παραγωγής χαρτιού. Το συνολικό μηχανικό φορτίο του κινητήριου συστήματος δεν κατανέμεται σωστά και στα

δύο τμήματα, με αποτέλεσμα το ένα τμήμα να παίρνει όλο το φορτίο και να υπερφορτώνεται. Το τμήμα που παίρνει όλο το φορτίο είναι εκείνο που κατά τη στιγμή της συμπίεσης των δύο τμημάτων είχε την πιο μεγάλη γραμμική ταχύτητα. Μία διαφορά 0,5 % έως 1 % στην ταχύτητα των δύο τμημάτων μπορεί να προκαλέσει αυτό το πρόβλημα. Ουσιαστικά το τμήμα εκείνο που είχε τη μεγαλύτερη ταχύτητα παρασύρει το άλλο τμήμα. Λόγω της μηχανικής εμπλοκής των δύο τμημάτων με διαφορετικές γραμμικές ταχύτητες, η ταχύτητα εκείνου του τμήματος που είχε τη μικρότερη ταχύτητα (πριν από τη συμπίεση) αυξάνει. Ένας ελεγκτής ταχύτητας που υπάρχει στο σύστημα ελέγχου του τμήματος αυτού (με τη μικρότερη ταχύτητα), λόγω της αύξησης της ταχύτητας πάνω από την επιθυμητή τιμή, μειώνει το μέγεθος εξόδου του, με αποτέλεσμα να μειωθεί το ρεύμα στους δρομείς των δύο κινητήρων συνεχούς ρεύματος του τμήματος αυτού. Η μεταβολή της ταχύτητας, όμως, του τμήματος με τη μικρότερη ταχύτητα δεν ακολουθεί τη μείωση του ρεύματος λόγω των μεγάλων ροπών αδράνειας που έχουν οι περιστρεφόμενες μάζες. Το αποτέλεσμα είναι να εξακολουθεί να υπάρχει αρνητική διαφορά μεταξύ επιθυμητής και μετρούμενης ταχύτητας. Έτσι ο ελεγκτής ταχύτητας μειώνει ακόμη περισσότερο το ρεύμα των δρομίων των δύο κινητήρων. Αυτή η διαδικασία λόγω της μη μείωσης της ταχύτητας του τμήματος αυτού συνεχίζεται, με αποτέλεσμα να μηδενίζεται το ρεύμα στους δρομείς των κινητήρων. Αυτό είναι αιτία υπερφόρτωσης του άλλου τμήματος. Αυτά συμβαίνουν μέσα σε ελάχιστο χρόνο (της τάξης δεκάτων του δευτερολέπτου).

Το υπερφορτωμένο πλέον σύστημα σταματά για λόγους προστασίας των κινητήρων από υπερθέρμανση, διότι αυτοί δεν είναι σε θέση να λειτουργήσουν υπερφορτωμένοι για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έλλειψη κάποιου συστήματος έλεγχου της κατανομής του συνολικού φορτίου μεταξύ των δύο τμημάτων. Συνήθως στην πράξη με αλληπάλληλες διακοπές και επανεκκινήσεις καθίσταται δυνατή κάποια λογική κατανομή φορτίου στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, χωρίς τούτο να αποτελεί ριζική αντιμετώπιση του προβλήματος.

Στην παρούσα εργασία καθορίζεται μια λογική ελέγχου, που εξασφαλίζει την ίδια γραμμική ταχύτητα στα τύμπανα T_1 , T_2 και T_3 , όταν οι πρέσες δεν ασκούν πίεση πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο. Όταν οι πρέσες ασκούν πίεση, πρέπει οι κινητήρες K_1 , K_2 , K_3 και K_4 να συνεισφέρουν στη συνολική ροπή φορτίου ανάλογα με την ονομαστική τους ροπή. Και στις δύο φάσεις λειτουργίας οι δύο κινητήρες κάθε τμήματος πρέπει να συνεισφέρουν το ίδιο στο φορτίο αυτών των τμημάτων, με την προϋπόθεση ότι οι κινητήρες σε κάθε τμήμα είναι ίδιοι μεταξύ τους, ή πρέπει να συνεισφέρουν φορτίο ανάλογο της ονομαστικής τους ροπής, στην περίπτωση που οι κινητήρες δεν είναι ίδιοι μεταξύ τους. Όμως το ποσοστό του φορτίου μεταξύ των δύο τμημάτων και μεταξύ των δύο κινητήρων του ίδιου τμήματος πρέπει να αλλάζει, εάν συντρέχει κάποιος σοβαρός λόγος (π.χ. μειωμένος αερισμός ψύξης σε ένα κινητήρα).



Σχήμα 1: Βασική δομή μιας χαρτοποιητικής μηχανής και του κινητήριου συστήματός της.
Figure 1: Basic structure of a paper machine and its drive.

Το στεγνωτικό τύμπανο κινείται με δύο κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με ένα κοινό μειωτήρα, μέσα από τον οποίο περνά ο άξονας του στεγνωτικού τυμπάνου. Κάθε μία πρέσα κινείται από ένα ξεχωριστό κινητήρα, τυλίγονται δε και οι δύο με την ίδια τσόχα, η οποία είναι ταυνομένη έντονα, έτσι ώστε να μην εμφανίζεται καμία ολίσθηση στις πρέσες (Σχήμα 1). Η τσόχα είναι ουσιαστικά ένας μίαντας, που συνδέει τις δύο πρέσες. Επειδή ο μίαντας αυτός είναι πλατύς σε σύγκριση με το πάχος του, δεν είναι ελαστικός. Έτσι η γραμμική ταχύτητα των δύο πρεσών είναι ίδια. Πριν γίνει η συμπίεση, πρέπει να έχει επιτευχθεί η ίδια γραμμική ταχύτητα και στα δύο τμήματα, διαφορετικά θα καταστραφεί η τσόχα. Στο κινητήριο σύστημα με την προτεινόμενη δομή, κάθε κινητήρας τροφοδοτείται από μία εξαπαλμική γέφυρα με θυρίστορ. Όλες οι γέφυρες αυτές είναι συνδεδεμένες με το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή ισχύος. Τα χαρακτηριστικά των κινητήρων και του μετασχηματιστή ισχύος μιας τυπικής χαρτοποιητικής μηχανής φαίνονται στο Παράρτημα Α. Στις μηχανές αυτού του είδους η μέγιστη γραμμική ταχύτητα συνήθως είναι 1.500 m/min.

Σε θέματα που αφορούν στη μελέτη του ελέγχου βιομηχανικών συστημάτων χαρτοποιητικών μηχανών αναφέρονται οι εργασίες [13] και [14]. Ειδικότερα σε θέματα ταλαντώσεων που εμφανίζονται σ' αυτά τα συστήματα αναφέρονται οι εργασίες [11], [15] και [16].

Για τη μελέτη της προτεινόμενης μεθόδου αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος του πολυκινητήριου συστήματος γίνεται μια μοντελοποίηση και στη συνέχεια εξομοίωση σε H/Y με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB

/ SIMULINK. Σχετικά θέματα έχουν μελετηθεί και στις εργασίες [1] και [2]. Με την εξομοίωση διερευνάται διεξοδικά η στατική και δυναμική συμπεριφορά του πολυκινητήριου συστήματος και έτσι διαπιστώνεται η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου. Επίσης εξετάζεται η κατάσταση, όταν συμβούν κάποια χαρακτηριστικά σφάλματα στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

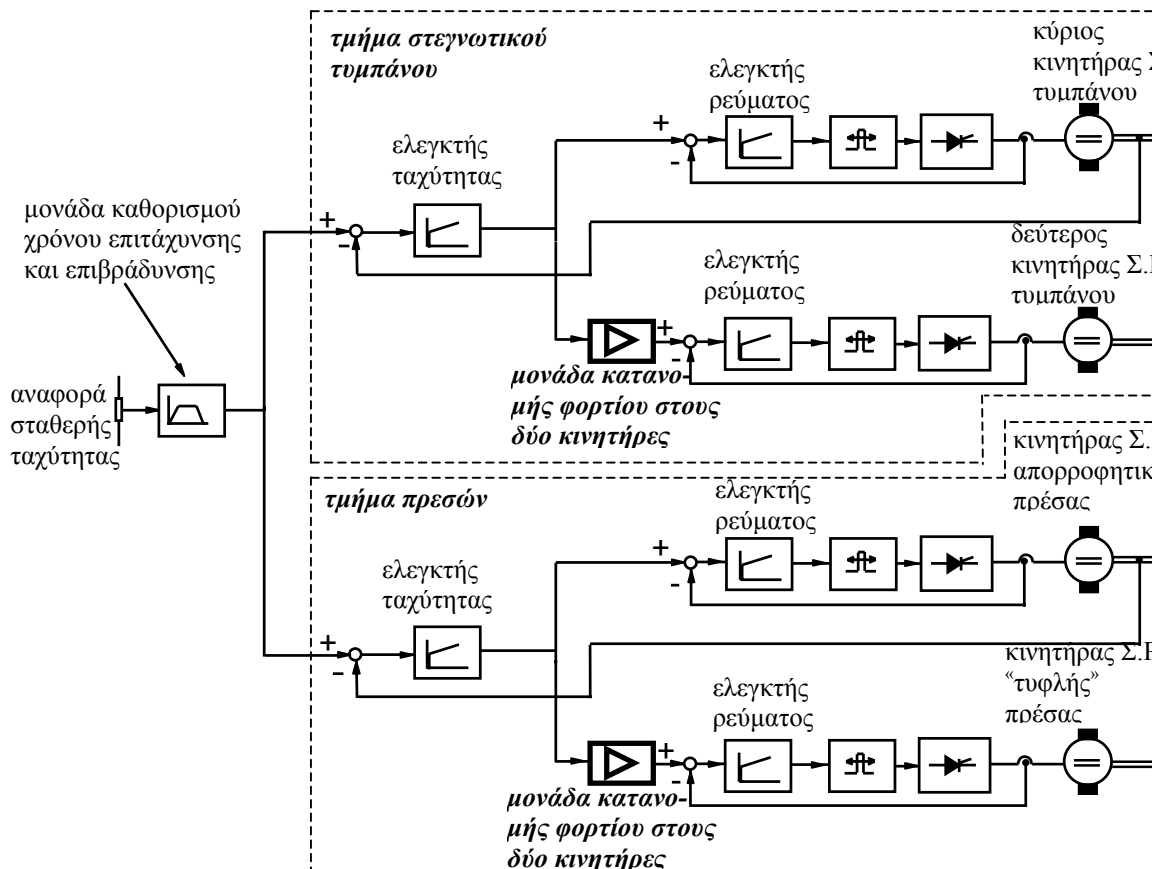
2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$u_{Ti} (i=1, 2)$: τάση δρομέα κινητήρων στεγνωτικού τυμπάνου,
$u_{Ti} (i=3, 4)$: τάση δρομέα κινητήρων απορροφητικής και «τυφλής» πρέσας,
$u_{ei} (i=1, 2)$: επαγόμενη τάση δρομέα των δύο κινητήρων στεγνωτικού τυμπάνου,
$u_{ei} (i=3, 4)$: επαγόμενη τάση δρομέα κινητήρα απορροφητικής και «τυφλής» πρέσας,
$I_{Ti} (i=1, 2)$: ρεύμα δρομέα των κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου,
$I_{Ti} (i=3, 4)$: ρεύμα δρομέα κινητήρα απορροφητικής και «τυφλής» πρέσας,
$R_{Ti} (i=1, 2)$: ωμική αντίσταση δρομέα των κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου,
$R_{Ti} (i=3, 4)$: ωμική αντίσταση δρομέα κινητήρα απορροφητικής και «τυφλής» πρέσας,
$L_{Ti} (i=1, 2)$: αυτεπαγωγή δρομέα των κινητήρων του

L_{Ti} ($i=3, 4$)	: στεγνωτικού τυμπάνου, αυτεπαγωγή δρομέα κινητήρα απορροφητικής και “τυφλής” πρέσας,	ω_1, ω_2	: γωνιακή ταχύτητα του άξονα των κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου,
Te_1, Te_2, T_L	: ηλεκτρομαγνητική ροπή κινητήρων K_1 και K_2 και ροπή φορτίου στεγνωτικού τυμπάνου στους άξονες των κινητήρων K_1 και K_2 ,	ω_{sp}, ω_{bp}	: γωνιακή ταχύτητα του άξονα του κινητήρα της απορροφητικής και “τυφλής” πρέσας,
Te_3, Te_4, T_{pr}	: ηλεκτρομαγνητική ροπή κινητήρα απορροφητικής πρέσας, “τυφλής” πρέσας και ροπή φορτίου των πρεσών,	θ_3, θ_5	: θέση άξονα κινητήρα απορροφητικής και “τυφλής” πρέσας,
J_1, J_2, J_3	: ροπή αδράνειας των κινητήρων K_1 και K_2 και του στεγνωτικού τυμπάνου όπως “φαίνεται” από την πλευρά των κινητήρων,	ω_4, ω_5	: γωνιακή ταχύτητα του άξονα μετά το μειωτήρα της απορροφητικής και της “τυφλής” πρέσας,
J_4, J_5, J_6	: ροπή αδράνειας των κινητήρων K_3 και K_4 και των δύο πρεσών μαζί, με αναφορά στον άξονα μίας εξ’ αυτών,	$\theta_{yan}, \omega_{yan}$: θέση και γωνιακή ταχύτητα άξονα στεγνωτικού τυμπάνου,
J_{yan}	: ροπή αδράνειας του στεγνωτικού τυμπάνου,	$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$: μαγνητική ροή μηχανών συνεχούς ρεύματος,
Tl_{yan}	: ροπή φορτίου του στεγνωτικού τυμπάνου,	D_1, D_2, D_{yan}	: διάμετρος απορροφητικής, “τυφλής” πρέσας και στεγνωτικού τύμπανου,
Tl_{sys}, J_{sys}	: ροπή συνολικού φορτίου και ροπή αδράνειας στεγνωτικού τυμπάνου και των πρεσών με αναφορά τον άξονα του στεγνωτικού τυμπάνου,	i_1, i_2, i_{yan}	: σχέση μετάδοσης μειωτήρων απορροφητικής, “τυφλής” πρέσας και στεγνωτικού τυμπάνου.
C_1, C_2, C_3, C_4	: σταθερές των μηχανών συνεχούς ρεύματος,		
θ_1, θ_2	: θέση άξονα των δύο κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου,		

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η προτεινόμενη διαδικασία ελέγχου του πολυκινητήριου συστήματος γίνεται κατανοητή με τη βοήθεια των Σχημάτων 2 και 3. Μόνο ο ένας από τους δύο κινητήρες σε κάθε



Σχήμα 2: Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου, όταν οι πρέσες δεν πιέζουν το τύμπανο.
Figure 2: Block diagram of the control system when the presses are not in contact with the Yankee cylinder.

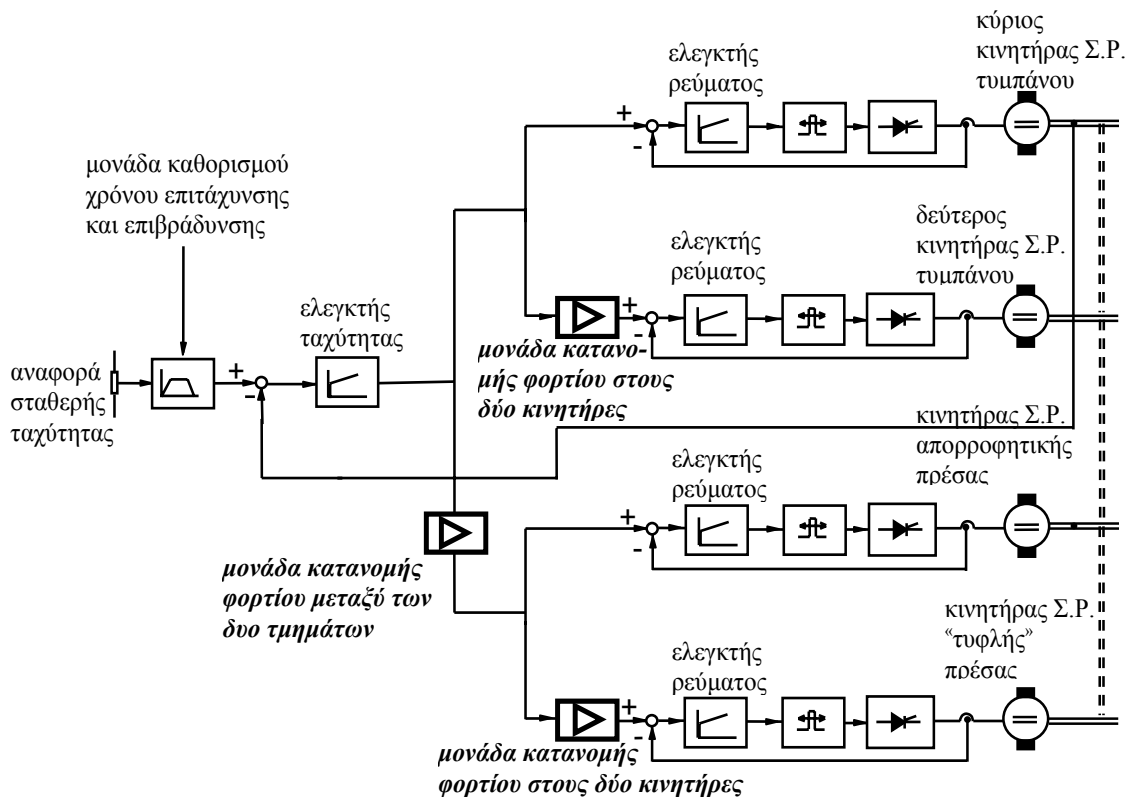
τμήμα έχει ταχογεννήτρια για τη μέτρηση της ταχύτητας.

Για την περίπτωση όπου οι πρέσες δεν είναι σε επαφή με το στεγνωτικό τύμπανο, ισχύει το Σχήμα 2. Η αναφορά σταθερής ταχύτητας οδηγείται σε μια μονάδα, που σκοπό έχει τη δημιουργία κατάλληλης κυματομορφής για το μέγεθος αναφοράς των ελεγκτών ταχύτητας λαμβάνοντας υπ' όψη τον επιθυμητό χρόνο επιτάχυνσης και επιβράδυνσης του συστήματος. Ακολούθως έχουμε τρεις ελεγκτές PI για κάθε τμήμα (με διακεκομμένες γραμμές επισημαίνονται τα δύο τμήματα, τμήμα στεγνωτικού τυμπάνου και τμήμα πρεσών), έναν ελεγκτή ταχύτητας και δύο ελεγκτές ρεύματος, οι οποίοι κατ' επέκταση είναι και ελεγκτές ροπής. Στην έξοδο του κάθε ελεγκτή ρεύματος προκύπτει ένα σήμα που ρυθμίζει τη γωνία εναύσεως των θυρίστωρ των αντίστοιχων γεφυρών. Το σήμα εξόδου του κάθε ελεγκτή ταχύτητας αποτελεί την αναφορά του ρεύματος ή της ροπής, ίδια και για τους δύο ελεγκτές ρεύματος.

Βασική καινοτομία στην προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου αποτελεί η χρησιμοποίηση μίας μονάδας κατανομής φορτίου, με σκοπό να αλλάξει την αναφορά του ελεγκτή ρεύματος για το δεύτερο κινητήρα του τυμπάνου ή για τον κινητήρα της "τυφλής" πρέσας. Αυτή η μονάδα είναι ένας ενισχυτής ή εξασθενητής. Εάν το κέρδος είναι 1, τότε οι ροπές των δύο κινητήρων είναι ίσες, εάν είναι μεγαλύτερο από 1, τότε η ροπή του δεύτερου κινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη ροπή

του κύριου κινητήρα. Το αντίθετο συμβαίνει εάν το κέρδος της μονάδας αυτής είναι μικρότερο από 1. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται ο λόγος των ροπών των δύο κινητήρων μέσα στο ίδιο τμήμα.

Στην περίπτωση όπου οι πρέσες ασκούν πίεση πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο ισχύει το Σχήμα 3. Και σ' αυτή την περίπτωση η αναφορά σταθερής ταχύτητας διέρχεται μέσω μίας μονάδας δημιουργίας σήματος αναφοράς με κύριο χαρακτηριστικό την ύπαρξη μίας ράμπας για επιτάχυνση και μίας για επιβράδυνση. Το σήμα αναφοράς σταθερής ταχύτητας είναι κοινό για όλο το σύστημα. Ακολούθως, σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου έχουμε συνολικά πέντε ελεγκτές PI, δηλ. έναν ελεγκτή ταχύτητας και τέσσερις ελεγκτές ρεύματος (ή ροπής). Η έξοδος του ελεγκτή ταχύτητας είναι η αναφορά ρεύματος (ή ροπής), ίδια και για τους τέσσερις ελεγκτές ρεύματος. Η αναφορά ρεύματος (ή ροπής) για το δεύτερο τμήμα διέρχεται από μία μονάδα κατανομής φορτίου, έτσι ώστε να ρυθμίζεται ο λόγος των φορτίων μεταξύ των δύο τμημάτων. Εάν το κέρδος της μονάδας αυτής είναι 1, τότε οι ροπές που συνεισφέρουν τα δύο τμήματα είναι ανάλογες των ονομαστικών τους ροπών, εάν είναι μεγαλύτερο από 1, τότε η ροπή του δεύτερου τμήματος είναι μεγαλύτερη από τη ροπή του πρώτου. Το αντίθετο συμβαίνει, εάν το κέρδος της μονάδας αυτής είναι μικρότερο από 1. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται ο λόγος των ροπών των



Σχήμα 3: Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου, όταν οι πρέσες πιέζουν το τύμπανο.
 Figure 3: Block diagram of the control system when the presses are in contact with the Yankee cylinder.

κινητήρων των δύο τμημάτων. Επειδή οι πρέσες πιέζουν με μεγάλη δύναμη το στεγνωτικό τύμπανο, μία χαρακτηριστική τιμή είναι 24 ton (ή 240 kN) ανά πρέσα, το φορτίο όλων των κινητήρων επαυξάνεται. Συνήθως, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας από 20% (όταν δεν ασκείται πίεση) αυξάνεται σε 60% της ονομαστικής ροπής των κινητήρων. Επισημαίνεται ότι η ονομαστική ροπή των κινητήρων αναπτύσσεται μόνο κατά τις επιταχύνσεις του κινητήριου συστήματος, ενώ στη συνέχεια απαιτείται ροπή μικρότερη της ονομαστικής.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ

Για την εξομοίωση του πολυκινητήριου συστήματος και τη μελέτη της συμπεριφοράς αυτού τόσο στη δυναμική κατάσταση όσο και στη μόνιμη λειτουργία χρησιμοποιούνται οι γνωστές εξισώσεις των μηχανών συνεχούς ρεύματος και το πρόγραμμα MATLAB / SIMULINK. Ειδικότερα οι εξισώσεις που περιγράφουν το κινητήριου σύστημα του στεγνωτικού τυμπάνου, όταν οι πρέσες δεν ασκούν πίεση πάνω σ' αυτό (Σχήμα 4), είναι:

$$u_{T1} = I_{T1} R_{T1} + L_{T1} \frac{dI_{T1}}{dt} + C_1 \Phi_1 \omega_1 \quad (4.1)$$

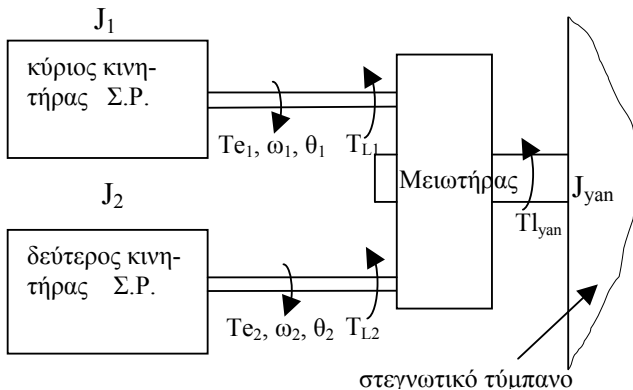
$$u_{T2} = I_{T2} R_{T2} + L_{T2} \frac{dI_{T2}}{dt} + C_2 \Phi_2 \omega_1 \quad (4.2)$$

$$T_{e1} = C_1 \Phi_1 I_{T1}, \quad T_{e2} = C_2 \Phi_2 I_{T2} \quad (4.3)$$

$$(J_1 + J_2 + J_3) \ddot{\theta}_1 = T_{e1} + T_{e2} - T_L \quad (4.4)$$

$$\dot{\theta}_1 = \omega_1, \quad \dot{\theta}_2 = \omega_2, \quad \theta_1 = \theta_2, \quad \omega_1 = \omega_2 \quad (4.5)$$

$$T_L = T_{L1} + T_{L2}, \quad T_{yan} = i_{yan} T_L, \quad J_{yan} = J_3 i_{yan}^2 \quad (4.6)$$



Σχήμα 4: Σχηματική παράσταση του κινητήριου συστήματος του στεγνωτικού τυμπάνου.

Figure 4: Yankee drying cylinder drive.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική κατάσταση του κινητήριου συστήματος των πρεσών, όταν δεν ασκούν πίεση πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο (Σχήμα 5), είναι :

$$u_{T3} = I_{T3} R_{T3} + L_{T3} \frac{dI_{T3}}{dt} + C_3 \Phi_3 \omega_{sp} \quad (4.7)$$

$$u_{T4} = I_{T4} R_{T4} + L_{T4} \frac{dI_{T4}}{dt} + C_4 \Phi_4 \omega_{bp} \quad (4.8)$$

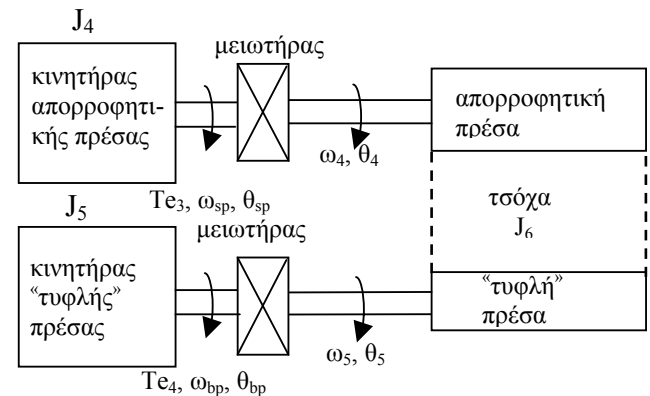
$$T_{e3} = C_3 \Phi_3 I_{T3}, \quad T_{e4} = C_4 \Phi_4 I_{T4} \quad (4.9)$$

$$J_{pr} \ddot{\theta}_4 = T_{e3} i_1 + T_{e4} i_2 (D_1 / D_2) - T_{pr} \quad (4.10)$$

$$J_{pr} = (J_4 i_1^2 + J_5 i_2^2 (D_1 / D_2)^2 + J_6) \quad (4.11)$$

$$\dot{\theta}_4 = \omega_4, \quad \dot{\theta}_5 = \omega_5 \quad (4.11)$$

$$\theta_5 = \theta_4 (D_1 / D_2), \quad \omega_5 = \omega_4 (D_1 / D_2) \quad (4.12)$$



Σχήμα 5: Σχηματική παράσταση του κινητήριου συστήματος των πρεσών.

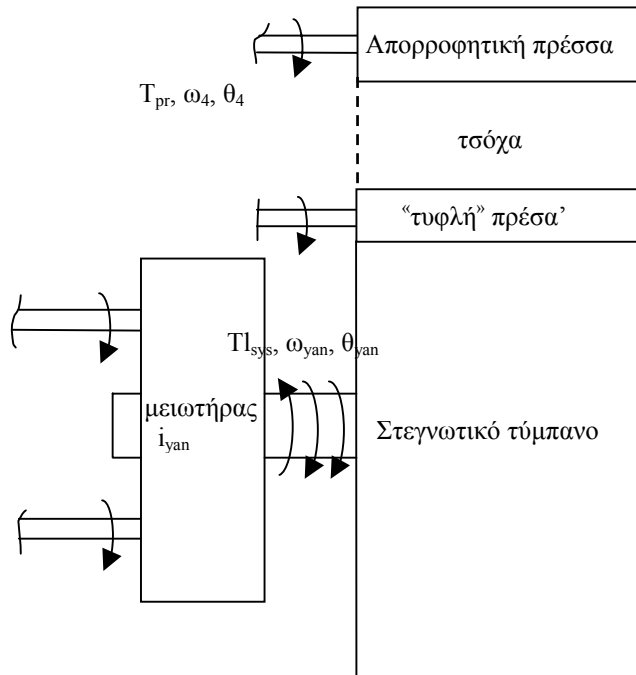
Figure 5: Presses drive system.

Για την περίπτωση που οι πρέσες ασκούν πίεση επί του στεγνωτικού τυμπάνου χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες εξισώσεις για την περιγραφή της δυναμικής κατάστασης (Σχήμα 6):

$$J_{sys} \ddot{\theta}_{yan} = T_{etot} - T_{sys} \quad (4.13)$$

$$J_{sys} = (J_4 i_1^2 + J_5 i_2^2 (D_1 / D_2)^2 + J_6) (D_{yan} / D_1)^2 + (J_1 + J_2) i_{yan}^2 + J_{yan} \quad (4.14)$$

$$T_{etot} = (T_{e1} + T_{e2}) i_{yan} + (T_{e3} i_1 + T_{e4} i_2 (D_1 / D_2)) (D_{yan} / D_1) \quad (4.15)$$



Σχήμα 6: Σχηματική παράσταση του κινητήριου συστήματος, όταν οι πρέσες ασκούν πίεση πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο.

Figure 6: Drive system when presses are in contact with the Yankee cylinder.

Η μοντελοποίηση του συνολικού πολυκινητήριου συστήματος βασίζεται αφ' ενός στη δομή σύμφωνα με το Σχήμα 1 και αφ' ετέρου στα λειτουργικά διαγράμματα των Σχημάτων 2 και 3. Με τις δυνατότητες του προγράμματος MATLAB / SIMULINK, στην παρούσα εργασία επιτεύχθη η εξομοίωση όλων των συνιστωσών των επί μέρους βρόχων ελέγχου, οι οποίοι περιλαμβάνουν ελεγχόμενες γέφυρες έξι παλμών με θυρίστορ, παλμογεννήτριες, ελεγκτές, μονάδες κατανομής φορτίου και μονάδες καθορισμού επιτάχυνσης και επιβράδυνσης της ταχύτητας.

Προφανώς το συνολικό δικτύωμα για την παράσταση του δεδομένου συστήματος με τις κατάλληλες εντολές του προαναφερθέντος προγράμματος εξομοίωσης είναι αρκετά πολύπλοκο και η έκτασή του δεν επιτρέπει την απεικόνιση εδώ.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ

Χρησιμοποιώντας τις Εξ. (4.1) έως (4.15) και τα παραμετρικά στοιχεία που φαίνονται στο Παράρτημα Α διεξήχθη εκτεταμένη εξομοίωση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά χαρακτηριστικά αποτελέσματα προερχόμενα από αυτή την εξομοίωση.

Στο Σχήμα 7 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας ενός πραγματικού συστήματος, όταν η ταχύτητα αναφοράς και η μεταβολή του φορτίου επιλέχθηκαν να μεταβάλλονται σύμφωνα με τα Σχήματα 7α και 7β. Η ταχύτητα αναφοράς

σύμφωνα με την επιλογή μας μεταβάλλεται (Σχήμα 7α) στην αρχή γραμμικά συναρτήσει του χρόνου για 10 sec, και ακολούθως παραμένει σταθερή για 10 sec. Στο διάστημα αυτό οι πρέσες ενεργοποιούνται ασκώντας πίεση πάνω στο στεγνωτικό τύμπανο, όπου το φορτίο μεταβάλλεται σημαντικά, σύμφωνα με την επιλογή μας σχεδόν κατά βηματικό τρόπο από 20% σε 60% των ονομαστικών ροπών των κινητήρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7β. Στη συνέχεια η ταχύτητα της μηχανής αυξάνει κατακτώντας υψηλή τιμή όπου και θα παραμείνει για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται από κάποια συγκεκριμένη παραγωγή χαρτιού. Η πραγματική ταχύτητα του στεγνωτικού τυμπάνου και των πρεσών που προκύπτει ως απόκριση του συστήματος φαίνεται στα Σχήματα 7γ και 7δ.

Παρατηρούμε ότι η απόκριση του συστήματος είναι πολύ ακριβής, επισημαίνοντας ότι ένα στεγνωτικό τύμπανο συνήθως έχει βάρος περίπου 40 ton και ροπή αδράνειας 20.000 kg m². Η απορροφητική και η “τυφλή” πρέσα έχουν βάρος περίπου 6 και 3 ton αντίστοιχα. Σημειώνεται εδώ, ότι για να επιτευχθεί μια σωστή απόκριση χωρίς ταλαντώσεις και υπέρβαση της επιθυμητής τιμής πρέπει να ρυθμιστούν σωστά οι ελεγκτές PI στο σύστημα ελέγχου με αλληπάλληλες δοκιμές καθ' όσον εκ των προτέρων δεν υπάρχει τρόπος προσδιορισμού των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων.

Στο Σχήμα 8 φαίνεται το ρεύμα του δρομέα των τεσ-σάρων κινητήρων. Παρατηρούμε ότι τα ρεύματα των δρομέων των κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου (Σχήματα 8α και 8β) είναι ίδια μεταξύ τους τόσο στη μεταβατική κατάσταση όσο και στη μόνιμη η οποία αποκαθίσταται από το χρονικό διάστημα $t = 40$ sec.

Το ίδιο παρατηρούμε και για τους δύο κινητήρες των πρεσών (Σχήματα 8γ και 8δ). Προφανώς οι κυματομορφές των αντίστοιχων ηλεκτρομαγνητικών ροπών είναι πανομοιότυπες με εκείνες των ρευμάτων λόγω της σχέσης 001. (Σχήματα 9α, 9β, 9γ και 9δ). Διαπιστώνεται ότι το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου οδηγεί στην επιθυμητή κατανομή του φορτίου με μεγάλη ακρίβεια.

Η ορθολογική κατανομή του φορτίου τόσο μεταξύ των κινητήρων του ίδιου τμήματος, όσο και μεταξύ των δυο τμημάτων, αποδεικνύεται ότι είναι απόλυτα εφικτή με την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου.

Για την πληρέστερη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συνολικού πολυκινητήριου συστήματος εξομοιώθηκαν δύο τυπικά σφάλματα, δηλ. το ξαφνικό ανοικτοκύκλωμα ενός θυρίστορ μιας γέφυρας, και η πλήρης διακοπή της λειτουργίας μιας γέφυρας.

Επιλέχθηκε η περίπτωση όπου ένα θυρίστορ ανοικτοκυκλώνεται στη γέφυρα που τροφοδοτεί το βοηθητικό κινητήρα του στεγνωτικού τυμπάνου.

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα του δρομέα του βοηθητικού κινητήρα του στεγνωτικού τυμπάνου τώρα παρουσιάζει μεγαλύτερη κυμάτωση και η μέγιστη τιμή του είναι μεγαλύτερη από την τιμή που είχε πριν παρουσιαστεί το σφάλ-

μα (Σχήμα 10 β). Το ρεύμα του δρομέα στους υπόλοιπους τρεις κινητήρες αυξάνει για μικρό χρονικό διάστημα και μετά επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση (Σχήματα 10α, 10γ, 10δ).

Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας που τροφοδοτείται από τη γέφυρα, που παρουσίασε το σφάλμα, συνεχίζει να προσφέρει ισχύ ίση με εκείνη όπως πριν γίνει το σφάλμα.

Στα Σχήματα 11α, 11β, 11γ, 11δ φαίνεται το ρεύμα των κινητήρων στη μόνιμη κατάσταση μετά το σφάλμα. Στο Σχήμα 11β φαίνεται ότι ένα από τα έξι θυρίστρος της γέφυρας που τροφοδοτεί το βοηθητικό κινητήρα του τυμπάνου δεν άγει, και η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα φθάνει στα 400 A, ενώ η μέγιστη τιμή του ρεύματος στο δρομέα του κύριου κινητήρα του στεγνωτικού είναι περίπου 275 A (Σχήμα 11α).

Προφανώς οι κυματομορφές των ηλεκτρομαγνητικών ροπών είναι πανομοιότυπες με εκείνες των ρευμάτων. Έτσι επιβεβαιώνεται η σωστή λειτουργία της λογικής ελέγχου, που προτείνεται στην παρούσα εργασία.

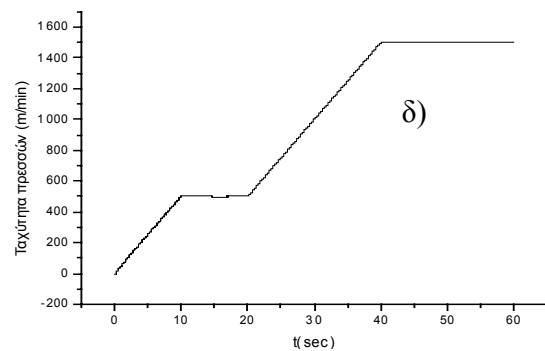
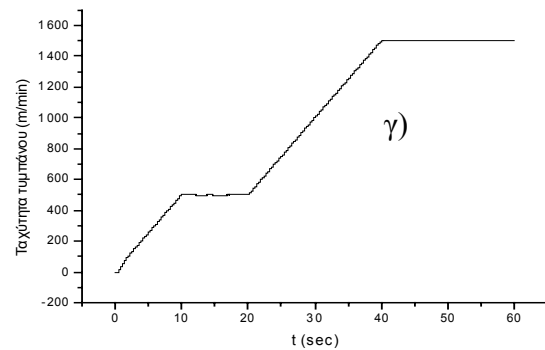
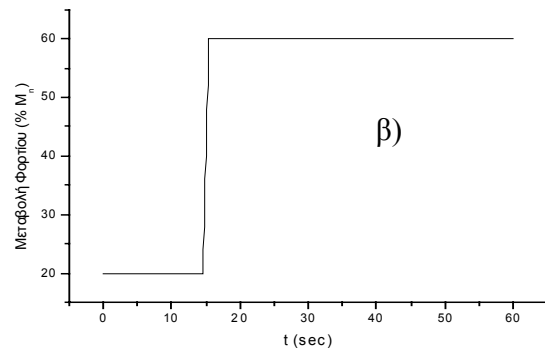
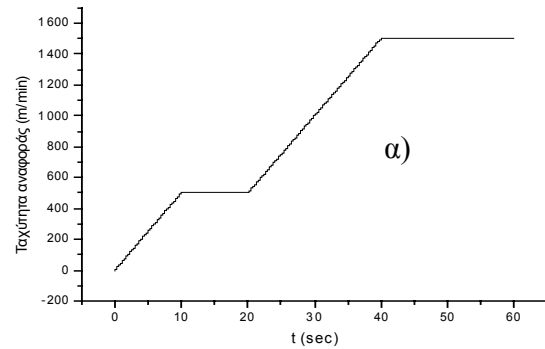
Η δεύτερη περίπτωση σφάλματος είναι η ολική παύση της λειτουργίας της γέφυρας που τροφοδοτεί το δεύτερο κινητήρα του στεγνωτικού τυμπάνου (Σχήμα 12). Παρατηρούμε μία πολύ μικρή μείωση της ταχύτητας του συστήματος για ελάχιστα δευτερόλεπτα (Σχήμα 13α). Τα ρεύματα του δρομέα στους υπόλοιπους τρεις κινητήρες αυξάνουν (Σχήματα 13β, 13γ, 13δ), με αποτέλεσμα να αυξάνουν και οι αντίστοιχες ροπές, ώστε να αντιμετωπίζεται πλήρως το μηχανικό φορτίο, το δε πολυκινητήριο σύστημα εξακολουθεί να περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα που είχε πριν από το σφάλμα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της εξομοίωσης ενός πραγματικού πολυκινητήριου συστήματος, η απόκρισή του είναι πολύ ακριβής και αρκετά γρήγορη (αν και υπάρχουν μεγάλες ροπές αδράνειας) χωρίς ταλαντώσεις (στα χρονικά σημεία $t = 10 \text{ sec}$ και $t = 40 \text{ sec}$ η απόκριση της ταχύτητας παρουσιάζει πολύ μικρή υπέρβαση της αναφοράς ταχύτητας, που δεν μπορεί να φανεί στα Σχήματα λόγω της κλίμακας). Αυτό οφείλεται στην ακριβή ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών PI, η οποία επιτεύχθηκε με κατάλληλες δοκιμές.

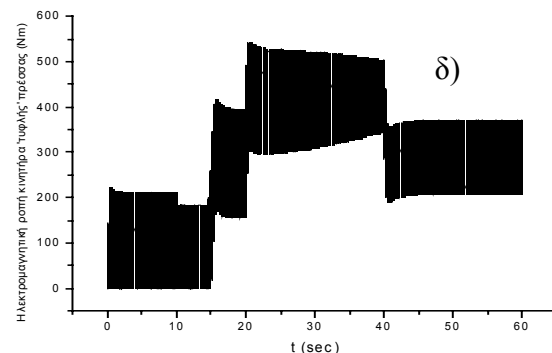
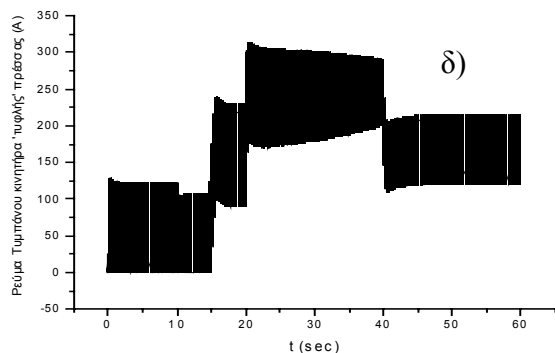
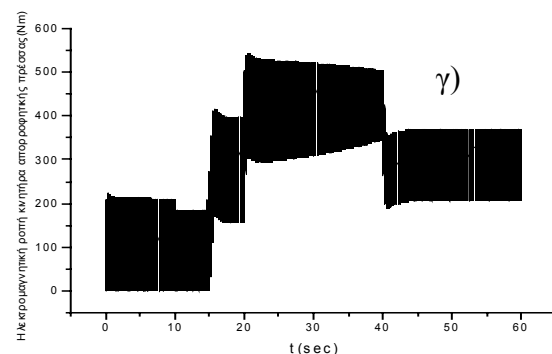
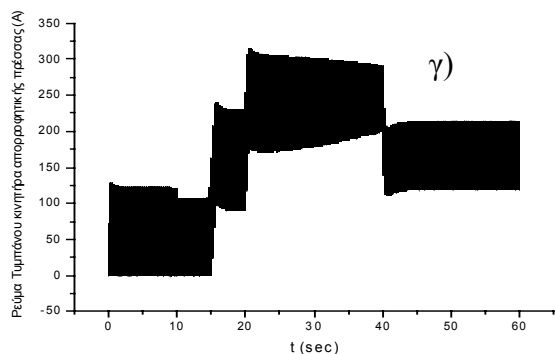
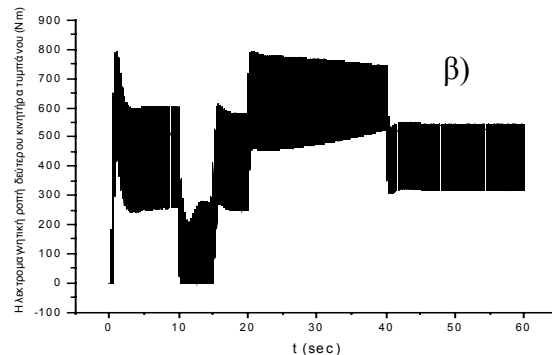
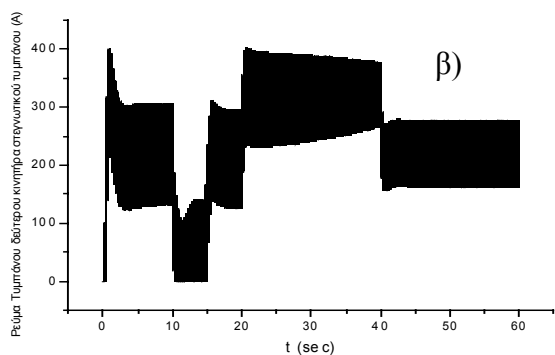
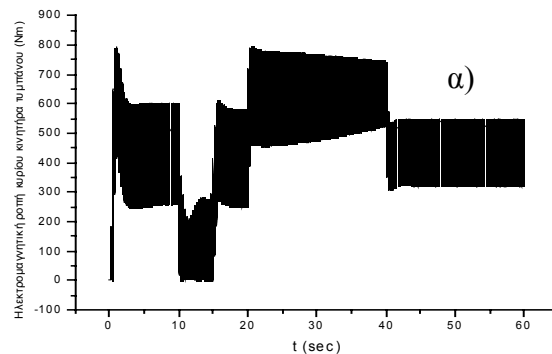
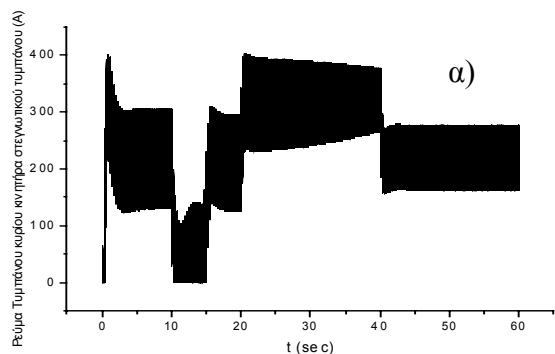
Η κατανομή των φορτίων γίνεται όπως ακριβώς είχε προδιαγραφεί. Μέσω της προτεινόμενης λογικής ελέγχου καθορίζονται ίσα φορτία μεταξύ των κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου και των κινητήρων των πρεσών, και ίσο φορτίο (% της ονομαστικής ροπής των κινητήρων) μεταξύ των δύο τμημάτων.

Παρατηρούμε ότι οι ροπές των κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου είναι ίσες μεταξύ τους, πράγμα που είχε τεθεί ως στόχος. Επίσης παρατηρούμε ότι και οι ροπές των κινητήρων των πρεσών είναι ίσες μεταξύ τους.



Σχήμα 7: Απόκριση ταχύτητας κατά τη μεταβολή της ταχύτητας αναφοράς και της ροπής του φορτίου α) ταχύτητα αναφοράς, β) ροπή αναφοράς του φορτίου, γ) ταχύτητα στεγνωτικού τυμπάνου, δ) ταχύτητα πρεσών.

Figure 7: Speed response with speed and load time variable reference α) speed reference, β) load reference, γ) Yankee speed, δ) presses section speed.

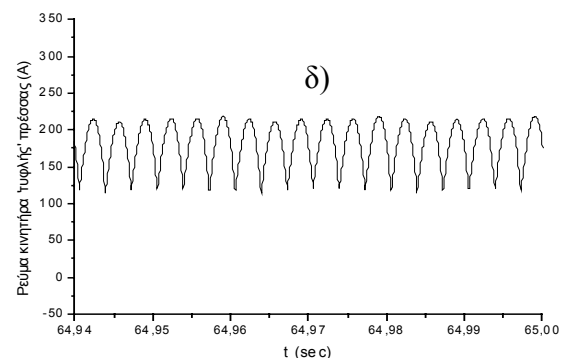
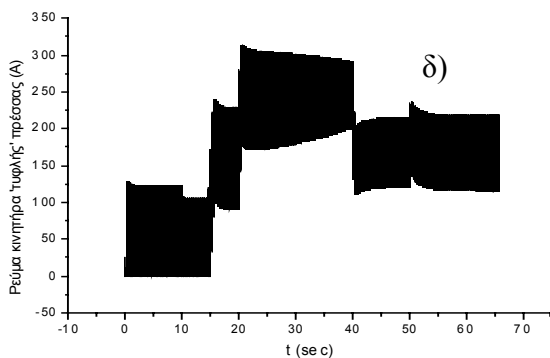
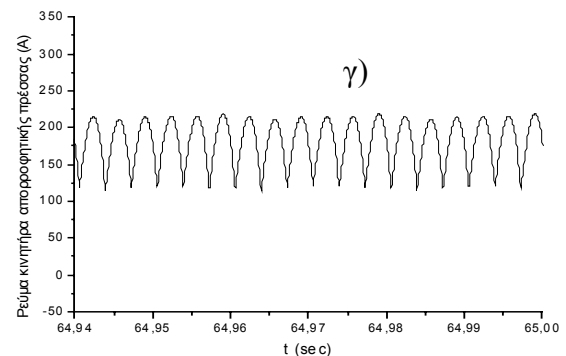
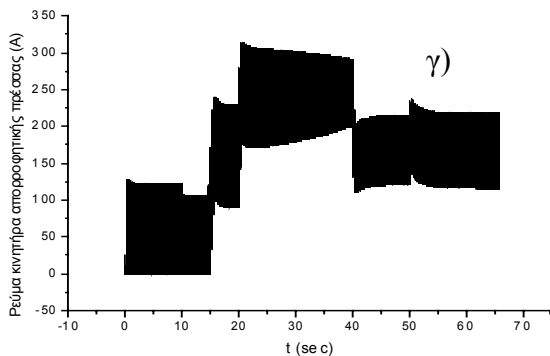
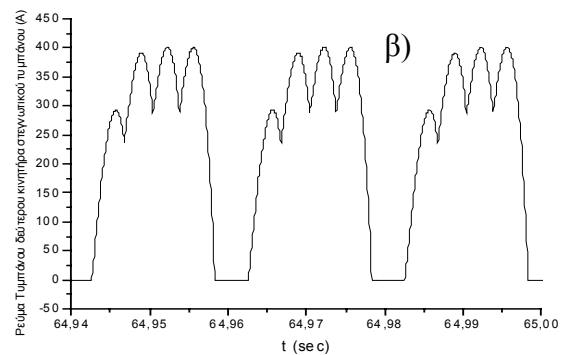
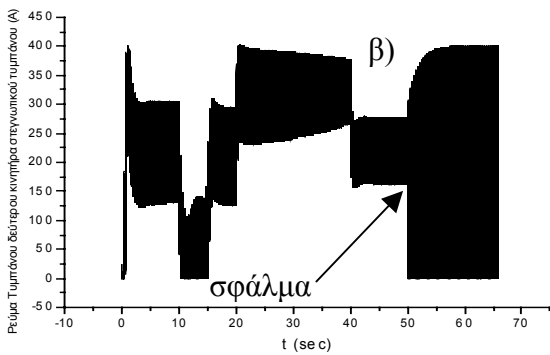
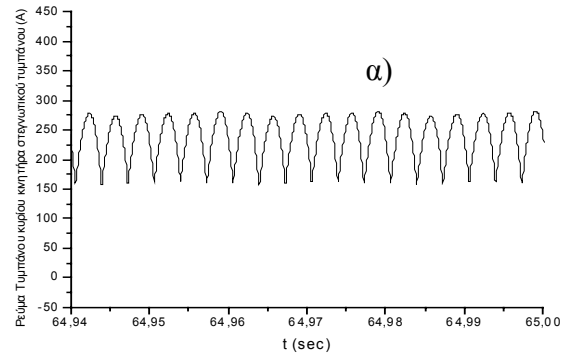
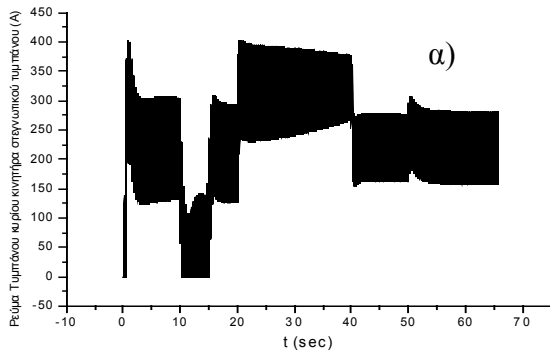


Σχήμα 8: Ρεύμα τυμπάνου: α, β) κύριου και δεύτερου κινητήρα του στεγνωτικού τυμπάνου, γ, δ) κινητήρων απορροφητικής και «τυφλής» πρέσας.

Figure 8: Armature current: α, β) Yankee master and helper motor, γ, δ) suction and blind press motors.

Σχήμα 9: Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής: α) κύριου κινητήρα στεγνωτικού τυμπάνου, β) δεύτερου κινητήρα στεγνωτικού τυμπάνου, γ, δ) κινητήρων απορροφητικής και «τυφλής» πρέσας.

Figure 9: Electromagnetic torque response: α) Yankee master motor; β) Yankee helper motor; γ, δ) suction and blind press motor.

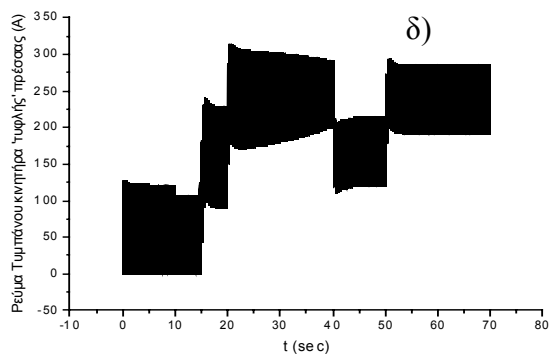
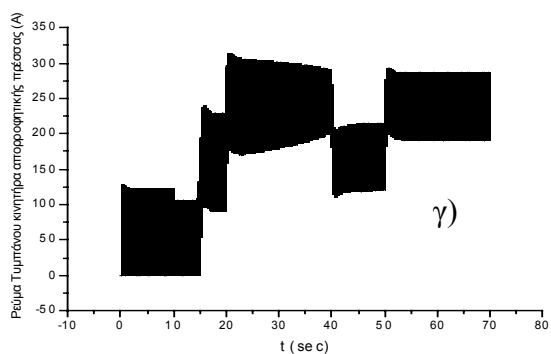
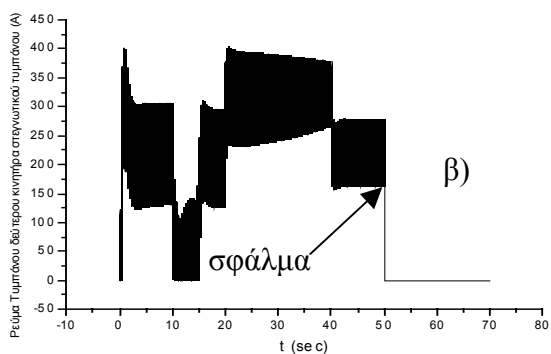
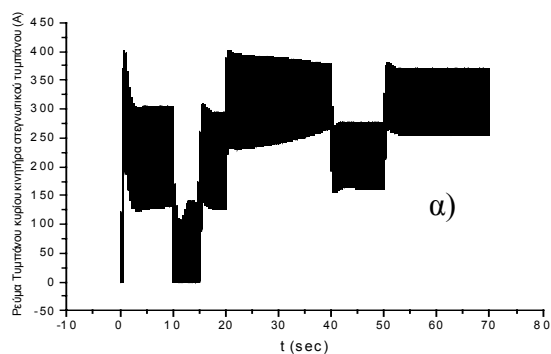


Σχήμα 10: Ρεύμα δρομέα με ένα ανοικτοκυκλωμένο θυρίστορ: α, β) κύριου και δεύτερου κινητήρα στεγνοωτικού τυμπάνου, γ, δ) απορροφητικής και "τυφλής" πρέσας.

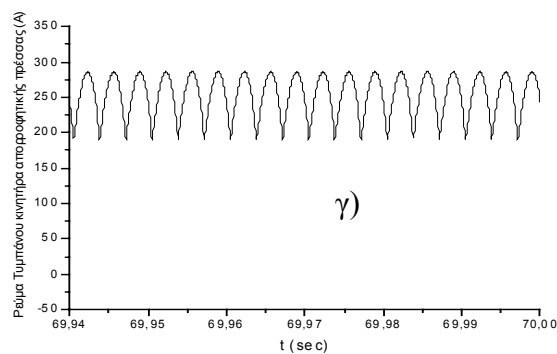
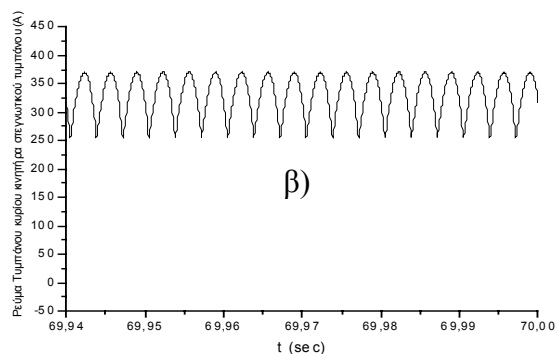
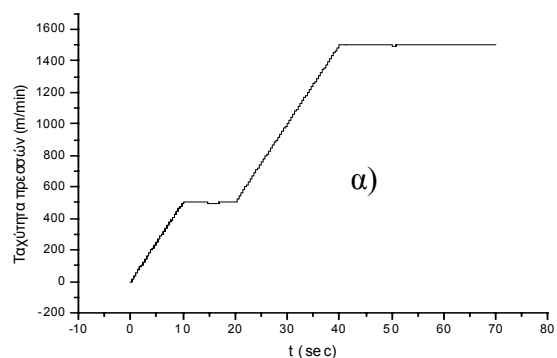
Figure 10: Armature current when one thyristor is open: α, β) Yankee master and helper motor; γ, δ) suction and blind press motor.

Σχήμα 11: Ρεύμα δρομέα με ένα ανοικτοκυκλωμένο θυρίστορ: α, β) κύριου και δεύτερου κινητήρα στεγνοωτικού τυμπάνου και γ, δ) απορροφητικής και "τυφλής" πρέσας.

Figure 11: Armature current when one thyristor is open: α, β) Yankee master and helper motor; γ, δ) suction and blind press motor.



Σχήμα 12: Ρεύμα δρομέα κινητήρων όταν μια γέφυρα είναι εκτός λειτουργίας: α, β) κύριου και δεύτερου κινητήρα στεγνωτικού τυμπάνου και γ, δ) απορροφητικής και "τυφλής" πρέσας.
 Figure 12: Armature current when one thyristor bridge is open: α, β) Yankee master and helper motor, γ, δ) suction, blind press motor.



Σχήμα 13: Γέφυρα δεύτερου κινητήρα τυμπάνου εκτός λειτουργίας: α) ταχύτητα συστήματος, β, γ, δ) ρεύμα δρομέα κύριου κινητήρα στεγνωτικού τυμπάνου, απορροφητικής και "τυφλής" πρέσας.

Figure 13: a) drive speed, β, γ, δ) Yankee master, suction and blind press motor armature current when a thyristor bridge is open.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παραμετρικά στοιχεία:

Α) των κινητήρων του στεγνωτικού τυμπάνου:

$$P_n = 152 \text{ kW}$$

$$N_n = 1870 \text{ min}^{-1}$$

$$\begin{aligned} M_n &= 776 \text{ Nm} \\ U_n &= 420 \text{ V} \\ I_n &= 394 \text{ A} \\ L_n &= 1.20 \text{ mH} \\ R_a &= 86.8 \text{ m}\Omega \\ J_{\text{mot}} &= 1.2 \text{ kg m}^2 \end{aligned}$$

Β) των κινητήρων των πρεσών:

$$\begin{aligned} P_n &= 117 \text{ kW} \\ N_n &= 2140 \text{ min}^{-1} \\ M_n &= 522 \text{ Nm} \\ U_n &= 420 \text{ V} \\ I_n &= 302 \text{ A} \\ L_n &= 1.46 \text{ mH} \\ R_a &= 107.9 \text{ m}\Omega \\ J_{\text{mot}} &= 0.6 \text{ kg m}^2 \end{aligned}$$

Γ) του στεγνωτικού τυμπάνου:

$$\begin{aligned} J_{\text{Yankee}} &= 100 \text{ kgr m}^2 \text{ (πλευρά αξόνων κινητήρων)} \\ J_{\text{Presses}} &= 100 \text{ kgr m}^2 \end{aligned}$$

Δ) του μετασχηματιστή ισχύος:

$$\begin{aligned} P_n &= 1600 \text{ kVA}, L_k = 16 \text{ }\mu\text{H}, R_k = 1 \text{ m}\Omega, \\ U_n &= 400 \text{ V}, I_n = 2310 \text{ A}, \text{Dyn 11} \end{aligned}$$

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. C. Michael and A. Safacas: "Design of a multi DC drive system based on hierarchical Control", **ELECTROMOTION**, Vol. 4, No 1-2, 1997, pp. 50-54.
2. C. Michael and A. Safacas: "Analysis of a Drive System Consisting of two DC Motors Driving the Yankee Drying Cylinder of a Tissue Paper machine", **IEEE, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS 2003, (ISIE 2003)**, Rio de Janeiro, Brasil.
3. Marius J. Nieniewski and Richard S. Marleau: "Mathematical Modeling of a Digital Current Loop for Electrical Drives", **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, VOL IE-34, NO. 1, FEBRUARY 1987, pp. 107-114.

4. Jink-Ping Jiang: "Optimal Feedback Control of direct-Current Motors", **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, VOL. 37, NO. 4, AUGUST 1990.

5. Jun-Kenu Ji: "DSP-Based Self-Tuning IP Speed Controller with Load Torque Compensation for rolling Mill DC drive", **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, VOL. 42, NO. 4, AUGUST 1995, 382-386.

6. Miomir K. Vukobratovic, Veljko Potkonjak: "Dynamics of contact tasks in robotics. Part I: general model of robot interacting with environment", **Mechanism and machine theory**, Vol. 34, 1999, pp. 923 – 942.

7. J. P. Sadler, R. W. Mayne and K. C. Fan: "Generalized Study of Crank – rocker Mechanisms Driven by a DC motor", **Mechanism and machine theory**, Vol. 15, 1980, pp. 435 - 445.

8. Jian Tao and J. P. Sadler: "Constant speed of a driven mechanism system", **Mechanism and machine theory** Vol 30, 1995, pp. 737 –748.

9. M. N. Ambardekar and K. N. Gupta: "Stochastic optimal control of vibrations of a high-speed cam driven mechanism", **Mechanism and machine theory**, Vol. 25, 1990, pp. 59-68.

10. C. Michael and A. Safacas: "Behavior of a drive system consisting of two DC motors with elastic shafts driving the Yankee drying cylinder of a tissue paper machine", **The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, (IPEMC 2003)**, August 14-17, 2003, Xi'an, China.

11. M. Valenzuela, J. Bentley and R. Lorenz, "Evaluation of Torsional Oscillations in Paper Machine Sections," **Pulp and Paper Industry Technical Conference**, 2004. Conference Record of the 2004 Annual, 27 June – 1 July 2004.

12. C. Michael and A. Safacas: "A Control Method for a Precise Load Distribution of a Multi-motor D.C. Drive System with Elastic Shafts Driving a Tissue Paper Machine", **ELECTROMOTION**, Vol. 10, No 3, July –September 2003, pp. 336 - 341.

13. M. Valenzuela and R. Lorenz, "Start up and commissioning Procedures for Electronically Line-Shafted Paper Machine Drives," **IEEE Trans. Ind. Applications**, vol. 38, No. 4, July/August 2002, pp. 966-973.

14. M. Valenzuela and R. Lorenz, "Electronic Line-Shafting Control for Paper Machines Drives," **IEEE Trans. Ind. Applications**, vol. 37, No. 1, January/February 2001, pp. 158-164.

15. J. M. Bentley, "Electromechanical Drive Train Design and Application. Part I", 1999 **TAPPI Paper Machines Drives Short Course**.

16. J. M. Bentley, "Electromechanical Drive Train Design and Application. Part II", 1999 **TAPPI Paper Machines Drives Short Course**.

17. G. Zhang and J. Foreshow, "Speed control of Two-Inertia System by PI/PID Control", **IEEE Trans. Ind. Electronics**, vol. 47, No. 3, June 2000.

18. Deur, J.; Peril, N, "Analysis of speed control system for electrical drives with elastic transmission," 1999. ISIE '99. **Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Volume: 2, 12-16 July 1999, vol. 2, pp. 624 – 630.

19. Άγγελος Γραμμενίδης, Χαρτοποιία, Πάτρα, 1984.

Κ. Μιχαήλ

Μηχανολόγος και Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, υποψήφιος διδάκτωρ Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

Α. Σαφάκας

Καθηγητής, Δρ Μηχανικός, Διευθυντής Εργαστηρίου Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής της Ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Extended summary

Load Distribution Control of a Paper Machine's Multi-motor Drive System – Steady State and Dynamic Behavior Analysis

C. MICHAEL

Mechanical - Electrical Engineer

A. SAFACAS

Professor, University of Patras

Abstract

A control method for the operation of a multi-motor drive system of paper machines is proposed in the present study. Paper machine drive systems, as a rule, consist of D.C. motors, which are fed by threephase electronic power converters. In the present case study four D.C. motors drive two presses and a drying cylinder. Furthermore, an automatic control method is proposed, through which the rational mechanical load distribution of the motors is controlled, depending on their nominal power. According to the requirements of the paper machine, two phases of operation are distinguished. In the first phase two D.C. motors drive two presses, not in contact with the drying cylinder. The other two D.C. motors drive the drying cylinder. When the two sections are synchronized, the second phase starts. The two sections come in contact and are rotating absolutely with the same linear speed. Then the paper comes in contact with the hot drying cylinder and it dries. Subsequently, it is wound on a cylinder for final use. In this industrial process there is a combination of rotational and linear movement for the formation and drying of the paper. The proposed method aims at the precise control of the kinetic behavior of the two sections, coordinating the operation of the presses and the drying cylinder. Because of the structure of the system there are inevitable transient conditions. For this reason, in the present work the investigation is focused on both the static and the dynamic behavior of the system.

1. INTRODUCTION

A paper machine consists of four sections, as shown in figure 1. The first one is called the “former” section and is the section where the paper is formed as a wet film. The second section, the “presses” section, consists of two presses; one suction press and one blind press. The third section is where the paper dries. This section consists of a drying cylinder and a hood. The drying cylinder is called a “Yankee drying cylinder” and is heated by steam. The hood blows hot air on the surface of the cylinder. In this way, the paper is dried and the moisture is reduced to 6%, according

to the specifications. The paper then is removed from the hot surface of the drying cylinder using a blade (Fig. 1, point D) and is wound onto a roll pressed on the pope reel.

In many cases a serious problem arises when the presses are pressed on the Yankee drying cylinder. The mechanical load is not distributed to both sections and only one of the two sections is loaded. Thus, this section is overloaded, and cannot work for a long time since it stops due to the function of the overload protection devices. The overload of one of the two sections happens due to the lack of control logic for load distribution between the two sections. The load of each section is transferred from one section to the other, resulting in serious problems for the paper machine drive and paper production.

In the present investigation, a control logic is proposed, that ensures the same linear speed for the two sections of the paper machine when presses are not pressed on the drying cylinder. When presses are pressed on the drying cylinder, the four D.C. motors must contribute to the total mechanical load in proportion to their nominal torques. Furthermore, the motors in each section contribute equally to the total load of the section, with the assumption that the motors in each section are identical, or contribute partly to the total load of

each section if the two motors are not identical.

However, the percentage load between the two sections and between the two motors of the same section can change due to a serious reason (e.g. inadequate cooling). The drying cylinder is driven by two D.C. motors connected to a common gearbox. Each press is driven by an individual D.C. motor and they are wrapped with the same felt. The D.C. motors are fed by four six-pulse thyristor bridge converters, which are connected to a common power transformer. Normally the maximum speed is 1.500 m/min. The motors'

and transformer's parameters are given in Appendix A.

For the investigation of the system a model algorithm

and simulation with the aid of MATLAB / SIMULINK software was developed. Using simulation the steady state and dynamic behavior of the system can be investigated and the effectiveness of the proposed control method can be ascertained. Also, the case is examined when certain characteristic faults occur in the electronic power converters.

2. CONTROL METHOD

The proposed control logic of the drive system is shown in Figures 2 and 3. Only one of the two D.C. motors in each section has a tachogenerator to measure the speed.

Figure 2 shows the case when the presses are not in contact with the drying cylinder. The control of each section is realized using a block that has two ramps, one for acceleration and one for deceleration time, and three PI controllers for each section, one for speed control and two for torque control (Fig. 2). Each torque controller drives a pulse generator and thus the firing angle of the thyristors is controlled. The output of the speed controller is the torque reference and is the same for both torque controllers.

A load-sharing unit is used to modify the reference of either the helper or the blind press motor torque controller. This unit is an amplifier or attenuator. If the gain of this block is 1 then the torques of the two motors are equal. If the gain is greater than 1, then the torque of the helper motor will be greater than the torque of the master motor. The opposite happens when the value is less than 1. Thus, the ratio of the motors' torque that contributes to the total load of each section is adjusted.

In the second case, where the presses are in contact with the Yankee cylinder, the control is realized using a block that has two ramps, one for acceleration and one for deceleration time, and five PI controllers in total, one for speed control and four for torque control (Fig. 3). The speed controller's output is the reference for all torque controllers. The torque reference for the second section passes through a load-sharing unit, which controls the load contribution of this section. An optimum solution can be found by adjusting the PI parameters of the controllers.

When the presses press the Yankee cylinder the load increases significantly for both sections, because the force from each press is very large (about 240 kN). In the present case the load increases from 20% to 60% of the nominal torque of the motors.

3. MODELLING AND SIMULATION

SIMULINK software was used to simulate the multi-drive system. Eq. (3.1) to (3.6) describe the Yankee drive

when presses are not in contact with the Yankee cylinder (Fig. 4), while Eq. (3.7) to (3.12) describe the presses' drive when presses are not in contact with the Yankee cylinder (Fig. 5). Eq. (3.13) to (3.15) describe the whole drive system.

4. SIMULATION RESULTS

In Fig. 7, 8 and 9 characteristic simulation results of the operation of the drive during acceleration and steady state are shown. Fig. 7 shows that the system's response is very accurate. The actual speed of Yankee and presses sections (Fig. 7 γ and 7 δ) is almost the same as the reference speed (Fig. 7 α), while the torque reference changes from 20% to 60% of the D.C. motors' nominal torque (Fig. 7 β). Fig. 8 shows the armature current and Fig. 9 shows the electromagnetic torque of the DC motors. The Yankee master motor torque (Fig. 9 α) is the same as the Yankee helper motor torque (Fig. 9 β), while the suction press motor torque (Fig. 9 γ) is the same as the blind motor torque (Fig. 9 δ). This was the main target of the proposed control method. The total load is shared among all motors according to their nominal torques.

Fig. 10 and 11 show the armature current of the DC motors when one thyristor is open in the power converter, which drives the second motor of the drying cylinder. The torques of the motors have exactly the same shape as the armature currents (001).

Fig. 12 shows the armature current of the DC motors when the power converter of the second drying cylinder motor does not function. Also, in this case, the torques of the motors have exactly the same shape as the armature current. Fig. 13 shows the speed response (Fig 13 α), and the armature current of the three DC motors, when the power converter of the second drying cylinder motor does not function. Fig. 13 α shows that the speed of the drive is not affected due to the loss of one power converter. The armature currents of the three motors increase (Fig. 12 α , 12 γ and 12 δ), resulting in increase of the motors' torques in such way that the mechanical load is compensated for and the drive system continues to rotate with the same speed as the speed before the fault.

5. CONCLUSIONS

As is shown by the simulation results of a real multi drive system, the speed response is very accurate and fast (even given the fact that the rotating masses have high inertia), without oscillations (in points $t = 10$ sec and $t = 40$ sec, the overshoot of the speed response is very small, and cannot appear in the drawings because of their small size). This was achieved by fine-tuning the PI controllers' parameters.

The load distribution of the four D.C. motors was achieved accurately as specified, namely according to the rules that conform to the real needs of the industry. Via the proposed control logic, equal load is maintained between the motors of drying cylinder and those of the presses, and equal load

between the two sections (% of nominal torque of the motors). We can see that the torques of the drying cylinder motors are equal, as were those of the presses motors torques. This was the target of this investigation.

C. Michael

Mechanical and Electrical Engineer, Ph.D. student, Electrical Engineering Department and Computer Technology, University of Patras.

A. Safacas

Professor, Dr-Eng., Director of the Electromechanical Energy Conversion Laboratory, Electrical Engineering Department and Computer Technology, University of Patras.