



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΔΟΧΙΚΗΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΑΝΤΛΙΩΝ»  
«SIMULATION OF THE SEQUENTIAL START-UP OF PUMPS»

ΝΕΣΙΑΔΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ Δ.

ΑΘΗΝΑ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2007

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Δ.Παπαντώνη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτήν την πολύ ενδιαφέρουσα εργασία, όπως επίσης και για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά του κατά την περίοδο της εκπόνησής της.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| <u>Κεφάλαιο</u>   | <u>Σελίδα</u> |
|---|---------------|
| 1. Εισαγωγή   | 5             |
| <b>ΜΕΡΟΣ Α΄ : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ</b>                      | <b>7</b>      |
| 2. Αντλίες  | <b>8</b>      |
| 2.1 Εισαγωγή  | 8             |
| 2.2 Οι εργοστροβιλομηχανές                              | 9             |
| 2.2.1 Εισαγωγή  | 9             |
| 2.2.2 Η δομή μιας εργοστροβιλομηχανής                   | 9             |
| 2.2.3 Ενεργειακός ισολογισμός                           | 11            |
| 2.2.4 Η μορφή της περωτής                               | 13            |
| 2.2.5 Η εξίσωση Euler στις εργοστροβιλομηχανές          | 14            |
| 2.2.6 Πολυβάθμιες εργοστροβιλομηχανές                   | 16            |
| 2.3 Φυγόκεντρες αντλίες                                 | 17            |
| 2.3.1 Βαθμός απόδοσης αντλίας                           | 17            |
| 2.3.2 Ιδεατή και θεωρητική χαρακτηριστική περωτής       | 20            |
| 2.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας                  | 22            |
| 2.3.4 Αδιάστατες παράμετροι                             | 25            |
| 3. Ηλεκτροκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος             | <b>27</b>     |
| 3.1 Εισαγωγή στους ηλεκτροκινητήρες                     | 27            |
| 3.1.1 Εισαγωγή  | 27            |
| 3.1.2 Αρχές λειτουργίας                                 | 28            |
| 3.1.3 Βαθμός απόδοσης                                   | 29            |
| 3.1.4 Χαρακτηριστική καμπύλη                            | 30            |
| 3.1.5 Βιομηχανικός έλεγχος                              | 31            |
| 3.1.6 Προστασία   | 32            |
| 3.1.7 Ταξινόμηση  | 33            |
| 3.2 Σύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες                          | 34            |
| 3.2.1 Εισαγωγή  | 34            |
| 3.2.2 Κατασκευή   | 34            |
| 3.2.3 Αρχές λειτουργίας                                 | 36            |
| 3.2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες                          | 38            |
| 3.2.5 Βαθμός απόδοσης & ονομαστικά μεγέθη               | 41            |
| 3.2.6 Εκκίνηση σύγχρονων κινητήρων                      | 42            |
| 3.2.7 Βιομηχανικός έλεγχος                              | 45            |
| 3.3 Επαγωγικοί (ασύγχρονοι) τριφασικοί ηλεκτροκινητήρες | 45            |
| 3.3.1 Εισαγωγή  | 45            |
| 3.3.2 Κατασκευή   | 46            |
| 3.3.3 Αρχές λειτουργίας                                 | 47            |
| 3.3.4 Χαρακτηριστική καμπύλη & μεταβολή αυτής           | 48            |
| 3.3.5 Βαθμός απόδοσης & ονομαστικά μεγέθη               | 52            |
| 3.3.6 Ταξινόμηση  | 53            |
| 3.3.7 Βιομηχανικός έλεγχος                              | 56            |
| 3.4 Μέθοδοι εκκίνησης κινητήρων                         | 60            |

|                                      |   |            |
|--------------------------------------|---|------------|
| 3.4.1                                | Απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο              | 60         |
| 3.4.2                                | Μέθοδοι μείωσης της τάσης τροφοδοσίας       | 61         |
| 3.4.3                                | Εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας   | 65         |
| 3.4.4                                | Σύνοψη                                      | 68         |
| 4.                                   | Η αντλητική εγκατάσταση                     | <b>70</b>  |
| 4.1                                  | Εισαγωγή                                    | 70         |
| 4.2                                  | Καθορισμός σημείου λειτουργίας              | 71         |
| 4.2.1                                | Η χαρακτηριστική της σωλήνωσης              | 71         |
| 4.2.2                                | Συνεργασία αντλιών                          | 73         |
| 4.2.3                                | Όργανα διακοπής στη σωλήνωση                | 75         |
| 4.2.4                                | Επιλογή κινητήρα                            | 77         |
| 4.3                                  | Εκκίνηση αντλητικής εγκατάστασης            | 77         |
| 4.3.1                                | Προετοιμασία & πορεία της εκκίνησης         | 77         |
| 4.3.2                                | Ευστάθεια λειτουργίας                       | 80         |
| 4.4                                  | Το υδραυλικό πλήγμα – αριθμητική ανάλυση    | 82         |
| 4.4.1                                | Εισαγωγή                                    | 82         |
| 4.4.2                                | Η μέθοδος των χαρακτηριστικών               | 83         |
| 4.4.3                                | Οριακές συνθήκες                            | 87         |
| 4.4.4                                | Το υδραυλικό πλήγμα κατά την εκκίνηση       | 89         |
| 4.4.5                                | Αντιπληγματική προστασία                    | 94         |
| 4.5                                  | Αναστρέψιμοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί         | 96         |
| 4.5.1                                | Αρχές λειτουργίας – εφαρμογές               | 96         |
| 4.5.2                                | Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός             | 98         |
| 4.5.3                                | Η εκκίνηση στους αναστρέψιμους ΥΗΣ          | 100        |
| <b>ΜΕΡΟΣ Β΄ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ</b> |   | <b>103</b> |
| 5.                                   | Πρόγραμμα PUMPSTAR                          | <b>104</b> |
| 5.1.1                                | Εισαγωγή                                    | 104        |
| 5.1.2                                | Περιγραφή αρχείων εισόδου & εξόδου          | 104        |
| 5.1.3                                | Επεξήγηση υπορουτίνων                       | 106        |
| 5.1.4                                | Ανάλυση δομής                               | 107        |
| 6.                                   | Αποτελέσματα                                | <b>109</b> |
| 6.1                                  | Στοιχεία της εγκατάστασης                   | 109        |
| 6.2                                  | Προσομοίωση με 1 αντλία                     | 111        |
| 6.2.1                                | Αρχική περίπτωση                            | 111        |
| 6.2.2                                | Διερεύνηση επίδρασης αεροφυλακίου           | 119        |
| 6.2.3                                | Διερεύνηση επίδρασης βάνας τύπου πεταλούδας | 122        |
| 6.3                                  | Προσομοίωση με 4 αντλίες                    | 131        |
| 6.3.1                                | Σωλήνωση χωρίς βάνες τύπου πεταλούδας       | 131        |
| 6.3.2                                | Σωλήνωση με βάνες τύπου πεταλούδας          | 138        |
| 6.4                                  | Διερεύνηση ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων       | 144        |
| 6.5                                  | Προσομοίωση για σύγχρονο κινητήρα           | 145        |
| Βιβλιογραφία                         |   | <b>154</b> |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η εκκίνηση ενός αντλιοστασίου. Τα αντλιοστάσια είναι ευρέως διαδεδομένες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται κυρίως για την άντληση νερού από δεξαμενές, χωρίς να λείπουν και άλλες βιομηχανικές τους εφαρμογές. Λόγω του έντονου γεωγραφικού αναγλύφου της Ελλάδας, που έχει ως αποτέλεσμα την απομόνωση περιοχών, αλλά και της ύπαρξης του νησιωτικού συμπλέγματος του Αιγαίου, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα στη χώρα μας με κύριο προορισμό τους την ύδρευση και την άρδευση. Ωστόσο η εκκίνησή τους μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στο δίκτυο τροφοδοσίας, κάτι ιδιαίτερα σοβαρό αν σκεφτεί κανείς ότι η πλειοψηφία των αντλιοστασίων στον ελλαδικό χώρο εντοπίζεται σε αγροτικές περιοχές με ασθενές ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον, μελέτης χρήζουν και οι κατά την εκκίνηση μεταβολές μεγεθών όπως η παροχή και η πίεση, καθώς δεν αποκλείεται η μεγάλη διακύμανσή τους να έχει αρνητική επίδραση στον εξοπλισμό και στην ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Τέλος, η ολοένα αυξανόμενη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ο συνδυασμός τους είτε με αντλιοστάσια είτε με αναστρέψιμους υδροηλεκτρικούς σταθμούς αποτελεί ένα νέο πεδίο εφαρμογής των συμπερασμάτων της εργασίας αυτής.

Η εργασία είναι διαρθρωμένη σε 2 μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελεί το θεωρητικό σκέλος της εργασίας και περιλαμβάνει 3 κεφάλαια. Σε αυτό παρουσιάζονται οι βασικές θεωρητικές γνώσεις που είναι απαραίτητες ώστε κάποιος να κατανοήσει τη λειτουργία των δύο κύριων μερών ενός αντλιοστασίου, της αντλίας και του κινητήρα, όπως και της μεταξύ τους συνεργασίας. Το πειραματικό σκέλος της εργασίας, το οποίο πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση της εκκίνησης αντλιοστασίου σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, παρουσιάζεται στα 2 κεφάλαια του δεύτερου μέρους της εργασίας. Σε αυτά παρατίθενται το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, όπως επίσης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Συνοπτικά το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου έχει ως εξής :

Αρχικά, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται αναφορά στις αντλίες που ανήκουν στην κατηγορία των εργοστροβιλομηχανών και αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει τη λειτουργία τους. Επιπλέον παρουσιάζεται η ευρέως διαδεδομένη φυγόκεντρη αντλία και αναλύονται τα διάφορα λειτουργικά χαρακτηριστικά της.

Το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο έχει ως αντικείμενο τους ηλεκτροκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς αυτό το είδος χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση των αντλιών κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά αναφέρονται εισαγωγικά στοιχεία που αφορούν όλους τους ηλεκτροκινητήρες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δύο είδη ηλεκτροκινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, οι ασύγχρονοι και οι σύγχρονοι. Δίνεται μια γενική περιγραφή της κατασκευής, όπως επίσης και της αρχής λειτουργίας κάθε είδους. Ακολουθεί παρουσίαση των διαφόρων τρόπων εκκίνησης ηλεκτροκινητήρων, εστιάζοντας στα πλεονεκτήματα και στα μειονεκτήματα που εμφανίζουν.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις αντλητικές εγκαταστάσεις. Αρχικά παρουσιάζεται ο ρόλος της σωλήνωσης στη λειτουργία της εγκατάστασης. Στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία που ακολουθείται κατά την επίλυση μεταβατικών φαινομένων, γίνεται εστίαση στο πρόβλημα της εκκίνησης μιας αντλίας από έναν κινητήρα και παρατίθενται οι κύριες εξισώσεις που διέπουν την διαδικασία αυτή. Τέλος γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών σταθμών.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του υπολογιστικού προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας. Πρόκειται για το πρόγραμμα PUMPSTAR το οποίο είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Αναλύεται η δομή του και η διαδικασία επίλυσης που ακολουθεί, ενώ γίνεται και σύνδεση των θεωρητικών εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια με τον κώδικα του προγράμματος.

Στο 6<sup>ο</sup> και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εκτέλεση του κώδικα σε H/Y, και ακολουθεί σχολιασμός αυτών. Τα στοιχεία εγκατάστασης που χρησιμοποιήθηκαν είναι πραγματικά και προέρχονται από υβριδικό έργο στο νησί της Ικαρίας που περιλαμβάνει ΑΠΕ και αντλιοστάσιο. Για την καλύτερη δυνατή κατανόηση των αποτελεσμάτων από τον αναγνώστη, γίνεται εκτεταμένη χρήση διαγραμμάτων. Τα μεγέθη των οποίων η μεταβολή εξετάζεται κατά τη διαδικασία της εκκίνησης, είναι η παροχή και η πίεση σε διάφορα σημεία της μηκοτομής του αγωγού κατάθλιψης, η ταχύτητα περιστροφής και η ροπή της αντλίας και του κινητήρα και το ηλεκτρικό ρεύμα που απορροφά η εγκατάσταση από το δίκτυο. Στην προσομοίωση, για την κίνηση των αντλιών χρησιμοποιούνται ασύγχρονοι κινητήρες που εκκινούν με τη μέθοδο αστέρα – τριγώνου. Αρχικά εξετάζεται η διαδικασία εκκίνησης αντλιοστασίου με μία αντλία, καθώς και η επίδραση της ύπαρξης αεροφυλακίου στον αγωγό κατάθλιψης. Ακολουθεί η μελέτη των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την τοποθέτηση βάνας τύπου πεταλούδας στην κατάθλιψη της αντλίας, η οποία καθυστερεί τη ροή του νερού προς την άνω δεξαμενή. Στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση σε αντλιοστάσιο με τέσσερις αντλίες, τόσο με όσο και χωρίς την ύπαρξη βανών. Τέλος παρουσιάζεται ενδεικτικά και η περίπτωση χρήσης, σε αντλιοστάσιο με μία αντλία, σύγχρονου κινητήρα, ο οποίος εκκινεί με τη μέθοδο της μεταβαλλόμενης συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος τροφοδοσίας.

## **ΜΕΡΟΣ Α΄ : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΝΤΛΙΕΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Οι αντλίες είναι μηχανές που χρησιμοποιούνται για την πρόσδοση σε ρευστά (συνήθως υγρά) της ενέργειας που απαιτείται για τη διακίνησή τους, είτε μέσα σε ένα κλειστό δίκτυο σωληνώσεων, είτε από μία δεξαμενή σε μία άλλη που συνήθως βρίσκεται σε μεγαλύτερη στάθμη από την πρώτη και συνδέονται μεταξύ τους επίσης με σωληνώσεις. Στην πρώτη περίπτωση η ενέργεια χρησιμοποιείται για την αναπλήρωση των υδραυλικών απωλειών που υφίσταται το ρευστό κατά τη ροή του στις σωληνώσεις, ενώ στη δεύτερη περίπτωση πέρα από τις υδραυλικές απώλειες πρέπει να προσδοθεί στο ρευστό και η ενέργεια που αντιστοιχεί στην ενεργειακή διαβάθμισή του μεταξύ των δύο δεξαμενών. Ως δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί και ένας ποταμός, ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ένα δοχείο πίεσης κτλ.

Υπάρχουν πολλά κριτήρια διάκρισης των αντλιών, όπως το είδος των υγρών που διακινούν, το υλικό κατασκευής τους, οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται ή ακόμα και ο προσανατολισμός τους στο χώρο. Επειδή όμως από τα κριτήρια αυτά προκύπτουν κατηγορίες αντλιών που αλληλεπικαλύπτονται, ως συνηθέστερο κριτήριο ταξινόμησης χρησιμοποιείται η αρχή με βάση την οποία προσδίδεται η ενέργεια από την αντλία στο ρευστό.

Έτσι διακρίνονται δύο κύρια είδη αντλιών :

- Αντλίες στις οποίες παρέχεται συνεχώς ενέργεια στο ρευστό.

Λόγω της συνεχούς παροχής ενέργειας, η ταχύτητα του ρευστού μέσα στην μηχανή λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από αυτές που επικρατούν στην έξοδό της. Εξαιτίας της συνέχειας της ροής, προκαλείται επιβράδυνση του ρευστού εντός ή στην έξοδο της μηχανής, που με τη σειρά της οδηγεί σε αύξηση της πίεσής του. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι φυγόκεντρες αντλίες (centrifugal pumps) και γενικότερα αντλίες που ανήκουν στις εργοστροβιλομηχανές, καθώς και ειδικοί τύποι αντλιών, όπως είναι ο υδραυλικός κριός, οι ηλεκτρομαγνητικές αντλίες κτλ.

- Αντλίες στις οποίες παρέχεται περιοδικά ενέργεια στο ρευστό.

Η ενέργεια μεταβιβάζεται στο ρευστό περιοδικά από ένα ή περισσότερα κινούμενα μέρη της μηχανής. Όμως η αύξηση της πίεσης του ρευστού συνοδεύεται από αμελητέα μεταβολή της κινητικής του ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αντλίες διαφράγματος (diaphragm pumps), οι αντλίες κοχλία (screw pumps), οι γριναζωτές αντλίες (gear pumps), οι αντλίες παλινδρόμησης ή ατμού (steam pumps) που χρησιμοποιούν έμβολα και γενικότερα αντλίες που κατατάσσονται στις υδραυλικές μηχανές μετατόπισης.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τις αντλίες που ανήκουν στην κατηγορία των εργοστροβιλομηχανών, αφού σε εγκαταστάσεις με προορισμό την ύδρευση ή την άρδευση χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά αυτές. Οι υπόλοιπες κατηγορίες που αναφέρθηκαν συναντώνται περιορισμένα, κυρίως σε εξειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές.



## 2.2 Οι εργοστροβιλομηχανές

### 2.2.1 Εισαγωγή

Οι εργοστροβιλομηχανές ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των στροβιλομηχανών, δηλαδή μηχανών μέσω των οποίων γίνεται εναλλαγή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια ρευστού. Στις εργοστροβιλομηχανές η ενέργεια προσδίδεται από τη μηχανή στο ρευστό, ενώ στις κινητήριες στροβιλομηχανές ή στροβίλους η ενέργεια αφαιρείται από το ρευστό και μετατρέπεται σε μηχανική μορφή. Σημαντικό ρόλο στη μετατροπή αυτή παίζει η κινητική ενέργεια του ρευστού. Για το λόγο αυτό οι στροβιλομηχανές στις οποίες το ρευστό είναι ασυμπίεστο, είναι γνωστές και ως υδροδυναμικές μηχανές, όρος που τονίζει τη σημασία της κινητικής του ενέργειας στη ροή ενέργειας διαμέσου της μηχανής.

Η μετατροπή της ενέργειας σε μια στροβιλομηχανή, πραγματοποιείται μέσω της συνεχούς ροής του ρευστού δια μέσου της μηχανής και της σταθερής περιστροφικής κίνησης αυτής. Λαμβάνει χώρα στο στρεφόμενο τμήμα της μηχανής το οποίο στις εργοστροβιλομηχανές ονομάζεται περωτή και στους στροβίλους δρομέας. Στην στρεφόμενη με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  άτρακτό της, αναπτύσσεται στρεπτική ροπή  $M$ , άρα εμφανίζεται μηχανική ισχύς  $N$  ίση με :

$$N = M \cdot \omega \quad (2.1)$$

Στις εργοστροβιλομηχανές η ροπή που αναπτύσσεται στην περωτή είναι ανθιστάμενη επομένως για να στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, θα πρέπει αυτή να είναι ίση με την κινητήρια ροπή, την οποία προσδίδει στη μηχανή ο κινητήρας.

Πέρα από τις αντλίες στις εργοστροβιλομηχανές κατατάσσονται οι ανεμιστήρες, οι φυσητήρες, οι στροβιλοσυμπιεστές.

### 2.2.2 Η δομή μιας εργοστροβιλομηχανής

Μία συνηθισμένη εργοστροβιλομηχανή είναι η φυγόκεντρη αντλία. Αυτή αποτελείται από τα εξής μέρη :

- το τμήμα εισόδου

Σκοπός του τμήματος εισόδου είναι να οδηγήσει το ρευστό από τη διατομή εισόδου της μηχανής στην διατομή εισόδου της περωτής. Στην τελευταία, η ροή πρέπει να έχει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ομοιομορφία προκειμένου η περωτή να λειτουργεί ομαλά, ενώ είναι επιθυμητό και το ρευστό να είναι απαλλαγμένο συστροφής ως προς τον άξονα της περωτής. Για τους παραπάνω λόγους σε μία τυπική αντλία με πρόβολο, όπως αυτή της εικόνας 2.1, το τμήμα εισόδου έχει την μορφή ενός κώνου ομόκεντρου με την περωτή. Η σύνδεση του τμήματος εισόδου με τον αγωγό αναρρόφησης γίνεται συνήθως μέσω φλάντζας.

- την περωτή

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, στην περωτή λαμβάνει χώρα η μεταφορά ενέργειας από τη μηχανή στο ρευστό. Η περωτή εδράζεται σε μία άτρακτο και περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα της τελευταίας.

- την άτρακτο

Πάνω στην άτρακτο εδράζεται η περωτή. Η άτρακτος λαμβάνει την μηχανική ροπή που παράγει ο κινητήρας και την μεταβιβάζει στην περωτή. Για τη στήριξή της υπάρχουν κατάλληλα έδρανα.

- το τμήμα εξόδου

Σκοπός του τμήματος εξόδου είναι να συλλέξει το ρευστό που εξέρχεται από την εξωτερική επιφάνεια της περωτής και να το οδηγήσει στην διατομή εξόδου της αντλίας. Αυτό όμως πρέπει να γίνεται όσο το δυνατό ομοιόμορφα κατά την περιφερειακή διεύθυνση και χωρίς να διαταράσσεται η ροή στο εσωτερικό της περωτής. Επιπλέον το τμήμα εξόδου πρέπει να επιτελεί και μία άλλη σημαντική λειτουργία. Το ρευστό στην διατομή εξόδου της περωτής έχει υψηλή ταχύτητα, η οποία είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή ταχύτητά του στη διατομή εξόδου της μηχανής. Επομένως θα πρέπει να επιβραδυνθεί στο τμήμα εξόδου, διαφορετικά θα υπάρχουν μεγάλες υδραυλικές απώλειες στη σωλήνωση. Η επιβράδυνση αυτή πρέπει να γίνει σταδιακά, ειδάλλως θα υπάρχουν υψηλές υδραυλικές απώλειες και εντός του τμήματος εξόδου. Ουσιαστικά συνιστά ανάκτηση της κινητικής ενέργειας του ρευστού σε στατική πίεση (αύξηση της στατικής πίεσης).

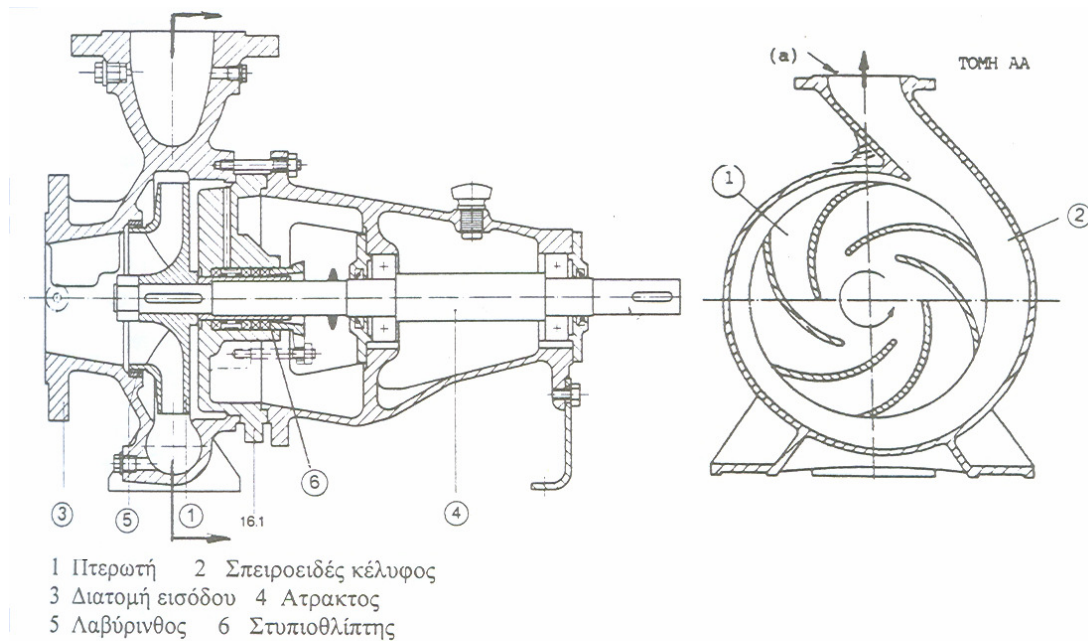
Για την καλύτερη δυνατή ανταπόκριση στα όσα αναλύθηκαν παραπάνω, το τμήμα εξόδου συνήθως διαμορφώνεται σε μορφή σπειροειδούς κελύφους. Το σπειροειδές κέλυφος επειδή περιβάλλει την περωτή, είναι το ογκωδέστερο στοιχείο της αντλίας. Για το λόγο αυτό αποτελεί το κύριο σώμα της μηχανής, στο οποίο συνδέονται όλα τα άλλα μέρη της. Επιπλέον φέρει τις εδράσεις της ατράκτου και σε αυτό διαμορφώνεται η βάση της αντλίας. Στις μεγάλου ολικού ύψους αντλίες, υπάρχει στεφάνη σταθερών οδηγητικών πτερυγίων που παρεμβάλλεται μεταξύ της εξόδου της περωτής και του σπειροειδούς κελύφους και υποβοηθά τη λειτουργία του τελευταίου. Η σύνδεση του τμήματος εξόδου με τον αγωγό κατάθλιψης γίνεται επίσης μέσω φλάντζας.

- το μηχανισμό στεγανότητας

Ο μηχανισμός στεγανότητας είναι απαραίτητος προκειμένου να μη διαφεύγει το ρευστό από το τμήμα της περωτής στο υπόλοιπο εσωτερικό της μηχανής. Στην περίπτωση που αυτό συμβεί πέρα της απώλειας ρευστού, διαταράσσεται και η ομαλή λειτουργία της μηχανής. Ο μηχανισμός αποτελείται κυρίως από στυπιοθλίπτες που παρεμβάλλονται μεταξύ της ατράκτου και του εσωτερικού τοιχώματος που διαχωρίζει την περωτή από την υπόλοιπη μηχανή. Η σημασία του είναι ακόμα μεγαλύτερη κατά την φάση της εκκίνησης, καθώς αναπτύσσονται υποπίεσεις. Πιθανή εισχώρηση αέρα τη χρονική αυτή στιγμή εντός της περωτής, μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε αποτυχία εκκίνησής της.

- το εξωτερικό κέλυφος

Το εξωτερικό κέλυφος συνδέει και περιβάλλει όλα τα υπόλοιπα τμήματα της αντλίας, ώστε να εξασφαλίζεται η εξωτερική στεγανότητα της μηχανής. Επιπλέον μέσω αυτού μεταβιβάζονται στην έδραση της μηχανής οι ροπές και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα επιμέρους τμήματα αυτής. Όπως αναφέρθηκε, συχνά τον ρόλο του εξωτερικού κελύφους επιτελεί το σπειροειδές τμήμα εξόδου που περιβάλλει την περωτή.



Εικόνα 2.1 Διαμόρφωση τυπικής φυγόκεντρης αντλίας με την πτερωτή σε πρόβολο

Πέρα από την τυπική μορφή φυγόκεντρης αντλίας, υπάρχουν και διάφορες άλλες παραλλαγές. Για παράδειγμα υπάρχουν οι αντλίες in line οι οποίες χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία και συχνά τοποθετούνται σε ευθύγραμμη σωλήνωση. Σε αυτές οι διατομές εισόδου και εξόδου της μηχανής διαμορφώνονται ομοαξονικά, ενώ το τμήμα εισόδου έχει τη μορφή διπλού ημισπειροειδούς κελύφους.

Για την άντληση νερού από γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται οι αντλίες βαθέων φρεάτων. Αυτές, λόγω της ιδιομορφίας της συγκεκριμένης εφαρμογής, έχουν κατακόρυφη διάταξη, άτρακτο μεγάλου μήκους, ενώ πρέπει να έχουν και κατά το δυνατό μικρότερη διάμετρο. Έτσι αντί του σπειροειδούς κελύφους, το τμήμα εξόδου διαμορφώνεται σε στεφάνη με οδηγητικά πτερύγια. Την ίδια διαμόρφωση του τμήματος εξόδου, παρουσιάζουν και οι αντλίες αξονικής ροής.

Τέλος, μια σπάνια διαμόρφωση είναι η αντλία διπλής αναρρόφησης. Αυτή αποτελείται από δύο πτερωτές ακτινικής ροής, κάθε μία από τις οποίες διακινεί τη μισή παροχή. Κάθε πτερωτή έχει δικό της τμήμα εισόδου μορφής ημισπειροειδούς κελύφους που περιβάλλει την άτρακτο της αντλίας, ενώ το τμήμα εξόδου είναι κοινό. Ο τύπος αυτός αντλίας χρησιμοποιείται σε περίπτωση κατά την οποία θέλουμε να αποφύγουμε την χρήση αντλίας μεικτής ροής.

### 2.2.3 Ενεργειακός ισολογισμός

Η ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια  $E$  ενός ρευστού που μπορεί να εναλλαχτεί με μηχανική ενέργεια προσδιορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli από τη σχέση :

$$E = \frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} + U + gz \quad (2.2)$$

όπου  $c$  το μέτρο της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού,  $p$  η στατική του πίεση,  $\rho$  η πυκνότητα,  $U$  η εσωτερική ενέργεια,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $z$  το γεωδαιτικό ύψος ως προς μία αυθαίρετη στάθμη αναφοράς.

Από τα προηγούμενα συμπεραίνεται ότι ο όρος  $c^2/2g$  εκφράζει την κινητική ενέργεια του ρευστού, ο όρος  $p/\rho$  την ενέργεια εντατικής κατάστασης, ο όρος  $gz$  την δυναμική ενέργεια λόγω βαρύτητας, ενώ η εσωτερική ενέργεια  $U$  του ρευστού χαρακτηρίζεται από την απόλυτη θερμοκρασία του  $T$ .

Συμβολίζοντας με (e) και (a) αντίστοιχα τις διατομές εισόδου και εξόδου της εργοστροβιλομηχανής, η ανά μονάδα μάζας μεταβολή της ολικής ενέργειας του ρευστού μεταξύ των δύο διατομών που είναι δυνατό να εναλλαγεί με μηχανική ενέργεια είναι ίση με :

$$E_e - E_a \pm \delta E = \left( \frac{c_e^2}{2} + \frac{p_e}{\rho} + U_e + gz_e \right) - \left( \frac{c_a^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} + U_a + gz_a \right) \quad (2.3)$$

Με  $\delta E$  συμβολίζεται η εναλλαγή ενέργειας της μηχανής με το περιβάλλον υπό μορφή θερμότητας. Όμως στις εργοστροβιλομηχανές, άρα και στις αντλίες, λόγω των μικρών αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών, ο όρος αυτός είναι αμελητέος ( $\delta E = 0$ ).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι με βάση την αρχή της συνέχειας και με την παραδοχή μηδενικών απωλειών ρευστού από το περίβλημα της μηχανής, η παροχή μάζας ρευστού  $\dot{m}$  στη διατομή εισόδου της μηχανής είναι ίση με την παροχή μάζας στη διατομή εξόδου, προκύπτει ότι η ανά μονάδα χρόνου ενέργεια που εναλλάσσεται με μηχανική ενέργεια και απορροφάται από το ρευστό είναι ίση με :

$$N_i = \dot{m} \cdot (E_a - E_e) > 0 \quad (2.4)$$

Λόγω όμως απωλειών που υπάρχουν η ισχύς  $N_i$  που απορροφά το ρευστό είναι μικρότερη από την ισχύ  $N$  που προσδίδει στην άτρακτο της μηχανής ο κινητήρας. Έτσι ορίζεται ο ολικός βαθμός απόδοσης της εργοστροβιλομηχανής :

$$\eta = \frac{N_i}{N} \quad (2.5)$$

Τα ρευστά τα οποία διακινούν οι αντλίες είναι υγρά (νερό, πετρελαιοειδή, έλαια κτλ), επομένως είναι ασυμπίεστα. Στα ασυμπίεστα, όμως, ρευστά δεν είναι δυνατό η ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, δηλαδή η εσωτερική ενέργεια  $U$  του ρευστού, να μετατραπεί σε μηχανική. Επομένως η ανά μονάδα μάζας μεταβολή της ολικής ενέργειας του ρευστού μεταξύ των διατομών εισόδου και εξόδου της αντλίας είναι ίση προς :

$$E_e - E_a = \left( \frac{c_e^2}{2} + \frac{p_e}{\rho} + gz_e \right) - \left( \frac{c_a^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} + gz_a \right) \quad (2.6)$$

Αν εκφράσουμε την ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια σε μονάδες στατικής πίεσης, προκύπτει η ολική πίεση  $p_o$  που δίνεται από τη σχέση :

$$p_o = \rho \frac{c^2}{2} + p + \rho g z \quad (2.7)$$

Συνήθως στις αντλίες η ολική πίεση εκφράζεται σε μέτρα στήλης του υγρού (m ΣΥ). Η πίεση  $H$  σε μέτρα στήλης υγρού δίνεται από τη σχέση :

$$H = \frac{p}{\rho g} = \frac{p}{\gamma} \quad (2.8)$$

όπου  $\gamma = \rho g$ , το ειδικό βάρος του υγρού.

Άρα η ολική πίεση εκφρασμένη σε mΣΥ είναι ίση με :

$$H_o = \frac{c^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \quad (2.9)$$

και η ανά μονάδα μάζας μεταβολή της ολικής ενέργειας του ρευστού μεταξύ των διατομών εισόδου και εξόδου της μηχανής είναι ίση με :

$$E_e - E_a = g (H_{oe} - H_{oa}) \quad (2.10)$$

Επιπλέον επειδή το ρευστό είναι ασυμπίεστο η παροχή μάζας του  $\dot{m}$  συνδέεται με την παροχή όγκου  $Q$  μέσω της σχέσης :

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = g \frac{\dot{m}}{\gamma} \quad (2.11)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.4, 2.10, 2.11 προκύπτει ότι η ισχύς  $N_i$  που απορροφά το ρευστό από την αντλία εκφράζεται από τη σχέση :

$$N_i = Q \cdot (p_{oa} - p_{oe}) = \gamma \cdot Q \cdot (H_{oa} - H_{oe}) = \gamma Q H \quad (2.12)$$

όπου  $H = (H_{oa} - H_{oe})$  (2.13)

είναι το πραγματικό ολικό ύψος της αντλίας το οποίο εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ολικής ενέργεια που παραλαμβάνει το ρευστό μεταξύ των διατομών εισόδου (e) και εξόδου (a) της αντλίας σε μέτρα στήλης υγρού.

## 2.2.4 Η μορφή της πτερωτής

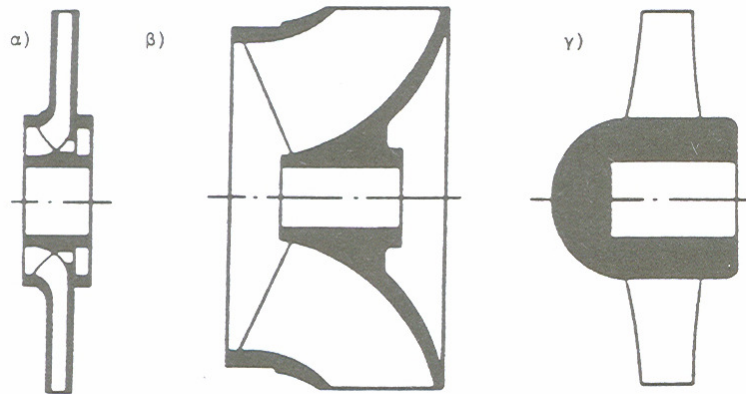
Η μορφή της μεσημβρινής τομής πτερωτής μιας αντλίας χαρακτηρίζεται ως ακτινικής, μεικτής ή αξονικής ροής ανάλογα με την κλίση της μεσημβρινής ταχύτητας  $c_m$ . Η συνιστώσα αυτή της ταχύτητας προκύπτει από την παρακάτω ανάλυση. Λόγω της αξονοσυμμετρικής διαμόρφωσης και των συνθηκών λειτουργίας, χρησιμοποιείται για την ανάλυση των ταχυτήτων και την περιγραφή της γεωμετρίας, πολικό σύστημα συντεταγμένων ως προς τον άξονα περιστροφής. Έτσι η ταχύτητα του ρευστού αναλύεται σε 3 συνιστώσες : την ακτινική  $c_r$ , την αξονική  $c_z$  και την περιφερειακή  $c_u$ . Οι δύο πρώτες συνθέτουν την μεσημβρινή συνιστώσα  $c_m$ , η οποία είναι η ταχύτητα που κείται στο μεσημβρινό επίπεδο (επίπεδο που περιλαμβάνει τον άξονα συμμετρίας).

Στις πτερωτές ακτινικής ροής το πλάτος  $b$  των πτερυγίων είναι μικρό σε σχέση με την διάμετρο  $D$  της πτερωτής. Ως εκ τούτου η αξονική συνιστώσα είναι σχεδόν μηδενική από την είσοδο ως την έξοδο της πτερωτής και επομένως η μεσημβρινή συνιστώσα είναι περίπου ίση με την ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού

( $c_m \approx c_r$ ). Ένα άλλο χαρακτηριστικό των πτερωτών αυτής της μορφής είναι ότι το ρευστό πραγματοποιεί στροφή κλίσης  $90^\circ$  που αρχίζει στην είσοδο της πτερωτής και ολοκληρώνεται εντός αυτής.

Στις πτερωτές αξονικής ροής το πλάτος  $b$  των πτερυγίων είναι μεγάλο σε σχέση με την διάμετρο  $D$  της πτερωτής. Επομένως η ακτινική συνιστώσα είναι σχεδόν μηδενική από την είσοδο ως την έξοδο της πτερωτής και η μεσημβρινή συνιστώσα είναι περίπου ίση με την αξονική συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού ( $c_m \approx c_z$ ). Στις πτερωτές αυτής της μορφής το ρευστό δεν πραγματοποιεί στροφή εντός της πτερωτής.

Οι πτερωτές μεικτής ροής είναι συνδυασμός των δύο τύπων που προαναφέρθηκαν. Σε αυτές ούτε η ακτινική  $c_r$  ούτε η αξονική  $c_z$  συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού είναι αμελητέες και επομένως η μεσημβρινή συνιστώσα  $c_m$  προκύπτει από την σύνθεσή τους.



Εικόνα 2.2 Μεσημβρινή τομή πτερωτής : α) ακτινικής ροής β) μεικτής ροής γ) αξονικής ροής

### 2.2.5 Η εξίσωση Euler στις εργοστροβιλομηχανές

Ο όρος μερική πτερωτή, αναφέρεται σε μία πτερωτή της οποίας το πλάτος  $b$  είναι μικρό συγκριτικά με την ακτίνα της  $r$ , έτσι ώστε να μπορεί να υποθεθεί με ασφάλεια ότι οι συνθήκες ροής δεν μεταβάλλονται κατά το πλάτος. Αν θεωρήσουμε μία τέτοια πτερωτή και συμβολίσουμε με δείκτη (2) τα μεγέθη που αναφέρονται στην έξοδό της και με δείκτη (1) αυτά που αναφέρονται στην είσοδό της, η ροπή  $M_u$  που αναπτύσσεται στο δρομέα είναι ίση με :

$$M_u = \dot{m}_u (r_2 c_{u2} - r_1 c_{u1}) \quad (2.14)$$

Η αντίστοιχη περιφερειακή ισχύς  $N_u$  που αναπτύσσεται είναι σύμφωνα με το θεώρημα της συστροφής ίση προς :

$$N_u = \omega \cdot M_u = \dot{m}_u (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad (2.15)$$

Στις παραπάνω σχέσεις με  $\dot{m}_u$  συμβολίζουμε την παροχή μάζας που διέρχεται από την πτερωτή,  $r$  την ακτίνα της,  $c_u$  την περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού,  $\omega$  την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της πτερωτής και  $u$  την περιφερειακή της ταχύτητα. Προφανώς ισχύει η σχέση :

$$u = \omega \cdot r \quad (2.16)$$

Σύμφωνα με την σχέση 2.12 η περιφερειακή ισχύς θα είναι ίση με :

$$N_u = \gamma Q_u H_u \quad (2.17)$$

, όπου  $Q_u$  η παροχή που διέρχεται από την πτερωτή, και  $H_u$  το θεωρητικό της ύψος. Το τελευταίο εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια του ρευστού που εναλλάσσεται στην πτερωτή με τη μηχανική ισχύ  $N_u$  και ισούται με :

$$H_u = H_{o2} - H_{o1} + \delta h_{f12} = \left( \frac{c_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \right) - \left( \frac{c_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 \right) + \delta h_{f12} \quad (2.18)$$

όπου  $H_{o2}$  και  $H_{o1}$  το ολικό ύψος του ρευστού στις διατομές εξόδου (2) και εισόδου (1) της πτερωτής αντίστοιχα και  $\delta h_{f12}$  οι υδραυλικές απώλειες μεταξύ των δύο διατομών. Η διαφορά  $H_{o2} - H_{o1}$  είναι το πραγματικό ύψος της πτερωτής, δηλαδή η πραγματική ενέργεια που λαμβάνει το ρευστό.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.11, 2.15 και 2.17 προκύπτει η σχέση :

$$H_u = \frac{1}{g} (u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad (2.19)$$

η οποία αποτελεί την εξίσωση του Euler διατυπωμένη για την περίπτωση εργοστροβιλομηχανής.

Επειδή το ρευστό αναρροφάται συνήθως από δεξαμενή μεγάλων διαστάσεων, μπορεί να θεωρηθεί αρχικά ακίνητο και απαλλαγμένο συστροφής. Επίσης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου, το τμήμα εισόδου έχει τέτοια μορφή, ώστε το ρευστό να εισέρχεται στην πτερωτή συνεχίζοντας να είναι απαλλαγμένο συστροφής. Άρα η περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητάς του είναι ίση με μηδέν ( $c_{u1} = 0$ ) και η εξίσωση του Euler παίρνει τη μορφή :

$$H_u = \frac{1}{g} u_2 c_{u2} \quad (2.20)$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνουμε ότι η επιθυμητή τιμή του θεωρητικού ύψους  $H_u$  μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο συνδυασμό των τιμών της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού και της περιφερειακής ταχύτητας της πτερωτής. Επειδή υψηλή τιμή της πρώτης, συνεπάγεται και υψηλή απόλυτη ταχύτητα του ρευστού και επομένως υψηλές υδραυλικές απώλειες τόσο στην πτερωτή όσο και στο τμήμα εξόδου της αντλίας, προτιμούνται μικρές τιμές της  $c_{u2}$  και υψηλές τιμές της  $u_2$ . Η διαπίστωση αυτή σε συνδυασμό με τον ορισμό της περιφερειακής ταχύτητας (εξ. 2.16), οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στις αντλίες ακτινικής και μεικτής ροής η διατομή εξόδου της πτερωτής αντιστοιχεί σε διάμετρο μεγαλύτερη από αυτή της διατομής εισόδου. Από το γεγονός αυτό προέρχεται και ο όρος φυγόκεντρος αντλίες. Υπερβολική, όμως, αύξηση της διαμέτρου της πτερωτής οδηγεί σε μεγάλο μέγεθος της μηχανής και άρα σε αυξημένο κόστος κατασκευής. Επομένως για την πρόσδοση του επιθυμητού ποσού ενέργειας στο ρευστό, πρέπει να γίνει κατάλληλος συνδυασμός και μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής και της διαμέτρου της πτερωτής.

Επίσης από την εξίσωση του Euler, είναι δυνατό να εξακριβωθεί και ο λόγος που οδήγησε στην ανάπτυξη περωτών διαφορετικής μορφής. Η παροχή  $Q_u$  που διέρχεται από την περωτή, θεωρώντας αμελητέο το τμήμα της διατομής που καταλαμβάνεται από τα περύγια, δίνεται από τη σχέση :

$$Q_u \approx 2\pi r_1 b_1 c_{n1} \approx 2\pi r_2 b_2 c_{n2} \quad (2.21)$$

όπου  $c_n$  η ορθή συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού αναλυμένη σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Αν η περωτή είναι ακτινική τότε η ορθή συνιστώσα συμπίπτει με την ακτινική συνιστώσα σε πολικό σύστημα ( $c_n \approx c_r$ ).

Στην περίπτωση κατά την οποία θέλουμε η αντλία να έχει το ίδιο θεωρητικό ύψος  $H_u$ , ίδια ταχύτητα περιστροφής  $n$ , αλλά η παροχή  $Q_u$  να αυξηθεί, είναι προφανές ότι πρέπει να αυξήσουμε τη διατομή  $F$  της περωτής. Η διατομή δίνεται από τη σχέση :

$$F = 2\pi r b \quad (2.22)$$

Ωστόσο από την εξίσωση Euler προκύπτει ότι το μόνο που μπορεί να μεταβληθεί είναι το πλάτος  $b$  των περυγίων. Όσο, όμως αυξάνεται το πλάτος των περυγίων και άρα πιο σημαντικό γίνεται σε σχέση με τη διάμετρο της περωτής, τόσο πιο δύσκολη είναι η στροφή κατά  $90^\circ$  η οποία συμβαίνει στις φυγοκεντρικές αντλίες ακτινικής μορφής και θα υπάρχει δυσλειτουργία της περωτής. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το γεγονός, θα πρέπει η τροποποιηθεί η περωτή σε μεικτής ροής. Σε περίπτωση που θέλουμε η παροχή να αυξηθεί ακόμα περισσότερο, το πλάτος των περυγίων θα πρέπει γίνει ακόμα μεγαλύτερο, η μεσημβρινή τομή να γίνει περισσότερο κεκλιμένη ως προς τον άξονα, ώστε τελικά η περωτή καταλήγει να είναι αξονικής ροής.

## 2.2.6 Πολυβάθμιες εργοστροβιλομηχανές

Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που προσδίδει μια εργοστροβιλομηχανή στο ρευστό, δηλαδή το πραγματικό ύψος  $H$  της αντλίας δεν είναι μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή. Υπάρχει ένα άνω όριο το οποίο καθορίζεται από δύο παράγοντες.

Ο πρώτος είναι η αντοχή του υλικού του δρομέα. Η μέγιστη ορθή τάση που αναπτύσσεται στην περωτή είναι ανάλογη του τετραγώνου της περιφερειακής ταχύτητας της περωτής ( $\sigma_{\max} \sim u^2$ ) και θα πρέπει να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη ορθή τάση του υλικού της περωτής. Επομένως τίθεται ένα άνω όριο στην τιμή της περιφερειακής ταχύτητας. Στις κοινές αντλίες ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται για λόγους μείωσης του κόστους τους, ο χυτοσίδηρος και η περιφερειακή ταχύτητα  $u$  της περωτής είναι της τάξης των 30 m/sec. Θεωρώντας ότι η περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού είναι ποσοστό της περιφερειακής ταχύτητας ( $c_u = ku$ ), η εξίσωση του Euler παίρνει τη μορφή

$H_u = ku^2 / g$ . Συνεπώς εύκολα συμπεραίνεται ότι θέτεται ένα άνω όριο και στην τιμή του πραγματικού ύψους  $H$  της μηχανής.

Ο δεύτερος είναι το πρόβλημα της σπηλαιώσης που εμφανίζεται στις υδροδυναμικές μηχανές. Αύξηση της περιφερειακής ταχύτητας  $u$  οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας του υγρού και σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli σε μείωση της στατικής του πίεσης. Αν όμως αυτή γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, τότε



αυτό θα ατμοποιηθεί τοπικά, γεγονός που θα επιφέρει έντονα προβλήματα δυσλειτουργίας της μηχανής.

Σε περιπτώσεις στις οποίες το επιθυμητό πραγματικό ύψος της αντλίας  $H$  είναι μεγαλύτερο από αυτό που καθορίζεται από την παραπάνω διαδικασία, χρησιμοποιούνται πολυβάθμιες αντλίες. Πρόκειται για στροβιλομηχανές με δύο ή περισσότερες πτερωτές (ή δρομείς στους πολυβάθμιους στροβίλους). Αυτές λειτουργούν εν σειρά, δηλαδή το ρευστό διέρχεται διαδοχικά από καθεμιά πτερωτή, και για λόγους απλότητας κατασκευής έχουν το ίδιο θεωρητικό ύψος  $H_u$ . Όταν το ρευστό είναι ασυμπίεστο διέρχεται από αυτές και η ίδια παροχή  $Q_u$  και επομένως είναι ταυτόσημες, γεγονός που οδηγεί σε ευκολία κατασκευής, αλλά και μείωση του κόστους της μηχανής.

Κάθε πτερωτή μαζί με την αντίστοιχη στεφάνη οδηγητικών πτερυγίων αποτελεί μία βαθμίδα. Ο ρόλος της στεφάνης είναι η εξάλειψη της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας του ρευστού  $c_{u2}$  καθώς αυτό εξέρχεται από την πτερωτή, αφού η συνιστώσα αυτή αυξάνει την απόλυτη ταχύτητα του ρευστού και οδηγεί σε αυξημένες υδραυλικές απώλειες. Με τον τρόπο αυτό, το ρευστό οδηγείται στην είσοδο της επόμενης πτερωτής απαλλαγμένο συστροφής, γεγονός που διευκολύνει και την ταυτόσημη λειτουργία όλων των πτερωτών. Το τμήμα εξόδου της μηχανής έχει και σε αυτή την περίπτωση, συνήθως τη μορφή σπειροειδούς κελύφους.

Κάθε βαθμίδα προσδίδει στο ρευστό το ίδιο ολικό ύψος  $H_1$ , αφού όπως προαναφέρθηκε όλες οι πτερωτές έχουν το ίδιο θεωρητικό ύψος  $H_u$ . Επομένως το ολικό ύψος  $H_{ολ}$  της πολυβάθμιας αντλίας είναι το γινόμενο του πλήθους  $z$  των βαθμίδων της και του ολικού ύψους  $H_1$  :

$$H_{ολ} = zH_1 \quad (2.23)$$

## 2.3 Φυγόκεντρες αντλίες

### 2.3.1 Βαθμός απόδοσης αντλίας

Η ροή ενέργειας από τον κινητήρα προς την αντλία και από την τελευταία προς το ρευστό, συνοδεύεται από διάφορες απώλειες. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε τρεις τύπους, διαμορφώνοντας και τους αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης : τις υδραυλικές, τις ογκομετρικές και τις μηχανικές.

Οι υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{fea}$  που αναπτύσσονται κατά τη ροή του ρευστού εντός της αντλίας μπορούν να αναλυθούν :

- Στις απώλειες  $\delta h_{fe1}$  μεταξύ της διατομής εισόδου (e) της μηχανής και της διατομής εισόδου (1) της πτερωτής.
- Στις απώλειες  $\delta h_{f12}$  στο εσωτερικό της πτερωτής μεταξύ των διατομών της εισόδου (1) και εξόδου (2).

- Στις απώλειες  $\delta h_{f2a}$  μεταξύ της διατομής εξόδου (2) της περωτής και της διατομής εξόδου (α) της μηχανής.

Προφανώς ισχύει :

$$\delta h_{fea} = \delta h_{fe1} + \delta h_{f12} + \delta h_{f2a} \quad (2.24)$$

Αν λάβουμε υπ' όψιν τις αιτίες που προκαλούν τις υδραυλικές απώλειες, αυτές διακρίνονται στις υδραυλικές απώλειες τριβής  $\delta h_T$  και στις υδραυλικές απώλειες κρούσεως  $\delta h_a$ , δηλαδή ισχύει :

$$\delta h_{fea} = \delta h_T + \delta h_a \quad (2.25)$$

Οι πρώτες οφείλονται στην συνεκτικότητα του ρευστού και είναι ανάλογες με αυτές που εμφανίζονται στις σωληνώσεις. Ομοίως με τις τελευταίες, διακρίνονται σε γραμμικές που αναπτύσσονται κατά την ομαλή ροή του ρευστού και εντοπισμένες που αναπτύσσονται σε σημεία μεταβολής της διατομής και της κατεύθυνσης της ροής, ιδιαίτερα στην περωτή και το τμήμα εξόδου της αντλίας. Οι απώλειες τριβής αυξάνονται μονότονα με το τετράγωνο της παροχής.

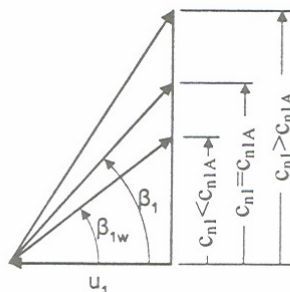
Οι απώλειες κρούσεως οφείλονται στην αποκόλληση της ροής που μπορεί να συμβεί στην ακμή πρόσπτωσης των πτερυγίων της περωτής ή στη γλωττίδα του σπειροειδούς κελύφους. Επειδή όπως έχει αναφερθεί, το ρευστό εισέρχεται στην περωτή άνευ συστροφής, η απόλυτη ταχύτητά του είναι ίση με την μεσημβρινή συνιστώσα του :

$$c_1 = c_{m1} = \frac{Q_u}{(\pi D_1 - z s_1) b_1} \quad (2.26)$$

, όπου  $z$  το πλήθος των πτερυγίων και  $s_1$  η προβολή πάχους του πτερυγίου στη διατομή εισόδου της περωτής.

Από την εικόνα 2.3 βλέπουμε ότι η κλίση  $\beta_{1w}$  της σχετικής ταχύτητας του ρευστού ως προς την περωτή είναι ίση με :  $\tan \beta_{1w} = \frac{c_1}{u_1}$ . Άρα υπάρχει τιμή της παροχής, για την

οποία η σχετική ταχύτητα του ρευστού έχει κλίση ίση με την κλίση  $\beta_1$  των πτερυγίων της περωτής. Αυτή η παροχή ονομάζεται βέλτιστη (optimum), συμβολίζεται ως  $Q_{uA}$  και γι' αυτήν οι απώλειες κρούσης στα πτερύγια είναι μηδενικές. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση της παροχής  $Q_u$  από την  $Q_{uA}$  τόσο αυξημένες είναι οι απώλειες αυτές.



Εικόνα 2.3 Τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και  $c_{u1} \approx 0$

Από τις εξισώσεις ορισμού του ύψους της περωτής  $H_u$  (2.18) και του ολικού πραγματικού ύψους της αντλίας  $H$  (2.13) προκύπτει :

$$\begin{aligned}
 H &= H_{oa} - H_{oe} = (H_{o2} - \delta h_{f2a}) - (H_{o1} + \delta h_{fe1}) = (H_{o2} - H_{o1}) - \\
 & - (\delta h_{f2a} + \delta h_{fe1}) = H_u - (\delta h_{fe1} + \delta h_{f12} + \delta h_{f2a}) = H_u - \delta h_{fea}
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

Δηλαδή η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που παραλαμβάνει το ρευστό από τη αντλία είναι ίση με την θεωρητική ενέργεια που του προσδίδει η πτερωτή μειωμένη κατά τις υδραυλικές απώλειες που αναπτύσσονται εντός της αντλίας.

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης  $\eta_h$  ορίζεται ως ο λόγος :

$$\eta_h = \frac{H}{H_u} = 1 - \frac{\delta h_{fea}}{H_u}
 \tag{2.28}$$

Ο βαθμός απόδοσης έχει μία μέγιστη τιμή την οποία παίρνει για μια συγκεκριμένη τιμή της παροχής, η οποία είναι μικρότερη της optimum παροχής.

Οι ογκομετρικές απώλειες οφείλονται στο φαινόμενο της ανακυκλοφορίας ενός τμήματος  $\delta Q$  της παροχής στην πτερωτή. Η αυξημένη στατική πίεση του ρευστού στη διατομή εξόδου (2) της πτερωτής σε σχέση με την διατομή εισόδου της (1), είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία ροής ρευστού από την περιοχή υψηλής προς την περιοχή χαμηλής πίεσης και η οποία διέρχεται μέσω του διακένου που υπάρχει μεταξύ της πτερωτής και του εξωτερικού κελύφους της αντλίας. Επιπλέον η υψηλή περιφερειακή ταχύτητα  $u$  και η πιθανή ύπαρξη σωματιδίων στο ρευστό καθιστούν αδύνατη την κατασκευή διάταξης που θα εξασφάλιζε απόλυτη στεγανότητα και θα διέκοπτε την ανακυκλοφορία αυτή. Έτσι πέραν της παροχής  $Q$  που εισέρχεται στην αντλία, διέρχεται από την πτερωτή και εξέρχεται από την αντλία κάθε χρονική στιγμή, υπάρχει και ένα τμήμα παροχής  $\delta Q$  το οποίο επίσης διέρχεται από την πτερωτή, παραλαμβάνει ενέργεια και το καταναλώνει για την συνεχή ανακυκλοφορία του. Επομένως η παροχή  $Q_u$  που διέρχεται από την πτερωτή κάθε χρονική στιγμή είναι μεγαλύτερη της παροχής  $Q$  και ισούται με :

$$Q_u = Q + \delta Q
 \tag{2.29}$$

Ως ογκομετρικός βαθμός απόδοσης  $\eta_Q$  ορίζεται ο λόγος :

$$\eta_Q = \frac{Q}{Q_u} = 1 - \frac{\delta Q}{Q_u}
 \tag{2.30}$$

Η τιμή του κυμαίνεται από 0,96 για τις μικρές αντλίες ως 0,99 για αντλίες μεγάλου μεγέθους. Για τη μείωση των ογκομετρικών απωλειών, άρα και της ενέργειας που δαπανάται εξαιτίας τους, χρησιμοποιούνται στραγγαλιστικές διατάξεις λαβυρίνθων. Αυτές είναι δακτυλιοειδείς σχισμές που διαμορφώνονται μεταξύ της στρεφόμενης πτερωτής και του σταθερού κελύφους πριν τη διατομή αναρρόφησης της πτερωτής, φέρουν ακτινικό διάκενο και λειτουργούν ουσιαστικά ως εντοπισμένες αντιστάσεις.

Οι μηχανικές απώλειες οφείλονται στο γεγονός ότι ένα μέρος  $N_m$  της μηχανικής ισχύος  $N$  που προσδίδει ο κινητήρας στην άτρακτο της αντλίας δαπανάται για την υπερνίκηση των απωλειών τριβής των στρεφόμενων μερών της τελευταίας. Το υπόλοιπο τμήμα της ισχύος αποτελεί την περιφερειακή ισχύ  $N_u$  και είναι διαθέσιμη να προσδοθεί στο ρευστό. Δηλαδή ισχύει :

$$N = N_u + N_m
 \tag{2.31}$$

Η ισχύς των απωλειών με τη σειρά της διακρίνεται δύο όρους : την ισχύ  $N_E$  που καταναλίσκεται λόγω της τριβής των εδράνων και των στυπιοθλιπτών και την ισχύ  $N_S$  που οφείλεται στην τριβή μεταξύ ρευστού και των εξωτερικών επιφανειών της πλήμνης και της στεφάνης της περωτής. Επομένως έχουμε :

$$N_m = N_E + N_S \quad (2.32)$$

Οι απώλειες στα έδρανα εξαρτώνται από τον τύπο τους, την ποιότητα και τη φόρτισή τους και είναι αντιστρόφως ανάλογες του μεγέθους της μηχανής. Οι απώλειες στρεφόμενου δίσκου οφείλονται στην ροπή των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της συνεκτικότητας του υγρού, ως προς τον άξονα περιστροφής. Εξαρτώνται κυρίως από τη μορφή της περωτής και είναι μεγαλύτερες για περωτές ακτινικής ροής.

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης  $\eta_m$  ορίζεται από τη σχέση :

$$\eta_m = \frac{N_u}{N} = 1 - \frac{N_E}{N} - \frac{N_S}{N} = 1 - \zeta_E - \zeta_S \quad (2.33)$$

όπου  $\zeta_E$  και  $\zeta_S$  οι παράμετροι απωλειών των εδράνων και του στρεφόμενου δίσκου αντίστοιχα. Οι τιμές που παίρνουν κυμαίνονται από 0,01 ως 0,04 για τον  $\zeta_E$  και από 0,01 ως 0,05 για τον  $\zeta_S$ . Η τιμή του μηχανικού βαθμού απόδοσης κυμαίνεται από 0,91 για μικρές αντλίες ως 0,985 για μεγάλες αντλίες.

Με βάση τις σχέσεις 2.5 και 2.12 ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως :

$$\eta = \frac{N_i}{N} = \frac{\gamma H Q}{N} \quad (2.34)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα όσα προαναφέρθηκαν ισχύει :

$$\eta_m = \frac{N_u}{N} = \frac{\gamma H_u Q_u}{N} = \frac{\gamma H Q}{N \eta_h \eta_Q} \Leftrightarrow \eta_m \eta_h \eta_Q = \frac{\gamma H Q}{N} \Leftrightarrow \eta_m \eta_h \eta_Q = \eta \quad (2.35)$$

Δηλαδή ο ολικός βαθμός απόδοσης ισούται με το γινόμενο των τριών επιμέρους βαθμών απόδοσης. Σε περίπτωση λειτουργίας της αντλίας με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, διαμορφώνεται κυρίως από τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης.

### 2.3.2 Ιδεατή και θεωρητική χαρακτηριστική περωτής

Πέρα από τους βαθμούς απόδοσης που αναφέρθηκαν, υπάρχει και ο ιδεατός βαθμός απόδοσης της περωτής  $\eta_i$ . Αυτός εκφράζει τη δυνατότητα πρόσδοσης ενέργειας από την περωτή συγκριτικά με μία άλλη ιδεατή που έχει άπειρο αριθμό περυγίων. Για συνήθεις περωτές παίρνει τιμές μεταξύ 0,70 και 0,75. Η τιμή του αυξάνεται με αύξηση του πλήθους  $z$  των περυγίων, με αύξηση του λόγου  $D_2 / D_1$  των διαμέτρων στις διατομές εξόδου και εισόδου της περωτής ή με μείωση της κλίσης  $\beta_2$  των περυγίων ως προς την περιφερειακή διεύθυνση στην έξοδο της περωτής. Η επίτευξη του επιθυμητού ιδεατού βαθμού απόδοσης επιτυγχάνεται με κατάλληλο συνδυασμό του πλήθους των περυγίων και της κλίσης αυτών, αφού για δεδομένη κλίση, υπερβολική αύξηση του πλήθους  $z$  οδηγεί σε μείωση των μεταξύ των περυγίων διακένων. Το τελευταίο προκαλεί αύξηση τόσο της ταχύτητας του ρευστού

όσο και των επιφανειών που αυτό διαρρέει, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται αυξημένες υδραυλικές απώλειες και συνεπώς μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης.

Ως ιδεατή χαρακτηριστική της περωτής ορίζεται η καμπύλη μεταβολής του ιδεατού ύψους  $H_{ui}$  της περωτής συναρτήσει της παροχής  $Q_u$  που διέρχεται από αυτή, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Αντίστοιχα ως θεωρητική χαρακτηριστική της περωτής ορίζεται η καμπύλη μεταβολής του θεωρητικού ύψους  $H_u$  της περωτής συναρτήσει της παροχής  $Q_u$  που διέρχεται από αυτή, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Το ιδεατό ύψος της περωτής δίνεται από την εξίσωση :

$$H_{ui} = \frac{u_2}{g} \left( u_2 - \frac{c_{n2}}{\tan \beta_2} \right) \quad (2.36)$$

, όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $u_2$  η περιφερειακή ταχύτητα στην διατομή εξόδου της περωτής,  $c_{n2}$  η ορθή συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού στην έξοδο της περωτής η οποία είναι ανάλογη της παροχής  $Q_u$  και  $\beta_2$  η κλίση των πτερυγίων στην έξοδο της περωτής.

Το ιδεατό και θεωρητικό ύψος συνδέονται με τη σχέση :

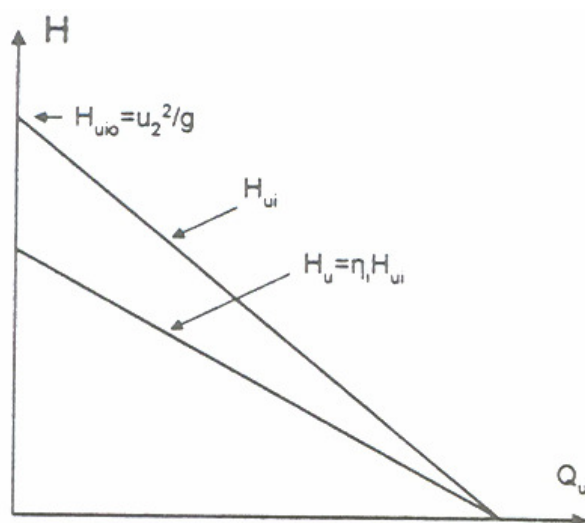
$$H_u = \eta_i H_{ui} = \eta_i \frac{u_2}{g} \left( u_2 - \frac{c_{n2}}{\tan \beta_2} \right) \quad (2.37)$$

, όπου  $\eta_i$  ο ιδεατός βαθμός απόδοσης.

Επομένως τόσο η ιδεατή όσο και η θεωρητική χαρακτηριστική περωτής έχουν τη μορφή ευθείας γραμμής με κλίση που καθορίζεται από την κλίση των πτερυγίων στη διατομή εξόδου της περωτής. Η κλίση αυτή είναι :

- αρνητική όταν  $\beta_2 < 90^\circ$
- μηδενική όταν  $\beta_2 = 90^\circ$
- θετική όταν  $\beta_2 > 90^\circ$

Για μηδενική παροχή ( $Q_u = 0$ ) το ύψη παίρνουν τις τιμές  $H_{ui} = \frac{u_2^2}{g}$  και  $H_u = \eta_i \frac{u_2^2}{g}$ .



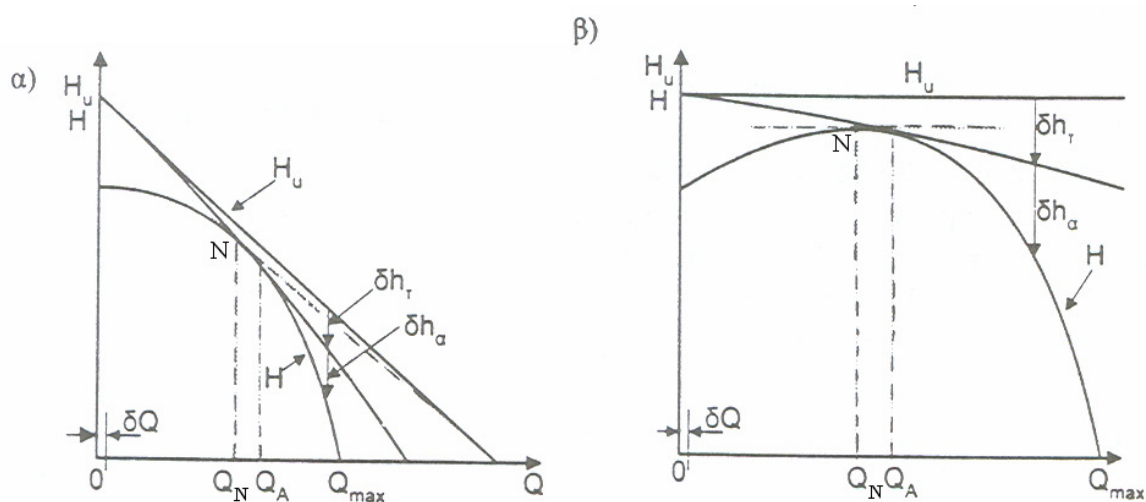
Εικόνα 2.4 Θεωρητική και ιδεατή χαρακτηριστική καμπύλη περωτής για κλίση πτερυγίων  $\beta_2 < 90^\circ$

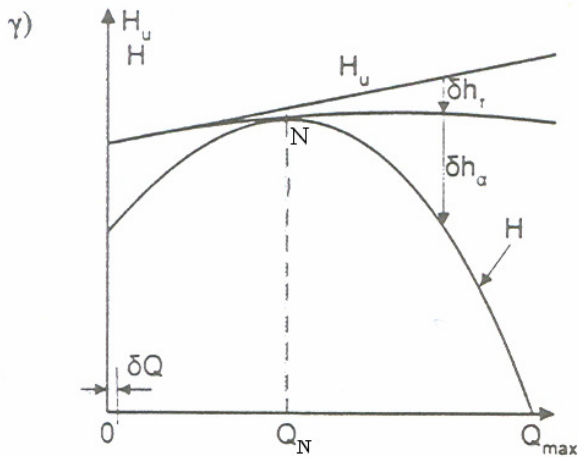
Στην περίπτωση κατά την οποία  $\beta_2 < 90^\circ$  παρατηρούμε ότι για  $Q_u > Q_{uMAX}$  τα ύψη παίρνουν αρνητικές τιμές. Στην περιοχή αυτή η αντλία λειτουργεί πλέον σαν στρόβιλος. Στην περίπτωση όπου  $\beta_2 = 90^\circ$  και  $\beta_2 > 90^\circ$  δεν παρατηρείται ανάλογη συμπεριφορά της μηχανής.

### 2.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας

Ως χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της αντλίας ορίζονται η καμπύλη μεταβολής του πραγματικού ύψους  $H$  και η καμπύλη μεταβολής του ολικού βαθμού απόδοσης  $\eta$  συναρτήσει της παροχής  $Q$  που διέρχεται από την αντλία, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Από αυτές τις δύο είναι δυνατό να προκύψει και η καμπύλη μεταβολής της απορροφούμενης ισχύος  $N$  συναρτήσει της παροχής  $Q$ .

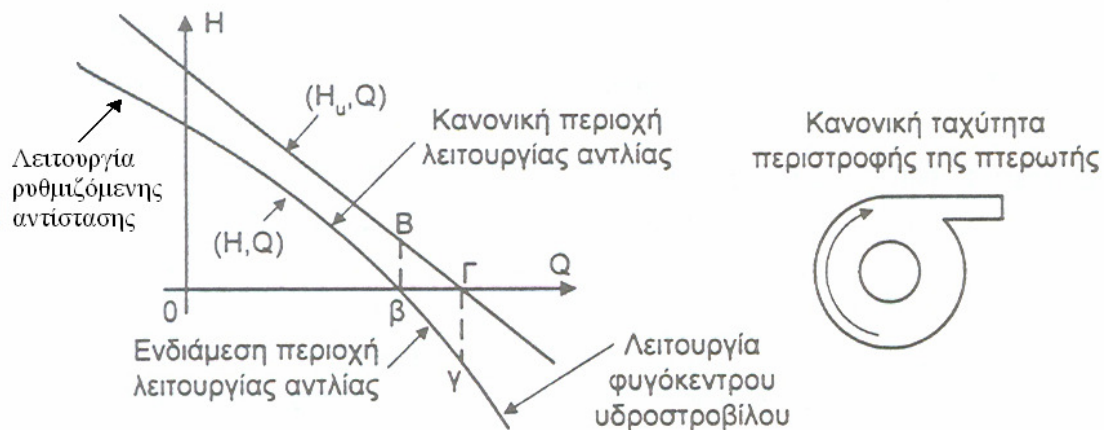
Η χαρακτηριστική  $(H, Q)$  προκύπτει από τη θεωρητική καμπύλη της περωτής  $(H_u, Q_u)$ , θεωρώντας αμελητέα τη διαφορά μεταξύ  $Q_u, Q$  και αφαιρώντας για κάθε τιμή της παροχής τις υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{fea}$ . Η κλίση της εξαρτάται, όπως και αυτή της θεωρητικής χαρακτηριστικής, από την κλίση των πτερυγίων στη διατομή εξόδου. Η ευθεία που διέρχεται από το σημείο μέγιστης θεωρητικής παροχής και εφάπτεται της καμπύλης  $(H, Q)$  καθορίζει το σημείο N (εικόνα 2.5) στο οποίο ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης είναι μέγιστος. Το σημείο αυτό, λόγω της προαναφερθείσας έντονης επίδρασης του υδραυλικού στον ολικό βαθμό απόδοσης, μπορεί να ταυτιστεί με το σημείο μεγίστου ολικού βαθμού απόδοσης και χαρακτηρίζεται ως κανονικό σημείο λειτουργίας της αντλίας. Σε συμφωνία με όσα αναφέραμε για τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης, η παροχή που αντιστοιχεί στο κανονικό σημείο λειτουργίας  $Q_N$  είναι μικρότερη από την βέλτιστη παροχή  $Q_A$  και συνήθως ισχύει :  $Q_N = (0,85 \div 0,95)Q_A$ .





Εικόνα 2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες  $(H, Q)$  και θεωρητικές χαρακτηριστικές αντλίας με α)  $\beta_2 < 90^\circ$  β)  $\beta_2 = 90^\circ$   
 γ)  $\beta_2 > 90^\circ$

Στην μέγιστη παροχή  $Q_{MAX}$  αντιστοιχεί μηδενικό ύψος ( $H = 0$ ), αλλά μη μηδενικό θεωρητικό ύψος ( $H_u \neq 0$ ). Αυτό σημαίνει ότι η πτερωτή προσδίδει στο ρευστό ενέργεια η οποία όμως δαπανάται αποκλειστικά για την κίνησή του εντός της αντλίας. Σε περίπτωση παροχής μεγαλύτερη από την  $Q_{MAX}$  διακρίνουμε δύο περιοχές. Στην πρώτη το πραγματικό ύψος  $H$  είναι αρνητικό ( $H < 0$ ), αλλά το θεωρητικό ύψος  $H_u$  θετικό ( $H_u > 0$ ). Αυτό σημαίνει ότι η πτερωτή συνεχίζει να προσδίδει ενέργεια στο ρευστό, η οποία όμως είναι μικρότερη από τις υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{fea}$  εντός της αντλίας με αποτέλεσμα να είναι  $H < 0$ . Στην περιοχή στην οποία και τα δύο ύψη είναι αρνητικά ( $H < 0$  και  $H_u < 0$ ), θα είναι αρνητικές και οι αντίστοιχες ισχύεις ( $N < 0$  και  $N_u < 0$ ). Επομένως η αντλία λειτουργεί σαν φυγόκεντρος στρόβιλος, δέχεται ενέργεια από το ρευστό και η ροπή στην άτρακτό της παύει να είναι ανθιστάμενη αλλά είναι πλέον κινητήρια.



Εικόνα 2.6 Επέκταση της χαρακτηριστικής της αντλίας

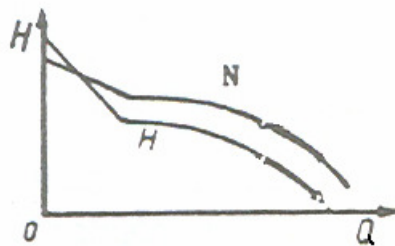
Για αρνητικές παροχές, δηλαδή για ροή από την διατομή εξόδου (α) προς την διατομή εισόδου (ε) και ενώ η αντλία συνεχίζει να στρέφεται κατά την κανονική φορά περιστροφής της, το πραγματικό ύψος είναι θετικό ( $H > 0$ ), αλλά το θεωρητικό ύψος γίνεται αρνητικό ( $H_u < 0$ ) αφού πλέον ισχύει  $c_{u2} \approx 0$  και  $c_{u1} > 0$ . Οι αντίστοιχες ισχύεις είναι θετικές ( $N > 0$  και  $N_u > 0$ ), δηλαδή η αντλία προσδίδει ισχύ το ρευστό, η οποία δαπανάται για τον περιορισμό της αρνητικής παροχής και την διατήρηση της

κανονικής φοράς περιστροφής. Λειτουργεί, επομένως, ως ρυθμιζόμενη αντίσταση. Για μηδενική ταχύτητα περιστροφής ( $n = 0$ ) η μηχανή λειτουργεί ως μία εντοπισμένη αντίσταση και οι χαρακτηριστική έχει τη μορφή παραβολής που ξεκινά από την αρχή των αξόνων.

Η καμπύλη του ολικού βαθμού απόδοσης ( $\eta, Q$ ) παρουσιάζει μέγιστο στην κανονική παροχή  $Q_N$ , ενώ για μηδενική ( $Q = 0$ ) και για μέγιστη παροχή ( $Q = Q_{MAX}$ ) έχει μηδενική τιμή. Αντίθετα η καμπύλη της απορροφούμενης ισχύος  $N$  συναρτήσει της παροχής  $Q$  είναι αύξουσα. Για  $Q = 0$  η τιμή της είναι μη μηδενική και αντιστοιχεί στην ισχύ των μηχανικών απωλειών και στην ισχύ που καταναλώνει η ανακυκλοφορία  $\delta Q$ . Για  $Q = Q_{MAX}$  η τιμή της αντιστοιχεί στην ισχύ που απαιτείται για τη διακίνηση της παροχής συν τις μηχανικές απώλειες. Δηλαδή ισχύει :

$$N_{Q_{max}} = N_m + \gamma \cdot (Q_{MAX} + \delta Q) \cdot \delta h_{jea} \quad (2.38)$$

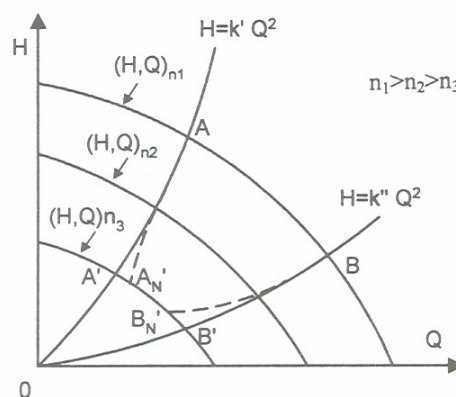
Στις αντλίες με πτερωτή αξονικής ροής η χαρακτηριστική καμπύλη ( $H, Q$ ) παρουσιάζει μια έντονη φθίνουσα πορεία και μετά από ένα σημείο καμψής, παίρνει μορφή όμοια με αυτήν των αντλιών με πτερωτή ακτινικής ροής. Ωστόσο η καμπύλη της ισχύος συναρτήσει της παροχής είναι φθίνουσα.



Εικόνα 2.7 Χαρακτηριστικές καμπύλες ( $H, Q$ ), ( $N, Q$ ) αντλία με πτερωτή αξονικής ροής

Η μορφή της χαρακτηριστικής ( $H, Q$ ) για διάφορες ταχύτητες περιστροφής είναι παρόμοια, ενώ τα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας κείνται επί παραβολών που διέρχονται από την αρχή των αξόνων ( $Q = 0, H = 0$ ) και έχουν τη μορφή :  $H = \kappa Q^2$ , όπου  $\kappa$  σταθερά ίδια για όλα τα σημεία.

Ως αντίστοιχα, χαρακτηρίζονται τα σημεία λειτουργίας της αντλίας στα οποία για διάφορες ταχύτητες περιστροφής ικανοποιείται η συνθήκη ομοιότητας της ροής, δηλαδή τα τρίγωνα ταχυτήτων είναι όμοια και η ροή είναι τυρβώδης.



Εικόνα 2.8 Χαρακτηριστικές καμπύλες για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και παραβολές αντίστοιχων σημείων λειτουργίας



Οι παραβολές των αντίστοιχων σημείων λειτουργίας είναι ταυτόχρονα και παραβολές σταθερού βαθμού απόδοσης για τις διάφορες ταχύτητες περιστροφής. Για χαμηλές, όμως, ταχύτητες όπου η ροή παύει να είναι τυρβώδης, λόγω της αύξησης των υδραυλικών απωλειών, η καμπύλη σταθερού βαθμού απόδοσης παίρνει τη μορφή κλειστού βρόγχου. Δηλαδή στην εικόνα 2.8 ίδιο βαθμό απόδοσης θα έχουν τα σημεία  $A, A'_N$  και  $B, B'_N$ . Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και στις υψηλές ταχύτητες, λόγω της μικρής, σε σχέση τις υπόλοιπες, αύξησης των μηχανικών απωλειών.

### 2.3.4 Αδιάστατες παράμετροι

Μία παράμετρος η οποία είναι ενδεικτική της μορφής της μεσημβρινής μορφής της πτερωτής είναι ο ειδικός αριθμός στροφών  $\eta_q$ . Αυτός ορίζεται ως η ταχύτητα περιστροφής μιας αντλίας γεωμετρικά όμοιας με την εξεταζόμενη, της οποίας η παροχή και το ύψος στο κανονικό σημείο λειτουργίας είναι μοναδιαία ( $H_N = 1$  και  $Q_N = 1$ ), και δίνεται από τη σχέση :

$$\eta_q = n \frac{Q_N^{1/2}}{H_N^{3/4}} \quad (2.39)$$

, όπου  $n$  η ταχύτητα περιστροφής (RPM),  $H_N$  το κανονικό ύψος (m ΣΥ) και  $Q_N$  η κανονική παροχή (m<sup>3</sup>/h) της υπό εξέταση αντλίας.

Όσο αυξάνεται η τιμή του  $\eta_q$  τόσο περισσότερο η πτερωτή γίνεται μεικτής και για πολύ υψηλές τιμές ( $\eta_q > 10.000$ ) αξονικής ροής, ενώ όσο μειώνεται τόσο περισσότερο γίνεται ακτινικής ροής. Αντλίες που ανήκουν σε μία οικογένεια γεωμετρικά όμοιων αντλιών έχουν τον ίδιο ειδικό αριθμό στροφών. Όμως, αντλίες με τον ίδιο  $\eta_q$  έχουν την ίδια περίπου μορφή, χωρίς να είναι κατ' ανάγκη γεωμετρικά όμοιες, καθώς τα  $H_N$  και  $Q_N$  δεν είναι τα μόνα κύρια χαρακτηριστικά της μηχανής σε δεδομένη ταχύτητα περιστροφής.

Η καμπύλη του ολικού βαθμού απόδοσης της αντλίας, συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών και άρα του τύπου της πτερωτής, για σταθερή τιμή κανονικής παροχής, παρουσιάζει ένα μέγιστο. Αυτό συμβαίνει γιατί στις μικρές τιμές  $\eta_q$  παρουσιάζονται έντονες υδραυλικές απώλειες, καθώς ο λόγος  $b_2 / D_2$  πλάτους των πτερυγίων προς τη διάμετρο της πτερωτής είναι μικρός. Όσο αυξάνεται ο  $\eta_q$ , τόσο αυξάνεται η τιμή του λόγου αυτού και μειώνονται οι υδραυλικές απώλειες.

Υπερβολική, όμως, αύξηση του  $\eta_q$  οδηγεί βάσει του ορισμού του σε μείωση του ύψους  $H_N$ , η οποία επιδρά εντονότερα στον βαθμό απόδοσης σε σχέση με τη μείωση των απωλειών.

Για μία οικογένεια γεωμετρικά όμοιων μηχανών, στην οποία εντάσσονται μηχανές διαφορετικού μεγέθους και ταχύτητας περιστροφής, συχνά οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας χαράσσονται σε αδιάστατη μορφή. Για το σκοπό αυτό γίνεται

χρήση της αδιάστατης παροχής  $\Phi$  και του αδιάστατου ύψους  $\Psi$ , που ορίζονται ως εξής :

$$\Phi = \frac{c_{u2}}{u_2} \quad (2.40)$$

$$\Psi = \frac{2gH}{u_2^2} \quad (2.41)$$

Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ αντλιών με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως είναι οι αντλίες με πτερωτή διαφορετικής μορφής.

Πέρα από τα παραπάνω αδιάστατα μεγέθη, κατά την μελέτη υδραυλικού πλήγματος σε μία αντλία (βλέπε Κεφάλαιο 4) συναντώνται ευρέως τα χαρακτηριστικά της μεγέθη αδιαστατοποιημένα ως προς τα αντίστοιχα μεγέθη του κανονικού σημείου λειτουργίας της. Έτσι ορίζουμε ως :

$$\nu = \frac{Q}{Q_N}, \quad h = \frac{H}{H_N}, \quad a = \frac{n}{n_N}, \quad \beta = \frac{T}{T_N} \quad (2.42)$$

την αδιαστατοποιημένη παροχή, ύψος, ταχύτητα περιστροφής και ροπή αντίστοιχα. Επίσης πολύ συχνά η χαρακτηριστική καμπύλη της αντλίας χαράσσεται στα αδιαστατοποιημένα μεγέθη  $(h, \nu)$ , ενώ για τη διευκρίνιση της φάσης λειτουργίας της χρησιμοποιούνται διαγράμματα με άξονες τα μεγέθη  $(a, \nu)$ . Συγκεκριμένα έχουμε :

- $h \geq 0, \nu \geq 0, a > 0$  : κανονική λειτουργία αντλίας
- $h \geq 0, \nu < 0, a \geq 0$  : λειτουργία ρυθμιζόμενης αντίστασης
- $h > 0, \nu < 0, a < 0$  : λειτουργία στροβίλου

Για λόγους ευκολίας, στις διάφορες αριθμητικές εφαρμογές έχουν εισαχθεί οι μεταβλητές  $W_H$  και  $W_B$ , που ορίζονται ως :

$$W_H = \frac{h}{a^2 + \nu^2} \quad (2.43)$$

$$W_B = \frac{\beta}{a^2 + \nu^2} \quad (2.44)$$

και χαράσσονται συναρτήσει της σχέσης :

$$x' = \arctan(\nu / a) \quad (2.45)$$

Στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, λόγω ορισμού της γωνίας  $\theta = \arctan(\nu / a)$  στο διάστημα  $(-\pi, \pi)$ , οι τιμές των  $W_H$  και  $W_B$  δίνονται συναρτήσει της μεταβλητής :

$$x = x' + \pi = \pi + \arctan(\nu / a) \quad (2.46)$$

Προφανώς για τα αντίστοιχα σημεία λειτουργίας μιας μηχανής ισχύουν οι σχέσεις :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (2.47)$$

$$W_{H1} = W_{H2}, \quad W_{B1} = W_{B2} \quad (2.48)$$

Οι περιοχές λειτουργίας μιας φυγόκεντρης αντλίας συναρτήσει της μεταβλητής  $x$  καθορίζονται ως :

- λειτουργία υδροστροβίλου :  $0 < x < \pi / 2$
- λειτουργία ρυθμιζόμενης αντίστασης :  $\pi / 2 < x < \pi$
- κανονική λειτουργία αντλίας :  $3\pi / 2 < x < 2\pi$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

### 3.1 Εισαγωγή στους ηλεκτροκινητήρες

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτροκινητήρες (electro motors) είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική, με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου. Χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο στην καθημερινή μας ζωή (π.χ. σε ηλεκτρικές συσκευές, ρολόγια) όσο και στη βιομηχανία (π.χ. κίνηση εργαλειομηχανών, αντλιών) και σε άλλες δραστηριότητες. Μαζί με τις γεννήτριες (generators), οι οποίες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, ανήκουν στην κατηγορία των ηλεκτρικών μηχανών. Οι ηλεκτρικές μηχανές είναι ηλεκτρομηχανικές διατάξεις μετατροπής ενέργειας. Χρησιμοποιούνται για συνεχή μετατροπή ενέργειας και μεγάλες, συνήθως κυκλικές, μετατοπίσεις. Τα κύρια μέρη μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι το ηλεκτρικό σύστημα, το μηχανικό σύστημα και το μαγνητικό πεδίο που τα εμπλέκει.

Ένας ηλεκτροκινητήρας κατασκευαστικά αποτελείται από τα εξής μέρη :

- το στάτη

Ο στάτης παραμένει ακίνητος. Αποτελεί το πλαίσιο του κινητήρα και είναι προσαρμοσμένοι σε αυτόν ηλεκτρομαγνήτες ή μόνιμοι μαγνήτες μέσω των οποίων δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Οι ηλεκτρομαγνήτες ουσιαστικά αποτελούνται από ρευματοφόρους αγωγούς (τυλίγματα) που έχουν περιελιχθεί γύρω από κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό (πυρήνα).

- το δρομέα

Ο δρομέας είναι το κινούμενο τμήμα της μηχανής και μπορεί να μετατοπίζεται γραμμικά ή να περιστρέφεται. Σε αυτόν προσαρμόζονται κατάλληλα πυρήνας και τυλίγματα, μόνιμος μαγνήτης ή μαλακός σίδηρος. Συχνά ο πυρήνας και τα τυλίγματα αναφέρονται με τον όρο τύμπανο ή οπλισμός (armature).

Μεταξύ δρομέα και στάτη υπάρχει ένα διάκενο, το οποίο επιτρέπει τη σχετική κίνηση των δύο μερών και ρυθμίζει την μαγνητική ροή που διαρρέει το μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής. Οι πυρήνες είναι κατασκευασμένοι από σιδηρομαγνητικό υλικό, που διαμορφώνονται συνήθως σε παράλληλα ελάσματα, ώστε να ελαττώνεται η μαγνητική αντίσταση και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες πυρήνα.

Οι συνδέσεις των στρεφόμενων τυλιγμάτων γίνονται είτε με δακτυλίους ολίσθησης και ψήκτρες είτε με ψήκτρες και συλλέκτη. Οι ψήκτρες (brushes) κατασκευάζονται από μαλακό άνθρακα (π.χ. γραφίτη), επιτρέπουν στο ρεύμα να διέρχεται ελεύθερα ενώ παρουσιάζουν χαμηλή τριβή. Ο συλλέκτης αποτελείται από έναν κύλινδρο, στην περιφέρεια του οποίου υπάρχουν σφηνοειδής τομείς από χαλκό, μονωμένους μεταξύ τους με μίκα. Φέρει στην περιφέρειά του τις ψήκτρες. Κύρια λειτουργία του συστήματος είναι η ανόρθωση του ρεύματος. Οι δακτύλιοι ολίσθησης είναι κατασκευασμένοι από μέταλλο και προσαρμόζονται στην άτρακτο του δρομέα, με την

παρεμβολή μόνωσης. Βρίσκονται σε συνεχή επαφή με τις ψήκτρες. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν οι διατάξεις αυτές, η παραγωγή συνεχούς τάσης γίνεται μέσω ηλεκτρονικής οδήγησης.

### 3.1.2 Αρχές λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών, επομένως και των ηλεκτροκινητήρων βασίζεται στους εξής νόμους που διέπουν τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα :

- Νόμος Ampere

Σύμφωνα με αυτόν, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργείται γύρω του μαγνητικό πεδίο με συγκεκριμένη ένταση. Σε περίπτωση που ο αγωγός είναι πηνίο με μεγάλο μήκος συγκριτικά με τη διάμετρό του, το μέτρο της έντασης  $H$  του πεδίου εξαρτάται από το μέτρο της έντασης  $i$  του ρεύματος, τον αριθμό των τυλίγμάτων  $N$  και το μήκος  $l$  του πηνίου :

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (3.1)$$

Η ένταση του πεδίου συνδέεται με την μαγνητική επαγωγή  $B$  με τη σχέση :

$$\vec{H} = \mu \vec{B} \quad (3.2)$$

, όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού μέσα από το οποίο διέρχεται το πεδίο. Η μαγνητική επαγωγή εκφράζει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής.

- Νόμος Faraday

Κατά τον νόμο αυτόν, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή  $\phi$  ή σε περίπτωση πηνίου με  $N$  τυλίγματα η πεπλεγμένη ροή  $\lambda = N\phi$ , που εμπλέκει ένας αγωγός, εμφανίζεται ηλεκτρική τάση  $e$  :

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.3)$$

Η εμπλεκόμενη μαγνητική ροή μπορεί να μεταβάλλεται λόγω της κίνησης του αγωγού, λόγω μεταβολής του ρεύματος που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου κτλ. Η αναπτυσσόμενη τάση, λέγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) και τείνει να εξουδετερώσει την μεταβολή που την προκάλεσε. Για παράδειγμα η ανάπτυξή της στα τυλίγματα ενός κινητήρα, τείνει να περιορίσει την γωνιακή ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο δρομέα του. Στην περίπτωση αυτή λέγεται αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ). Η πολικότητα καθορίζεται με βάση τον νόμο του Lenz.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο αυτόν όσο και το νόμο του Faraday, η επαγόμενη τάση σε έναν αγωγό που κινείται εντός μαγνητικού πεδίου είναι :

$$e = \vec{l} \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.4)$$

, όπου  $l$  το μήκος του αγωγού,  $\vec{B}$  η μαγνητική επαγωγή του πεδίου και  $\vec{v}$  η σχετική ταχύτητα του αγωγού ως προς το μαγνητικό πεδίο

- Νόμος Lorenz

Σύμφωνα με το νόμο αυτό, όταν ηλεκτρόνια κινούνται σε κοινή κατεύθυνση εντός μαγνητικού πεδίου, ασκείται σε αυτά δύναμη. Κίνηση ηλεκτρονίων σε κοινή κατεύθυνση είναι και η ροή ηλεκτρικού ρεύματος εντός ηλεκτροφόρου αγωγού. Η δύναμη που ασκείται στα ηλεκτρόνια του ρεύματος, μεταφέρεται στον αγωγό και απ'

αυτόν στο μέρος της μηχανής στο οποίο είναι προσαρμοσμένος. Η στοιχειώδης δύναμη  $d\vec{F}$  που ασκείται σε αγωγό στοιχειώδους μήκους  $dL$  που διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $i$  από πεδίο με μαγνητική επαγωγή  $\vec{B}$  ισούται με :

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{L} \times \vec{B} \quad (3.5)$$

Σε περίπτωση όπου ο αγωγός έχει κατάλληλη μορφή, π.χ. τύλιγμα, η κατεύθυνση των ασκούμενων δυνάμεων, οδηγεί στην εμφάνιση ροπής που εξαναγκάζει το τύλιγμα σε περιστροφή. Η διαδικασία εμφάνισης της ροπής είναι η εξής :

Έστω ένας ηλεκτροκινητήρας του οποίου ο στάτης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο με ημιτονοειδή συμπεριφορά  $B_s(a) = B_s \sin a$ , ενώ ο δρομέας του περιλαμβάνει ένα στοιχειώδες τύλιγμα.

Η δύναμη που ασκείται στο ένα άκρο του τυλίγματος είναι  $\vec{F}_1 = i \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) = iLB_s \sin a$  και προκαλεί ροπή  $T_1 = (\vec{r} \times \vec{F}) = riLB_s \sin a$ . Η δύναμη και η ροπή στο άλλο άκρο του είναι  $\vec{F}_2 = i \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) = iLB_s \sin a$  και  $T_2 = (\vec{r} \times \vec{F}) = riLB_s \sin a$  αντίστοιχα. Έτσι στο τύλιγμα εφαρμόζεται συνολικά ροπή ίση με  $T = 2riLB_s \sin a$ .

Όμως και το τύλιγμα του δρομέα διαρρέεται από ρεύμα και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, έντασης  $\vec{H}_R$ . Το μέγιστο αυτής με το μέγιστο της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου του στάτορα  $B_s$  σχηματίζουν γωνία  $\gamma = 180^\circ - a$  άρα ισχύει  $\sin a = \sin \gamma$ . Τα παραπάνω οδηγούν στην έκφραση της συνολικής ροπής με τη σχέση :

$$T = kH_R B_s \sin a = k \cdot H_R \times B_s = k' \cdot B_R \times B_s \quad (3.6)$$

, όπου ο συντελεστής  $k$  εξαρτάται τόσο από τον τρόπο όσο και από τα υλικά κατασκευής της μηχανής.

Δύναμη ασκείται και σε ηλεκτρόνια που περιστρέφονται εντός μαγνητικού πεδίου, και η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τον άξονα περιστροφής τους με τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Στα περισσότερα υλικά υπάρχει ισορροπία μεταξύ ηλεκτρονίων με θετική και αρνητική φορά περιστροφής. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως είναι ο σίδηρος, τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται με τυχαίο τρόπο. Έτσι όταν τεμάχια τέτοιων υλικών βρεθούν μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσεται στα ηλεκτρόνιά τους δύναμη, που αναγκάζει τα τεμάχια να μετακινηθούν ή να περιστραφούν, ούτως ώστε να ευθυγραμμιστούν με τις μαγνητικές γραμμές. Η ευθυγράμμιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να ελαχιστοποιηθεί η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος, καθώς θα ελαχιστοποιηθούν τα μαγνητικά διάκενα μεταξύ των υλικών (π.χ. διάκενα αέρα) και θα μεγιστοποιηθεί η διερχόμενη από τα υλικά μαγνητική ροή.

### 3.1.3 Βαθμός απόδοσης

Όπως προαναφέρθηκε, όλες οι ηλεκτρικές μηχανές, άρα και οι κινητήρες αποτελούνται από τρία τμήματα : το ηλεκτρικό, το μηχανικό και το μαγνητικό πεδίο. Το τελευταίο παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο προηγούμενων τμημάτων και συμβάλλει στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Η τελευταία μεταβιβάζεται στην άτρακτο του κινητήρα, απ' όπου την παραλαμβάνει το φορτίο. Σε κάθε τμήμα, όμως, παρουσιάζονται και απώλειες ενέργειας.

Οι μηχανικές απώλειες, οφείλονται κυρίως στις τριβές στα έδρανα της μηχανής και στην αεροδυναμική αντίσταση των στρεφόμενων μερών (απώλειες ανεμισμού). Οι ηλεκτρικές απώλειες, διακρίνονται στις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα και στις απώλειες του συστήματος ψηκτρών – συλλέκτη (ή ψηκτρών – δακτυλίων ολίσθησης), εφ' όσον αυτό υπάρχει.

Οι απώλειες πεδίου ή μαγνητικές απώλειες, είναι ουσιαστικά οι απώλειες πυρήνα, και περιλαμβάνουν τις απώλειες υστέρησης, τις απώλειες δινορρευσμάτων και τις απώλειες φορτίου. Οι δύο πρώτες οφείλονται στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, ενώ οι απώλειες πεδίου οφείλονται στο ρεύμα του τυμπάνου και τη μαγνητική ροή που αυτό παράγει.

Ως βαθμός απόδοσης του κινητήρα  $\eta_K$  ορίζεται ο λόγος :

$$\eta_K = \frac{P_{MHX}}{P_{IN}} = \frac{P_{MHX}}{P_{MHX} + P_{ΑΠ}} \quad (3.7)$$

, όπου  $P_{MHX}$  η μηχανική ισχύς στην άτρακτο της μηχανής,  $P_{IN}$  η ολική εισερχόμενη ισχύς στον κινητήρα και  $P_{ΑΠ}$  η ολική ισχύς των απωλειών. Αποτελεί ένα μέτρο αξιολόγησης των κινητήρων ως προς την απόδοσή τους στη μετατροπή ενέργειας και η τιμή του είναι ανάλογη της ισχύος της μηχανής. Τυπική τιμή για κινητήρες υψηλής ισχύος είναι 0,98.

### 3.1.4 Χαρακτηριστική καμπύλη

Η συμπεριφορά του μηχανικού φορτίου το οποίο οδηγεί ένας κινητήρας μπορεί να διακριθεί σε δύο φάσεις :

- Τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας

Κατά τη διάρκειά της ο κινητήρας επιβραδύνεται ή επιταχύνεται, δηλαδή η ταχύτητά του μεταβάλλεται. Επίσης μπορεί να μεταβάλλεται και το φορτίο. Συνήθεις καταστάσεις μεταβατικής λειτουργίας είναι η εκκίνηση και το σταμάτημα του κινητήρα.

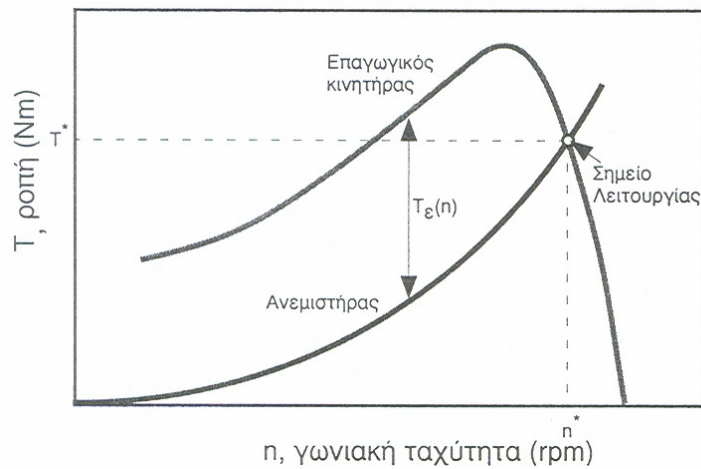
- Τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Κατά τη διάρκειά της, ο κινητήρας στρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Επίσης σταθερό παραμένει και το φορτίο.

Για τη μελέτη των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας, χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής – στροφών  $(T, n)$  του φορτίου και του κινητήρα. Η χαρακτηριστική καμπύλη του φορτίου εκφράζει τη ροπή  $T_{\phi}$  που απαιτείται, ούτως ώστε η ταχύτητα περιστροφής του  $n$ , να είναι σταθερή. Η μορφή της εξαρτάται από τις μηχανικές απώλειες των στρεφόμενων μερών και την συμπεριφορά που αυτές παρουσιάζουν κατά τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής.

Η χαρακτηριστική καμπύλη του κινητήρα, εκφράζει τη ροπή  $T_K$  που μπορεί αυτός να αποδώσει όταν περιστρέφεται με μία συγκεκριμένη ταχύτητα  $n$ . Επιπλέον μπορούμε να αντλήσουμε από αυτή χρήσιμες πληροφορίες, όπως είναι η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, η μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδώσει και η ροπή εκκίνησης, δηλαδή η ροπή που αποδίδεται σε μηδενική ταχύτητα περιστροφής. Η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του

κινητήρα. Από την τομή των χαρακτηριστικών φορτίου και κινητήρα, προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής  $n$  στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όπως επίσης και η ροπή που απαιτείται για τη διατήρηση αυτής.



Εικόνα 3.1 Παράδειγμα μόνιμης κατάστασης λειτουργίας κινητήρα – φορτίου

### 3.1.5 Βιομηχανικός έλεγχος

Για την επιλογή του κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να εξεταστούν οι εξής παράγοντες :

- Επάρκεια της ροπής, της ταχύτητας και της ισχύος που αποδίδει ο κινητήρας
- Μέθοδος εκκίνησης κινητήρα
- Μέθοδος πέδησης κινητήρα
- Μέθοδος ρύθμισης και ελέγχου του κινητήρα
- Προστασία του συστήματος από φαινόμενα, όπως η υπερθέρμανση, η απώλεια φάσης, χαμηλή τάση κτλ

Οι τέσσερις τελευταίοι παράγοντες αποτελούν το βιομηχανικό έλεγχο κινητήρων. Ένα σύστημα κινητήρων μαζί με το συνολικό ηλεκτρικό σύστημα βιομηχανικού ελέγχου, ονομάζεται οδήγηση (drive). Κινητήρες ενταγμένοι σε ένα σύστημα οδήγησης είναι δυνατόν να επιτελούν και άλλες λειτουργίες, πέραν της τυπικής πρόσδοσης μηχανικής ισχύος. Έτσι είναι δυνατή η απόδοση μηχανικής ισχύος, ακόμα και όταν ο κινητήρας στρέφεται κατά την αντίθετη φορά περιστροφής σε σχέση με την κανονική. Στην περίπτωση αυτή, στη χαρακτηριστική καμπύλη του κινητήρα τόσο η ροπή όσο και η ταχύτητα περιστροφής έχουν αρνητική τιμή ( $T_K < 0$  και  $n < 0$ ).

Εάν η ροπή είναι θετική ( $T_K > 0$ ) και η ταχύτητα περιστροφής αρνητική ( $n < 0$ ), τότε ο κινητήρας δρα ως γεννήτρια απορροφώντας μηχανική ενέργεια και μετατρέποντάς τη σε ηλεκτρική, η οποία επιστρέφει στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η ροπή είναι αρνητική ( $T_K < 0$ ) και η ταχύτητα περιστροφής θετική ( $n > 0$ ). Σε περίπτωση κατά την οποία ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος με κάποια εξωτερική αντίσταση, όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς καταστρέφεται, έχουμε λειτουργία δυναμικής πέδησης. Τέλος είναι δυνατόν η μηχανή με κατάλληλη σύνδεση να δράσει και ως πέδη, οπότε η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα στο εσωτερικό της. Οι τιμές της ροπής που αντιστοιχούν σε λειτουργία πέδησης, είναι

μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν σε λειτουργία γεννήτριας. Γενικά η λειτουργία πέδης αποφεύγεται, διότι είναι ενεργειακά ασύμφορη.

Πέρα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει μια οδήγηση, υπάρχουν και κάποια σημεία τα οποία χρήζουν προσοχής, διαφορετικά μπορούν να προκληθούν προβλήματα. Ένα από αυτά είναι η επίδραση της οδήγησης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το ηλεκτρικό σήμα εξόδου της οδήγησης είναι μία σειρά κυματομορφών. Οι κυματομορφές αυτές μπορεί να αποτελούν σύνθεση πολλών ημιτονοειδών κυματομορφών με κυκλική συχνότητα που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της βασικής συχνότητας. Βασική συχνότητα, καλείται η συχνότητα που αντιστοιχεί στην σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι παρουσιάζουν ασυνέχειες, με αποτέλεσμα να περιέχουν αρμονικές. Οι τελευταίες διαχέονται στο δίκτυο σαν ηλεκτρικός θόρυβος και μπορούν να προκαλέσουν υπερθέρμανση του κινητήρα, αλλά και προβλήματα σε άλλες συνδεδεμένες με το δίκτυο ηλεκτρικές συσκευές. Για τον περιορισμό της επίδρασής τους χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι η επίδραση της οδήγησης στο μηχανικό φορτίο. Κατ' αρχήν, είναι πιθανή η λειτουργία της οδήγησης στην περιοχή της κρίσιμης ταχύτητας. Κρίσιμη ταχύτητα, ονομάζεται η ταχύτητα στην οποία αντιστοιχεί συχνότητα περιστροφής του συστήματος κινητήρα – φορτίου, ίση με την ιδιοσυχνότητά του. Όπως είναι προφανές, ένα τέτοιο φαινόμενο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο, προκαλεί ισχυρές ταλαντώσεις και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε ολοσχερή καταστροφή του μηχανικού συστήματος. Προκειμένου να αποφθεχθεί κάτι τέτοιο πρέπει να γίνεται κατάλληλη επιλογή κινητήρα, έτσι ώστε οι στροφές λειτουργίας του να μην αντιστοιχούν στη ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Σε περίπτωση εφαρμογής όπου απαιτείται λειτουργία με μεταβλητές στροφές, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται οδηγίες που θα απαγορεύουν τη λειτουργία σε συγκεκριμένες συχνότητες ή να γίνονται αλλαγές στο σχεδιασμό του συστήματος.

### 3.1.6 Προστασία

Ένας ηλεκτροκινητήρας μπορεί να υπερθερμανθεί για διάφορες αιτίες, όπως είναι η συνεχής μηχανική υπερφόρτωση, κάποιο βραχυκύκλωμα, η ανεπαρκής ψύξη του κτλ. Το πρόβλημα αυτό είναι πιο έντονο στους κινητήρες μέσης και υψηλής ισχύος. Έτσι για την προστασία τους χρησιμοποιούνται μια σειρά από διατάξεις :

- Ασφάλειες

Προσφέρουν προστασία κυρίως από τα υψηλής έντασης ρεύματα που εμφανίζονται σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος. Ωστόσο πρέπει η ονομαστική ισχύ της ασφάλειας να είναι υψηλότερη από αυτή του κινητήρα, αλλιώς αυτή θα καεί κατά τη φάση της εκκίνησης.

- ηλεκτρονόμοι (relays) υπερφόρτωσης

Είναι συνδεδεμένοι σε σειρά με τον κινητήρα. Αποτελούνται από ένα θερμαντικό στοιχείο και μία επαφή που συνίσταται από έναν οπλισμό και έναν ηλεκτρομαγνήτη. Όταν το ρεύμα είναι υψηλό για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις υπερφόρτωσης, αυξάνεται η θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου. Αυτή η πληροφορία μεταβιβάζεται στην επαφή, η οποία δρα σαν διακόπτης



μετακινώντας τον οπλισμό με τον ηλεκτρομαγνήτη. Η ύπαρξη του θερμαντικού στοιχείου, εξασφαλίζει το ότι δεν θα υπάρξει αποσύνδεση του κινητήρα κατά την παρατήρηση σύντομων υψηλών ρευμάτων, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκκίνηση.

- διμεταλλικοί ρεονόμοι ή διακόπτες

Πρόκειται για διατάξεις εμφυτευμένες στα τυλίγματα, οι οποίες διακόπτουν την τροφοδοσία αυτών, ώστε να τα προστατεύουν από υπερθέρμανση.

- διατάξεις προστασίας από χαμηλή τάση

Συνήθως είναι μαγνητικές διατάξεις, οι οποίες όταν η τάση πέσει κάτω από κάποιο όριο, αποκόπτουν την τάση λειτουργίας και σταματούν τον κινητήρα.

- διατάξεις προστασίας από απώλεια πεδίου

Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης και παράλληλης διέγερσης. Περιλαμβάνουν ηλεκτρονόμους, που αποκόπτουν την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα όταν χαθεί η τάση διέγερσης του μαγνητικού πεδίου.

Σε περίπτωση ύπαρξης συστήματος οδήγησης, το πρόβλημα της προστασίας του κινητήρα απλοποιείται. Παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στη μηχανή, όπως τα υψηλά στιγμιαία ρεύματα, οι υπερτάσεις και υποτάσεις και η μηχανική υπερφόρτωση, μπορούν να ανιχνευθούν έγκαιρα από τις διατάξεις της οδήγησης και τότε η τελευταία διακόπτει την τροφοδοσία του κινητήρα.

### 3.1.7 Ταξινόμηση

Οι υπάρχοντες τύποι ηλεκτροκινητήρων είναι πάρα πολλοί και κατά συνέπεια υπάρχουν πολλά κριτήρια ταξινόμησής τους. Έτσι για να αποφεύγεται η σύγχυση που μπορεί να προκληθεί από το γεγονός ότι ένας ηλεκτροκινητήρας ανήκει σε πολλές διαφορετικές κατηγορίες, χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση κυρίως τα εξής δύο κριτήρια :

- Το είδος της κίνησης του δρομέα του κινητήρα.

Διαχωρίζει τους κινητήρες σε γραμμικούς (linear motors), όπου η κίνηση του δρομέα είναι γραμμική και περιστροφικούς, όπου η κίνηση είναι περιστροφική.

- Η τροφοδοσία του κινητήρα.

Με βάση αυτό το κριτήριο οι κινητήρες διακρίνονται σε συνεχούς ρεύματος (DC motors), που τροφοδοτούνται από συνεχές ρεύμα, σε εναλλασσόμενου ρεύματος (AC motors), που τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενο ρεύμα και σε βηματικούς κινητήρες (stepping motors, steppers) , όπου η τροφοδοσία είναι αποκλειστικά ηλεκτρονική.

Οι κατηγορίες ηλεκτροκινητήρων που προκύπτουν από την ταξινόμηση με βάση το δεύτερο κριτήριο, χωρίζονται σε διάφορες υποκατηγορίες. Έτσι οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς, ανάλογα με το αν η τροφοδοσία γίνεται από μία ή τρεις φάσεις και κινητήρες με ψήκτρες ή κινητήρες σειράς (universal motors). Οι μονοφασικοί και τριφασικοί κινητήρες χωρίζονται με τη σειρά τους στους επαγωγικούς ή ασύγχρονους (induction / asynchronous motors) και τους σύγχρονους κινητήρες (synchronous motors). Οι επαγωγικοί, ανάλογα με το είδος του δρομέα τους χαρακτηρίζονται ως κινητήρες με

δρομέα κλωβού (squirrel cage motors) ή κινητήρες με τυλιγμένους δρομείς (wound rotor motors).

Οι κινητήρες συνεχόμενου ρεύματος, κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες, με κριτήριο την ύπαρξη ή όχι ψηκτρών και συλλέκτη. Ένα άλλο κριτήριο ταξινόμησής τους είναι ο τρόπος με τον οποίο παράγεται το μαγνητικό πεδίο. Έτσι οι κινητήρες με ψήκτρες διακρίνονται σε κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη (permanent magnet motors) και κινητήρες με ηλεκτρομαγνήτη, ενώ οι χωρίς ψήκτρες σε κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη και κινητήρες διακοπτόμενης μαγνητικής αντιστάσεως (reluctance motors). Οι κινητήρες με ηλεκτρομαγνήτη διακρίνονται σε κινητήρες διέγερσης σειράς (series), παράλληλης διέγερσης (shunt), σύνθετης διέγερσης (compound) και ξένης διέγερσης (separately excited). Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, είναι κυρίως χαμηλής ισχύος και ανάλογα με κατασκευαστικές λεπτομέρειες του δρομέα χωρίζονται σε κινητήρες με δρομέα σιδήρου (iron rotor), χωρίς δρομέα σιδήρου και επίπεδους κινητήρες.

## 3.2 Σύγχρονοι κινητήρες

### 3.2.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι κατασκευαστικά όμοιοι με τις σύγχρονες γεννήτριες στρεφόμενου πεδίου. Μάλιστα οι τελευταίες μπορούν να λειτουργήσουν ως κινητήρες, αν συνδεθούν με μία τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι σύγχρονοι κινητήρες παράγονται σε διάφορες ισχείς που κυμαίνονται από μερικά Watt (W) για τους μονοφασικούς κινητήρες και φθάνουν μέχρι αρκετές εκατοντάδες Megawatt (MW) για γεννήτριες αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων.

Η ονομασία τους προκύπτει από το γεγονός ότι στρέφονται με μία ορισμένη ταχύτητα ανεξαρτήτως φορτίου, την σύγχρονη ταχύτητα, στην οποία θα αναφερθούμε εκτενέστερα παρακάτω. Το γεγονός αυτό, καθώς και η ευκολία με την οποία μπορούν να μεταβάλλουν το συντελεστή ισχύος τους  $\cos \phi$ , αποτελούν τα δύο κύρια πλεονεκτήματά τους έναντι κινητήρων άλλων τύπων. Παρ' όλα αυτά, είναι λιγότερο διαδεδομένοι σε σύγκριση με τους επαγωγικούς (ασύγχρονους) κινητήρες μιας και παρουσιάζουν κάποια σοβαρά μειονεκτήματα :

- έχουν αυξημένο κόστος
- για την λειτουργία τους είναι συχνά αναγκαία η ύπαρξη τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος
- δεν μπορούν να εκκινήσουν μόνοι τους

Επειδή στα αντλιοστάσια οι απαιτήσεις για ισχύ αρχίζουν από μερικές εκατοντάδες Watt και φθάνουν μέχρι μερικά MW, χρησιμοποιούνται τριφασικοί σύγχρονοι κινητήρες. Έτσι θα επικεντρωθούμε σε αυτή την υποκατηγορία σύγχρονων μηχανών.

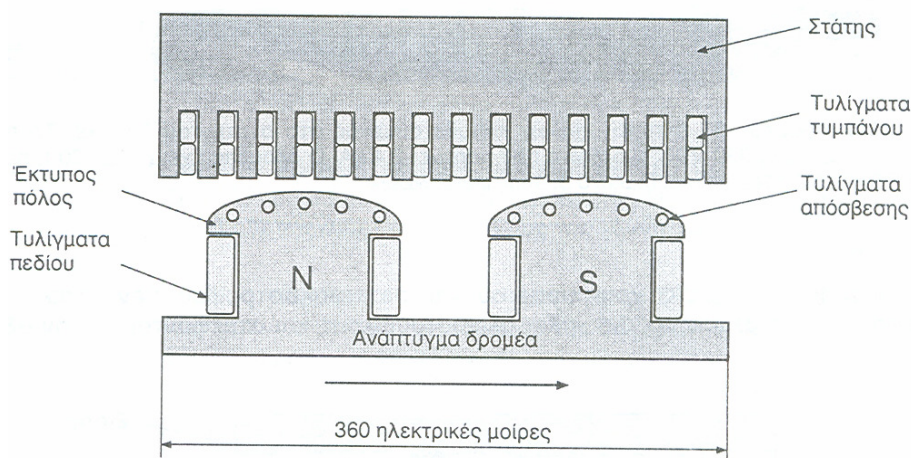
### 3.2.2 Κατασκευή

Ο στάτης σε αυτό το είδος κινητήρων, κατασκευάζεται από κυλινδρικό πυρήνα που αποτελείται από μονωμένα ελάσματα. Στα ελάσματα αυτά υπάρχουν αυλάκια όπου

τοποθετούνται τριφασικά τυλίγματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτά λέγονται φάσεις και αποτελούν το τύμπανο. Συνδέονται πάντοτε σε σύνδεση αστέρα, όπου τα τρία τυλίγματα απέχουν μεταξύ τους  $120^\circ$ , ενώ οι άκρες τους ενώνονται και σχηματίζουν τον ουδέτερο αγωγό.

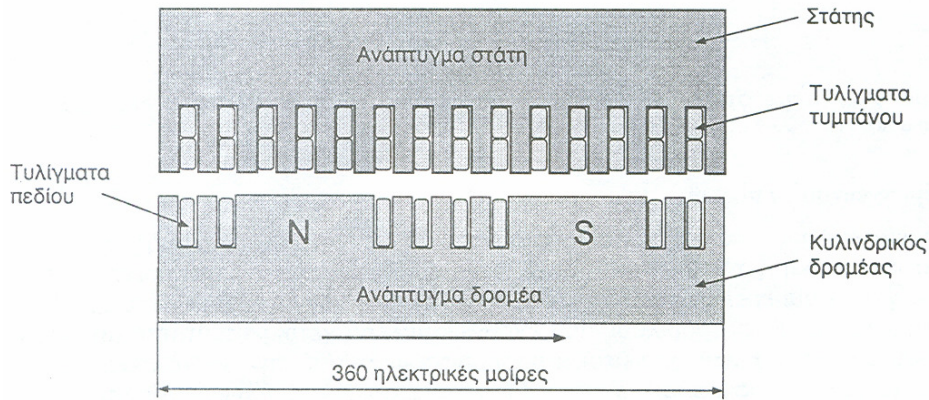
Ο δρομέας μπορεί να έχει έκτυπους πόλους (salient pole) ή να είναι κυλινδρικής μορφής χωρίς έκτυπους πόλους (cylindrical rotor, nonsalient pole). Οι δρομείς έκτυπων πόλων έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές και μέσες ταχύτητες περιστροφής ( $< 1000rpm$ ), καθώς εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση ανεμισμού και μειωμένη αντοχή σε μεγάλες φυγόκεντρες δυνάμεις. Χαρακτηρίζονται από μεγάλο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα, το οποίο όμως δεν είναι σταθερό, αλλά μειώνεται περιοδικά από εξογκώματα, που καλούνται έκτυποι πόλοι και φέρουν τα τυλίγματα του πεδίου. Συνήθως τα τυλίγματα αυτά είναι ορθογωνικής διατομής, διαμόρφωση που ευνοεί την ψύξη τους, και κατασκευάζονται από χαλκό. Σε αρκετές περιπτώσεις, στην κεφαλή των πόλων υπάρχουν αγωγοί σε σύνδεση κλωβού που καλούνται τυλίγματα απόσβεσης (damping ή amortisseur windings) και των οποίων η λειτουργία θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Υπάρχουν δύο ήδη έκτυπων πόλων οι συμπαγείς (salient solid pole) και οι πόλοι από ελάσματα (salient laminated pole). Οι δρομείς με έκτυπους πόλους από ελάσματα, αποτελούν κατά κάποιο τρόπο μία ενδιάμεση κατηγορία μεταξύ των δρομέων συμπαγών έκτυπων πόλων και των κυλινδρικών δρομέων.



Εικόνα 3.2 Τμήμα στάτη και δρομέα 3Φ σύγχρονης μηχανής με δρομέα έκτυπων πόλων

Οι κυλινδρικοί δρομείς χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου εμπλέκονται υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Έχουν τις περισσότερες φορές 2-4 πόλους. Κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα και φέρουν αύλακες στους οποίους τοποθετούνται τυλίγματα ορθογωνικής διατομής από χαλκό. Για τη συγκράτηση των τυλιγμάτων χρησιμοποιούνται δακτύλιοι υψηλής αντοχής. Η διάμετρος των δρομέων αυτών περιορίζεται από την αντοχή των υλικών κατασκευής στις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται, και είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το μήκος τους, δίνοντάς τους ένα επίμηκες σχήμα. Επίσης και αυτοί μπορεί να φέρουν τυλίγματα απόσβεσης κατανεμημένα στην περιφέρειά τους.



Εικόνα 3.3 Τμήμα στάτη και δρομέα 3Φ σύγχρονης μηχανής με κυλινδρικό δρομέα

Στους σύγχρονους κινητήρες, οι αγωγοί του δρομέα διαρρέονται από συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο προέρχεται από κάποια εξωτερική πηγή. Για παράδειγμα στους σύγχρονους κινητήρες χωρίς ψήκτες (brushless synchronous motors), υπάρχει μία μικρή σύγχρονη γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με τον κινητήρα, και η οποία παρέχει σταθερή τάση με την παρεμβολή ανορθωτών. Στους κινητήρες με δακτυλίου ολίσθησης και ψήκτες το συνεχές ρεύμα παράγεται από μία μικρή γεννήτρια συνεχούς ρεύματος και μέσω των προαναφερθέντων εξαρτημάτων διοχετεύεται στα τυλίγματα του πεδίου. Υπάρχουν όμως και σύγχρονοι κινητήρες στους οποίους οι δρομείς αντί τυλιγμάτων φέρουν μόνιμους μαγνήτες (permanent magnet synchronous motors), και άρα δεν έχουν ανάγκη για κάποια εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος.

Τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας φέρουν τον ίδιο αριθμό μαγνητικών πόλων  $P$ , ο οποίος είναι πάντα άρτιος. Ανάλογα με τον αριθμό αυτό και τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας του κινητήρα  $f$ , καθορίζεται η σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ , σύμφωνα με τη σχέση :

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (3.8)$$

Η ταχύτητα αυτή είναι η ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και αυτή στην οποία λειτουργεί αποκλειστικά ο σύγχρονος κινητήρας. Με βάση τον ορισμό της σύγχρονης ταχύτητας καθορίζεται η σχέση που συνδέει την μηχανική ταχύτητα περιστροφής και τη κυκλική συχνότητα του ρεύματος :

$$\omega_{MHX} = \omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = 2\pi f \frac{2}{P} = \omega_{ΗΛ} \frac{2}{P} \quad (3.9)$$

### 3.2.3 Αρχές λειτουργίας

Η παραγωγή ροπής γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Τα τυλίγματα του στάτη διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα και σύμφωνα με το νόμο του Ampere δημιουργούν γύρω τους ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο δρομέας φέρει το σταθερό πεδίο, το οποίο οφείλεται είτε στους μόνιμους μαγνήτες του είτε στο συνεχές ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματά του οπότε και αυτά δρουν σαν ηλεκτρομαγνήτες. Το πεδίο αυτό μπορεί να παρασυρθεί από το μαγνητικό πεδίο του στάτη όταν οι πόλοι

του δρομέα βρίσκονται σχεδόν απέναντι από αντίθετους μαγνητικούς πόλους του στάτη. Έτσι εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των δύο πεδίων, αναπτύσσεται ροπή που προκαλεί την περιστροφή του δρομέα με την σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου. Η ροπή αυτή δίνεται από τη σχέση :

$$T = k \cdot \vec{B}_R \times \vec{B}_S = k \cdot \vec{B}_R \times \vec{B}_{NET} \quad (3.10)$$

, όπου  $\vec{B}_R$  η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του δρομέα,  $\vec{B}_S$  η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη και  $\vec{B}_{NET} = \vec{B}_R + \vec{B}_S$  το διανυσματικό άθροισμα των επαγωγών αυτών. Έτσι με τον τρόπο αυτό περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα και η άτρακτος του κινητήρα, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής αυτής.

Η μεταβλητότητα του μαγνητικού πεδίου του στάτη οφείλεται στη φύση του εναλλασσόμενου ρεύματος που το προκαλεί και σύμφωνα με τον νόμο του Faraday προκαλεί την εμφάνιση αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ)  $E_a$  που αντιτίθεται στην περιστροφή του δρομέα και δίνεται από τη σχέση :

$$E_a = K\Phi f \quad (3.11)$$

, όπου  $K$  ένας συντελεστής που εξαρτάται από κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και  $\Phi$  η μέση μαγνητική ροή ανά πόλο, η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης του δρομέα.

Όταν εμφανιστεί ένα μηχανικό φορτίο στην άτρακτο της μηχανής, οι πόλοι του δρομέα εμφανίζουν μία απόκλιση σε σχέση με τους πόλους του στάτη κατά μία μηχανική γωνία  $a$ , που δίνεται από τη σχέση :

$$a = \frac{2}{P} \delta \quad (3.12)$$

, όπου  $P$  ο αριθμός των μαγνητικών πόλων και  $\delta$  η ηλεκτρική γωνία απόκλισης του πεδίου του δρομέα από το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο. Δηλαδή είναι η γωνία μεταξύ των διανυσματικών μεγεθών  $\vec{B}_R$ ,  $\vec{B}_{NET}$  και καλείται γωνία ροπής.

Παρά όμως την εμφάνιση αυτής της μηχανικής απόκλισης ο δρομέας, άρα και η άτρακτος του κινητήρα, συνεχίζει να στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, ουσιαστικά «κυνηγώντας» το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Όσο το φορτίο αυξάνεται, αυξάνονται και οι γωνίες  $a$  και  $\delta$ , χωρίς όμως να μεταβάλλεται η ταχύτητα του δρομέα. Αυτό μπορεί να συνεχιστεί μέχρι ενός ορίου, που αντιστοιχεί στη ροπή αποσυγχρονισμού ή ανατροπής (pull-out torque). Στην περίπτωση αυτή, η απομάκρυνση μεταξύ πόλων δρομέα και στάτη είναι τέτοια, που προκαλεί το «ξεκλείδωμα» του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα και τελικά τη διακοπή της περιστροφής του. Επειδή το απότομο αυτό σταμάτημα μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές στο ηλεκτρικό δίκτυο, ο κινητήρας αποσυνδέεται αυτόματα από την τροφοδοσία του.

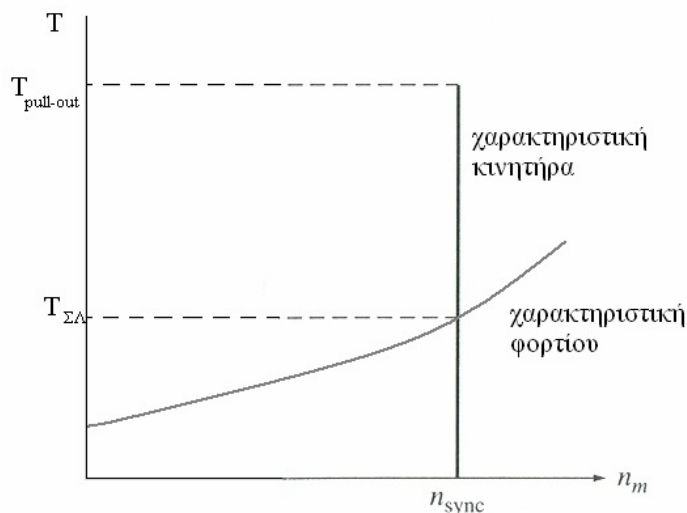
Πέρα από τη ροπή ανατροπής, υπάρχει και μία άλλη χαρακτηριστική τιμή της ροπής, η ροπή συγχρονισμού (pull-in torque). Όπως έχει αναφερθεί, ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των σύγχρονων κινητήρων είναι το γεγονός ότι δεν μπορούν να εκκινήσουν μόνοι τους. Έτσι για το ξεκίνημά τους έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, από τις οποίες οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι η εκκίνηση με μεταβολή της συχνότητας του ρεύματος τροφοδοσίας του στάτη, η εκκίνηση με τη βοήθεια των τυλιγμάτων κλωβού που φέρει ο δρομέας και η εκκίνηση από κάποια εξωτερική συσκευή. Σε περίπτωση εκκίνησης με τις δύο τελευταίες μεθόδους, και

αφού ο δρομέας έχει αρχίσει να κινείται και να επιταχύνεται, σε κάποια χρονική στιγμή κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής είναι κοντά στην σύγχρονη ( $92 \div 97\% \cdot n_s$ ) και οι πόλοι του δρομέα βρίσκονται απέναντι από αντίθετους μαγνητικούς πόλους του στάτη (N-S ή S-N), διαρρέονται τα τυλίγματα του πρώτου από συνεχές ρεύμα. Αυτό προκαλεί την εμφάνιση μιας ροπής υψηλής τιμής, που ωθεί το πεδίο του δρομέα να συγχρονιστεί με την ταχύτητα του πεδίου του στάτη και άρα έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή του ίδιου του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα. Παράλληλα για λόγους που θα εξηγηθούν στο επόμενο κεφάλαιο, μηδενίζεται η ροπή επαγωγικού τύπου. Η μέγιστη σταθερή ροπή φορτίου με την οποία μπορεί ο κινητήρας να συγχρονιστεί εργαζόμενος στην ονομαστική τάση, ρεύμα τροφοδοσίας και συχνότητά του, ονομάζεται ροπή συγχρονισμού.

Η επιλογή της στιγμής διέγερσης του δρομέα με συνεχές ρεύμα και μετάβασης στη σύγχρονη λειτουργία είναι πολύ σημαντική. Αν γίνει λανθασμένα, μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ροπής πέδησης που εμποδίζει την επιτάχυνση της μηχανής. Επιπλέον πιθανό αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη ταλαντώσεων που θα προκαλέσουν βίαιο μηχανικό πλήγμα. Για το λόγο αυτό, τις περισσότερες φορές γίνεται αυτόματα από την οδήγηση του κινητήρα.

### 3.2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες

Η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών των σύγχρονων κινητήρων έχει τελείως διαφορετική μορφή σε σχέση με τα άλλα είδη ηλεκτροκινητήρων. Συγκεκριμένα είναι ένα ευθύγραμμο τμήμα που άγεται από τον άξονα των στροφών για την τιμή της σύγχρονης ταχύτητας. Το άνω όριό του καθορίζεται από την ροπή ανατροπής. Έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για σταθερή τάση τροφοδοσίας, η ροπή που αναπτύσσει ένας σύγχρονος κινητήρας είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής.



Εικόνα 3.4 Χαρακτηριστική καμπύλη σύγχρονου κινητήρα

Αντίθετα εμφανίζει εξάρτηση από την τιμή της γωνίας ροπής  $\delta$ , που για τους κινητήρες κυλινδρικών δρομέων αποτυπώνεται από τη σχέση :

$$T = T_{MAX} \sin \delta = (k \cdot \vec{B}_R \cdot \vec{B}_{NET}) \cdot \sin \delta = \frac{3V_a E_a}{X_a \omega_{MHX}} \sin \delta \quad (3.13)$$

, όπου  $T_{MAX}$  η μέγιστη ροπή που μπορεί να αναπτυχθεί από τη μηχανή, δηλαδή η ροπή ανατροπής,  $V_a$  και  $I_a$  το μέτρο της τάσης και της έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας του στάτη ανά φάση αντίστοιχα και  $X_a$  η αντίδραση ανά φάση. Εξαιτίας της ημιτονοειδούς της εξάρτησης από τη γωνία ροπής, η παραγόμενη ροπή έχει θετική τιμή όταν η γωνία έχει τιμή μεταξύ 0 και 180 μοιρών, παρουσιάζει μέγιστο για  $\delta = 90^\circ$  και έχει μηδενική τιμή στα άκρα του διαστήματος αυτού ( $\delta = 0^\circ$  και  $\delta = 180^\circ$ ). Επειδή η μέγιστη ροπή είναι η ροπή ανατροπής, καταλαβαίνουμε ότι η λειτουργία της μηχανής είναι ευσταθής μόνο στην περιοχή  $0^\circ - 90^\circ$ . Όταν η τιμή της γωνίας ροπής βρίσκεται στην περιοχή  $90^\circ - 180^\circ$ , μία περαιτέρω αύξηση στην τιμή του φορτίου θα οδηγήσει στον αποσυγχρονισμό του δρομέα και το σταμάτημα της μηχανής. Όταν η γωνία πάρει αρνητικές τιμές ( $\delta < 0^\circ$ ), η ροπή έχει αντίθετη φορά από την ταχύτητα περιστροφής ( $T < 0$ ) και ο κινητήρας εργάζεται πλέον ως γεννήτρια. Αυτό αποτυπώνεται και στην χαρακτηριστική ( $T, n$ ) με ένα ευθύγραμμο τμήμα συμμετρικό με το προαναφερθέν ως προς τον άξονα των στροφών.

Η ισχύς που απορροφά η μηχανή δίνεται από τη σχέση :

$$P_{3\phi} = 3V_a I_a \cos \phi = \frac{3V_a E_a}{X_a} \sin \delta \quad (3.14)$$

, όπου  $\cos \phi$  ο συντελεστής ισχύος. Παρατηρούμε ότι η ισχύς παρουσιάζει συμπεριφορά ανάλογη με αυτήν της ροπής σε σχέση με τη γωνία ροπής  $\delta$ . Το ρεύμα που απορροφάται από την εναλλασσόμενη τροφοδοσία είναι ανάλογο της ροπής που απαιτείται να παραχθεί και παίρνει μέγιστη τιμή για γωνία  $\delta = 90^\circ$ .

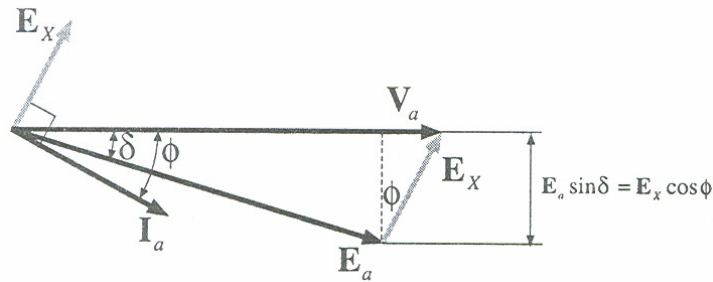
Η απορροφώμενη ισχύς μαζί με την άεργο ισχύ  $Q$  που ταλαντώνεται μεταξύ τροφοδοσίας και κινητήρα και δεν καταναλώνεται από αυτόν, καθορίζουν τη φαινόμενη ισχύ  $S$  σύμφωνα με τη σχέση :

$$S_{3\phi} = \sqrt{Q_{3\phi}^2 + P_{3\phi}^2} = 3V_a I_a \quad (3.15)$$

, όπου  $Q$  σε VAR,  $S$  και  $P$  σε VA (Watt).

Στην περίπτωση όπου ο δρομέας έχει έκτυπους πόλους, το ιδιαίτερο σχήμα του σε συνδυασμό με την ανάγκη μείωσης της μαγνητικής αντίστασης, επηρεάζει την κατεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου του στάτη  $\vec{B}_s$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τόσο η ροπή όσο και η απορροφώμενη ισχύς, να αναλύονται σε δύο συνιστώσες. Από αυτές η μία εμφανίζει εξάρτηση από τον όρο  $\sin \delta$  και είναι όμοια με αυτή των κυλινδρικών δρομέων, ενώ η άλλη συνιστώσα δείχνει την επίδραση της μαγνητικής αντίστασης και εμφανίζει εξάρτηση από τον όρο  $\sin 2\delta$ .

Για την καλύτερη κατανόηση των μεγεθών που επηρεάζονται στην εξίσωση 3.14 παρατίθεται το κάτωθι σχήμα :



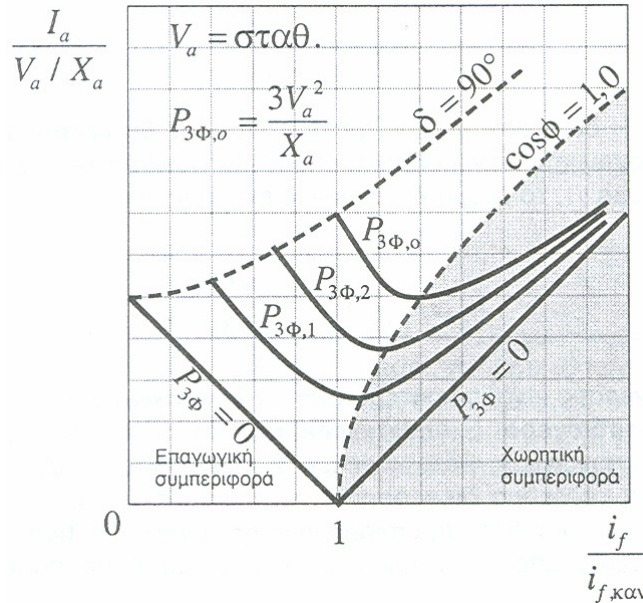
Εικόνα 3.5 Διανυσματικό διάγραμμα φασιδεικτών σύγχρονου κινητήρα (με  $E_x$  παρίσταται η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίδραση του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής)

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων κινητήρων, είναι η δυνατότητα ρύθμισης της τιμής του συντελεστή ισχύος με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης. Από όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα συνάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι η μεταβολή του  $\cos \phi$  θα έχει επίπτωση τόσο στην ΑΗΕΔ όσο και στο ρεύμα του στάτη. Στην περίπτωση κατά την οποία η απορροφόμενη πραγματική ισχύς είναι σταθερή, το φορτίο παραμένει αμετάβλητο, ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος στο ηλεκτρικό δίκτυο άρα η συχνότητα του ρεύματος του στάτη είναι σταθερή, και το ρεύμα διέγερσης λάβει τιμή τέτοια ώστε το ρεύμα του στάτη να είναι ελάχιστο, έχουμε κανονική διέγερση (normal excitation). Στην κατάσταση αυτή λειτουργίας ο συντελεστής ισχύος έχει τη μέγιστη τιμή ( $\cos \phi = 1$ ), η άεργος ισχύς είναι μηδενική ( $Q_{3\phi} = 0$ ) και η φαινόμενη ισχύς ισούται με την πραγματική ( $S_{3\phi} = P_{3\phi}$ ).

Εάν το ρεύμα διέγερσης είναι μεγαλύτερο από αυτό της κανονικής διέγερσης ( $i_f > i_{f,KAN}$ ), ο κινητήρας βρίσκεται σε κατάσταση υπερδιέγερσης, ο συντελεστής ισχύος είναι μικρότερος της μονάδας και το  $I_a$  προπορεύεται της  $V_a$ . Η συμπεριφορά αυτή καλείται χωρητική, καθώς ο κινητήρας απορροφά πραγματική ισχύ από το δίκτυο και αποδίδει σε αυτό άεργη ισχύ. Σε αντίθετη περίπτωση ( $i_f < i_{f,KAN}$ ), ο κινητήρας βρίσκεται σε κατάσταση υποδιέγερσης, ο συντελεστής ισχύος είναι μικρότερος της μονάδας και το  $I_a$  υπολείπεται της  $V_a$ . Η συμπεριφορά αυτή καλείται επαγωγική, καθώς ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο τόσο πραγματική όσο και άεργη ισχύ.

Έτσι δημιουργείται μία σχέση εξάρτησης του ρεύματος του στάτη  $I_a$  με το ρεύμα διέγερσης  $i_f$ , η οποία γραφικά παίρνει τη μορφή καμπύλης σχήματος V. Για κάθε κινητήρα διατίθενται μια σειρά από καμπύλες με παράμετρο την τιμή της απορροφόμενης πραγματικής ισχύος που ονομάζονται καμπύλες V (V-curves). Λόγω της σταθερής τάσης τροφοδοσίας, οι καμπύλες αυτές δείχνουν και την φαινόμενη ισχύ που απορροφά η μηχανή. Όλα τα σημεία καμπής των καμπυλών αυτών βρίσκονται σε μία καμπύλη που αντιστοιχεί σε καταστάσεις κανονικής διέγερσης. Για περίπτωση υποδιέγερσης η μεταβολή του  $I_a$  είναι αντίστροφη αυτής του  $i_f$ , ενώ για περίπτωση υπερδιέγερσης ανάλογη. Για μηδενική πραγματική ισχύ η καμπύλη είναι γραμμική, και ο κινητήρας απορροφά μόνο άεργη ισχύ. Στην περιοχή επαγωγικής συμπεριφοράς όλες οι καμπύλες V φράσσονται από την καμπύλη που δίνει τη μέγιστη τιμή του ρεύματος του στάτη ( $\delta = 90^\circ$ ).





Εικόνα 3.6 Καμπύλες V σύγχρονου κινητήρα

Στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις τα περισσότερα συστήματα κίνησης παρουσιάζουν επαγωγική συμπεριφορά. Για την αντιστάθμιση του γεγονότος αυτού και τη βελτίωση του γενικότερου συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης, οι όποιοι σύγχρονοι κινητήρες υπάρχουν, επιλέγεται να εργάζονται σε κατάσταση υπερδιέγερσης, δηλαδή να παρουσιάζουν χωρητική συμπεριφορά. Πολλές φορές εγκαθίστανται σύγχρονοι κινητήρες που δεν κινούν κάποιο φορτίο και άρα στερούνται άτρακτου, αποκλειστικά για την εκμετάλλευση της παραπάνω δυνατότητας. Αυτές οι μηχανές ονομάζονται σύγχρονοι πυκνωτές (synchronous capacitors), απορροφούν μηδενική πραγματική ισχύ ( $P_{3\phi} = 0$ ) και έχουν μηδενικό συντελεστή ισχύος ( $\cos \phi = 0$ ).

### 3.2.5 Βαθμός απόδοσης & ονομαστικά μεγέθη

Στους σύγχρονους κινητήρες, όπου η εισερχόμενη ισχύς περιλαμβάνει τόσο την ηλεκτρική ισχύ του εναλλασσόμενου ρεύματος του στάτη  $p_{\text{ΗΛ}}$  όσο και την ηλεκτρική ισχύ του ρεύματος του δρομέα  $p_f$ , ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως :

$$\eta_K = \frac{P_{\text{ΜΗΧ}}}{P_{\text{ΗΛ}} + p_f} = \frac{T_{\text{ΜΗΧ}} \omega_{\text{ΜΗΧ}}}{3V_a I_a \cos \phi + p_f} \quad (3.16)$$

, όπου  $P_{\text{ΜΗΧ}}$  η μηχανική ισχύς,  $T_{\text{ΜΗΧ}}$  η μηχανική ροπή στην άτρακτο του κινητήρα,  $\omega_{\text{ΜΗΧ}}$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0,85 και 0,97. Οι διάφορες απώλειες ισχύος, επιμερίζονται κυρίως στις ωμικές απώλειες του στάτη και του δρομέα, στις απώλειες πυρήνα επίσης στάτη και δρομέα και στις μηχανικές απώλειες ανεμισμού και εδράνων. Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται για την διέγερση του δρομέα γεννήτρια προσαρμοσμένη στην ίδια άτρακτο με τον κινητήρα, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και οι συνολικές απώλειες αυτής.

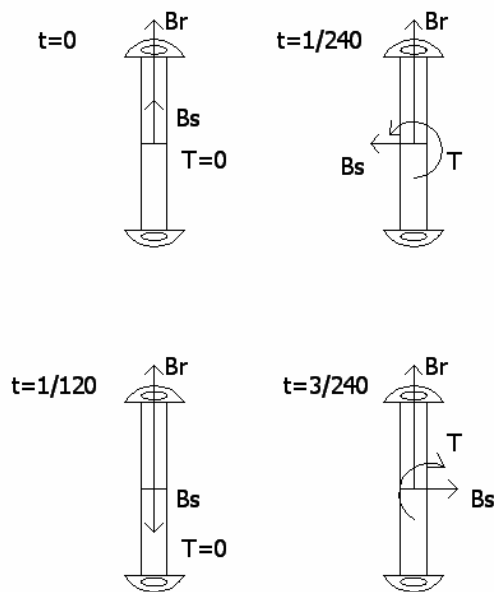
Με τον όρο ονομαστική τάση  $V_N$ , χαρακτηρίζεται η τάση στην οποία συνδέεται ο κινητήρας. Μεταξύ αυτής και της απορροφούμενης ισχύος ισχύει η σχέση :

$$P_{3\Phi} = \sqrt{3}V_N I_a \cos \phi \quad (3.17)$$

Η ονομαστική συχνότητα  $f_N$  είναι η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας του στάτη και σε περίπτωση που η μηχανή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο στην Ευρώπη έχουμε  $f_N = 50\text{Hz}$ . Ονομαστική ισχύς  $P_N$  καλείται η μηχανική ισχύς στην άτρακτο του κινητήρα όταν εργάζεται υπό συνθήκες ονομαστικής συχνότητας και ονομαστικής τάσης. Το σημείο λειτουργίας που καθορίζεται από τα παραπάνω στοιχεία, ονομάζεται ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής ισχύος  $\cos \phi_N$  έχει τιμή 1 για συνήθη λειτουργία, ή 0,8 χωρητικός για λειτουργία παραγωγής άεργης ισχύος. Αυτή έχει μέγιστη τιμή ίση με τα 3/4 της ονομαστικής ισχύος ( $Q_{3\Phi,N-MAX} = 0,75P_{3\Phi,N}$ ), ωστόσο οι κινητήρες αυτοί έχουν μεγαλύτερο όγκο και άρα υψηλότερο κόστος κατασκευής συγκριτικά με αυτούς που έχουν  $\cos \phi_N = 1$ . Τέλος το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης  $i_{f,N}$  προκύπτει από τις καμπύλες  $V$  του κινητήρα.

### 3.2.6 Εκκίνηση σύγχρονων κινητήρων

Ο λόγος για τον οποίο οι σύγχρονοι κινητήρες αδυνατούν να εκκινήσουν μόνοι τους φαίνεται παρακάτω. Έστω ένας δρομέας με δύο έκτυπους πόλους, που τη χρονική στιγμή  $t = 0$  είναι ακίνητος (εικόνα 3.7). Όταν διαρρεύσει τα τυλίγματα του στάτη εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 60Hz, δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο  $B_s$ , ενώ το πεδίο του δρομέα  $B_r$  είναι ακίνητο. Από τη εξίσωση 3.10 συμπεραίνουμε ότι δεν αναπτύσσεται ροπή. Τη χρονική στιγμή  $t = 1/240\text{sec}$ , το πεδίο του στάτη έχει περιστραφεί κατά  $90^\circ$ , ενώ ο δρομέας και το πεδίο του έχουν μείνει ακίνητα. Στην περίπτωση αυτή η γωνία μεταξύ  $B_s$  και  $B_r$  είναι τέτοια ώστε να αναπτύσσεται ροπή με φορά ανθρωλογιακή. Για  $t = 1/120\text{sec}$ , λόγω του πολύ μικρού χρονικού διαστήματος, ο δρομέας έχει παραμείνει πρακτικά ακίνητος και η ροπή είναι πάλι μηδενική. Για  $t = 3/240\text{sec}$ , η φορά της μαγνητικής επαγωγής του στάτη έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ροπής ωρολογιακής φοράς. Τέλος τη στιγμή  $t = 1/60\text{sec}$ , δηλαδή όταν έχουμε έναν πλήρη ηλεκτρικό κύκλο, πάλι η ροπή είναι μηδενική. Αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας είναι η μηδενική συνιστάμενη ροπή κατά τη διάρκεια του κύκλου, η ανάπτυξη δονήσεων και η υπερθέρμανση της μηχανής.



Εικόνα 3.7

Μία από τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους εκκίνησης είναι η χρήση των τυλιγμάτων κλωβού. Αυτή είναι όμοια με τη διαδικασία εκκίνησης των επαγωγικών κινητήρων, μπορεί γίνει είτε με πλήρη είτε με μειωμένη τάση τροφοδοσίας και αναλύεται στην αντίστοιχη παράγραφο. Κατά τη διάρκειά της, τα τυλίγματα του δρομέα δεν διαρρέονται από ρεύμα και συχνά για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλής τάσης σε αυτά, βραχυκυκλώνονται με μία αντίσταση.

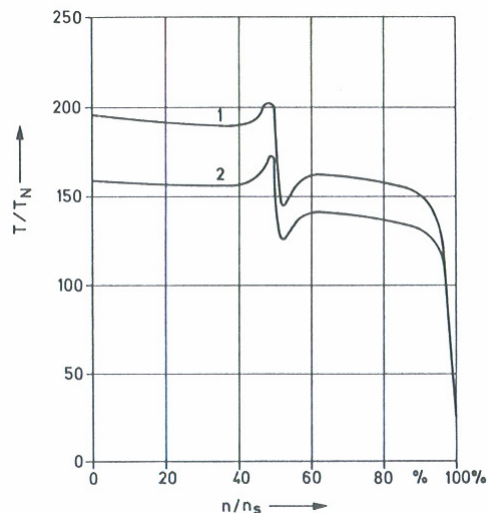
Η ολική ροπή  $T_m$  που αναπτύσσεται κατά την ασύγχρονη εκκίνηση, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το άθροισμα δύο συνισταμένων, δηλαδή ισχύει :

$$T_m = T_a + T_p \cdot \cos(2sf) \quad (3.18)$$

, όπου  $T_a$  η ροπή που αναλογεί στην ροπή εκκίνησης των επαγωγικών κινητήρων,  $T_p$  μία παλμική ροπή που οφείλεται στο ιδιαίτερο σχήμα του δρομέα των σύγχρονων κινητήρων (ο δρομέας στους επαγωγικούς κινητήρες είναι κυλινδρικός) και  $s$  η ολίσθηση, ένα μέγεθος που θα εξηγηθεί στην επόμενη ενότητα.

Οι κινητήρες δρομέων συμπαγών έκτυπων πόλων παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή των  $T_a$  και  $T_p$  σε σχέσεις με αυτούς με κυλινδρικό δρομέα, ενώ οι μηχανές με δρομέα πόλων από ελάσματα εμφανίζουν ενδιάμεσες τιμές.

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η μορφή της καμπύλης μεταβολής της ροπής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής, να διαφέρει τόσο μεταξύ επαγωγικών και σύγχρονων κινητήρων, όσο και μεταξύ σύγχρονων κινητήρων με διαφορετικό δρομέα. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι η εμφάνιση «σαμαριού» (διαδοχικά άνοδος, απότομη πτώση και άνοδος) για ταχύτητα περιστροφής  $n \approx 50\% \cdot n_s$ . Στους κινητήρες δρομέων με έκτυπους πόλους η αλλαγή αυτή οφείλεται τόσο σε μείωση της τιμής της  $T_a$  λόγω μαγνητικής και ηλεκτρικής ασυμμετρίας όσο και σε αλλαγή της φοράς της  $T_p$ , ενώ στους κυλινδρικούς δρομείς οφείλεται μόνο στο δεύτερο παράγοντα. Έτσι είναι πιο έντονη στους πρώτους και λιγότερο εμφανής στους δεύτερους.



Εικόνα 3.8 Χαρακτηριστική καμπύλη ασύγχρονης εκκίνησης κινητήρα με συμπαγής έκτυπους πόλους με 1)  $\cos\phi = 1$  2)  $\cos\phi = 0,8$

Το ρεύμα εκκίνησης στους σύγχρονους κινητήρες είναι μικρότερο συγκριτικά με τους ασύγχρονους κινητήρες με δρομέα κλωβού κατά ένα λόγο 1:1,75.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι τα τυλίγματα απόσβεσης, εφ' όσον υπάρχουν, συμβάλλουν και στην σταθερή λειτουργία του κινητήρα. Στο μόνιμο σημείο λειτουργίας, δεν αναπτύσσεται τάση στα τυλίγματα αυτά. Όταν, όμως η μηχανή επιταχυνθεί ή επιβραδυνθεί για κάποιο λόγο, θα έχουμε σχετική κίνηση μεταξύ των πεδίων στάτη και δρομέα. Λόγω αυτής, σύμφωνα με το νόμο του Faraday, θα αναπτυχθεί στα τυλίγματα απόσβεσης τάση που θα τείνει να εξουδετερώσει τη μεταβολή που την προκάλεσε. Έτσι θα εμφανιστεί στα τυλίγματα ρεύμα και εξαιτίας αυτού μαγνητικό πεδίο και ροπή, η οποία θα επιβραδύνει ή θα επιταχύνει το δρομέα, ώστε να αποκατασταθεί η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Από την εξομαλυντική τους αυτή λειτουργία, προέρχεται και το όνομα των τυλιγμάτων απόσβεσης, τα οποία συναντάμε πολύ συχνά στις σύγχρονες γεννήτριες, καθώς εκεί υπάρχει η απαίτηση για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Μία άλλη μέθοδος εκκίνησης συνίσταται στην ύπαρξη κάποιου εξωτερικού κινητήρα, ο οποίος συνδέεται στην άτρακτο του σύγχρονου, τον ξεκινά και τον επιταχύνει μέχρι κάποια ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης. Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής, ο σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί σαν σύγχρονη γεννήτρια, αποδίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα στο δίκτυο. Στη συνέχεια ο εξωτερικός κινητήρας αποσυνδέεται από την άτρακτο του σύγχρονου και όπως είναι αναμενόμενο, ο τελευταίος αρχίζει να επιβραδύνεται και να πλησιάζει τη σύγχρονη ταχύτητα. Η επιβράδυνση αυτή του δρομέα και του πεδίου του σε σχέση με το πεδίο του στάτη, έχει ως αποτέλεσμα η ροπή που μέχρι τώρα ήταν ανθιστάμενη στην κίνηση να αλλάξει φορά και επομένως η μηχανή να λειτουργεί πλέον σαν ένας κινητήρας. Παράλληλα τροφοδοτείται ο δρομέας με συνεχές ρεύμα και έτσι επιτυγχάνεται η περιστροφή του κινητήρα με τη σύγχρονη ταχύτητα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανάγκη εκκίνησης απουσίας φορτίου, αφού σε διαφορετική περίπτωση ο εξωτερικός κινητήρας θα έπρεπε να είναι ισχύος μεγαλύτερης αυτής του κινητήρα που καλείται να εκκινήσει.

Τέλος μία τρίτη τεχνική εκκίνησης που κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος είναι η χρήση οδήγησης μεταβλητής συχνότητας. Περισσότερα για τη μέθοδο αυτή θα πούμε στην παράγραφο 3.4.3.

### 3.2.7 Βιομηχανικός έλεγχος

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των σύγχρονων κινητήρων είναι ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για το σταμάτημά τους από τη στιγμή που θα αποσυνδεθούν από την τροφοδοσία τους. Μάλιστα για κινητήρες μεγάλης ισχύος μπορεί να φθάσει ακόμα και τις αρκετές ώρες και οφείλεται στη μεγάλη ροπή αδρανείας του δρομέα και του φορτίου τους. Έτσι έχουν αναπτυχθεί κάποιες μέθοδοι που συμβάλλουν στην ταχύτερη πέδηση των μηχανών αυτών. Αυτές είναι :

- Χρήση μηχανικής πέδης στην άτρακτο ρου κινητήρα
- Βραχυκύκλωμα των τυλιγμάτων του στάτη με παράλληλη διατήρηση της διέγερσης του δρομέα
- Σύνδεση των ακροδεκτών των τυλιγμάτων του στάτη με αντιστάσεις με παράλληλη διατήρηση της διέγερσης του δρομέα

Πέρα από τις συνήθεις περιπτώσεις υπερθέρμανσης, βραχυκυκλώματος και συνεχούς μηχανικής υπερφόρτωσης, για τις οποίες λαμβάνεται μέριμνα για την προστασία όλων των ηλεκτροκινητήρων με χρήση κατάλληλων διατάξεων, στους σύγχρονους κινητήρες υπάρχουν και άλλες δύο περιπτώσεις που χρήζουν προσοχής. Αυτές είναι :

- Απώλεια μιας φάσης της τροφοδοσίας. Εφ' όσον παρατηρηθεί, είναι αναγκαία η διακοπή της τροφοδοσίας και άρα της λειτουργίας του κινητήρα, αφού μπορεί να προκληθεί σοβαρή μηχανική δυσλειτουργία.
- Αντιστροφή αλληλουχίας φάσεων τροφοδοσίας. Και στην περίπτωση αυτή διακόπτεται η τροφοδοσία της μηχανής, ώστε να αποφευχθεί η αντιστροφή της φοράς περιστροφής της.

Λόγω της καθαρά ηλεκτρολογικής φύσεως των δύο παραπάνω περιπτώσεων, κρίνεται απαραίτητη η ανίχνευση και η αντιμετώπισή τους μέσω κατάλληλης ρύθμισης της οδήγησης του κινητήρα.

## 3.3 Επαγωγικοί (ασύγχρονοι) τριφασικοί κινητήρες

### 3.3.1 Εισαγωγή

Οι επαγωγικοί ή ασύγχρονοι κινητήρες, είναι οι πλέον διαδεδομένοι στη βιομηχανία, καθώς παρουσιάζουν απλότητα και οικονομία κατασκευής, αξιοπιστία και ευκολία στη συντήρηση. Οι μονοφασικοί (1Φ) επαγωγικοί κινητήρες παράγονται σε χαμηλές ισχείς σε αντίθεση που τριφασικούς (3Φ) που μπορεί να έχουν ισχύ ως και μερικά Megawatt (MW). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή που μας ενδιαφέρει, δηλαδή τα αντλιοστάσια, χρησιμοποιούνται κατά κόρον οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες, εκτός και αν δεν υπάρχει διαθέσιμη τριφασική τροφοδοσία. Για το λόγο αυτό θα αναλύσουμε τα διάφορα χαρακτηριστικά τους, χωρίς να επεκταθούμε στους μονοφασικούς επαγωγικούς κινητήρες.

### 3.3.2 Κατασκευή

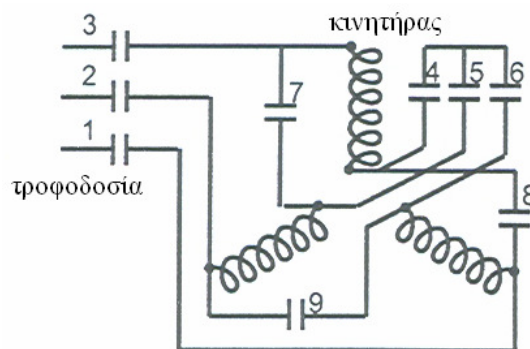
Στους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες ο ακίνητος στάτης έχει κυλινδρική μορφή και κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων. Στην εσωτερική του επιφάνεια, φέρει αυλάκια στα οποία είναι τοποθετημένα τριφασικά τυλίγματα. Τα τυλίγματα αυτά διαρρέονται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα προερχόμενο από την τροφοδοσία της μηχανής και παρίστανται για λόγους απλότητας ως συγκεντρωμένα πηνία. Ο αριθμός των τυλιγμάτων του στάτη, καθορίζεται από τον επιθυμητό αριθμό  $P$  των δημιουργούμενων μαγνητικών πόλων. Έτσι κάθε μία φάση αποτελείται από  $P/2$  πηνία, που απέχουν μεταξύ τους  $4\pi/P$  μηχανικές μοίρες και συνεπώς ο στάτης περιλαμβάνει  $P/2$  τριάδες πηνίων. Υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης των τυλιγμάτων :

- η σύνδεση αστέρα

Στην περίπτωση αυτή, οι άκρες των τυλιγμάτων που βρίσκονται πλησιέστερα στον άξονα περιστροφής συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τον ουδέτερο αγωγό. Οι άλλες άκρες συνδέονται με τριφασικό ρεύμα.

- η σύνδεση τριγώνου

Στη σύνδεση αυτή το τέλος του ενός τυλίγματος συνδέεται με την αρχή του επόμενου.



Εικόνα 3.9 Κύκλωμα μεταβολής σύνδεσης τυλιγμάτων στάτη  
α) αστέρα (κλειστοί διακόπτες 1, 2, 3, 4, 5, 6) β) τρίγωνο (κλειστοί 1, 2, 3, 7, 8, 9)

Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος και αυτός από σιδηρομαγνητικό υλικό και φέρει στην εξωτερική του επιφάνεια αυλακώσεις. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1.7 υπάρχουν δύο τύποι δρομέων των επαγωγικών κινητήρων, ο δρομέας κλωβού ή βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage motor) και ο τυλιγμένος δρομέας (wound rotor). Ο δρομέας κλωβού είναι κατασκευασμένος από ράβδους αλουμινίου ή χαλκού οι οποίες στα άκρα τους βραχυκυκλώνονται από δακτυλίδια ίδιου υλικού και τοποθετούνται μέσα στις αυλακώσεις του δρομέα. Το σύνολο των βραχυκυκλωμένων ράβδων ομοιάζει με κλωβό και από το γεγονός αυτό προέρχεται η ονομασία «δρομέας κλωβού». Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται συχνότερα ως υλικό του κλωβού και ιδιαίτερα σε κινητήρες χαμηλότερης ισχύος. Τις περισσότερες φορές η κατασκευή γίνεται με απ' ευθείας χύτευση υγρού αλουμινίου στις αυλακώσεις του δρομέα, με αποτέλεσμα αυτός να παρουσιάζει στιβαρότητα, αλλά να μην μπορεί να αποσυναρμολογηθεί.

Ο τυλιγμένος δρομέας φέρει στις αυλακώσεις του τυλίγματα όμοια και ίδια στον αριθμό με αυτά του στάτη, τα οποία συνδέονται και αυτά σε διάταξη τριγώνου ή

αστέρα. Οι τρεις ακροδέκτες τους συνδέονται με δακτυλίους ολίσθησης, οι οποίοι με τη σειρά τους βρίσκονται σε μόνιμη επαφή με ψήκτρες. Έτσι και τα τυλίγματα του τυλιγμένου δρομέα είναι βραχυκυκλωμένα. Εναλλακτικά μπορούν να συνδέονται με εξωτερικές αντιστάσεις, γεγονός που όπως θα δούμε προσδίδει κάποια πλεονεκτήματα. Ωστόσο αυτά, αντισταθμίζονται από το υψηλό κόστος κατασκευής τους και τις αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης, λόγω της ύπαρξης του συστήματος ψηκτρών – δακτυλίων ολίσθησης.

### 3.3.3 Αρχές λειτουργίας

Η αρχή λειτουργία των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων προσεγγίζει αυτήν των μετασχηματιστών και στηρίζεται στο νόμο του Faraday. Το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη δημιουργεί χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, μαγνητικής επαγωγής  $\vec{B}_s$ , το οποίο χαρακτηρίζεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή. Η ροή αυτή διέρχεται από το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα και εισέρχεται στο σιδηρομαγνητικό υλικό του τελευταίου. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday εμφανίζεται τάση στις ράβδους (ή στα τυλίγματα) και λόγω του γεγονότος ότι αυτά είναι βραχυκυκλωμένα, διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα εξ επαγωγής. Αν οι αγωγοί του δρομέα δεν ήταν βραχυκυκλωμένοι, τότε ο κινητήρας θα δρούσα σαν μετασχηματιστής χωρίς φορτίο.

Σε αντίθεση όμως με τους μετασχηματιστές, όπου το επαγόμενο ρεύμα έχει ίδια συχνότητα με αυτό που το προκαλεί, στους επαγωγικούς κινητήρες αυτό συμβαίνει μόνο σε κατάσταση ακινησίας. Η ροή ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου, μαγνητικής επαγωγής  $\vec{B}_r$ . Έτσι η περιστροφική κίνηση των ρευματοφόρων τυλιγμάτων ή ράβδων του δρομέα μέσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη, δημιουργεί σύμφωνα με την σχέση 3.6  $T = k \cdot \vec{B}_r \times \vec{B}_s$ , την απαιτούμενη μηχανική ροπή, που με τη σειρά της μεταβιβάζεται στο φορτίο.

Το γεγονός ότι το ρεύμα του δρομέα παράγεται από επαγωγή και όχι από κάποια εξωτερική πηγή, όπως στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ή διεγέρτρια πηγή, όπως στους σύγχρονους κινητήρες, αποτελεί την ειδοποιό διαφορά τους από τα διάφορα άλλα είδη ηλεκτροκινητήρων.

Ένα άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων, το οποίο τους διακρίνει τόσο από τους μονοφασικούς επαγωγικούς όσο και από τους σύγχρονους κινητήρες, είναι η ικανότητά τους να εκκινούν μόνοι τους, χωρίς κάποια εξωτερική βοήθεια ή μεταβολή της λειτουργίας τους.

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη έχει ταχύτητα ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ . Επειδή, όμως, η εμφάνιση επαγωγικής τάσης απαιτεί να υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ των αγωγών του δρομέα (τυλιγμάτων, ράβδων) και του μαγνητικού πεδίου του στάτη, ο δρομέας δεν μπορεί να στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Έτσι ορίζεται η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed)  $n_{slip}$  η οποία είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ δρομέα – πεδίου και ισούται με :

$$n_{slip} = n_s - n_{MHX} \quad (3.19)$$

Ως ολίσθηση  $s$ , ορίζεται το μέγεθος :

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} \quad (3.20)$$

Η ολίσθηση εκφράζεται είτε ως ποσοστό % είτε ως αριθμός τιμής μικρότερης της μονάδας. Η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 3% και 8%, ενώ κατά την εκκίνηση του κινητήρα είναι ίση με 1 (100%). Υψηλές τιμές της ολίσθησης, έχουν σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς που περνά από το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα, και που διατίθεται για την κίνηση του τελευταίου και κατανάλωση σε απώλειες. Συνεπώς μειώνεται και η απόδοση του κινητήρα, ενώ επιπλέον αυτός υπερθερμαίνεται. Εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα περιστροφής  $n_{MHX}$  του δρομέα και η ολίσθηση συνδέονται με τη σχέση :

$$n_{MHX} = n_s(1 - s) \quad (3.21)$$

Εξαιτίας της ύπαρξης της ολίσθησης και της περιστροφής του δρομέα σε ταχύτητα διαφορετική από τη σύγχρονη, συχνά οι επαγωγικοί κινητήρες καλούνται και ασύγχρονοι κινητήρες.

Επίσης ορίζεται και η συχνότητα ολίσθησης  $f_s$ , η οποία αποτελεί την συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στους αγωγούς του δρομέα και δίνεται από τη σχέση :

$$f_s = sf_1 \quad (3.22)$$

, όπου  $f_1$  η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος του στάτη.

Σε συνδυασμό με τον ορισμό της σύγχρονης ταχύτητας, η συχνότητα ολίσθησης εκφράζεται και ως :

$$f_s = \frac{P}{120}(n_s - n_{MHX}) \quad (3.23)$$

Το πλάτος της επαγόμενης τάσης σε κινούμενο δρομέα  $E_{2,\pi}$  συνδέεται με την επαγόμενη τάση σε ακίνητο δρομέα  $E_2$  με τη σχέση :

$$E_{2,\pi} = sE_2 \quad (3.24)$$

Από την προηγούμενη σχέση, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επαγόμενη στο δρομέα τάση είναι μέγιστη όταν αυτός είναι ακίνητος και συνεχώς μειώνεται όσο η ταχύτητά του πλησιάζει τη σύγχρονη  $n_s$ . Προφανώς ανάλογη συμπεριφορά θα παρουσιάζουν το ρεύμα του δρομέα και η προκαλούμενη μηχανική ροπή.

### 3.3.4 Χαρακτηριστική καμπύλη & μεταβολή αυτής

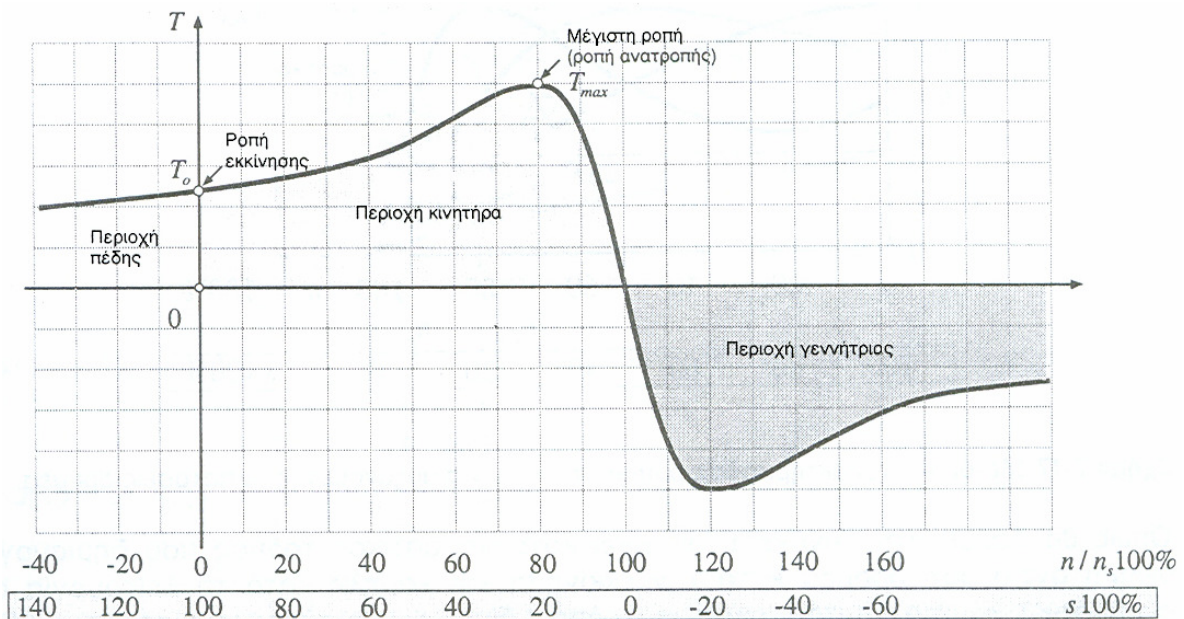
Η χαρακτηριστική ροπής – στροφών ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα συχνά χαράσσεται σε αδιάστατους άξονες, με τη ροπή να αδιαστατοποιείται ως προς την ονομαστική ροπή  $T_N$  και την ταχύτητα περιστροφής ως προς τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ . Η ονομαστική ροπή, αντιστοιχεί στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του κινητήρα ή σημείο πλήρους φορτίου (full load). Το τελευταίο είναι το μόνιμο σημείο λειτουργίας, όπου κινητήρας και φορτίο περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα και συνήθως εμφανίζεται σε τιμή ολίσθησης 5%, δηλαδή  $n_{MHX} = 0,95n_s$ . Η ροπή που αναπτύσσεται κατά την εκκίνηση (starting ή blocked-rotor torque) είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική και μάλιστα περίπου διπλάσια αυτής ( $T_{ST} \approx 200\% \cdot T_N$ ), έτσι ώστε



να διασφαλίζεται ότι ο κινητήρας θα μπορεί να θέσει σε κίνηση οποιοδήποτε φορτίο κινεί στο ονομαστικό σημείο. Καθώς ο κινητήρας επιταχύνει, η τιμή της ροπής αρχικά μειώνεται μέχρι μία ελάχιστη τιμή (pull-up torque) που συνήθως παρατηρείται στο διάστημα  $n_{MHX} = 0,25 \div 0,40n_s$ . Στη συνέχεια έχουμε αύξηση μέχρι ένα ανώτατο σημείο. Η μέγιστη αυτή ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής (breakdown ή pullout torque), είναι περίπου 2,5 φορές η ονομαστική ( $T_{PULL-OUT} \approx 250\% \cdot T_N$ ) και εμφανίζεται σε μία περιοχή τιμών της ταχύτητας περιστροφής που κυμαίνεται από  $n_{MHX} = 0,80n_s$  για τους κινητήρες πολύ μικρής ισχύος ως και  $n = 0,98n_s$  για κάποιους μεγάλης ισχύος. Η ονομασία ροπή ανατροπής οφείλεται στο γεγονός, ότι η περιοχή λειτουργίας του κινητήρα μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης ροπής είναι ασταθής, αφού ισχύει  $\frac{dT}{dn} > 0$ . Έτσι σε περίπτωση κατά την οποία το φορτίο απαιτεί ροπή

$T_\phi > T_{PULL-OUT}$ , η ολίσθηση μεγαλώνει, η παραγόμενη ροπή μειώνεται και ο κινητήρας επιβραδύνεται μέχρι να σταματήσει. Σε κάποιες διαμορφώσεις επαγωγικών κινητήρων, η καμπύλη της ροπής δεν εμφανίζει το αρχικό φθίνον τμήμα και είναι εξ' αρχής αύξουσα (π.χ. χαρακτηριστική καμπύλη της εικόνας 3.10).

Μετά το σημείο μέγιστης ροπής, υπάρχει μια περιοχή όπου η ροπή μειώνεται έως ότου πάρει μηδενική τιμή, προφανώς για ταχύτητα περιστροφής ίση με τη σύγχρονη. Σε αυτήν ανήκει και η περιοχή λειτουργίας της μηχανής. Εάν η ταχύτητα περιστροφής είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη και άρα η ολίσθηση παίρνει αρνητική τιμή ( $n_{MHX} > n_s \Leftrightarrow s < 0$ ), η ροπή παίρνει και αυτή αρνητικές τιμές και η μηχανή εργάζεται ως επαγωγική γεννήτρια αποδίδοντας ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί εάν το φορτίο για κάποια αιτία (π.χ. ανάπτυξη ροπής εξαιτίας της βαρύτητας) επιταχύνει τον κινητήρα. Προκειμένου να μην διαταραχθεί η λειτουργία του δικτύου, ο κινητήρας μπορεί να συνδεθεί με πυκνωτές που θα αποθηκεύσουν και στη συνέχεια θα αποδώσουν την ισχύ αυτή. Σε περίπτωση κατά την οποία η τιμή της ολίσθησης είναι μεγαλύτερη της μονάδας και άρα η ταχύτητα περιστροφής είναι αρνητική ( $s > 1 \Leftrightarrow n_{MHX} < 0$ ), ο κινητήρας απορροφά τόσο μηχανική όσο και ηλεκτρική ισχύ. Συνεπώς συμπεριφέρεται ως πέδη και η ροπή εξακολουθεί να έχει θετική τιμή ( $T_k > 0$ ), η οποία σταδιακά μειώνεται.

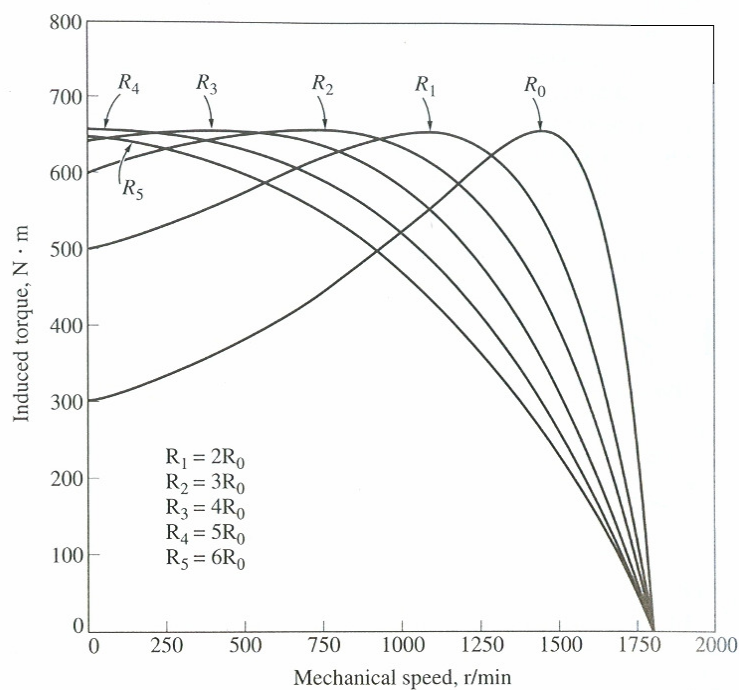


Εικόνα 3.10 Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών επαγωγικού κινητήρα.

Ένα κύριο συμπέρασμα που εξάγεται από τη μελέτη της καμπύλης  $(T, n)$ , είναι ότι για δεδομένη κλίση της καμπύλης, η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τροφοδοσίας ( $T \sim V_{\text{ΤΡΟΦ}}^2$ ). Στους κινητήρες με δρομέα κλωβού η μορφή της χαρακτηριστικής εξαρτάται από την αντίσταση  $R$  του δρομέα και από το σχήμα του. Επομένως ο ίδιος στάτης με διαφορετικής αντίστασης δρομείς παρουσιάζει διαφορετική χαρακτηριστική ροπής – στροφών. Επιλέγοντας κατάλληλο υλικό κατασκευής του κλωβού σε έναν κινητήρα αυτού του τύπου, μπορούμε να αλλάξουμε την αντίσταση  $R$  που χαρακτηρίζει το δρομέα. Αύξηση της αντίστασης του δρομέα προκαλεί μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης προς τα αριστερά με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της ροπής εκκίνησης του κινητήρα και άρα της ικανότητάς του να επιταχύνει φορτία υψηλής αδράνειας, ενώ η τιμή της ροπής ανατροπής παραμένει ίδια, αφού δεν εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης του δρομέα. Ωστόσο υπερβολική αύξηση της τελευταίας και επομένως υπερβολική μετατόπιση της χαρακτηριστικής προς τα αριστερά, οδηγεί στην εμφάνιση υψηλής ολίσθησης στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την απόδοση της μηχανής.

Στους κινητήρες με τυλιγμένο δρομέα η μεταβολή της αντίστασης του τελευταίου, επιτυγχάνεται πιο εύκολα συγκριτικά με τους δρομείς κλωβού, αφού έχουμε πρόσβαση στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων του μέσω των δακτυλίων ολίσθησης. Έτσι αυξάνοντας την αντίσταση του δρομέα, μπορούμε να μειώσουμε το ρεύμα που καταναλώνει ο κινητήρας κατά την εκκίνηση, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα υψηλή τιμή της ροπής εκκίνησης. Επίσης στην περίπτωση που τα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται με εξωτερικές αντιστάσεις, έχουμε τη δυνατότητα μεταβάλλοντας αυτές, να μεταβάλλουμε τις στροφές του κινητήρα και συνεπώς να πετύχουμε «πλάγιασμα» της χαρακτηριστικής. Για το λόγο αυτό, ο τύπος αυτών των κινητήρων χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται επιτάχυνση αδρανειακών φορτίων και μεγάλου εύρους μεταβολές στροφών, όπως είναι οι ανελκυστήρες και τα ανυψωτικά μηχανήματα. Από την άλλη μεριά παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, όπως είναι το

αυξημένο κόστος, οι αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης, η πολυπλοκότητα της οδήγησής τους, η αυξημένη θέρμανση του δρομέα, οι αυξημένες απώλειες στις εξωτερικές αντιστάσεις και η ευρεία μεταβολή ταχύτητας για χαμηλή ολίσθηση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας λόγω του «πλαγιάσματος» της χαρακτηριστικής. Επιπροσθέτως, σε αρκετές εφαρμογές το περιβάλλον είναι εκρηκτικό ή επικίνδυνο, πράγμα που καθιστά κάθε εξωτερική επέμβαση στο δρομέα επισφαλής.



Εικόνα 3.11 Παράδειγμα επίδρασης της μεταβολής της αντίστασης στην χαρακτηριστική καμπύλη κινητήρα με τυλιγμένο δρομέα

Έτσι συμπεραίνουμε ότι η ανάγκη συμβιβασμού μεταξύ υψηλής ροπής εκκίνησης και χαμηλής ολίσθησης στο ονομαστικό σημείο, αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις κατά την κατασκευή ενός ασύγχρονου κινητήρα. Έναν τρόπο αντιμετώπισής της, αποτελεί η κατάλληλη επιλογή της αντίδρασης σκέδασης στάτη (leakage reactance). Η τελευταία, οφείλεται στην έλλειψη ζεύξης μεταξύ της μαγνητικής ροής του πεδίου του δρομέα και των τυλιγμάτων του στάτη και έχει ως αποτέλεσμα ένας μέρος της ροής αυτής να μην συναντά τα τυλίγματα. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ των ράβδων του δρομέα και του στάτη.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η κατασκευή των δρομέων διπλού ή βαθέως κλωβού. Σε αυτούς οι υψηλότερες τιμές της ροπής εκκίνησης επιτυγχάνονται με την ύπαρξη στο δρομέα αυλακιών μεγάλου βάθους και την εκμετάλλευση του «επιδερμικού φαινομένου». Στο κάτω μέρος των αυλακιών, δηλαδή πλησιέστερα στο κέντρο, τοποθετούνται αγωγοί χαμηλής αντίστασης που εμφανίζουν υψηλή αντίδραση σκέδασης, ενώ υψηλότερα αγωγοί υψηλής αντίστασης με μικρότερη αντίδραση σκέδασης. Οι αγωγοί αυτοί μπορεί να έρχονται σε επαφή ή να αποτελούν δύο ξεχωριστούς κλωβούς, αλλά πάντοτε οι άνω αγωγοί είναι μικρότερης διατομής από τους κάτω. Κατά την εκκίνηση, οι αντιδράσεις στις ράβδους είναι μεγάλες συγκριτικά με τις αντιστάσεις. Έτσι το ρεύμα διαρρέει κυρίως την περιοχή χαμηλής αντίδρασης, δηλαδή τους άνω αγωγούς υψηλής αντίστασης. Επειδή αυτοί είναι πλησιέστερα στην

«επιδερμίδα» του δρομέα, παράγεται υψηλή ροπή. Όσο ο κινητήρας φθάνει στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του, μειώνεται η συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς του δρομέα και επομένως η επίδραση της αντίδρασης ελαττώνεται σημαντικά συγκριτικά με την επίδραση της αντίστασης. Για το λόγο αυτό, διοχετεύεται περισσότερο ρεύμα στους κάτω αγωγούς, η ολική αντίσταση του δρομέα ελαττώνεται και εξασφαλίζεται αποδοτική λειτουργία του κινητήρα στο ονομαστικό σημείο. Οι δρομείς διπλού κλωβού εμφανίζουν υψηλότερη ροπή εκκίνησης από τους δρομείς βαθέως κλωβού, όμως στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας, τα δύο είδη εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Στα μειονέκτημά τους συγκαταλέγονται η μικρότερη ροπή ανατροπής, η ελαφρά υψηλότερη ολίσθηση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας και το αυξημένο κόστος κατασκευής το οποίο όμως παραμένει χαμηλότερο αυτού των τυλιγμένων δρομέων.

### 3.3.5 Βαθμός απόδοσης & ονομαστικά μεγέθη

Στους επαγωγικούς κινητήρες, όπου η μόνη εισερχόμενη ισχύς είναι η ηλεκτρική ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος του στάτη  $p_{\text{ΗΛ}}$ , ο βαθμός απόδοσης είναι :

$$\eta_K = \frac{P_{\text{MHX}}}{p_{\text{ΗΛ}}} = \frac{T_{\text{MHX}} \omega_{\text{MHX}}}{3V_1 I_1 \cos \phi} \quad (3.25)$$

όπου  $P_{\text{MHX}}$  η μηχανική ισχύς,  $T_{\text{MHX}}$  η μηχανική ροπή στην άτρακτο του κινητήρα,  $\omega_{\text{MHX}}$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής,  $V_1$  και  $I_1$  το μέτρο της τάσης και της έντασης του ρεύματος του στάτη ανά φάση αντίστοιχα και  $\cos \phi$  ο συντελεστής ισχύος. Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0,78 και 0,94. Οι διάφορες απώλειες ισχύος, επιμερίζονται κυρίως στις ωμικές απώλειες του στάτη και του δρομέα, στις απώλειες πυρήνα επίσης στάτη και δρομέα και στις μηχανικές απώλειες ανεμισμού και εδράνων.

Πέραν της ονομαστικής ροπής  $T_N$  που αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν και άλλα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Έτσι ορίζονται οι ονομαστικές στροφές, η ονομαστική συχνότητα, η ονομαστική τάση  $V_N$ , το ονομαστικό ρεύμα  $I_N$  και η ονομαστική ισχύς  $P_N$ . Η τελευταία ορίζεται ως το γινόμενο των ονομαστικών στροφών επί την ηλεκτρομαγνητική ισχύ μειωμένη κατά τις μηχανικές απώλειες, δηλαδή δίνεται από τη σχέση :

$$P_N = T_N \omega_N \quad (3.26)$$

Οι τιμές της ονομαστικής τάσης και του ονομαστικού ρεύματος εξαρτώνται από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του στάτη. Σε περίπτωση σύνδεσης τυλιγμάτων τριγώνου, η ονομαστική τάση ανά φάση  $V_{N,\Phi}$  θα είναι ίση με την πολική τάση τροφοδοσίας του κινητήρα  $V_{N,\text{ΤΡΟΦ}}$ . Εάν όμως έχουμε σύνδεση τυλιγμάτων αστέρα, επειδή η ονομαστική τάση στα τυλίγματα (φάσεις) έχει συγκεκριμένη τιμή, η ονομαστική τάση τροφοδοσίας του κινητήρα θα ισούται με :

$$V_{N,\text{ΤΡΟΦ-Υ}} = V_{N,\Phi} \sqrt{3} \quad (3.27)$$

Για παράδειγμα για σταθερή ονομαστική τάση τροφοδοσίας ανά φάση (τύλιγμα) 220V, η ονομαστική τάση τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι 220V για σύνδεση

τριγώνου και 380V γι σύνδεση αστέρα ( $V_{N,ΤΡΟΦ} = 220\Delta/380Υ$ ). Σε περίπτωση όπου η τάση της τροφοδοσίας είναι σταθερή συμπεραίνουμε ότι η τάση ανά φάση για σύνδεση αστέρα θα είναι ίση με το  $1/\sqrt{3} = 58\%$  της τάσης ανά φάση για σύνδεση τριγώνου. Αυτό αποτελεί ένα πλεονέκτημα της σύνδεσης αστέρα έναντι της σύνδεσης τριγώνου, καθώς λόγω της μικρότερης τάσης ανά φάση, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μικρότερης μόνωσης στα τυλίγματα. Επιπλέον επιτρέπει για την ίδια διάμετρο αυλακιού, τη χρήση αγωγών μεγαλύτερης διατομής, πράγμα που οδηγεί σε μεγαλύτερη ένταση ρευμάτων και άρα μεγαλύτερη ισχύ της μηχανής. Ένας άλλος λόγος για τον οποίο προτιμάται η σύνδεση αστέρα έναντι της σύνδεσης τριγώνου, είναι ότι στην πρώτη περίπτωση απαλείφονται οι όποιες μικρές διαφορές στις τάσεις των φάσεων. Αυτό δε συμβαίνει στη δεύτερη περίπτωση, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αυξημένες ωμικές απώλειες. Τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται με την απορροφούμενη από τη μηχανή ισχύ  $P_{3\phi}$  με τη σχέση :

$$P_{3\phi} = 3V_{N,\phi} I_a \cos \phi = \sqrt{3} V_{N,ΤΡΟΦ} I_a \cos \phi \quad (3.28)$$

, όπου  $I_a$  το ανά φάση ρεύμα.

Το απορροφόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, αρχίζει από μία πολύ υψηλή τιμή στην εκκίνηση ( $I_{ST} = 400 \div 600\% \cdot I_N$ ), και σταδιακά μειώνεται καθώς η μηχανή επιταχύνεται.

### 3.3.6 Ταξινόμηση

Λόγω του εύρους των εφαρμογών όπου χρησιμοποιούνται οι τριφασικοί επαγωγικοί κινητήρες, πέρα από τη διάκρισή τους με βάση τα κατασκευαστικά τους στοιχεία, υπάρχουν και άλλα κριτήρια ταξινόμησής τους σε κατηγορίες. Έτσι έχουμε :

- ταξινόμηση με κριτήριο την προστασία των κινητήρων

Διακρίνονται 5 κατηγορίες ανάλογα με την προστασία των μηχανών, η οποία καθορίζει και τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες στις οποίες μπορούν να λειτουργούν αξιόπιστα και αποδοτικά. Έτσι υπάρχουν :

- Αδιάβροχοι κινητήρες (drip proof)

Είναι οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι κινητήρες. Προστατεύονται από υγρά και σωματίδια που πέφτουν στον κινητήρα κατακόρυφα και υπό γωνία  $\pm 30^\circ$ .

- Τελείως αδιάβροχοι κινητήρες (splash proof)

Πρόκειται για κινητήρες που προστατεύονται από υγρά και σωματίδια τα οποία πέφτουν στη μηχανή κατακόρυφα και υπό γωνία  $\pm 100^\circ$ .

- Ερμητικά κλειστοί κινητήρες χωρίς ανεμισμό (totally enclosed, nonventilated)

Σε αυτές τις μηχανές δεν επιτρέπεται η κίνηση αέρα από και προς το περιβάλλον.

Είναι κυρίως κινητήρες χαμηλής ισχύος, που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλον όπου ο αέρας είναι ιδιαίτερα υγρός ή έχει αυξημένη συγκέντρωση σε σωματίδια.

- Ερμητικά κλειστοί κινητήρες με ανεμισμό (totally enclosed, fan cooled)

Οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτούς της προηγούμενης και χρησιμοποιούνται σε ίδιες εφαρμογές. Ωστόσο, επειδή πρόκειται

για μηχανές μεγάλης και υψηλής ισχύος έχουν αυξημένες ανάγκες ψύξης. Για το λόγο αυτό φέρουν ανεμιστήρα, που τους ψύχει εξωτερικά.

- Κινητήρες αντεκρηκτικού – αντιφλογικού τύπου (explosion-proof motors)

Πρόκειται για ειδικού τύπου κινητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εκρηκτικά ή / και εύφλεκτα περιβάλλοντα. Οι μηχανές αυτές είναι ερμητικά κλεισμένες, ώστε να εξαλειφθεί η πιθανότητα πρόκλησης πυρκαγιάς ή έκρηξης στον περιβάλλοντα χώρο από βραχυκύκλωμα ή σπινθηρισμό στα τυλίγματά τους και να μπορούν να αντέξουν υψηλές πιέσεις στα τοιχώματά τους.

- ταξινόμηση με κριτήριο τον κύκλο λειτουργίας των κινητήρων

Σύμφωνα με τους γερμανικούς κανονισμούς DIN οι κινητήρες διακρίνονται με βάση το είδος του κύκλου λειτουργίας τους στις εξής 9 κατηγορίες :

S1 : Πρόκειται για κινητήρες σχεδιασμένους για συνεχή λειτουργία.

S2 : Οι κινητήρες της κατηγορίας αυτής λειτουργούν για μικρό χρονικό διάστημα και στη συνέχεια σταματούν.

S3 : Περιλαμβάνει κινητήρες με περιοδικό κύκλο εργασίας, χωρίς να σταματούν στο ενδιάμεσο χρονικό διάστημα.

S4 : Πρόκειται για κινητήρες με περιοδικό κύκλο εργασίας, οι οποίοι μετά από κάθε κύκλο σταματούν και στη συνέχεια εκκινούν ξανά.

S5 : Οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας είναι όμοιοι με αυτούς της προηγούμενης με τη διαφορά της χρήσης ηλεκτρικής πέδης.

S6 : Οι μηχανές που περιλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή είναι όμοιες με αυτές της κατηγορίας S1 με τη διαφορά ότι το φορτίο τους είναι περιοδικό.

S7 : Πρόκειται για κινητήρες όμοιους με αυτούς της κατηγορίας S6 με τη διαφορά της χρήσης ηλεκτρικής πέδης.

S8 : Περιλαμβάνει κινητήρες με συνεχή κύκλο λειτουργίας, το φορτίο τους είναι περιοδικό και έχουν μεταβλητή σχέση φορτίου – στροφών.

S9 : Οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας είναι σχεδιασμένοι για συνεχή λειτουργία, το φορτίο τους είναι περιοδικό και έχουν τη δυνατότητα μεταβολής ταχύτητας.

- ταξινόμηση με κριτήριο τη σχεδίαση των κινητήρων

Ανάλογα με την κατεύθυνση της ατράκτου και την έδραση του κινητήρα, διαμορφώνεται και η μορφή του στάτη. Έτσι με κριτήριο τον τύπο του στάτη οι κινητήρες ταξινομούνται με βάση τους κανονισμούς DIN σε διάφορες κατηγορίες.

- ταξινόμηση με κριτήριο τη χαρακτηριστική των κινητήρων

Ανάλογα με τη μορφή της χαρακτηριστικής τους καμπύλης ροπής – στροφών, οι επαγωγικοί κινητήρες ταξινομούνται σε κατηγορίες.

Στην Ευρώπη ως κριτήριο χρησιμοποιείται η τιμή της ροπής εκκίνησης και έχουμε τις εξής 5 κατηγορίες :

| Κατηγορία | Ροπή εκκίνησης |
|-----------|----------------|
| KL 16     | $2,40T_N$      |
| KL 13     | $2,00T_N$      |

|       |           |
|-------|-----------|
| KL 10 | $1,80T_N$ |
| KL 7  | $1,20T_N$ |
| KL 5  | $0,80T_N$ |

Αντίθετα στις ΗΠΑ, κύριο κριτήριο ταξινόμησης είναι η αντίσταση του δρομέα και υπάρχουν 4 κατηγορίες επαγωγικών κινητήρων κατά NEMA (National Electrical Manufacturer's Association).

- Κατηγορία NEMA A

Οι κινητήρες που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, έχουν δρομείς με χαμηλή αντίσταση και χαμηλή αντίδραση σκέδασης στάτη. Εμφανίζουν κατά την εκκίνηση κανονική ροπή ( $T_{ST} \geq 200\% \cdot T_N$ ) και πολύ υψηλό ρεύμα ( $I_{ST} = 500 \div 800\% \cdot I_N$ ). Φθάνουν γρήγορα στις ονομαστικές στροφές και έχουν χαμηλή ολίσθηση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας ( $s_N = 0,005 \div 0,015$ ). Η ροπή ανατροπής είναι αρκετά υψηλή ( $T_{PULL-OUT} = 200 \div 300\% \cdot T_N$ ) και εμφανίζεται για χαμηλή τιμή ολίσθησης ( $s \leq 0,20$ ). Μεταξύ αρχικής και μέγιστης τιμής, η ροπή συνεχώς αυξάνεται δίχως να υπάρχει κάποιο τμήμα όπου μειώνεται. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές, όπου οι απαιτήσεις για ροπή κατά την εκκίνηση είναι χαμηλές, όπως π.χ. η κίνηση ανεμιστήρων και αντλιών, όμως συναντώνται όλο και λιγότερο καθώς αντικαθίστανται από τους κινητήρες κατηγορίας NEMA B.

- Κατηγορία NEMA B

Πρόκειται για κινητήρες, οι οποίοι όπως και αυτοί της προηγούμενης κατηγορίας, παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης. Ωστόσο, το ρεύμα εκκίνησης είναι επίσης υψηλό αλλά αρκετά μικρότερο ( $I_{N,B} \approx 0,75 \cdot I_{N,A}$ ) και η ονομαστική ολίσθηση παραμένει χαμηλή αλλά είναι ελαφρά μεγαλύτερη. Επίσης ο δρομέας τους παρουσιάζει υψηλότερη αντίδραση σε σχέση με την κατηγορία A, με αποτέλεσμα η ροπή ανατροπής τους να είναι λίγο μικρότερη ( $T_{PULL-OUT} \geq 200\% \cdot T_N$ ). Σε αυτήν περιλαμβάνονται κυρίως κινητήρες με δρομέα βαθέως κλωβού. Και αυτοί συναντώνται σε εφαρμογές όπου το φορτίο απαιτεί όχι υψηλές ροπές εκκίνησης και σταθερή ταχύτητα περιστροφής, π.χ. η κίνηση ανεμιστήρων, αντλιών και φυσητήρων.

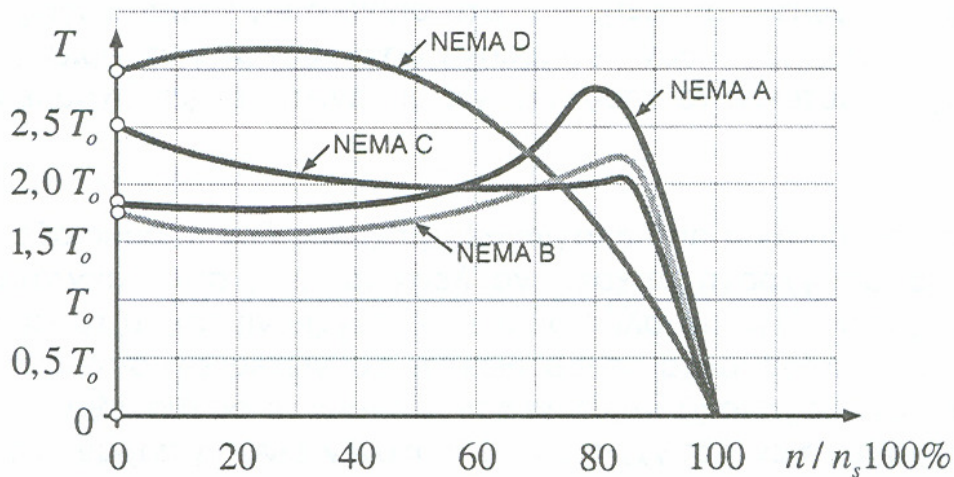
- Κατηγορία NEMA C

Περιλαμβάνει κινητήρες που χαρακτηρίζονται από υψηλή ροπή εκκίνησης ( $T_{ST} \leq 250\% \cdot T_N$ ) και χαμηλό ρεύμα εκκίνησης. Ωστόσο έχουν υψηλότερη ολίσθηση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας ( $s_N \approx 0,05$ ) και μικρότερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες. Επιπλέον η ροπή ανατροπής είναι λίγο μικρότερη αυτής της κατηγορίας A. Εδώ ανήκουν κυρίως κινητήρες με δρομέα διπλού κλωβού. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την κίνηση συμπιεστών, μηχανών σύνθλιψης, μεταφορικών ταινιών κτλ

- Κατηγορία NEMA D

Οι κινητήρες αυτοί εμφανίζουν κατά την εκκίνηση πολύ υψηλή ροπή ( $T_{ST} > 275\% \cdot T_N$ ) και χαμηλό ρεύμα. Έχουν χαμηλή αντίσταση σκέδασης στάτη και κατασκευαστικά

είναι όμοιοι με αυτούς της κατηγορίας A, με τη διαφορά ότι οι ράβδοι κλωβού του δρομέα είναι μικρότερες και από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Έτσι η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε πολύ χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, ενώ η ονομαστική ολίσθηση είναι αρκετά υψηλή ( $s_N = 0,08 \div 0,15$ ) και επομένως και ο βαθμός απόδοσης αρκετά χαμηλός. Επίσης λόγω των υψηλών απωλειών έχουν μεγάλο όγκο, πράγμα που συνεπάγεται αυξημένο κόστος κατασκευής. Είναι κατάλληλοι για οδήγηση περιοδικών ή κρουστικών φορτίων, τα οποία απαιτούν υψηλές επιταχύνσεις. Σε αρκετές περιπτώσεις και ιδιαίτερα στα κρουστικά φορτία, συνδυάζονται με σφόνδυλο.



Εικόνα 3.12 Χαρακτηριστικές καμπύλες για κινητήρες κατηγορίες NEMA A-D

### 3.3.7 Βιομηχανικός έλεγχος

Αρκετές εφαρμογές απαιτούν την πέδηση των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι μέθοδοι πέδησης που χρησιμοποιούνται είναι :

- μηχανική πέδηση

Περιλαμβάνει χρήση ηλεκτρομαγνητικής πέδης η οποία είναι προσαρμοσμένη στην ίδια άτρακτο, εξωτερικά του κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αποφυγή υπερθέρμανσης της μηχανής.

- εναλλαγή 2 φάσεων

Συνίσταται στην δημιουργία ενός αντίθετα περιστρεφόμενου πεδίου του στάτη το οποίο επιβραδύνει τον κινητήρα. Όταν ο τελευταίος επιβραδυνθεί πλήρως και φθάσει σε μηδενικές στροφές, αποσυνδέεται από την τροφοδοσία. Δηλαδή ο κινητήρας εργάζεται σαν πέδη και μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε θερμότητα. Η μέθοδος αυτή ενέχει υψηλές απώλειες και καταπονεί θερμικά τη μηχανή.

- πέδηση με συνεχές ρεύμα

Στα πλαίσια της μεθόδου αυτού, τα τυλίγματα του στάτη αποσυνδέονται από την τριφασική εναλλασσόμενη τροφοδοσία και συνδέονται με πηγή συνεχούς ρεύματος. Έτσι έχουμε τη δημιουργία ακίνητων μαγνητικών πόλων. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη συνεχιζόμενη περιστροφή του δρομέα, προκαλεί την παραγωγή ρευμάτων που έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπής πέδησης. Δηλαδή ο κινητήρας εργάζεται σαν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με βραχυκυκλωμένο τύμπανο.



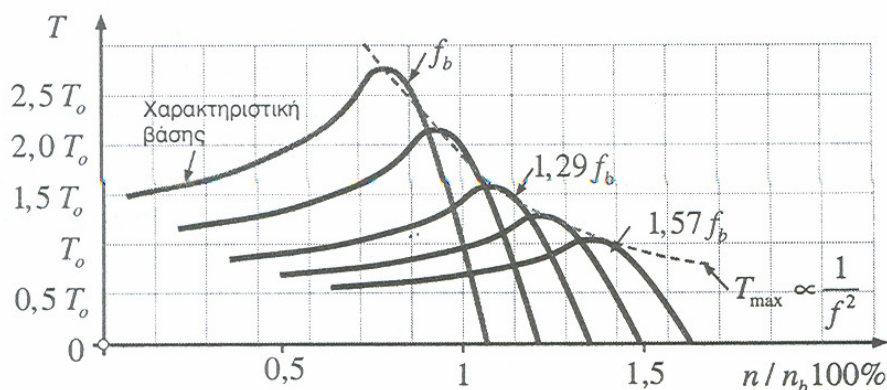
Οι θερμικές απώλειες είναι μικρότερες σχεδόν κατά τα 2/3 συγκριτικά με αυτές της προηγούμενης μεθόδου, με επακόλουθο την μικρότερη καταπόνηση της μηχανής.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες δεν είναι εκ κατασκευής κατάλληλοι για εφαρμογές που απαιτούν ευρεία μεταβολή στροφών, καθώς εργάζονται πολύ κοντά στις σύγχρονες στροφές. Επιπλέον η μορφή της χαρακτηριστικής τους  $(T, n)$  με το στενό πεδίο ευσταθούς λειτουργίας, δεν διευκολύνει κάτι τέτοιο. Στους κινητήρες με τυλιγμένους δρομείς, αυτή η δυσκολία ξεπερνιέται με τη χρήση εξωτερικών αντιστάσεων, όπως έχει προαναφερθεί. Στους κινητήρες με δρομέα κλωβού, όπου δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, η αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να γίνει με βάση τον ορισμό της σύγχρονης ταχύτητας  $n_s = 120f / P$ . Στο παρελθόν η αλλαγή αυτή επιτυγχανόταν με την μεταβολή του αριθμού των πόλων, που γινόταν με 2 τρόπους. Ο ένας στηριζόταν στην αλλαγή του τρόπου σύνδεσης των πηνίων του στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της φοράς του ρεύματος σε κάποια πηνία, που με τη σειρά της προκαλεί την αλλαγή της πολικότητάς τους και τη δημιουργία σε κάθε πηνίο «ακόλουθων» πόλων (consequent poles) αντίθετης πολικότητας από τους υπάρχοντες. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο διπλασιασμός του αριθμού των πόλων και ο υποδιπλασιασμός της σύγχρονης ταχύτητας. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων, η ροπής ανατροπής μπορεί να είναι ίδια με πριν, διπλάσια ή μειωμένη κατά το ήμισυ. Ο άλλος τρόπος συνίσταται στην ύπαρξη δύο ή περισσότερων τυλιγμάτων στο στάτη, με διαφορετικό αριθμό πόλων. Ανάλογα με το ποιο τύλιγμα τροφοδοτείται με ρεύμα καθορίζεται και η ταχύτητα περιστροφής. Οι μηχανές αυτού του τύπου καλούνται κινητήρες δύο ταχυτήτων και έχουν αυξημένο κόστος κατασκευής.

Επειδή καμία από τις προηγούμενες μεθόδους δεν εξασφαλίζει ευρεία μεταβολή στροφών, αναπτύχθηκαν κατάλληλες ηλεκτρονικές οδηγήσεις, οι οποίες μεταβάλλουν τις στροφές αλλάζοντας τη χαρακτηριστική  $(T, n)$  της μηχανής. Η αλλαγή αυτή επιτυγχάνεται με τρεις κυρίως τρόπους :

➤ Με απλή μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας

Η μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή τόσο της σύγχρονης ταχύτητας και επομένως της χαρακτηριστικής  $(T, n)$ , όσο και των αντιδράσεων του κυκλώματος της μηχανής. Η αρχική ονομαστική σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα καλείται ταχύτητα βάσης και η συχνότητα που αντιστοιχεί σε αυτή συχνότητα βάσης. Η αύξηση της συχνότητας πέρα από την τελευταία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σύγχρονης ταχύτητας και των αντιδράσεων. Επιπλέον, με δεδομένο ότι η τάση τροφοδοσίας παραμένει σταθερή, μειώνεται ο λόγος τάσης προς συχνότητα, με αποτέλεσμα μείωση της τιμής των ροπών εκκίνησης και ανατροπής καθώς και των ρευμάτων που διαρρέουν το στάτη και το δρομέα. Μάλιστα οι ροπές αυτές μεταβάλλονται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της συχνότητας ( $T_{PULL-OUT}, T_{ST} \sim 1/f^2$ ), ενώ η ονομαστική ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας ( $T \sim 1/f$ ).



Εικόνα 3.13 Ρύθμιση ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα με αύξηση της συχνότητας

Μείωση της συχνότητας κάτω από τη συχνότητα βάσης, προκαλεί τα αντίθετα αποτελέσματα. Ωστόσο λόγω της αύξησης των ρευμάτων στάτη και δρομέα, αυξάνεται και η μαγνητική ροή που διατρέχει το μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής. Η αύξηση αυτή, μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό του σιδηρομαγνητικού υλικού και επομένως σε υπερθερμάνσεις, αύξηση των ρευμάτων μαγνήτισης και αυξημένες απώλειες μαγνήτισης. Το πρόβλημα αυτό, αντιμετωπίζεται στις οδηγίες που διατηρούν σταθερή τη μαγνητική ροή και περιγράφονται κάτωθι.

➤ Με μεταβολή της συχνότητας και σταθερή ροή διακένου

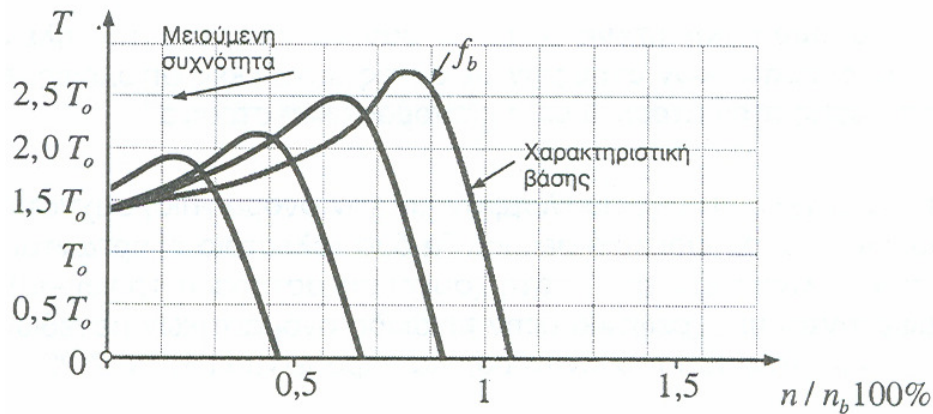
Οι οδηγίες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως όταν επιδιώκουμε μείωση της συχνότητας τροφοδοσίας. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο νόμο του Faraday. Για εναλλασσόμενη τάση αυτός παίρνει τη μορφή :

$$v(t) = V_m \sin(2\pi ft) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.29)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση αυτή προκύπτει :

$$\phi(t) = -\frac{V_m}{2\pi fN} \cos(2\pi ft) = -\Phi_m \cos(2\pi ft) \quad (3.30)$$

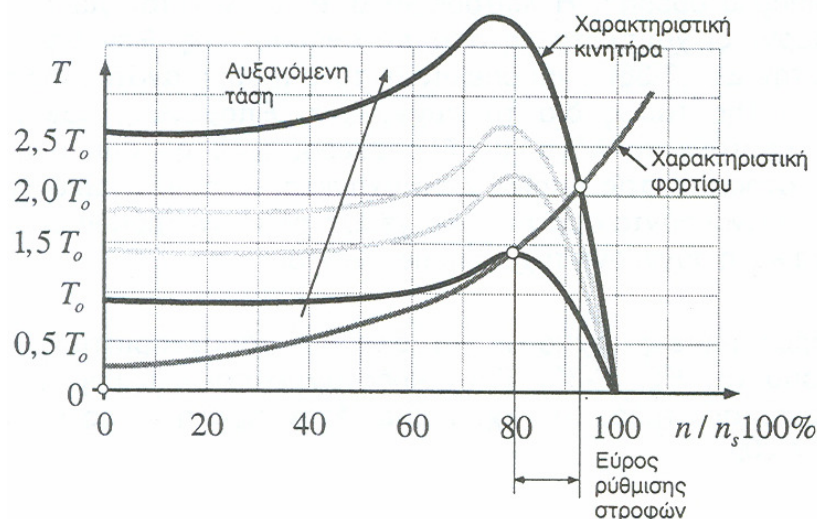
Άρα προκύπτει ότι για να κρατήσουμε το πλάτος της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής σταθερό, αρκεί να διατηρήσουμε σταθερό το λόγο της τάσης προς τη συχνότητα  $V_m / f$ . Επομένως πέρα από τη συχνότητα, οι οδηγίες αυτές μειώνουν αναλογικά και την τάση του στάτη. Εάν η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος της μηχανής, που περιλαμβάνει τόσο τις αντιστάσεις όσο και τις αντιδράσεις, είναι πολύ μικρή, η ροπή ανατροπής εξαρτάται μόνο από το λόγο  $V_m^2 / f$ . Έτσι παραμένει σταθερή, και η μείωση της συχνότητας επιφέρει απλώς τη μετάθεση της χαρακτηριστικής  $(T, n)$  προς τα αριστερά. Αυτό όμως συμβαίνει σπάνια και ως εκ τούτου η μείωση της συχνότητας οδηγεί και σε μείωση της ροπής ανατροπής. Η μέθοδος αυτή είναι επιθυμητό να συνοδεύεται και από μείωση της απορροφούμενης από τη μηχανή ισχύος, αλλιώς με βάση τον ορισμό της τελευταίας  $P_{3\phi} = \sqrt{3} V_{N,ΤΡΟΦ} I_a \cos \phi$ , η μείωση της τάσης θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος και υπερθέρμανση. Επίσης αποφεύγεται να χρησιμοποιείται όταν είναι επιθυμητή η αύξηση της συχνότητας, καθώς η συνεπαγόμενη αύξηση της τάσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αντοχής στη μόνωση των τυλιγμάτων.



Εικόνα 3.14 Μετάθεση χαρακτηριστικής καμπύλης για μείωση συχνότητας και σταθερό λόγο  $V/f$

➤ Με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας

Η μέθοδος αυτήν δεν μεταθέτει τη χαρακτηριστική καμπύλη της μηχανής ως προς τον άξονα των στροφών. Η λειτουργία της βασίζεται στην εξάρτηση της ροπής από το τετράγωνο της τάσης ( $T \sim V^2$ ). Έτσι με αύξηση της τάσης, η χαρακτηριστική «σπρώχνεται» προς τα πάνω, ενώ μειώνεται η ολίσθηση στο σημείο λειτουργίας. Μειονέκτημά της είναι το γεγονός, ότι λόγω της σταθερής σύγχρονης ταχύτητας περιορίζεται το εύρος λειτουργίας με μεταβλητές στροφές. Επιτυγχάνεται με αυτομετασχηματιστές και με οδηγίες μεταβλητού εύρους παλμών (PWM). Οι οδηγίες αυτές, επιτρέπουν τον ταυτόχρονο και ανεξάρτητο έλεγχο της συχνότητας και της τάσης ανάλογα με τη διαμόρφωση ενός σήματος εισόδου, και βρίσκουν ευρεία εφαρμογή. Όταν η μεταβολή της τάσης υπερβαίνει ως ποσοστό το 5% της ονομαστικής ( $|\Delta V| \geq 5\% \cdot V_N$ ) και η συχνότητα παραμένει σταθερή, απαιτείται ανάλογη της παραγόμενης από τη μηχανή ισχύος. Η μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας εφαρμόζεται συνήθως σε κινητήρες χαμηλής ισχύος που κινούν πτερωτές.



Εικόνα 3.15 Μετάθεση χαρακτηριστικής καμπύλης για αύξηση τάσης τροφοδοσίας

### 3.4 Μέθοδοι εκκίνησης κινητήρων

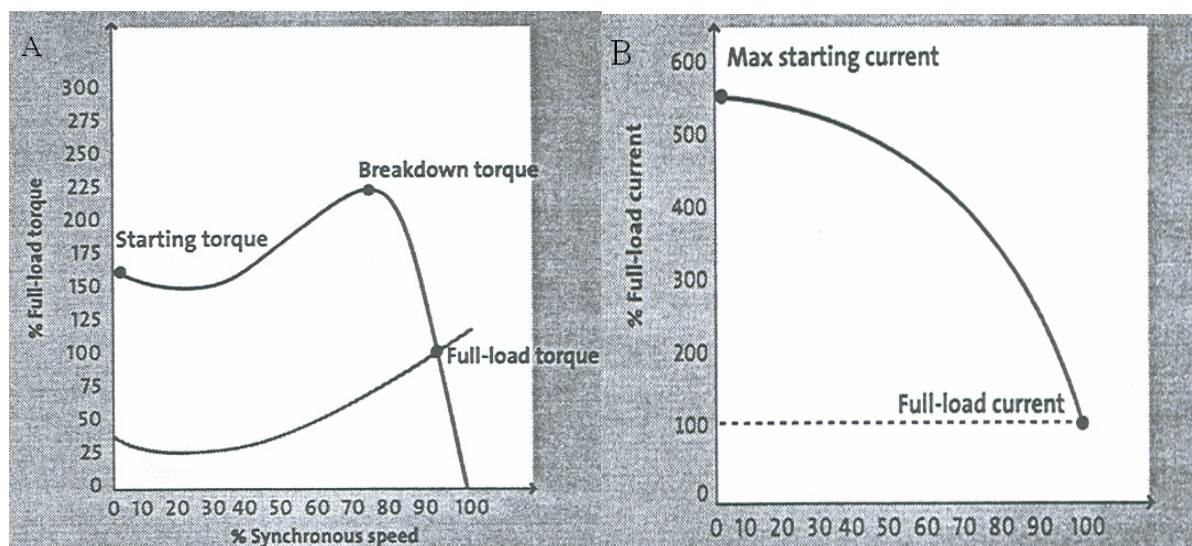
#### 3.4.1 Εκκίνηση με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο (direct on-line [DOL] starting)

Συνίσταται στην απλή σύνδεση του κινητήρα στο δίκτυο, χωρίς την παρεμβολή κάποιας εξειδικευμένης συσκευής που μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του ρεύματος τροφοδοσίας. Πρόκειται για την πιο απλή και αξιόπιστη μέθοδο, με το μικρότερο κόστος, κατά την εφαρμογή της οποίας σημειώνεται η μικρότερη αύξηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κινητήρα και αναπτύσσεται στην άτρακτό του η μεγαλύτερη δυνατή ροπή. Μπορεί με κατάλληλα συστήματα οδήγησης και προστασίας, να εφαρμοσθεί και σε μηχανές που εκκινούν και σταματούν συχνά. Ωστόσο σε κινητήρες μεγάλης ισχύος είναι δυνατό να προκαλέσει βυθίσεις τάσης στο δίκτυο, αφού το ρεύμα εκκίνησης  $I_{ST}$  είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό (συνήθως  $I_{ST} \approx 400 \div 600\% \cdot I_N$ ). Αυτό υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_{ST} = \frac{S_{ST}}{\sqrt{3}V_T} \quad (3.31)$$

, όπου  $V_T$  η τάση τροφοδοσίας και  $S_{ST}$  η φαινόμενη ισχύς εκκίνησης του κινητήρα.

Οι διαταραχές αυτές είναι δυνατό να προκαλέσουν μείωση της κινητήριας ροπής και έτσι να έχουμε ανεπιτυχή εκκίνηση. Στην περίπτωση των επαγωγικών κινητήρων, αν δεν έχουμε υπέρβαση της ροπής ανατροπής και η τάση αποκατασταθεί, ο κινητήρας θα επιταχύνει απορροφώντας ακόμα υψηλότερο ρεύμα και προκαλώντας νέες βυθίσεις τάσης. Εισερχόμαστε δηλαδή σε μία επικίνδυνη περίοδο, που είναι δυνατό να προκαλέσει την επιβράδυνση και το σταμάτημα της μηχανής. Η κατάσταση αυτή όμως να αποβεί πολύ επικίνδυνη και για την σταθερότητα όλου του δικτύου, γι' αυτό και οι διάφορες εταιρείες παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας, θέτουν αυστηρά όρια. Για παράδειγμα η ΔΕΗ επιτρέπει βύθιση τάσης μικρότερη του 5% κατά την εκκίνηση μικρών και μέσων κινητήρων, ενώ για τους μεγαλύτερους τα όρια είναι ακόμα πιο αυστηρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος αυτή να εφαρμόζεται κυρίως σε κινητήρες μικρής ισχύος ( $< 2KW$ ).



Εικόνα 3.16 Ενδεικτικές χαρακτηριστικές α) ροπής β) ρεύματος επαγωγικού κινητήρα 7,5kW της εταιρίας Grundfos με φορτίο αντλία της ίδιας εταιρίας

Διακρίνονται οι ροπές εκκίνησης (starting torque), ανατροπής (breakdown), πλήρους φορτίου (full load) και τα αντίστοιχα ρεύματα

### 3.4.2 Μέθοδοι μείωσης της τάσης τροφοδοσίας

Προκειμένου να αντιμετωπισθεί το μειονέκτημά της απ' ευθείας σύνδεσης στο δίκτυο, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές μέθοδοι εκκίνησης που μειώνουν το ρεύμα της διαδικασίας αυτής. Οι περισσότερες από αυτές στηρίζονται στην ευθεία αναλογία μεταξύ ρεύματος και τάσης ( $I \sim V$ ) και έχουν ως στόχο την με διάφορους τρόπους μείωση της τάσης τροφοδοσίας. Έτσι συμβάλλουν και στη μείωση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, αφού αυτή με βάση τον ορισμό της μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης ( $P_{3\phi} \sim V^2$ ), ενώ αφήνουν τις περισσότερες φορές τον συντελεστή ισχύος ανεπηρέαστο. Η εφαρμογή τους όμως απαιτεί προσοχή, λόγω της εξάρτησης της ροπής και της παραγόμενης μηχανικής ισχύος από το τετράγωνο της τάσης ( $T \sim V^2, P_{MHX} \sim V^2$ ).

#### ➤ Εκκίνηση με εξωτερικούς ροοστάτες (resistor starting)

Χρησιμοποιείται κυρίως στους επαγωγικούς κινητήρες με τυλιγμένους δρομείς, ενώ μερικές φορές εφαρμόζεται και σε μικρής ισχύος μηχανές με δρομείς κλωβού. Μέσω των ροοστατών, αυξάνουμε την αντίσταση του κυκλώματος του κινητήρα, επιτυγχάνοντας αύξηση του συντελεστή ισχύος, μείωση του ρεύματος και αύξηση της ροπής εκκίνησης. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η τελευταία είναι ίση με την τιμή της ροπής ανατροπής. Η μετάβαση στην κανονική σύνδεση με το δίκτυο, μπορεί να γίνει είτε άμεσα είτε σταδιακά. Στη δεύτερη περίπτωση, υπάρχει μεταβατικό στάδιο στο οποίο το ρεύμα τροφοδοσίας διαρρέει τμήμα των αντιστάσεων. Έτσι εξασφαλίζεται πιο ομαλή διακύμανση ρεύματος και ροπής, με τίμημα ένα πιο πολύπλοκο κύκλωμα. Καθ' όλη τη φάση ξεκινήματος – επιτάχυνσης το κύκλωμα τροφοδοσίας του κινητήρα δεν είναι ποτέ πλήρως ανοικτό, έχουμε δηλαδή κλειστή μετάβαση (closed transition). Μειονέκτημά της μεθόδου αποτελεί η μείωση της απόδοσης της μηχανής στο σημείο λειτουργίας και η απώλεια ενέργειας στους ροοστάτες.

#### ➤ Εκκίνηση με επαγωγέα (reactor starting)

Πρόκειται για μία απλή μέθοδο κλειστής μετάβασης όμοια με την προηγούμενη, με την διαφορά ότι μεταξύ τροφοδοσίας και κινητήρα παρεμβάλλεται ένα πηνίο. Η παραγόμενη θερμότητα είναι μικρή με αποτέλεσμα η απόδοση της μηχανής να είναι καλύτερη συγκριτικά με την προηγούμενη μέθοδο, η αύξηση τάσης – ροπής – ρεύματος γίνεται ομαλά, αλλά μειώνεται ο συντελεστής ισχύος. Χρησιμοποιείται κυρίως σε μεσαίες και μεγάλες μηχανές.

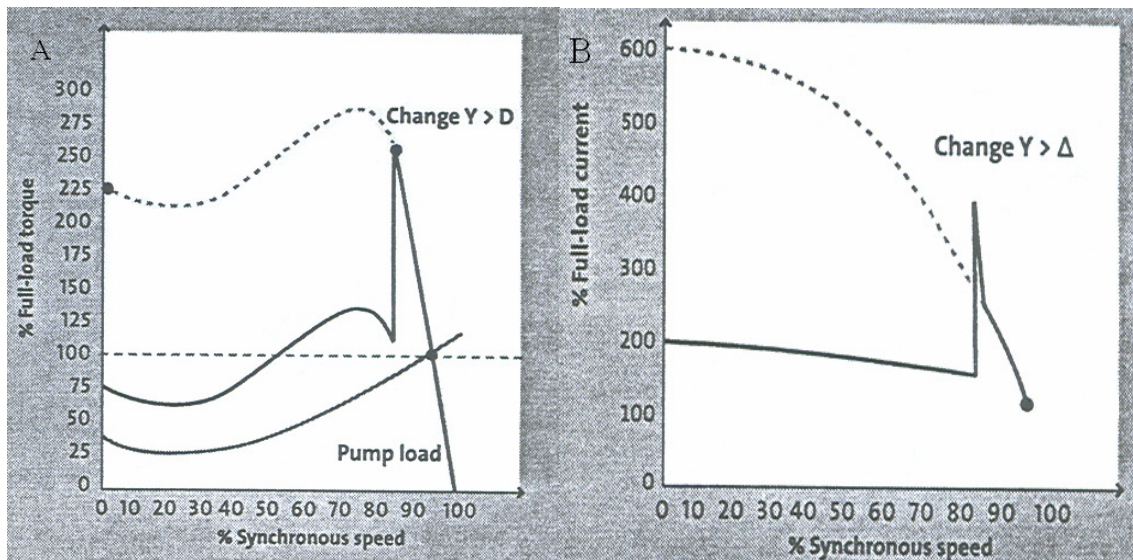
#### ➤ Εκκίνηση με σταδιακή τροφοδότηση των τυλιγμάτων (part-winding starting)

Πρόκειται για μια μέθοδο κλειστής μετάβασης που χρησιμοποιείται σπάνια. Προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι ο εφοδιασμός του κινητήρα με δύο ή περισσότερα τυλίγματα στάτη τα οποία συνδέονται στην τροφοδοσία σταδιακά. Έτσι κατά την εκκίνηση το απορροφώμενο ρεύμα και η παραγόμενη ροπή είναι μειωμένα,

ενώ το μέγιστο ρεύμα που θα προκύψει κατά τη φάση της επιτάχυνσης, είναι μειωμένο σε κάποιο βαθμό συγκριτικά με το πολύ υψηλό κανονικό ρεύμα εκκίνησης. Εκτελείται ανάλογα με το μέγεθος, την ταχύτητα περιστροφής και την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα σε δύο ή περισσότερα βήματα, υπό τον όρο συντονισμού των τυλιγμάτων, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία της μηχανής, και φυσικά ότι η παραγόμενη κάθε στιγμή ροπή μπορεί να επιταχύνει το φορτίο. Κύριο μειονεκτήματά της είναι το αυξημένο κόστος της μηχανής και ο εκ κατασκευής καθορισμός των χαρακτηριστικών της χωρίς δυνατότητα αλλαγής τους.

➤ Εκκίνηση αστέρα – τριγώνου (star-delta [  $\Upsilon - \Delta$  ] starting)

Εφαρμόζεται σε επαγωγικούς κινητήρες στους οποίους τα τυλίγματα του στάτη είναι σύνδεσης τριγώνου και ιδιαίτερα όταν αυτοί κινούν φορτία υψηλής αδράνειας. Βάση της μεθόδου αυτής, ο κινητήρας εκκινεί έχοντας τα τυλίγματα του στάτη σε σύνδεση αστέρα. Σε κάποια χρονική στιγμή που επιλέγουμε εμείς, ένας διακόπτης αστέρας – τριγώνου αλλάζει τη συνδεσμολογία σε σύνδεση τριγώνου. Δηλαδή το ρεύμα και η ροπή ακολουθούν τη χαρακτηριστική αστέρα και στη συνέχεια μεταπηδούν στη χαρακτηριστική τριγώνου. Σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει στην ενότητα 3.3.5, στη σύνδεση αστέρα η ανά φάση τάση των τυλιγμάτων είναι μειωμένη, με αποτέλεσμα το ρεύμα εκκίνησης να είναι το ίδιο με το 1/3 του ρεύματος εκκίνησης σε σύνδεση τριγώνου ( $I_{ST-\Upsilon} = I_{ST-\Delta} / 3 = I_{ST-DOL} / 3$ ). Όμως ανάλογα μειωμένη τιμή παρουσιάζει και η ροπή εκκίνησης αστέρα ( $T_{\Upsilon} = T_{\Delta} / 3$ ), γι' αυτό είναι απαραίτητο η τελευταία να είναι μεγαλύτερη της ροπής του φορτίου σε ακινησία. Επιπλέον ένα σημείο που χρήζει προσοχής, είναι το χρονικό σημείο της μετάβασης από τη μία σύνδεση στην άλλη. Αν αυτή λάβει χώρα σε χαμηλή ταχύτητα, λόγω των υψηλών τιμών του απορροφόμενου ρεύματος σύνδεσης δέλτα, δεν αποκλείονται βυθίσεις τάσης στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, κατά τη μετάβαση από τη μία σύνδεση στην άλλη ο κινητήρας αποσυνδέεται από την τροφοδοσία. Πρόκειται, δηλαδή, για ανοικτή μετάβαση (open transition). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μηχανή να επιβραδύνεται στιγμιαία. Προκειμένου να επιταχύνει, όταν επανασυνδεθεί απορροφά αυξημένη ποσότητα ρεύματος. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται σαν ένας υψηλός παλμός ρεύματος κατά τις πρώτες στιγμές της σύνδεσης δέλτα, του οποίου η τιμή ξεπερνά την κανονική τιμή που αναλογεί στη σύνδεση αυτή. Τέλος η μέθοδος αυτή συνοδεύεται από αυξημένες απώλειες και επομένως αυξημένη θερμότητα που πρέπει να απαχθεί από τη μηχανή.



Εικόνα 3.17 Ενδεικτικές χαρακτηριστικές α) ροπής β) ρεύματος επαγωγικού κινητήρα 7,5kW της εταιρίας Grundfos με φορτίο αντλία της ίδιας εταιρίας Με διακεκομμένη γραμμή οι καμπύλες για εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο

➤ Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή (auto-transformer starting)

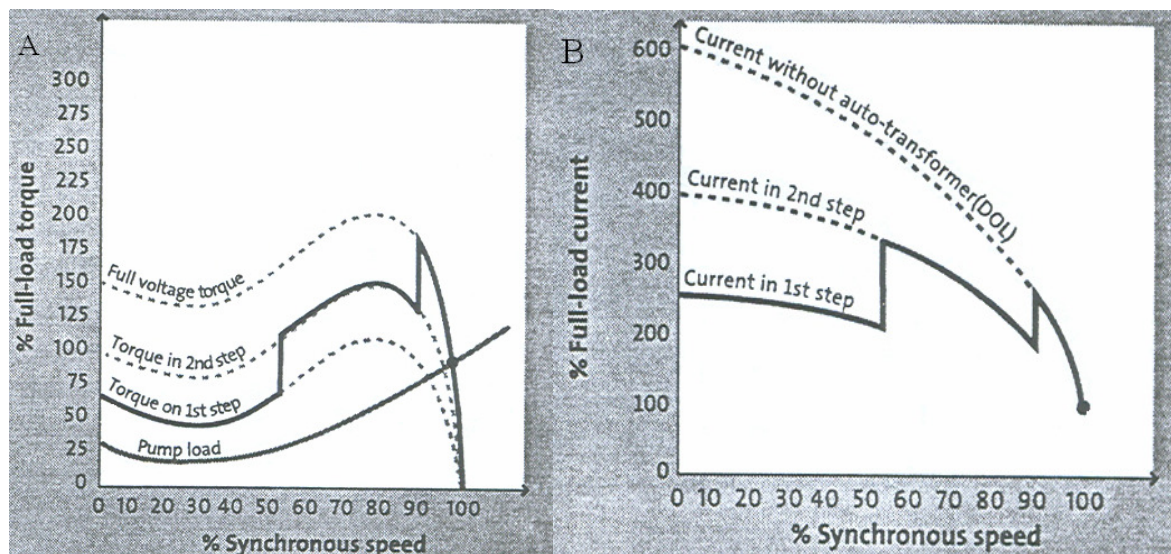
Περιλαμβάνει τη χρήση αυτομετασχηματιστή σε σειρά με τον κινητήρα. Ο αυτομετασχηματιστής είναι ένας τροποποιημένος μετασχηματιστής, στον οποίο τα δύο τυλίγματα έρχονται σε επαφή και ενδιάμεσά τους υπάρχει λήψη τάσης. Παρουσιάζει μικρότερη εσωτερική αντίσταση και προσφέρεται για μικρότερες μεταβολές τάσης σε σχέση με έναν κανονικό μετασχηματιστή. Η πρωτεύουσα τάση  $V_1$  συνδέεται με τη δευτερεύουσα  $V_2$  με τη σχέση :

$$V_1 = V_2 + V_{CA} \quad (3.32)$$

Η πρωτεύουσα τάση είναι η τάση τροφοδοσίας, ενώ η δευτερεύουσα τάση για την οποία ισχύει  $V_2 = 0,5 \div 0,8 \cdot V_1$  εφαρμόζεται αρχικά στους ακροδέκτες του κινητήρα. Σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους μείωσης τάσης, εδώ το ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης ( $I \sim V^2$ ), με αποτέλεσμα το ρεύμα και η ροπή να εμφανίζουν μία ευθεία αναλογία ( $I \sim T$ ). Κατά την εκκίνηση η τάση στη μηχανή είναι μειωμένη και ως εκ τούτου είναι μειωμένα το ρεύμα και η ροπή. Στη συνέχεια ο αυτομετασχηματιστής αποσυνδέεται και η μηχανή συνδέεται απ' ευθείας με την τροφοδοσία. Η μετάβαση αυτή μπορεί να είναι είτε ανοικτή είτε κλειστή. Στην πρώτη περίπτωση ο κινητήρας, αποσυνδέεται και επιβραδύνεται στιγμιαία, με αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλού παλμού ρεύματος κατά την επανασύνδεσή του στο δίκτυο. Στη δεύτερη, το ρεύμα διαρρέει ένα τμήμα του αυτομετασχηματιστή προτού φθάσει στον κινητήρα και σε καμία στιγμή δεν παρατηρείται απώλεια τροφοδοσίας αυτού. Η μετάβαση γίνεται σε δύο βήματα και συνεπακόλουθα η τάση, η ροπή και το ρεύμα αυξάνουν πιο ομαλά. Για το λόγο αυτό, είναι σπάνια η υιοθέτηση ανοικτής μετάβασης. Όπως έχουμε αναφέρει η μεταβολή της τάσης, δεν προκαλεί αλλαγή της μορφής της χαρακτηριστικής, αλλά μόνο καθ' ύψος μετατόπιση αυτής. Έτσι η ροπή και το ρεύμα ακολουθούν τη καμπύλη που αντιστοιχεί στην εκάστοτε τιμή τάσης, μεταπηδούν στην επόμενη καμπύλη με κατακόρυφα άλματα και τελικά ακολουθούν την καμπύλη πλήρους τάσης μέχρι να φθάσουν στις ονομαστικές τους τιμές. Η στιγμή

μετάβασης από την μία τάση στην άλλη, καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής.

Με τη μέθοδο αυτή παράγεται η υψηλότερη ροπή ανά Ampere έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας συγκριτικά με τη χρήση ροοστάτη, επαγωγέα ή με την ηλεκτρονική ρύθμιση τάσης. Ωστόσο, λόγω της εξάρτησης της ροπής από το τετράγωνο της τάσης, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή τόσο της τάσης εκκίνησης, όσο και της χρονικής στιγμής αλλαγής τάσης, ώστε η παραγόμενη ροπή να είναι υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου. Ακόμα, και εδώ παρατηρείται υψηλός παλμός ρεύματος κατά την μετάβαση στην πλήρη τάση. Επιπλέον παρατηρείται μείωση του συντελεστή ισχύος του κινητήρα.



Εικόνα 3.18 Ενδεικτικές χαρακτηριστικές α) ροπής β) ρεύματος επαγωγικού κινητήρα 7,5kW της εταιρίας Grundfos με φορτίο αντλία της ίδιας εταιρίας

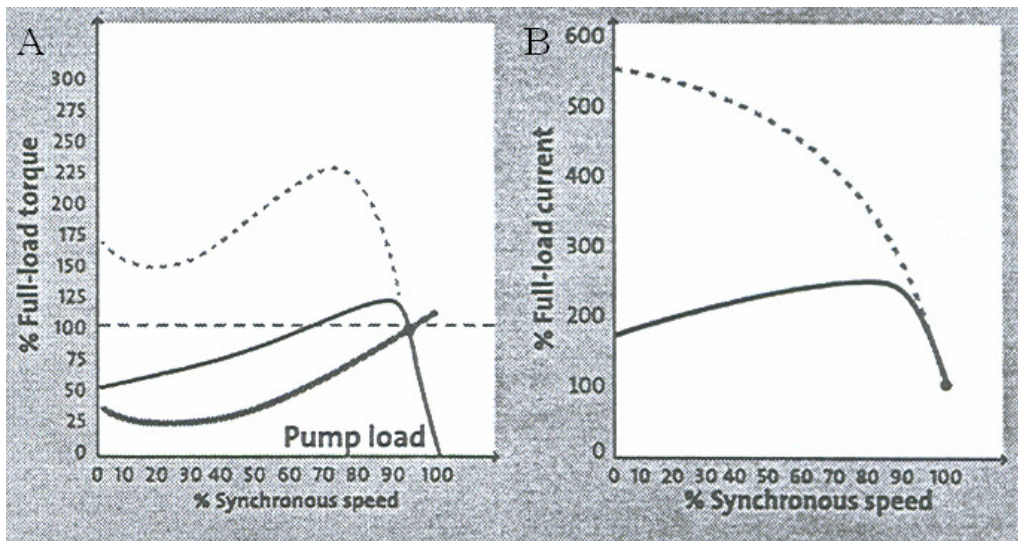
Η μετάβαση στην πλήρη τάση πραγματοποιείται σε 2 βήματα. Με διακεκομμένη γραμμή, οι αντιστοιχούσες σε κάθε τάση καμπύλες για εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο

➤ Εκκίνηση με ηλεκτρονική ρύθμιση τάσης (soft-starting)

Πραγματοποιείται με τη χρήση διατάξεων (soft-starters) που φέρουν θυρίστορ, αλλά έχουν μικρότερο κόστος σε σύγκριση με τους κυκλομετατροπείς και τους αντιστροφείς. Το κύκλωμα των ημιαγωγών επιδρά στη γωνία φάσης της τάσης και η λειτουργία του καθορίζεται από ένα κύκλωμα ελέγχου. Στο ξεκίνημα η τάση είναι μειωμένη με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένη τιμή του ρεύματος και της ροπής εκκίνησης. Στη συνέχεια η τάση αυξάνεται σταδιακά μέχρι την ονομαστική τιμή της, γεγονός που οδηγεί στην αποφυγή υψηλών παλμών ρεύματος και ροπής. Η επιλογή του χρόνου που θα διαρκέσει το στάδιο αυτό, όπως και της αρχικής τάσης, εναπόκειται στην απόφαση των χειριστών της εγκατάστασης. Συνήθως επιλέγεται αρχική τάση ώστε να ισχύει  $I_{ST-DOL} = 2 \div 3 \cdot I_{ST-SOFT}$ . Η ροπή αυξάνει από την αρχική τιμή, μέχρι τη ροπή ανατροπής ( $n \approx 0,90n_s$ ) και στη συνέχεια κατέρχεται. Όμοια, το απορροφόμενο ρεύμα αυξάνεται μέχρι ένα μέγιστο σημείο ( $n \approx 0,80 \div 0,90n_s$ ) και στη συνέχεια παίρνει την ονομαστική τιμή. Επιπλέον οι συγκεκριμένες διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον έλεγχο του σταματήματος της μηχανής. Και η μέθοδος αυτή απαιτεί προσεκτική επιλογή των παραμέτρων, ώστε να υπερκαλύπτεται



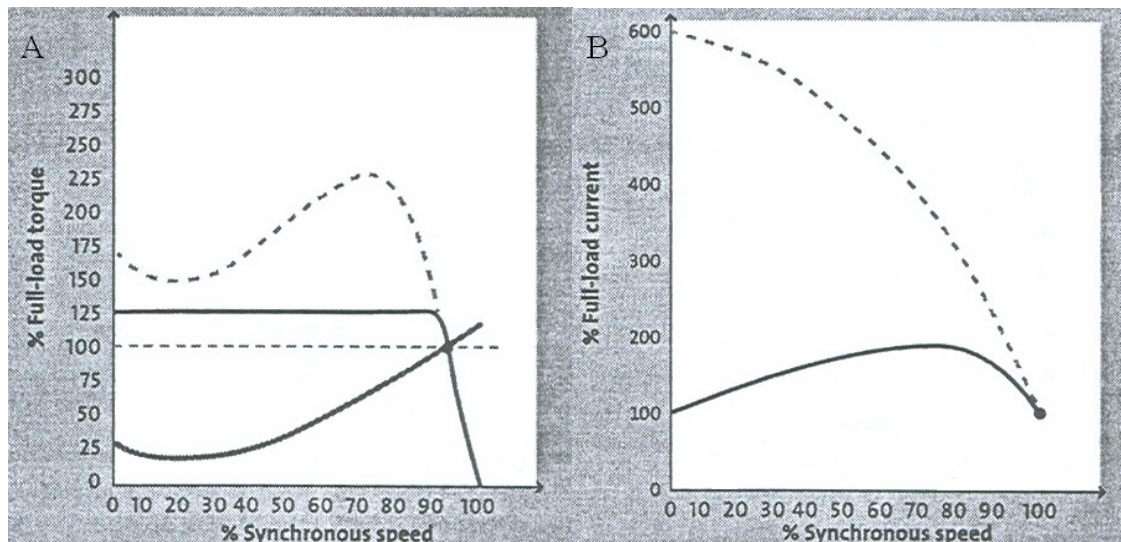
η απαιτούμενη από το φορτίο ροπής. Μειονέκτημά της είναι η πιθανότητα εισαγωγής υψηλών αρμονικών ρευμάτων στο δίκτυο και η ανάπτυξη υψηλής θερμότητας στα θυρίστορ που μειώνει ελαφρά την απόδοση του συστήματος.



Εικόνα 3.19 Ενδεικτικές χαρακτηριστικές α) ροπής β) ρεύματος επαγωγικού κινητήρα 7,5kW της εταιρίας Grundfos με φορτίο αντλία της ίδιας εταιρίας Με διακεκομμένη γραμμή οι καμπύλες για εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο

### 3.4.3 Εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός, ότι μεταβάλλοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα και επομένως έχουμε μετάθεση της χαρακτηριστικής  $(T, n)$  της μηχανής. Δηλαδή ο κινητήρας περιστρέφεται σε σύγχρονη ταχύτητα καθ' όλη τη φάση ξεκινήματος και επιτάχυνσης. Ως εκ τούτου, η παραγόμενη ροπή παρουσιάζει μικρή διακύμανση και είναι κοντά στην ονομαστική της τιμή ( $T \approx T_N$ ), ενώ το απορροφώμενο ρεύμα ξεκινά από την ονομαστική του τιμή ( $I_{ST} = I_N$ ), αυξάνεται σταδιακά, εμφανίζει μία μέγιστη τιμή ( $I_{MAX} \approx 1,5 \div 2 \cdot I_N$ ) για ταχύτητα περιστροφής  $n \approx 0,80n_s$ , και πέφτει πάλι στην ονομαστική τιμή. Έτσι ο λόγος ροπής ανά Ampere έντασης ρεύματος είναι πολύ υψηλός. Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής προβλέπει την χρήση αντιστροφών ή κυκλομετατροπέων. Λόγω της δυνατότητας που παρέχουν οι διατάξεις αυτές για έλεγχο των στροφών του κινητήρα καθ' όλον τον κύκλο λειτουργίας, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, περιορίζοντας τις διατάξεις soft-starting. Έχουν υψηλότερο κόστος από αυτές και παρουσιάζουν ίδια μειονεκτήματα, δηλαδή την ανάπτυξη θερμότητας στα θυρίστορ και την πιθανότητα εισαγωγής υψηλών αρμονικών στο δίκτυο ακόμα και μετά τη φάση της επιτάχυνσης. Χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα, ενώ και το μέγεθος των εκκινήτων είναι μεγάλο.



Εικόνα 3.20 Ενδεικτικές χαρακτηριστικές α) ροπής β) ρεύματος επαγωγικού κινητήρα 7,5kW της εταιρίας Grundfos με φορτίο αντλία της ίδιας εταιρίας  
Με διακεκομμένη γραμμή οι καμπύλες για εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο

Ακολουθεί μία αρκετά εκτεταμένη περιγραφή των διατάξεων μεταβολής συχνότητας.

- Ο αντιστροφέας (inverter)

Ο αντιστροφέας τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα και παρέχει ρεύμα 1 ή 3 φάσεων, επιθυμητής συχνότητας, με τη βοήθεια κυκλώματος από θυρίστορ. Με τον όρο θυρίστορ χαρακτηρίζουμε μία ομάδα ημιαγωγών που αποτελούνται από 4 στρώματα υλικού. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτή μίας διόδου, δηλαδή απαγορεύουν τη ροή ρεύματος προς μία κατεύθυνση μέχρι μία μέγιστη τιμή τάσης (peak inverse voltage), αλλά επιπλέον επιτρέπουν τη ροή μόνο όταν η τάση ξεπεράσει μία καθορισμένη τιμή που καλείται breakover voltage. Ο πιο συνηθισμένος τύπος τους είναι οι ανορθωτές ελεγχόμενου πυριτίου (SCR). Αυτοί έχουν το χαρακτηριστικό να μεταβάλουν την τάση breakover αντιστρόφως ανάλογα με την τιμή ενός ρεύματος που ρέει στην έξοδο της διόδου. Έτσι δίνουν την δυνατότητα, αν η χαρακτηριστική τάση του επιλεγόμενου θυρίστορ είναι μεγαλύτερη από την τάση του κυκλώματος, να άγουν μόνο όταν δεχθούν το ρεύμα. Το θυρίστορ άγει όσο το ρεύμα του κυκλώματος είναι μεγαλύτερο από μία συγκεκριμένη τιμή, ακόμα και αν το ρεύμα διόδου πάψει να υφίσταται. Τελευταία χρησιμοποιούνται στους αντιστροφείς όλο και περισσότερο διπολικά τρανζίστορ μεμονωμένης θύρας (IGBT).

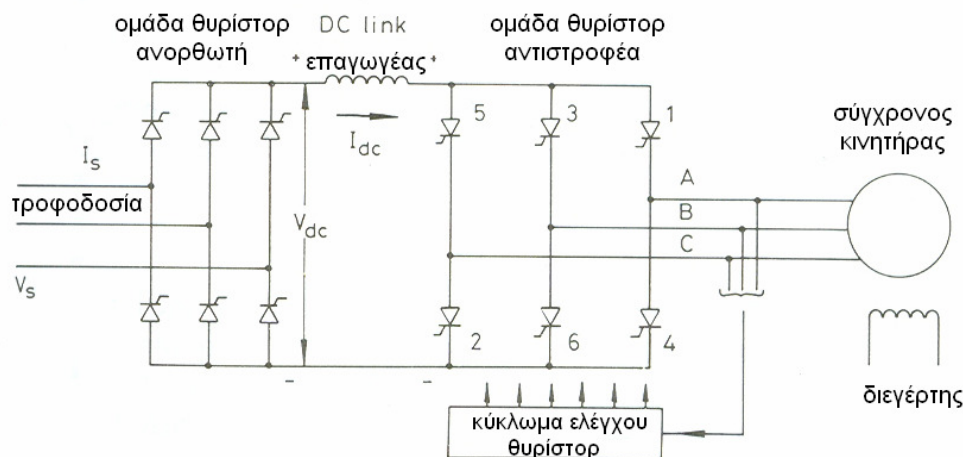
Ένας τριφασικός αντιστροφέας αποτελείται από 6 θυρίστορ. Κάθε χρονική στιγμή, 3 από αυτά άγουν ρεύμα και 3 δεν άγουν. Όσο πιο μικρός ο χρόνος κατά τον οποίο άγουν τόσο πιο μεγάλη είναι η συχνότητα της παραγόμενης τάσης. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η παραγωγή τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος ελεγχόμενης συχνότητας. Υπάρχουν τρία είδη αντιστροφέων : αυτοί που επιδρούν στο ρεύμα (current source inverters), αυτοί που επιδρούν στη τάση (voltage source inverters) και οι αντιστροφείς μεταβλητού εύρους παλμών (PWM inverters) που επιδρούν ανεξάρτητα τόσο στην τάση όσο και στη συχνότητα. Η εντολή για τη ρύθμιση της λειτουργίας των θυρίστορ, μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές π.χ. ένα ροοστάτη που στέλνει μία τάση ελέγχου, ένα PLC ή και H/Y. Η ρύθμιση στροφών που επιτυγχάνουν είναι περίπου 1:10, μπορούν να ρυθμίσουν στροφές μέχρι  $\pm 3\%$  των στροφών βάσης, χωρίς όμως να δύνανται να αποδώσουν την ονομαστική

ροπή σε πολύ χαμηλές στροφές. Χρησιμοποιούνται πέρα από την τροφοδοσία του στάτη και για να απορροφούν ισχύ από το δρομέα επαγωγικών μηχανών με τυλιγμένο δρομέα κατά τη λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης και το κόστος τους θεωρείται μεσαίο.

Συχνά ο αντιστροφέας συνδέεται με ανορθωτική διάταξη (rectifier), που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, εξουδετερώνοντας την ανάγκη ύπαρξης πηγής συνεχούς ρεύματος. Ο ανορθωτής μπορεί να είναι είτε ελεγχόμενος πυριτίου (SCR) είτε καταμητής (chopper) και αποτελείται από θυρίστορ ή διόδους. Στη δεύτερη περίπτωση, παράγεται τάση τύπου PWM. Η όλη διάταξη αντιστροφή – ανορθωτή καλείται μετατροπέας (converter) και συνήθως συνοδεύεται από φίλτρα για τον περιορισμό των αρμονικών της τάσης που παράγεται. Μερικές άλλες φορές οι αντιστροφείς διαθέτουν συσσωρευτή συνεχούς ρεύματος, ώστε να συνεχίζεται η λειτουργία της μηχανής και μετά από διακοπή της τροφοδοσίας ρεύματος.

- Ο κυκλομετατροπέας (cycloconverter)

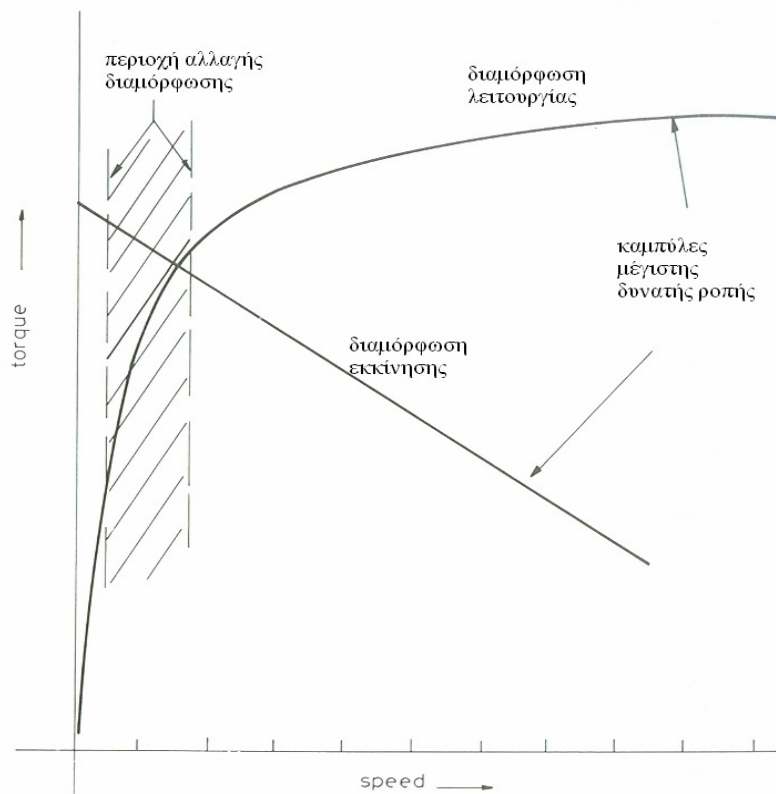
Πρόκειται για διάταξη που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερού πλάτους και συχνότητας και παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα 3 φάσεων επιθυμητής συχνότητας και πλάτους. Ο κυκλομετατροπέας είναι πιο πολύπλοκος από τον αντιστροφή και αποτελείται από μία τριάδα μετατροπέων, κάθε ένας από τους οποίους δρα σε μία φάση της τάσης. Σε κάθε μετατροπέα τα θυρίστορ χωρίζονται σε δύο ομάδες, την αρνητική και τη θετική, καθεμία από τις οποίες αποτελείται από 6 θυρίστορ πυριτίου (SCR). Σε συνήθειες συνθήκες λειτουργίας, η μία λειτουργεί ως ανορθωτής και η άλλη ως αντιστροφή. Ο έλεγχος των θυρίστορ του δεύτερου γίνεται με χρήση της τάσης που εξέρχεται από τον κυκλομετατροπέα. Διακρίνονται δύο είδη κυκλομετατροπέων : οι non-circulating και οι circulating current cycloconverters. Στους πρώτους οι δύο ομάδες δεν άγουν ταυτόχρονα και η κυματομορφή της εξόδου κάθε φάσης καθορίζεται από τη μεταβολή της καθυστέρησης με την οποία αυτές άγουν. Στους δεύτερους συμβαίνει το αντίθετο και επιπλέον μεταξύ των ομάδων παρεμβάλλονται επαγωγείς. Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο, καθώς παρουσιάζει λιγότερα προβλήματα αρμονικών, είναι απαλλαγμένη της νεκρής περιόδου μετάβασης από την θετική στην αρνητική ομάδα και δύναται να έχει αυξημένη συχνότητα εξόδου.



Εικόνα 3.21 Οδήγηση κυκλομετατροπέα σύγχρονου κινητήρα

Η διάταξη επιλέγει κάθε στιγμή το συνδυασμό των φάσεων που ομοιάζουν περισσότερο με την επιθυμητή κυματομορφή της τάσης με αποτέλεσμα η κυματομορφή εξόδου να είναι ακριβής σε μεγάλο βαθμό, ενώ η κυματομορφή του ρεύματος προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την ημιτονοειδή μορφή. Έτσι η παραγωγή ροπής είναι πολύ ομαλή για όλο το εύρος των στροφών. Ωστόσο στα μειονεκτήματά των διατάξεων αυτών, συγκαταλέγεται η απαίτηση η συχνότητα τροφοδοσίας να είναι 3-4 φορές υψηλότερη από την επιδιωκόμενη μέγιστη συχνότητα εξόδου, π.χ. όταν η πρώτη είναι 50Hz, η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να εφαρμοσθεί στον κινητήρα είναι 16,67Hz. Δηλαδή τίθεται ένα άνω όριο στη σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα. Για το λόγο αυτό οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλής στροφές και υψηλή ροπή.

Στους σύγχρονους κινητήρες, χρησιμοποιούνται κυρίως circulating current cycloconverters, όμως η μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών διαφέρει σε σχέση με αυτές της εικόνας 3.20. Αυτό συμβαίνει γιατί σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, ο κινητήρας λειτουργεί σε χαμηλές τιμές τάσης που δεν μπορούν να διασφαλίσουν τον ομαλό έλεγχο των θυρίστορ του αντιστροφέα. Έτσι υπάρχει μία περίοδος (starting mode), στην οποία ο έλεγχος αυτός γίνεται με χρήση της διαρκούς ικανότητας των θυρίστορ του ανορθωτή να άγουν. Ωστόσο η εφαρμογή της τεχνικής αυτής, απαιτεί τη χρήση ειδικών αισθητήρων ώστε να γνωρίζουμε την ακριβή θέση της ατράκτου, τουλάχιστον όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε ακινησία, και να τροφοδοτούνται κάθε φορά εκείνα τα θυρίστορ του αντιστροφέα που θα συμβάλλουν στην παραγωγή της μέγιστης δυνατής ροπής. Επειδή η ροπή που παράγεται με τον τρόπο αυτό, σταδιακά μειώνεται καθώς η μηχανή επιταχύνεται, γρήγορα έχουμε αλλαγή της διαμόρφωσης ελέγχου των θυρίστορ σε αυτή της κανονικής λειτουργίας ( $n = 0,05 \div 0,20 \cdot n_s$ ).



Εικόνα 3.22 Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών κατά την εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας

### 3.4.4 Σύνοψη

Όλες οι εναλλακτικές μέθοδοι που προαναφέρθηκαν προκαλούν σοβαρή αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κινητήρα. Επομένως όποια και αν επιλεγθεί, είναι αναγκαίο το ξεκίνημα και η επιτάχυνση της μηχανής να μην διαρκέσουν μεγάλο χρονικό διάστημα, προκειμένου να αποφευχθεί υπερθέρμανση των τυλιγμάτων της. Όταν ο κινητήρας κινεί αντλία, ως πιο κατάλληλες μέθοδοι ξεκινήματος θεωρούνται η χρήση οδήγησης μεταβλητής συχνότητας και η χρήση ηλεκτρονικού ρυθμιστή τάσης, καθώς λόγω της ομαλής μεταβολής ροπής και ρεύματος σε αυτές, περιορίζεται η πιθανότητα υδραυλικού πλήγματος κατά την εκκίνηση. Εν κατακλείδι, πρόκειται για ένα θέμα με μεγάλο ενδιαφέρον, και συνεχώς νέες τεχνικές εκκίνησης δοκιμάζονται σε πειραματικό στάδιο. Ακολουθεί πίνακας όπου συνοψίζονται οι επιδράσεις κάθε μεθόδου στη ροπή και το ρεύμα εκκίνησης.

| Μέθοδος εκκίνησης             | Τάση κινητήρα          | Ροπή εκκίνησης  | Ρεύμα εκκίνησης                           |
|-------------------------------|------------------------|-----------------|---|
| Απ' ευθείας στο δίκτυο        | 1                      | 1               | 1   |
| Με ροοστάτη                   | $a$ ( $\sim 0,8$ )     | $a^2$           | $a$                                       |
| Με επαγωγέα                   | $a$ ( $0,8 \div 0,4$ ) | $a^2$           | $a$                                       |
| Αστέρας – τρίγωνο             | 1                      | 0,33            | 0,33                                      |
| Με αυτομετασχηματιστή         | $a$ ( $0,8 \div 0,5$ ) | $a^2$           | $a^2$                                     |
| Ηλεκτρονική ρύθμιση τάσης     | $a$ (μεταβλητό)        | $a^2$           | $a$                                       |
| Οδήγηση μεταβλητής συχνότητας | μεταβλητή              | > ροπής φορτίου | $1 \div 1,5$ του ρεύματος πλήρους φορτίου |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Η ΑΝΤΛΗΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

#### 4.1 Εισαγωγή

Με τον όρο αντλητική εγκατάσταση, περιγράφουμε μία εγκατάσταση η οποία περιλαμβάνει μία ή περισσότερες αντλίες που διακινούν ένα υγρό μεταξύ δύο δεξαμενών, τις μηχανές κίνησης των αντλιών και το σύνολο των σωληνώσεων που συνδέουν τις δεξαμενές με την αντλία. Επιπλέον διαθέτει λοιπό ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό εξοπλισμό, ο οποίος είναι απαραίτητος για τη λειτουργία, την ασφάλεια και τη συντήρησή της.

Δύο χαρακτηριστικά μεγέθη της εγκατάστασης, είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού στις δύο δεξαμενές, η οποία μετράται ως προς μία κοινή στάθμη αναφοράς. Συνήθως ως στάθμη αναφοράς χρησιμοποιείται η στάθμη της θάλασσας. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε πάλι, ότι ως δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί ένας ποταμός, ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ένα δοχείο πίεσης ή απλά μία ανοικτή δεξαμενή. Ανάλογα με το αν η δεξαμενή είναι ανοικτή ή κλειστή, διαφοροποιείται και η στατική πίεση που δέχεται το υγρό στην επιφάνειά του. Στην περίπτωση απλής ανοικτής δεξαμενής, η στατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση  $H_B$ , που ως γνωστόν εξαρτάται από το υψόμετρο στο οποίο αναφερόμαστε. Η δεξαμενή που βρίσκεται σε χαμηλότερο ύψος και από την οποία το υγρό αναρροφάται, ονομάζεται δεξαμενή αναρρόφησης. Η σωλήνωση που συνδέει την αντλία με τη δεξαμενή αυτή, ονομάζεται σωλήνωση αναρρόφησης. Η δεξαμενή που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος και αποτελεί τον επιθυμητό προορισμό του υγρού καλείται δεξαμενή κατάθλιψης, ενώ η σωλήνωση που την συνδέει με την αντλία σωλήνωση κατάθλιψης.

Ως γεωμετρικό ύψος αναρρόφησης  $h_e$  ορίζεται η διαφορά :

$$h_e = z_a - z_E \quad (4.1)$$

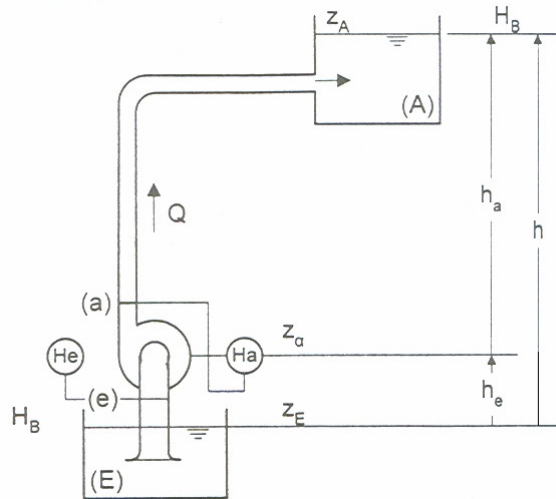
, όπου  $z_a$  η στάθμη της αντλίας και  $z_E$  η στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης. Η στάθμη της αντλίας συμπίπτει με τη στάθμη της ατράκτου της αν αυτή είναι οριζόντια ή με τη στάθμη της διατομής εισόδου της πτερωτής αν η άτρακτος είναι κατακόρυφη. Αντίστοιχα ορίζεται το γεωμετρικό ύψος κατάθλιψης  $h_a$  από τη σχέση :

$$h_a = z_A - z_a \quad (4.2)$$

, όπου  $z_A$  η στάθμη της δεξαμενής κατάθλιψης.

Το γεωμετρικό ύψος ανύψωσης  $h$  ορίζεται ως η διαφορά της στάθμης των δύο δεξαμενών, και είναι ανεξάρτητο από τη στάθμη τοποθέτησης της αντλίας :

$$h = z_A - z_E = h_e + h_a \quad (4.3)$$



Εικόνα 4.1 Διάταξη απλού αντλιοστασίου

## 4.2 Καθορισμός σημείου λειτουργίας

### 4.2.1 Η χαρακτηριστική της σωλήνωσης

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli, στις διατομές εισόδου (e) και εξόδου (a) της αντλίας η ολική πίεση αντίστοιχα ισούται με :

$$H_{oe} = H_e + \frac{c_e^2}{2g} + z_e = (H_B + z_E) - \delta h_{fEe} \quad (4.4)$$

$$H_{oa} = H_a + \frac{c_a^2}{2g} + z_a = (H_B + z_A) + \delta h_{fAa} \quad (4.5)$$

, όπου  $H_e$ ,  $H_a$  η στατική πίεση στις διατομές εισόδου και εξόδου, ενώ  $\delta h_{fEe}$  και  $\delta h_{fAa}$  οι υδραυλικές απώλειες στις σωληνώσεις αναρρόφησης και κατάθλιψης αντίστοιχα. Επίσης έχει θεωρηθεί ότι πρόκειται για μεγάλες δεξαμενές στις οποίες η κινητική ενέργεια του υγρού είναι αμελητέα.

Από τις δύο προηγούμενες εξισώσεις προκύπτει το ολικό ύψος της αντλίας  $H$  :

$$H = H_{oa} - H_{oe} = (z_A - z_E) + (\delta h_{fAa} + \delta h_{fEe}) = h + \delta h_{fEA} \quad (4.6)$$

, όπου  $\delta h_{fEA}$  οι ολικές απώλειες στις σωληνώσεις της εγκατάστασης. Δηλαδή η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που προσδίδει η αντλία στο υγρό είναι ίση με το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για την ανύψωσή του και της ενέργειας που δαπανάται κατά τη ροή του εντός της σωλήνωσης.

Η τελευταία οφείλεται στις υδραυλικές απώλειες, που διακρίνονται στις γραμμικές και τις εντοπισμένες απώλειες. Οι γραμμικές απώλειες οφείλονται στη συνεκτικότητα του ρευστού, είναι ανάλογες του μήκους του αγωγού και εκφράζονται από τη σχέση των Darcy – Weisbach (σε μέτρα στήλης υγρού) :

$$\delta h_{fTPAM} = f \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (4.7)$$

, όπου  $L$  το μήκος του αγωγού,  $d$  η εσωτερική διάμετρος του,  $c$  η μέση ταχύτητα του ρευστού και  $f$  ο συντελεστής των γραμμικών απωλειών (συμβολίζεται και με το

ελληνικό γράμμα  $\lambda$ ). Ο συντελεστής αυτός είναι συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας του εσωτερικού του αγωγού και του αριθμού Reynolds της ροής, ο οποίος ως γνωστό δίνεται από τη σχέση :

$$Re = \frac{cd}{\nu} \quad (4.8)$$

, όπου  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Ως σχετική τραχύτητα  $\varepsilon_s$  ορίζεται ο λόγος της μέσης τραχύτητας των τοιχωμάτων του αγωγού  $\varepsilon$  και της εσωτερική διαμέτρου του  $d$  :

$$\varepsilon_s = \varepsilon / d \quad (4.9)$$

Η τραχύτητα των σωλήνων εξαρτάται από το υλικό κατασκευής τους, τον τρόπο κατασκευής τους, και το χρόνο χρήσης τους.

Όταν η ροή εντός του αγωγού είναι στρωτή, δηλαδή ισχύει  $Re < 2300$ , ο συντελεστής γραμμικών απωλειών δίνεται από τη σχέση :

$$f = 64 / Re \quad (4.10)$$

Σε περίπτωση πλήρους ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής, επομένως όταν  $Re > 4000$ , χρησιμοποιείται η σχέση των Colebrook – White :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71} \right) \quad (4.11)$$

Εύκολα συμπεραίνουμε ότι η επίλυση της παραπάνω σχέσης, γίνεται με εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας, πράγμα που θα δούμε και στον υπολογιστικό κώδικα. Από μία σειρά πειραμάτων, έχει καταρτιστεί το διάγραμμα Moody το οποίο μας δίνει μία αρκετά καλή προσέγγιση της τιμής του συντελεστή.

Οι εντοπισμένες απώλειες εμφανίζονται κυρίως σε σημεία μεταβολής της διατομής του αγωγού και της κατεύθυνσης της ροής. Επιπλέον εντοπισμένες απώλειες παρουσιάζονται και σε διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα που τοποθετούνται στις σωληνώσεις, όπως είναι οι βάνες. Περιγράφονται από τη σχέση :

$$\delta h_{f_{\text{ΕΝΤΟΠΗ}}} = \zeta \frac{c^2}{2g} \quad (4.12)$$

, όπου  $\zeta$  ο συντελεστής των εντοπισμένων απωλειών.

Τέλος στις υδραυλικές απώλειες εντάσσεται και η κινητική ενέργεια  $\frac{c_A^2}{2g}$  που έχει το υγρό όταν εισέρχεται στη μεγάλων διαστάσεων δεξαμενή κατάθλιψης, καθώς αυτή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και ουσιαστικά χάνεται σε φαινόμενα τριβής και στροβιλισμών.

Λόγω της αρχής της συνέχειας της μάζας ενός ασυμπίεστου ρευστού, η παροχή όγκου  $Q$  στα διάφορα τμήματα της σωληνώσεως είναι σταθερή και ίση με :

$$Q = c_i A_i \quad (4.13)$$

, όπου  $A_i$  η διατομή του τμήματος  $i$  της σωληνώσεως.

Έτσι το άθροισμα όλων των απωλειών μπορεί να γραφτεί στη μορφή :

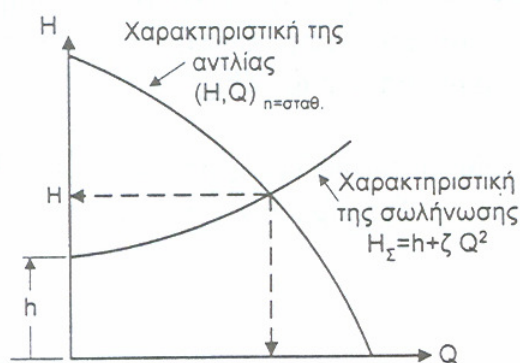
$$\delta h_{f_{EA}} = \sum f_i \frac{L_i}{d_i} \frac{c_i^2}{2g} + \sum \zeta_k \frac{c_k^2}{2g} + \frac{c_A^2}{2g} = \zeta_{EA} \cdot Q^2 \quad (4.14)$$



και η εξίσωση 4.6 να μετασχηματιστεί στην εξής :

$$H_{\Sigma} = h + \zeta_{EA} \cdot Q^2 \quad (4.15)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης της εγκατάστασης και εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια που πρέπει να διατίθεται στο ρευστό ώστε αυτό να μπορεί απρόσκοπτα να διακινείται μέσω της συγκεκριμένης σωλήνωσης. Λόγω της μορφής της μπορεί να χαραχθεί εύκολα σε κοινό διάγραμμα  $(H, Q)$  με τη χαρακτηριστική της αντλίας. Από το σημείο τομής τους προκύπτει το σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης για τη δεδομένη ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, δηλαδή το σημείο στο οποίο η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που προσδίδει η συγκεκριμένη αντλία στο υγρό είναι ίση με την ενέργεια που απαιτείται για την ροή του εντός της σωλήνωσης και την ανύψωσή του.



Εικόνα 4.2 Σημείο λειτουργίας αντλιοστασίου

Το σημείο τομής των δύο χαρακτηριστικών καθορίζει τόσο τον βαθμό απόδοσης της αντλίας κατά τη λειτουργία της, όσο και την ισχύ που αυτή θα απορροφά (βλέπε και σχέση 2.34) :

$$N = \frac{\gamma H Q}{\eta} \quad (4.16)$$

Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της πιεζομετρικής γραμμής σε μία σωλήνωση. Αυτή αποτυπώνει τη μεταβολή της πίεσης απαλλαγμένης από την συμβολή της κινητικής ενέργειας και δίνεται από τη σχέση :

$$H = \frac{p}{\rho g} + z \quad (4.17)$$

#### 4.2.2 Συνεργασία αντλιών

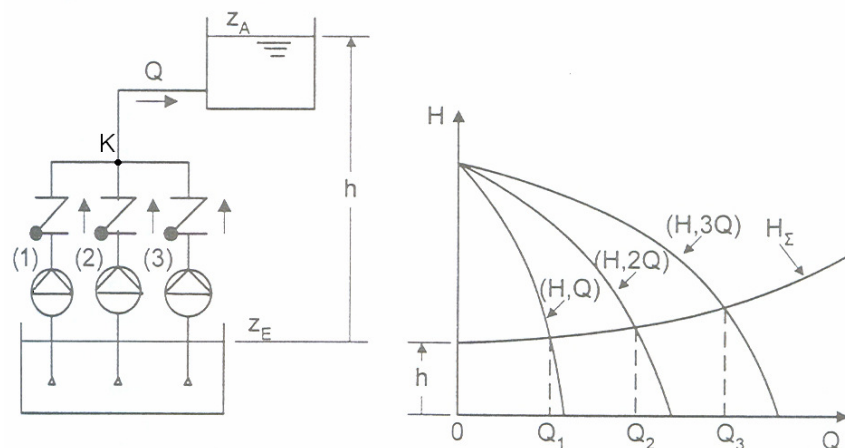
Πολλές φορές, είτε για καθαρά λειτουργικούς λόγους (π.χ. ανάγκη για αυξημένη παροχή), είτε απλά για λόγους αύξησης της ευελιξίας και της αξιοπιστίας της εγκατάστασης, εγκαθίστανται σε ένα αντλιοστάσιο περισσότερες από μία αντλίες. Οι αντλίες αυτές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να είναι όμοιες μεταξύ τους, μπορούν να συνδεθούν και να συνεργαστούν με δύο τρόπους :

- Την παράλληλη λειτουργία

Σε αυτήν, κάθε αντλία έχει τη δική της σωλήνωση αναρρόφησης, αλλά όλες καταθλίβουν το υγρό σε μία κοινή σωλήνωση κατάθλιψης. Είναι προφανές ότι η

παροχή στη σωλήνωση αυτή θα ισούται με το άθροισμα των παροχών που διακινεί κάθε μηχανή ( $Q_K = \sum Q_i$ ). Προκειμένου να ικανοποιηθεί η προηγούμενη συνθήκη, η τελική χαρακτηριστική του συνόλου των αντλιών προκύπτει από την κατά παροχή πρόσθεση των χαρακτηριστικών τους και αναφέρεται στον κοινό κόμβο  $K$  των σωληνώσεων κατάθλιψης κάθε αντλίας. Από την τομή αυτής της τελικής χαρακτηριστικής με την χαρακτηριστική του τμήματος της σωλήνωσης από τον κόμβο  $K$  μέχρι τη δεξαμενή κατάθλιψης, καθορίζεται το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης και κάθε αντλίας ξεχωριστά.

Σε περίπτωση κατά την οποία τα ύψη των αντλιών διαφέρουν μεταξύ τους αρκετά, είναι δυνατό να υπάρχει σημείο λειτουργίας για το οποίο το ολικό ύψος που αντιστοιχεί στον κόμβο  $K$  είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο ύψος μιας αντλίας ( $H_{oK} > H_i$ ). Αν συμβεί αυτό, η εν λόγω αντλία θα λειτουργεί σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.3, ως ρυθμιζόμενη αντίσταση με αρνητική παροχή που θα προέρχεται από τις υπόλοιπες αντλίες. Επειδή κάτι τέτοιο είναι ανεπιθύμητο, τοποθετούνται στον αγωγό κατάθλιψης όλων των μηχανών και πριν τον κοινό κόμβο, βαλβίδες αντεπιστροφής. Αυτές, επιτρέπουν την απρόσκοπτη ροή του υγρού προς την άνω δεξαμενή, αλλά εμποδίζουν τη ροή προς την αντλία και την κάτω δεξαμενή. Χρησιμοποιούνται ακόμα και σε αντλιοστάσια με όμοιες εργοστροβιλομηχανές ανεξάρτητα του τρόπου σύνδεσής τους, για να απομονώνουν όποιες από αυτές βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Είναι προφανές ότι με την παράλληλη λειτουργία επιτυγχάνεται, μέσω της κατάλληλης επιλογής της παροχής κάθε αντλίας, μεγάλη ευελιξία στη ρύθμιση της συνολικά διακινούμενης παροχής.



Εικόνα 4.3 Παράλληλη λειτουργία ταυτόσημων αντλιών

#### - Την εν σειρά λειτουργία

Χαρακτηριστικό της είναι η ύπαρξη ενιαίας σωλήνωσης, κατά μήκος της οποίας τοποθετούνται οι αντλίες. Στην περίπτωση αυτή η παροχή καθ' όλο το μήκος της σωλήνωσης θα είναι αμετάβλητη ( $Q_{i-1} = Q_i = Q_{i+1} \dots$ ), ενώ το συνολικό ύψος της εγκατάστασης θα ισούται με το άθροισμα των υψών κάθε αντλίας ( $H(Q) = \sum H_i(Q)$ ). Σύμφωνα με τις προηγούμενες συνθήκες, η τελική χαρακτηριστική του συνόλου των αντλιών προκύπτει από την καθ' ύψος πρόσθεση των χαρακτηριστικών τους. Από την τομή αυτής της τελικής χαρακτηριστικής με την χαρακτηριστική της σωλήνωσης καθορίζεται το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης και κάθε μηχανής ξεχωριστά.

Η διαμόρφωση αυτή παρέχει τη δυνατότητα τόσο ανύψωσης συγκεκριμένης παροχής σε μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με την λειτουργία μίας μόνο αντλίας, όσο και ανύψωσης σε συγκεκριμένο ύψος μεγαλύτερης παροχής. Έτσι απαντάται κυρίως σε εφαρμογές μεγάλου γεωμετρικού ύψους ανύψωσης ή με μεγάλο μήκος αγωγού κατάθλιψης και άρα αυξημένες υδραυλικές απώλειες. Ένα σημείο όμως που χρήζει προσοχής, είναι ότι πρέπει οι αντλίες να είναι περίπου ίδιου μεγέθους, διαφορετικά αν διακινούν μεγάλης απόκλισης παροχές είναι δυνατό να υπάρχει σημείο λειτουργίας στο οποίο η αντλία με τη μικρότερη παροχή να εργάζεται ως στρόβιλος. Επιπλέον και εδώ τοποθετείται, για λόγους που αναφέρθηκαν, βαλβίδα αντεπιστροφής μεταξύ της τελευταίας μηχανής και της δεξαμενής κατάθλιψης.

Πέρα από τα προηγούμενα, η σύνδεση αυτή παρέχει στην εγκατάσταση ευελιξία στη ρύθμιση του επιθυμητού ύψους μέσω της λειτουργίας κατάλληλου συνδυασμού εργοστροβιλομηχανών και έτσι χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου το ύψος μεταβάλλεται (π.χ. σε άρδευση περιοχών διαφορετικής στάθμης). Επίσης εν σειρά εγκατάσταση μίας αντλίας, μπορεί να γίνει και εκ των υστέρων προκειμένου να αυξήσουμε τη διακινούμενη παροχή. Αυτό μπορεί να επιβάλλεται είτε λόγω αύξησης των αναγκών είτε λόγω σημαντικής μείωσης της παροχής εξαιτίας αύξησης των υδραυλικών απωλειών. Το τελευταίο φαινόμενο είναι αρκετά συχνό, καθώς με την πάροδο των χρόνων αυξάνεται η τραχύτητα στο εσωτερικό των αγωγών και μειώνεται η εσωτερική διάμετρός τους λόγω επικαθίσεων αλάτων (ανάλογα και με τη φύση του διακινούμενου υγρού).

Συχνά οι αντλίες τοποθετούνται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους, καθώς σε αντίθετη περίπτωση, η στατική πίεση στην κατάθλιψη των τελευταίων μηχανών μπορεί να είναι υπερβολικά μεγάλη. Έτσι για λόγους αντοχής θα απαιτείται μεγάλο πάχος τοιχωμάτων των αγωγών, πράγμα που συνεπάγεται αυξημένο κόστος κατασκευής. Με την διασπορά των αντλιών, επιτυγχάνεται η πτώση της στατικής πίεσης μεταξύ δύο διαδοχικών μηχανών λόγω των υδραυλικών απωλειών και η ανάπτυξη μικρότερων μέγιστων πιέσεων στη σωλήνωση. Τέλος εν σειρά λειτουργία υιοθετείται και στην περίπτωση που θέλουμε να αυξήσουμε τη στατική πίεση στην αναρρόφηση μίας αντλίας, ώστε να αποφύγουμε το φαινόμενο της σπηλαιώσεως σε αυτή. Το ρόλο αυτό επιτελεί η πρώτη αντλία (inducer), η οποία συνήθως δε χρειάζεται να είναι υψηλών δυνατοτήτων, ενώ η δεύτερη αναλαμβάνει τη διακίνηση του υγρού.

#### 4.2.3 Όργανα διακοπής στη σωλήνωση

Πέρα από τις βαλβίδες αντεπιστροφής που αναφέρθηκαν παραπάνω, σε μία σωλήνωση χρησιμοποιούνται πολύ συχνά διάφοροι τύποι βανών. Μία βάννα αποτελείται από :

- το κύριο σώμα

Σκοπός του είναι η σύνδεση της βάννας με τη σωλήνωση και η οδήγηση του ρευστού εντός αυτής. Επίσης σε αυτό εδράζονται όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της και παραλαμβάνει τις εξωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται. Επομένως, πρέπει να έχει αντοχή στις υψηλές πιέσεις. Η σύνδεση με τη σωλήνωση επιτυγχάνεται μέσω φλάντζας ή κοχλίωσης.

- το μετακινούμενο στοιχείο

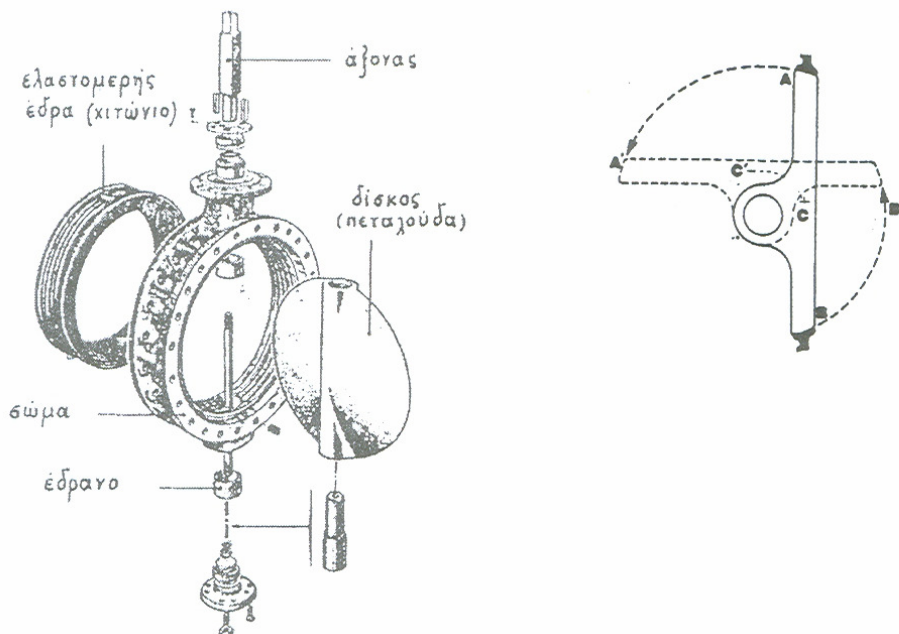
Έχει μορφή δίσκου, σφαίρας ή κώνου και εμποδίζει ή διακόπτει πλήρως τη ροή του ρευστού. Η κίνησή του είναι περιστροφική ή έχει τη μορφή παράλληλης μετατόπισης.

- το σύστημα μετάδοσης κίνησης.

Μπορεί να ενεργοποιείται είτε χειροκίνητα είτε μηχανικά από κάποιο ηλεκτρικό – υδραυλικό σύστημα. Συνήθως έχει τη μορφή κοχλιωτού βάκτρου ή περιστρεφόμενης ατράκτου. Περιλαμβάνει και στεγνωτική διάταξη, ώστε να μην υπάρχει διαρροή ρευστού προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Οι τύποι βανών που περιλαμβάνει η εγκατάσταση του πειραματικού σκέλους της εργασίας είναι οι εξής :

Οι βάνες πεταλούδας ή στρεφόμενου δίσκου (butterfly valves). Χρησιμοποιούνται για ρύθμιση και διακοπή της ροής. Είναι δυνατή η προσαρμογή τους μεταξύ δύο φλαντζών της σωλήνωσης. Χαρακτηρίζονται από μικρή διαδρομή πλήρους χειρισμού, πράγμα που δίνει τη δυνατότητα ηλεκτροχειρισμού τους. Επιπλέον εμφανίζουν μικρή αντίσταση στην πλήρως ανοικτή θέση, ενώ ο συντελεστής αντίστασης μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με τη γωνία ανοίγματος. Είναι κατάλληλες και για μεγάλες τιμές παροχής, αλλά όχι για υψηλές πιέσεις.



Εικόνα 4.4 Μέρη βάνας τύπου πεταλούδας

Οι βαλβίδες αντεπιστροφής (non-return ή check valves), που όπως σημειώθηκε ανωτέρω, εμποδίζουν τη ροή κατά μία κατεύθυνση. Ως στοιχείο στεγανότητας χρησιμοποιείται είτε κάποιο ανυψούμενο αξονοσυμμετρικό σχήμα (δίσκος, έμβολο) είτε ένας περιστρεφόμενος δίσκος (κλαπέτο). Ο τελευταίος εμφανίζει μικρή πτώση πίεσης, είναι κατάλληλος και για μικρές παροχές, αλλά κατά το κλείσιμό του μπορεί να προκληθεί υδραυλικό πλήγμα.

Οι συρταρωτές βάνες (gate valves) είναι ο συνηθέστερος τύπος βάνας διακοπής της παροχής. Η κατασκευή τους είναι απλή και εμφανίζουν πολύ καλή στεγανότητα, χρησιμοποιώντας ένα σύρτη για τη διακοπή της ροής. Ο χειρισμός τους είναι αργός και απαιτεί ανάπτυξη μεγάλης ροπής. Στην πλήρως ανοικτή θέση, οι υδραυλικές απώλειες της ροής είναι πολύ μικρές. Ωστόσο σε ενδιάμεση θέση είναι αυξημένες,

λόγω της ανάπτυξης στροβιλισμών και αστάθειας στη ροή, και επιπλέον προκαλείται φθορά του σύρτη.

#### 4.2.4 Επιλογή κινητήρα

Η επιλογή του κινητήρα σε μία αντλητική εγκατάσταση καθορίζεται από τους εξής παράγοντες :

- απαιτήσεις που επιβάλλονται από την αντλία

Πρόκειται για την πιο καθοριστική ομάδα παραγόντων. Σε αυτήν ανήκουν τα κύρια χαρακτηριστικά της αντλίας, όπως είναι το είδος της, οι απαιτήσεις της σε ισχύ σε συναρτήσει φυσικά με παράγοντες όπως είναι η διακινούμενη παροχή και η ταχύτητα περιστροφής, η φορά περιστροφής της, το εύρος ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής, ο κύκλος λειτουργίας της. Ακόμα περιλαμβάνονται παράγοντες, όπως η ροπή αδρανείας των στρεφόμενων μερών της αντλίας, η χαρακτηριστική ροπής – στροφών του φορτίου (αντλίας), η ύπαρξη κάποιου είδους πέδης και η χαρακτηριστική της ροπής κατά την πέδηση, οι παράμετροι του συστήματος ελέγχου της εγκατάστασης, οι διαστάσεις της αντλίας και της ατράκτου της, οι δυνάμεις που ασκούνται στην άτρακτο κτλ

- περιβάλλουσες συνθήκες

Οι συνθήκες αυτές αφορούν τόσο το περιβάλλον της εγκατάστασης όσο και τη λειτουργία της. Έτσι συγκαταλέγονται στην κατηγορία αυτή στοιχεία όπως το ύψος όπου βρίσκεται η εγκατάσταση, το επίπεδο μόλυνσης του αέρα του περιβάλλοντος εργασίας, πιθανή ύπαρξη εκρηκτικών ή εύφλεκτων υλικών, το μέσο ψύξης της μηχανής, η σύνθεση και η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, το επίπεδο ταλαντώσεων του κινητήρα, ο παραγόμενος από αυτόν θόρυβος κτλ

- στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου

Πρόκειται για ηλεκτρολογικά στοιχεία, όπως είναι το είδος του ρεύματος που διατίθεται στην περιοχή του αντλιοστασίου, η συχνότητά του, η διατιθέμενη τάση (χαμηλή, μέση, υψηλή) και τυχόν παρατηρούμενες διακυμάνσεις αυτής. Επιπλέον συμπεριλαμβάνονται και θεσπισμένα όρια ασφαλείας για μεγέθη όπως το ρεύμα εκκίνησης, η αποδεκτή βύθιση τάσης εξαιτίας της λειτουργίας του αντλιοστασίου, ο συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης κτλ

- ειδικές συνθήκες

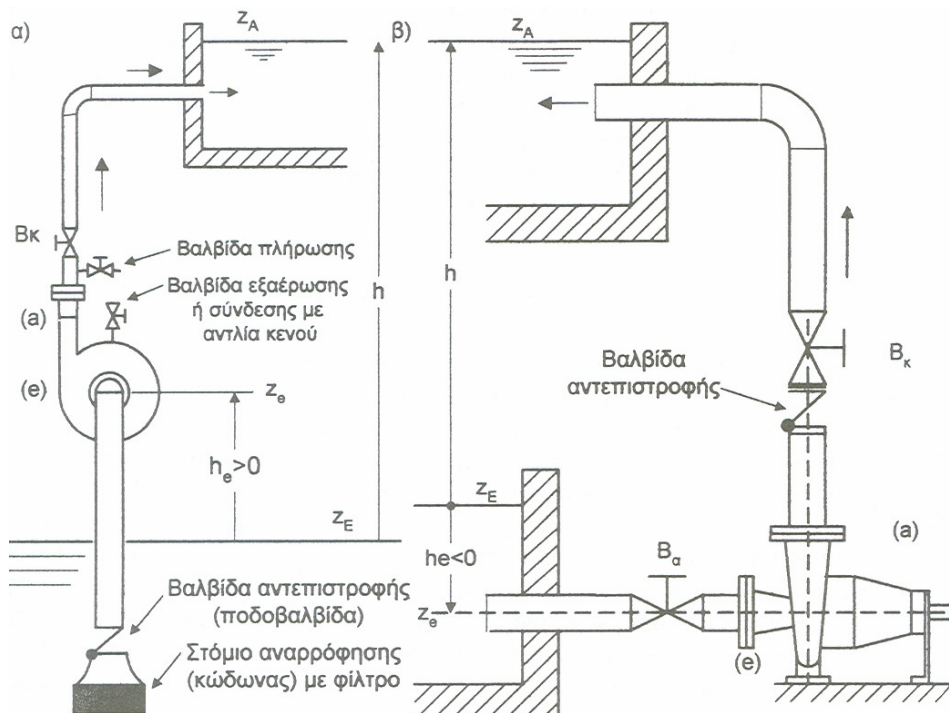
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κάποιοι εθνικοί κανονισμοί που διέπουν τη λειτουργία των εγκαταστάσεων αυτών, οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της εγκατάστασης κτλ

### 4.3 Εκκίνηση αντλητικής εγκατάστασης

#### 4.3.1 Προετοιμασία & πορεία της εκκίνησης

Ένα σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής κατά την εκκίνηση ενός αντλιοστασίου, αποτελεί η αναγκαιότητα να είναι τόσο η αντλία όσο και η σωλήνωση αναρρόφησης γεμάτες με υγρό. Σε περίπτωση που το γεωμετρικό ύψος αναρρόφησης έχει αρνητική

τιμή ( $z_a < z_E$ ), η συνθήκη αυτή ικανοποιείται αυτόματα και αρκεί μόνο μία εξαέρωση στο ψηλότερο τμήμα της αντλίας. Όταν ισχύει το αντίθετο, δηλαδή η αντλία έχει τοποθετηθεί σε μεγαλύτερη στάθμη από την δεξαμενή αναρρόφησης ( $z_a > z_E$ ), είναι αναγκαία η τοποθέτηση μιας βαλβίδας αντεπιστροφής στην είσοδο του αγωγού αναρρόφησης, γνωστής ως ποδοβαλβίδα, ούτως ώστε όταν σταματά η αντλία, το υγρό να εγκλωβίζεται εντός αυτής και να μην επιστρέφει λόγω της βαρύτητας στη δεξαμενή αναρρόφησης. Σε περίπτωση κατά την οποία η εργοστροβιλομηχανή παραμένει εκτός λειτουργίας για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι πιθανό, λόγω διαρροών στην ποδοβαλβίδα, αυτή να αδειάσει. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη διάταξης που θα τροφοδοτεί με υγρό προερχόμενο από κάποια εξωτερική πηγή, απ' ευθείας το άνω μέρος του κελύφους της μηχανής. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χρήση αντλίας κενού και η αποφυγή τοποθέτησης ποδοβαλβίδας. Με τον τρόπο αυτό απομακρύνεται ο εντός της κυρίας αντλίας αέρας, ανεβαίνει η στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης και η μηχανή τίθεται σε κίνηση όταν έχει πληρωθεί πλήρως με υγρό. Τέλος υπάρχει η δυνατότητα χρήσης αντλιών αυτόματης αναρρόφησης. Σε αυτές το κέλυφος είναι έτσι διαμορφωμένο, ώστε μετά το σταμάτημα της μηχανής να εγκλωβίζεται σε αυτό υγρό. Κατά την εκκίνηση, το ρευστό αυτό καταθλίβεται σε ένα ακροφύσιο Venturi, δημιουργείται υποπίεση και ανεβαίνει η στάθμη στο εσωτερικό της μηχανής όπως και στην περίπτωση της αντλίας κενού. Ωστόσο, πρόκειται κυρίως για μηχανές μικρής ισχύος. Ένα άλλο στοιχείο το οποίο έχει αναφερθεί, και πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα κατά την εκκίνηση, είναι η αποφυγή εισχώρησης αέρα εντός της αντλίας λόγω της δημιουργούμενης υποπίεσης.



Εικόνα 4.5 Διάταξη αντλητικής εγκατάστασης με ύψος αναρρόφησης α) θετικό β) αρνητικό

Πέρα από τις βαλβίδες αντεπιστροφής, στην αντλητική εγκατάσταση χρησιμοποιούνται και βάνες. Σε αντλιοστάσια με αρνητικό ύψος αναρρόφησης τοποθετείται βάνα στη σωλήνωση αναρρόφησης, δηλαδή άναντι της αντλίας ( $B_a$

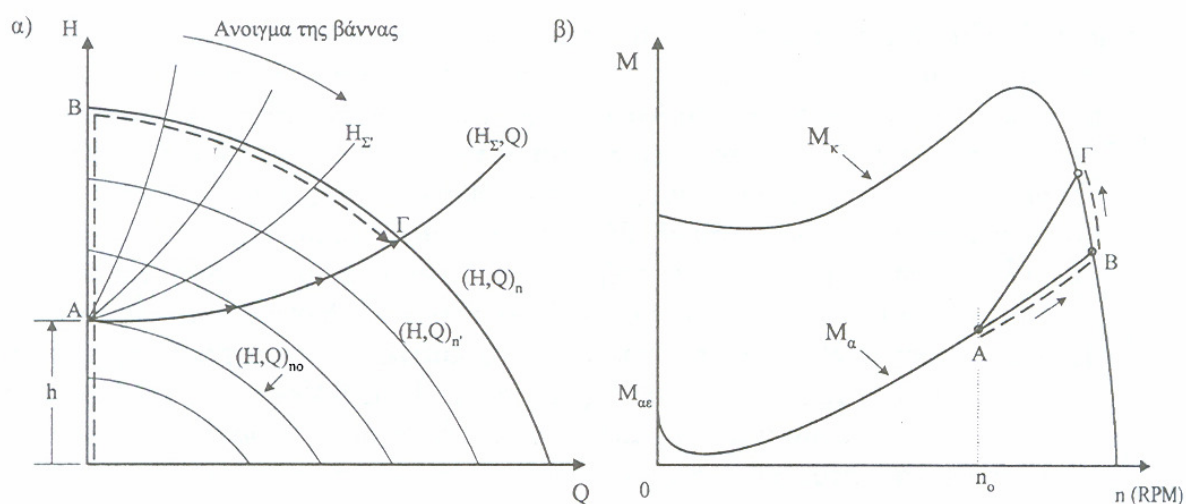
εικόνα 4.5β). Αυτή είναι πάντα ανοικτή και κλείνει μόνο σε περίπτωση αφαίρεσης της αντλίας, π.χ. σε περίπτωση συντήρησης. Εύκολα γίνεται κατανοητό ότι δεν είναι αναγκαία η ύπαρξή της σε αντλιοστάσια με θετικό γεωμετρικό ύψος αναρρόφησης. Επιπλέον, ανεξαρτήτως της τιμής του ύψους αναρρόφησης, τοποθετείται βάννα και στη σωλήνωση κατάθλιψης μετά την βαλβίδα αντεπιστροφής ( $B_x$  εικόνα 4.5).

Συνήθως η βάννα κατάθλιψης είναι είτε πλήρως ανοικτή είτε πλήρως κλειστή, επηρεάζει την κλίση της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης που εξακολουθεί να έχει τη μορφή παραβολής, και παίζει ρόλο κατά την φάση της εκκίνησης. Η χρησιμοποίησή της για τη ρύθμιση της παροχής αποφεύγεται, καθώς είναι ενεργειακά ασύμφορη λόγω των αυξημένων υδραυλικών απωλειών που εμφανίζει.

Το χρονικό σημείο της εκκίνησης που αυτή ανοίγει, παίζει ρόλο στην τιμή της ροπής που απαιτεί η αντλία κατά τη διαδικασία αυτή. Όταν η αντλία βρίσκεται εκτός λειτουργίας είναι λογικό το σημείο λειτουργίας να ταυτίζεται με την αρχή των αξόνων στη χαρακτηριστική καμπύλη ύψους – παροχής ( $H = 0, Q = 0$ ), όπως και στην καμπύλη ροπής – στροφών του συστήματος κινητήρα – αντλίας ( $T = 0, n = 0$ ). Κατά την επιτάχυνση της αντλίας, το σημείο λειτουργίας μετακινείται κατά μήκος του άξονα του ύψους, μέχρι το σημείο A ( $H = h, Q = 0$ ). Τη χρονική αυτή στιγμή η αντλία που περιστρέφεται με μία ταχύτητα  $n_o$ , προσδίδει στο ρευστό ενέργεια που μόλις επαρκεί για την ανύψωσή του και δεν αναπληρώνει τις όποιες υδραυλικές απώλειες. Ακριβώς εδώ επεισέρχεται ο ρόλος της βάννας κατάθλιψης (εικόνα 4.6).

Εάν αυτή είναι κλειστή, τότε συνεχίζεται η μετακίνηση του σημείου λειτουργίας κατά μήκος του άξονα του ύψους, μέχρι το άνω άκρο της χαρακτηριστικής B ( $H_B, Q = 0$ ).

Η μεταβολή της ροπής που απαιτεί η αντλία εκφράζεται με μία καμπύλη σχεδόν σταθερής διεύθυνσης, που συναντά την καμπύλη ροπής του κινητήρα. Στο σημείο αυτό τομής, η ταχύτητα περιστροφής είναι πολύ κοντά σε αυτή του μόνιμου σημείου λειτουργίας, ενώ και ο κινητήρας βρίσκεται σε ευσταθή περιοχή λειτουργίας του. Από το σημείο αυτό και πέρα, η βάννα ανοίγει με αποτέλεσμα να μειώνεται η κλίση της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης. Έτσι το σημείο λειτουργίας μετακινείται κατά μήκος της χαρακτηριστικής της αντλίας για την τελική ταχύτητα περιστροφής  $n$ , μέχρι να φθάσει στο σημείο λειτουργίας Γ της εγκατάστασης.



Εικόνα 4.6 Επίδραση της βάννας κατάθλιψης στην πορεία εκκίνησης με αντλία μεικτής ή ακτινικής ροής

Εάν τώρα η βάνα είναι ανοικτή, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται κατά μήκος της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης και είναι κάθε φορά το σημείο τομής αυτής με την χαρακτηριστική της αντλίας για την εκάστοτε ταχύτητα περιστροφής. Το μόνιμο σημείο λειτουργίας, που προκύπτει από αυτή τη μέθοδο, δεν ενδιαφέρει σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Ωστόσο, στις αντλίες χαμηλού ειδικού αριθμού στροφών, η απορροφούμενη ισχύς  $N$  για σταθερή ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της παροχής  $Q$  και άρα η απαιτούμενη ροπή  $T_a$  για μη μηδενική παροχή είναι μεγαλύτερη αυτής που αντιστοιχεί σε μηδενική παροχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όταν η αντλία είναι ακτινικής ή μεικτής ροής και η βάνα είναι ανοικτή, μεταξύ του σημείου λειτουργίας  $A$  με ταχύτητα περιστροφής  $n_o$  και του μόνιμου σημείου λειτουργίας  $\Gamma$ , η απαίτηση της αντλίας για ροπή να είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τη περίπτωση κλειστής βάνας. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τόσο τον τύπο του ηλεκτροκινητήρα που επιλέγεται για την κίνηση της αντλίας όσο και τη μέθοδο εκκίνησης που θα προτιμηθεί. Εδώ αξίζει να σημειωθεί, ότι όταν ο αγωγός έχει πολύ μεγάλο μήκος, τόσο η αδράνεια όσο και η μάζα του περιεχόμενου σε αυτόν υγρού είναι μεγάλες και μπορούν να παίξουν ρόλο ανάλογο με αυτόν μιας κλειστής βάνας.

Αντίθετα στις αντλίες αξονικής ροής, η καμπύλη της ανθιστάμενης ροπής  $T_a$  για μηδενική παροχή έχει αρκετά μεγαλύτερη κλίση, συγκριτικά με αυτή των αντλιών μεικτής και ακτινικής ροής. Έτσι όταν η βάνα κατάθλιψης είναι κλειστή, η απαιτούμενη ροπή είναι μεγαλύτερη μεταξύ του σημείου λειτουργίας  $A$  με ταχύτητα περιστροφής  $n_o$  και του μόνιμου σημείου λειτουργίας  $\Gamma$  σε σχέση με την περίπτωση ανοικτής βάνας. Γενικότερα η ανθιστάμενη ροπή στις αξονικές εργοστροβιλομηχανές είναι υψηλότερη απ' ό,τι σε αυτές με χαμηλό και μέσο ειδικό αριθμό στροφών. Τέλος εκκίνηση με τη βάνα κλειστή σε αντλίες με ασταθή περιοχή λειτουργίας, όπως είναι οι αξονικές, δεν οδηγεί σε μονοσήμαντη εξέλιξη του φαινομένου, και αυτό χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

### 4.3.2 Ευστάθεια λειτουργίας

Σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της Μηχανικής, η ισορροπία του στρεφόμενου συστήματος αντλίας – κινητήρα, δίνεται από τη σχέση :

$$T_K - T_a = I \frac{d\omega}{dt} \quad (4.18)$$

, όπου  $T_K$  η παραγόμενη από τον κινητήρα ροπή στην άτρακτο,  $T_a$  η ανθιστάμενη ροπή της αντλίας,  $I$  η ροπή αδρανείας των στρεφόμενων μαζών (ατράκτου και περωτής της αντλίας, δρομέα ηλεκτροκινητήρα, συνδέσμων, υγρού που βρίσκεται εντός της περωτής) και  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του συστήματος. Όταν το σύστημα βρίσκεται στο μόνιμο σημείο λειτουργίας του (σημείο  $E$ , εικόνα 4.7), προφανώς η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή ( $d\omega/dt = 0$ ) και η κινητήριος ροπή ισούται με την ανθιστάμενη ( $T_K = T_a$ ). Όταν η ισότητα αυτή δεν ισχύει, ανάλογα με το αν η κινητήριος ή η ανθιστάμενη ροπή είναι μεγαλύτερη, προκύπτει θετικός ή



αρνητικός ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής και η αντλία επιταχύνεται ( $T_K > T_a, d\omega/dt > 0$ ) ή επιβραδύνεται ( $T_a > T_K, d\omega/dt < 0$ ) αντίστοιχα.

Η ανθιστάμενη ροπή αποτελεί ουσιαστικά την ροπή που απαιτεί η αντλία για την κίνησή της και σύμφωνα με όλα όσα έχουμε αναφέρει στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο θα δίνεται από τη σχέση :

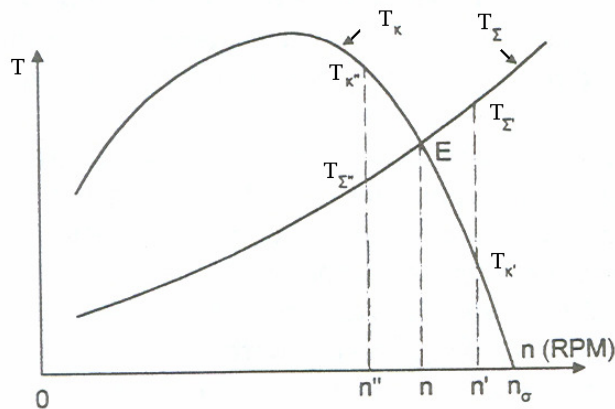
$$T_a = \frac{N_a}{\omega} = \frac{\gamma H Q}{\eta \omega} = \frac{\gamma H Q \cdot 60}{\eta \cdot 2\pi n} \quad (4.19)$$

Άρα διαπιστώνουμε ότι δεν είναι σταθερή και εξαρτάται τόσο από το σημείο λειτουργίας της αντλίας ( $H, Q, \eta$ ) όσο και από την ταχύτητα περιστροφής  $n$ .

Όπως έχουμε αναφέρει, οι επαγωγικοί ηλεκτροκινητήρες εμφανίζουν στη χαρακτηριστική τους καμπύλη ( $T, n$ ) μία περιοχή ασταθούς λειτουργίας. Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι σύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες όταν εκκινούν ως επαγωγικοί. Έτσι ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος κινητήρα – αντλίας, είναι η κατάλληλη επιλογή του πρώτου, ούτως ώστε το σημείο μόνιμης λειτουργίας να βρίσκεται στην περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του. Πέρα από αυτή τη συνθήκη, ρόλο στην ευσταθή λειτουργία της εγκατάστασης παίζει και η συμπεριφορά του φορτίου (αντλία & σωλήνωση). Με τον όρο ευσταθής λειτουργία αντλητικής εγκατάστασης, εννοούμε ότι πιθανή μεταβολή ενός μεγέθους π.χ. της ταχύτητας περιστροφής, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του σημείου λειτουργίας, θα αναιρεθεί από το σύστημα και θα έχουμε επαναφορά στην πρότερη κατάσταση λειτουργίας. Η ταχύτητα με την οποία θα γίνει αυτή η επαναφορά, εξαρτάται από τη λεγόμενη ροπή επαναφοράς. Αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των κλίσεων  $dT_\Sigma / dn$  και  $dT_K / dn$ . Το μέγεθος  $T_\Sigma$  ονομάζεται ροπή της σωλήνωσης και δεν έχει φυσική σημασία. Ουσιαστικά πρόκειται για τη ροπή αντίστασης της αντλίας, και η χρήση της οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε σημείο λειτουργίας της τελευταίας για την αντίστοιχη ταχύτητα περιστροφής, θα κείται επί της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης. Επομένως η συνθήκη ευσταθούς λειτουργίας διατυπώνεται ως :

$$\frac{dT_\Sigma}{dn} > \frac{dT_K}{dn} \quad (4.20)$$

Λόγω του αδρανειακού χαρακτήρα του συστήματος, η επαναφορά στην αρχική τιμή της ταχύτητα περιστροφής θα γίνει υπό τη μορφή ταλάντωσης περί αυτήν. Αν η ροπή επαναφοράς είναι μικρή, το σύστημα θα περιέλθει σε εκτεταμένη περίοδο λειτουργίας με κυμαινόμενη ταχύτητα περιστροφής, πράγμα ανεπιθύμητο.



Εικόνα 4.7 Προσδιορισμός σημείου λειτουργίας του συστήματος κινητήρα – αντλίας

Επιπλέον αστάθεια του συστήματος μπορεί να προκληθεί και εξαιτίας της μορφής της χαρακτηριστικής της αντλίας. Όπως έχουμε αναφέρει στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, στις αντλίες αξονικής ροής η χαρακτηριστική  $(H, Q)$  δεν έχει αρνητική κλίση ( $dH/dQ < 0$ ) σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας, αλλά υπάρχουν και περιοχές με θετική κλίση. Έτσι προκύπτουν από την τομή της με τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης, παραπάνω από ένα σημεία λειτουργίας της εγκατάστασης, από τα οποία μόνο αυτά που βρίσκονται σε περιοχή με αρνητική κλίση είναι ευσταθή. Η συνθήκη ευσταθούς λειτουργίας στην περίπτωση αυτή διατυπώνεται ως :

$$\frac{dH_{\Sigma}}{dQ} > \frac{dH}{dQ} \quad (4.21)$$

## 4.4 Το υδραυλικό πλήγμα – αριθμητική ανάλυση

### 4.4.1 Εισαγωγή

Η εξέταση της λεπτομερούς πορείας της διαδικασίας εκκίνησης ενός αντλιοστασίου, εντάσσεται στα πλαίσια μελέτης μεταβατικών φαινομένων και συγκεκριμένα στη θεωρία του υδραυλικού πλήγματος.

Με τον όρο υδραυλικό πλήγμα, χαρακτηρίζουμε μη μόνιμα φαινόμενα στα υδραυλικά συστήματα, στα οποία η μεταβολή από τη μία κατάσταση στην άλλη γίνεται με γρήγορο ρυθμό και επομένως για την περιγραφή τους πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η συμπιεστότητα του ρευστού και η ελαστικότητα του αγωγού. Χαρακτηριστικό των φαινομένων αυτών, είναι ότι η μεταβολή της κινηματικής κατάστασης έχει τη μορφή διαταραχής, που δημιουργείται στη θέση όπου προκαλείται η μεταβολή και οδεύει με πεπερασμένη ταχύτητα κατά μήκος του συστήματος. Λόγω της σημαντικότητας της συμπιεστότητας και της ελαστικότητας, η ταχύτητα του ρευστού σε περίπτωση αγωγού ομοιόμορφης διατομής είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου όσο και της θέσης  $(c(x,t))$ . Ωστόσο τα φαινόμενα αυτά συχνά συνοδεύονται από την ανάπτυξη υπερπίεσεων ή υποπίεσεων που διαφέρουν αρκετά από την στατική πίεση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, με αποτέλεσμα να τίθεται σε κίνδυνο η αντοχή της σωλήνωσης της εγκατάστασης.

Η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής  $a$  δίνεται από τη σχέση :

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{k} + \frac{D \cdot c_1}{E \cdot e} \right)}} \quad (4.22)$$

, όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $k$  ο συντελεστής συμπίεστότητάς του,  $D$  η εσωτερική διάμετρος του αγωγού,  $e$  το πάχος των τοιχωμάτων του,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής του.

Ο όρος  $c_1$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τον τρόπο στήριξης του αγωγού. Όταν αυτός είναι ελεύθερος στο ένα του άκρο και συγκρατείται μόνο από το άλλο ορίζεται ως :

$$c_1 = 5/4 - \mu \quad (4.23\alpha)$$

, όταν είναι πακτωμένος και στα δύο άκρα του :

$$c_1 = 1 - \mu^2 \quad (4.23\beta)$$

και όταν είναι εφοδιασμένος με διασταλτικούς συνδέσμους :

$$c_1 = 1 - \mu/2 \quad (4.23\gamma)$$

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις με  $\mu$  συμβολίζουμε τον συντελεστή Poisson του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αγωγός.

Το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται για να διαδοθεί μία διαταραχή από το ένα άκρο ενός αγωγού στο άλλο και να επιστρέψει στο άκρο απ' όπου ξεκίνησε, καλείται περίοδος του φαινομένου και είναι ίση προς :

$$2T = 4L/a \quad (4.24)$$

, όπου  $L$  το μήκος του αγωγού,  $a$  η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής και  $T$  ένας χαρακτηριστικός χρόνος για τον οποίο προφανώς ισχύει  $T = 2L/a$ .

#### 4.4.2 Η μέθοδος των χαρακτηριστικών

Για την ανάλυση ενός φαινομένου υδραυλικού πλήγματος, αρχικά εφαρμόζουμε σε ένα στοιχειώδες τμήμα αγωγού κλίσης  $\theta$ , τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας. Έπειτα από μία σειρά συλλογισμών και απλοποιήσεων, των οποίων η αναφορά ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις :

$$F_{\text{ΟΡΜΗΣ}} : g \frac{\partial H}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + f \frac{u \cdot |u|}{2D} = 0 \quad (4.25)$$

$$F_{\text{ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ}} : \frac{\alpha^2}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + u \left( \frac{\partial H}{\partial x} + \sin \theta \right) + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (4.26)$$

Οι δύο αυτές εξισώσεις είναι δυνατό να συνδυαστούν σε μία, μέσω της εισαγωγής κατάλληλου πολλαπλασιαστή  $\lambda$ . Έτσι μετά από κατάλληλη αναδιάταξη των διαφορών όρων προκύπτει :

$$F = F_{\text{ΣΥΝΕΧ}} + \lambda \cdot F_{\text{ΟΡΜ}} = \left[ \frac{\partial H}{\partial x} (u + \lambda g) + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \lambda \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \left( u + \frac{a^2}{\lambda g} \right) + \frac{\partial u}{\partial t} \right] + u \cdot \sin \theta + \lambda \cdot f \frac{u \cdot |u|}{2D} = 0 \quad (4.27)$$

Παρατηρούμε ότι ο πρώτος όρος είναι ίσος με το ολικό διαφορικό  $dH/dt$  όταν :

$$\frac{dx}{dt} = u + \lambda g \quad (4.28)$$

Αντίστοιχα ο δεύτερος όρος είναι ίσος με ολικό διαφορικό  $du/dt$  με τη προϋπόθεση :

$$\frac{dx}{dt} = u + \frac{a^2}{\lambda g} \quad (4.29)$$

Από την ανάγκη ταυτόχρονης ικανοποίησης των δύο ανωτέρω εξισώσεων προκύπτει :

$$u + \lambda g = u + \frac{a^2}{\lambda g} \Rightarrow \lambda = \pm \frac{a}{g} \quad (4.30)$$

Οι δύο τιμές της παραμέτρου  $\lambda$ , μας δίνουν δύο ολικές διαφορικές εξισώσεις, καθεμία από τις οποίες συνοδεύεται από έναν περιορισμό :

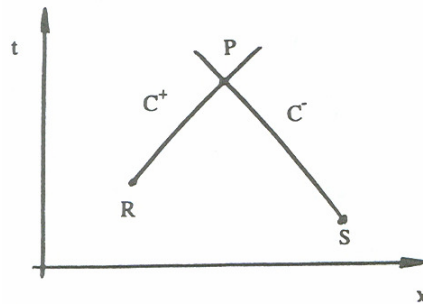
$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \cdot \frac{du}{dt} + u \cdot \sin \theta + a \cdot f \frac{u \cdot |u|}{2gD} = 0 \quad (4.31)$$

$$\text{με περιορισμό } \frac{dx}{dt} = u + a \quad (4.32)$$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \cdot \frac{du}{dt} + u \cdot \sin \theta - a \cdot f \frac{u \cdot |u|}{2gD} = 0 \quad (4.33)$$

$$\text{με περιορισμό } \frac{dx}{dt} = u - a \quad (4.34)$$

Οι καμπύλες που ορίζονται από τις σχέσεις (4.32) & (4.34) σε ένα διάγραμμα  $(x, t)$  καλούνται χαρακτηριστικές. Σε μεταλλικούς αγωγούς επειδή η ταχύτητα του ρευστού είναι πολλή μικρότερη σε σχέση με την ταχύτητα διαταραχής ( $u = 2 \div 7 \text{ m/sec}$ ,  $a > 1000 \text{ m/sec}$ ), οι εξισώσεις των χαρακτηριστικών παίρνουν τη μορφή  $dx/dt \approx \pm a$ . Για να γίνει κατανοητή η σημασία των τεσσάρων ανωτέρω εξισώσεων παρατίθεται το κάτωθι σχήμα.



Εικόνα 4.8

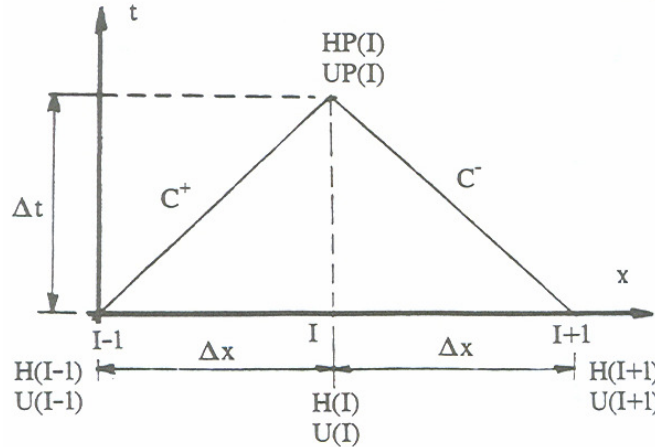
Σε αυτό υπάρχουν δύο πλήρως ορισμένα σημεία τα R και S, δηλαδή είναι γνωστά σε αυτά τόσο το ύψος  $H$  όσο και η ταχύτητα  $u$ . Από το R διέρχεται η χαρακτηριστική καμπύλη  $C^+$  (εξίσωση 4.32) κατά μήκος της οποίας ισχύει η σχέση 4.31, ενώ από το σημείο S διέρχεται η χαρακτηριστική καμπύλη  $C^-$  (εξίσωση 4.34) κατά μήκος της οποίας ισχύει η σχέση 4.33. Οι σχέσεις 4.31 & 4.33 περιλαμβάνουν δύο αγνώστους  $(u, H)$  και έχουν η καθεμία ένα γνωστό σημείο. Επομένως στο σημείο τομής P των χαρακτηριστικών είναι δυνατή η επίλυση τους, η εύρεση της ταχύτητας  $u_p$  και του ύψους  $H_p$  και επομένως ο πλήρης προσδιορισμός του σημείου. Έτσι ξεκινώντας από γνωστές συνθήκες κατά τη χρονική στιγμή  $t$  προκύπτουν οι τιμές των  $u$  και  $H$  τη

χρονική στιγμή  $t + \Delta t$  και αποτυπώνεται η χρονική εξέλιξη του φαινομένου στις διάφορες θέσεις του αγωγού.

Πιο συγκεκριμένα, οι εξισώσεις επιλύονται μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Ο αγωγός χωρίζεται σε ευθύγραμμα τμήματα μήκους  $\Delta x$ , τα οποία με βάση τον ορισμό των χαρακτηριστικών συνδέονται με το χρονικό βήμα επίλυσης  $\Delta t$  με τη σχέση :

$$\Delta t = \Delta x / a \quad (4.35)$$

Επομένως η μελέτη του φαινομένου είναι περισσότερο λεπτομερής όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των τμημάτων στα οποία χωρίζεται ο αγωγός.



Εικόνα 4.9

Επίσης θέτουμε :

$$dH = HP(I) - H(I-1) \quad (4.36)$$

$$dU = UP(I) - U(I-1) \quad (4.37)$$

, όπου με  $(I-1)$  συμβολίζουμε το κατά τη χρονική στιγμή  $t$  πλήρες ορισμένο σημείο που βρίσκεται έναντι του εξεταζόμενου σημείου  $I$  (εικόνα 4.9). Το τελευταίο εξετάζεται τη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$  και είναι προφανώς άγνωστη τόσο η ταχύτητα του  $UP(I)$  όσο και το ύψος του  $HP(I)$ . Τα δύο αυτά σημεία βρίσκονται κατά μήκος της ίδια χαρακτηριστικής καμπύλης  $C^+$ . Έτσι η εξίσωση 4.31 παίρνει τη μορφή :

$$\begin{aligned} HP(I) - H(I-1) + \frac{a}{g} \cdot [UP(I) - U(I-1)] + U(I-1) \cdot \sin \theta \cdot \Delta t + \\ + \frac{a \cdot f \cdot \Delta t}{2gD} \cdot U(I-1) \cdot |U(I-1)| = 0 \end{aligned} \quad (4.38)$$

Αντίστοιχα κατά τη χρονική στιγμή  $t$  υπάρχει ένα πλήρες γνωστό σημείο, που βρίσκεται κάταντι του εξεταζόμενου σημείου  $I$  και συμβολίζεται με  $(I+1)$ . Τα σημεία αυτά βρίσκονται κατά μήκος της χαρακτηριστικής καμπύλης  $C^-$  και επομένως η εξίσωση 4.33 μετασχηματίζεται ως εξής :

$$\begin{aligned} HP(I) - H(I+1) - \frac{a}{g} \cdot [UP(I) - U(I+1)] + U(I+1) \cdot \sin \theta \cdot \Delta t - \\ - \frac{a \cdot f \cdot \Delta t}{2gD} \cdot U(I+1) \cdot |U(I+1)| = 0 \end{aligned} \quad (4.39)$$

Τις δύο προηγούμενες εξισώσεις μπορούμε να τις προσθέσουμε και να τις αφαιρέσουμε. Από την πρόσθεση προκύπτει :

$$HP(I) = 0,5 \cdot \left\{ \begin{array}{l} H(I-1) + H(I+1) + \frac{a}{g} \cdot [U(I-1) - U(I+1)] \\ -\sin \theta \cdot \Delta t \cdot [U(I-1) + U(I+1)] \end{array} \right\} - \frac{a \cdot f \cdot \Delta t}{2gD} \cdot [U(I-1) \cdot |U(I-1)| - U(I+1) \cdot |U(I+1)|] = 0 \quad (4.40)$$

Αντίστοιχα από την αφαίρεση έχουμε :

$$UP(I) = 0,5 \cdot \left\{ \begin{array}{l} U(I-1) + U(I+1) + \frac{g}{a} \cdot [H(I-1) - H(I+1)] \\ -\sin \theta \cdot \Delta t \cdot [U(I-1) + U(I+1)] \end{array} \right\} - \frac{a \cdot f \cdot \Delta t}{2D} \cdot [U(I-1) \cdot |U(I-1)| + U(I+1) \cdot |U(I+1)|] = 0 \quad (4.41)$$

Έτσι προκύπτουν οι δύο εξισώσεις που μας επιτρέπουν να χαρακτηρίσουμε πλήρως το σημείο  $I$ . Εναλλακτικά είναι δυνατό στη θέση της ταχύτητας στις εξισώσεις 4.38 & 4.39 να εισάγουμε την παροχή όγκου  $Q$ , για την οποία ισχύει προφανώς :

$$Q = uA \quad (4.42)$$

, όπου  $A$  η διατομή του αγωγού. Έτσι οι σχέσεις αυτές παίρνουν τη μορφή :

$$HP(I) - H(I-1) + \frac{a}{gA} \cdot [QP(I) - Q(I-1)] + R \cdot Q(I-1) \cdot |Q(I-1)| = 0 \quad (4.43)$$

$$HP(I) - H(I+1) - \frac{a}{gA} \cdot [QP(I) - Q(I+1)] - R \cdot Q(I+1) \cdot |Q(I+1)| = 0 \quad (4.44)$$

$$, \text{ όπου } R = \frac{f \cdot \Delta x}{2gD \cdot A^2} \quad (4.45)$$

Επιλύοντας ως προς τον άγνωστο  $HP(I)$  έχουμε :

$$HP(I) = C_p - B \cdot QP(I) \quad (4.46)$$

$$HP(I) = C_M + B \cdot QP(I) \quad (4.47)$$

, όπου :

$$C_p = H(I-1) + B \cdot Q(I-1) - R \cdot Q(I-1) \cdot |Q(I-1)| \quad (4.48)$$

$$C_M = H(I+1) - B \cdot Q(I+1) + R \cdot Q(I+1) \cdot |Q(I+1)| \quad (4.49)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (4.50)$$

Στις εξισώσεις 4.46 & 4.47 άγνωστοι είναι τα  $HP$  και  $QP$ , άρα προκύπτει :

$$HP(I) = 0,5 \cdot (C_p + C_M) \quad (4.51)$$

Η παράμετρος  $B$  είναι σταθερή και χαρακτηριστική του αγωγού, ενώ τα  $C_p$  και  $C_M$  υπολογίζονται σε κάθε κόμβο, κάθε χρονική στιγμή. Ο αριθμός των κόμβων ελέγχου είναι  $N+1$ , όπου  $N$  το πλήθος των ισομηκών τμημάτων του αγωγού. Ο πρώτος κόμβος έχει δείκτη 1 και ο τελευταίος  $N+1$ . Όταν προσδιορισθούν πλήρως τα σημεία τη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$ , η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντικαθιστώντας τις τιμές των  $U(I)$  και  $H(I)$  με αυτές των  $UP(I)$  και  $HP(I)$ . Έτσι προσδιορίζονται τα σημεία

τη χρονική στιγμή  $t + 2\Delta t$  και ακολουθείται η ίδια διαδικασία μέχρι την πλήρη μελέτη του φαινομένου.

#### 4.4.3 Οριακές συνθήκες

Στους ακραίους κόμβους του αγωγού υπάρχει αδυναμία εφαρμογής της παραπάνω περιγραφείσας μεθόδου, καθώς σε αυτά έχουμε μόνο μία από τις εξισώσεις 4.46 & 4.47. Έτσι προκύπτει η ανάγκη διατύπωσης οριακών συνθηκών που θα συμπληρώνουν τις υπάρχουσες σχέσεις και θα οδηγούν στην ολοκληρωτική επίλυση του προβλήματος. Για λόγους συντομίας, θα αναφερθούμε μόνο στις οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό σκέλος.

Στην περίπτωση ύπαρξης δεξαμενής μεγάλων διαστάσεων, θεωρείται ότι η στάθμη της παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια εξέτασης του φαινομένου. Το σφάλμα στο αποτέλεσμα εξαιτίας της παραδοχής αυτής είναι αμελητέο. Όταν η δεξαμενή είναι άναντι (πριν) του αγωγού, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι απώλειες εισόδου του ρευστού από αυτήν στη σωλήνωση. Αυτές εκφράζονται ως :

$$\delta h_e = k \frac{UP_1^2}{2g} = k \frac{QP_1^2}{2gA^2} \quad (4.52)$$

, όπου  $k$  ο συντελεστής απωλειών εισόδου.

Συνεκτιμώντας τόσο τις απώλειες εισόδου, όσο και την κινητική ενέργεια του υγρού, η πίεση στον πρώτο κόμβο του αγωγού είναι ίση με :

$$HP_1 = HR - (1+k) \frac{QP_1^2}{2gA^2} \quad (4.53)$$

, όπου  $HR$  η στάθμη της δεξαμενής ως προς τη στάθμη αναφοράς. Συνδυάζοντας την ανωτέρω σχέση με την εξίσωση 4.47 μπορούμε να απαλείψουμε τον όρο  $HP$  και να καταλήξουμε σε μία δευτεροβάθμια εξίσωση :

$$\frac{1+k}{2gA^2} \cdot QP_1^2 + B \cdot QP_1 - (HR - C_M) = 0 \quad (4.54)$$

, από τις λύσεις της οποίας προσδιορίζεται η παροχή  $QP_1$ . Σημειώνεται ότι η αρνητική λύση αντιστοιχεί σε παροχή αντίθετης φοράς. Σε αρκετές, όμως, περιπτώσεις μπορούμε να θεωρήσουμε τις απώλειες εισόδου και κινητικής ενέργειας αμελητέες σε σύγκριση με το  $HR$ , πράγμα το οποίο έγινε και στο πειραματικό σκέλος της εργασίας αυτής. Στην περίπτωση αυτή θα ισχύει :

$$HP_1 = HR \quad (4.55)$$

$$QP_1 = \frac{HR - C_M}{B} \quad (4.56)$$

Στην περίπτωση μεγάλης δεξαμενής κάτω, δηλαδή στο τέλος του αγωγού, μόνη υδραυλική απώλεια που υπάρχει είναι αυτή της κινητικής ενέργειας του ρευστού :

$$\delta h_e = \frac{UP_{N+1}^2}{2g} = \frac{QP_{N+1}^2}{2gA^2} \quad (4.57)$$

Επομένως το ύψος στον τελευταίο κόμβο του αγωγού είναι :

$$HP_{N+1} = HR + \delta h_e = HR + \frac{QP_{N+1}^2}{2gA^2} \quad (4.58)$$

Και πάλι, συνδυάζοντας την προηγούμενη εξίσωση με τη σχέση 4.46 σχηματίζεται η παρακάτω δευτεροβάθμια εξίσωση, από τις λύσεις της οποίας προκύπτει η τιμή της παροχής  $QP_{N+1}$  και επομένως του ύψους  $HP_{N+1}$  :

$$\frac{1}{2gA^2} \cdot QP_{N+1}^2 + B \cdot QP_{N+1} + (HR - C_p) = 0 \quad (4.59)$$

Αν οι απώλειες ληφθούν αμελητέες, όπως έγινε και στο πειραματικό σκέλος, θα ισχύει :

$$HP_{N+1} = HR \quad (4.60)$$

$$QP_{N+1} = \frac{C_p - HR}{B} \quad (4.61)$$

Μία άλλη περίπτωση, όπου είναι απαραίτητη η εισαγωγή οριακής συνθήκης, είναι αυτή του τυφλού άναντι άκρου. Πρόκειται, δηλαδή, για διακοπή της παροχής που μπορεί να οφείλεται π.χ. σε κάποια κλειστή βάνα. Τότε θα ισχύει :

$$QP_1 = 0 \quad (4.62)$$

$$HP_1 = C_M \quad (4.63)$$

Οριακή συνθήκη είναι απαραίτητη και σε περίπτωση αγωγών εν σειρά. Με τον τελευταίο όρο, εννοούμε δύο αγωγούς που συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά και διαφέρουν σε ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά : διάμετρος, πάχος τοιχώματος, υλικό κατασκευής, συντελεστής γραμμικών απωλειών κτλ. Στην περίπτωση αυτή επηρεάζεται και ένας δεύτερος δείκτης ο οποίος χαρακτηρίζει τον αγωγό στον οποίο ανήκει ο κόμβος. Θεωρώντας αμελητέες τις υδραυλικές απώλειες στο σημείο της σύνδεσης, όπως επίσης και τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας, έχουμε :

$$HP = HP_{i,N+1} = HP_{i+1,1} \quad (4.64)$$

$$QP = QP_{i,N+1} = QP_{i+1,1} \quad (4.65)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις αυτές με την εξίσωση 4.46 του άναντι αγωγού  $i$  :

$$HP_{i,N+1} = C_{P,i} - B_i \cdot QP_{i,N+1} \quad (4.66)$$

και την εξίσωση 4.47 του κάταντι αγωγού  $i+1$  :

$$HP_{i+1,1} = C_{M,i+1} + B_{i+1} \cdot QP_{i+1,1} \quad (4.67)$$

προκύπτει :

$$QP = QP_{i,N+1} = QP_{i+1,1} = \frac{C_{P,i} - C_{M,i+1}}{B_i + B_{i+1}} \quad (4.68)$$

Τα παραπάνω ισχύουν και όταν έχουμε έναν ενιαίο μη ομοιόμορφο αγωγό, του οποίου επίσης τα τμήματα, διαφέρουν σε κάποιο χαρακτηριστικό στοιχείο.

Εάν στο άναντι άκρο ενός αγωγού, υπάρχει φυγόκεντρη αντλία είναι δυνατή η εισαγωγή οριακής συνθήκης μέσω της προσέγγισης της χαρακτηριστικής της αντλίας με ένα πολυώνυμο. Πρόκειται όμως για μία διαδικασία που ενέχει τον κίνδυνο σφάλματος, π.χ. από την απαλοιφή ενός όρου του πολυωνύμου για την απλούστευση



των πράξεων. Έτσι στο πειραματικό σκέλος πρώτα επιλύεται η κινηματική συμπεριφορά της αντλίας, προσδιορίζεται το ύψος και η παροχή που διακινεί και στη συνέχεια πράττουμε όμοια με την περίπτωση αγωγών εν σειρά, θεωρώντας τη μηχανή ως έναντι αγωγό με γνωστά στοιχεία. Δηλαδή ισχύει :

$$HP = HP_{\text{ΑΝΤΛΙΑΣ}} = HP_{i+1,1} \quad (4.69)$$

$$QP = QP_{\text{ΑΝΤΛΙΑΣ}} = QP_{i+1,1} \quad (4.70)$$

Φυσικά τα παραπάνω ισχύουν στην περίπτωση που μεταξύ του αγωγού και της αντλίας δεν παρεμβάλλεται κάποιο άλλο όργανο της σωλήνωσης, π.χ. μία βάνα.

Τέλος ένα σημείο που πρέπει να αναφερθεί, είναι η ανάγκη σε ένα σύστημα με πολλούς αγωγούς να γίνουν οι υπολογισμοί για το ίδιο χρονικό βήμα  $\Delta t$ . Διαφορετικά δεν θα είναι δυνατή η εφαρμογή οριακών συνθηκών στα σημεία σύνδεσής τους. Για κάθε αγωγό ή κλάδο  $j$  ισχύει :

$$\Delta t = L_j / a_j N_j \quad (4.71)$$

, όπου  $L_j$  το μήκος του αγωγού,  $a_j$  η ταχύτητα διαταραχής σε αυτόν και  $N_j$  το πλήθος των τμημάτων στα οποία έχει διαιρεθεί και το οποίο είναι αυστηρά ακέραιος αριθμός. Είναι προφανές ότι είναι πολύ δύσκολο να ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη για όλους τους αγωγούς, δηλαδή να έχουν ίδιο  $\Delta t$  και ακέραιο  $N_j$ . Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζουμε τη διαδικασία πρώτα στον μικρότερου μήκους αγωγό και καθορίζονται τα  $N_j$  και  $\Delta t$ . Σε όσους αγωγούς, για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα, δεν προκύπτει ακέραιο πλήθος τμημάτων μπορούμε :

- Να μεταβάλλουμε το μήκος του, ώστε να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του γινομένου  $\Delta t \cdot a_j$
- Να μεταβάλλουμε ελαφρά (μέχρι 15%) την ταχύτητα διαταραχής, ώστε το μήκος να είναι πάλι ακέραιο πολλαπλάσιο του γινομένου  $\Delta t \cdot a_j'$

Συνήθως προτιμάται η δεύτερη μέθοδος, καθώς η ταχύτητα διαταραχής προσδιορίζεται εξ' αρχής με κάποιο σφάλμα. Ωστόσο κατά την εκτέλεση του υπολογιστικού προγράμματος, υιοθετήθηκε η πρώτη μέθοδος.

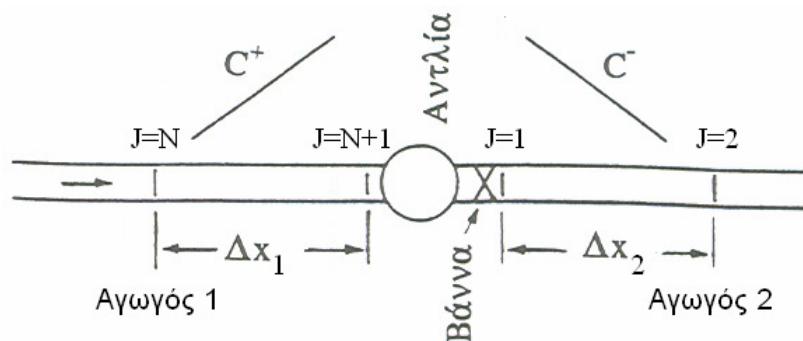
Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι η εκλογή του χρονικού βήματος δεν είναι αυθαίρετη, αλλά τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της λύσης. Η τελευταία σχετίζεται με το σφάλμα αποκοπής του υπολογιστή κατά την πραγματοποίηση των αριθμητικών πράξεων. Εάν το σφάλμα αυτό αυξάνεται καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο, η αριθμητική λύση χαρακτηρίζεται ως ασταθής και τα αποτελέσματα δεν έχουν φυσική σημασία. Ακριβή κριτήρια προσδιορισμού της ευστάθειας μιας λύσης δεν υπάρχουν. Ωστόσο, αν θεωρήσουμε αμελητέους τους μη γραμμικούς όρους των γραμμικών απωλειών, μία προσεγγιστική συνθήκη ευστάθειας αποτελεί η σχέση :

$$\Delta x \geq a \cdot \Delta t \quad (4.72)$$

#### 4.4.4 Το υδραυλικό πλήγμα κατά την εκκίνηση

Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε την εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου κατά το ξεκίνημα ενός αντλιοστασίου. Έστω μία απλή εγκατάσταση, αποτελούμενη από έναν αγωγό αναρρόφησης 1, την αντλία, μία βάνα (π.χ. τύπου πεταλούδας) στην

κατάθλιψη της και έναν αγωγό κατάθλιψης 2, και στην οποία έχουμε επιλέξει κατάλληλο χρονικό βήμα υπολογισμού  $\Delta t$ . Κάθε αγωγός έχει χωρισθεί σε τμήματα μήκους  $\Delta x_1$  και  $\Delta x_2$  αντίστοιχα.



Εικόνα 4.10

Λόγω της θεώρησης τόσο της αντλίας όσο και της βάννας ως ανελαστικά σώματα θα έχουμε :

$$Q_{\text{ΑΝΤΛΙΑΣ}} = QP_{1,N+1} = QP_{2,1} = Q_H \quad (4.73)$$

Επίσης με την υπόθεση αμελητέας διαφοράς της κινητικής ενέργειας μεταξύ των δύο αγωγών και συμβολίζοντας τις απώλειες της βάννας ως  $\Delta H_V$  θα ισχύει :

$$H_{\text{ΑΝΤΛΙΑΣ}} = HP_{2,1} - HP_{1,N+1} + \Delta H_V = H_H \quad (4.74)$$

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και εφαρμόζοντας την εξίσωση 4.43, το ύψος του τελευταίου κόμβου του αγωγού κατάθλιψης 1,  $N+1$  τη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$ , θα συνδέεται με το ύψος του προτελευταίου κόμβου 1,  $N$  τη χρονική στιγμή  $t$ , με τη σχέση :

$$HP_{1,N+1} = H_{1,N} - B_1 \cdot (QP_{1,N+1} - Q_{1,N}) - R_1 \cdot Q_{1,N} \cdot |Q_{1,N}| \quad (4.75)$$

ή σύμφωνα με την εξίσωση 4.46 :

$$HP_{1,N+1} = C_{P,1} - B_1 \cdot QP_{1,N+1} \quad (4.76)$$

Αντίστοιχα για τον αγωγό κατάθλιψης, μεταξύ του ύψους του πρώτου κόμβου 2,1 τη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$  και του ύψους του δεύτερου κόμβου 2,2 τη χρονική στιγμή  $t$ , θα ισχύει (εξίσωση 4.44) :

$$HP_{2,1} = H_{2,2} + B_2 \cdot (QP_{2,1} - Q_{2,2}) + R_2 \cdot Q_{2,2} \cdot |Q_{2,2}| \quad (4.77)$$

ή αλλιώς (εξίσωση 4.47) :

$$HP_{2,1} = C_{M,2} + B_2 \cdot QP_{2,1} \quad (4.78)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό της παραμέτρου  $W_H$  (σχέση 2.43) και θεωρώντας ότι αυτή υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ διακριτών τιμών, επομένως μπορεί να εκφραστεί ως  $W_H = A_0 + A_1 \cdot x$ , όπου οι συντελεστές  $A_0, A_1$  εξαρτώνται από το διάστημα του  $x$  στο οποίο γίνεται η παρεμβολή, ισχύει :

$$H_H = h \cdot H_N = (a^2 + v^2) \cdot W_H [\pi + \arctan(v/a)] \cdot H_N = (a^2 + v^2) \cdot [A_0 + A_1 \cdot (\pi + \arctan(v/a))] \cdot H_N \quad (4.79)$$

Οι υδραυλικές απώλειες της βάννας εκφράζονται από τη σχέση :

$$\frac{Q_H}{Q_N} = \tau^2 \frac{\Delta H_V}{\Delta H_{V0}} \Leftrightarrow \Delta H_V = \Delta H_{V0} \cdot \frac{v \cdot |v|}{\tau^2} \quad (4.80)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις η σχέση 4.74 μετασχηματίζεται ως εξής :

$$F_1 = H_H - HP_{2,1} + HP_{1,N+1} - \Delta H_V = 0 \Leftrightarrow$$

$$F_1 = (a^2 + v^2) \cdot W_H [\pi + \arctan(v/a)] \cdot H_N - C_{M,2} - B_2 \cdot QP_{2,1} + C_{P,1} -$$

$$-B_1 \cdot QP_{1,N+1} - \Delta H_{VO} \cdot (v \cdot |v|) \Leftrightarrow \quad (4.81)$$

$$F_1 = (a^2 + v^2) \cdot [A_0 + A_1 \cdot (\pi + \arctan(v/a))] \cdot H_N - HPM - v \cdot BAK - \Delta H_{VO} \cdot (v \cdot |v|) = 0$$

, όπου  $HPM = C_{M,2} - C_{P,1}$ ,  $BAK = (B_1 + B_2) \cdot Q_N$ .

Αν το σύστημα δεν βρίσκεται στη στάθμη αναφοράς θα πρέπει να προστεθεί στην εξίσωση 4.81 ο όρος  $z_E$ , δηλαδή η στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης. Σε περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει αγωγός αναρρόφησης και η αντλία είναι βυθισμένη στην δεξαμενή αναρρόφησης θα ισχύει  $HPM = C_{M,2}$ ,  $BAK = B_2 \cdot Q_N$ .

Επιπλέον όταν στην κατάθλιψη δεν υπάρχει βάνα ο όρος  $(\Delta H_{VO} \cdot v \cdot |v|)$  παραλείπεται.

Προφανώς για δεδομένη αντλητική εγκατάσταση στην οποία είναι γνωστά όλα τα μεγέθη των σωληνώσεων, της αντλίας και του κινητήρα, οι μόνοι άγνωστοι στην παραπάνω εξίσωση είναι τα μεγέθη  $a$  και  $v$  τη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$ .

Πέρα όμως από τη χρονική συμπεριφορά του ύψους και της παροχής στα διάφορα σημεία της σωλήνωσης, για την μελέτη υδραυλικού πλήγματος κατά την εκκίνηση είναι αναγκαία και η εξέταση της κινηματικής συμπεριφοράς των στρεφόμενων μερών. Ο θεμελιώδης νόμος της Μηχανικής που περιγράφει την κινηματική κατάσταση του συστήματος κινητήρα – αντλίας (σχέση 4.18), κατά την εκκίνηση διατηρεί τη μορφή  $T_K - T_a = I \frac{d\omega}{dt}$ .

Μέσα σε ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , η ανθιστάμενη ροπή μπορεί να προσεγγιστεί με τη σχέση :

$$T_a = 0,5 \cdot (T_{a,O} + T_{a,P}) \quad (4.82)$$

, όπου  $T_{a,O}$  η ανθιστάμενη ροπή σε μία χρονική στιγμή  $t$  κατά την οποία είναι γνωστή και  $T_{a,P}$  η ανθιστάμενη ροπή στην επόμενη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$  κατά την οποία είναι άγνωστη.

Ανάλογη προσέγγιση μπορεί να γίνει και για την κινητήρια ροπή :

$$T_K = 0,5 \cdot (T_{K,O} + T_{K,P}) \quad (4.83)$$

, όπου  $T_{K,O}$  η γνωστή κινητήρια ροπή τη στιγμή  $t$  και  $T_{K,P}$  η κινητήρια ροπή στην επόμενη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$  κατά την οποία είναι άγνωστη.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.82 & 4.83 και εισάγοντας τις ταχύτητες περιστροφής  $n_O$  και  $n_P$  τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές, θα έχουμε :

$$0,5 \cdot (T_{K,O} + T_{K,P}) - 0,5 \cdot (T_{a,O} + T_{a,P}) = I \frac{d\omega}{dt} \Leftrightarrow \frac{T_{K,O} + T_{K,P} - T_{a,O} - T_{a,P}}{2} =$$

$$= I \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n_P - n_O}{\Delta t} \Leftrightarrow (T_{K,O} + T_{K,P} - T_{a,O} - T_{a,P}) = I \cdot \frac{\pi}{15} \cdot \frac{n_P - n_O}{\Delta t} \Leftrightarrow \quad (4.84)$$

$$F_2 = T_{a,O} + T_{a,P} + I \cdot \frac{\pi}{15} \cdot \frac{n_P - n_O}{\Delta t} - (T_{K,O} + T_{K,P}) = 0$$

Για την αδιαστατοποίηση της παραπάνω σχέσης χρησιμοποιούμε τις παραμέτρους  $a_o, a_p$  και  $\beta_o, \beta_p$  για τα μεγέθη της αντλίας. Η ροπή του κινητήρα αδιαστατοποιείται ως προς την ροπή κανονικού σημείου λειτουργίας της αντλίας με τις παραμέτρους  $betmo_o, betmo_p$ , που υπολογίζονται επίσης με γραμμική παρεμβολή. Δηλαδή ισχύει :

$$betmo = T_K / T_{a,N} = A_0 + AM \cdot n \quad (4.85)$$

Ως εκ τούτου έχουμε :

$$F_2 = T_{a,N} \cdot (\beta_o + \beta_p) + I \cdot \frac{\pi \cdot n_N}{30} \cdot \frac{a_p - a_o}{\Delta t} - T_{a,N} \cdot (betmo_o + betmo_p) \Leftrightarrow \quad (4.86)$$

$$F_2 = (\beta_o + \beta_p) + C_T \cdot (a_p - a_o) - (betmo_o + betmo_p) = 0$$

$$, \text{ όπου } C_T = I \cdot \frac{n_N}{T_{a,N}} \cdot \frac{\pi}{15 \cdot \Delta t} \quad (4.87)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό της αδιάστατης παραμέτρου  $W_B$  (σχέση 2.44) και εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο γραμμικής παρεμβολής όπως για την  $W_H$ , έχουμε :

$$\beta_p = (a^2 + v^2) \cdot W_B [\pi + \arctan(v/a)] = (a^2 + v^2) \cdot [B_0 + B_1 \cdot (\pi + \arctan(v/a))] \quad (4.88)$$

Επομένως η σχέση 4.86 παίρνει την τελική μορφή :

$$F_2 = (a^2 + v^2) [B_0 + B_1 \cdot (\pi + \arctan(v/a))] + \beta_o + C_T (a_p - a_o) - (betmo_o + betmo_p) = 0 \quad (4.89)$$

Εύκολα συμπεραίνουμε ότι για δεδομένη αντλητική εγκατάσταση στην οποία είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά της αντλίας και του κινητήρα, οι μόνοι άγνωστοι στην παραπάνω εξίσωση είναι τα μεγέθη  $a$  και  $v$  τη χρονική στιγμή  $t + \Delta t$ .

Αντιλαμβανόμαστε ότι υπάρχουν δύο εξισώσεις που έχουν τους ίδιους 2 αγνώστους και επομένως αποτελούν ένα σύστημα εξισώσεων το οποίο μπορεί να λυθεί.

Συνηθέστερα η επίλυση αυτή, γίνεται με εφαρμογή της επαναληπτικής μεθόδου Newton – Raphson. Σύμφωνα με αυτήν θα ισχύει :

$$F_1 + F_{1,v} \cdot \Delta v + F_{1,a} \cdot \Delta a = 0 \quad (4.90)$$

$$F_2 + F_{2,v} \cdot \Delta v + F_{2,a} \cdot \Delta a = 0 \quad (4.91)$$

, όπου  $\Delta v$  και  $\Delta a$  οι μεταβολές των παραμέτρων  $v$  και  $a$  αντίστοιχα, και  $F_{1,a}$ ,  $F_{1,v}$ ,  $F_{2,a}$ ,  $F_{2,v}$  οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων  $F_1$  και  $F_2$  ως προς τα μεγέθη αυτά.

Προφανώς για τις μερικές παραγώγους θα ισχύει :

$$F_{1,a} = H_N \cdot (2a \cdot W_H - A_1 \cdot v) \quad (4.92\alpha)$$

$$F_{1,v} = H_N \cdot (2v \cdot W_H + A_1 \cdot a) - BAK - 2 \cdot \Delta H_{vo} \cdot |v| \quad (4.92\beta)$$

$$F_{2,a} = 2a \cdot W_B - B_1 \cdot v + C_T - AM \quad (4.93\alpha)$$

$$F_{2,v} = 2v \cdot W_B + B_1 \cdot a \quad (4.93\beta)$$

Επιλύοντας τις τέσσερις παραπάνω εξισώσεις ως προς  $\Delta v$  και  $\Delta a$  θα έχουμε :

$$\Delta a = \frac{\frac{F_2}{F_{2,v}} - \frac{F_1}{F_{1,v}}}{\frac{F_{1,a}}{F_{1,v}} - \frac{F_{2,a}}{F_{2,v}}} \quad (4.94)$$

$$\Delta v = -\frac{F_1}{F_{1,v}} - \Delta a \cdot \frac{F_{1,a}}{F_{1,v}} \quad (4.95)$$

Οι νέες τιμές των παραμέτρων  $a$  και  $\nu$  θα είναι :

$$a = a' + \Delta a \quad (4.96)$$

$$\nu = \nu' + \Delta \nu \quad (4.97)$$

, όπου  $a'$  και  $\nu'$  οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από την προηγούμενη προσέγγιση.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση και οι διορθώσεις  $\Delta \nu$  και  $\Delta a$  να είναι πολύ μικρές, δηλαδή μέχρι να προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια η τιμή των παραμέτρων  $a$  και  $\nu$ . Συνήθως τίθεται ένα όριο σύγκλισης ( $TOL$ ), στο οποίο η διαδικασία σταματά όταν ισχύει :

$$|\Delta a| + |\Delta \nu| < TOL \quad (4.98)$$

Για παράδειγμα στο πειραματικό σκέλος της εργασίας η τιμή του ορίου σύγκλισης έχει επιλεγεί :  $TOL = 0,00025$ .

Όταν στην κατάθλιψη της αντλίας υπάρχει βαλβίδα αντεπιστροφής, είναι αναγκαίο να καθορισθεί ένα κριτήριο θετικής ροής. Θέτοντας στη σχέση 4.81  $\nu = 0$  και θεωρώντας τις απώλειες όταν η βάνα είναι ανοικτή αμελητέες, προκύπτει η σχέση :

$$F_3 = -HPM + H_N \cdot a^2 \cdot W_H \quad (4.99)$$

Για εγκατάσταση που βρίσκεται σε στάθμη διάφορη της αναφοράς θα έχουμε :

$$F_3 = -CM_2 + H_N \cdot a^2 \cdot W_H + z_E \quad (4.100)$$

Όσο ισχύει  $F_3 > 0$ , η ροή είναι θετική και ισχύουν τα όσα έχουμε προαναφέρει. Τη χρονική στιγμή κατά την οποία έχουμε  $F_3 \leq 0$  η βάνα κλείνει στιγμιαία και η αντλία απομονώνεται από την σωλήνωση κατάθλιψης. Άρα νόημα έχει μόνο η επίλυση της  $F_2$  (σχέση 4.89), απ' όπου προκύπτει ο ρυθμός επιβράδυνσης των στρεφόμενων μαζών. Βάση της μεθόδου Newton – Raphson θα ισχύει :

$$F_2 + F_{2,a} \cdot \Delta a = 0 \Leftrightarrow \Delta a = -F_2 / F_{2,a} \quad (4.101)$$

Η νέα τιμή της παραμέτρου  $a$  θα είναι  $a' = a + \Delta a$  και η διαδικασία αυτή θα επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση της τιμής της.

Στην περίπτωση κατά την οποία έχουμε  $N$  αντλίες συνδεδεμένες σε σειρά και η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρή, η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω διαφοροποιείται ελαφρά. Διατυπώνονται  $N + 1$  εξισώσεις ίδιας μορφής με τις 4.81 & 4.89,  $N$  για την κινηματική συμπεριφορά κάθε αντλίας και μία για τη μεταβολή ύψος και παροχής στη σωλήνωση. Όμως και οι άγνωστοι είναι  $N + 1$  ( $a_1, \dots, a_N, \nu$ ), γιατί από την εξίσωση συνέχειας στη σωλήνωση προκύπτει :

$$Q_{h,1} = \dots = Q_{h,N} = \nu_1 \cdot Q_{N,1} = \dots = \nu_N \cdot Q_{N,N} \quad (4.102)$$

Δηλαδή μεταξύ των παραμέτρων  $\nu$  θα ισχύει :

$$\nu_1 = \dots = (Q_{N,N} / Q_{N,1}) \cdot \nu_N = c_N \cdot \nu_N = \nu \quad (4.103)$$

Το σύστημα αυτό επιλύεται με τη μέθοδο Newton – Raphson και προκύπτουν οι τιμές των αγνώστων παραμέτρων.

Κάτι ανάλογο συμβαίνει και όταν υπάρχουν  $K$  παράλληλες αντλίες, των οποίων οι αγωγοί αναρρόφησης και κατάθλιψης μέχρι τη σύνδεσή τους σε κοινή σωλήνωση έχουν μικρά μήκη. Στην περίπτωση κατά την οποία οι αντλίες είναι ταυτόσημες και

άρα έχουν ίδια χαρακτηριστικά, η εκτενής ανάλυση που προηγήθηκε δεν αλλάζει, παρά μόνο στο γεγονός ότι η παροχή στον κοινό αγωγό θα ισούται με :

$$QP_{2,1} = Q_{1,N+1} = K \cdot Q_H = K \cdot v \cdot Q_N \quad (4.104)$$

Εάν όμως οι αντλίες είναι διαφορετικές μεταξύ τους, θα ισχύει :

$$QP_{2,1} = Q_{1,N+1} = Q_{H,1} + \dots + Q_{H,K} = v_1 \cdot Q_{N,1} + \dots + v_K \cdot Q_{N,K} \quad (4.105)$$

Έτσι θα πρέπει να διατυπωθούν  $2K$  εξισώσεις,  $K$  για την κινηματική συμπεριφορά κάθε αντλίας και  $K$  για την μεταβολή του ύψους και της παροχής σε κάθε κλάδο. Επομένως δημιουργείται σύστημα με  $2K$  αγνώστους  $(a_1, \dots, a_K, v_1, \dots, v_K)$  το οποίο επιλύεται με τη μέθοδο Newton – Raphson.

#### 4.4.5 Αντιπληγματική προστασία

Προκειμένου να μετριαστούν οι επιπτώσεις του υδραυλικού πλήγματος σε μία αντλητική εγκατάσταση μπορούν υιοθετηθούν διάφορες μέθοδοι. Μερικές από αυτές είναι :

- Αύξηση της διαμέτρου των αγωγών

Έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της μέσης ταχύτητας ροής στις σωληνώσεις, γεγονός που επιφέρει την σχεδόν αναλογική μείωση της έντασης του υδραυλικού πλήγματος, δηλαδή την μείωση των υποπίεσεων και υπερπίεσεων στους αγωγούς. Είναι πλήρως αξιόπιστη μέθοδος, όμως έχει δυσμενή επίπτωση στο κόστος κατασκευής της εγκατάστασης. Σε αρκετές πάντως περιπτώσεις, είναι πιο οικονομική και ασφαλώς πιο αξιόπιστη συγκριτικά με άλλες μεθόδους.

- Ύπαρξη κλάδου by-pass

Συναντάται κυρίως σε μικρές εγκαταστάσεις και συνήθως έχει ως στόχο τον μετριασμό της υποπίεσης στον αγωγό κατάθλιψης. Στην περίπτωση αυτή, ο τελευταίος συνδέεται με τη δεξαμενή αναρρόφησης με κλάδο που παρακάμπει την αντλία. Έτσι όταν επικρατεί υποπίεση στον αγωγό κατάθλιψης, αυτή μετριάζεται από την ροή ρευστού προερχόμενου από τη δεξαμενή. Για τη μη διατάραξη της ομαλής λειτουργίας της εγκατάστασης και την αποτροπή ροής προς την κάτω δεξαμενή, ο κλάδος φέρει βαλβίδα αντεπιστροφής.

- Εγκατάσταση σφονδύλου

Χρησιμοποιείται για τη μείωση της έντασης του πλήγματος που προκαλείται από απότομο σταμάτημα του κινητήρα. Αυξάνει τη ροπή αδρανείας των στρεφόμενων μαζών με αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού επιβράδυνσης της αντλίας. Το μέγεθός του είναι ανάλογο του μήκους της σωλήνωσης κατάθλιψης και καθίσταται απαγορευτικό για μήκη μεγαλύτερα των περίπου 2km. Εμφανίζει υψηλή αξιοπιστία, ωστόσο επιβαρύνει σημαντικά το κόστος κατασκευής και συντήρησης της εγκατάστασης. Επιπλέον, η παρουσία του επιβαρύνει την εκκίνηση του αντλιοστασίου, αυξάνοντας τις απαιτήσεις σε ροπή εκκίνησης και ηλεκτρικό ρεύμα καθώς και το χρόνο εκκίνησης.

- Εγκατάσταση πύργου ανάπαλσης

Πρόκειται για δεξαμενή ελεύθερης επιφάνειας, μικρής διατομής και μεγάλου ύψους, που φέρει υγρό ίδιο με το διακινούμενο στην εγκατάσταση. Ανάλογα με τη θέση όπου τοποθετείται μπορεί να συμβάλλει στην απόσβεση τόσο υποπίεσεων όσο και

υπερπιέσεων. Στην πρώτη περίπτωση, συνδέεται με τον αγωγό κατάθλιψης μέσω βαλβίδας αντεπιστροφής. Η έναρξη τη ροής του υγρού προς τον αγωγό, εξαρτάται από την επιλογή της στάθμης του νερού στον πύργο. Στη δεύτερη περίπτωση, συνδέεται με τον αγωγό μέσω ειδικά διαμορφωμένου στομίου με υψηλό συντελεστή εντοπισμένων απωλειών. Το ρευστό λόγω της αυξημένης του πίεσης εισέρχεται και εξέρχεται από τον πύργο και καθώς μία βαλβίδα αντεπιστροφής διακόπτει τη ροή προς την αντλία, εκτελεί ταλάντωση η οποία διαρκώς αποσβένεται λόγω των ενεργειακών απωλειών στο στόμιο εισόδου. Συχνά υπάρχει ανάγκη τροφοδότησής του με υγρό από εξωτερική πηγή.

- Εγκατάσταση αεροφυλακίου

Είναι η μέθοδος αντιπληγματικής προστασίας που επιλέχθηκε στην υπό μελέτη εγκατάσταση. Το αεροφυλάκιο είναι μία κλειστή δεξαμενή, η οποία είναι γεμάτη με αέρα και υγρό ίδιο με αυτό που διακινείται στην εγκατάσταση και χρησιμοποιείται κυρίως για τον μετριασμό των υπερπιέσεων. Η αρχή λειτουργίας του είναι όμοια με αυτή του πύργου ανάπαλσης, δηλαδή το υγρό εισέρχεται και εξέρχεται σε αυτό εκτελώντας μία διαρκώς αποσβενόμενη ταλάντωση λόγω των απωλειών στο στόμιο εισόδου και της αντίστασης του πεπιεσμένου αέρα. Συνήθως το στόμιο είναι τύπου Borda, εξαιτίας του οποίου η ταχύτητα ροής από τον αγωγό προς το δοχείο είναι 2 φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα της ροής από το δοχείο προς τον αγωγό. Οι υδραυλικές απώλειες του στομίου είναι ίσες με την κινητική ενέργεια του ρευστού, δηλαδή ισχύει :

$$\delta h_{\sigma} = \kappa \frac{u^2}{2g} = \kappa \frac{1}{2g} \cdot \left( \frac{Q}{\pi d^2 / 4} \right)^2 \quad (4.106)$$

, όπου  $\kappa$  ο λόγος απωλειών στομίου που παίρνει τιμή  $\kappa = 1$  για ροή από το αεροφυλάκιο προς τον αγωγό και  $\kappa = 2.5 \div 3$  για την αντίστροφη φορά της ροής,  $d$  η διατομή του στομίου και  $Q$  η διακινούμενη από αυτό παροχή.

Η στατική πίεση του αέρα του δοχείου  $H_{\ominus}$  ισούται με διαφορά της ολικής πίεσης  $H_{o,i}$  του κόμβου στον οποίο συνδέεται με τη σωλήνωση και της στάθμης του υγρού  $z_{\ominus}$  εντός αυτού. Δηλαδή για το μόνιμο σημείο λειτουργίας θα ισχύει :

$$H_{o,i} = H_i + z_i = z_{\ominus} + H_{\ominus} \quad (4.107)$$

Επομένως αύξηση της πίεσης στον κόμβο, θα προκαλέσει αύξηση της πίεσης του αέρα, μείωση του όγκου του και αύξηση της στάθμης του υγρού. Δηλαδή αυτή διαμοιράζεται στον αέρα και το υγρό. Η μεταβολή του όγκου του αέρα συνδέεται με τη μεταβολή της στατικής του πίεσης με τη σχέση :

$$H_{\ominus} \cdot V_{\ominus}^n = H'_{\ominus} \cdot V'_{\ominus}{}^n \quad (4.108)$$

, όπου  $n = 1, 2$  μία μέση τιμή του εκθέτη καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Από την τιμή του  $H'_{\ominus}$  και τη κατεύθυνση της ροής του υγρού καθορίζεται η νέα τιμή της στατικής πίεσης στον κόμβο :

$$H_i = (z_{\ominus} - z_i) + H'_{\ominus} \pm \delta h_{\sigma} \quad (4.109)$$

Γενικά το αεροφυλάκιο είναι πολύ πιο αξιόπιστο από τον πύργο ανάπλασης, ωστόσο έχει αυξημένο κόστος εγκατάστασης, λόγω του μεγάλου μεγέθους του, και υψηλό κόστος λειτουργίας, εξαιτίας της ανάγκης ύπαρξης αεροσυμπιεστή που εισάγει επιπλέον αέρα όταν η στάθμη του υγρού έχει υπερβεί κάποιο όριο. Για το λόγο αυτό εγκαθίσταται κυρίως σε μεγάλες εγκαταστάσεις.

## 4.5 Αναστρέψιμοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί

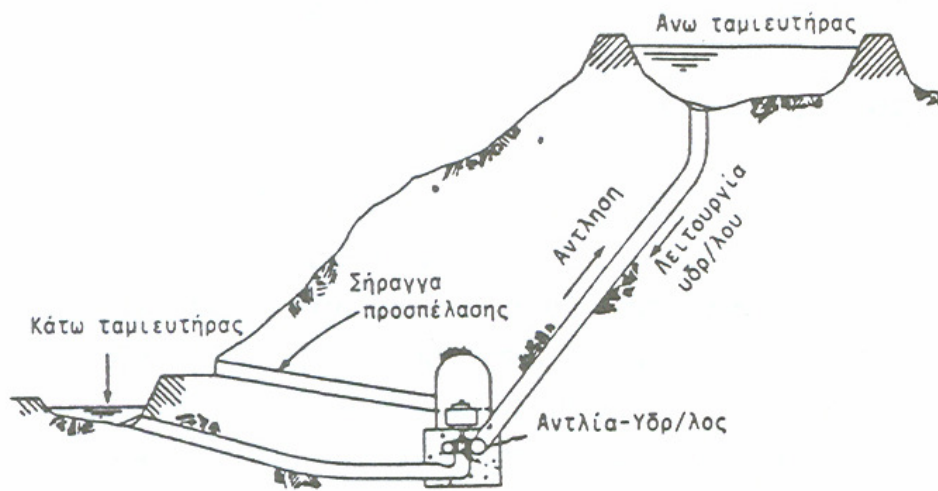
### 4.5.1 Αρχή λειτουργίας - εφαρμογές

Ο ηλεκτρισμός είναι ένα στιγμιαίο φαινόμενο, συνεπώς πρέπει να παράγεται όποτε ζητείται. Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας εξακολουθεί να προέρχεται από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΘΗΣ), οι οποίοι απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα για να μεταβάλουν το φορτίου τους και να προσαρμοστούν στις τιμές της ζήτησης ενέργειας. Επειδή η τελευταία μπορεί να παρουσιάσει μεγάλες διακυμάνσεις ακόμα και μέσα σε διάστημα κάποιων ωρών, οι ΘΗΣ χρησιμοποιούνται ως σταθμοί βάσης παράγοντας ένα κατά βάση σταθερό ποσό ενέργειας, ενώ οι αιχμές της ζήτησης καλύπτονται από μικρούς ΘΗΣ με αεριοστροβίλους και από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ). Οι τελευταίοι, εφ' όσον περιλαμβάνουν φράγμα και δεξαμενή αποθήκευσης νερού, μπορούν να αποδώσουν στο δίκτυο ισχύ εντός μερικών δευτερολέπτων. Και πάλι όμως υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση και η περίσσεια ενέργεια χάνεται, ενώ και η δυνατότητα παραγωγής των ΥΗΣ περιορίζεται από διάφορους παράγοντες (κλιματικούς, χρήση νερού για άλλους σκοπούς κτλ).

Μία λύση στο πρόβλημα αυτό, αποτελούν τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα (reversible hydro-power stations) ή αλλιώς σταθμοί άντλησης – ταμίευσης (pumped – storage plants). Αυτοί περιλαμβάνουν όπως και οι συμβατικοί ΥΗΣ μία άνω δεξαμενή στην οποία συγκεντρώνεται νερό. Λόγω της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ δεξαμενής και χώρου εγκατάστασης των υδροστροβίλων, το νερό κατά την πτώση του προσδίδει σε αυτούς ισχύ, η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση γεννητριών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση όμως με τους συμβατικούς σταθμούς, το νερό αυτό δεν αφήνεται να διαφύγει, αλλά συγκεντρώνεται σε μία κάτω δεξαμενή. Στις περιόδους όπου η ζήτηση ενέργειας υπερκαλύπτεται (π.χ. στη διάρκεια της νύχτας), η περισσευούμενη ισχύς χρησιμοποιείται για άντληση του νερού από την κάτω προς την άνω δεξαμενή, ώστε να είναι πάλι διαθέσιμο για παραγωγή ενέργειας. Έτσι παρά το αυξημένο κόστος κατασκευής τους, τις αλλοιώσεις που επιφέρουν στο φυσικό τοπίο, και την δυνατότητα κατασκευής τους μόνο σε περιοχές συγκεκριμένης μορφολογίας, οι αναστρέψιμοι ΥΗΣ είναι έργα μεγάλης διάρκειας ζωής, που μας δίνουν την δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας υπό υδραυλική μορφή, διαθέσιμης σε ελάχιστο χρόνο, χωρίς περαιτέρω περιβαλλοντικές επιπτώσεις (καυσαέρια, απόβλητα κτλ). Επιπλέον, μπορούν να αποτελούν την εφεδρεία ενός συστήματος, αντικαθιστώντας μονάδες βάσης σε περίπτωση βλάβης ή απλώς να χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση της συχνότητας και της τάσης του δικτύου. Για τους λόγους αυτούς βρίσκονται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος και συνεχώς κατασκευάζονται νέα έργα όλο και μεγαλύτερης ισχύος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι σταθμοί Tianhuangping (Κίνα, 2001) ισχύος 1,8GW και Kannagawa (Ιαπωνία, υπό κατασκευή) ισχύος 2,8GW. Στην Ελλάδα υπάρχουν δύο τέτοιοι σταθμοί : της Σφηκιάς στον ποταμό Αλιάκμονα ισχύος 315MW και του Θησαυρού στον ποταμό Νέστο ισχύος 381MW .



Οι δύο δεξαμενές μπορεί να είναι είτε φυσικές κοιλότητες που «σφραγίζονται» με φράγμα, είτε εξ' ολοκλήρου τεχνητές κατασκευές. Η δεύτερη περίπτωση είναι σπάνια για την άνω δεξαμενή, καθώς επιδιώκεται αυτή να συγκεντρώνει και ύδατα από την τοπική λεκάνη απορροής τα οποία τουλάχιστον θα αντισταθμίζουν τις απώλειες νερού λόγω εξάτμισης. Ο βαθμός απόδοσής των έργων αυτών, είναι ουσιαστικά ο βαθμός ανάκτησης της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στη φάση της άντλησης, και κυμαίνεται μεταξύ 70% και 85%. Σε περίπτωση που η φυσική παροχή στην άνω δεξαμενή υπερκαλύπτει τις εξατμίσεις, μπορούν να παράγουν και πρωτογενή ηλεκτρική ενέργεια. Οι διάφορες απώλειες εντοπίζονται στις υδροδυναμικές μηχανές, τις ηλεκτρικές μηχανές, σε ηλεκτρολογικές διατάξεις και φυσικά στις σωληνώσεις.



Εικόνα 4.11 Διάταξη αναστρέψιμου ΥΗΣ

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή των αναστρέψιμων έργων είναι ο συνδυασμός τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή και η αιολική. Εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, οι μορφές αυτές βρίσκονται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος, και κατασκευάζονται συνεχώς νέες μονάδες αξιοποίησής τους. Ωστόσο χαρακτηρίζονται από στοχαστικότητα της δυνατότητας ηλεκτροπαραγωγής η οποία εξαρτάται κυρίως από κλιματικούς παράγοντες, με αποτέλεσμα να είναι σπάνιο να συμπίπτει η παραγόμενη ενέργεια με τη ζητούμενη από το σύστημα. Το πρόβλημα αυτό εντείνεται ακόμα περισσότερο σε περιοχές με αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως είναι τα νησιά του Αιγαίου όπου έχουν εγκατασταθεί αρκετά αιολικά πάρκα. Ο συνδυασμός αιολικού πάρκου και ενός μικρού αναστρέψιμου ΥΗΣ, μπορεί να δώσει λύση στο πρόβλημα. Συγκεκριμένα, όταν η ηλεκτροπαραγωγή του πάρκου υπερκαλύπτει τη ζήτηση, η περισσευούμενη ενέργεια που σε κανονικές συνθήκες δεν θα αξιοποιούνταν, χρησιμοποιείται για την άντληση νερού προς την άνω δεξαμενή του ΥΗΣ. Όταν η ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή του πάρκου, τίθεται σε λειτουργία ο σταθμός και παράγει ενέργεια χρησιμοποιώντας την ενέργεια του νερού που έχει ήδη αποθηκευτεί. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό μπορούμε να οδηγηθούμε στην σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτηση του δικτύου αυτού από την χρήση ορυκτών καυσίμων στην ηλεκτροπαραγωγή. Η ύπαρξη μιας γεννήτριας diesel ως εφεδρείας,

έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός συστήματος που θα καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

Τέλος σε περιοχές όπου δεν υπάρχει πρόβλημα επάρκειας ηλεκτρικής ενέργειας, είναι δυνατός ο συνδυασμός των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αντλιοστάσια. Αυτά λειτουργούν σε περιόδους περίσσειας της παραγόμενης ενέργειας και αποθηκεύουν νερό σε μία δεξαμενή, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για τις ανάγκες των κατοίκων.

#### 4.5.2 Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός

Οι μονάδες των αναστρέψιμων ΥΗΣ τοποθετούνται σε στάθμη χαμηλότερη από αυτή της κατώτερης δεξαμενής για την αποφυγή εισροής αέρα, κάτι όμως που απαιτεί μεγάλο όγκο εκσκαφών. Μπορούν να απομονωθούν από τις δύο δεξαμενές, μέσω βανών που τοποθετούνται στους αγωγούς κατάθλιψης και αναρρόφησης. Ανάλογα με τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Τις σύνθετες

Περιλαμβάνουν υδροστρόβιλο, φυγόκεντρη αντλία και μία ή δύο ηλεκτρικές μηχανές (κινητήρας, γεννήτρια). Συνήθως επιδιώκεται για λόγους μείωσης του απαιτούμενου χώρου και κόστους, η ύπαρξη μιας ηλεκτρικής μηχανής που λειτουργεί κάθε φορά είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια. Οι τρεις μηχανές τοποθετούνται σε κοινή άτρακτο και η φορά περιστροφής είναι ίδια ανεξαρτήτως λειτουργίας. Για τη μείωση των φθορών απαιτείται η ύπαρξη συμπλέκτη στα άκρα της άτρακτου, ώστε να μην περιστρέφεται άσκοπα η υδροδυναμική μηχανή που κάθε φορά δεν εργάζεται. Σε περίπτωση κατακόρυφης διάταξης, η αντλία τοποθετείται στο κατώτερο σημείο, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

- Τις εξοπλισμένες με αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή (στροβιλοαντλία).

Πρόκειται για μηχανές που έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας είτε ως αντλίες είτε ως στρόβιλοι, με αντιστροφή της φοράς περιστροφής της πτερωτής (δρομέα) και της φοράς ροής του ρευστού. Επίσης οι μονάδες αυτές περιλαμβάνουν ηλεκτρική μηχανή που εργάζεται είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας.

Οι σύνθετες μονάδες παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος εξοπλισμού και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο. Δίνουν όμως το πλεονέκτημα επιλογής μηχανών που θα εργάζονται στο κανονικό τους σημείο λειτουργίας, δίχως να υπάρχει ανάγκη συμβιβασμών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση, όπου λόγω του μεγάλου υδραυλικού ύψους προκρίνεται η εγκατάσταση στροβίλου τύπου Pelton, ο οποίος όμως δεν μπορεί να λειτουργήσει ως αντλία. Επίσης προτιμώνται όταν η προβλεπόμενη συχνότητα εναλλαγής λειτουργίας είναι υψηλή, καθώς οι αναστρέψιμες μηχανές θα πρέπει πρώτα να σταματήσουν και στη συνέχεια να αρχίσουν να περιστρέφονται αντίστροφα, δηλαδή πρόκειται για χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται μηχανές που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο διαμορφώσεων. Πρόκειται για στροβιλοαντλίες με δύο πτερωτές που μοιράζονται την ίδια άτρακτο. Η μία λειτουργεί ως πτερωτή αντλίας και η άλλη ως δρομέας στροβίλου, επιτυγχάνοντας βέλτιστη λειτουργία και στις δύο περιπτώσεις.

Οι αναστρέψιμες υδροδυναμικές μηχανές, συνήθως εμφανίζουν το ίδιο κατ' απόλυτη τιμή θεωρητικό ύψος πτερωτής τόσο για λειτουργία στροβίλου όσο και για λειτουργία αντλίας ( $H_u = H_{u,T} = -H_{u,P}$ ) καθώς και την ίδια παροχή πτερωτής ( $Q_u = Q_{u,T} = -Q_{u,P}$ ).

Όμως το πραγματικό ύψος της αντλίας είναι μειωμένο κατά τις υδραυλικές απώλειες, ενώ η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι αυξημένη κατά τις υδραυλικές απώλειες.

Δηλαδή ισχύει :

$$H_P = H_{u,P} - \delta h_P \quad (4.110)$$

$$H_T = H_{u,T} + \delta h_T \quad (4.111)$$

Ανάλογα για την παροχή ισχύει :

$$Q_P = Q_{u,P} - \delta Q_P \quad (4.112)$$

$$Q_T = Q_{u,T} + \delta Q_T \quad (4.113)$$

Επομένως βλέπουμε ότι τα δύο σημεία λειτουργίας της πτερωτής δε συμπίπτουν. Η διαφορά αυτή ενισχύεται από τη διαφορετική μορφή της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης για κάθε λειτουργία, αφού έχουμε :

$$H_{\Sigma,P} = h + \zeta \cdot Q^2 \quad (4.114)$$

$$H_{\Sigma,T} = h - \zeta \cdot Q^2 \quad (4.115)$$

Δηλαδή το καθαρό ύψος αντλίας είναι πάντα μεγαλύτερο από το καθαρό ύψος στροβίλου. Η ροή εντός της μηχανής για λειτουργία αντλίας είναι επιβραδυνόμενη, ενώ για λειτουργία στροβίλου επιταχυνόμενη, με αποτέλεσμα στην πρώτη περίπτωση η μηχανή να εμφανίζει αστάθεια, ειδικά για λειτουργία σε μερική παροχή. Έτσι η εκλογή του σημείου λειτουργίας της αναστρέψιμης μηχανής, επιλέγεται πλησιέστερα στο σημείο λειτουργίας αντλίας. Το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος στα οποία λειτουργούν οι μηχανές καθορίζονται από διάφορους παράγοντες. Για παράδειγμα μείωση του ύψους άντλησης, έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της παροχής αλλά και αύξηση της απαιτούμενης ισχύος. Έτσι το ελάχιστο καθαρό ύψος άντλησης περιορίζεται από την μέγιστη ισχύ που μπορεί να απορροφήσει ο κινητήρας. Για το μέγιστο ύψος άντλησης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι περιοχές ασταθούς λειτουργίας της μηχανής.

Το ελάχιστο ύψος στροβίλου περιορίζεται από την ικανότητα της μηχανής να επιταχύνει στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής ενώ ταυτόχρονα η γωνία της βάνας δεν πρέπει ξεπερνά μία συγκεκριμένη τιμή ασφαλείας, καθώς και από την ανάγκη ευσταθούς λειτουργίας της μηχανής κατά την διαδικασία αυτή. Είναι προφανές ότι το εύρος του ύψους λειτουργίας καθορίζεται από το μέγιστο ύψος άντλησης και το ελάχιστο ύψος στροβίλου. Ακόμα η μηχανή εμφανίζει άλλες δύο περιοχές εργασίας. Όταν η φορά περιστροφής είναι όμοια με του στροβίλου, αλλά η παροχή είναι από την κάτω προς την άνω δεξαμενή ( $n > 0, Q < 0$ ) έχουμε λειτουργία αντιστρόφου στροβίλου, ενώ όταν το νερό ρέει από την άνω προς την κάτω δεξαμενή και η φορά περιστροφής είναι ίδια με της αντλίας ( $n < 0, Q > 0$ ), η μηχανή εργάζεται ως ρυθμιζόμενη αντίσταση.

### 4.5.3 Η εκκίνηση στους αναστρέψιμους ΥΗΣ

Και στους αναστρέψιμους ΥΗΣ, τίθεται το πρόβλημα της εκκίνησης των αντλιών, το οποίο εντείνεται ακόμα περισσότερο λόγω του μεγάλου μεγέθους των μηχανών. Σε αυτό ακριβώς το σημείο εντοπίζεται και η σύνδεση της παρούσας εργασίας με τις εγκαταστάσεις αυτές. Για την μείωση της απαιτούμενης ισχύος εκκίνησης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που εμπλέκουν τόσο τις αντλίες όσο και για τους κινητήρες. Όσον αφορά τις πρώτες, η εκκίνηση μπορεί με δύο τρόπους :

- με την πτερωτή γεμάτη νερό

Στην περίπτωση αυτή η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων παραμένει κλειστή, δηλαδή η παροχή είναι μηδενική. Με τον τρόπο αυτό η ισχύς που απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής, ισούται με το 35% της ονομαστικής. Για την παροχή της ισχύος αυτής και τον συγχρονισμό της αντλίας, δηλαδή την επιτάχυνσή της στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, είναι απαραίτητη η ύπαρξη βοηθητικού υδροστροβίλου. Μετά το συγχρονισμό, τα ρυθμιστικά πτερύγια ανοίγουν μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Η λειτουργία με κλειστά πτερύγια, συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής για την απαγωγή την οποίας πρέπει να ληφθεί μέριμνα.

- με την πτερωτή κενή

Και εδώ τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι κλειστά, ωστόσο η βάνα κατάθλιψης είναι ανοικτή. Η πτερωτή αδειάζει από το νερό με την έγχυση αέρα υπό πίεση στο σπειροειδές κέλυφος. Αυτό συνεχίζεται μέχρι η στάθμη στην αναρρόφηση να πέσει κάτω από το κατώτερο σημείο της πτερωτής. Η αντλία επιταχύνεται εν κενό και συγχρονίζεται, είτε από κάποιο βοηθητικό υδροστροβίλο είτε με σύζευξη στο δίκτυο, καταναλώνοντας πολύ μικρή ισχύ περίπου 1-3% της ονομαστικής. Στη συνέχεια η πτερωτή πληρώνεται με νερό. Επειδή η πλήρωση από την κάτω δεξαμενή προκαλεί κρουστικά φαινόμενα, αυτό μπορεί να γίνει από την άνω δεξαμενή ή και με άλλους τρόπους.

Οι ηλεκτρικές μηχανές των αναστρέψιμων ΥΗΣ είναι κατά κύριο λόγο σύγχρονες, λόγω της ικανότητάς τους να εναλλάσσουν εύκολα τη λειτουργίας τους. Οι διάφορες τεχνικές εκκίνησης κινητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής :

- Ύπαρξη βοηθητικού εξωτερικού κινητήρα
- Ύπαρξη βοηθητικού υδροστροβίλου
- Ασύγχρονη εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο
- Ασύγχρονη εκκίνηση με χαμηλή τάση τροφοδοσίας
- Σύγχρονη εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας

Στις πρώτες τέσσερις μεθόδους, κάθε μονάδα διαθέτει το δικό της εξοπλισμό εκκίνησης, ενώ στην εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας είναι δυνατή η εκκίνηση περισσότερων από μία μονάδων με κοινό εξοπλισμό. Αυτή αποτελεί και την πλέον διαδεδομένη μέθοδο, καθώς οι υπόλοιπες παρουσιάζουν μια σειρά σοβαρών μειονεκτημάτων.

Η εγκατάσταση βοηθητικού εξωτερικού κινητήρα, συνεπάγεται αυξημένο όγκο εκσκαφών για την εγκατάσταση τόσο αυτού όσο και συμπληρωματικού εξοπλισμού (μειωτήρας, σύστημα λίπανσης κτλ). Συνοδεύεται από σημαντική αύξηση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας. Επιπρόσθετα κατά την λειτουργία του

κινητήρα αναπτύσσονται στις ατράκτους κραδασμοί, δημιουργώντας προβλήματα στη λειτουργία της στροβιλοαντλίας.

Ο βοηθητικός στρόβιλος, απαιτεί επίσης αυξημένες εκσκαφές για την εγκατάστασή του και ενέχει αυξημένο κόστος. Επιπλέον, η εκκίνηση καθίσταται αδύνατη σε περίπτωση όπου ο στρόβιλος είναι εκτός λειτουργίας για τη συντήρησή του. Τέλος η τεχνική αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έργα όπου η άνω δεξαμενή είναι αρχικά άδεια και απαιτείται πλήρωσή της.

Η εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο, συνοδεύεται όπως έχουμε αναφέρει από υψηλές τιμές ρεύματος εκκίνησης και πιθανές βυθίσεις τάσης. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι αναστρέψιμοι ΥΗΣ χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αιχμών ζήτησης και την σταθεροποίηση του δικτύου, αντιλαμβάνεται κανείς την ακαταλληλότητα της μεθόδου, αφού αυτή μπορεί να έχει δυσμενή επίδραση στο ήδη βεβαρημένο δίκτυο. Επιπλέον για την επίτευξη σταθερότητας κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, πραγματοποιούνται διάφορες αλλαγές στο σχεδιασμό της ηλεκτρικής μηχανής (π.χ. πιο συμπαγείς πόλοι) που όμως αυξάνουν το κόστος της και μειώνουν την αξιοπιστία και την απόδοσή της σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας. Τέλος η μέθοδος αυτή συνοδεύεται από υψηλά δυναμικά και θερμικά φορτία που μειώνουν τη διάρκεια ζωής της μηχανής και του όλου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

Η ασύγχρονη εκκίνηση με χαμηλή τάση τροφοδοσίας γίνεται είτε μέσω αυτομετασχηματιστή είτε με ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης. Στην πρώτη περίπτωση, εξακολουθούν να υπάρχουν υψηλοί παλμοί ρεύματος που δοκιμάζουν την αντοχή του δικτύου τροφοδοσίας. Αυτό το πρόβλημα εξαλείφεται με τους ηλεκτρονικούς ρυθμιστές τάσης. Η ανάγκη όμως ύπαρξης ενός εκκινητή για κάθε μονάδα, αυξάνει το κόστος της επιλογής αυτής.

Έτσι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος για την εκκίνηση των ηλεκτρικών μηχανών στους υπάρχοντες ΥΗΣ, είναι η χρήση οδήγησης μεταβλητής συχνότητας. Αυτή παρουσιάζει μεγάλη αξιοπιστία και είναι κατάλληλη για την αρχική πλήρωση της άνω δεξαμενής. Επίσης η δυνατότητα εκκίνησης περισσότερων των μία μονάδων από έναν εκκινητή, οδηγεί σε μείωση του κόστους εξοπλισμού και λειτουργίας καθώς και σε περιορισμένο συμπληρωματικό όγκο εκσκαφών. Η διαμόρφωση και το πλήθος των εκκινητών εξαρτάται από το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θέλουμε να ολοκληρωθεί το ξεκίνημα μιας μονάδας και όλης της εγκατάστασης. Μια συνήθης διαμόρφωση είναι η ύπαρξη δύο οδηγήσεων, έτσι ώστε όταν απαιτείται η συντήρηση μιας, να μην είναι αναγκαία η εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο.



## **ΜΕΡΟΣ Β΄ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΚΕΛΟΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PUMPSTAR

#### 5.1.1 Εισαγωγή

Για την εκτέλεση του πειραματικού σκέλους της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PUMPSTAR. Πρόκειται για έναν κώδικα γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ο οποίος υπολογίζει τα σημαντικότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την εκκίνηση μιας αντλητικής εγκατάστασης, ανά χρονικά βήματα  $\Delta t$ . Τα μεγέθη που σχετίζονται με τη σωλήνωση, υπολογίζονται σε συγκεκριμένα σημεία ελέγχου. Λόγω της ύπαρξης αγωγών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, κάθε σημείο χαρακτηρίζεται από δύο δείκτες, αυτόν του αγωγού στον οποίο ανήκει ( $J$ ) και αυτόν που δείχνει τη θέση του αγωγού ( $I$ ). Ο αριθμός των σημείων, καθορίζεται από τον αριθμό των τμημάτων στα οποία διακριτοποιείται κάθε αγωγός. Όπως προαναφέραμε, πρώτα αυτό γίνεται στον μικρότερο αγωγό και στη συνέχεια στους μεγαλύτερους. Για τη μετάβαση από τον ένα αγωγό στον άλλο διατυπώνονται κατάλληλες οριακές συνθήκες. Τα μεγέθη υπολογίζονται τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , καταγράφονται, και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών στην επόμενη χρονική στιγμή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να καθορισθεί πλήρως η διαδικασία της εκκίνησης.

#### 5.1.2 Περιγραφή αρχείων εισόδου & εξόδου

Η εισαγωγή των δεδομένων της εγκατάστασης γίνεται μέσω των αρχείων εισόδου, ενώ τα αποτελέσματα γράφονται στα αρχεία εξόδου. Κάθε ένα από αυτά χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο αριθμό. Έτσι έχουμε τα αρχεία εισόδου :

##### 7. INPIPP

Το αρχείο αυτό περιγράφει το δίκτυο της σωλήνωσης της εγκατάστασης. Έτσι εδώ καθορίζονται ο αριθμός των σωληνώσεων, τα χαρακτηριστικά τους (μήκος, διάμετρος, πάχος, τραχύτητα, στάθμη στα δύο άκρα, υλικό κατασκευής) και καθορίζονται οι αγωγοί που συντρέχουν σε κάθε κόμβο. Επιπλέον αναφέρεται ο αριθμός των αντλιών της εγκατάστασης, όπως και οι αγωγοί αναρρόφησης και κατάθλιψής τους.

##### 8. PUMPCON

Εδώ γίνεται περιγραφή των μηχανών και των διατάξεων της εγκατάστασης. Έτσι καθορίζεται ο αριθμός των αντλιών (είναι ταυτόσημες), το κανονικό σημείο λειτουργία τους (ύψος, παροχή, βαθμός απόδοσης, ταχύτητα περιστροφής), η ροπή αδρανείας των στρεφόμενων μαζών τους, καθώς και το αν αυτές λειτουργούν. Όσον αφορά τους ηλεκτροκινητήρες, αναφέρεται η ονομαστική τους ισχύ και χαρακτηριστικά που συνδέονται με το είδος τους (π.χ. ροπή ανατροπής σύγχρονων μηχανών). Επιπλέον καθορίζεται το αν η εγκατάσταση περιλαμβάνει αεροφυλάκια και πόσα είναι αυτά, καθώς και τα κύρια στοιχεία τους (διάμετρος, αρχικός όγκος και στάθμη αέρα, διάμετρος και λόγος απωλειών στομίου). Ακόμα αναφέρονται στοιχεία που έχουν να κάνουν με την εκκίνηση της εγκατάστασης (διαδοχική εκκίνηση



αντλιών, χρονική στιγμή ανοίγματος βανών). Τέλος καθορίζονται λειτουργικές παράμετροι του προγράμματος (μέγιστος χρόνος τρεξίματος, ελάχιστο πλήθος τμημάτων στα οποία χωρίζεται ένας αγωγός, συχνότητα καταγραφής αποτελεσμάτων).

#### 9. WHWB

Στο αρχείο αυτό καθορίζονται οι τιμές των αδιάστατων παραμέτρων  $W_H$  και  $W_B$  της χρησιμοποιούμενης αντλίας, συναρτήσει της μεταβλητής  $x = ATAN(v/a)$ .

#### 10. ZBUTER

Πρόκειται για αρχείο του οποίου η ύπαρξη εξαρτάται από την ύπαρξη βανών τύπου πεταλούδας στην κατάθλιψη των αντλιών. Καθορίζει την μεταβολή του συντελεστή απωλειών συναρτήσει της γωνίας που σχηματίζει ο δίσκος με την διεύθυνση της ροής.

#### 15. INMHKOT

Εδώ καθορίζεται η μηκοτομή του αγωγού κατάθλιψης της εγκατάστασης. Δηλαδή αναφέρεται η στάθμη ενός αριθμού σημείων καθώς και η θέση τους κατά μήκος του αγωγού.

#### 16. INMOTOR

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει τη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών και την καμπύλη ρεύματος – στροφών του κινητήρα, αμφότερες αδιαστατοποιημένες ως προς τα ονομαστικά μεγέθη. Προφανώς οι καμπύλες καθορίζονται από εύλογο αριθμό σημείων τους.

Ο τρόπος αυτός εισαγωγής των δεδομένων παρέχει μεγάλη ευελιξία και μας δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του κώδικα σε διαφορετικές εγκαταστάσεις. Αυτό συμβαίνει, γιατί μπορούμε να μεταβάλουμε ουσιώδη δεδομένα του προβλήματος π.χ. τον αριθμό των αντλιών ή την ύπαρξη αεροφυλακίων, με απλές αλλαγές στα αρχεία εισόδου, αφήνοντας τον κώδικα ανεπηρέαστο.

Ο καθορισμός των αρχείων εξόδου και το τι αυτά θα αναφέρουν εναπόκεινται στην ευχέρεια του χρήστη. Για λόγους μείωσης του μεγέθους τους, τα διάφορα μεγέθη καταγράφονται ανά χρονικά διαστήματα  $10 \cdot DT$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει επιλεγεί η δημιουργία των εξής αρχείων :

#### 11. OHAM

Στο αρχείο αυτό καταγράφονται αδιαστατοποιημένα στοιχεία που σχετίζονται κυρίως με τη λειτουργία των αντλιών (παροχή & ταχύτητα περιστροφής), η παροχή σε κάποια σημαντικά σημεία της σωλήνωσης της εγκατάστασης (κατάθλιψη αντλίας, μετά το αεροφυλάκιο, στο τέλος του αγωγού), όπως επίσης και η πίεση σε κόμβους της σωλήνωσης.

#### 12. OPUM

Εδώ αποτυπώνονται αδιαστατοποιημένα στοιχεία που σχετίζονται με την κινηματική συμπεριφορά της εγκατάστασης (κινητήρια & ανθιστάμενη ροπή, ταχύτητα περιστροφής)

#### 13. OAER

Στο αρχείο αυτό αναγράφονται τα στοιχεία των αεροφυλακίων (μανομετρική πίεση, όγκος αέρα, μεταβολή στάθμης αέρα) σε όλη την διάρκεια της εκκίνησης.

#### 14. MHKOT

Σε αυτό καταγράφεται η στάθμη των κόμβων του αγωγού κατάθλιψης, στο αρχικό μόνιμο σημείο λειτουργίας, δηλαδή πριν την εκκίνηση.

#### 17. OMOT

Εδώ αποτυπώνεται η μεταβολή μεγεθών που σχετίζονται με τη λειτουργία του κινητήρα (απορροφόμενο ρεύμα και ταχύτητα περιστροφής κάθε κινητήρα, συνολικά απορροφόμενο ρεύμα από την εγκατάσταση) καθ' όλη τη διάρκεια τρεξίματος του προγράμματος.

#### 18. INTOPP

Στο συγκεκριμένο αρχείο καταγράφονται τα στοιχεία του αρχικού μόνιμου σημείου λειτουργίας (παροχή & ύψος αντλιών, ολική παροχή, απορροφόμενη ισχύς, συντελεστής απωλειών βανών, παροχή & ύψος στην αρχή και το πέρας κάθε αγωγού). Επίσης αποτυπώνεται το χρονικό βήμα και ο χαρακτηριστικός χρόνος της διαδικασίας υπολογισμού.

#### 19. Z

Εδώ αναγράφονται στοιχεία που σχετίζονται με τη λειτουργία των βανών τύπου πεταλούδας (γωνία που σχηματίζει ο δίσκος με την διεύθυνση της ροής, συντελεστής απωλειών).

### 5.1.3 Επεξήγηση υπορουτίνων

Πέρα από τον κύριο κορμό του κώδικα, υπάρχουν και κάποιες υπορουτίνες (subroutines) οι οποίες εκτελούν συγκεκριμένους υπολογισμούς, Αυτές είναι :

#### - Υπορουτίνα WAVESP

Υπολογίζει την ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής σε κάθε αγωγό. Ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου *ISTEEL* του αρχείου εισόδου INPIPP, μας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού τόσο σε χαλύβδινο αγωγό όσο και σε αγωγό από οπλισμένο σκυρόδεμα.

#### - Υπορουτίνα INTER

Πρόκειται για πρόγραμμα γραμμικής παρεμβολής. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής των παραμέτρων  $W_H$  και  $W_B$  της αντλίας, της τιμής ροπής και ρεύματος του κινητήρα για κάθε χρονική στιγμή υπολογισμού, καθώς και για τον καθορισμό της στάθμης των σημείων ελέγχου του αγωγού κατάθλιψης.

#### - Υπορουτίνα INTERZ

Επίσης είναι πρόγραμμα γραμμικής παρεμβολής, όμως με κατεύθυνση υπολογισμού από την υψηλή τιμή προς τη χαμηλή. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του συντελεστή απωλειών της βάνας πεταλούδας κάθε χρονική στιγμή υπολογισμού.

#### - Υπορουτίνα INPOINT

Υπολογίζει την παροχή και το ύψος στα εσωτερικά σημεία των αγωγών με τη χρήση των εξισώσεων 4.46 & 4.47.

#### - Υπορουτίνα SUBSOLIN

Με αυτή καθορίζονται οι γραμμικές υδραυλικές απώλειες σε κάθε αγωγό (εξ. 4.7). Ο υπολογισμός του συντελεστή γραμμικών απωλειών γίνεται με την σχέση 4.10 για στρωτή ροή, αλλιώς χρησιμοποιείται η σχέση 4.11. Επειδή η τελευταία επιλύεται με επαναληπτική διαδικασία, απαιτείται μία αρχική τιμή. Αυτή προέρχεται από μία προσεγγιστική σχέση του διαγράμματος Moody. Η επαναληπτική διαδικασία σταματά

όταν η διαφορά των δύο τελευταίων αποτελεσμάτων είναι μικρότερη από το όριο σύγκλισης ( $DF < 0,00001$ ).

#### - Υπορουτίνα PUMP

Πρόκειται για κώδικα ο οποίος αποσαφηνίζει κάθε χρονική στιγμή την κινηματική συμπεριφορά του συστήματος αντλία – κινητήρα. Κατ' αρχήν η υπορουτίνα λαμβάνει υπ' όψιν τις τιμές της προηγούμενης χρονικής στιγμής, ως δεδομένα εισόδου. Για την κάθε χρονική στιγμή υπολογισμού, καθορίζονται μέσω της υπορουτίνας INTER η τιμή ροπής και ρεύματος του κινητήρα. Στην περίπτωση μας, η μέθοδος εκκίνησης του ασύγχρονου κινητήρα είναι αστέρα – τριγώνου. Η μετάβαση καθορίζεται από την παράμετρο *DTAT* και από τη σύγκρισή της με τη χρονική στιγμή επιλέγεται η καμπύλη αστέρα ή τριγώνου. Με βάση την τιμή της εξίσωσης  $F_3$  (εξ. 4.100) διακρίνουμε αν η βαλβίδα αντεπιστροφής είναι κλειστή ή ανοικτή. Στη πρώτη περίπτωση επιλύουμε την σχέση 4.89 και προκύπτει η νέα ταχύτητα περιστροφής αντλίας *AL*, η αδιάστατη ροπή του κινητήρα *BETMOP* και το απορροφώμενο ρεύμα *CUROP*. Στη δεύτερη επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων 4.81 & 4.89 με τη μέθοδο Newton – Raphson (σχέσεις 4.90 & 4.91) και υπολογίζονται τα *AL*, *BETMOP*, *CUROP* καθώς η παροχή *V* την εξεταζόμενη χρονική στιγμή.

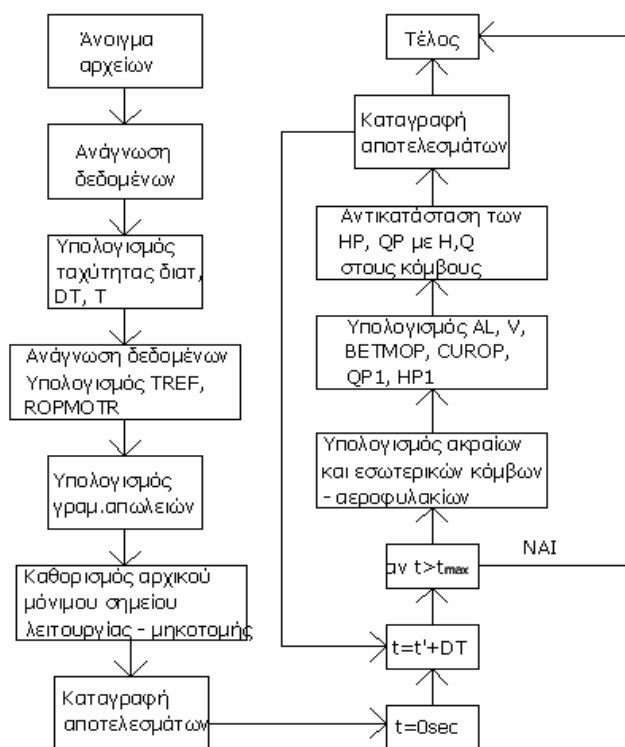
### 5.1.4 Παρουσίαση δομής

Η δομή του υπολογιστικού προγράμματος είναι η εξής :

- i. Άνοιγμα των αρχείων εισόδου και εξόδου
- ii. Ανάγνωση των στοιχείων της σωλήνωσης και των παραμέτρων λειτουργίας του προγράμματος (αρχεία INPIPP, PUMPCON, INMHKOT, ZBUTER).
- iii. Υπολογισμός της ταχύτητας διαταραχής μέσω της υπορουτίνας WAVESP. Με βάση αυτήν καθορίζεται το χρονικό βήμα *DT* (εξ.4.35), ο χαρακτηριστικός χρόνος *T* (εξ.4.24) και αναπροσαρμόζεται το μήκος των αγωγών ώστε αυτοί να διαιρούνται σε ακέραιο πλήθος τμημάτων (εξ.4.71).
- iv. Ανάγνωση των αδιάστατων χαρακτηριστικών αντλίας και κινητήρα (αρχεία WHWB, INMOTOR), υπολογισμός της ισχύος στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (εξ.4.16), της κανονικής ροπής της αντλίας *TREF*, της ονομαστικής ροπής του κινητήρα *ROPMOTR* και αναγωγή της αδιάστατης κινητήριας ροπής ως προς την ροπή κανονικής λειτουργίας της αντλίας (μεταβλητές *BETMA*, *BETMT*).
- v. Υπολογισμός των γραμμικών απωλειών μέσω της υπορουτίνας SUBSOLIN.
- vi. Καθορισμός του αρχικού μόνιμου σημείου λειτουργίας, δηλαδή πριν την εκκίνηση της εγκατάστασης. Στα πλαίσια αυτά υπολογίζονται το ύψος  $H(I, J)$  και η παροχή  $Q(I, J)$  στους σωλήνες, οι παράμετροί τους *R* και *B*. Επίσης καθορίζονται η παροχή, το ύψος και η απορροφώμενη ισχύς κάθε αντλίας και η αρχική κατάσταση στο αεροφυλάκιο. Τέλος υπολογίζεται η στάθμη των σημείων ελέγχου των αγωγών με χρήση της υπορουτίνας INTER.
- vii. Τη χρονική στιγμή  $t = 0 + DT$ , οι αντλίες εκκινούν. Πρώτα καθορίζονται οι οριακές συνθήκες και επειδή πρόκειται για δύο δεξαμενές είναι οι σχέσεις 4.55, 4.56 & 4.60, 4.61. Επίσης καθορίζεται το άνοιγμα και ο συντελεστής

απωλειών της βάνας πεταλούδας. Μέσω της υπορουτίνας INPOINT υπολογίζονται η παροχή  $QP(I, J)$  και το ύψος  $HP(I, J)$  στο εσωτερικών των αγωγών, ενώ στους κόμβους υπάρχουν οριακές συνθήκες συνέχειας. Σε περίπτωση παρουσίας αεροφυλακίου, πρέπει να διορθωθεί η παροχή και το ύψος άναντι και κάτω από αυτό (σχέσεις 4.108 & 4.109). Στη συνέχεια μέσω της υπορουτίνας PUMP υπολογίζονται αδιαστατοποιημένα το ρεύμα, η ροπή κινητήρα, η ταχύτητα και η παροχή της αντλίας. Με βάση αυτά βρίσκεται η παροχή  $QP1$  και το ύψος  $HP1$  της αντλίας, για τα οποία ισχύουν οι οριακές συνθήκες αντλίας (4.69 & 4.70). Η παράμετρος  $IP$  καθορίζει το αν μία εγκατεστημένη αντλία μπορεί να λειτουργήσει. Το πότε κάθε αντλία τίθεται σε λειτουργία καθορίζεται από την παράμετρο  $DTDIAD$ . Μη λειτουργία αντλίας σημαίνει μηδενικές τιμές  $QP1$  και  $HP1$ . Τέλος τα μεγέθη που βρέθηκαν καταγράφονται στα αντίστοιχα αρχεία.

- viii. Για τους υπολογισμούς τη χρονική στιγμή  $t = DT + DT$ , αντικαθίστανται τα  $QP(I, J), HP(I, J)$  με τα  $Q(I, J), H(I, J)$  αντίστοιχα. Δηλαδή τη νέα χρονική στιγμή, τα αρχικά μεγέθη στον πρώτο κόμβο του αγωγού κατάθλιψης  $(JK, 1)$  θα ισούνται με τα μεγέθη της αντλίας την προηγούμενη χρονική στιγμή ( $Q(JK, 1)_{t+2DT} = QP1_{t+DT}$ ), και με βάση αυτά θα υπολογισθούν οι νέες τιμές τους σε όλο το μήκος της σωλήνωσης. Η όλη αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να φθάσουμε το μέγιστο χρόνο τρεξίματος του προγράμματος που έχουμε ορίσει. Προκειμένου τα αρχεία εξόδου να είναι περισσότερο εύχρηστα, δίνεται η δυνατότητα καταγραφής των αποτελεσμάτων ανά αριθμό χρονικών βημάτων.



Εικόνα 6.1 Διάγραμμα ροής κώδικα υπολογισμού

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 6.1 Στοιχεία της εγκατάστασης

Για την εκτέλεση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά στοιχεία, προερχόμενα από ένα υβριδικό έργο στην Ικαρία. Αυτό περιελάμβανε αντλιοστάσιο με 8 μηχανές σε παράλληλη σύνδεση, τις οποίες κινούσαν ασύγχρονοι κινητήρες. Οι αντλίες διακινούσαν νερό από μία κάτω δεξαμενή στάθμης 65m σε μία άνω δεξαμενή στάθμης 555m. Η μέθοδος εκκίνησης που είχε υιοθετηθεί είναι αυτή του αστέρα – τριγώνου, ενώ μεταξύ της εκκίνησης κάθε αντλίας μεσολαβούσε ένα χρονικό διάστημα. Η διαμόρφωση της σωλήνωσης της εγκατάστασης αυτής φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (αρχείο INPIPP) :

|                                       | Μήκος (m) | Διάμετρος (m) | Πάχος (mm) | Τραχύτητα (mm) |
|---------------------------------------|-----------|---------------|------------|----------------|
| Ενιαίος αγωγός αναρρόφησης            | 150       | 0,80          | 8          | 0,20           |
| Αγωγός αναρρόφησης αντλίας (x8)       | 25        | 0,225         | 6          | 0,20           |
| Αγωγός κατάθλιψης αντλίας (x8)        | 15        | 0,200         | 10,3       | 0,20           |
| Ενιαίος αγωγός κατάθλιψης (4 τμήματα) | 200       | 0,40          | 11,9       | 0,20           |
|                                       | 400       | 0,56          | 12,7       | 0,20           |
|                                       | 600       | 0,61          | 11,9       | 0,20           |
|                                       | 1000      | 0,61          | 7,9        | 0,20           |

Τα κατασκευαστικά στοιχεία των χρησιμοποιούμενων αντλιών και κινητήρων είναι τα εξής (αρχείο PUMPCON) :

| Αντλία YB-32                     |                        | Κινητήρας                      |        |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------|
| Κανονικό ύψος                    | 495 m                  | Ονομαστική ισχύς               | 180 KW |
| Κανονική παροχή                  | 86 m <sup>3</sup> /h   | Μεταβολή από αστέρα σε τρίγωνο | 5 sec  |
| Κανονικός βαθμός απόδοσης        | 0,785                  |                                |        |
| Κανονική ταχύτητα περιστροφής    | 2900 RPM               |                                |        |
| Ροπή αδρανείας στρεφόμενων μαζών | 1,95 kg*m <sup>2</sup> |                                |        |

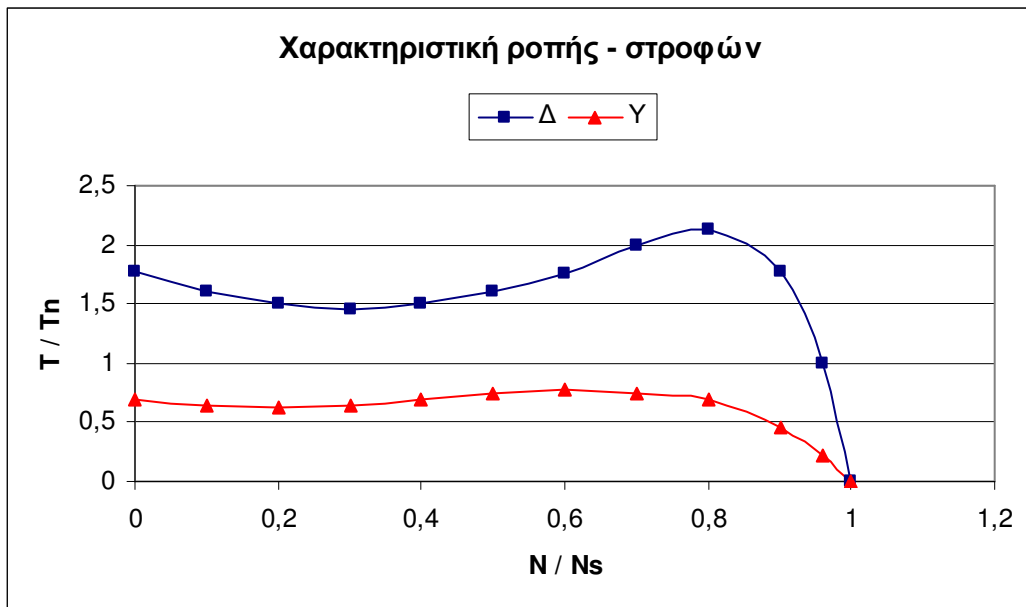
Οι αδιάστατες παράμετροι  $W_H$  και  $W_B$  της αντλίας έχουν τις εξής τιμές (αρχείο WHWB) :

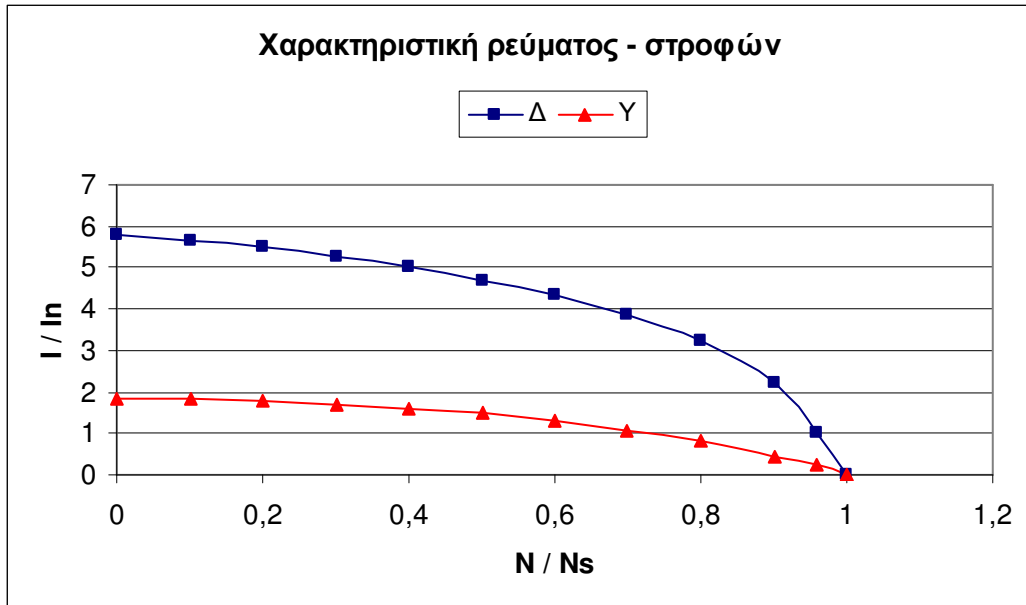
| $x = ATAN(v/a)$ | $W_H$    | $W_B$    |
|-----------------|----------|----------|
| 0.000000        | 2.017751 | 0.300000 |
| 0.157417        | 1.760381 | 0.890740 |
| 0.307397        | 1.451363 | 0.799658 |
| 0.444419        | 1.169678 | 0.725015 |

|          |          |          |
|----------|----------|----------|
| 0.565701 | 0.922498 | 0.653488 |
| 0.670857 | 0.717009 | 0.592575 |
| 0.761013 | 0.554628 | 0.528895 |
| 0.785398 | 0.500000 | 0.500000 |
| 0.837981 | 0.331001 | 0.435205 |
| 0.851966 | 0.256585 | 0.381700 |

Οι αδιάστατες χαρακτηριστικές των κινητήρων είναι οι εξής (αρχείο INMOTOR) :

| $n/n_s$ | $T/T_N - \Delta$ | $I/I_N - \Delta$ | $T/T_N - \Upsilon$ | $I/I_N - \Upsilon$ |
|---------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| 0       | 1.777            | 5.77             | 0.70               | 1.85               |
| 0.1     | 1.60             | 5.64             | 0.635              | 1.825              |
| 0.2     | 1.50             | 5.50             | 0.625              | 1.775              |
| 0.3     | 1.45             | 5.275            | 0.643              | 1.675              |
| 0.4     | 1.50             | 5.0              | 0.70               | 1.60               |
| 0.5     | 1.60             | 4.70             | 0.75               | 1.50               |
| 0.6     | 1.75             | 4.35             | 0.775              | 1.31               |
| 0.7     | 2.00             | 3.875            | 0.75               | 1.08               |
| 0.8     | 2.125            | 3.24             | 0.69               | 0.80               |
| 0.9     | 1.775            | 2.23             | 0.45               | 0.45               |
| 0.96    | 1.0              | 1.0              | 0.22               | 0.22               |
| 1.0     | 0.0              | 0.0              | 0.0                | 0.0                |





Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι πρόκειται για επαγωγικούς κινητήρες κατηγορίας NEMA B.

Επιπλέον περιλαμβάνονταν αεροφυλάκιο με τα εξής στοιχεία (αρχείο PUMPCON) :

|                    |                    |                        |       |
|--------------------|--------------------|------------------------|-------|
| Αριθμός            | 1                  | Αρχική στάθμη αέρα     | 56 m  |
| Διάμετρος          | 1,0 m              | Διάμετρος στομίου      | 0,1 m |
| Αρχικός όγκος αέρα | 1,0 m <sup>3</sup> | Λόγος απωλειών στομίου | 2,5   |

## 6.2 Προσομοίωση με 1 αντλία

### 6.2.1 Αρχική περίπτωση

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η φάση της εκκίνησης σε εγκατάσταση όμοια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Μόνη διαφορά είναι η ύπαρξη 1 αντλίας αντί για 8. Λόγω της διαφοροποίησης αυτής, μειώνεται η ολικά διακινούμενη παροχή και επομένως προκύπτει η ανάγκη αλλαγής των διαμέτρων των ενιαίων αγωγών. Η αλλαγή αυτή έγινε με κριτήριο την διατήρηση σταθερής ταχύτητας ροής ρευστού εντός του αγωγού. Έτσι για το κανονικό σημείο λειτουργίας και 8 αντλίες έχουμε :

- Ενιαίος αγωγός αναρρόφησης

$$\text{Παροχή : } Q_{AN} = \frac{8 \cdot 86}{3600} = 0,191 \frac{m^3}{sec}$$

$$\text{Διατομή : } AD_{AN} = \pi \cdot 0,8^2 / 4 = 0,50265 m^2$$

$$\text{Ταχύτητα : } U_{AN} = Q_{AN} / AD_{AN} = 0,38 m/s$$

Για 1 αντλία θα ισχύει :

$$\text{Νέα διατομή : } d' = \sqrt{\frac{4 \cdot Q'_{AN}}{\pi \cdot U_{AN}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 86}{\pi \cdot 3600 \cdot 0,38}} = 0,283m \approx 0,28m$$

$$\text{Νέα ταχύτητα : } U'_{AN} = Q'_{AN} / AD'_{AN} = 0,388m/s$$

Επιπλέον κρίθηκε ότι πρέπει να διπλασιαστεί το μήκος του αγωγού αναρρόφησης από 150m σε 300m, καθώς στους αναστρέψιμους ΥΗΣ ο αγωγός αναρρόφησης έχει αρκετά μεγάλο μήκος.

- Για τον ενιαίο αγωγό κατάθλιψης, υπολογίζεται η ταχύτητα στο 4<sup>ο</sup> και τελευταίο τμήμα του, που έχει και τη μεγαλύτερη διάμετρο.

$$\text{Παροχή : } Q_{KAT} = \frac{8 \cdot 86}{3600} = 0,191 \frac{m^3}{sec}$$

$$\text{Διατομή : } AD_{KAT} = \pi \cdot 0,61^2 / 4 = 0,29225m^2$$

$$\text{Ταχύτητα : } U_{KAT} = Q_{KAT} / AD_{KAT} = 0,654m/s$$

Για 1 αντλία θα ισχύει :

$$\text{Νέα διατομή : } d' = \sqrt{\frac{4 \cdot Q'_{KAT}}{\pi \cdot U_{KAT}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 86}{\pi \cdot 3600 \cdot 0,654}} = 0,216m \approx 0,22m$$

$$\text{Νέα ταχύτητα : } U'_{KAT} = Q'_{KAT} / AD'_{KAT} = 0,628m/s$$

Προκειμένου να μην έχουμε εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των τμημάτων του αγωγού, αυτός διαμορφώνεται σε έναν ενιαίο. Η διάμετρος του θα είναι  $d = 0,22m$ , όπως υπολογίστηκε, ενώ ως πάχος λαμβάνουμε για λόγους αντοχής το μέγιστο από τα αρχικά δηλαδή 12,7mm. Έτσι η σωλήνωση διαμορφώνεται ως εξής :

|                                       | a/a | Μήκος (m) | Διάμετρος (m) | Πάχος (mm) | Τραχύτητα (mm) |
|---------------------------------------|-----|-----------|---------------|------------|----------------|
| Ενιαίος αγωγός αναρρόφησης            | 1   | 300       | 0,28          | 8          | 0,20           |
| Αγωγός αναρρόφησης αντλίας (x1)       | 2   | 25        | 0,225         | 6          | 0,20           |
| Αγωγός κατάθλιψης αντλίας (x1)        | 3   | 15        | 0,200         | 10,3       | 0,20           |
| Ενιαίος αγωγός κατάθλιψης (4 τμήματα) | 4   | 200       | 0,22          | 12,7       | 0,20           |
|                                       | 5   | 400       | 0,22          | 12,7       | 0,20           |
|                                       | 6   | 600       | 0,22          | 12,7       | 0,20           |
|                                       | 7   | 1000      | 0,22          | 12,7       | 0,20           |

Τα χαρακτηριστικά αντλίας, κινητήρα και αεροφυλακίου παραμένουν τα ίδια.

Εκτελώντας το πρόγραμμα, η εικόνα του αρχικού μόνιμου σημείου λειτουργίας, είναι η εξής :

$$XRONIKO \text{ BHMA } DT(SEC) = 0.0058 \quad TPER(SEC) = 1.5393$$



PLHTOS ANTLION 1 SE LEITΟΥΡΓΙΑ= 1  
 ARXIKH PAROXH ANTLIOSTASIOY (M3/H)= 0.0000  
 PAROXH MIAS ANTLIAS (M3/H)= 0.0000  
 ARXIKO OL. YPSOS ANTLIAS (MWG)= 0.0000  
 ARX. APOR. ISXYS ANNTLIAS (KW)= 0.0000

| J | Q(J,1) | Q(J,N1(J)) | H(J,1)   | H(J,N1(J)) |
|---|--------|------------|----------|------------|
| 1 | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 2 | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 3 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 4 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 5 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 6 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 7 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |

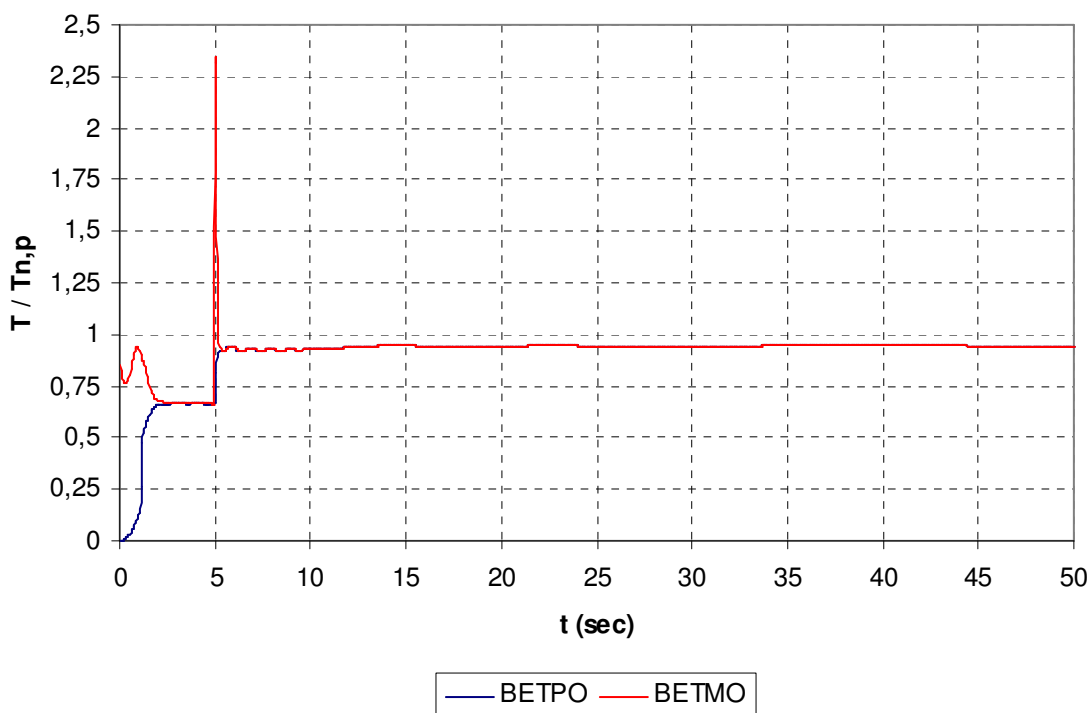
Κρίθηκε ότι ο χρόνος των 50sec είναι αρκετός για το τρέξιμο του προγράμματος και την εξαγωγή συμπερασμάτων, και ότι η καταγραφή των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνεται ανά χρονικό διάστημα  $10 \cdot DT$  χωρίς να έχουμε σημαντική απώλεια πληροφορίας. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα εμφανίζονται με τη μορφή διαγραμμάτων. Τα μεγέθη που εμφανίζονται σε αυτά φέρουν τις ονομασίες που έχουν στον κώδικα, και είναι τα εξής :

|                    |  |
|--------------------|--|
| <i>BETPO</i>       | Ανθιστάμενη ροπή αντλίας αδιαστατοποιημένη ως προς την ροπή του κανονικού σημείου λειτουργίας          |
| <i>BETMO</i>       | Ροπή κινητήρα αδιαστατοποιημένη ως προς την ανθιστάμενη ροπή αντλίας του κανονικού σημείου λειτουργίας |
| <i>CUR</i>         | Ρεύμα κινητήρα αδιαστατοποιημένο ως προς το ονομαστικό του   |
| <i>ROPM</i>        | Ροπή κινητήρα αδιαστατοποιημένη ως προς την ονομαστική του   |
| <i>ALP</i>         | Αδιάστατη ταχύτητα περιστροφής αντλίας   |
| <i>VP</i>          | Αδιάστατη παροχή αντλίας   |
| <i>QP(3,1)</i>     | Παροχή στον 1 <sup>ο</sup> κόμβο του αγωγού κατάθλιψης 3 της αντλίας                                   |
| <i>QP(4,1)</i>     | Παροχή στο 1 <sup>ο</sup> κόμβο του ενιαίου αγωγού κατάθλιψης 4  |
| <i>QP(7,N1(7))</i> | Παροχή στον τελευταίο κόμβο του ενιαίου αγωγού κατάθλιψης 7  |
| <i>HKO1</i>        | Ύψος (πίεση) στο σημείο σύνδεσης των αγωγών 1 & 2  |
| <i>HKO2</i>        | Ύψος (πίεση) στο σημείο σύνδεσης των αγωγών 3 & 4  |

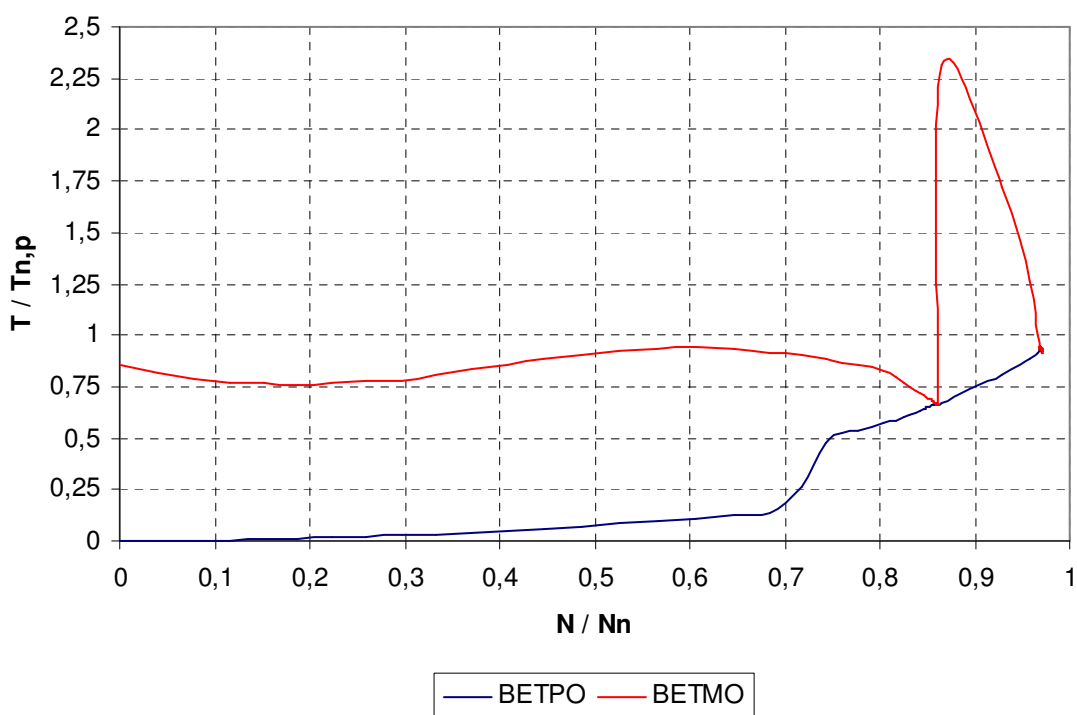
Πολλά από τα διαγράμματα είναι αδιαστατοποιημένα ως προς τα μεγέθη κανονικού σημείου λειτουργίας της αντλίας ή τα ονομαστικά μεγέθη του κινητήρα :

|           |   |
|-----------|---|
| $T_{N,P}$ | Ανθιστάμενη ροπή αντλίας στο κανονικό σημείο λειτουργίας      |
| $N_N$     | Ταχύτητα περιστροφής αντλίας στο κανονικό σημείο λειτουργίας  |
| $Q_N$     | Παροχή αντλίας στο κανονικό σημείο λειτουργίας                |
| $I_N$     | Απορροφόμενο ρεύμα κινητήρα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας |
| $T_{N,M}$ | Παραγόμενη ροπή κινητήρα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας    |

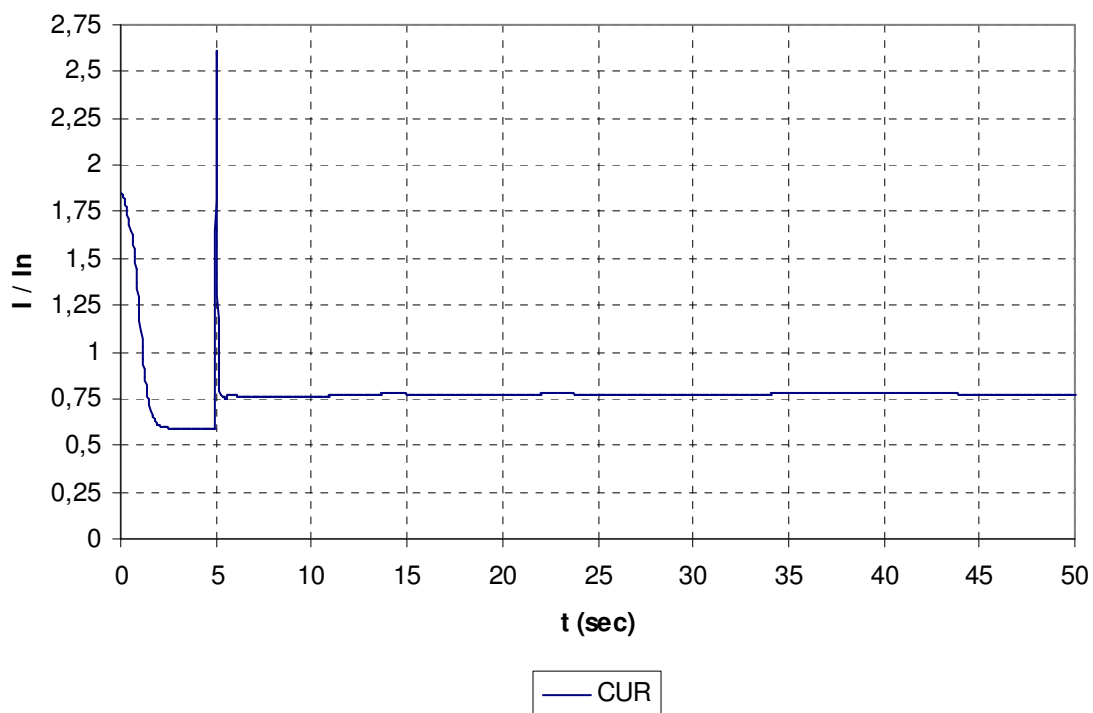
### Χρονική μεταβολή ροπών αντλίας & κινητήρα



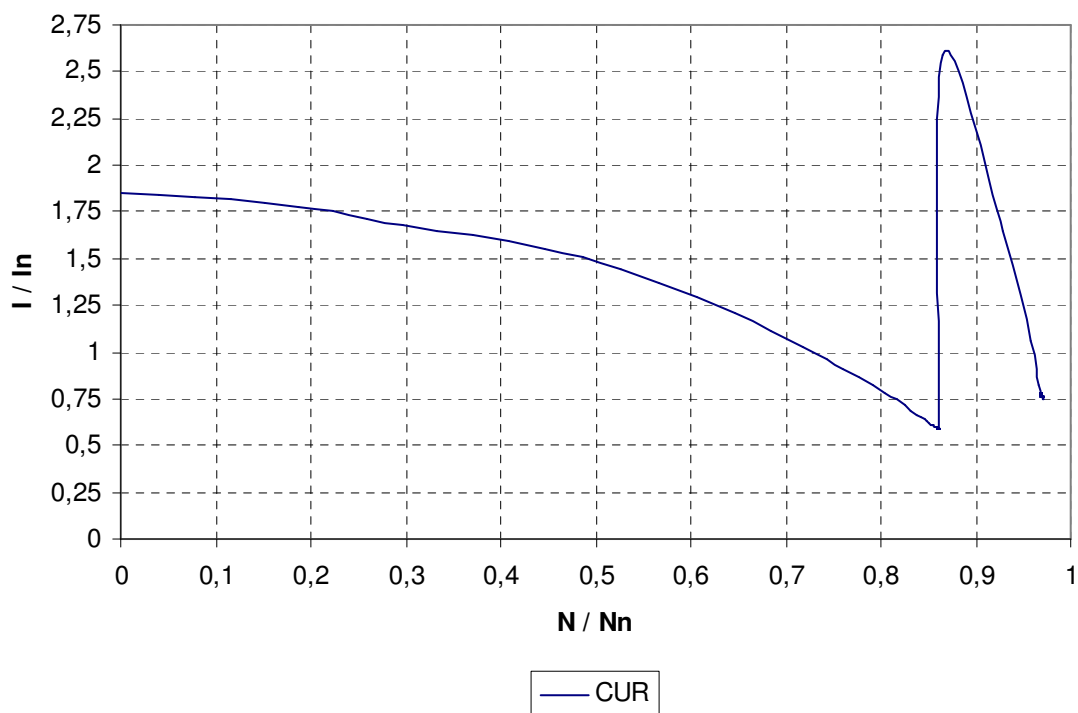
### Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής - στροφών



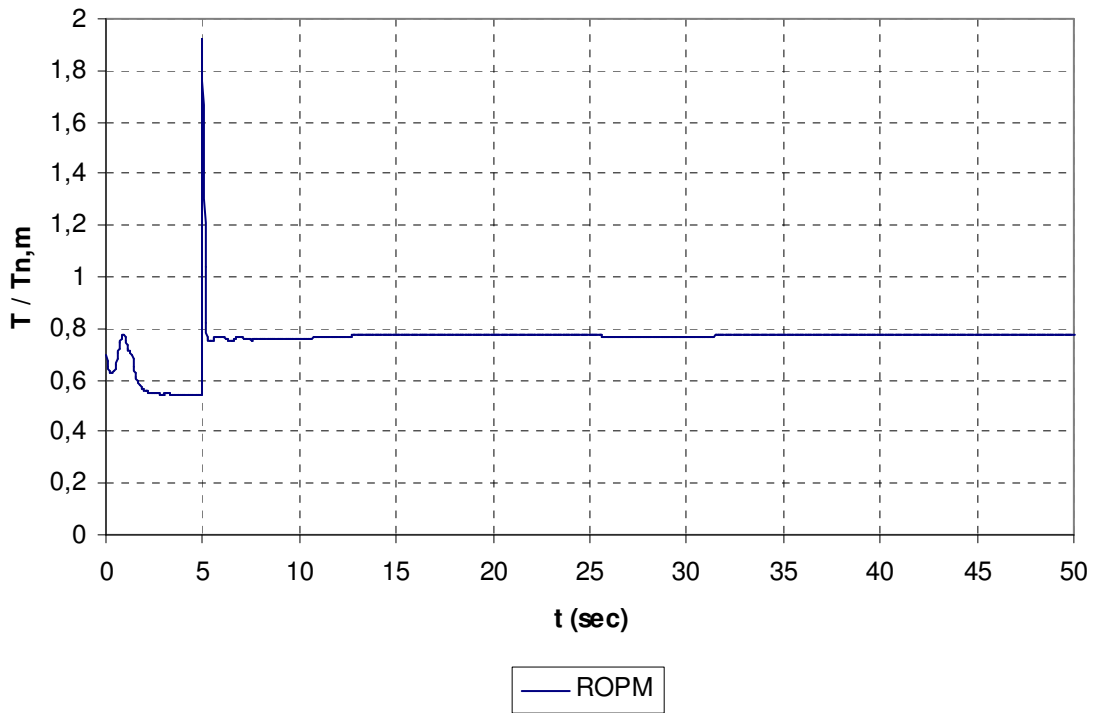
### Χρονική μεταβολή απορροφόμενου ρεύματος



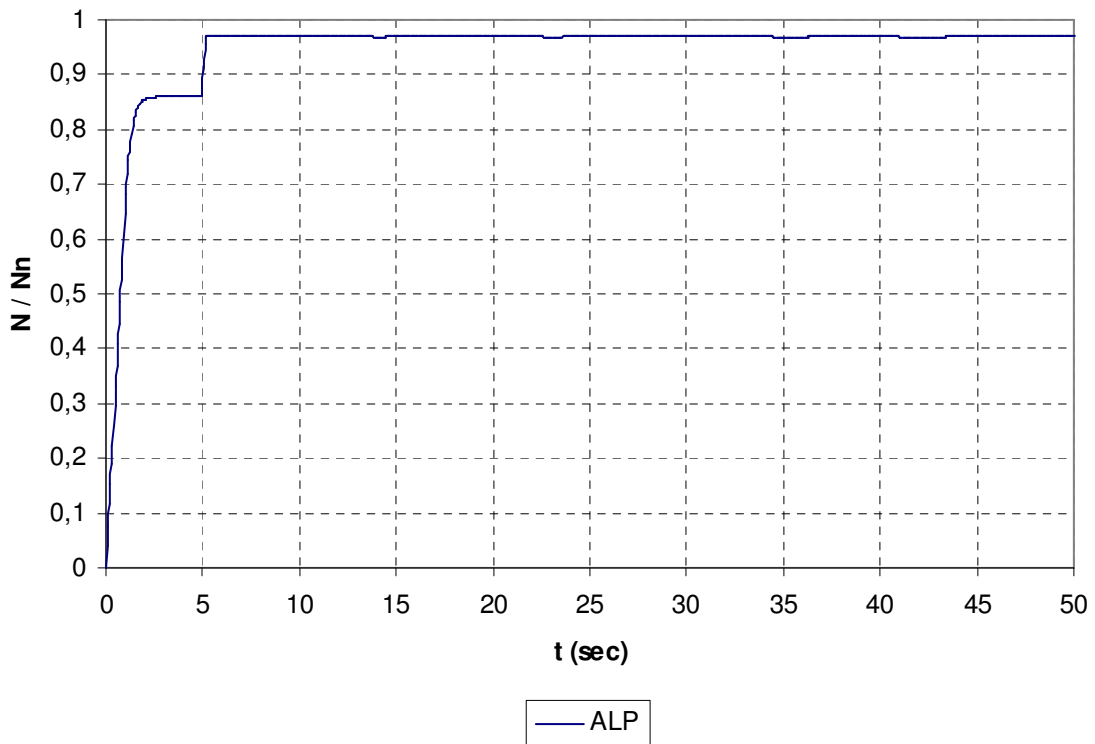
### Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - στροφών

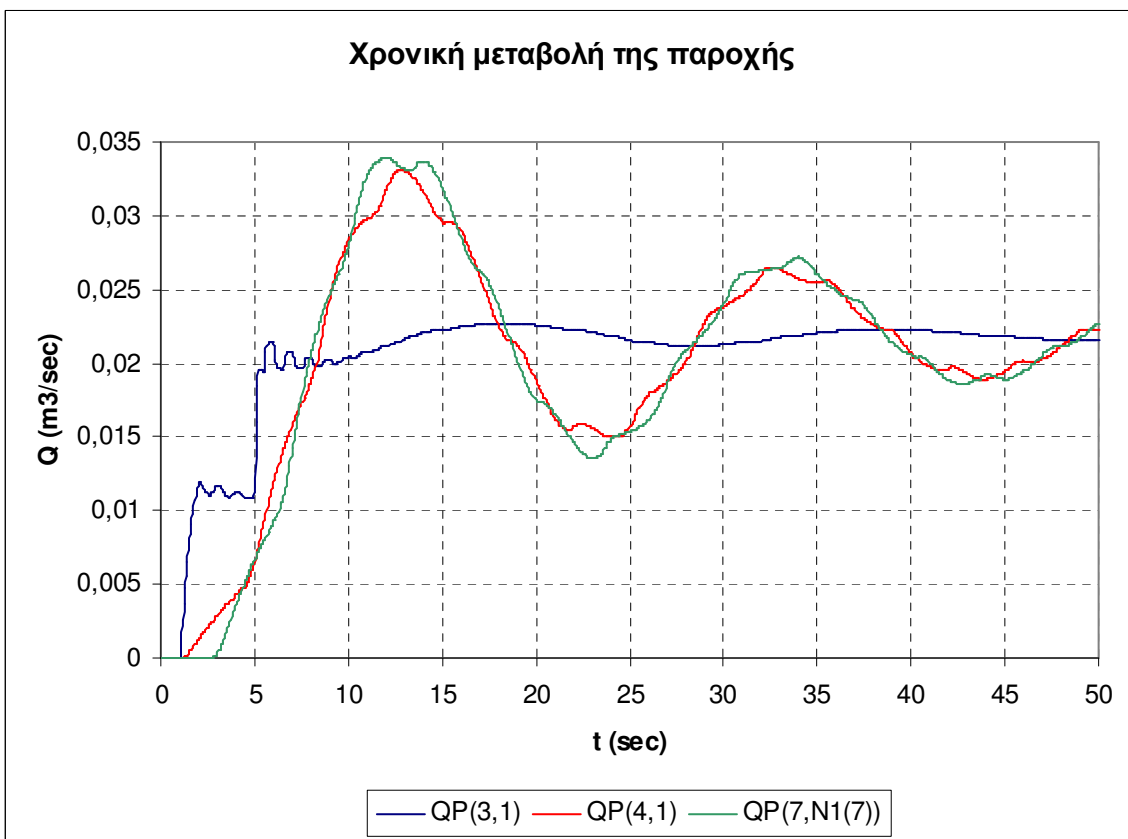
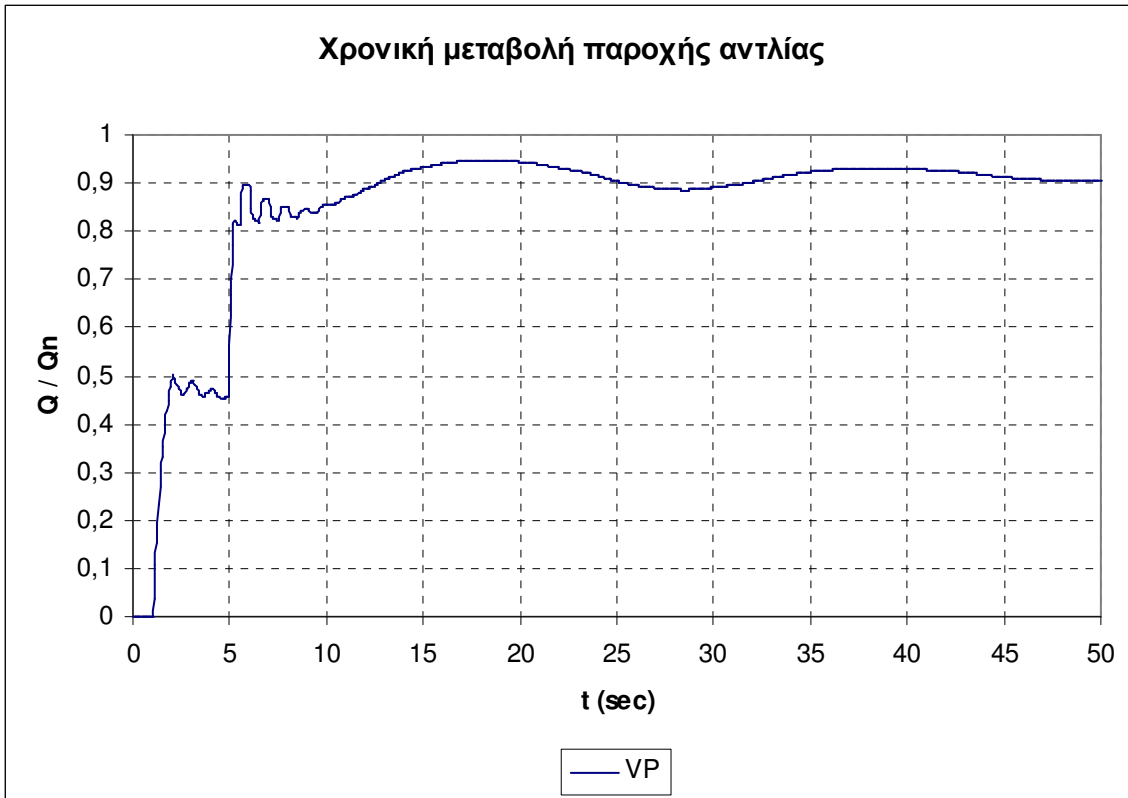


Χρονική μεταβολή ροπής κινητήρα

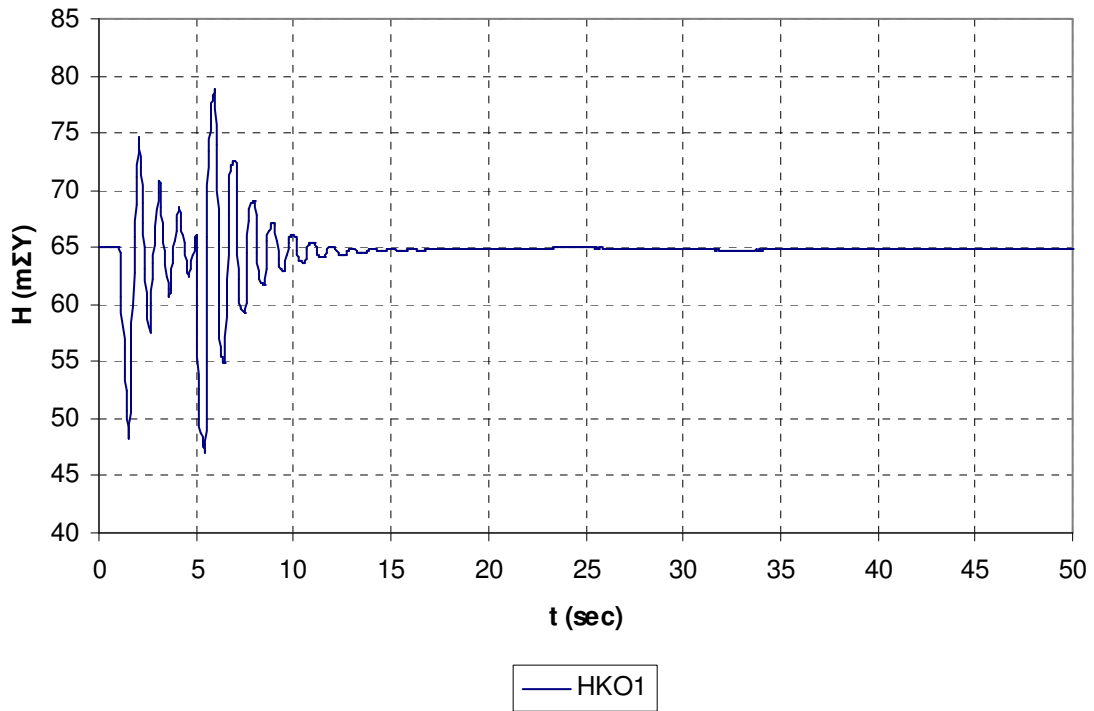


Χρονική μεταβολή ταχύτητας αντλίας

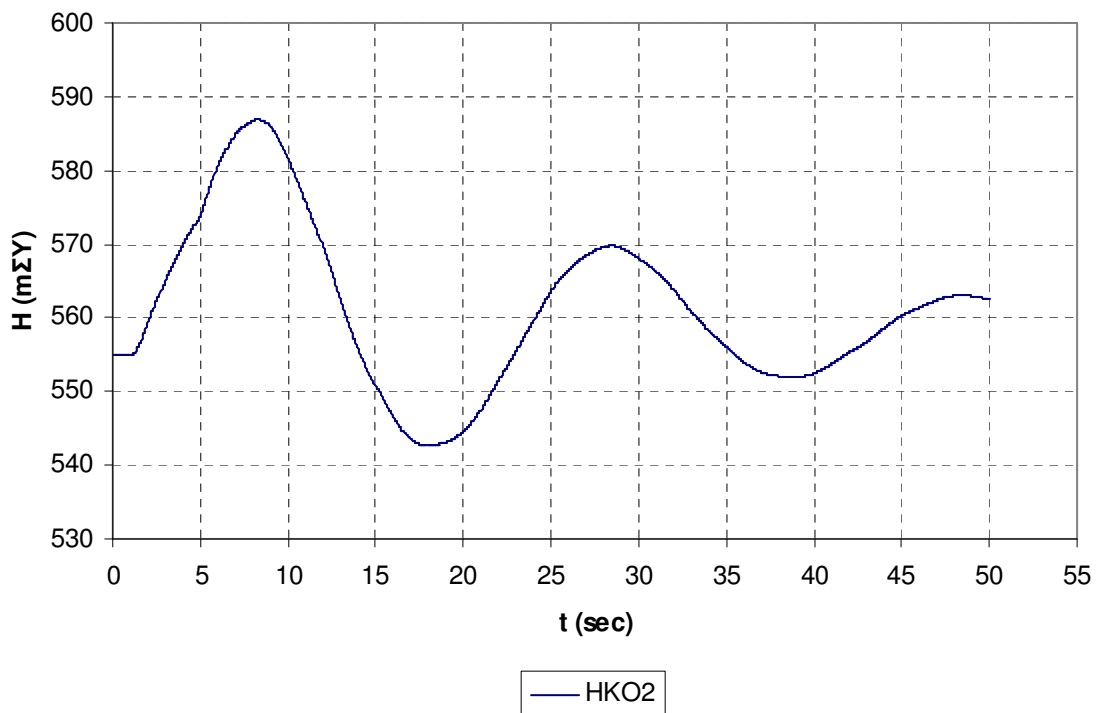




Χρονική μεταβολή ύψους - 1ος κόμβος



Χρονική μεταβολή ύψους - 2ος κόμβος



### Παρατηρήσεις

1<sup>ov</sup> : Είναι εμφανές ότι με την επιλογή της μεθόδου εκκίνησης αστέρα – τριγώνου, το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο κατά 67,9% ( $I_{ST} = 1,85 \cdot I_N$ ) συγκριτικά με την απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο, ενώ το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της εκκίνησης είναι μειωμένο κατά 55,1% ( $I_{MAX} = 2,5884 \cdot I_N$ ). Και για τις δύο περιπτώσεις η απ' ευθείας σύνδεση έχει  $I_{MAX} = I_{ST} = 5,77 \cdot I_N$ .

2<sup>ov</sup> : Τη χρονική στιγμή της αλλαγής σύνδεσης των τυλιγμάτων του κινητήρα ( $t = 5 \text{ sec}$ ), παρατηρείται όπως ήταν αναμενόμενο, υψηλός παλμός ρεύματος και σημαντική αύξηση της κινητήριας ροπής. Χάρη σε αυτήν, επιτυγχάνεται σημαντική επιτάχυνση της αντλίας, η οποία οδηγεί με τη σειρά της σε απότομη αύξηση της παροχής της. Λόγω του μεγάλου μήκους του αγωγού κατάθλιψης, η παροχή αυξάνει σε αυτόν με μία χρονική καθυστέρηση και συνοδεύεται από αρκετά μεγάλες διακυμάνσεις.

3<sup>ov</sup> : Το ύψος στον πρώτο κόμβο εμφανίζει 2 έντονες αυξομειώσεις. Η πρώτη παρουσιάζει ελάχιστο (-25,8% της αρχικής τιμής) για  $t = 1,5757 \text{ sec}$ , μέγιστο (+14,9% της αρχικής τιμής) για  $t = 2,099 \text{ sec}$  και προφανώς οφείλεται στην εκκίνηση της αντλίας. Η δεύτερη παρουσιάζει ελάχιστο (-27,8%) για  $t = 5,4713 \text{ sec}$ , μέγιστο (+21,2%) για  $t = 5,9946 \text{ sec}$  και αποδίδεται στην απότομη επιτάχυνση της αντλίας λόγω της μεταβολής  $\Upsilon - \Delta$ .

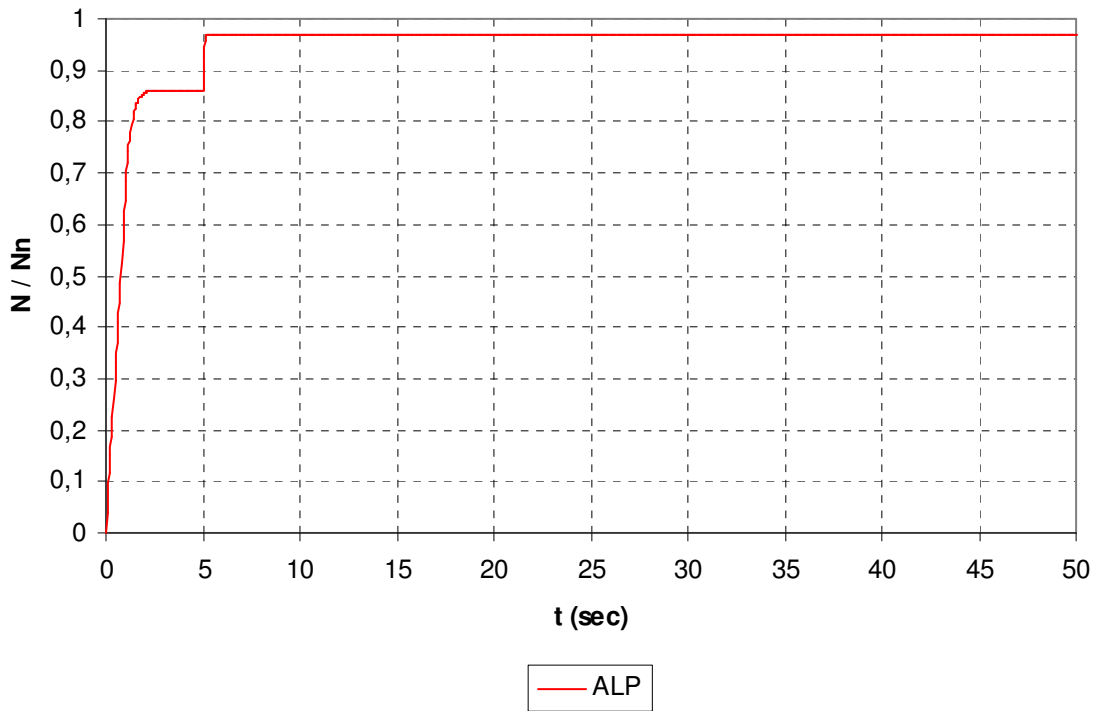
4<sup>ov</sup> : Αντίθετα, στον δεύτερο κόμβο το ύψος παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή (+5,7% της αρχικής τιμής) για  $t = 8,2622 \text{ sec}$ , μία ελάχιστη (-2,2%) για  $t = 17,9722 \text{ sec}$  και η διακύμανσή των τιμών του σταδιακά εξομαλύνεται.

5<sup>ov</sup> : Στο πέρας των 50sec οι τιμές των μεγεθών είναι : ταχύτητα περιστροφής της αντλίας  $ALP = 0,9691$ , παροχή αντλίας  $VP = 0,9058$ , ροπή  $BETPO = BETMO = 0,9423$  και ρεύμα  $CUR = 0,7731$ . Δυνητικά η μετάβαση από αστέρα σε τρίγωνο θα μπορούσε να γίνει 1-2 sec νωρίτερα, καθώς όπως παρατηρούμε το χρονικό διάστημα  $2,5 \div 5 \text{ sec}$ , η αντλία δεν επιταχύνεται και οι τιμές κινητήριας και ανθιστάμενης ροπής είναι σχεδόν ταυτόσημες. Δηλαδή το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Όμως η απότομη επιτάχυνση από μηδενική ταχύτητα στις  $0,9691 \cdot 2900 = 2810 \text{ RPM}$ , θα σήμαινε ακόμα εντονότερη διακύμανση της παροχής και της πίεσης στους αγωγούς.

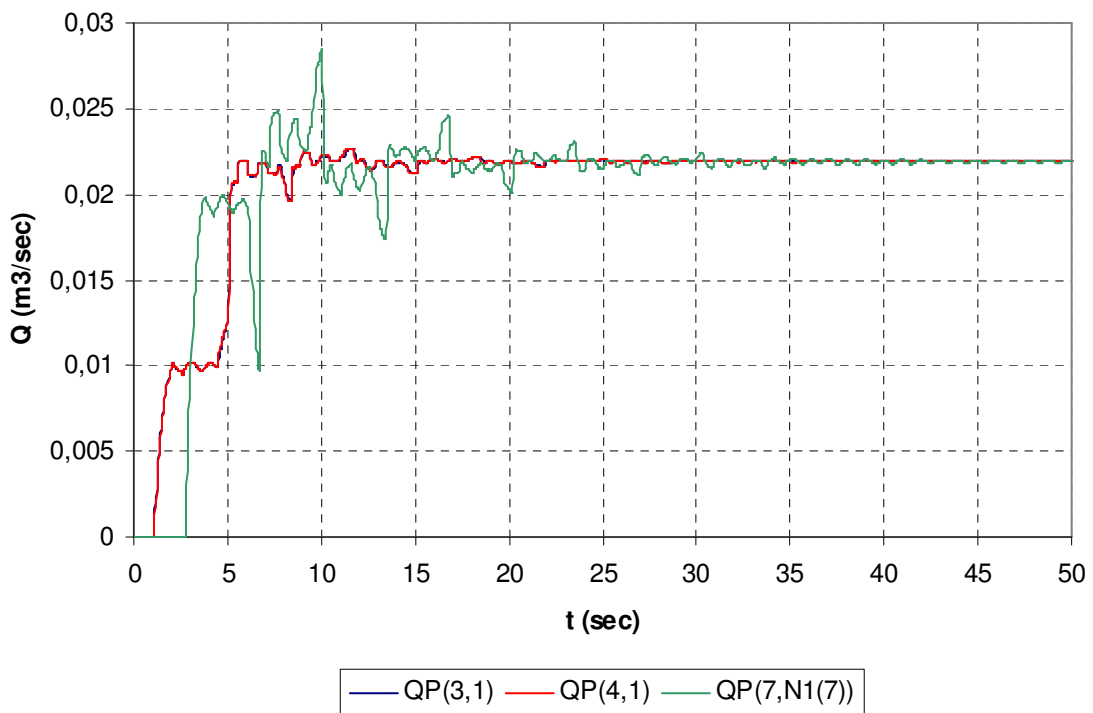
### **6.2.2 Διερεύνηση επίδρασης αεροφυλακίου**

Προκειμένου να εξακριβωθεί αν και κατά πόσο το αεροφυλάκιο εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της πίεσης στη σωλήνωση, εκτελέστηκε το πρόγραμμα για την ίδια σωλήνωση αφαιρώντας το αεροφυλάκιο. Η αλλαγή αυτή συντελέστηκε πολύ εύκολα θέτοντας την τιμή της παραμέτρου  $IAER$  στο αρχείο PUMPCON ίση με 0. Είναι ευκολονόητο ότι τα κινηματικά στοιχεία της εγκατάστασης δεν παρουσιάζουν κάποια διαφοροποίηση. Έτσι παρατίθενται μόνο τα διαγράμματα της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας, της παροχής στον αγωγό κατάθλιψης και της πίεσης στους δύο κόμβους.

### Χρονική μεταβολή ταχύτητας αντλίας

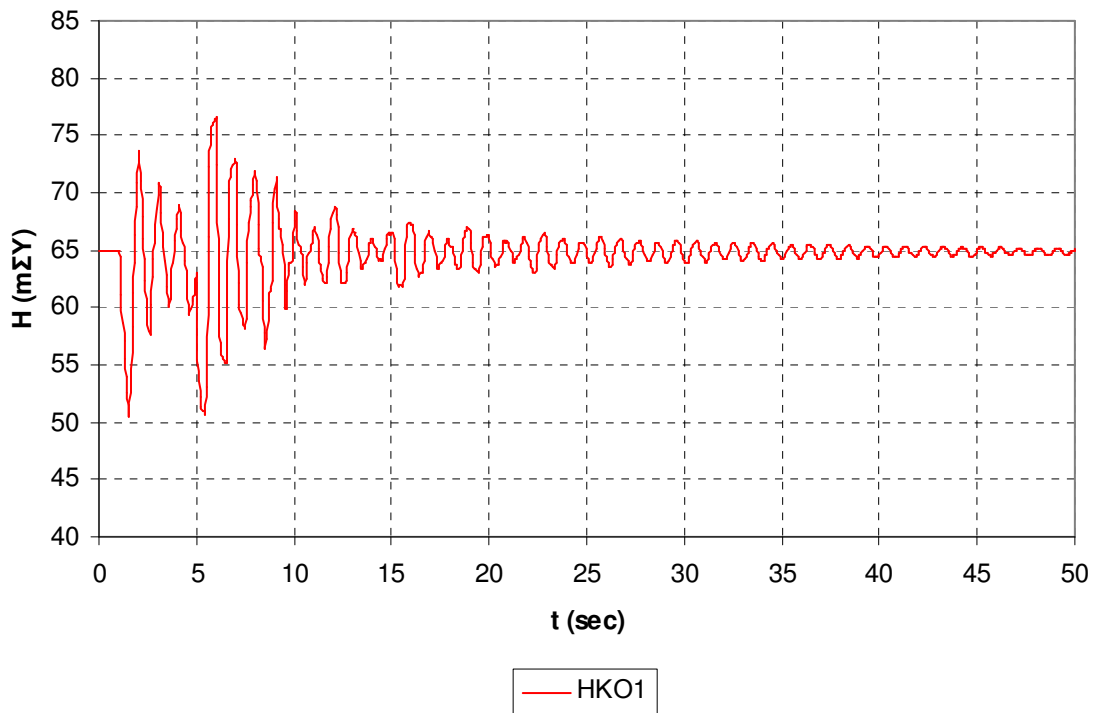


### Χρονική μεταβολή παροχής

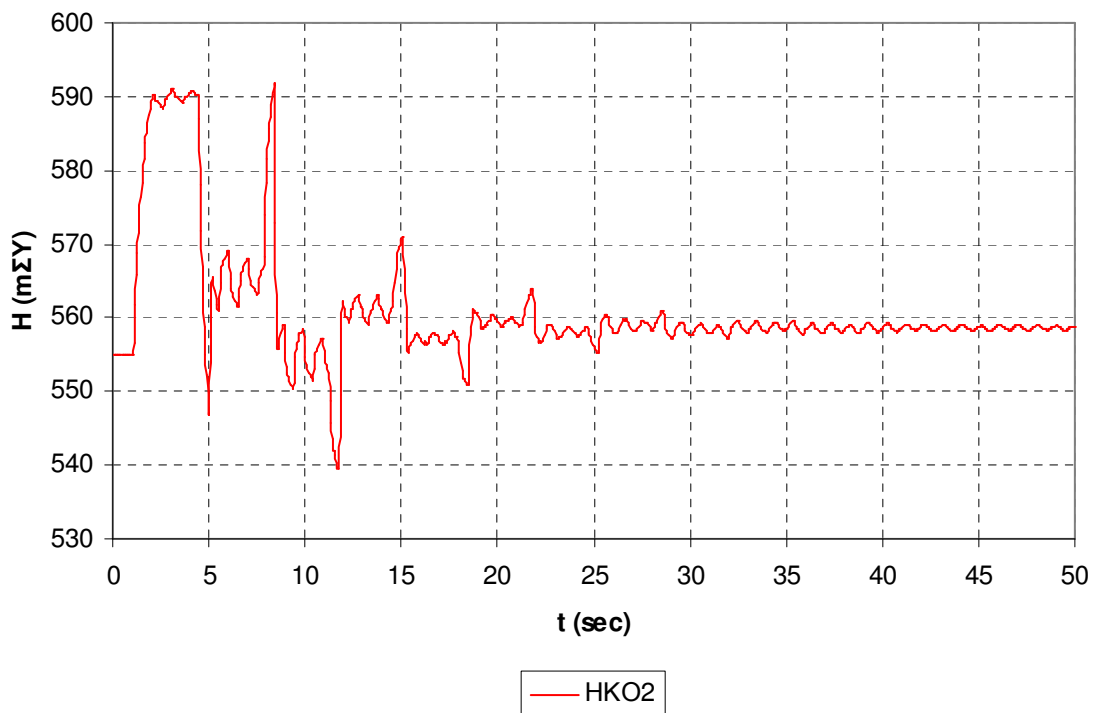




Χρονική μεταβολή ύψους - 1ος κόμβος



Χρονική μεταβολή ύψους - 2ος κόμβος



## Παρατηρήσεις

1<sup>ov</sup> : Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του αεροφυλακίου, πράγμα αναμενόμενο.

2<sup>ov</sup> : Όσον αφορά την παροχή, κατ' αρχήν παρατηρείται μία ταύτιση των τιμών της στους αρχικούς κόμβους των αγωγών 3 & 4, η οποία δεν συνέβαινε στην αρχική περίπτωση. Αυτό είναι κάτι λογικό, αφού το μήκος του αγωγού 3 είναι αρκετά μικρό (15m) και μεταξύ τους παρεμβαλλόταν το αεροφυλάκιο. Όσον αφορά τη χρονική της μεταβολή, μετά από μία μικρή περίοδο διακυμάνσεων, η τιμή της σταθεροποιείται. Αντίθετα στην αρχική περίπτωση παρατηρήθηκε συνέχιση της διακύμανσης καθ' όλο το διάστημα του φαινομένου, λόγω της δράσης του αεροφυλακίου.

Η παροχή στο τέλος του αγωγού 7, επίσης σταθεροποιείται μετά το χρονικό διάστημα των 30sec, όμως εν τω μεταξύ η διακύμανση της έχει μικρότερο εύρος σε σχέση με την αρχική περίπτωση, αλλά είναι πολύ πιο απότομη. Επιπλέον για  $t = 6,6924\text{sec}$  παρουσιάζει ένα ελάχιστο, πιθανώς λόγω της καθυστέρησης μεταβολής  $\Upsilon - \Delta$  και επιτάχυνσης της αντλίας.

3<sup>ov</sup> : Το ύψος στον πρώτο κόμβο, εμφανίζει και πάλι 2 έντονες αυξομειώσεις. Η πρώτη παρουσιάζει ελάχιστο και μέγιστο τις ίδιες χρονικές στιγμές ( $t = 1,5757\text{sec}$  και  $t = 2,099\text{sec}$  αντίστοιχα), αλλά έχει μικρότερο εύρος (-22,3% και +13,4% της αρχικής τιμής αντίστοιχα). Ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η δεύτερη (ελάχιστο  $t = 5,4713\text{sec}$ , -22% & μέγιστο  $t = 5,9946\text{sec}$ , +18%). Ωστόσο πρέπει να παρατηρήσουμε ότι ακόμα και μέχρι τα 50sec, η τιμή της πίεσης δεν έχει σταθεροποιηθεί πλήρως.

4<sup>ov</sup> : Όσον αφορά τη μεταβολή του ύψους στον δεύτερο κόμβο, αυτή δεν παρουσιάζει πλέον τη μορφή ομαλής ταλάντωσης, αλλά είναι πολύ πιο απότομη. Στο χρονικό διάστημα  $2 \div 4,4\text{sec}$  έχουμε συνεχώς πίεση αυξημένη (+6 ÷ 6,5% της αρχικής). Μετά από μία πτώση λίγο κάτω από τα αρχικά επίπεδα, έχουμε νέα άνοδο ( $t = 8,3785\text{sec}$ , +6,6%) που ακολουθείται από απότομη πτώση ( $t = 11,7509\text{sec}$ , -2,8%). Καθ' όλη τη διάρκεια του υπολογισμού, οι μεταβολές συνεχίζονται χωρίς να υπάρξει σταθεροποίηση μέχρι τα 50sec.

Εν κατακλείδι, το αεροφυλάκιο κρίνεται αναγκαίο κατά την εκκίνηση του αντλιοστασίου. Μπορεί να αυξάνει ελαφρά την καταπόνηση του αγωγού αναρρόφησης και να διαταράσσει την ομαλότητα της παροχής στη σωλήνωση, αλλά μετριάξει σε μεγάλο βαθμό την μεταβολή και την ένταση της πίεσης στον αγωγό κατάθλιψης.

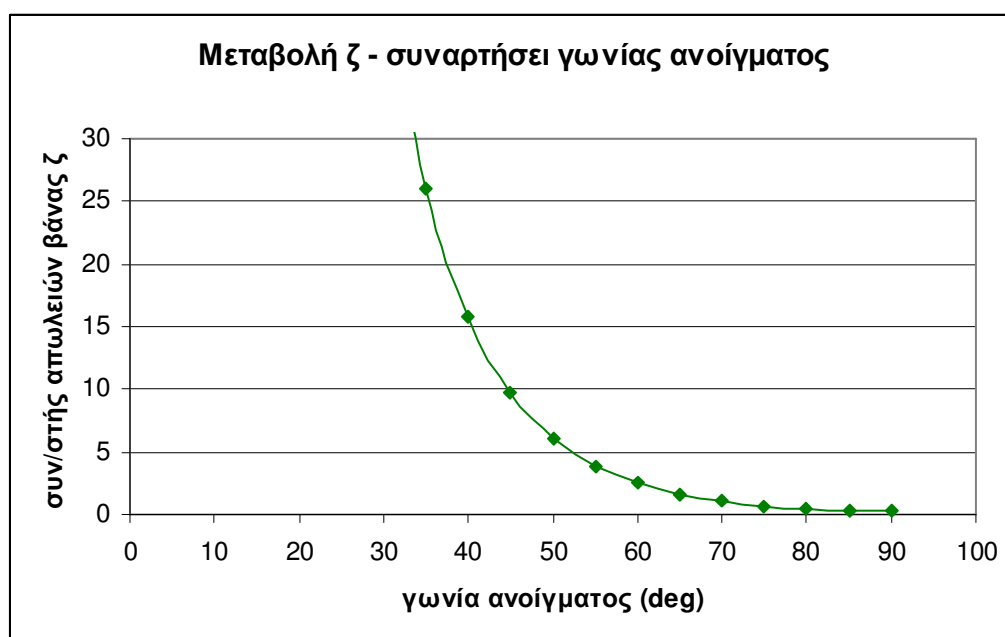
### **6.2.3 Διερεύνηση επίδρασης βάνας πεταλούδας**

Στην περίπτωση αυτή το αεροφυλάκιο επανέρχεται στην εγκατάσταση. Επιπλέον εισάγεται ένα νέο στοιχείο, η βάνα τύπου πεταλούδας, που βρίσκεται ακριβώς μετά την αντλία και πριν τον πρώτο κόμβο του αγωγού 3. Είναι αρχικά κλειστή και ανοίγει επιτρέποντας τη ροή του νερού μετά από ένα χρονικό διάστημα το οποίο έχουμε ορίσει στα 5sec μετά την εκκίνηση της αντλίας. Η τιμή αυτή μπορεί εύκολα να μεταβληθεί στο αρχείο PUMPCON (παράμετρος *DTVALV*). Οι τιμές του συντελεστή

απωλειών της βάνας συναρτήσει των τιμών της γωνίας που σχηματίζει ο δίσκος με την κατεύθυνση της ροής είναι :

| Γωνία (deg) | $\zeta = 2g \cdot \delta h_f / c^2$ |  | Γωνία (deg) | $\zeta = 2g \cdot \delta h_f / c^2$ |
|-------------|-------------------------------------|--|-------------|-------------------------------------|
| 90          | 9793152                             |  | 40          | 6.139767759                         |
| 85          | 6918.309709                         |  | 35          | 3.826646608                         |
| 80          | 649.6966424                         |  | 30          | 2.483913974                         |
| 75          | 263.059225                          |  | 25          | 1.587411824                         |
| 70          | 127.5066225                         |  | 20          | 1.068402664                         |
| 65          | 76.4750276                          |  | 15          | 0.705516366                         |
| 60          | 45.665846                           |  | 10.2        | 0.45708819                          |
| 55          | 25.98191644                         |  | 5           | 0.309029543                         |
| 50          | 15.8597485                          |  | 0           | 0.2536                              |
| 45          | 9.727976512                         |  |             |                                     |

Η μεταβολή του συντελεστή απωλειών  $\zeta$  σε σχέση με τη γωνία ανοίγματος, δηλαδή τη συμπληρωματική της γωνίας που σχηματίζει ο δίσκος με την κατεύθυνση της ροής, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Θεωρούμε ότι η βάνα ανοίγει γραμμικά. Ο χρόνος ανοίγματος από την πλήρως κλειστή ως την πλήρως ανοικτή θέση, θεωρήθηκε ίσως με 30sec (παράμετρος *TCVP* - αρχείο PUMPCON).

Αρχικό μόνιμο σημείο λειτουργίας :

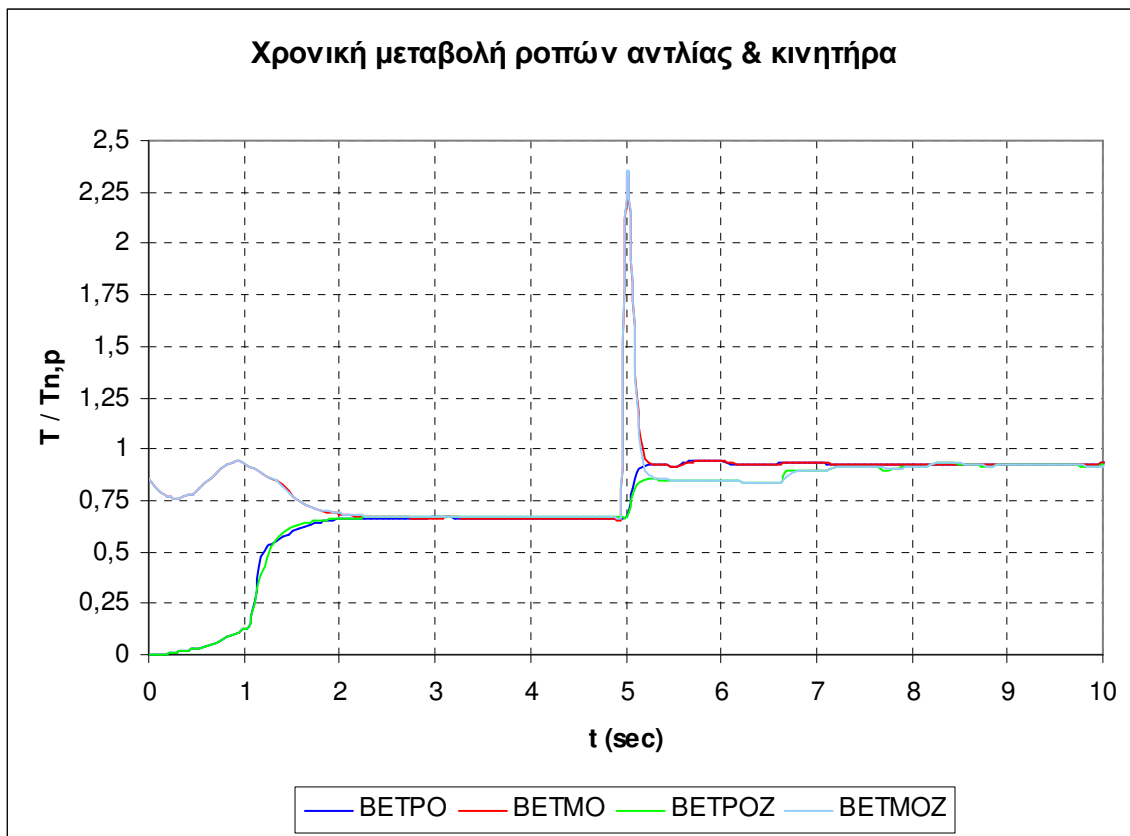
ΧΡΟΝΙΚΟ ΒΗΜΑ DT (SEC)= 0.0058 TPER (SEC)= 1.5393

PLHTOS ANTLION 1 SE LEITΟΥΡΓΙΑ= 1  
 ΑΡΧΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΟΥ (M3/H)= 0.0000

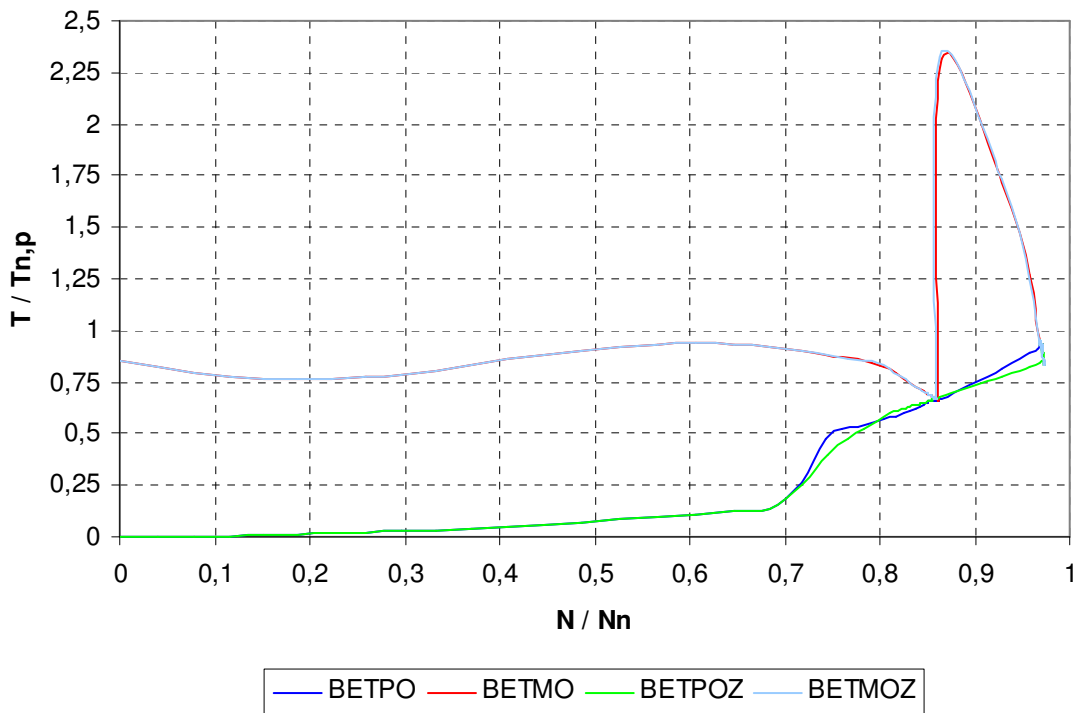
PAROXH MIAS ANTLIAS (M3/H)= 0.0000  
 ARXIKO OL. YPSOS ANTLIAS (MWG)= 0.0000  
 ARX. APOR. ISXYS ANNTLIAS (KW)= 0.0000  
 SYNTELESTHS APOLEION BANNON= 9793152.0  
 ARXIKH GONIA ROHS BANNON (DEG)= 90.0

| J | Q(J,1) | Q(J,N1(J)) | H(J,1)   | H(J,N1(J)) |
|---|--------|------------|----------|------------|
| 1 | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 2 | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 3 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 4 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 5 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 6 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 7 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |

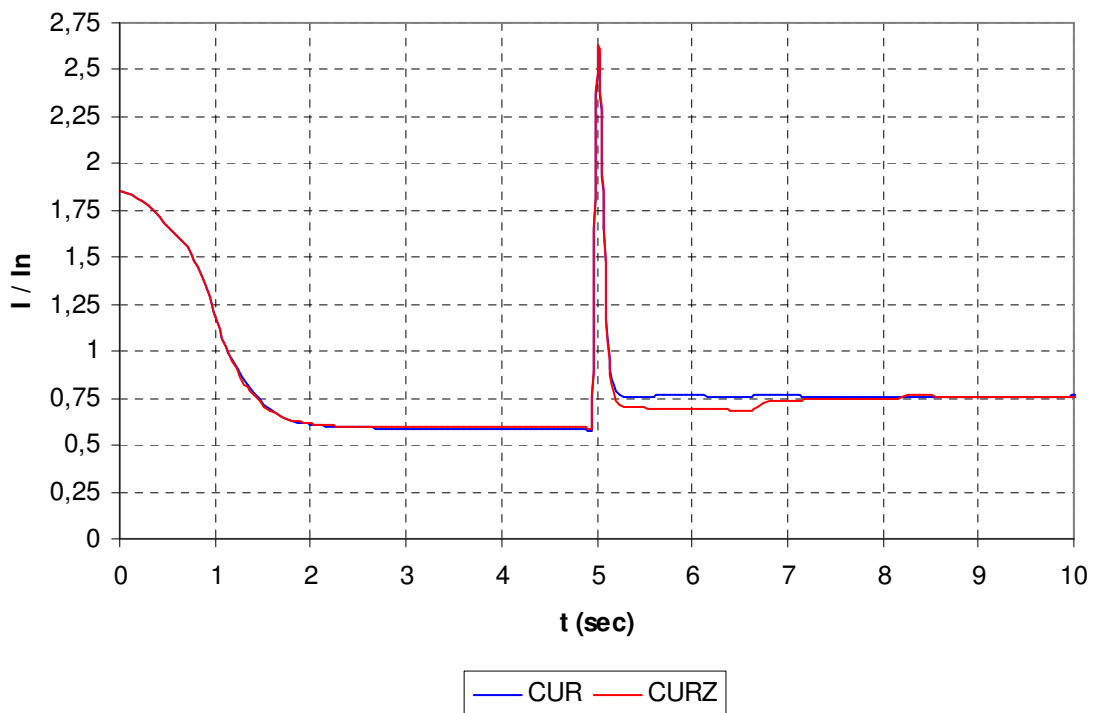
Η εκτέλεση του κώδικα, οδήγησε στην καταγραφή αποτελεσμάτων ανά χρονικά διαστήματα  $10 \cdot DT$ . Προκειμένου να υπάρχει εύκολη παρατήρηση της επίδρασης της βάνας, τα διάφορα μεγέθη χαράσσονται σε κοινό διάγραμμα με αυτά της αρχικής περίπτωσης άνευ βάνας. Για τη διάκρισή τους, τα πρώτα φέρουν στο τέλος τους το γράμμα Z. Κάποια διαγράμματα χαράσσονται σε μικρότερο χρονικό διάστημα, ώστε να είναι ευδιάκριτες οι όποιες διαφοροποιήσεις.



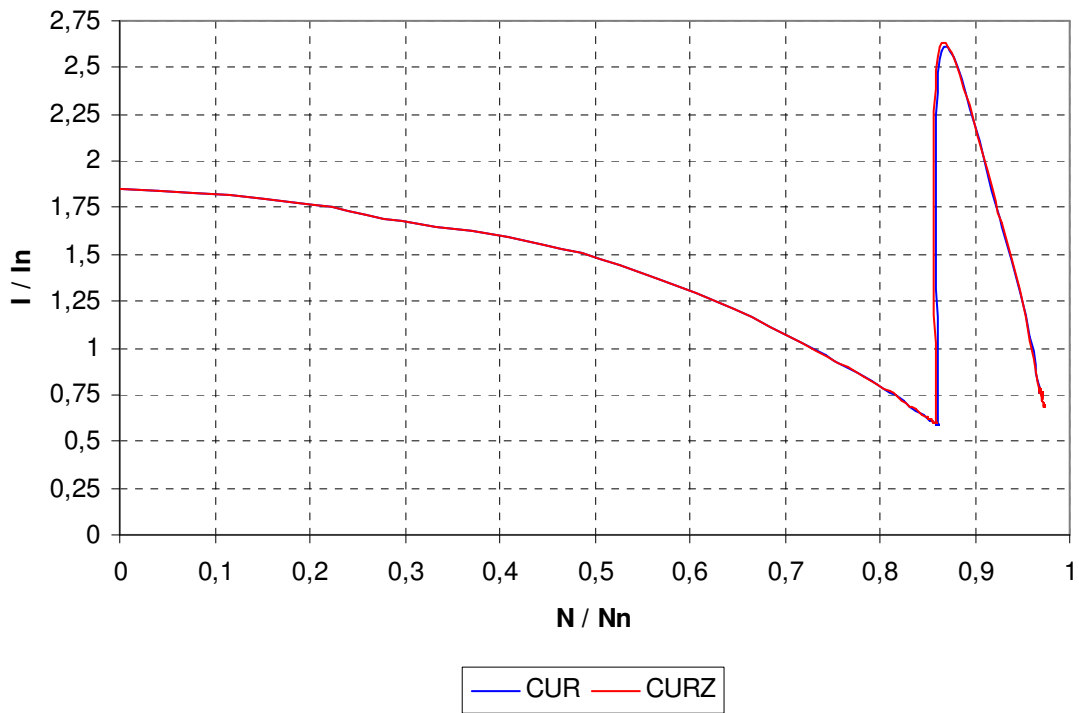
### Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής - στροφών



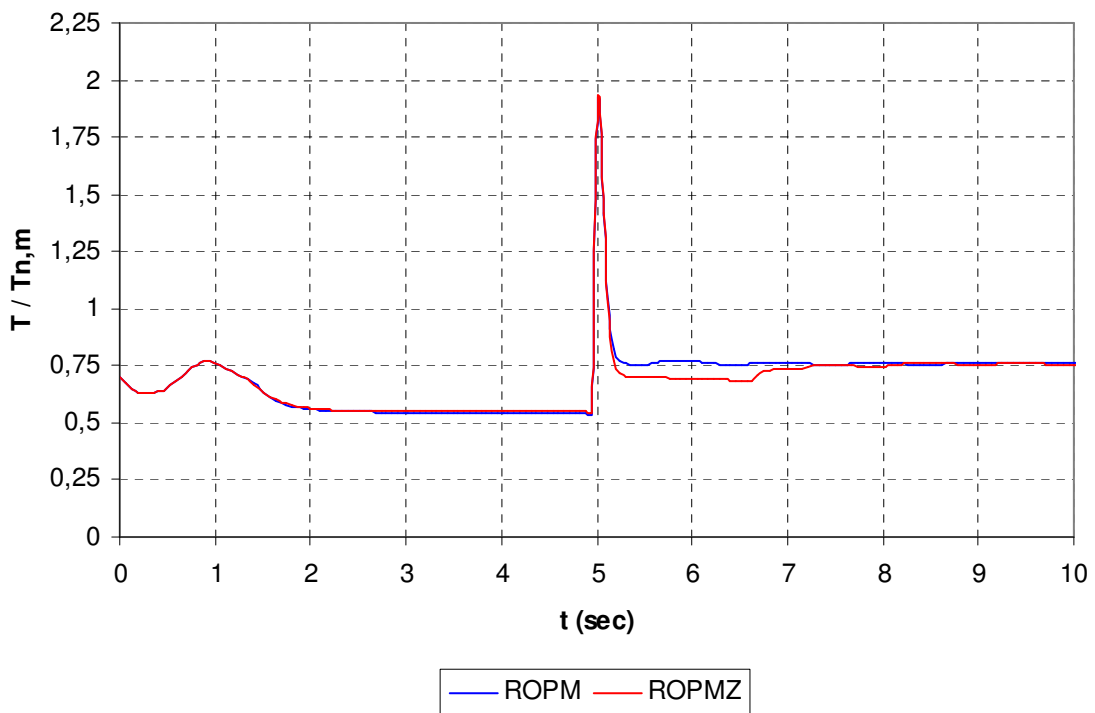
### Χρονική μεταβολή απορροφόμενου ρεύματος



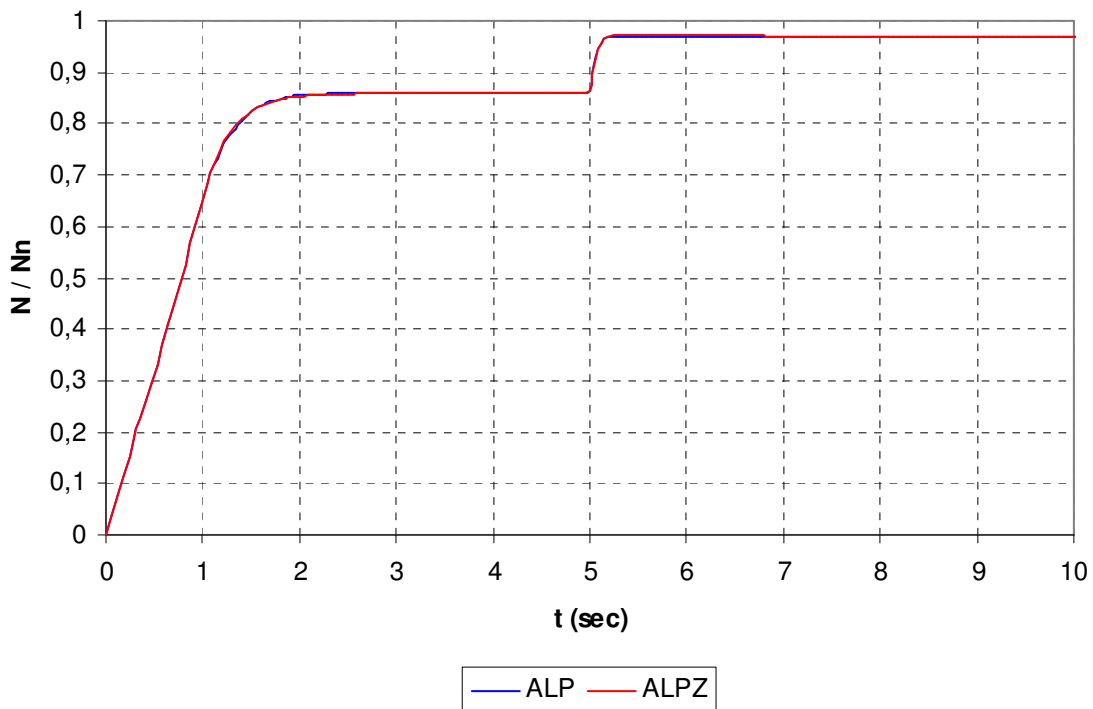
Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - στροφών



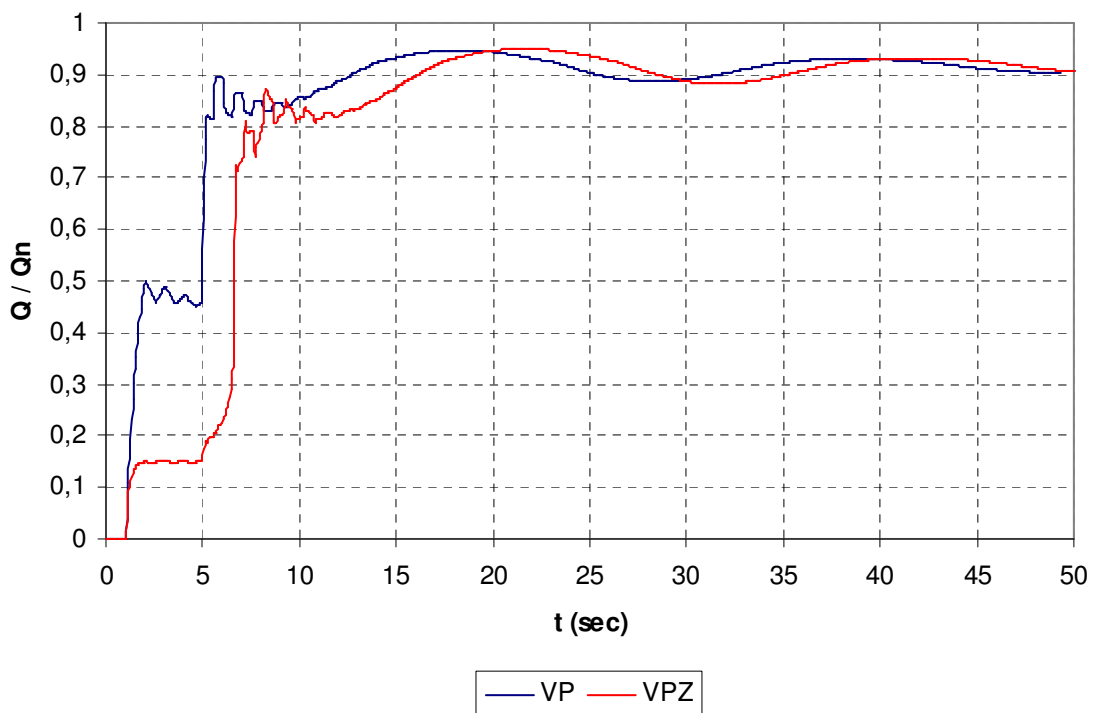
Χρονική μεταβολή ροπής κινητήρα

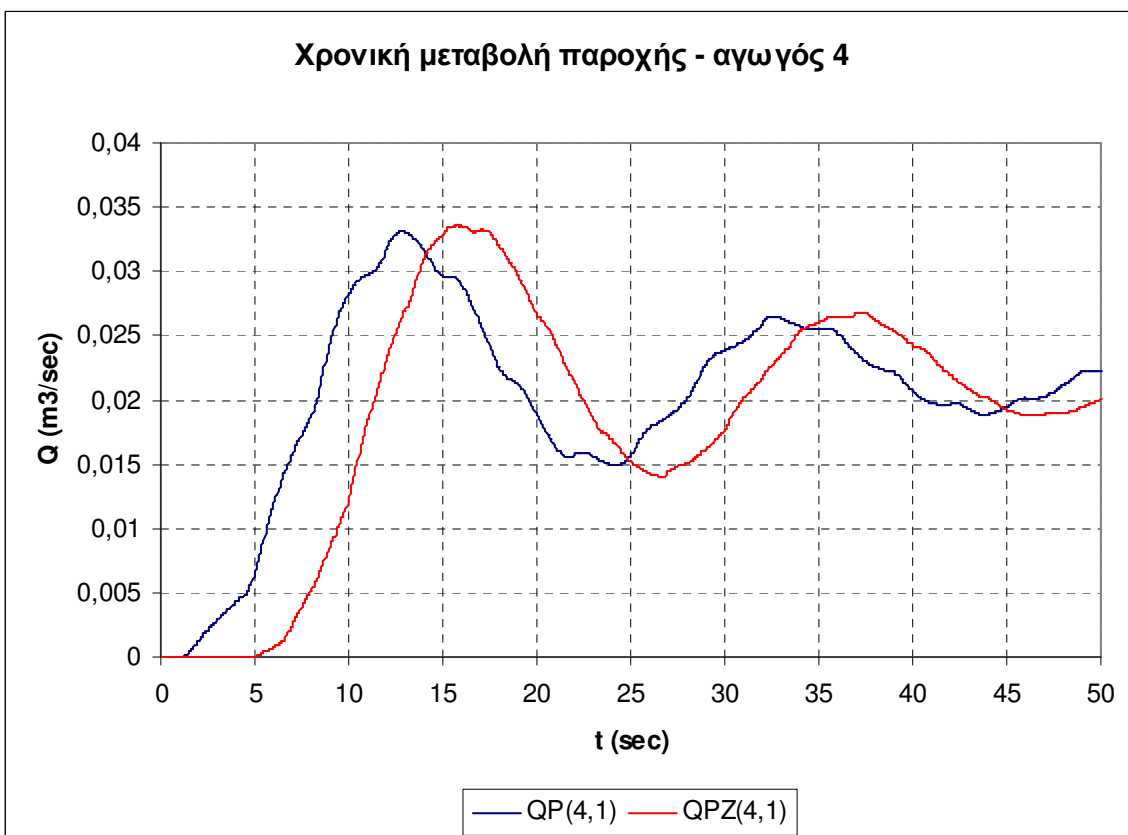
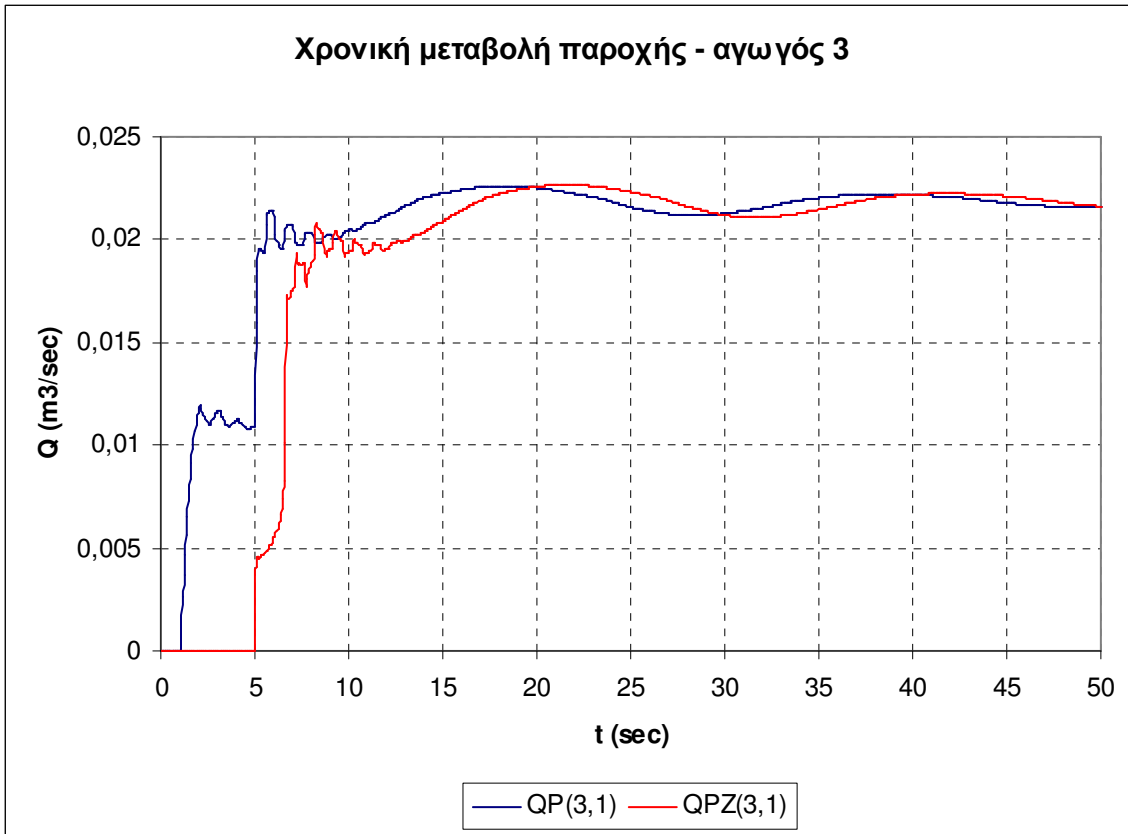


### Χρονική μεταβολή ταχύτητας αντλίας

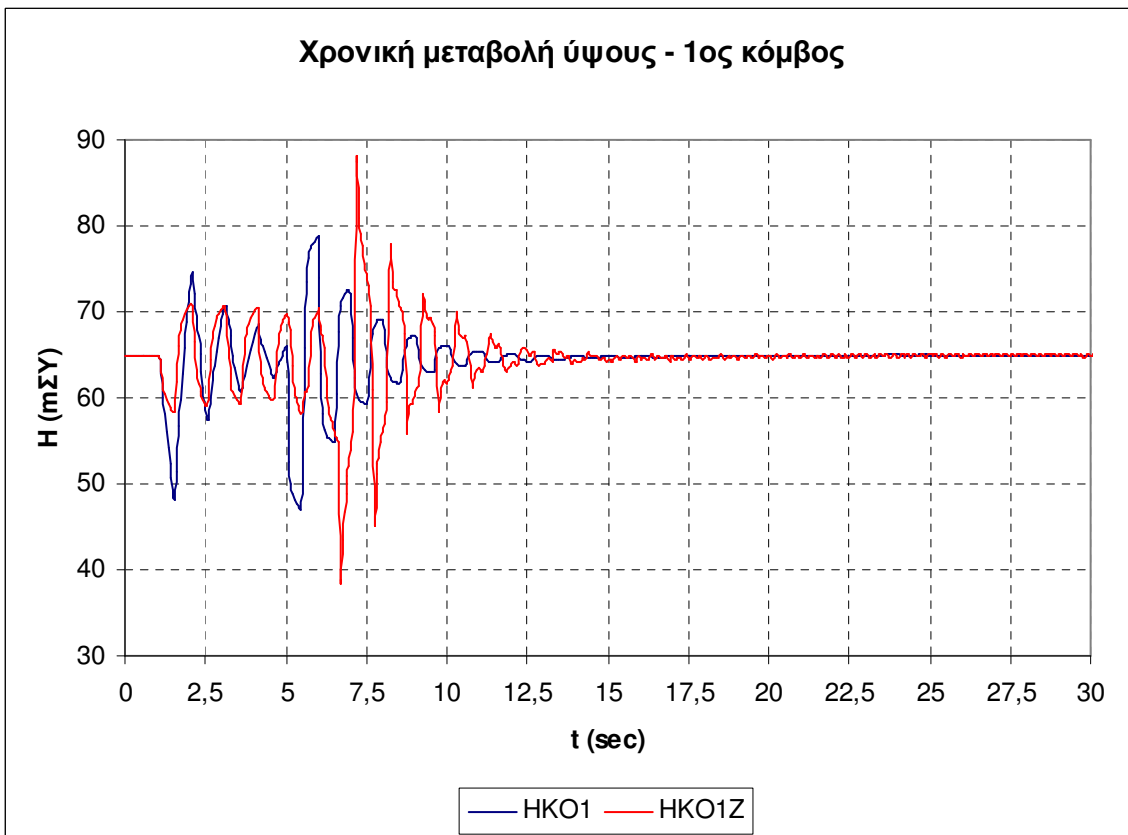
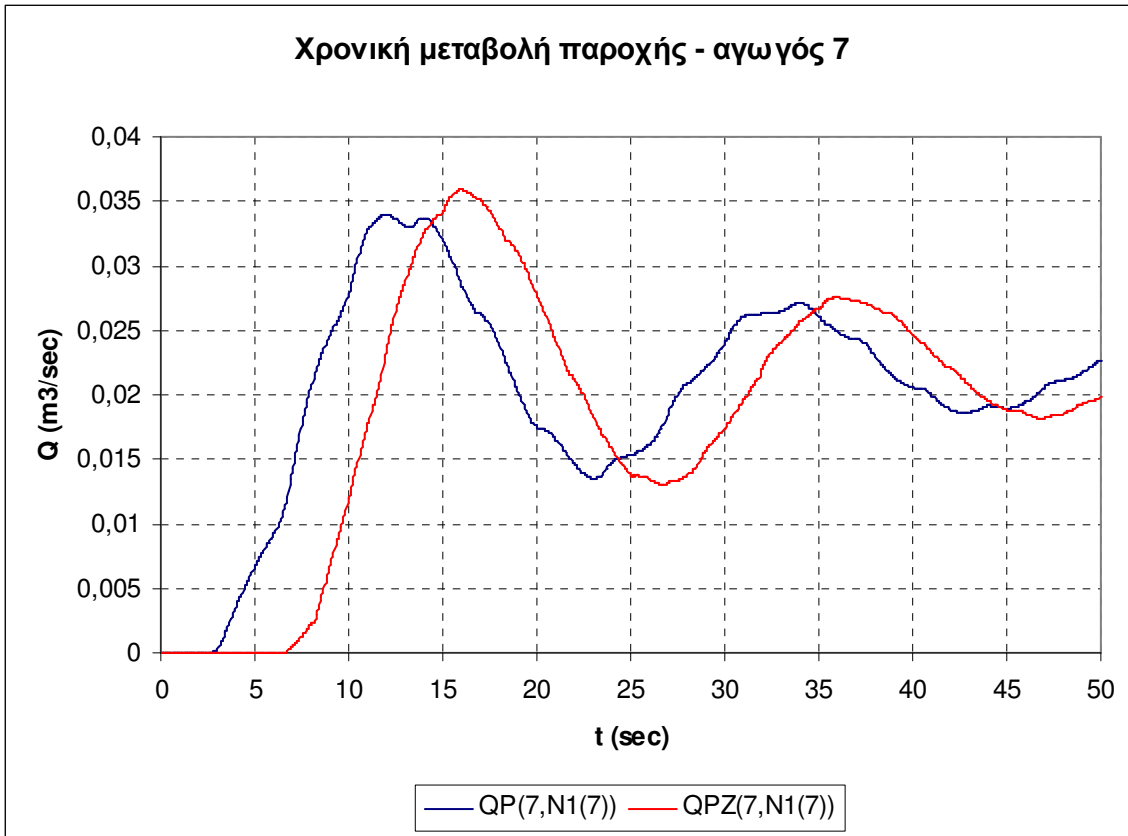


### Χρονική μεταβολή παροχής αντλίας











### Παρατηρήσεις

Βλέπουμε ότι η χρήση της βάνας στην κατάθλιψη της αντλίας, έχει τόσο ευεργετικά όσο και αρνητικά αποτελέσματα.

1<sup>ov</sup> : Μεταβάλλει ελαφρά την χαρακτηριστική ροπής της αντλίας, προσδίνοντάς της μια πιο ομαλή αύξηση για ταχύτητα περιστροφής  $N > 0,7 \cdot N_n$  και ενώ ακόμα η βάνα είναι κλειστή ( $t = 1 \div 2 \text{ sec}$ ).

2<sup>ov</sup> : Η μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  συμπίπτει με το άνοιγμα της βάνας, με αποτέλεσμα το μέγιστο απορροφόμενο ρεύμα να είναι ελαφρά αυξημένο ( $I_{MAX} = 2,6083 \cdot I_N$ ) και η μείωση σε σχέση με την απευθείας σύνδεση στο δίκτυο είναι πλέον 54,8%.

3<sup>ov</sup> : Στο χρονικό διάστημα  $t = 5,2 \div 8 \text{ sec}$  το ρεύμα και οι ροπές κινητήρα – αντλίας είναι μειωμένες σε σχέση με την αρχική περίπτωση, προφανώς λόγω της παροχής που έχει ήδη συσσωρευτεί στον αγωγό αναρρόφησης. Η μείωση αυτή φθάνει μέχρι και το 6% για το ρεύμα, και το 7% για τις ροπές. Δηλαδή η επίτευξη των κινηματικών μεγεθών του σημείου λειτουργίας της εγκατάστασης μετατίθεται χρονικά για ένα διάστημα περίπου 3sec. Το γεγονός αυτό συμβάλει στην ευκολότερη σταθεροποίηση του δικτύου μετά από μια βύθιση τάσης.

4<sup>ov</sup> : Η καμπύλη παροχής της αντλίας, λόγω του κλεισίματος της βάνας, παρουσιάζει σταθερή παροχή στο διάστημα  $t = 2 \div 5 \text{ sec}$ . Στη συνέχεια ακολουθεί απότομη άνοδος και ακολουθεί την ίδια πορεία με την αρχική περίπτωση.

5<sup>ov</sup> : Η καμπύλη της παροχής στον αγωγό κατάθλιψης εμφανίζει μία μετάθεση προς τα αριστερά η οποία είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του αγωγού από την αντλία. Δεν παρουσιάζει κάποια έντονη διαφοροποίηση συγκριτικά με την αρχική περίπτωση, ως προς το εύρος και τη συχνότητα των διακυμάνσεών της.

6<sup>ov</sup> : Όσον αφορά την πίεση στον 1<sup>o</sup> κόμβο, βλέπουμε ότι η τιμή της εκτελεί αποσβενόμενη ταλάντωση, με μέγιστο για  $t = 7,2156\text{sec}$  (+34,5% της αρχική τιμής) και ελάχιστο για  $t = 6,6924\text{sec}$  (-40,1%). Δηλαδή απουσιάζει η έντονη διακύμανση που οφείλεται στο ξεκίνημα της αντλίας, με τμήμα υψηλότερες πιέσεις στη συνέχεια. Στα 15sec η διακύμανση της πίεσης έχει εξομαλυνθεί σχεδόν πλήρως.

7<sup>ov</sup> : Η πίεση στον 2<sup>o</sup> κόμβο, παρουσιάζει μία ελαφρά μετάθεση προς τα αριστερά με μεγαλύτερο εύρος διακύμανσης. Συγκεκριμένα παρατηρείται μέγιστο για  $t = 11,3439\text{sec}$  (+6,44% της αρχικής τιμής), ελάχιστο (-2,6%) για  $t = 21,519\text{sec}$  και η διακύμανσή των τιμών της σταδιακά εξομαλύνεται.

8<sup>ov</sup> : Στο πέρας των 50sec οι τιμές των μεγεθών είναι : ταχύτητα περιστροφής της αντλίας  $ALP = 0,9691$ , παροχή αντλίας  $VP = 0,9055$ , ροπή  $BETPO = BETMO = 0,9422$  και ρεύμα  $CUR = 0,773$ .

Συνοψίζοντας, βλέπουμε ότι η χρήση της βάνας, έχει ευεργετικές συνέπειες στα κινηματικά χαρακτηριστικά του συστήματος και στο απορροφόμενο ρεύμα. Ωστόσο συνοδεύεται από αυξημένες υπερπιέσεις και υποπιέσεις αμέσως μετά το άνοιγμα της βάνας, δοκιμάζοντας την αντοχή της σωλήνωσης.

## 6.3 Προσομοίωση με 4 αντλίες

### 6.3.1 Σωλήνωση χωρίς βάνες τύπου πεταλούδας

Και πάλι, λόγω της διαφοροποίησης του αριθμού των αντλιών και επομένως της παροχής, είμαστε υποχρεωμένοι να μεταβάλλουμε τα χαρακτηριστικά των ενιαίων αγωγών. Υπενθυμίζουμε ότι για 8 αντλίες υπολογίσαμε :

$$U_{AN} = Q_{AN} / AD_{AN} = 0,38\text{m/s}$$

$$U_{KAT} = Q_{KAT} / AD_{KAT} = 0,654\text{m/s}$$

Έτσι για το κανονικό σημείο λειτουργίας και 4 αντλίες θα έχουμε :

- Ενιαίος αγωγός αναρρόφησης

$$\text{Νέα διατομή} : d' = \sqrt{\frac{4 \cdot Q'_{AN}}{\pi \cdot U_{AN}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 86}{\pi \cdot 3600 \cdot 0,38}} = 0,566\text{m} \approx 0,56\text{m}$$

$$\text{Νέα ταχύτητα} : U'_{AN} = Q'_{AN} / AD'_{AN} = 0,388\text{m/s}$$

- Ενιαίος αγωγός κατάθλιψη

$$\text{Νέα διατομή} : d' = \sqrt{\frac{4 \cdot Q'_{KAT}}{\pi \cdot U_{KAT}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 86}{\pi \cdot 3600 \cdot 0,654}} = 0,431\text{m} \approx 0,43\text{m}$$

$$\text{Νέα ταχύτητα} : U'_{KAT} = Q'_{KAT} / AD'_{KAT} = 0,658\text{m/s}$$

Έτσι η σωλήνωση της εγκατάστασης διαμορφώνεται ως εξής :

|                            | α/α | Μήκος (m) | Διάμετρος (m) | Πάχος (mm) | Τραχύτητα (mm) |
|----------------------------|-----|-----------|---------------|------------|----------------|
| Ενιαίος αγωγός αναρρόφησης | 1   | 300       | 0,56          | 8          | 0,20           |

|                                       |     |      |       |      |      |
|---------------------------------------|-----|------|-------|------|------|
| Αγωγός αναρρόφησης αντλίας (x4)       | 2-5 | 25   | 0,225 | 6    | 0,20 |
| Αγωγός κατάθλιψης αντλίας (x4)        | 6-9 | 15   | 0,200 | 10,3 | 0,20 |
| Ενιαίος αγωγός κατάθλιψης (4 τμήματα) | 10  | 200  | 0,43  | 12,7 | 0,20 |
|                                       | 11  | 400  | 0,43  | 12,7 | 0,20 |
|                                       | 12  | 600  | 0,43  | 12,7 | 0,20 |
|                                       | 13  | 1000 | 0,43  | 12,7 | 0,20 |

Επομένως στα διαγράμματα παρουσιάζονται τα μεγέθη :

|                 |  |
|-----------------|--|
| $QP(10,1)$      | Παροχή στο 1 <sup>ο</sup> κόμβο του ενιαίου αγωγού κατάθλιψης 10 |
| $QP(13,N1(13))$ | Παροχή στον τελευταίο κόμβο του ενιαίου αγωγού κατάθλιψης 13     |
| $HKO1$          | Ύψος (πίεση) στο σημείο σύνδεσης των αγωγών 1 & 2                |
| $HKO2$          | Ύψος (πίεση) στο σημείο σύνδεσης των αγωγών 9 & 10               |

Οι αντλίες δεν εκκινούν όλες μαζί, αλλά με χρονική υστέρηση 7,5sec η μία από την άλλη. Ο χρόνος αυτός μπορεί να αλλαχθεί εύκολα στο αρχείο PUMPCON (παράμετρος  $DTDIAD$ ). Επομένως οι στιγμές μεταβολής στη λειτουργία της εγκατάστασης είναι :

|                      |   |  |                      |   |
|----------------------|---|--|----------------------|---|
| $t = 0\text{sec}$    | Εκκίνηση 1 <sup>ης</sup> αντλίας                      |  | $t = 15\text{sec}$   | Εκκίνηση 3 <sup>ης</sup> αντλίας                      |
| $t = 5\text{sec}$    | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 1 <sup>ου</sup> κινητήρα |  | $t = 20\text{sec}$   | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 3 <sup>ου</sup> κινητήρα |
| $t = 7,5\text{sec}$  | Εκκίνηση 2 <sup>ης</sup> αντλίας                      |  | $t = 22,5\text{sec}$ | Εκκίνηση 4 <sup>ης</sup> αντλίας                      |
| $t = 12,5\text{sec}$ | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 2 <sup>ου</sup> κινητήρα |  | $t = 27,5\text{sec}$ | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 4 <sup>ου</sup> κινητήρα |

Για το αρχικό μόνιμο λειτουργίας έχουμε :

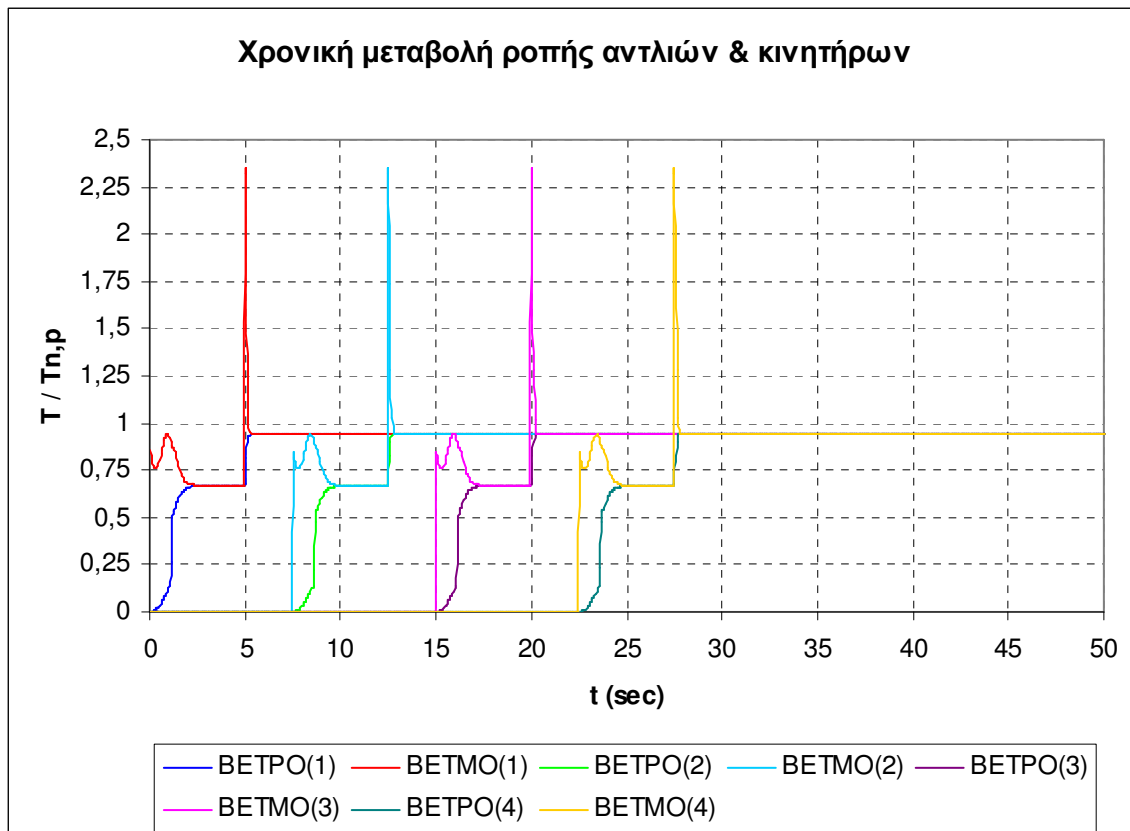
XRONIKO BHMA DT(SEC)= 0.0058 TPER(SEC)= 1.6255

PLHTOS ANTLION 1 SE LEITOURGIA= 4  
 ARXIKH PAROXH ANTLIOSTASIOY (M3/H)= 0.0000  
 PAROXH MIAS ANTLIAS (M3/H)= 0.0000  
 ARXIKO OL. YPSOS ANTLIAS (MWG)= 0.0000  
 ARX. APOR. ISXYS ANNTLIAS (KW)= 0.0000

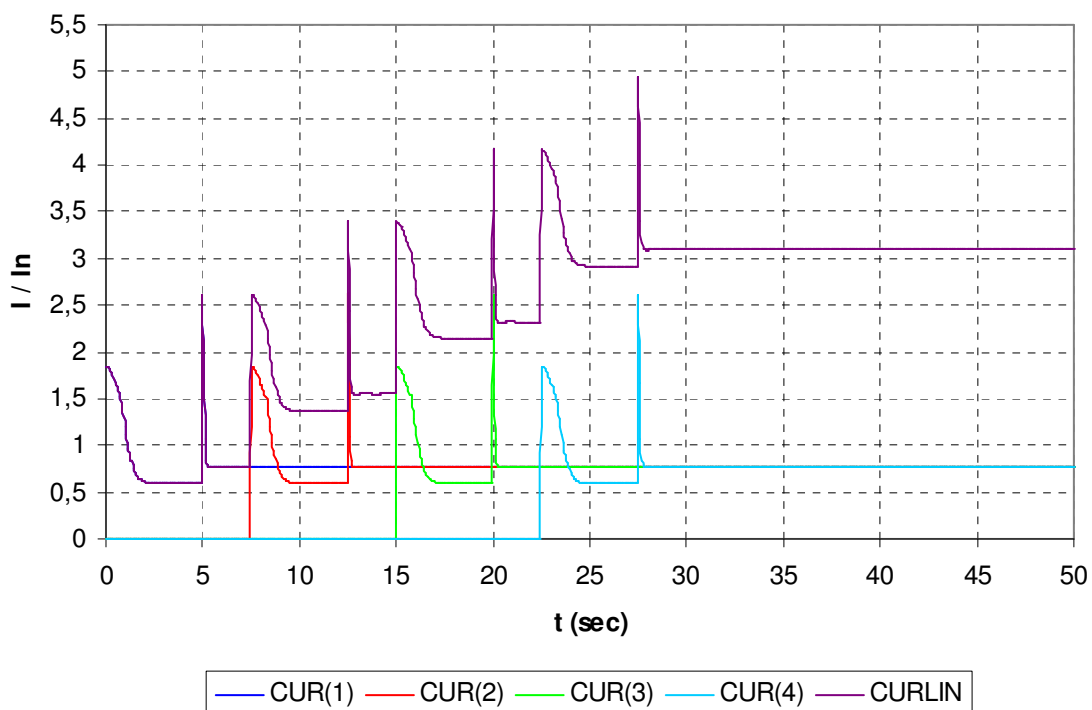
| J  | Q(J,1) | Q(J,N1(J)) | H(J,1)   | H(J,N1(J)) |
|----|--------|------------|----------|------------|
| 1  | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 2  | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 3  | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 4  | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 5  | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 6  | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 7  | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 8  | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 9  | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 10 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 11 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |

|    |        |        |          |          |
|----|--------|--------|----------|----------|
| 12 | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 13 | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |

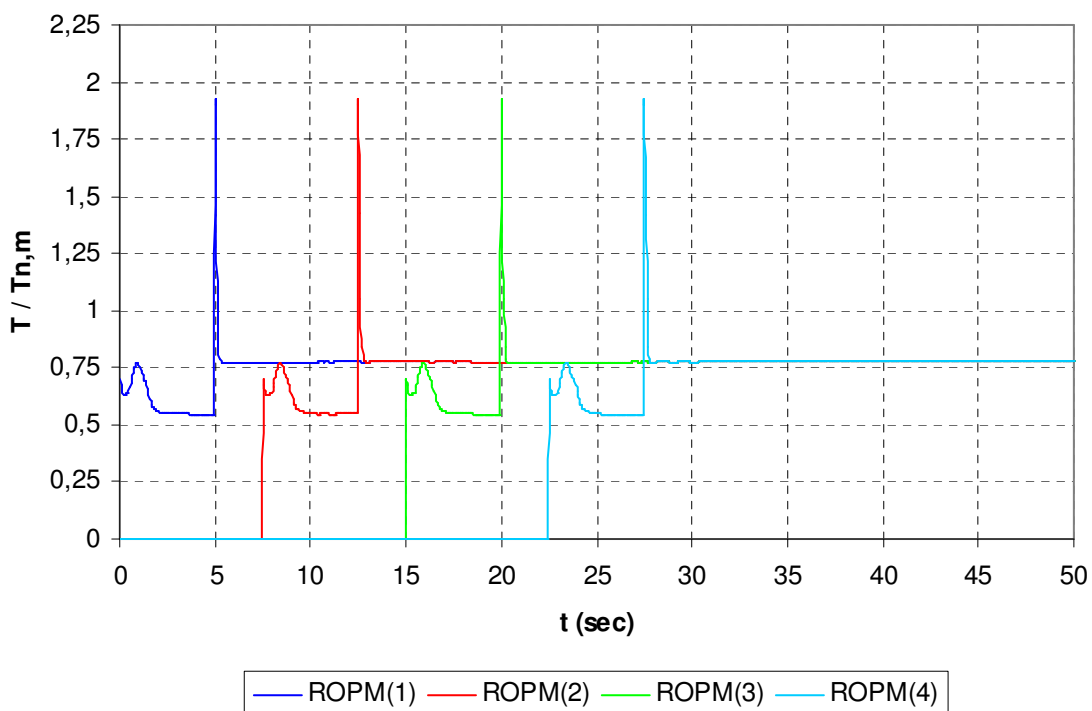
Λόγω της ύπαρξης 4 αντλιών, αυτήν τη φορά επιλέχθηκε χρόνος τρεξίματος 75 sec , έτσι ώστε να αποτυπωθεί καλύτερα η πορεία της εξέλιξης του φαινομένου. Επίσης λόγω της αυξημένης παροχής, προστέθηκε στην εγκατάσταση και 2<sup>ο</sup> όμοιο με το αρχικό αεροφυλάκιο. Ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής των εξεταζόμενων μεγεθών.



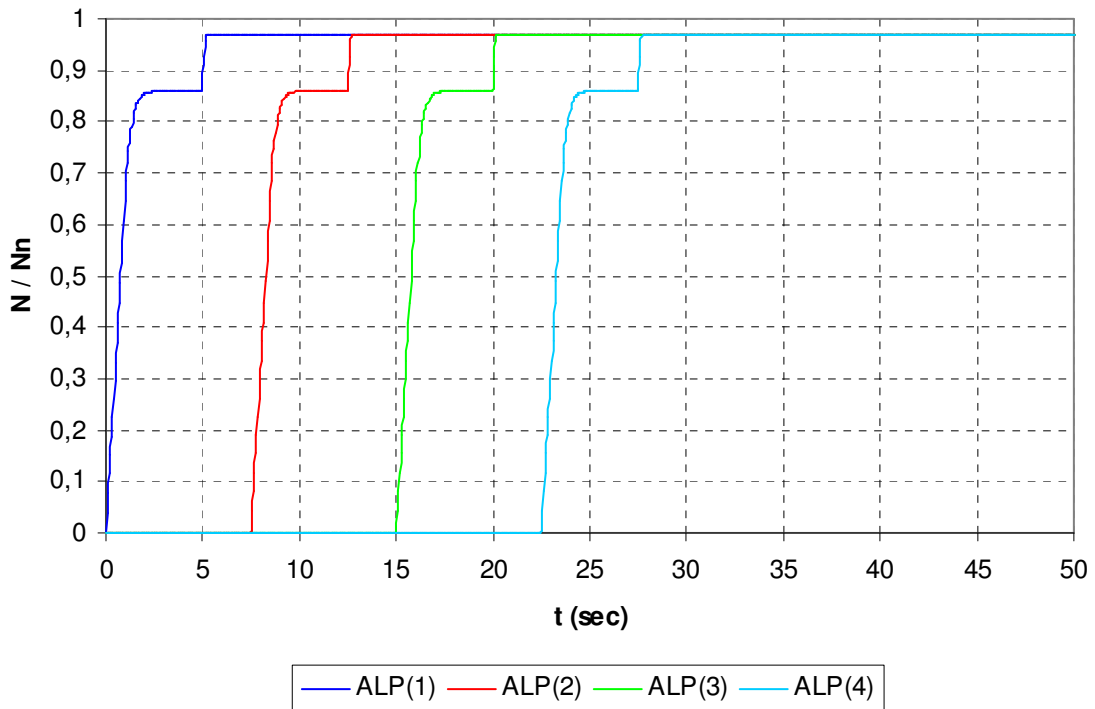
### Χρονική μεταβολή απορροφόμενου ρεύματος



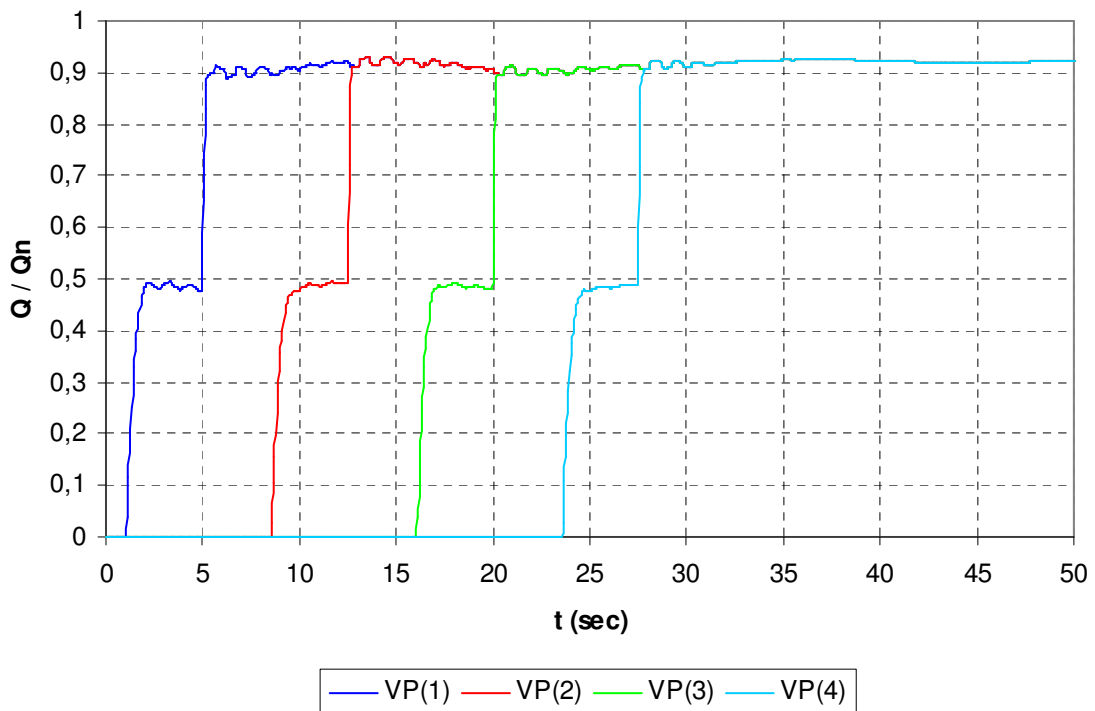
### Χρονική μεταβολή ροπής κινητήρων



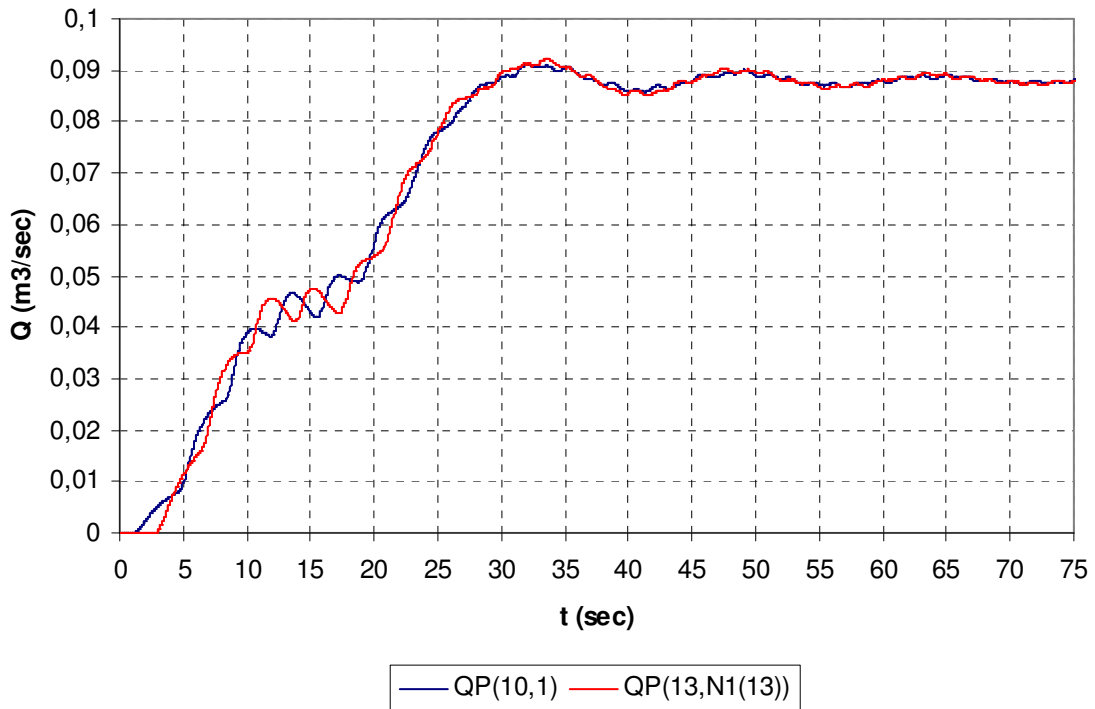
### Χρονική μεταβολή ταχύτητας αντλιών



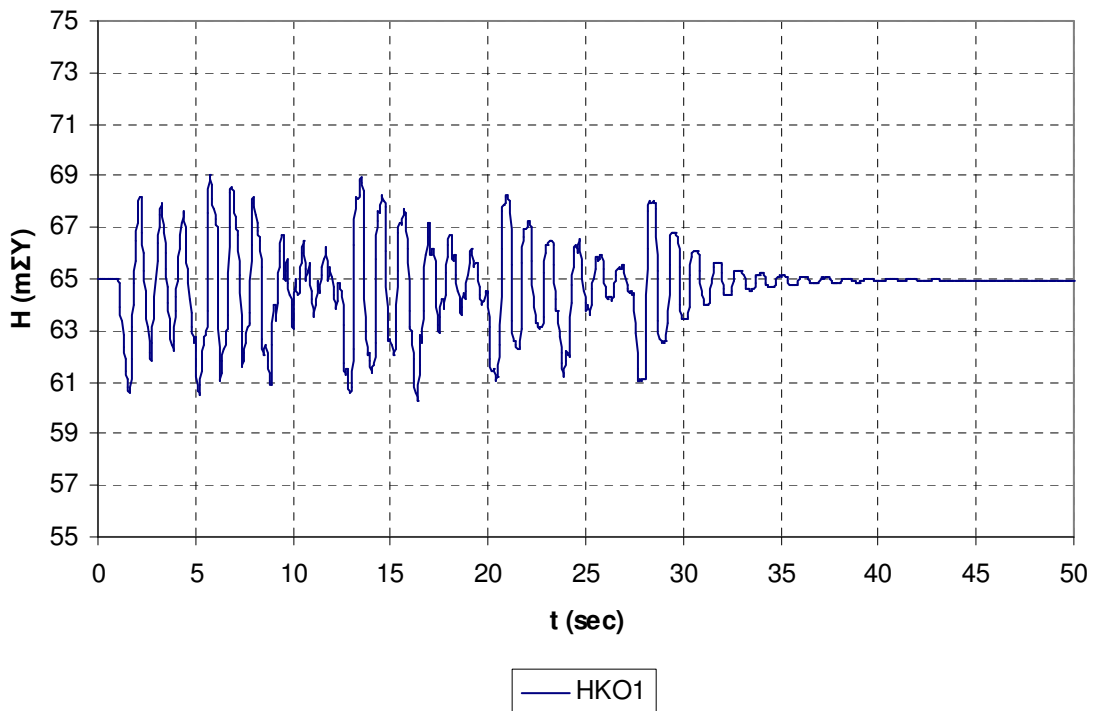
### Χρονική μεταβολή παροχής αντλιών



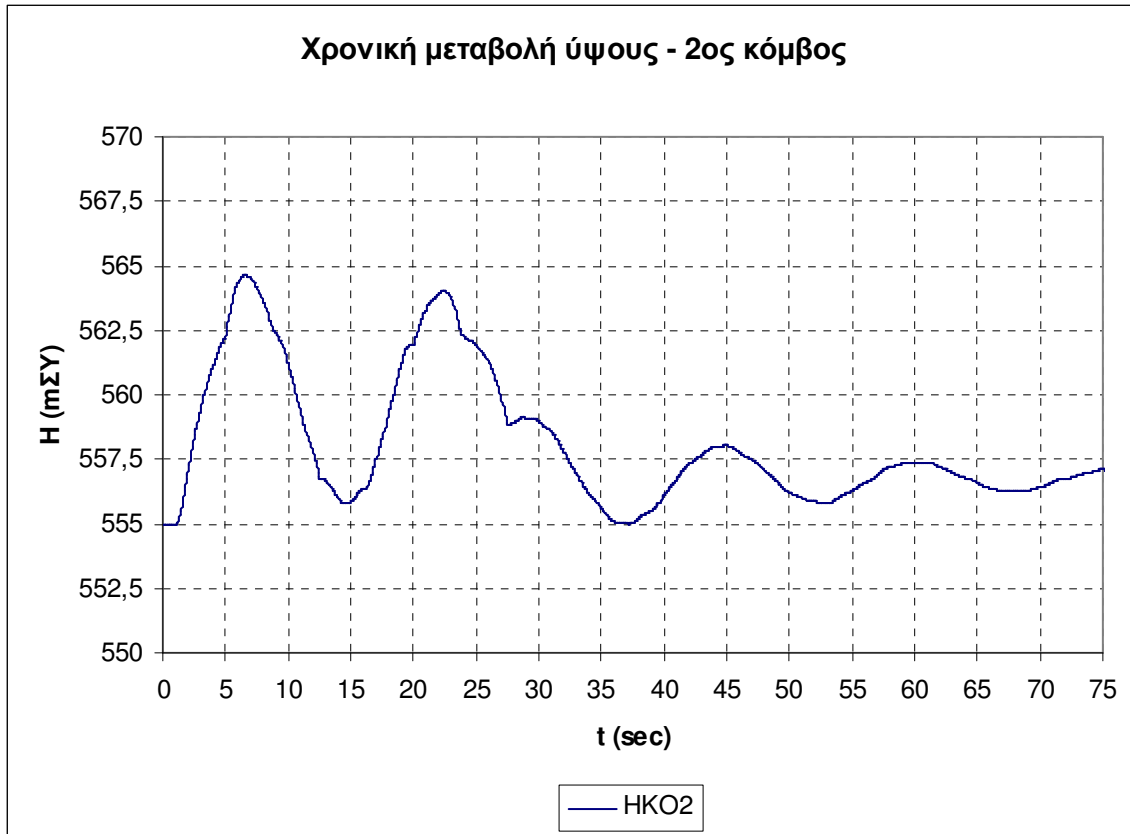
Χρονική μεταβολή παροχής - αγωγοί 10,13



Χρονική μεταβολή ύψους - 1ος κόμβος







### Παρατηρήσεις

1<sup>ov</sup> : Όσον αφορά τις ροπές κινητήρων και αντλιών, την ταχύτητα και την παροχή των τελευταίων, βλέπουμε ότι για κάθε μία από τις 4+4 μηχανές ισχύουν όλα όσα αναφέραμε και στην περίπτωση της μιας αντλίας.

2<sup>ov</sup> : Η επιλογή της διαδοχικής εκκίνησης των αντλιών ανά 7,5 sec , παρατηρούμε ότι έχει ως αποτέλεσμα το μέγιστο απορροφόμενο ρεύμα από την εγκατάσταση είναι  $4,924 \cdot I_N$  και σημειώνεται τη χρονική στιγμή  $t = 27,5078 \text{ sec}$  , δηλαδή κατά τη μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  του τελευταίου κινητήρα. Εάν η εκκίνηση και των 4 μηχανών γινόταν ταυτόχρονα, με βάση τα στοιχεία της παραγράφου 6.2.1 θα αναμέναμε μέγιστο ρεύμα  $\sim 10,35 \cdot I_N$  σε χρονική στιγμή περίπου 5 sec . Έχουμε δηλαδή πετύχει μείωση  $\sim 52,5\%$  . Στην περίπτωση ταυτόχρονης εκκίνησης 4 αντλιών και χρήσης κινητήρων με συνδεσμολογία τριγώνου, το μέγιστο ρεύμα θα ήταν  $\sim 23,1 \cdot I_N$  και άρα η μείωση είναι  $\sim 78,5\%$  . Καθίσταται λοιπόν σαφές, ότι μείωση του απορροφόμενου ρεύματος μπορεί να γίνει και με απλές και χωρίς κόστος μεθόδους, όπως είναι η μη ταυτόχρονη εκκίνηση όλων των αντλιών.

3<sup>ov</sup> : Η παροχή στον αγωγό κατάθλιψης, εμφανίζει μία αρκετά ομαλή αύξηση της τιμής της. Η αυξητική της τάσης μειώνεται στο διάστημα  $t = 12 \div 15 \text{ sec}$  προφανώς λόγω των έντονων διακυμάνσεων στην τιμή της, που παρατηρήθηκαν στην παράγραφο 6.2.1. Η παρουσία των 2 αεροφυλακίων περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τις διακυμάνσεις αυτές.

4<sup>ov</sup> : Η πίεση στον κόμβο 1, παρουσιάζει 5 έντονες διακυμάνσεις. Αυτές οφείλονται στην εκκίνησης της 1<sup>ης</sup> αντλίας ( $t = 0 \text{ sec}$ ), στην μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  του 1<sup>ov</sup> κινητήρα ( $t = 5 \text{ sec}$ ), στην μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  του 2<sup>ov</sup> κινητήρα ( $t = 12,5 \text{ sec}$ ), στην

μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  του 3<sup>ου</sup> κινητήρα ( $t = 20\text{sec}$ ) και στην μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  του 4<sup>ου</sup> κινητήρα ( $t = 27,5\text{sec}$ ). Η εκκίνηση της 2<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> αντλίας φαίνεται ότι έχουν ευεργετική επίδραση στην εξομάλυνση της τιμής της πίεσης. Η μέγιστη υπερπίεση καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου είναι 6,21% τη χρονική στιγμή  $t = 5,7621\text{sec}$  και μέγιστη τιμή υποπίεση 7,32% για  $t = 16,4024\text{sec}$ . Δηλαδή παρά την αυξημένη παροχή, το φαινόμενο εξελίσσεται πιο ομαλά. Μετά τα  $t = 35\text{sec}$  έχουμε σχεδόν πλήρη εξάλειψη των διακυμάνσεων.

5<sup>ου</sup>: Η πίεση στον κόμβο 2 εκτελεί μία διαρκώς αποσβενόμενη ταλάντωση. Κύριο χαρακτηριστικό αυτής, είναι ότι δεν παρατηρείται υποπίεση σε καμία χρονική στιγμή. Μέγιστη τιμή έχουμε για  $t = 6,5761\text{sec}$  (+1,73% της αρχικής τιμής). Και πάλι δηλαδή έχουμε μετριασμό του εύρους της ταλάντωσης σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση.

6<sup>ου</sup>: Στο πέρας των 75sec οι τιμές των μεγεθών είναι :  
ταχύτητα περιστροφής κάθε αντλίας  $ALP = 0,9689$ , παροχή κάθε αντλίας  $VP = 0,9208$ ,  
ροπή  $BETPO = BETMO = 0,9464$  και ρεύμα τροφοδοσίας  $CURLIN = 3,1059$ .

### 6.3.2 Σωλήνωση με βάνες τύπου πεταλούδας

Στη συνέχεια εξετάστηκε και η περίπτωση 4 αντλιών με τοποθέτηση βανών τύπου πεταλούδας στην κατάθλιψή τους. Οι στιγμές μεταβολής στη λειτουργία της εγκατάστασης είναι :

|                      |  |                      |  |
|----------------------|--|----------------------|--|
| $t = 0\text{sec}$    | Εκκίνηση 1 <sup>ης</sup> αντλίας   | $t = 15\text{sec}$   | Εκκίνηση 3 <sup>ης</sup> αντλίας   |
| $t = 5\text{sec}$    | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 1 <sup>ου</sup> κινητήρα<br>Άνοιγμα 1 <sup>ης</sup> βάνας | $t = 20\text{sec}$   | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 3 <sup>ου</sup> κινητήρα<br>Άνοιγμα 3 <sup>ης</sup> βάνας |
| $t = 7,5\text{sec}$  | Εκκίνηση 2 <sup>ης</sup> αντλίας   | $t = 22,5\text{sec}$ | Εκκίνηση 4 <sup>ης</sup> αντλίας   |
| $t = 12,5\text{sec}$ | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 2 <sup>ου</sup> κινητήρα<br>Άνοιγμα 2 <sup>ης</sup> βάνας | $t = 27,5\text{sec}$ | Μεταβολή $\Upsilon - \Delta$ 4 <sup>ου</sup> κινητήρα<br>Άνοιγμα 4 <sup>ης</sup> βάνας |

Για το μόνιμο σημείο λειτουργίας ισχύει :

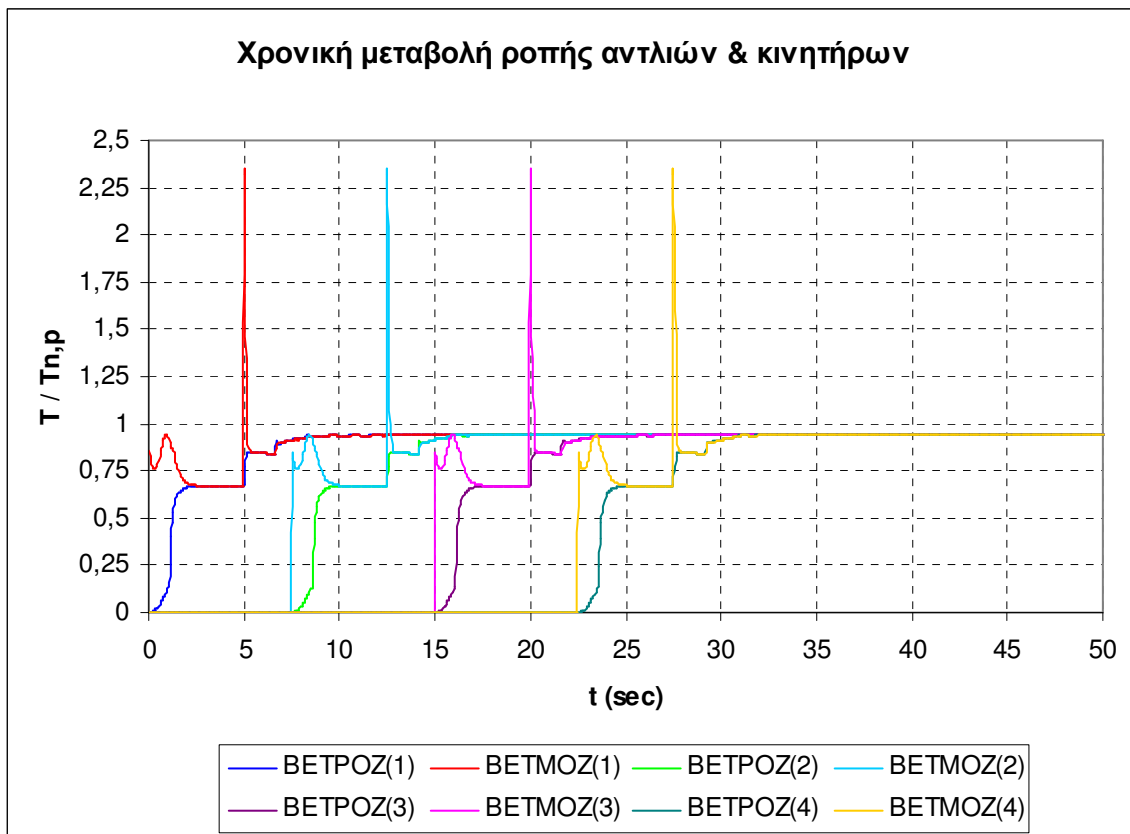
XRONIKO BHMATA DT (SEC) = 0.0058    TPER (SEC) = 1.6255

PLHTOS ANTLION 1 SE LEITOURGIA = 4  
ARXIKH PAROXH ANTLIOSTASIOY (M3/H) = 0.0000  
PAROXH MIAS ANTLIAS (M3/H) = 0.0000  
ARXIKO OL. YPSOS ANTLIAS (MWG) = 0.0000  
ARX. APOR. ISXYS ANNTLIAS (KW) = 0.0000  
SYNTELESTHS APOLEION BANNON = 9793152.0  
ARXIKH GONIA ROHS BANNON (DEG) = 90.0

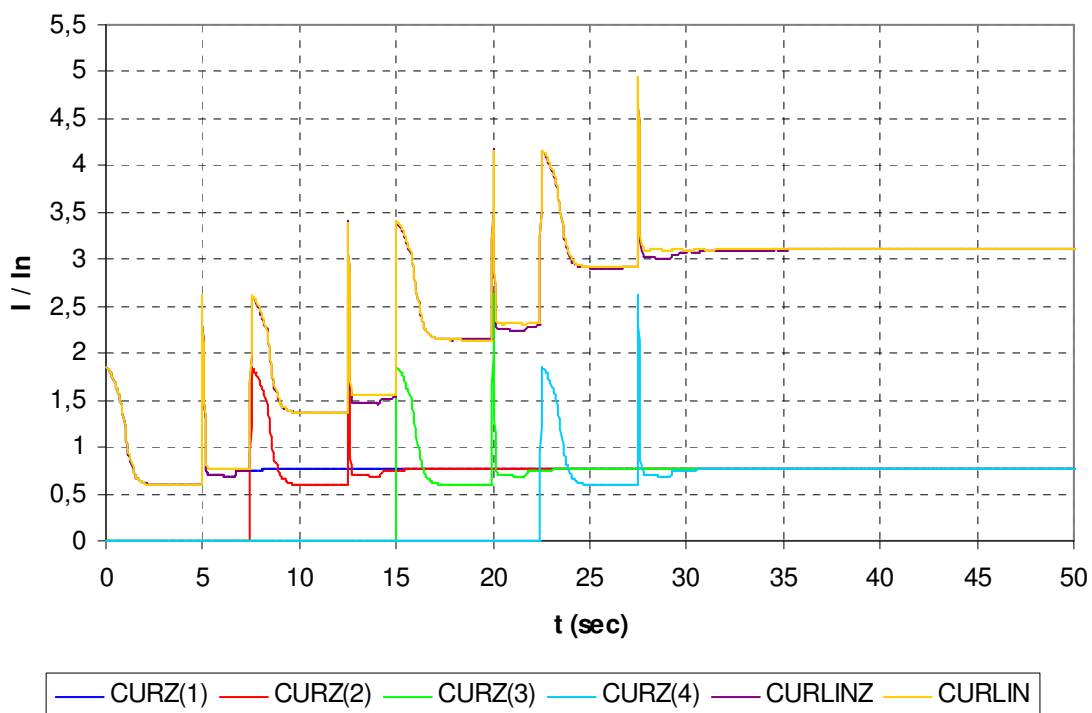
| J | Q(J, 1) | Q(J, N1(J)) | H(J, 1) | H(J, N1(J)) |
|---|---------|-------------|---------|-------------|
| 1 | 0.0000  | 0.0000      | 65.0000 | 65.0000     |
| 2 | 0.0000  | 0.0000      | 65.0000 | 65.0000     |
| 3 | 0.0000  | 0.0000      | 65.0000 | 65.0000     |

|    |        |        |          |          |
|----|--------|--------|----------|----------|
| 4  | 0.0000 | 0.0000 | 65.0000  | 65.0000  |
| 5  | 0.0000 | 0.0000 | 65.0000  | 65.0000  |
| 6  | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 7  | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 8  | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 9  | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 10 | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 11 | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 12 | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |
| 13 | 0.0000 | 0.0000 | 555.0000 | 555.0000 |

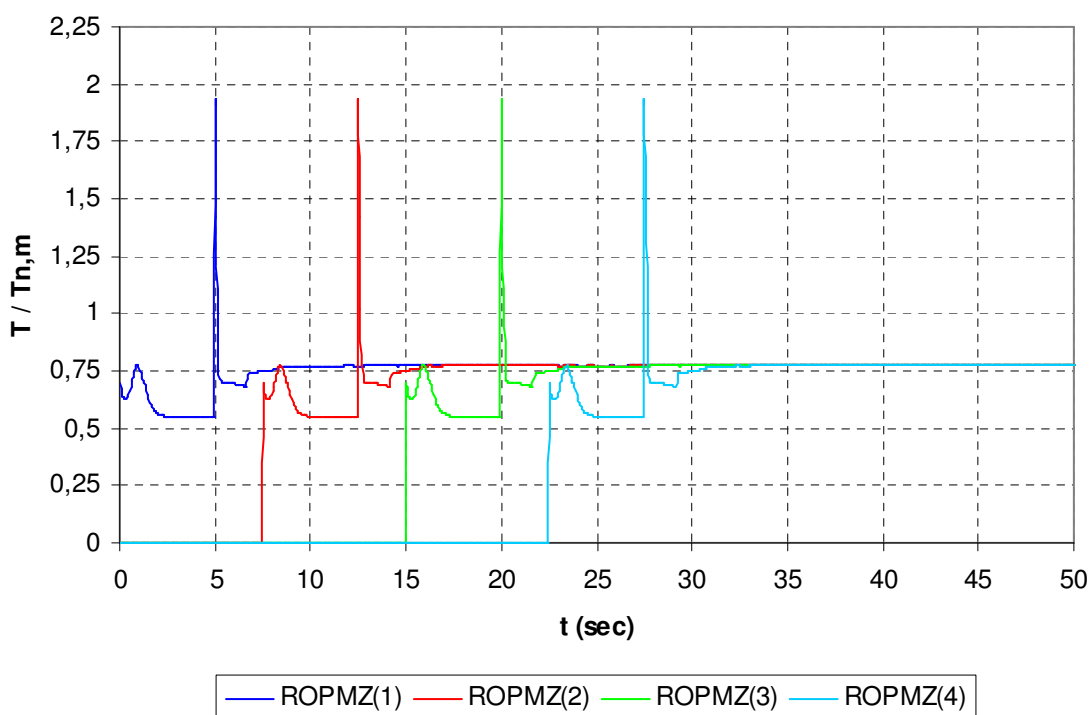
Ακολουθούν τα αποτελέσματα, μερικά από τα οποία χαράσσονται σε κοινό διάγραμμα με την περίπτωση 4 αντλιών χωρίς βάνες



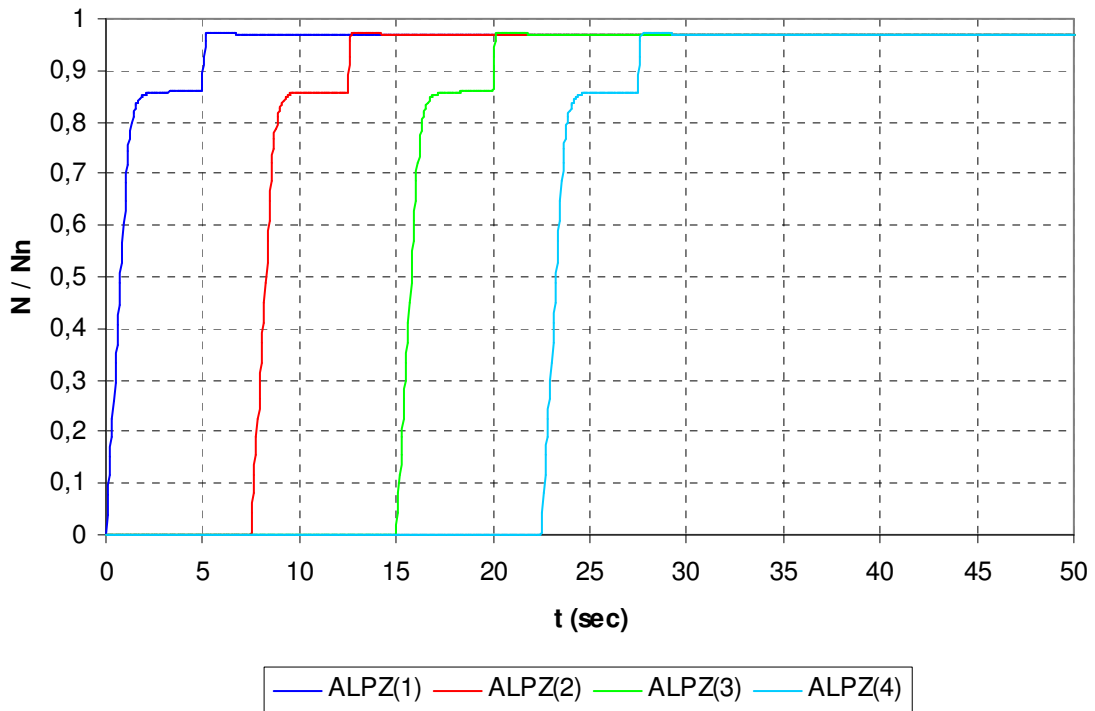
### Χρονική μεταβολή απορροφόμενου ρεύματος



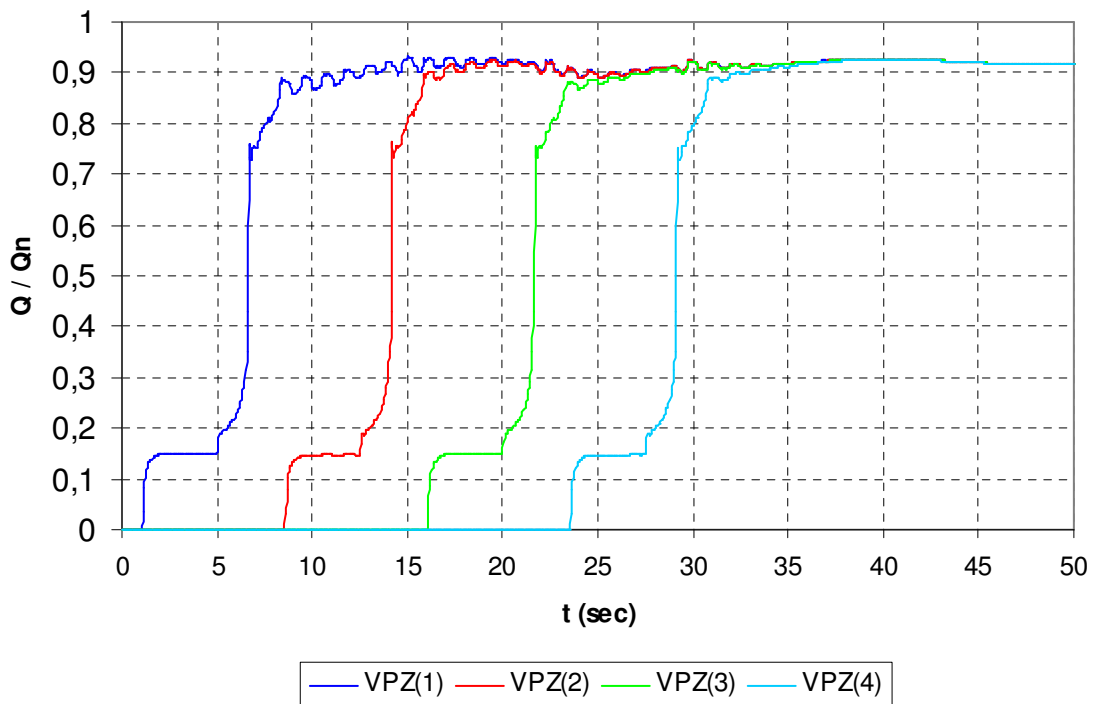
### Χρονική μεταβολή ροπής κινητήρων



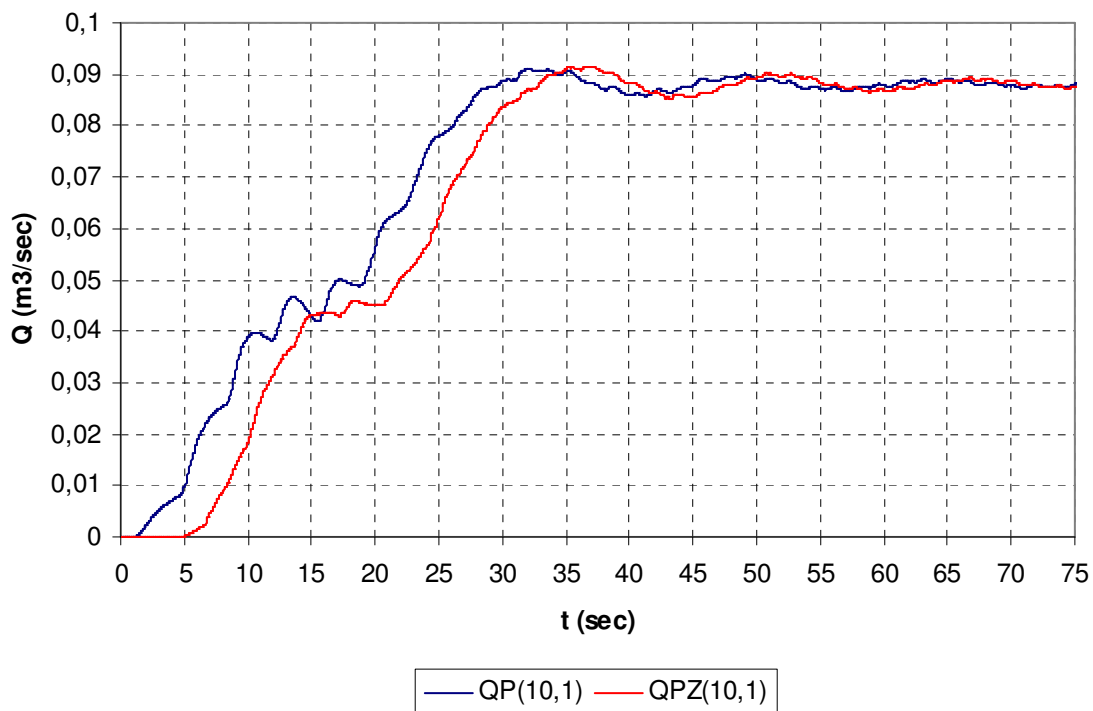
### Χρονική μεταβολή ταχύτητας αντλιών



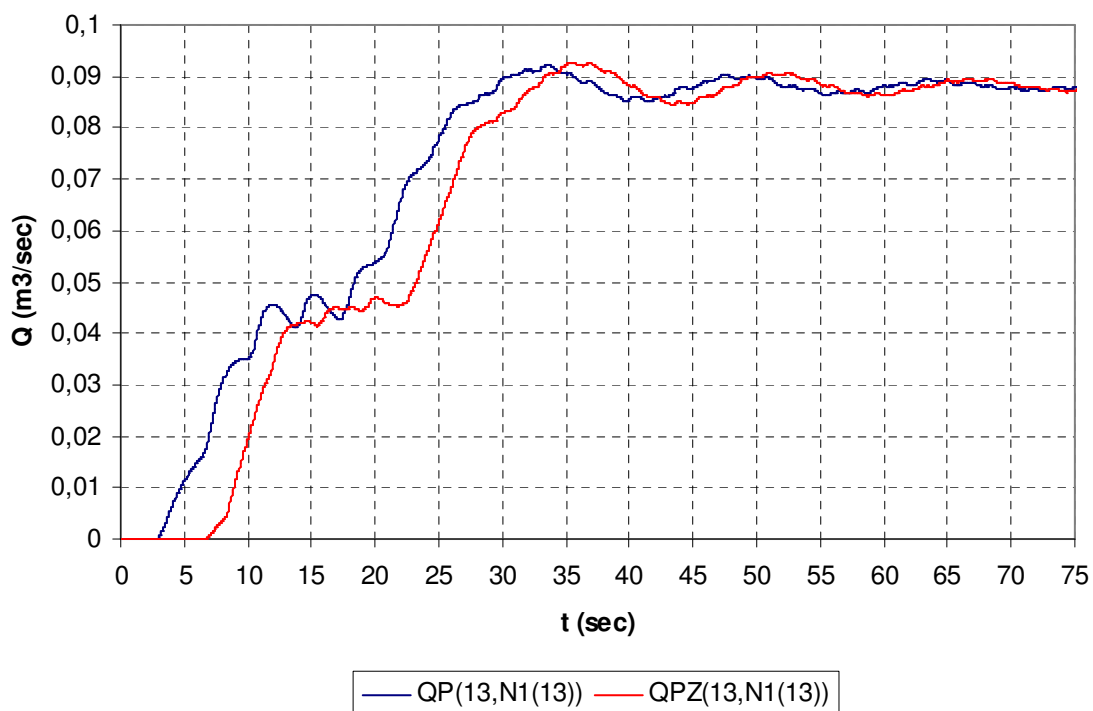
### Χρονική μεταβολή παροχής αντλιών



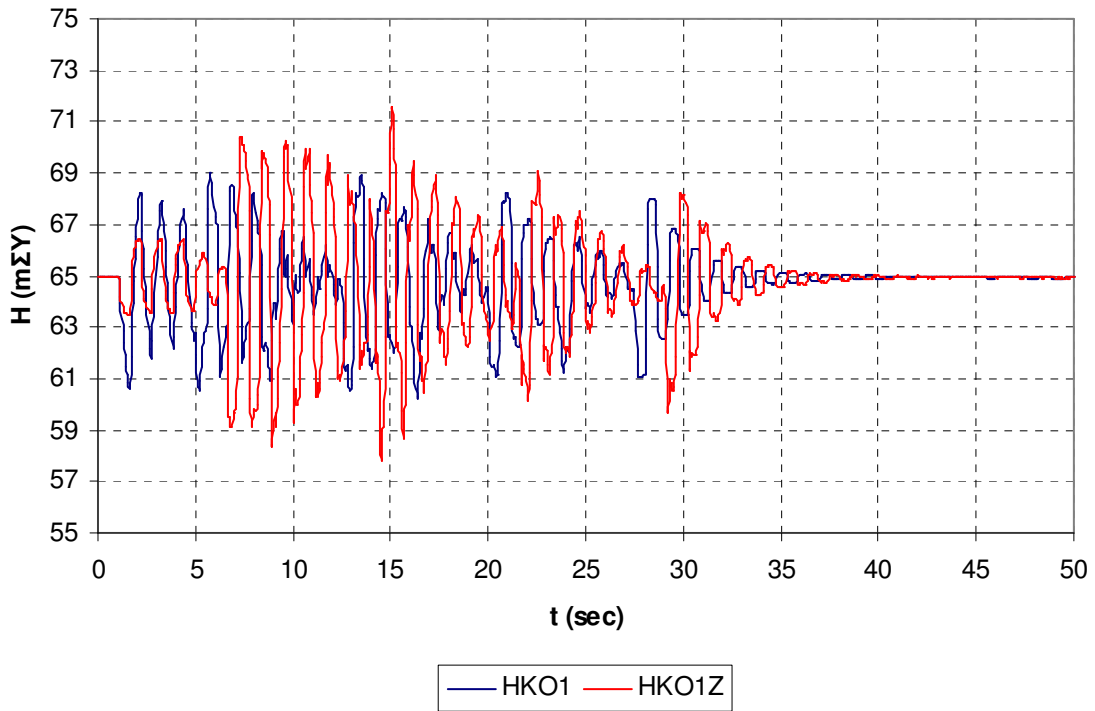
Χρονική μεταβολή παροχής - αγωγός 10



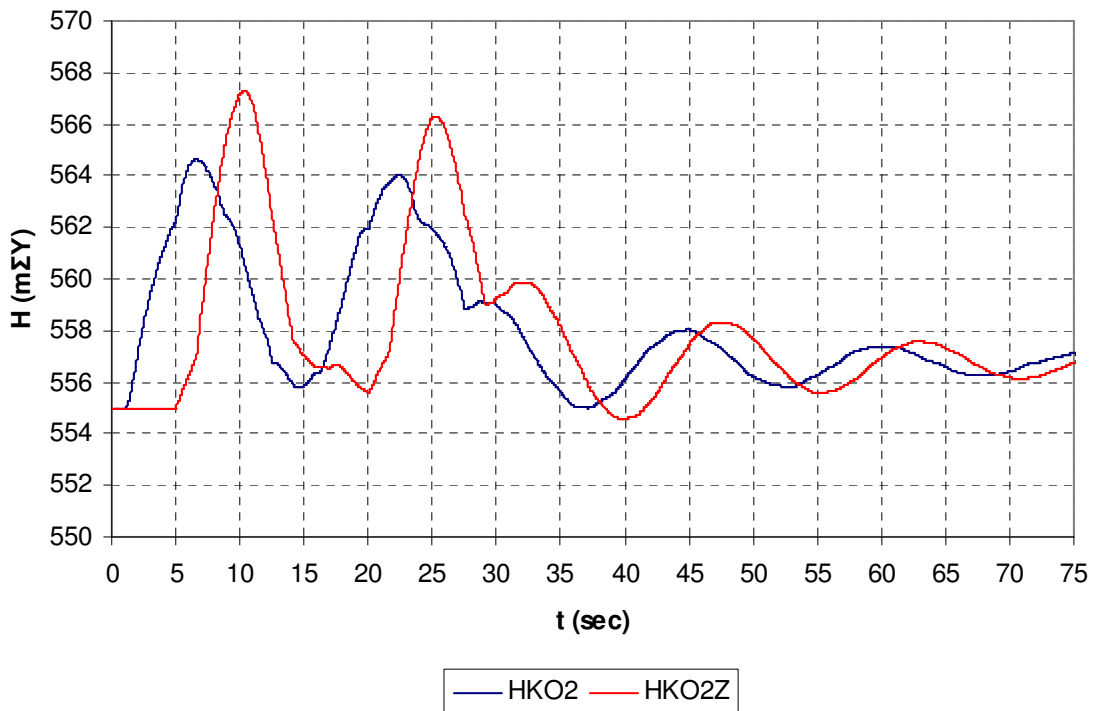
Χρονική μεταβολή παροχής - αγωγός 13



Χρονική μεταβολή ύψους - 1ος κόμβος



Χρονική μεταβολή ύψους - 2ος κόμβος



## Παρατηρήσεις

1<sup>ov</sup> : Όσον αφορά τις ροπές κινητήρων και αντλιών, την ταχύτητα και την παροχή των τελευταίων, βλέπουμε ότι για κάθε μία από τις 4+4 μηχανές ισχύουν όλα όσα αναφέραμε και στην περίπτωση της μιας αντλίας με βάνα στην κατάθλιψη.

2<sup>ov</sup> : Το μέγιστο απορροφόμενο ρεύμα από την εγκατάσταση είναι  $4,9256 \cdot I_N$  και σημειώνεται τη χρονική στιγμή  $t = 27,5078 \text{sec}$ , δηλαδή κατά τη μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  του τελευταίου κινητήρα. Αμέσως μετά αυτής, υπάρχει ένα διάστημα στο οποίο η τιμή του είναι μειωμένη ως και 3% σε σχέση με την περίπτωση χωρίς βάνες.

3<sup>ov</sup> : Η παροχή στον αγωγό κατάθλιψης, εμφανίζει μία μετάθεση προς τα αριστερά η οποία είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του αγωγού από την αντλία συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Παρουσιάζει μείωση του εύρους των διακυμάνσεών της.

4<sup>ov</sup> : Η πίεση στον κόμβο 1, εμφανίζει για μεγάλο χρονικό διάστημα μεγάλη διαφορά τιμής συγκριτικά με την αρχική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι συμπίπτουν σε μικρό χρονικό διάστημα πολλές μεταβολές (μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  & άνοιγμα της βάνας της 1<sup>ης</sup> αντλίας στα 5sec, εκκίνηση 2<sup>ης</sup> αντλίας στα 7,5sec). Επιπλέον εμφανίζονται 3 έντονες διακυμάνσεις. Αυτές οφείλονται στην μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  & άνοιγμα της βάνας της 2<sup>ης</sup> αντλίας ( $t = 12,5 \text{sec}$ ), στην μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  & άνοιγμα της βάνας της 3<sup>ης</sup> αντλίας ( $t = 20 \text{sec}$ ) και στην μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$  & το άνοιγμα της βάνας της 4<sup>ης</sup> αντλίας ( $t = 27,5 \text{sec}$ ). Ωστόσο οι διακυμάνσεις αυτές εξαιτίας των βανών, έχουν μία χρονική μετάθεση. Η μέγιστη υπερπίεση καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου είναι 9,95% τη χρονική στιγμή  $t = 15,0651 \text{sec}$  και μέγιστη τιμή υποπίεση 11,09% για  $t = 14,5418 \text{sec}$ . Και πάλι δηλαδή οι βάνες επιδρούν αρνητικά στη διακύμανση του ύψους. Μετά τα  $t = 35 \text{sec}$  έχουμε σχεδόν πλήρη εξάλειψη των διακυμάνσεων.

5<sup>ov</sup> : Η πίεση στον κόμβο 2 εκτελεί μία διαρκώς αποσβενόμενη ταλάντωση. Μέγιστη τιμή έχουμε για  $t = 10,3554 \text{sec}$  (+2,22% της αρχικής τιμής). Ελάχιστη τιμή για  $t = 39,6599 \text{sec}$  (-0,07% της αρχικής τιμής). Και πάλι δηλαδή έχουμε πιο έντονη μεταβολή του εύρους της ταλάντωσης σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βάνες.

6<sup>ov</sup> : Στο πέρας των 75sec οι τιμές των μεγεθών είναι :  
ταχύτητα περιστροφής κάθε αντλίας  $ALP = 0,9689$ , παροχή κάθε αντλίας  $VP = 0,9218$ ,  
ροπή  $BETPO = BETMO = 0,9466$  και ρεύμα τροφοδοσίας  $CURLIN = 3,1067$ .

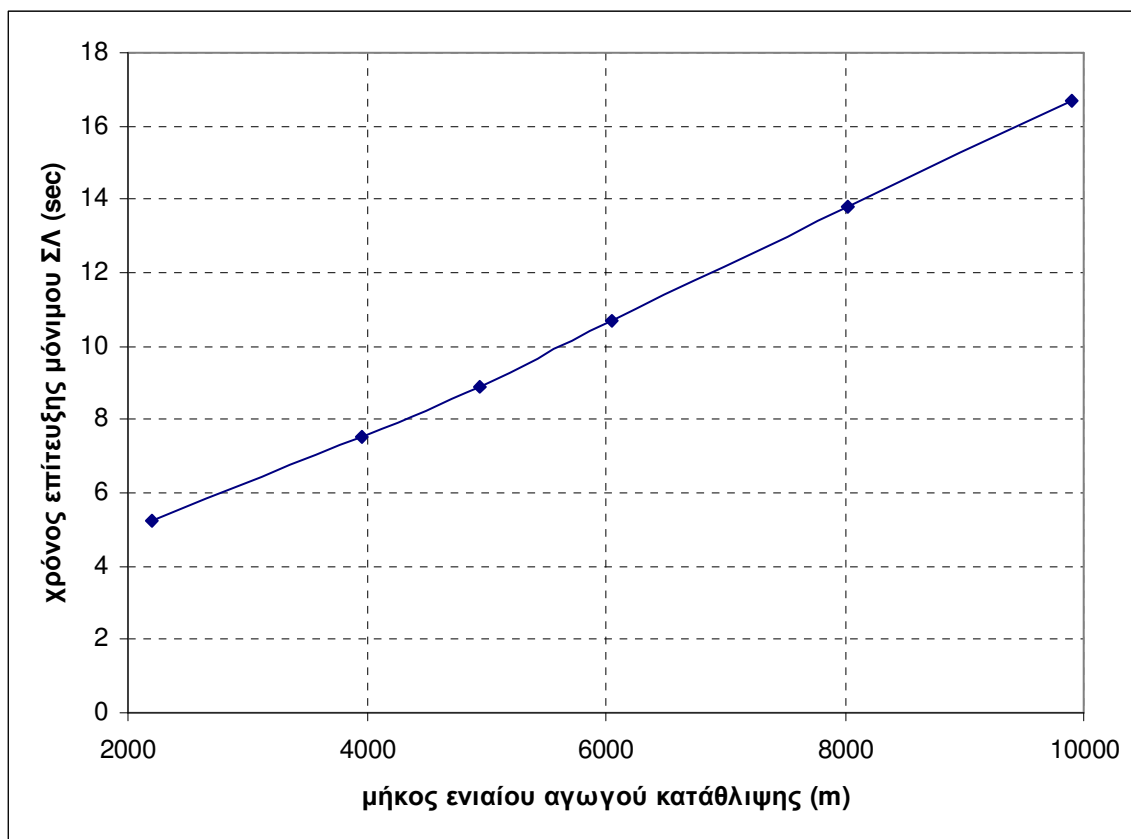
## **6.4 Διερεύνηση ανεξαρτησίας αποτελεσμάτων**

Προκειμένου να διερευνηθεί αν και κατά πόσο όλα τα προηγούμενα αποτελέσματα επηρεάζονται από το μήκος του αγωγού κατάθλιψης, διενεργήθηκε μια σειρά δοκιμών. Σε αυτές υποτέθηκε η χρήση μιας αντλίας, χωρίς βάνα στην κατάθλιψή της και χωρίς αεροφυλάκιο, ώστε να μην υπάρχει επίδραση καμίας διάταξης της σωλήνωσης ενώ μεταβαλλόταν κάθε φορά το μήκος του αγωγού. Ο κώδικας τροποποιήθηκε ελαφρά ώστε σε ένα αρχείο εισόδου να αποτυπώνεται ο χρόνος στον οποίο το σύστημα αντλίας – κινητήρα φθάνει στο μόνιμο σημείο λειτουργίας της. Ως παράμετρος της οποίας η μεταβολή εξετάστηκε προκρινόμενου να καθοριστεί ο χρόνος αυτός, επιλέχθηκε η αδιάστατη ταχύτητα περιστροφής της αντλίας  $ALP$ . Καθορίστηκε ότι η εγκατασταθεί λειτουργεί στο μόνιμο ΣΛ όταν η διαφορά η τιμή



της ταχύτητας περιστροφής διαφέρει κατά 0,001 από αυτή της μόνιμης κατάστασης. Επίσης τέθηκε όριο, ώστε ο χρόνος να είναι μεγαλύτερος των 5sec και να έχει γίνει η μεταβολή  $\Upsilon - \Delta$ . Προκειμένου να μην υπάρξει πρόβλημα στην εκτέλεση του κώδικα, μεταβλήθηκε ανάλογα και η μηκοτομή του αγωγού κατάθλιψης. Έτσι έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα :

| Μήκος (m) | Χρόνος (sec) |
|-----------|--------------|
| 2200      | 5,2388       |
| 3960      | 7,5064       |
| 4950      | 8,9018       |
| 6050      | 10,7043      |
| 8030      | 13,7859      |
| 9900      | 16,6931      |



Παρατηρούμε ότι η καμπύλη μήκους – χρόνου προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την ευθεία γραμμή. Επομένως τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, δεν εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη διαμόρφωση του αγωγού κατάθλιψης.

### 6.5 Προσομοίωση για σύγχρονο κινητήρα

Τέλος στα πλαίσια της εργασίας αυτής, εξετάστηκε και η περίπτωση αντικατάστασης του ασύγχρονου κινητήρα με σύγχρονο, λόγω της μεγάλης εφαρμογής που βρίσκει ο τύπος αυτός στα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα. Από τις διάφορες μεθόδους εκκίνησης, αυτή που επιλέχθηκε είναι η εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής

συχνότητας, μιας και αυτή χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε αυτές τις εφαρμογές.

Με βάση τα στοιχεία της αντλίας της εγκατάστασης βρέθηκε ότι η απαιτούμενη ισχύς

της είναι :  $N_{a,N} = \frac{\gamma H Q}{\eta} = \frac{1000 \cdot 495 \cdot 86}{0,785 \cdot 102 \cdot 3600} = 147,7 \text{ KW}$  . Θέτοντας και ένα συντελεστή

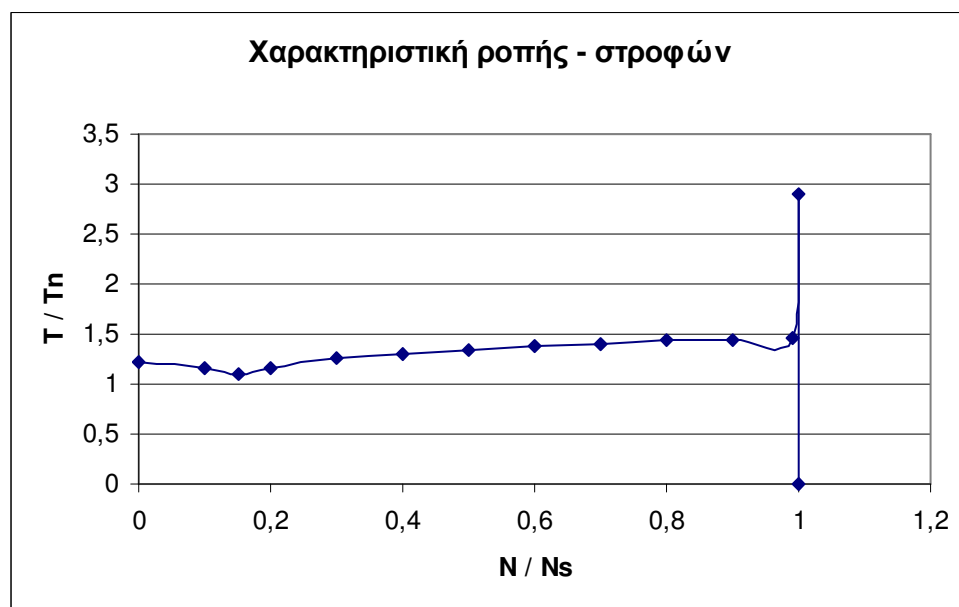
ασφαλείας 1,15 η απαιτούμενη ισχύς του κινητήρα θα είναι :  $1,15 \cdot N_{a,N} = 169,9 \text{ KW}$  .

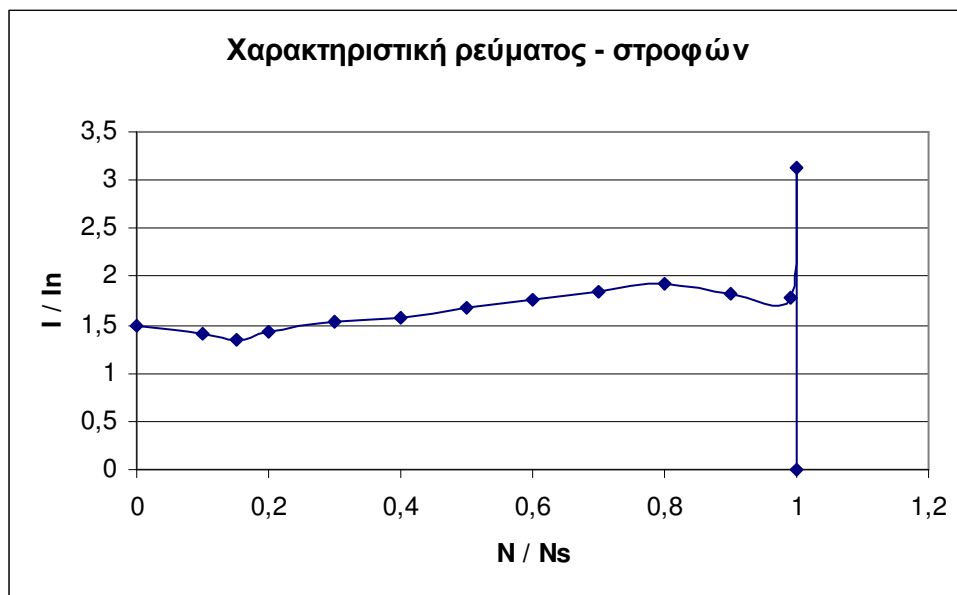
Ενδεικτικά επιλέγουμε τον κινητήρα MF18.3 της εταιρίας Oswald. Πρόκειται για σύγχρονο κινητήρα, μόνιμων μαγνητών και μεταβλητών στροφών. Αυτός έχει τα εξής στοιχεία :

|                |          |
|----------------|----------|
| $n_s$          | 3000 RPM |
| $N_N$          | 189,1 KW |
| $T_{PULL-OUT}$ | 2,983    |
| $I_{MAX}$      | 3,135    |

Λόγω έλλειψης δεδομένων για τις χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής και ρεύματος, δημιουργήθηκαν ενδεικτικές χαρακτηριστικές των μεγεθών αυτών για την εκκίνηση μεταβλητής συχνότητας με βάση αναφορές της βιβλιογραφίας (4, 14) – εικόνες 3.20α, 3.22.

| $n/n_s$ | $T/T_N$ | $I/I_N$ |  | $n/n_s$ | $T/T_N$ | $I/I_N$ |
|---------|---------|---------|--|---------|---------|---------|
| 0       | 1.23    | 1.5     |  | 0.6     | 1.39    | 1.77    |
| 0.1     | 1.16    | 1.415   |  | 0.7     | 1.41    | 1.845   |
| 0.15    | 1.1     | 1.34    |  | 0.8     | 1.434   | 1.92    |
| 0.2     | 1.17    | 1.425   |  | 0.9     | 1.45    | 1.815   |
| 0.3     | 1.26    | 1.535   |  | 0.995   | 1.46    | 1.777   |
| 0.4     | 1.3     | 1.58    |  | 1.0 max | 2.983   | 3.135   |
| 0.5     | 1.35    | 1.67    |  | 1.001   | 0.0     | 0.0     |





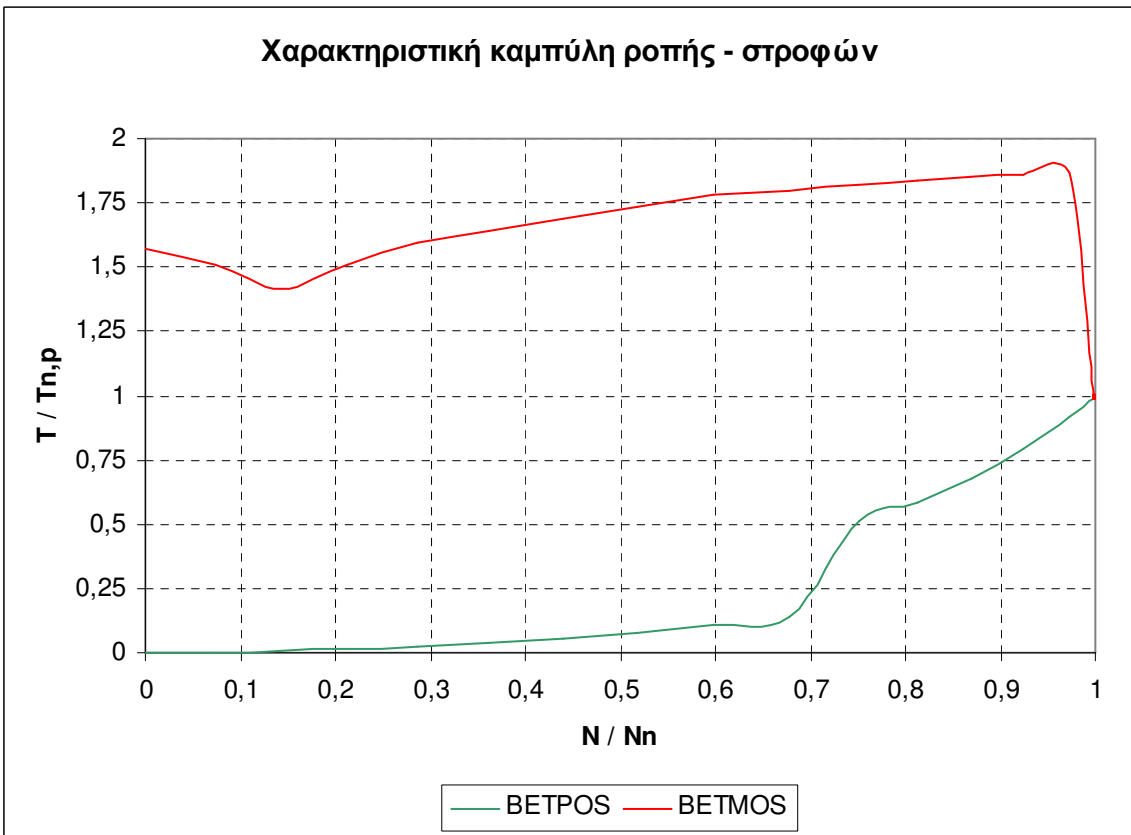
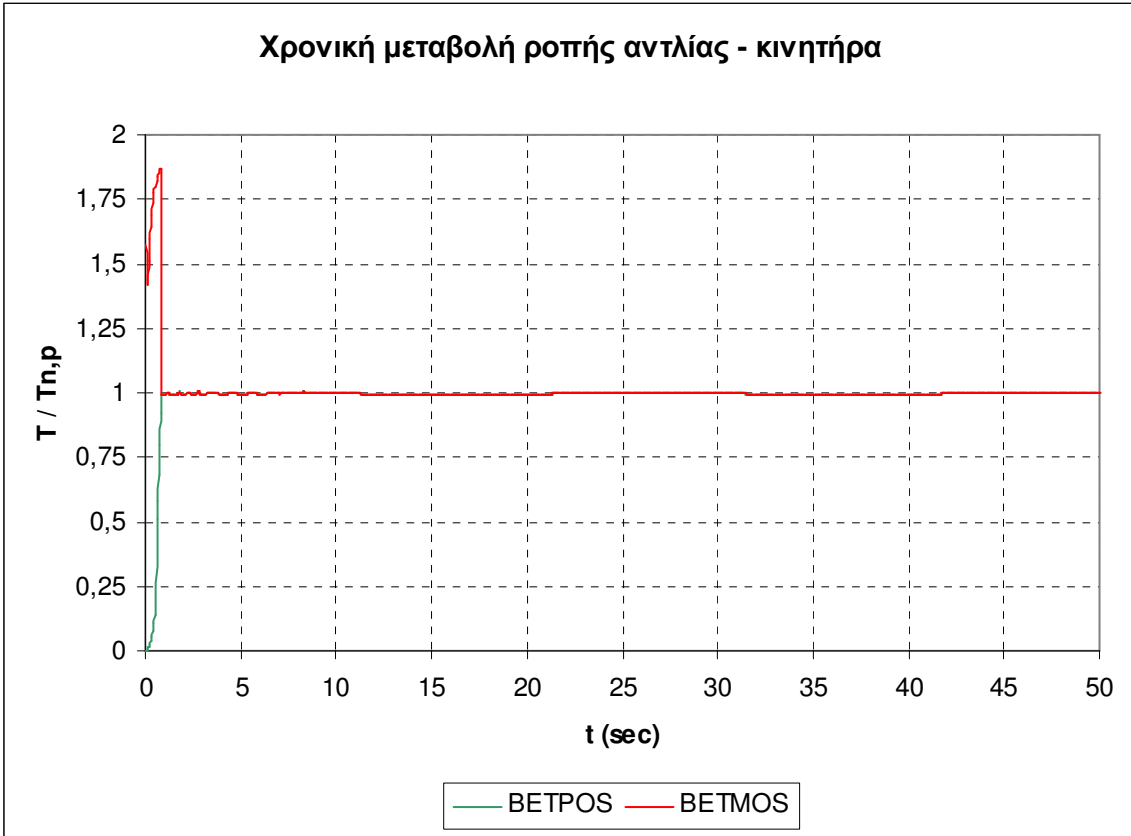
Για το αρχικό μόνιμο σημείο λειτουργίας ισχύει :

XRONIKO BHMATA DT(SEC)= 0.0058 TPER(SEC)= 1.5393

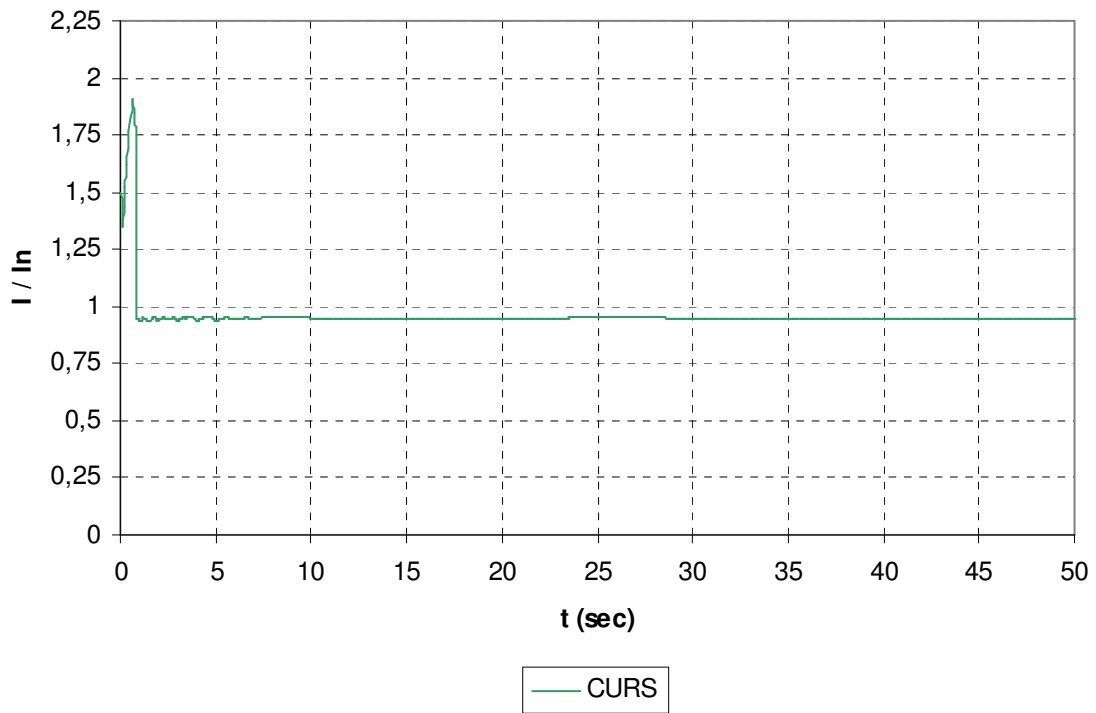
PLHTOS ANTLION 1 SE LEITΟΥYRGIA= 1  
 ARXIKH PAROXH ANTLIOSTASIOY (M3/H)= 0.0000  
 PAROXH MIAS ANTLIAS (M3/H)= 0.0000  
 ARXIKO OL. YPSOS ANTLIAS (MWG)= 0.0000  
 ARX. APOR. ISXYS ANNTLIAS (KW)= 0.0000

| J | Q(J,1) | Q(J,N1(J)) | H(J,1)   | H(J,N1(J)) |
|---|--------|------------|----------|------------|
| 1 | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 2 | 0.0000 | 0.0000     | 65.0000  | 65.0000    |
| 3 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 4 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 5 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 6 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |
| 7 | 0.0000 | 0.0000     | 555.0000 | 555.0000   |

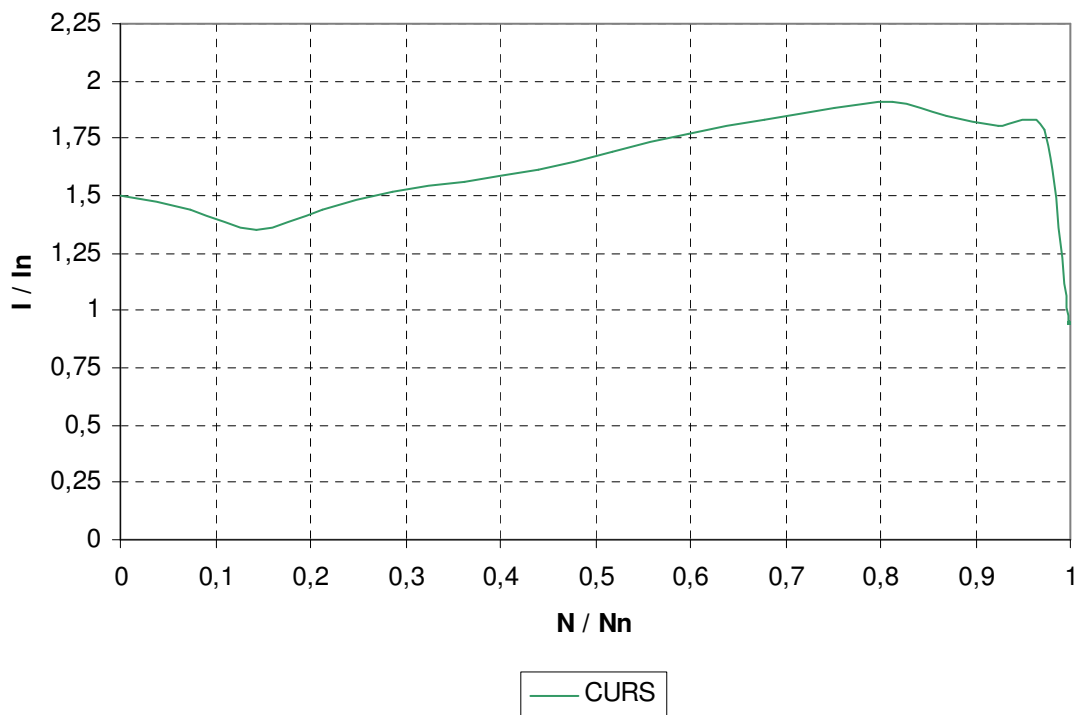
Τα διάφορα μεγέθη συμβολίζονται με το γράμμα S. Για τρέξιμο του κώδικα για 50sec, έχουμε τα εξής αποτελέσματα :

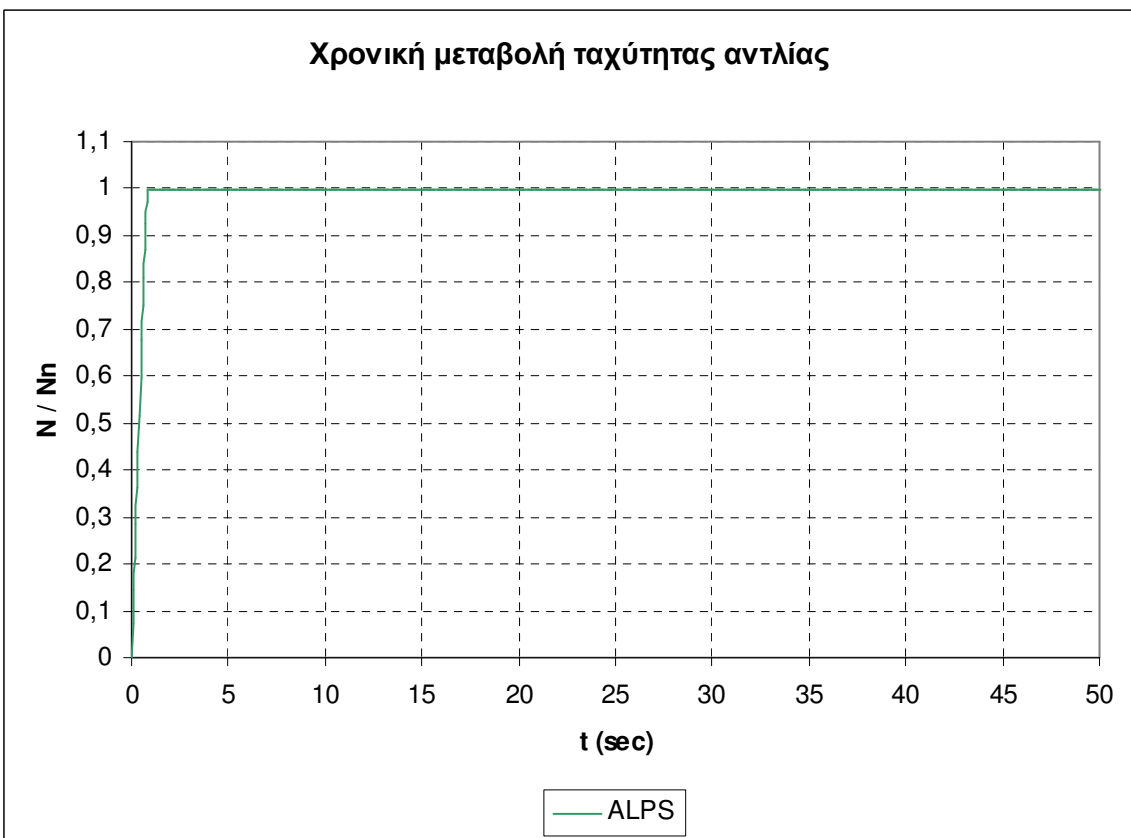
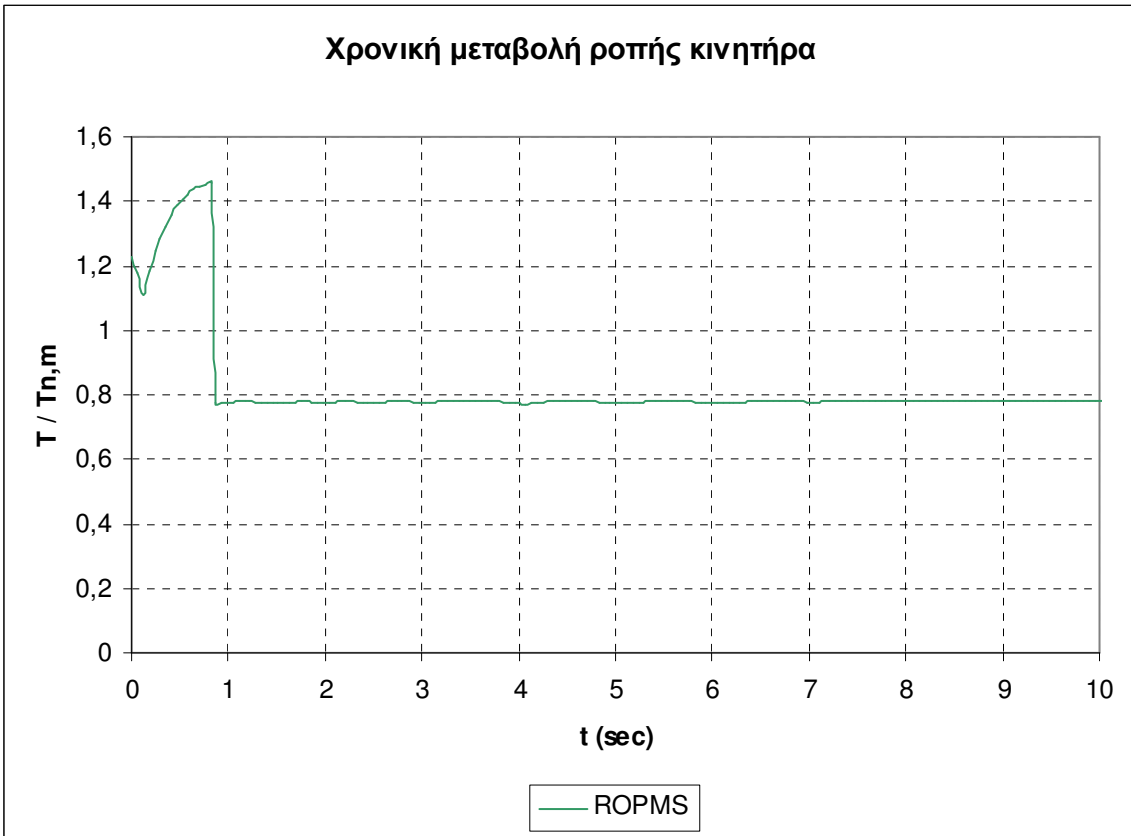


### Χρονική μεταβολή απορροφόμενου ρεύματος

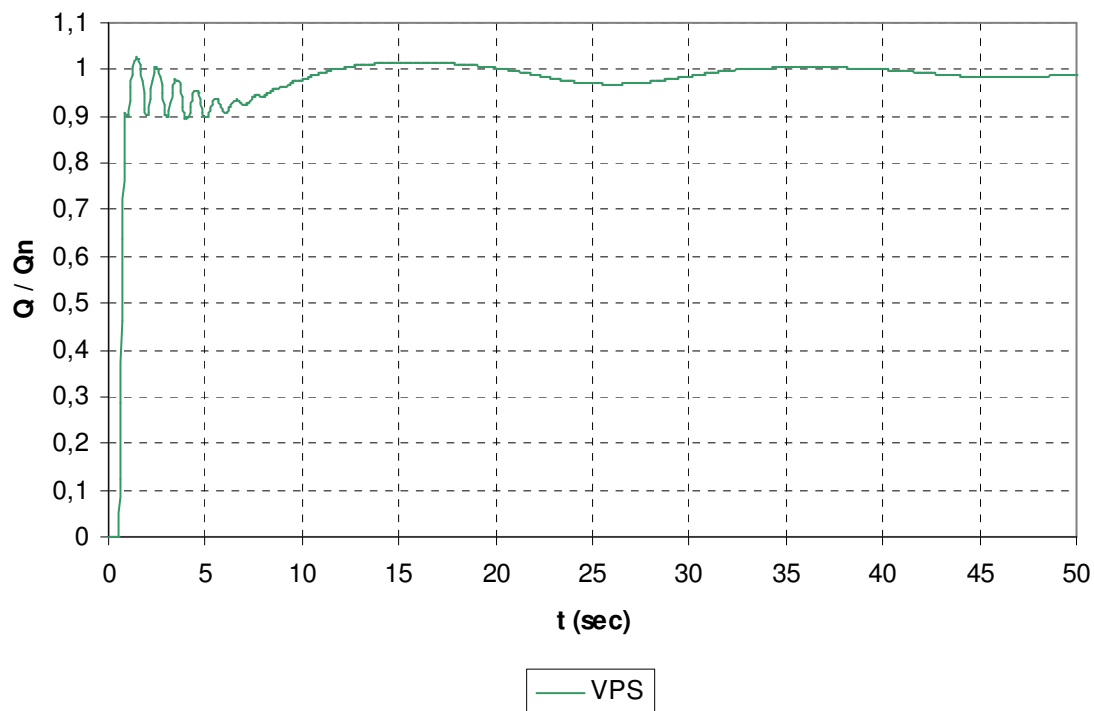


### Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - στρωφών

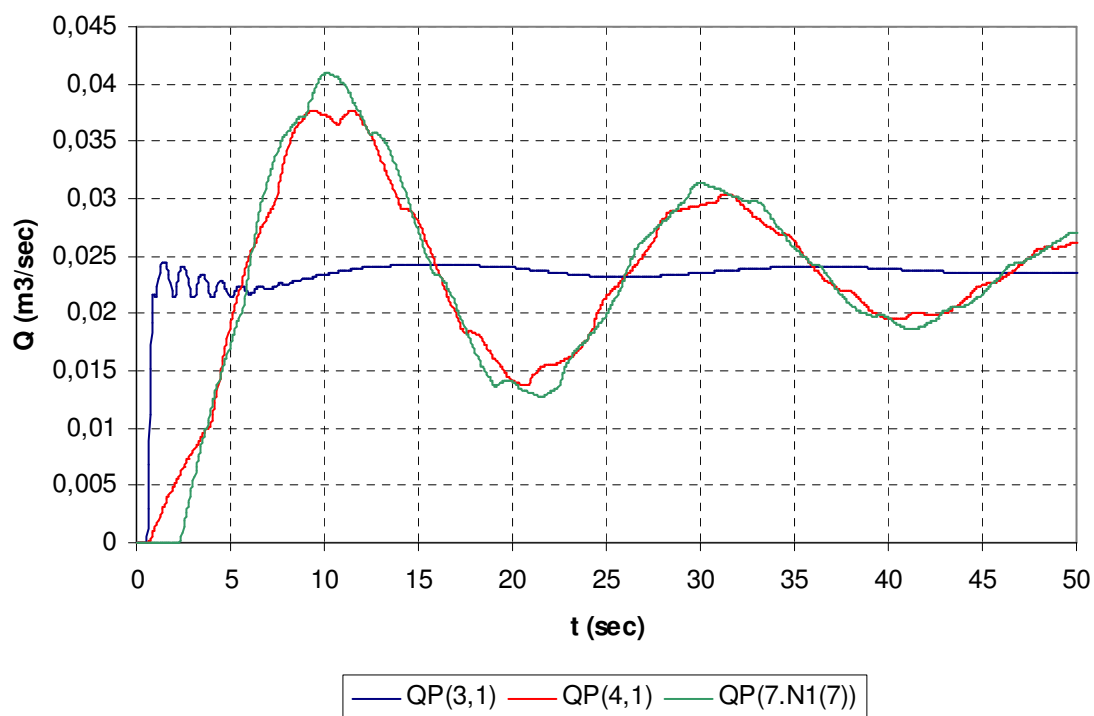




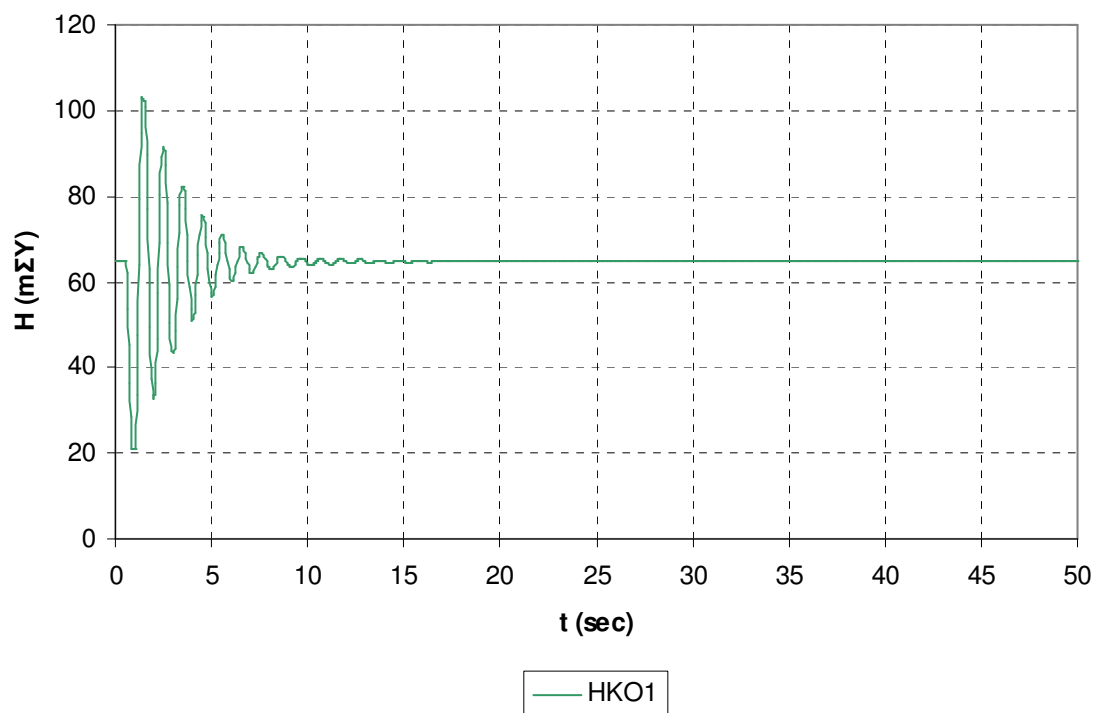
Χρονική μεταβολή παροχής αντλίας



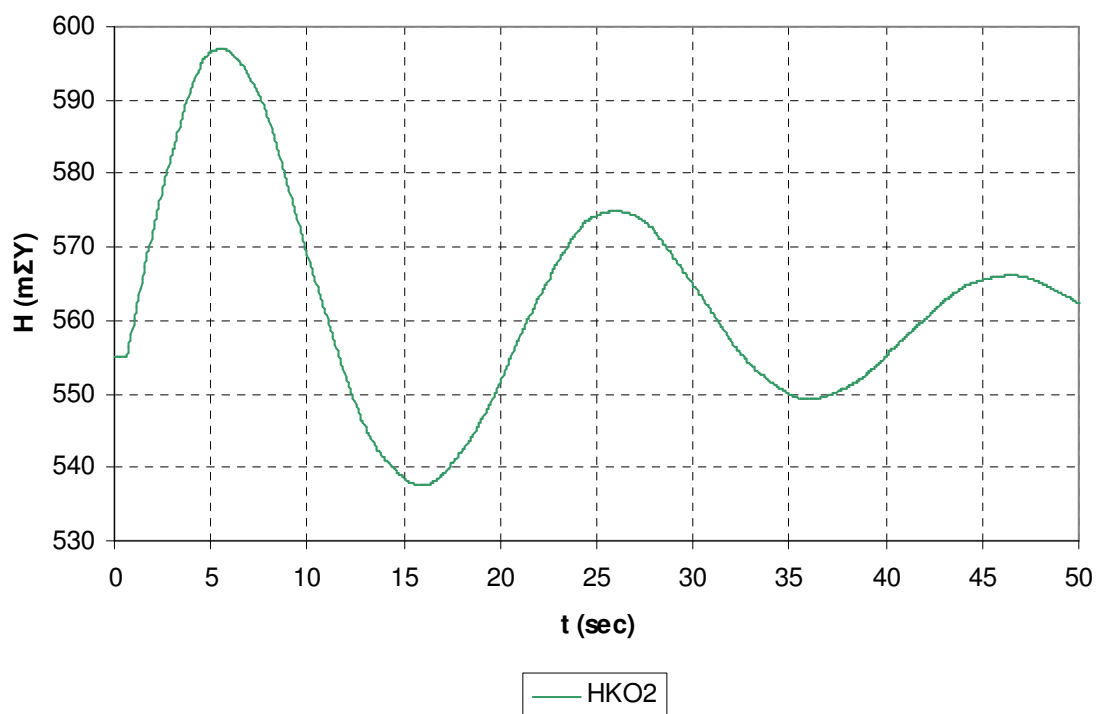
Χρονική μεταβολή παροχής



Χρονική μεταβολή ύψους - 1ος κόμβος



Χρονική μεταβολή ύψους - 2ος κόμβος





### Παρατηρήσεις

1<sup>ov</sup> : Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο σε σχέση με τη χρήση ασύγχρονης μηχανής. Συγκεκριμένα έχουμε στην εκκίνηση  $I_{ST} = 1,5 \cdot I_N$  (μείωση 18,92% συγκριτικά με την εκκίνηση αστέρα), ενώ το μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται καθ' όλη τη διάρκεια της εκκίνησης είναι  $I_{MAX} = 1,9072 \cdot I_N$  (μείωση 26,32%). Και για τις δύο περιπτώσεις η εκκίνηση με συνδεσμολογία τριγώνου έχει  $I_{MAX} = I_{ST} = 5,77 \cdot I_N$ .

2<sup>ov</sup> : Βλέπουμε ότι πολύ γρήγορα ( $t = 0,878 \text{sec}$ ) η αντλία και ο κινητήρας περιστρέφονται σε ισορροπία στη σύγχρονη ταχύτητα.

3<sup>ov</sup> : Το ύψος στον πρώτο κόμβο εκτελεί αποσβενόμενη ταλάντωση. Αυτή παρουσιάζει ελάχιστο (-67,74% της αρχικής τιμής) για  $t = 0,878 \text{sec}$ , μέγιστο (+58,43%) για  $t = 1,4013 \text{sec}$  και προφανώς οφείλονται στην εκκίνηση της αντλίας. Αξιοσημείωτο είναι το σημαντικά αυξημένο εύρος της διακύμανσης της πίεσης σε σχέση με την αρχική περίπτωση που εξετάστηκε.

4<sup>ov</sup> : Και στον δεύτερο κόμβο το ύψος παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή (+7,57% της αρχικής τιμής) για  $t = 5,5876 \text{sec}$ , μία ελάχιστη (-3,15%) για  $t = 15,9372 \text{sec}$  και η διακύμανσή των τιμών του σταδιακά εξομαλύνεται. Έχουμε εντονότερη διακύμανση συγκριτικά με τη χρήση ασύγχρονου κινητήρα.

5<sup>ov</sup> : Στο πέρας των 50sec οι τιμές των μεγεθών είναι : ταχύτητα περιστροφής της αντλίας  $ALP = 0,9978$ , παροχή αντλίας  $VP = 0,99$ , ροπή  $BETPO = BETMO = 0,997$  και ρεύμα  $CUR = 0,9477$ . Όπως ήταν αναμενόμενο, όλα τα στοιχεία είναι πολύ κοντά στα ονομαστικά.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Blair T., “3 phase AC motor starting methods : An analysis of reduced voltage starting characteristics”, Proceedings IEEE – SoutheastCon 2002, Columbia, SC, USA, p. 181-186
- 2) Chapman J., “Electric machinery fundamentals”, McGraw-Hill International Edition, 4<sup>th</sup> edition, New York, 2005
- 3) Das J.C. – Casey J., “Characteristics and analysis of starting of large synchronous motors”, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference – 1999 IEEE, Sparks, NV, USA
- 4) Finney D., “Variable frequency AC motor drive systems”, Peter Peregrinus Ltd, reprinted, London, 1991
- 5) Karassik I – Messina J. – Cooper P. – Heald C., “Pump Handbook”, McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> edition, New York, 2001
- 6) Krasil’nikov M.F – Krasil’nikov A.M., “Start-up system for pumping operation of the reversible units at the Dinorwig pumped-storage station”, Power Technology and Engineering, Vol. 21, No. 5, May 1987, p. 301-304
- 7) Μαθιουλάκης Δ. – Αναγνωστόπουλος Ι., “Βιομηχανική Ρευστομηχανική”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2004
- 8) Παπαδόπουλος Ε., “Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2000
- 9) Παπαντώνης Δ., “Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις”, εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1998
- 10) Παπαντώνης Δ., “Υδροδυναμικές Μηχανές : Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, εκδόσεις Συμεών”, 2<sup>η</sup> έκδοση, Αθήνα, 2002
- 11) Schaefer Richard, “Excitation control of the synchronous motor”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 3, May/June 1999, p. 694-702
- 12) Vokhmyanin V.M. – Kuleshov E.P. – Magruk V.I. – Rodionov V.G., “Methods of starting the reversible units of the Zagorsk pumped-storage station in a motor regime”, Power Technology and Engineering, Vol. 30, No. 4, April 1996, p. 208-210
- 13) Cummins Power Generation, “Application Manual – Liquid cooled generator sets”, 2004
- 14) Grundfos, “Grundfos Motor Book – Starting methods”, 2004
- 15) Oswald Elektromotoren GmbH, “Speed-controlled PM synchronous motors series MF water-cooled catalogue”, Version 0626