

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Applying Wireless Sensor
Networks in Industrial Plant
Monitoring**

Συγγραφέας

Γόντικας Γεώργιος

Επιβλέπων

*Καθ. Παύλος Σπυράκης
Χατζηγιαννάκης*

Συνεπιβλέπων

Δρ. Ιωάννης

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται μία διερεύνηση του χώρου του Industrial Plant Monitoring και μια προσπάθεια σύνδεσης του με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Σκοπός μας είναι η δημιουργία μιας εφαρμογής που θα μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη πρόταση στο χώρο του Toolware Monitoring και του Industrial Plant Monitoring. Η εφαρμογή μας βασίστηκε στο PrismaSense το οποίο είναι μια πλατφόρμα που σχεδιάστηκε με προσανατολισμό τέτοιου είδους εφαρμογές. Στην προσπάθεια αυτή συνεργάστηκα με τον συνάδελφο Ανδρέα Παπαγεωργίου και ως εκ τούτου οι δύο εργασίες είναι αλληλένδετες και θα πρέπει να μελετηθούν από κοινού για να έχει κάποιος μία συνολική αντίληψη του θέματος που πραγματευόμαστε. Αρχικά, διερευνούμε τα αίτια και τους παράγοντες φθοράς μιας tooling machine και ακολούθως προσδιορίζουμε ποιες μετρικές θεωρούμε αξιόπιστες για την πρόληψη ενός πιθανού break down. Στην συνέχεια, μελετούμε κάποια πρωτόκολλα επικοινωνίας και κάνουμε μία σε βάθος ανάλυση του πρωτοκόλλου ZigBee, το οποίο χρησιμοποιείται και από την πλατφόρμα που επιλέξαμε. Επειτα, προχωρούμε σε μία περιγραφή του υλικού και λογισμικού της πλατφόρμας PrismaSense και τέλος κάνουμε μία πρώτη ανάλυση της εφαρμογής μας η οποία αρκετά περιλαμβάνει την απλή αποστολή στον κεντρικό υπολογιστή των τιμών από το επιταχυνσιόμετρο του αισθητήρα και ακολούθως την υλοποίηση δύο αλγορίθμων (RMS και FFT) που καταλήξαμε μετά από μελέτη ότι θα μπορούσαν να συμβαλλουν στην καλύτερη πρόληψη αστοχιών της μηχανής.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Πάυλο Σπυράκη. Ιδιαίτέρως τον καθηγητή μας κ. Ιωάννη Χατζιγιαννάκη για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μας καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και χρήσιμες συμβουλές του. Την Prisma Electronics ABEE η οποία μας παρείχε το απαραίτητο υλικό και λογισμικό, καθώς και τον κ. Κάτσικα προσωπικά αλλά και τους συνεργάτες του για τη βοήθεια, το υλικό και τον πολύτιμο χρόνο που μας διέθεσαν. Το φίλο και συνάδελφο Ανδέα Παπαγεωργίου με τον οποίο είχα τη τύχη να συνεργαστώ για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, προϊόν συνεργασίας με τον οποίον αποτελεί όλη η ιδέα, μελέτη και υλοποίηση της εφαρμογής.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	4
1.1 Κίνητρο και σημασία του θέματος	
1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας	
1.3 Συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας	
1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας	
2. Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs) και εφαρμογές	
2.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	
2.2 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	
3. Πρωτόκολλα επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	
3.1 WiFi	

3.2 Bluetooth

3.3 ZigBee

3.3.1 Πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου

3.3.2 Τοπολογίες Δικτύων

3.3.3 Τα επίπεδα του πρωτοκόλλου

3.3.3.1 Physical Layer

3.3.3.2 MAC Layer

3.3.3.3 Network Layer

3.3.3.4 Application Layer

3.3.4 Τύποι Συσκευών

3.3.5 Χαρακτηριστικά Καναλιών και διαμόρφωσης

3.3.6 Πρόσβαση στο Κανάλι

3.3.7 Συχνότητες Λειτουργίας

3.3.8 Ισχύς Εκπομπής και Ακτίνα Δράσης

3.3.9 Δυνατότητες Δικτύων

4. **Predictive Maintenance και Preventive Maintenance**

5. **Toolware Monitoring**

5.1 Σύντομη Περιγραφή

5.2 Ορολογία Διαδικασιών Κοπής – Κοπτικών Εργαλείων

5.3 Τύποι φθοράς Κοπτικών Εργαλείων

- 5.4 Παράμετροι Παρακολούθησης της φθοράς
- 5.5 Τεχνικές Ανάλυσης Σημάτων
- 5.6 Ανάλυση στο Πεδίο του Χρόνου
- 5.7 Ανάλυση στο Πεδίο των συχνοτήτων (FFT)
- 5.8 Άλλες Μέθοδοι Ανάλυσης
- 5.9 Σύστημα διάγνωσης – πρόγνωσης Φθοράς
- 5.10 Σύστημα Προκαθορισμένων Ορίων / Κανόνων
- 5.11 Συστήματα Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Systems)
- 5.12 Εμπειρα Συστήματα
- 5.13 Νευρωνικά Δίκτυα
- 5.14 Συμπεράσματα

6. PrismaSense Platform

- 6.1 Τι είναι το PrismaSense
- 6.2 Hardware
- 6.3 Software

7. Η εφαρμογή μας

8. Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

- 8.1 Συμπεράσματα
- 8.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και σημασία του θέματος

Έναν κύριο ρόλο στην βιομηχανία έχουν οι tooling machines (μηχανές κοπής/διαμόρφωσης μεταλλικών εξαρτημάτων, τόρνοι, διατρητικές μηχανές). Τέτοιου είδους μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλους τους τομείς της μεταλλουργίας και κατασκευής διαφόρων εξαρτημάτων. Σήμερα υπάρχουν πολλών ειδών μηχανές του είδους προσαρμοσμένες στις ανάγκες της εκάστοτε γραμμής παραγωγής. Οι περισσότερες νέες μηχανές διαθέτουν υπολογιστικές μονάδες και αισθητήρες για τον έλεγχο της λειτουργίας της μηχανής. Ωστόσο δεν υπάρχουν διαθέσιμα συστήματα για την επιτήρηση της κατάστασης της μηχανής. Μάλιστα το πρόβλημα αυτό εντείνεται όταν αναλογιστούμε ότι σε μία γραμμή παραγωγής μπορούν να υπάρχουν διάφοροι τύποι μηχανών με το δικό της σύστημα ελέγχου η κάθε μία.

Η σωστή λειτουργία της μηχανής και των εξαρτημάτων αυτής, είναι βασική παράμετρος για την σωστή παραγωγή των υπό διαμόρφωση εξαρτημάτων. Λόγω της μεγάλης καταπόνησης των κοπτικών εργαλείων, επέρχονται αλλοιώσεις στην επιφάνεια αυτών,

οι οποίες αλλοιώσεις επιφέρουν παραμορφώσεις στο παραγόμενο εξάρτημα.

Η αλλαγή των κοπτικών εργαλείων γίνεται συνήθως περιοδικά, γίνεται δηλαδή αντικατάσταση αυτών προληπτικά, χωρίς να έχει αναγκαστικά παρατηρηθεί φθορά στο κοπτικό εργαλείο σε τέτοιο βαθμό ώστε να είναι απαραίτητη η αλλαγή του. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό η απρόσκοπτη λειτουργία της μηχανής μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη αλλαγή. Το μοντέλο της προληπτικής αλλαγής όμως έχει αρκετά μειονεκτήματα. Πρώτα από όλα, με αυτόν τον τρόπο, δεν εξασφαλίζεται ότι κάποια στιγμή είτε λόγω αστοχίας του κοπτικού εργαλείου είτε λόγω της διαδικασίας κοπής δεν θα παρουσιαστεί θραύση αυτού, φαινόμενο το οποίο δεν θεωρείται σπάνιο, με αποτέλεσμα την διακοπή λειτουργίας της μηχανής. Αποτελέσματα της διακοπής αυτής είναι πρώτον οικονομικές απώλειες λόγω διακοπής της διαδικασίας παραγωγής, δεύτερον η απώλεια του υπό διαμόρφωση εξαρτήματος που την ώρα της διακοπής ήταν στην μηχανή και τρίτον η πιθανή βλάβη κάποιου επιπλέον μέρους της μηχανής πέραν αυτού καθαυτού του κοπτικού εργαλείου. Η τρίτη πιθανή απώλεια είναι και η χείριστη, η οποία μπορεί να είναι σχετικά σπάνια, αν όμως συμβεί οδηγεί και σε μεγάλη διάρκεια διακοπής της παραγωγής, αφού ο χρόνος που θα χρειαστεί για την επισκευή, πέραν του χρόνου αντικατάστασης του ανταλλακτικού πιθανότατα θα περιλαμβάνει και χρόνο αναμονής για την προμήθεια των κατάλληλων ανταλλακτικών. Επίσης με την προληπτική αλλαγή των κοπτικών εργαλείων το κόστος παραγωγής αυξάνεται σημαντικά, αφού και τα εξαρτήματα αυτά αντικαθιστώνται πριν ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους, αλλά και η λειτουργία

διακόπτεται περισσότερες φορές από ότι είναι αναγκαίο. Επίσης στις περισσότερες περιπτώσεις η διάγνωση βλαβών, αλλά και η απόφαση για αντικατάσταση των κοπτικών εργαλείων επαφίεται σε κατάλληλους ανθρώπους που ασχολούνται με την συγκεκριμένη εργασία. Η συμμετοχή όμως του ανθρώπινου παράγοντα σε τέτοιου είδους αποφάσεις πολλές φορές δημιουργεί προβλήματα.

Βλέπουμε ότι η ανάγκη για την ύπαρξη ενός συστήματος παρακολούθησης της κατάστασης της μηχανής και της έγκαιρης διάγνωσης μίας λανθάνουσας κατάστασης είναι αναγκαία και άμεση απαίτηση της βιομηχανίας και τα αποτελέσματα αυτού, από οικονομικής και όχι μόνο άποψης, είναι εύκολα μετρήσιμα.

1.2 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Στόχος μας είναι αρχικά η διερευνήση της περιοχής του industrial plant monitoring και σύνδεσής του με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Επειτα θα μελετήσουμε την ανάπτυξη ενός συστήματος μέσω της πλατφόρμας PrismaSense το οποίο θα μπορεί να προσαρμόζεται εύκολα σε μία tooling machine και θα περιλαμβάνει μία σειρά έξυπνων αισθητήρων, οι οποίοι θα μετρούν κατάλληλες παραμέτρους και με την ανάλογη επεξεργασία τους θα είναι σε θέση να αποφαινούνται αυτόματα για την κατάσταση των κύριων εξαρτημάτων της μηχανής όπως και για την ομαλή λειτουργία αυτής. Αυτοί οι έξυπνοι αισθητήρες θα διαθέτουν μηχανισμό εκμάθησης, ώστε η παραμετροποίηση τους να είναι η ελάχιστη δυνατή. Τα δεδομένα και οι αποφάσεις θα αποστέλλονται σε έναν κεντρικό ελεγκτή, ο οποίος θα τα αποστέλλει σε μία βάση δεδομένων. Επίσης, θα αναπτύξουμε αλγόριθμους επεξεργασίας

των δεδομένων και χρήσης ιστορικών στοιχείων για την αυτόματη διάγνωση εσφαλμένων καταστάσεων.

1.3 Συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας

Η ανάπτυξη του παραπάνω συστήματος θα μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη πρόταση στο χώρο του Industrial Plant Monitoring καθώς και έναυσμα για την περαιτέρω διερεύνηση του χώρου. Η εγκατάσταση του συστήματος σε μία γραμμή παραγωγής θα μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλά οφέλη για τη βιομηχανία, κυρίως οικονομικά, καθώς και να προσδώσει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ασφάλεια στην παραγωγική διαδικασία.

1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Αρχικά θα κάνουμε μία αναφορά στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (WSNs) και στον τρόπο που αυτά θα μπορέσουν να μας βοηθήσουν στην εφαρμογή μας. Επειτα θα αναφέρουμε τα διαθέσιμα πρωτόκολλα επικοινωνίας και θα ακολουθήσει μία εκτενής αναφορά και μελέτη στο πρωτόκολλο ZigBee και στα πλεονεκτήματά του τα οποία μας οδήγησαν στην επιλογή του. Υστερα θα διερευνήσουμε τους όρους Predictive και Preventive Maintenance, οι οποίοι αποτελούν δύο μείζονος σημασίας στρατηγικές που ακολουθούνται από τις βιομηχανίες στο χώρο του Industrial Plant Monitoring. Ακολουθεί μία εκτενής αναφορά στο

χώρο του Toolware Monitoring, στο οποίο θα αναφέρουμε αναλυτικά τους τύπους και τις παραμέτρους παρακολούθησης φθοράς των Tooling Machines, τεχνικές ανάλυσης σημάτων και συστήματα διάγνωσης/πρόγνωσης φθοράς. Επίσης θα αναφέρουμε τεχνικές ανάλυσης σημάτων στο πεδίο της συχνότητας καθώς και τρόποι αντιμετώπισης με συστήματα ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Systems) και Νευρωνικά Δίκτυα. Επειτα, θα παρουσιάσουμε το PrismaSense, την πλατφόρμα πάνω στην οποία αναπτύξαμε το σύστημα μας. Τελός, θα ακολουθήσει μία παρουσίαση της εφαρμογής μας η οποία περιλαμβάνει και την υλοποίηση δύο αλγορίθμων σε C (RMS και FFT) οι οποίοι μετά από ανάλυση που κάναμε, κρίναμε ότι θα μας βοηθήσουν να βγάλουμε χρήσιμα συμπερίσματα για την αποδοτική λειτουργία της εφαρμογής μας.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μας θερμά τον καθηγητή μας κ. Χατζιγιαννάκη για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μας καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και χρήσιμες συμβουλές του. Την Prisma Electronics ABEE η οποία μας παρείχε το απαραίτητο υλικό και

λογισμικό, καθώς και τον κ. Κάτσικα προσωπικά αλλά και τους συνεργάτες του για τη βοήθεια, το υλικό και τον πολύτιμο χρόνο που μας διέθεσαν. Το φίλο και συνάδελφο Ανδέα Παπαγεωργίου με τον οποίο είχα τη τύχη να συνεργαστώ για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, προϊόν συνεργασίας με τον οποίον αποτελεί όλη η ιδέα, μελέτη και υλοποίηση της εφαρμογής.

Κεφάλαιο 2

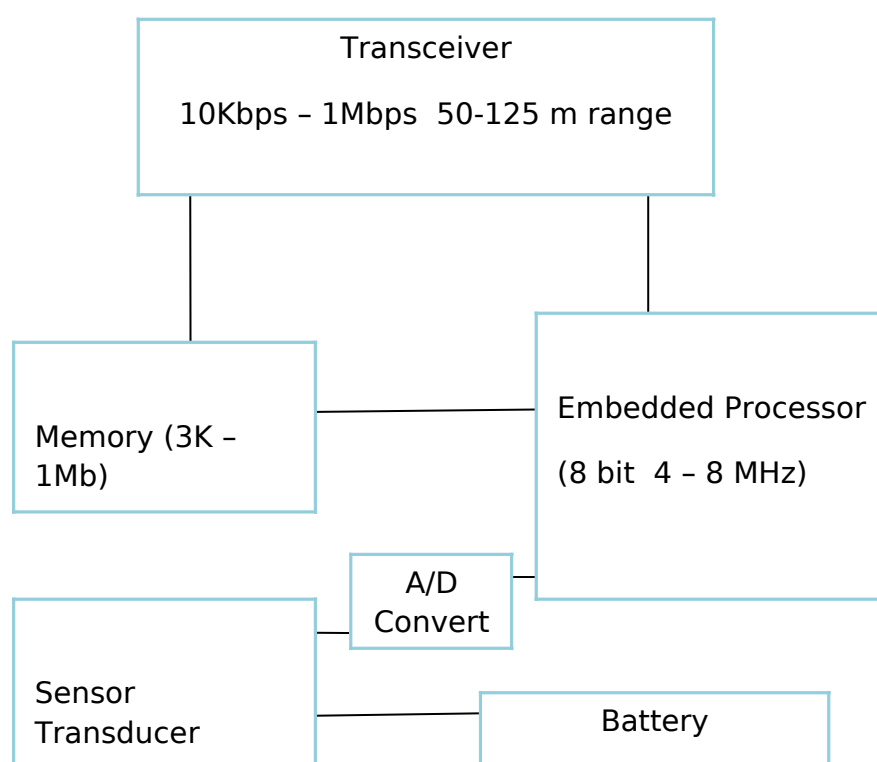
Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα τελευταία χρόνια η πρόοδος που σημειώθηκε στην κατασκευή απλών μικρών κυκλωμάτων χαμηλής κατανάλωσης με χαμηλό κόστος οδήγησε σε ένα νέο τεχνολογικό επιτευγμα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs). Τα δίκτυα αυτά συνδιάζουν ασύρματη επικοινωνία και δυνατότητες υπολογισμού με αισθητήρες φυσικών φαινομένων που μπορούν πολύ εύκολα να ενσωματωθούν στο φυσικό περιβάλλον. Το μέγεθος ενός αισθητήρα είναι μερικά κυβικά χιλιοστά και η επιθυμητή τιμή λιγότερο από ένα δολάριο συμπεριλαμβανομένου του μικροελεγκτή, του module επικοινωνίας, της τροφοδοσίας και του ίδιου του αισθητήρα. Όλες αυτές οι συσκευές βρίσκονται τοποθετημένες στην ίδια συσκευή και αποτελούν έναν κόμβο (node).

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν μία ειδική μορφή ad hoc δικτύων με μειωμένη έως καθόλου κινητικότητα, αναμένεται να βρουν πρόσφορο έδαφος ανάπτυξης τα επόμενα χρόνια αφού αποτελούν ένα αξιόπιστο περιβάλλον μέτρησης και ανάλυσης περιβαλλοντικών μεγεθών. Τα δίκτυα αυτά είναι “data centric” (λειτουργούν με επίκεντρο τα δεδομένα), δηλαδή σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ad hoc δίκτυα όπου δεδομένα λαμβάνονται από συγκεκριμένο κόμβο, τα δεδομένα λαμβάνονται σύμφωνα με κάποιες ιδιότητες, για παράδειγμα «σε ποια περιοχή η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 30°». Επομένως, απαιτείται μεγάλος αριθμός αισθητήρων για να μπορέσουμε να έχουμε αξιόπιστες τιμές συγκεκριμένων ιδιοτήτων σε μία περιοχή.

Ενας τυπικός αισθητήρας αποτελείται από έναν ασύρματο πομποδέκτη για να μπορεί να λαμβάνει και να στέλνει δεδομένα,

έναν ενσωματωμένο επεξεργαστή, μία μικρή μονάδα μνήμης και τον αισθητήρα μέτρησης του φυσικού μεγέθους που επιθυμούμε. Όλα τα παραπάνω τροφοδοτούνται από μία ενσωματωμένη μπαταρία. Παρακάτω φαίνεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός τυπικού αισθητήρα.



Πρέπει να σημειωθεί ότι οι προδιαγραφές που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τη εφαρμογή. Επίσης, όσον αφορά τους αισθητήρες, υπάρχει μια τεράστια ποικιλία διαθέσιμων transducers για μετρήσεις φυσικών μεγεθών, όπως για παράδειγμα θερμοκρασίας, πίεσης, ταχύτητας, επιτάχυνσης, ήχου, υγρασίας, φωτινότητας, αερίων, ρύπανσης, ραδιενέργειας, πίεσης στο αίμα, επιπέδου ζαχάρου στο αίμα και πολλά άλλα.

Σύγκριση Sensor Nodes

Sensor Node	CPU	Power	Memory	I/O	Trans Rate	Radio	Trans Range
Special-purpose sensor nodes							
Spec 2003	4-8 MHz	3mW(peak) 3μW(idle)	3K RAM	8-bit onchip ADC	50-100 kbps		40 feet (indoors)
Generic Sensor nodes							
Rene 1999	ATMEL 8535	60 mW(active) 0.036 mW(sleep)	8 K flash 32 K EEPro m	Large expansion connector	10 kbps	916 MHz	Up to 100 feet
Mica-2 2001	ATMEGA 128	60 mW(active) 0.036 mW(sleep)	128 K flash 4 K RAM	Large expansion connector	76 kbps	433 MHz	100 meters
Telos 2004	Motorola HCS08	32 mW(active) 0.001 mW(sleep)	4 K RAM	USB and ethernet	250 kbps	2.4 GHz IEEE 802.15.4	50m(indoors) 125m (outdoors)
Mica-Z 2004	ATMEGA 128		4 K RAM 128 K flash	Expansion connector	250 kbps	2.4 GHz IEEE 802.15.4	30m (indoors) 100m (outdoors)
iB53 24					250 kbps	2.4 GHz	30 meters
Rockwell WINS	Intel Strong Arm SA 1100		1MB SRAM 4 MB flash			900 MHz	
High Bandwidth sensor nodes							
BT node 2001	Atmel Mega 128L 7.328 MHz	50 mW (idle) 285mW (active)	128 KB flash 4 KB EEPro	8 channel 10 bit A/D 2 UARTS	Bluetooth	433-915 MHz	

			m 4 KB SRAM	Expanda ble connecto rs			
Imote 1.0 2003	ARM 7TDMI 12-48 MHz	1 mW (idle) 120mW (active)	64 KB SRAM 512 KB flash	UART,USB,GPIO,I2C,SPI	bluetooth		
Gateway Nodes							
Stargate 2003	Intel PXA255		64 KB SRAM	2 PCMCIA/CF, com ports, Ethernet, usb		Serial connect ion to sensor network	
Inrsync Cerfcube 2003	Intel PXA255		32 KB flash 64 KB SRAM	Single cf card, genral IO			
PC104 nodes	X86 proces sor		32 KB flash 64 KB SRAM	PCI BUS			

Εφαρμογές

Οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ποικίλουν και συνήθως εμπλέκουν κάποιου είδους παρακολούθηση, ανίχνευση ή έλεγχο. Κάποιες εφαρμογές αφορούν παρακολούθηση κατοικίας, ανίχνευση αντικειμένου, έλεγχο πυρινικού αντιδραστήρα, ανίχνευση φωτιάς, και διαχείριση κίνησης στο δρόμο.

Area Monitoring

Πρόκειται για μία σχετικά απλή εφαρμογή των WSNs, όπου τα δίκτυο δημιουργείται πάνω από την περιοχή στην οποία θέλουμε να παρακολουθήσουμε κάποιο φαινόμενο. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων για την ανίχνευση στρατιωτικής εισβολής σε ένα πεδίο μάχης. Όταν

κάποιος αισθητήρας ανιχνεύσει κάποια αλλαγή που θα πυροδοτούσε κάποιο event (θερμότητα, πίεση, ήχος, φώς, ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, δόνηση κλπ), το event αυτό πρέπει να αναφερθεί με κάποιο τρόπο στον κεντρικό σταθμό. Ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να απαιτούνται διαφορετικές τεχνικές διάδοσης δεδομένων, μικρότερη ναχή σε σφάλματα, μεγαλύτερη ασφάλεια κλπ.

Environmental Monitoring

Συστήματα όπως το PermaSense Project, PermaSense Online Data Viewer και glacier monitoring έχουν αναπτυχθεί για την παρακολούθηση της κατάστασης των παγετώνων στις ελβετικές Άλπεις.

Machine Health Monitoring ή Condition Based Maintenance

Έχουν αναπτυχθεί ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με στόχο το λεγόμενο CBM (Condition Based Maintenance), τα οποία προσφέρουν σαφή πλεονεκτήματα μείωσης κόστους καθώς και προσδίνουν μεγαλύτερη λειτουργικότητα στο σύστημα. Δίνουν τη δυνατότητα πρόσβασης σε δυσπρόσιτες ή επικίνδυνες περιοχές, σε μηχανές με περιστρεφόμενα μέλη καθώς και σε κινούμενα αντικείμενα στα οποία δε θα μπορούσε εφαρμοστεί κάποιο σύστημα με καλωδίωση.

Industrial Monitoring

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές που αφορούν water/wastewater monitoring που έχουν κατασκευαστεί σαν μέρος του προγράμματος ARRA (American Recovery and Reinvestment Act) καθώς και

εφαρμογές παρακολούθησης στάθμης του νερού και πίεσης σε υπόγειες γεωτρήσεις.

Vehicle Detection

Πολλή χρήσιμη είναι η χρήση των WSNs στον τομέα αυτό, καθώς μπορεί να εντοπιστεί η παρουσία οχημάτων σε κάποιο χώρο καθώς και να αναγνωριστεί το είδος του οχήματος (μοτοσυκλέτα, αυτοκίνητο, λεωφορείο κλπ.)

Agriculture

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί ραγδαία αύξηση της χρήσης WSNs στον τομέα της γεωργίας, καθώς βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς, από την παρακολούθηση της στάθμης του νερού και των αποβλήτων μέχρι τη ρύθμιση της πίεσης του νερού και την παρακολούθηση της παραγωγής.

Κεφάλαιο 3

Πρωτόκολλα Ασύρματης Επικοινωνίας

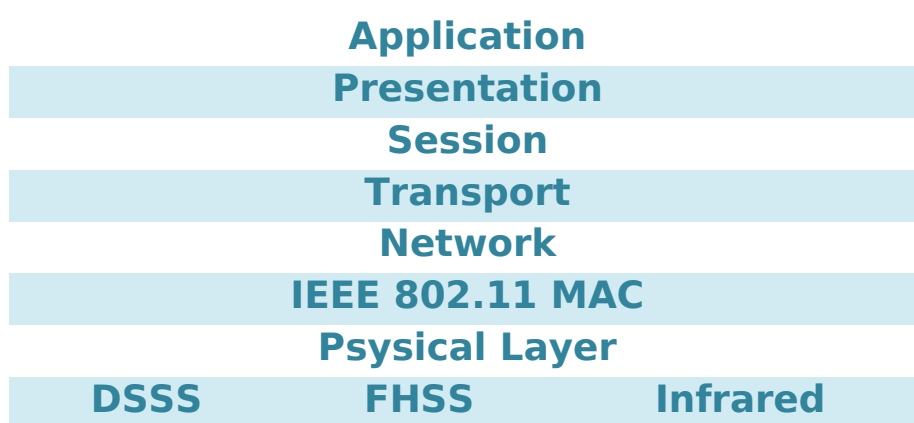
Wi-Fi

Πρόκειται για το πρωτόκολλο 802.11x της IEEE. Δίνει τη δυνατότητα για δημιουργία ασύρματων τοπικών δικτύων (WLANs) και χρησιμοποιείται ευρέως για την πρόσβαση στο διαδίκτυο με πλεονεκτήματα ότι παρακάμπτει την ανάγκη καλωδίωσης των

κτιρίων και προσφέρει κάλυψη οπουδήποτε, ακόμα και σε εξωτερικούς χώρους. Πλέον όλοι οι φορητοί υπολογιστές διαθέτουν μια μονάδα που υλοποιεί το 802.11x και για όσους Η/Υ δεν διαθέτουν ενσωματωμένη μονάδα υπάρχει ένα πλήθος προσαρμογέων σε μορφή καρτών PCI, PCMCIA και σε USB περιφερειακό. Σε πολλά κεντρικά σημεία μιας πόλης είναι δυνατή η σύνδεση στο διαδίκτυο από οποιονδήποτε φέρει μια φορητή συσκευή με τις ανάλογες δυνατότητες και το κατάλληλο λειτουργικό. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι μεγάλα ξενοδοχεία, εμπορικά κέντρα, διάφορες επιχειρήσεις ή ακόμα και δημόσιες υπηρεσίες διαθέτουν ασύρματο δίκτυο στο οποίο επιτρέπουν ελεύθερη πρόσβαση. Τα σημεία αυτά συναντώνται στην Αγγλική ορολογία ως «Access Points» ή «Hot spots». Η χρήση του Wi-Fi είναι ευρέως διαδεδομένη και στα πανεπιστήμια. Βέβαια, στην περίπτωση αυτή η πρόσβαση είναι περιορισμένη και προορίζεται για τους εκπαιδευτικούς και τους φοιτητές στους οποίους το ίδρυμα παρέχει τους απαραίτητους κωδικούς για τη σύνδεση. Το σύστημα κρυπτογράφησης που χρησιμοποιείται για την ασφάλεια των Wi-Fi δικτύων είναι το WPA. Το WPA διαδέχθηκε το WEP το οποίο είχε αποδειχθεί χαμηλής ασφάλειας. Με τη σειρά του το WPA θα αντικατασταθεί από το WPA2 που χρησιμοποιεί το πιο εξελιγμένο σύστημα κρυπτογράφησης AES. Η ονομασία Wi-Fi στην οποία έγινε αναφορά, δόθηκε από την Wi-Fi Alliance που αποτελεί μια μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα συνεταιριστική κίνηση από κατασκευάστριες εταιρίες στο χώρο του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η Wi-Fi Alliance ιδρύθηκε το 1999 με σκοπό να οδηγήσει στην υιοθέτηση ενός ενιαίου προτύπου για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Σήμερα αποτελείται από 300 εταιρίες-μέλη. Η προσπάθεια της επικεντρώνεται στον έλεγχο των νέων συσκευών που παράγονται

και που υλοποιούν το 802.11 με στόχο την εξασφάλιση της συμβατότητας με τα υπόλοιπα προϊόντα της ίδιας κατηγορίας. Κάθε συσκευή που πληρεί τους κανόνες και τις προϋποθέσεις που θέτει η Wi-Fi Alliance πέρνα τον έλεγχο με επιτυχία και λαμβάνει πιστοποίηση.

Επίπεδα του πρωτοκόλλου



Τα δυο τελευταία επίπεδα PHY και MAC ορίζονται από την IEEE. Παρατηρώντας το φυσικό επίπεδο διακρίνονται οι τεχνικές κατανομής του χώρου σε ένα διαθέσιμο κανάλι, οι DSSS και FHSS. Στην τεχνική DSSS κάθε bit πληροφορίας διαμορφώνεται με μια ψευδοτυχαία ακολουθία από 11 ή περισσότερα bits. Στη νέα ακολουθία που προκύπτει εφαρμόζεται ψηφιακή διαμόρφωση διαφορικής ολίσθησης φάσης DPSK και γίνεται εκπομπή του σήματος. Η DSSS αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό των bits του σήματος που πρόκειται να σταλεί και αυτό έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και σε χωρητικότητα του καναλιού. Το μεγάλο πλεονέκτημα της DSSS είναι ότι σε περίπτωση

αλλοίωσης των bits κατά την αποστολή, ο δέκτης μπορεί να ανακτήσει την χαμένη ακολουθία από bits με μεθόδους στατιστικής αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για επαναμετάδοση που θα μείωνε την ταχύτητα επικοινωνίας. Στην τεχνική FHSS το σήμα πληροφορίας διαμορφώνεται με μια φέρουσα στενής ζώνης η οποία κάνει συνεχείς μεταβάσεις από μια συχνότητα σε μια άλλη βάσει μιας προκαθορισμένης ακολουθίας. Ο δέκτης σχετίζεται με την ακολουθία μεταβάσεων του πομπού και μπορεί να αναγνωρίσει το σήμα, ενώ οποιαδήποτε άλλη συσκευή το βλέπει σαν θόρυβο.

Bluetooth

Ίσως είναι το δημοφιλέστερο πρωτόκολλο από τη στιγμή που πλέον συναντάται σε κάθε κινητό τηλέφωνο. Δημιουργήθηκε αρχικά από την Ericsson και στη συνέχεια κέρδισε το ενδιαφέρον άλλων εταιρειών μεταξύ των οποίων οι IBM, Intel, Nokia και Toshiba. Η Ericsson σε συνεργασία με τις εταιρείες αυτές ίδρυσε το SIG, που αποτελεί μια κίνηση για την βελτιστοποίηση του Bluetooth και την προώθησή του στην αγορά. Το Bluetooth αποσκοπεί στη δημιουργία περιφερειακών συσκευών όπως εκτυπωτές, πληκτρολόγια, ποντίκια, ακουστικά κ.α. που θα επικοινωνούν χωρίς τη χρήση καλωδίων. Βέβαια προκύπτει η ανάγκη για τροφοδοσία από συστοιχίες μπαταριών ακόμα και σε συσκευές οι οποίες συνήθως δεν την χρειάζονται. Για παράδειγμα τα συνηθισμένα ακουστικά δεν έχουν ανάγκη για τροφοδοσία αφού το ζεύγος μεγαφώνων που διαθέτουν οδηγείται από την ισχύ του αναλογικού σήματος εισόδου. Αντίθετα στα ακουστικά Bluetooth χρειαζόμαστε τροφοδοσία για το κύκλωμα του πομποδέκτη και για την βαθμίδα που ενισχύει το σήμα πληροφορίας και οδηγεί τα μεγάφωνα. Το Bluetooth χωρίζεται στις ακόλουθες τάξεις ανάλογα με την ισχύ εκπομπής:

Τάξη 1: Ισχύς εξόδου 100mW μέγιστη απόσταση άνω των 100m

Τάξη 2: Ισχύς εξόδου 2.5mW μέγιστη απόσταση 10m

Τάξη 3: Ισχύς εξόδου 1mW μέγιστη απόσταση 1m

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι αποστάσεις που έχουν αναφερθεί σχετικά με την ακτίνα κάλυψης κάθε πρωτοκόλλου είναι ενδεικτικές και μεταβάλλονται ανάλογα με το

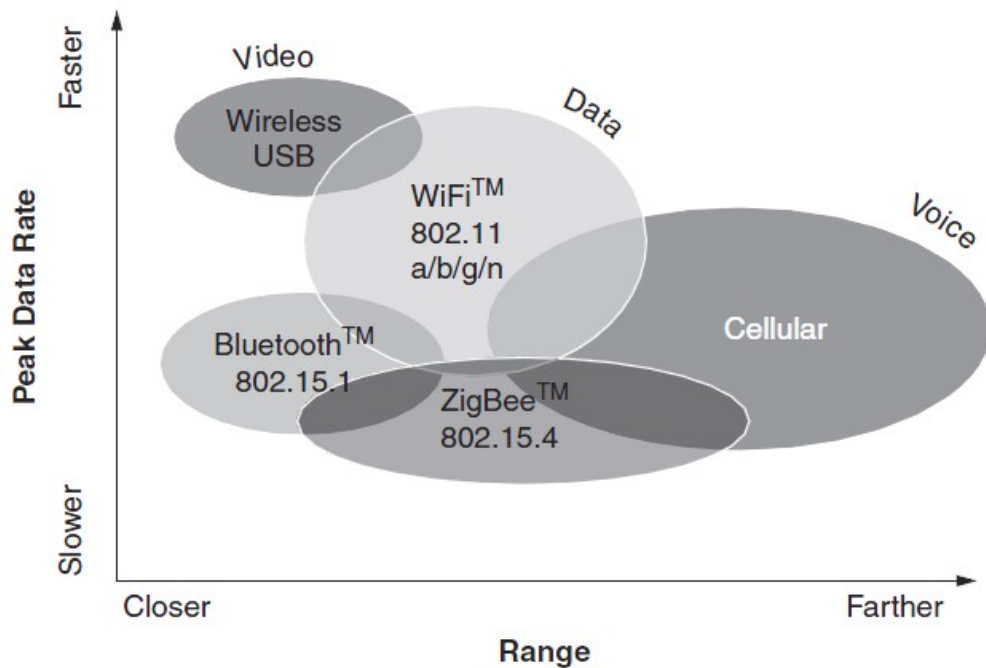
περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η ασύρματη μετάδοση, αφού εξαρτώνται και από εξωτερικούς παράγοντες όπως το θόρυβο, την απορρόφηση και τυχόν εμπόδια.

Συνοπτική σύγκριση των παραπάνω πρωτοκόλλων με το ZigBee

	ZigBee	Wi-Fi	Bluetooth
Τομέας Εφαρμογών	Monitoring , Control	Web, Email, Video	Αντικατάσταση καλωδίων
Απαιτούμενοι Πόροι	4KB - 32 KB	1 MB +	250 KB +
Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας	100 - 1.000 +	0.5 -5	1-7
Μέγεθος Δικτύου	Unlimited	32	7
Εύρος Ζώνης	20 - 50	11.000 +	720 Kbps
Εμβέλεια Μετάδοσης	1 - 100+	1 -100	1-10 +
Πλεονεκτήματα	Αξιοπιστία , Χαμηλή Κατανάλωση, Κόστος	Ταχύτητα, Ευελιξία	Κόστος , Convenience

ZigBee

Το Zigbee είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης το οποίο βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Βασικός του στόχος είναι να καλύψει το κομμάτι της αγοράς το οποίο δεν εξυπηρετείται από τις άλλες υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες, όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα. Τα χαρακτηριστικά του είναι ότι στοχεύει σε χαμηλό data rate με αποτέλεσμα εξοικονόμηση ενέργειας. Επίσης, χρησιμοποιεί μικρή στοίβα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από μικροελεγκτές των 8 bit καθώς και προσφέρει στη μεγάλη αυτονομία, δηλαδή οι συσκευές που συνδέονται σε δίκτυο ZigBee να μπορούν να τρέχουν ακόμα και για χρόνια με μπαταρίες και όχι για μερικές μέρες ή ώρες όπως συμβαίνει με άλλα ασύρματα πρωτόκολλα.



Σύμφωνα με τα παραπάνω, βλέπουμε ότι το Zigbee είναι μια ιδανική επιλογή για ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Προσφέρει υψηλή αξιοπιστία, ασφάλεια, χαμηλή κατανάλωση και δυνατότητα πολύ χαμηλού ρυθμού μετάδοσης.

Πλεονεκτηματα του ZigBee

Αξιοπιστία

Το Zigbee χρησιμοποιεί διάφορες τεχνικές για να εξασφαλίσει αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων.

- ❖ IEEE 802.15.4 με O-QPSK το οποίο είναι μία παραλλαγή της PSK διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί 4 διαφορετικές τιμές της

φάσης για να μεταδώσει, καθώς και DSSS, Direct-sequence Spread Spectrum ,τεχνική διαμόρφωσης κατά την οποία το μεταδιδόμενο σήμα καταλαμβάνει μεγαλύτερο εύρος-ζώνης από σήμα πληροφορίας που διαμορφώνεται.

- ❖ CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance)
Το Zigbee, πριν αρχίσει να εκπέμπει, «ακούει» το κανάλι. Αν το κανάλι δε χρησιμοποιείται, τότε ξεκινά η εκπομπή.
- ❖ 16-bit CRCs Χρησιμοποιεί 16-bit CRC σε κάθε πακέτο το οποίο ονομάζεται Frame CheckSum (FCS) και εξασφαλίζει τη σωστή αποστολή των bits.
- ❖ Acknowledgments σε κάθε βήμα
- ❖ Mesh networking για να βρεθεί η αξιόπιστη διαδρομή. Το Mesh networking προσφέρει τις εξής βελτιώσεις σε ένα ασύρματο δίκτυο. Βελτιωμένη εμβέλεια (multi-hop) , ad-hoc σχηματισμός του δικτύου, αυτόματη ανακάλυψη και διόρθωση διαδρομής .
- ❖ End-to-end acknowledgments για να επαληθεύσει ότι τα δεδομένα έφτασαν στον προορισμό τους.
- ❖ Παρέχει αξιόπιστο broadcasting, τεχνική για μετάδοση ενός μηνύματος σε όλους του κόμβους καθώς και multicasting σε μία επιλεγμένη ομάδα κόμβων.
- ❖ Για κάθε πακέτο που αποτυγχάνει να αποσταλεί, γίνονται άλλες τρεις προσπάθειες αποστολής. Αν δεν γίνει επιτυχής

αποστολή σε κάποια από αυτές τις προσπάθειες,
ενημερώνεται ο κόμβος αποστολής για την αποτυχία αυτή

Αποτελεί μία οικονομική λύση

Η τιμή ενός ολοκληρωμένου σε λιανική πώληση κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5 δολαρίων ενώ σε χονδρική φτάνει ακόμα και το 1 δολάριο.

Χαμηλή κατανάλωση

Το Zigbee είναι ένα πρωτόκολο χαμηλής κατανάλωσης. Με ένα ζευγάρι μπαταρίες AA, συσκευές σε ένα δίκτυο Zigbee μπορούν να λειτουργούν για χρόνια, σχετικά πάντα με την εφαρμογή. Συγκεκριμένα έχει μετρηθεί ότι μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι και 5 χρόνια με ένα ζευγάρι μπαταρίες!

Το μυστικό κρύβεται στο ότι ένας κόμβος δικτύου Zigbee, δε χρειάζεται να μένει σε διαρκή σύνδεση με το δίκτυο για να θεωρείται ότι ανήκει στο δίκτυο, μπορεί να πέσει σε κατάσταση sleep.

Ασφάλεια

Η ασφάλεια του ZigBee έγκυται στη χρήση του προτύπου AES-128(Advanced Encryption Standard) το οποίο χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των πακέτων.

Χαμηλός ρυθμός μετάδοσης

Το ZigBee βασίζεται σε IEEE 802.15.4 πομποδέκτες, οι οποίοι επικοινωνούν με ρυθμό 250 kbps σε συχνότητα 2.4 GHz. Το πραγματικό through-put του δικτύου βέβαια είναι κοντά στα 25 kbps αν αφαιρεθούν οι χρόνοι κρυπτογράφησης /αποκρυπτογράφησης, επανάληψης και acknowledgements που αοφρούν το mesh πρωτόκολλο. Ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει στη μείωση αυτή του through-put είναι το γεγονός ότι οι πομποδέκτες αυτοί είναι half duplex, δηλαδή δεν μπορούν και να λαμβάνουν και να μεταδίδουν δεδομένα ταυτόχρονα.

Τοπολογίες δικτύου

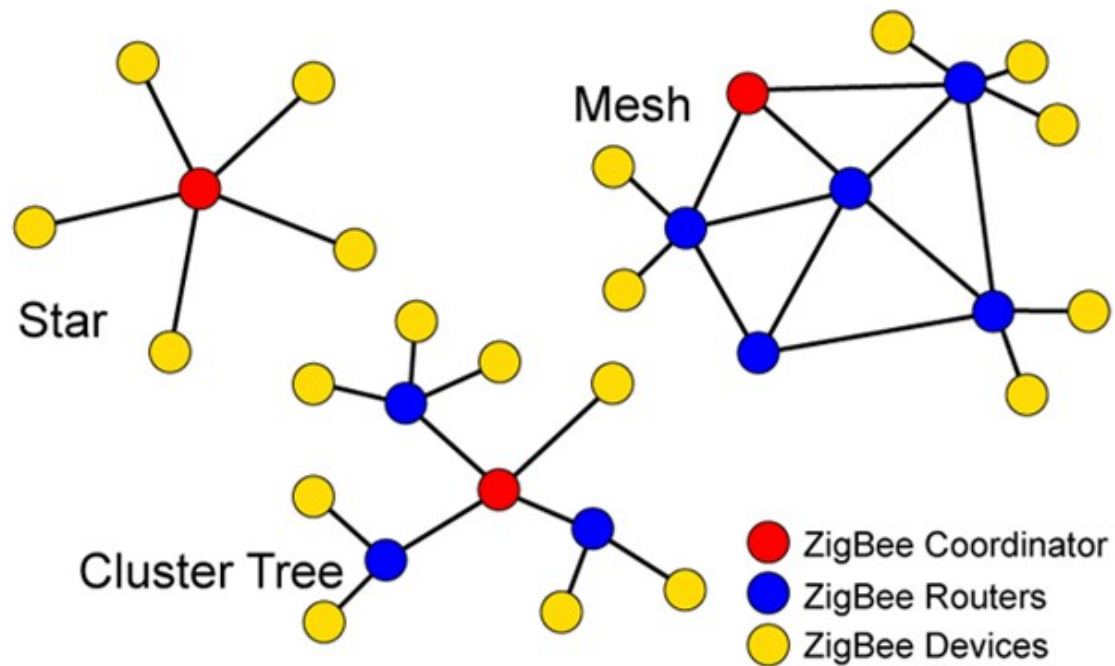
Ένα από τα πλεονεκτήματα του ZigBee είναι ότι υποστηρίζει πολλές διαφορετικές τοπολογίες δικτύου.

Η **τοπολογία αστέρα** αποτελείται από ένα συντονιστή συνδεδεμένο σε κάποιες συσκευές. Ο συντονιστής είναι αρμόδιος για τον έλεγχο και το συντονισμό του δικτύου, ενώ οι υπόλοιπες συσκευές είναι συνδεδεμένες απευθείας μόνο στο συντονιστή και μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μόνο μέσω αυτού. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας, υπάρχει ένας συντονιστής συνδεδεμένος με έναν αισθητήρα θερμότητας και ανάλογα με την τιμή της θερμοκρασίας δίνει τις ανάλογες εντολές στις συσκευές που ελέγχουν για παράδειγμα το άνοιγμα/κλείσιμο των παραθύρων. Πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι είναι οικονομικότερη σε ενέργειας και προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών.

Στην **τοπολογία σημείο προς σημείο**, κάθε συσκευή εγκαθιστά συνδέσεις με όσες συσκευές βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια της. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται δίκτυα με μορφή δένδρου ή πλέγματος. Οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους με τη βοήθεια αλγορίθμων δρομολόγησης. Πλεονεκτήματα της τοπολογίας αυτής είναι η αξιοπιστία αλλά και η επεκτασιμότητα που προσφέρει αφού μπορεί από πολλά τέτοια δίκτυα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους να δημιουργηθεί ένα μεγαλύτερο στο οποίο θα υπάρχει μόνο ένας συντονιστής και ένας δρομολογιτής σε κάθε υπο-δίκτυο.

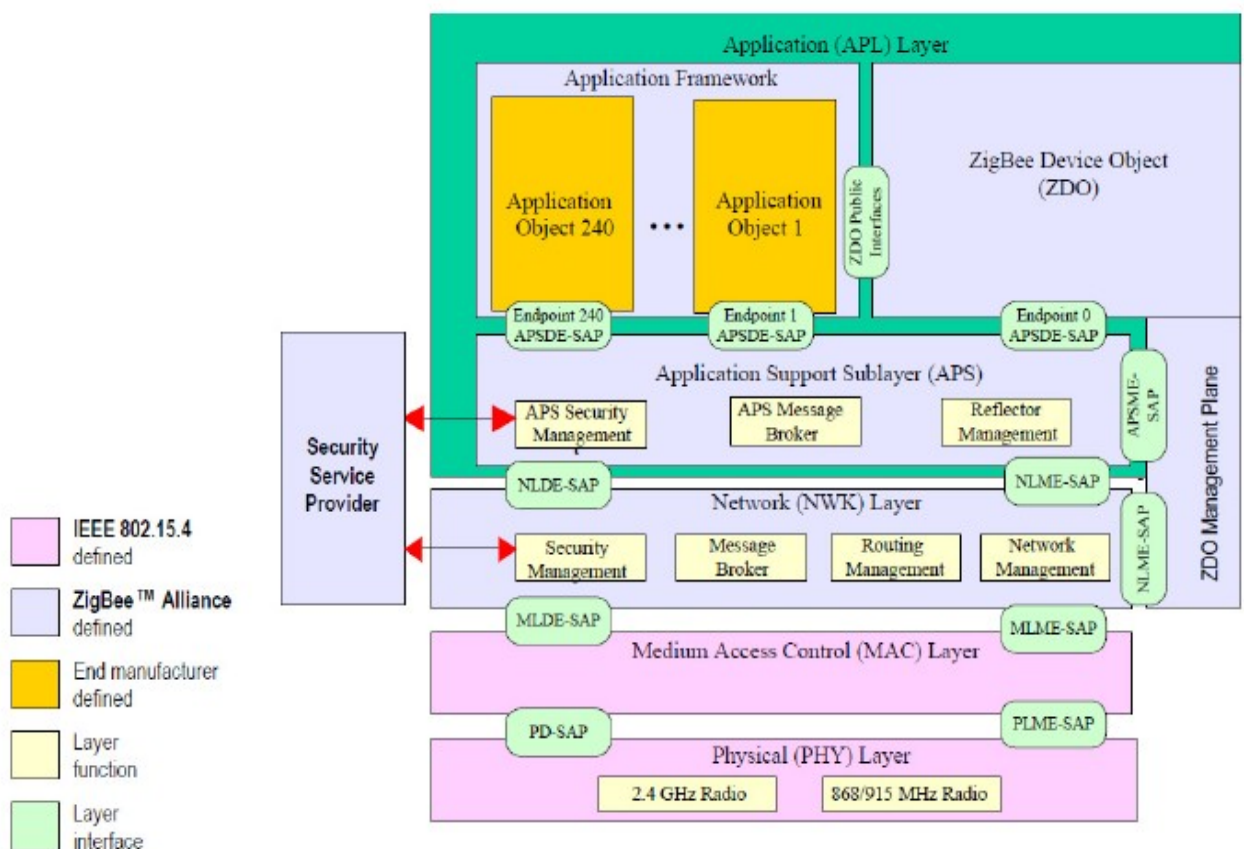
Μπορεί επίσης να υπάρξει συνδιασμός των δύο παραπάνω τοπολογιών, σχηματίζοντας ένα δίκτυο δένδρου το οποίο θα συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο τοπολογιών, δηλαδή

μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών αλλά και μεγαλύτερα επίπεδα αξιοπιστίας και επεκτασιμότητας.



Τα επίπεδα του Zigbee

Ενω το ZigBee ακολουθεί διαστρωμάτωση κατά OSI , δεν έχει και τα 7 προβλεπόμενα επίπεδα, αλλά μόνο 4 . PHY και MAC (τα οποία αποτελούν το IEEE 802.15.4) και NWK (δικτύου) APL (εφαρμογής) τα οποία προστέθηκαν από τη Zigbee Alliance.



Physical Layer

Το επίπεδο αυτό επιτελεί τις παρακάτω λειτουργίες :

- Ενεργοποίηση και απενεργοποίηση πομποδέκτη
- Εκτέλεση του ED (Energy detection, μηχανισμός που εντοπίζει κάποιο σήμα σε ένα συγκεκριμένο κανάλι)
- Πραγματοποίηση του LQI (Link Quality Indicator, ενδειξη ποιότητας του σήματος που λαμβάνει σύμφωνα με τους παράγοντες SNR(Signal to Noise Ratio) και RSS (Received Signal Strength). Όσο μεγαλύτερο SNR τόσο καλύτερη ποιότητα σήματος έχουμε γιατί το σήμα επηρεάζεται δύσκολα από σήματα θορύβου!)
- Εκτέλεση του CCA (Clear Channel Assessment, χρησιμοποιεί τα ED και CS (Carrier Sense, μέθοδος ανίχνευσης σήματος σε ένα κανάλι) για να ελεγχει αν το κανάλι είναι ελεύθερο.
- Επιλογή της ακριβούς συχνότητας του καναλιού
- Αποστολή και λήψη δεδομένων.

Έχει δύο πομποδέκτες, ο ένας λειτουργεί στη συχνότητα των 2.4 GHz και ο άλλος στα 868/915 MHz. Για αυτές τις τρεις συχνότητες είναι διαθέσιμα 27 κανάλια (από το 0 μέχρι το 26). Στα 868 MHz είναι διαθέσιμο ένα κανάλι, στα 915 MHz 10 κανάλια και 2.4 GHz 16 κανάλια.

Physical Layer Services

Στο PHY έχουμε τις υπηρεσίες δεδομένων και τις υπηρεσίες διαχείρισης. Η πρόσβαση σε αυτές γίνεται με τα PD-SAP και PLME-SAP αντίστοιχα. Η υπηρεσία δεδομένων περιλαμβάνει ένα Primitive, το PD-Data. Το PD-Data.request καλείτε από το MAC για να ζητήσει την αποστολή ενός MPDU. Το PHY ενεργοποιεί τον πομπό και στη συνέχεια δημιουργεί ένα PSDU και το στέλνει. Μόλις ολοκληρωθεί η αποστολή, το PHY στέλνει το PD-Data.confirm στο MAC για να αναφέρει ότι η αποστολή ήταν επιτυχής. Αν το PD-Data.request σταλεί την ώρα που ο πομποδέκτης είναι ήδη απασχολημένος, θα επιστραφεί ένα PD-Data.confirm το οποίο θα περιγράφει την κατάσταση του πομποδέκτη, ουσιαστικά τον λόγο για το οποίο δεν γίνεται να εκτελεσθεί το request. Το PD-Data.indication παράγεται όταν γίνεται μεταφορά πακέτων από το PHY στο MAC. Η υπηρεσία διαχείρισης αποτελείται από τα παρακάτω primitives:

- **PLME-CCA** Το PLME-CCA.request εμφανίζεται όταν ο CSMA-CA αλγόριθμος απαιτεί από το PLME την πραγματοποίηση ενός CCA. Μετά την ολοκλήρωση του CCA επιστρέφεται το PLME-CCA.confirm το οποίο μπορεί να έχει μια από τις τιμές «BUSY» (κανάλι κατειλημμένο) ή «IDLE» (κανάλι ελεύθερο) ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού. Αν ο πομποδέκτης είναι απενεργοποιημένος τότε η τιμή του PLME-CCA.confirm

θα είναι «TRX_OFF» ενώ αν βρίσκεται ήδη σε λειτουργία θα είναι «TX_ON». Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις έχουμε αποτυχία εκτέλεσης του CCA.

- **PLME-ED** Το ED ζητείται με το PLME-ED.request. Με την αποπεράτωση των μετρήσεων παράγεται το PLME-ED.confirm με την τιμή «SUCCESS» και μια ένδειξη για το ενεργειακό επίπεδο που ανιχνευτικό, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0x00 και 0xff . Το PLME-ED.confirm φέρει ένα μήνυμα σφάλματος με την τιμή «TRX_OFF» όταν ο πομποδέκτης είναι ανενεργός ή την «TX_ON» όταν ο πομπός είναι απασχολημένος.
- **PLME-GET** Το PLME_GET.request χρησιμοποιείται όταν το MAC «θέλει» να αντλήσει πληροφορίες από κάποιο attribute που βρίσκεται στην PIB του PHY. Αν το attribute που αναζητείται στη βάση δεδομένων βρεθεί τότε στέλνεται το PLME-GET.confirm με την τιμή «SUCCESS», ενώ αν δεν βρεθεί επιστρέφει την τιμή UNSUPPORTED_ATTRIBUTE.
- **PLME-SET-TRX-STATE** Αν χρειαστεί να αλλάξει κατάσταση ο πομποδέκτης, στέλνεται το PLME-SET-TRX-STATE.request . Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί είναι οι παρακάτω:
 - πομποδέκτης απενεργοποιημένος (TRX_OFF)
 - πομπός ενεργός (TX_ON)
 - δέκτης ενεργός (RX_ON)

Αν ο πομποδέκτης δύναται να τεθεί στην ζητούμενη κατάσταση τότε επιστρέφεται το PLME-SET-TRX-STATE.confirm στην τιμή

«SUCCESS». Σε περίπτωση που ο πομπός βρίσκεται σε λειτουργία και την ίδια στιγμή φτάσει μια αίτηση για αλλαγή κατάστασης σε TRX_OFF ή σε RX_ON τότε αγνοείτε και επιστρέφεται η τιμή «BUSY_TX». Παρομοίως όταν ο δέκτης είναι απασχολημένος δεν δέχεται τις αιτήσεις για TRX_OFF ή TX_ON και στέλνει το PLME-SET-TRX-STATE.confirm με την τιμή «BUSY_RX».

- ο **PLME-SET** Το PLME-SET.request χρησιμοποιείται για να αλλαχθεί η τιμή ενός συγκεκριμένου attribute από την PIB του PHY. Όταν βρεθεί το ζητούμενο attribute και η τιμή του μεταβληθεί επιτυχώς τότε στέλνεται το PLMESET.confirm σε κατάσταση «SUCCESS». Η νέα τιμή που δίδεται θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα πεδίο τιμών που να θεωρείτε έγκυρο για το υπό επεξεργασία attribute, διαφορετικά το αποτέλεσμα του PLME-SET.confirm θα είναι το INVALID_PARAMETER. Αν το attribute δεν βρεθεί επιστρέφεται σε τιμή UNSUPPORTED_ATTRIBUTE.

Physical Layer PDU

Ενα πακέτο του φυσικού επιπέδου αποτελείται από τα παρακάτω μέρη. Την επικεφαλίδα συγχρονισμού SHR, την επικεφαλίδα φυσικού επιπέδου PHR και το ωφέλιμο φορτίο Payload. Το SHR αποτελείται επιμέρους από το Preamble το οποίο χρησιμοποιείται στο συγχρονισμό των πομποδεκτών και στο SFD το οποίο δηλώνει το τέλος του πεδίου συγχρονισμού και την αρχή του πακέτου δεδομένων. Το PHR προσδιορίζει το μέγεθος του πακέτου.

SHR		PHR		PHY Payload
Preamble	SFD	Frame length	Reserved	

MAC Layer

Το MAC επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση των ανωτερων επιπέδων με το physical επίπεδο. Εξασφαλίζει :

- Την παραγωγή των Beacons (Beacon είναι ένα σήμα που αποστέλλεται από τον PAN Coordinator για να συγχρονίσει όλες τις συσκευές του δικτύου και να μπορέσει να παραχωρήσει ένα GTS . Το GTS δίνεται σε μία συσκευή για να μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι χωρίς τη χρήση CSMA-CA.)
- Συγχρονισμός των συσκευών στο εισερχόμενο Beacon.

- Επιτρέπει τη σύνδεση και αποσύνδεση μεταξύ των συσκευών στα δίκτυα Zigbee.
- Χρησιμοποιεί CSMA-CA για να παραχωρεί το κανάλι.
- Παραχωρεί τα GTS.

MAC Layer Services

Το MAC όπως και το PHY περιλαμβάνει την υπηρεσία δεδομένων και την υπηρεσία διαχείρισης. Η πρόσβαση σε αυτές γίνεται με το MCPS-SAP και το MLMESAP αντίστοιχα. Το MAC data service έχει τα παρακάτω δύο primitives.

- **MCPS-DATA** Το MCPS-DATA.request ζητάει από το MAC να στείλει ένα MSDU. Αν η εντολή ολοκληρωθεί με επιτυχία παράγεται το MCPSPDATA.
confirm σε κατάσταση «SUCCESS». Σε περίπτωση σφάλματος, το MCPS-DATA.confirm ορίζεται σε μια από τις εξής καταστάσεις:
 - **INVALID_GTS** όταν η αποστολή γίνεται με χρήση GTS και δεν βρεθεί κάποιο έγκυρο timeslot.
 - **TRANSACTION_OVERFLOW** προκύπτει αν η χωρητικότητα της λίστας

αναμονής, στην οποία κρατούνται οι μεταβάσεις πριν εκτελεστούν, είναι πλήρης.

- **TRANSACTION_EXPIRED** εμφανίζεται όταν η μετάβαση αποθηκευθεί στη λίστα αναμονής και ξεπεράσει το χρονικό όριο παραμονής της σε αυτή.
- **UNAVAILABLE_KEY** όταν ζητηθεί να προστεθεί ασφάλεια στο πακέτο αλλά δεν υπάρχει κανένας έγκυρος κωδικός στη MAC PIB.
- **FRAME_TOO_LONG** επιστρέφεται από τη στιγμή που το μέγεθος του πακέτου είναι τόσο μεγάλο ώστε να υπερβαίνει την τιμή που ορίζεται από τη σταθερά `aMaxMACFrameSize`.
- **FAILED_SECURITY_CHECK** σε περίπτωση που προκύψει οποιοδήποτε άλλο σφάλμα σχετικά με τις παραμέτρους ασφαλείας.
- **CHANNEL_ACCESS_FAILURE** όταν χρησιμοποιείται η CSMA-CA και δεν επιτευχθεί πρόσβαση στο κανάλι.
- **NO_ACK** όταν δεν σταλεί σήμα επιβεβαίωσης.
- **MCPS-PURGE** Το `MCPS-PURGE.request` χρησιμοποιείται για να αφαιρεθεί κάποιο MSDU από τις μεταβάσεις που βρίσκονται σε αναμονή.

Αν το MSDU

αφαιρεθεί επιστρέφεται το MCPS-PURGE.confirm σε κατάσταση «SUCCESS» ,
διαφορετικά τίθεται σε «INVALID_HANDLE».

Τα Primitives της υπηρεσίας διαχείρισης είναι τα ακόλουθα:

- **MLME-ASSOCIATE** Το MLME-ASSOCIATE.request παράγεται με σκοπό η εν λόγω συσκευή να συνδεθεί με τον Coordinator του ZigBee δικτύου. Μόλις η διαδικασία ολοκληρωθεί επιτυχώς δημιουργείται το MLMEASSOCIATE.confirm σε κατάσταση «SUCCESS». Αν προκύψει σφάλμα και η σύνδεση δεν είναι εφικτή το MLME-ASSOCIATE.confirm τίθεται στις καταστάσεις:
 - **UNAVAILABLE_KEY** όταν ζητηθεί να προστεθεί ασφάλεια στο πακέτο αλλά δεν υπάρχει κανένας έγκυρος κωδικός στη MAC PIB.
 - **FAILED_SECURITY_CHECK** σε περίπτωση που προκύψει οποιοδήποτε άλλο σφάλμα σχετικά με τις παραμέτρους ασφαλείας.
 - **CHANNEL_ACCESS_FAILURE** όταν χρησιμοποιείται η CSMA-CA και δεν επιτευχθεί πρόσβαση στο κανάλι.
 - **NO_ACK** όταν δεν σταλεί σήμα επιβεβαίωσης.
 - **NO_DATA** όταν η συσκευή που ζητά να συνδεθεί δεν λάβει απόκριση από τον Coordinator.

- **INVALID_PARAMETER** αν οποιαδήποτε παράμετρος του MLMEASSOCIATE.request δεν είναι έγκυρη ή βρίσκεται εκτός του πεδίου τιμών που έχει οριστεί.

Το MLME-ASSOCIATE.indication παράγεται από το MLME του Coordinator και στέλνεται στο NWK layer δείχνοντας ότι έχει ληφθεί μια αίτηση σύνδεσης. Όταν ο Coordinator αποφασίσει για το αν θα επιτρέψει τη σύνδεση στη συσκευή ZigBee (που έκανε την αίτηση) στέλνει το MLME-ASSOCIATE.response με την ανάλογη απόφαση.

- **MLME-DISASSOCIATE** Με το MLME-DISASSOCIATE.request μια συσκευή μπορεί να αποσυνδεθεί από ένα PAN στο οποίο ανήκει ή να την αποσυνδέσει ο Coordinator που διαχειρίζεται το PAN αυτό. Όταν πετύχει η αποσύνδεση στέλνεται το MLME-DISASSOCIATE.confirm σε «SUCCESS», αλλιώς παίρνει τις καταστάσεις:

- **TRANSACTION_OVERFLOW** προκύπτει αν η χωρητικότητα της λίστας αναμονής, στην οποία κρατούνται οι μεταβάσεις πριν εκτελεστούν, είναι πλήρης.

- **TRANSACTION_EXPIRED** εμφανίζεται όταν η μετάβαση αποθηκευθεί στη λίστα αναμονής και ξεπεράσει το χρονικό όριο παραμονής της σε αυτή.
- **UNAVAILABLE_KEY** όταν ζητηθεί να προστεθεί ασφάλεια στο πακέτο αλλά δεν υπάρχει κανένας έγκυρος κωδικός στη MAC PIB.
- **FAILED_SECURITY_CHECK** σε περίπτωση που προκύψει οποιοδήποτε άλλο σφάλμα σχετικά με τις παραμέτρους ασφαλείας.
- **CHANNEL_ACCESS_FAILURE** όταν χρησιμοποιείται η CSMA-CA και δεν επιτευχθεί πρόσβαση στο κανάλι.
- **NO_ACK** όταν δεν σταλεί σήμα επιβεβαίωσης.
- **INVALID_PARAMETER** αν οποιαδήποτε παράμετρος δεν είναι έγκυρη ή βρίσκεται εκτός του πεδίου τιμών που έχει οριστεί.

Το MLME-DISASSOCIATE.indication χρησιμοποιείται για να δείξει ότι έχει ληφθεί μια εντολή αποσύνδεσης.

- **MLME-BEACON-NOTIFY** Το MLME-BEACON-NOTIFY.indication μεταφέρει στο NWK κάποιες παραμέτρους που βρίσκονται σε ένα Beacon που παραλήφθηκε από το MAC.
- **MLME-GET** Λειτουργεί όπως το PLME_GET με τη διαφορά ότι επεξεργάζεται τα στοιχεία της MAC PIB.

- **MLME-GTS** Το MLME-GTS.request παράγεται για να ζητήσει να διανεμηθεί

ένα νέο GTS ή για να αφαιρεθεί ένα υπάρχον αφιερωμένο timeslot. Το MLME GTS.confirm σε κατάσταση «SUCCESS» δείχνει ότι η αίτηση έγινε δεκτή, διαφορετικά επιστρέφει σε μια από τις εξής καταστάσεις:

- **UNAVAILABLE_KEY** όταν δεν υπάρχει κανένας έγκυρος κωδικός στη MAC PIB.
- **NO_SHORT_ADDRESS** όταν το macShortAddress ισούται με 0xffffe ή 0xffff.
- **FAILED_SECURITY_CHECK** σε περίπτωση που προκύψει οποιοδήποτε άλλο σφάλμα σχετικά με τις παραμέτρους ασφαλείας.
- **CHANNEL_ACCESS_FAILURE** όταν χρησιμοποιείται η CSMA-CA και δεν επιτευχθεί πρόσβαση στο κανάλι.
- **NO_ACK** όταν δεν σταλεί σήμα επιβεβαίωσης.
- **INVALID_PARAMETER** αν οποιαδήποτε παράμετρος του MLMEGTS.request δεν είναι έγκυρη ή βρίσκεται εκτός του πεδίου τιμών που έχει οριστεί.

Το MLME-GTS.indication δείχνει ότι έγινε η διανομή ενός νέου GTS ή ότι αφαιρέθηκε ένα από τα GTS που ήδη υπήρχαν.

- **MLME-ORPHAN** Το MLME-ORPHAN.indication παράγεται από το MLME ενός

Coordinator και υποδεικνύει (στο NWK) την ύπαρξη μιας συσκευής που άνηκε παλαιότερα στο δίκτυο που διαχειρίζεται ο Coordinator αυτός. Μια τέτοια συσκευή χαρακτηρίζεται ως «ορφανή».

- **MLME-RESET** Το MLME-RESET.request δημιουργείται από το NWK για να

επαναφέρει το MAC στις αρχικές του ρυθμίσεις, κάνοντας reset σε όλα τα attributes που βρίσκονται στην MAC PIB. Αν το reset ολοκληρωθεί με επιτυχία το MLME RESET.confirm τίθεται σε «SUCCESS», διαφορετικά η κατάστασή του γίνεται DISABLE_TRX_FAILURE.

- **MLME-RX-ENABLE** Το MLME-RX-ENABLE.request θέτει τον δέκτη σε

λειτουργία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Το MLME-RXENABLE.

confirm παράγεται και αφού ο δέκτης τεθεί σε λειτουργία ορίζεται

σε «SUCCESS». Αν δεν ενεργοποιηθεί ο δέκτης οι δυνατές καταστάσεις είναι

η «TX_ACTIVE» όταν ο πομπός είναι ενεργός και η «INVALID_PARAMETER»

για οποιοδήποτε άλλο σφάλμα.

- **MLME-SCAN** Το MLME-SCAN.request χρησιμοποιείται για σάρωση του

καναλιού πραγματοποιώντας ένα ED για να καθοριστεί ο βαθμός χρήσης του

καναλιού ή εντοπίζοντας πληροφορίες σχετικά με το δίκτυο προέλευσής

τους. Το MLME-SCAN.confirm θα είναι σε κατάσταση «SUCCESS» όταν η

σάρωση ολοκληρωθεί με επιτυχία, διαφορετικά αν δεν εντοπίσει κανένα

beacon τίθεται σε «NO_BEACON».

- **MLME-COMM-STATUS** Το MLME-COMM-STATUS.indication παράγεται για να ενημερώσει το NWK για την κατάσταση κάποιας μετάδοσης που

βρίσκεται σε εξέλιξη ή για να πληροφορήσει το NWK για κάποιο σφάλμα

που προέκυψε κατά τον έλεγχο των παραμέτρων ασφαλείας ενός

εισερχόμενου πακέτου.

- **MLME-SET** Λειτουργεί όπως το PLME-SET με τη διαφορά ότι επεξεργάζεται

τα στοιχεία της MAC PIB.

- **MLME-SYNC** Το MLME-SYNC.request ζητά τον συγχρονισμό με τον

Coordinator και την ανίχνευση των beacons που εκπέμπει.

- **MLME-SYNC-LOSS** MLME-SYNC-LOSS.indication επισημαίνει ότι χάθηκε ο

συγχρονισμός μιας συσκευής ZigBee με τον Coordinator του PAN στο οποίο

ανήκει.

- **MLME-POLL** Το MLME-POLL.request παροτρύνει τη ZigBee συσκευή να

ζητήσει δεδομένα από τον Coordinator. Όταν παραληφθεί ένα πακέτο με

δεδομένα από τον Coordinator το MLME-POLL.confirm λαμβάνει την τιμή

«SUCCESS» ενώ σε περίπτωση σφάλματος μια από τις παρακάτω

καταστάσεις:

- **UNAVAILABLE_KEY** όταν ζητηθεί να προστεθεί ασφάλεια στο πακέτο αλλά δεν υπάρχει κανένας έγκυρος κωδικός στη MAC PIB.
- **FAILED_SECURITY_CHECK** σε περίπτωση που προκύψει οποιοδήποτε σφάλμα σχετικά με τις παραμέτρους ασφαλείας.
- **CHANNEL_ACCESS_FAILURE** όταν χρησιμοποιείται η CSMA-CA και δεν επιτευχθεί πρόσβαση στο κανάλι.
- **NO_ACK** όταν δεν σταλεί σήμα επιβεβαίωσης.
- **NO_DATA** όταν παραληφθεί ένα πακέτο από τον Coordinator με μηδενικό μήκος.
- **INVALID_PARAMETER** αν οποιαδήποτε παράμετρος του MLME-POLL.request δεν είναι έγκυρη ή βρίσκεται εκτός του πεδίου τιμών που έχει οριστεί.

MPDU

Το πακέτο του MPDU από το header MHR, το ωφέλιμο φορτίο MAC Payload και το πλαίσιο τέλους MFR. Το MHR περιέχει σηματοδοσία για έλεγχο του πακέτο, πληροφορίες αναγνώρισης και στοιχεία διευθυνσιοδότησης αποστολέα και παραλήπτη. Το MFR περιέχει το FCS, το οποίο είναι μία ακολουθία 16 bit για έλεγχο λαθών.

MHR						MAC Paylo ad	MF R
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Frame Paylo ad	FCS

Network Layer

Το επίπεδο δικτύου εξασφαλίζει τη λειτουργικότητα του 802.15.4 ελέγχοντας το MAC επίπεδο και μεσολαβεί για την επικοινωνία του APL (επίπεδο εφαρμογής) με τα χαμηλότερα επίπεδα.

Οι αρμοδιότητες του είναι οι εξείς :

- Καθορίζει το ρόλο μιας νέας συσκευής
- Δημιουργεί ένα δίκτυο
- Επιτρέπει τη σύνδεση ή την αποχώρηση κάποιου κόμβου από το υπάρχον δίκτυο

- Το NWK ενός coordinator ορίζει τις διευθύνσεις κάθε συσκευής που εισέρχεται στο δίκτυο του
- Ανακαλύπτει τις γειτονικές συσκευές, αυτές δηλαδή οι οποίες απέχουν ένα μόνο hop.
- Ανακαλύπτει και συντηρεί τις συντομότερες διαδρομές για να έρθει σε επαφή με άλλες συσκευές.
- Αλλάζει το μηχανισμό δρομολόγησης των δεδομένων

Για την αποστολή δεδομένων από μία συσκευή υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί, το Unicast, το Multicast και το Broadcast.

Στο **Unicast**, τα δεδομένα στέλνονται προς μία μόνο συσκευή με συγκεκριμένη διεύθυνση.

Στο **Multicast** τα δεδομένα στέλνονται σε ένα σύνολο συσκευών που βρίσκονται στο ίδιο δίκτυο. Το σύνολο αυτό αναγνωρίζεται από μία 16-bit ακολουθία που λέγεται multicast group ID. Κάθε συσκευή διατηρεί ένα multicast table στο οποίο καταχωρεί σε ποια group ανήκει.

Στο **Broadcast** τα δεδομένα που μεταδίδονται σε ένα κανάλι, λαμβάνονται από όλες τις συσκευές που λειτουργούν στο κανάλι αυτό.

Network Layer Services

Η υπηρεσία δεδομένων του NWK έχει ένα μόνο primitive, το NLDE-DATA. Το NLDE-DATA.request ζητά την αποστολή ενός NSDU. Όταν η αποστολή ολοκληρωθεί με επιτυχία το NLDE-DATA.confirm

τίθεται σε «SUCCESS», ενώ σε αντίθετη περίπτωση μπαίνει σε κατάσταση σφάλματος. Το NLDE-DATA.indication δείχνει τη μεταφορά ενός PDU από το NWK στο MAC. Για το NLME, την υπηρεσία διαχείρισης, τα primitives είναι τα ακόλουθα:

- **NLME-NETWORK-DISCOVERY** Το NLME-NETWORK-DISCOVERY.request χρησιμοποιείται για την εύρεση εν ενεργεία δικτύων στην περιοχή λειτουργίας (POS) της συσκευής. Επιστρέφεται το NLME-NETWORKDISCOVERY.confirm φέροντας πληροφορίες για τα δίκτυα που βρέθηκαν μέσω της κατάστασης στην οποία έχει τεθεί. Η κατάσταση αυτή είναι πάντα ίδια με εκείνη του MLME-SCAN.confirm .
- **NLME-NETWORK-FORMATION** Το NLME-NETWORK-FORMATION.request παράγεται όταν επιθυμούμαι η εν λόγω συσκευή να δημιουργήσει ένα νέο δίκτυο ως Coordinator. Όταν η συσκευή δεν δύναται να γίνει Coordinator η κατάσταση του NLME-NETWORK-FORMATION.confirm ορίζεται ως «INVALID_REQUEST» . Αν η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει ως Coordinator τότε το NLME παράγει το MLME-SCAN.request για να βρεθεί ένα διαθέσιμο κανάλι. Αν το MLME-SCAN.confirm επιστρέψει σε «SUCCESS» , το NLME επιλέγει το κατάλληλο κανάλι από τα διαθέσιμα. Στη συνέχεια το NWK θα πρέπει να επιλέξει ένα κωδικό αναγνώρισης για το δίκτυο (PAN Identifier) που να μην χρησιμοποιείται ήδη. Αν δεν βρεθεί κατάλληλο κανάλι ή PAN Identifier τότε το δίκτυο δε γίνεται να σχηματιστεί και το NLME-NETWORKFORMATION.confirm γίνεται «STARTUP_FAILURE». Αν δεν προκύψουν σφάλματα και το δίκτυο σχηματιστεί, επιστρέφεται το NLME NETWORKFORMATION.confirm σε «SUCCESS».

- **NLME-PERMIT-JOINING** Το NLME-PERMIT-JOINING.request χρησιμοποιείται όταν θέλουμε ο Coordinator να επιτρέπει τη σύνδεση άλλων στοιχείων στο δίκτυό του για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ίσο με την παράμετρο PermitDuration. Αν η συσκευή στην οποία γίνεται το request δεν είναι Coordinator ή Router τότε το NLME-PERMIT-JOINING.confirm μπαίνει σε κατάσταση «INVALID_REQUEST». Αν η συσκευή είναι Coordinator ή Router το NLME-PERMIT-JOINING.confirm θα είναι ίδιο με το MLME-SET.confirm, η κατάσταση του οποίου εξαρτάται από την τιμή του PermitDuration.
- **NLME-START-ROUTER** Το NLME-START-ROUTER.request παράγεται ώστε ο Router να αρχίσει να εκτελεί μια σειρά από εργασίες που βρίσκονται υπό την αρμοδιότητά του. Οι εργασίες αυτές είναι η αποδοχή αιτήσεων από άλλες συσκευές που θέλουν να συνδεθούν στο δίκτυό του, η δρομολόγηση των Data Frames και η λειτουργία Route Discovery. Αν η συσκευή δεν είναι Router το NLME-START-ROUTER.confirm γίνεται «INVALID_REQUEST». Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η κατάστασή του γίνεται ίση με εκείνη του MLME-START.confirm . Ο Router θα αρχίσει να εκτελεί τις εργασίες μόνον σε περίπτωση που το MLME-START.confirm επιστρέφει σε κατάσταση «SUCCESS».
- **NLME-ED-SCAN** Το επίπεδο εφαρμογής δημιουργεί το NLME-EDSCAN.request για να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις των επιπέδων ενέργειας στα γειτονικά κανάλια. Για να γίνει αυτό το NWK κάνει χρήση του MLME-SCAN.request . Κατά συνέπεια τα αποτελέσματα του NLME-EDSCAN.confirm προκύπτουν από την κατάσταση του MLME-SCAN.confirm .

- **NLME-JOIN** Χρήση του NLME-JOIN.request γίνεται για να ζητηθούν η σύνδεση ή η επανασύνδεση της συσκευής σε ένα δίκτυο και η αλλαγή του καναλιού μετάδοσης. Όταν το request στέλνεται σε μια συσκευή που βρίσκεται ήδη σε δίκτυο ενώ η παράμετρος RejoinNetwork είναι ίση με 0x00 (δηλαδή δεν ζητείται επανασύνδεση) τότε παράγεται το NLME-JOIN.confirm σε κατάσταση «INVALID_REQUEST». Αν το primitive στέλνεται με σκοπό να αλλάξει το κανάλι μετάδοσης τότε το NLME-JOIN.confirm επιστρέφει σε «SUCCESS» όταν η αλλαγή είναι επιτυχής, όμως αν η συσκευή δεν υποστηρίζει το attribute phyCurrentChannel, η μετάβαση από ένα ράδιο-κανάλι σε ένα άλλο δε μπορεί να επιτευχθεί και το NLME-JOIN.confirm τίθεται σε «UNSUPPORTED_ATTRIBUTE». Το NLME-JOIN.indication παράγεται σε ένα Coordinator ή σε ένα Router για να δείξει ότι κάποια άλλη συσκευή συνδέθηκε στο δίκτυό του.
- **NLME-DIRECT-JOIN** Το NLME-DIRECT-JOIN.request δημιουργείται σε ένα Coordinator ή Router ώστε να συνδέσει άμεσα μια συσκευή στο δίκτυό του. Αν προσθέσει μια συσκευή στο δίκτυό του, παράγεται το NLME-DIRECT-JOIN.confirm σε «SUCCESS». Στην κατάσταση «ALREADY_PRESENT» θα βρεθεί όταν η συσκευή ήταν ήδη στο δίκτυο και σε «NEIGHBOOR_TABLE» όταν ο πίνακας που περιέχει τα συνδεδεμένα στοιχεία είναι πλήρης.
- **NLME-LEAVE** Όταν μια συσκευή θέλει να εγκαταλείψει ένα δίκτυο ή να υποχρεώσει (αν είναι Coordinator ή Router) κάποια άλλη συσκευή να αποχωρήσει από αυτό, παράγει το NLME-LEAVE.request. Αν ληφθεί από το NWK μιας συσκευής που δεν ανήκει σε δίκτυο τότε επιστρέφεται το NLMELEAVE.

confirm σε «INVALID_REQUEST». Σε κατάσταση UNKNOWN_DEVICE εισέρχεται, όταν η συσκευή δεν υπάρχει. Σε κάθε άλλη περίπτωση γίνεται ίδιο με το MCPS-DATA.confirm. Το NLME-LEAVE.indication δείχνει αν η συσκευή που το παρήγαγε εγκατέλειψε το δίκτυο ή αν ανάγκασε μια άλλη συσκευή να αποσυνδεθεί.

- **NLME-RESET** Το NLME-RESET.request επαναφέρει το NWK στην αρχική του κατάσταση. Αν το reset ολοκληρωθεί με επιτυχία το NLME-RESET.confirm τίθεται σε «SUCCESS», διαφορετικά η κατάστασή του γίνεται DISABLE_TRX_FAILURE.
- **NLME-SYNC** Το NLME-SYNC.request ζητά τον συγχρονισμό με τον Coordinator ή τη λήψη δεδομένων από αυτόν. Το NLME-SYNC.request περιλαμβάνει την παράμετρο TRACK η οποία παίρνει τις Boolean τιμές TRUE και FALSE δείχνοντας αν ο συγχρονισμός θα διατηρηθεί ή όχι στα επόμενα beacons. Όταν η παράμετρος TRACK είναι FALSE και το δίκτυο δουλεύει χωρίς τη χρήση beacons, τότε το NLME παράγει το MLME-POLL.request. Μετά την εκτέλεση του MLME-POLL.request η κατάσταση του NLMESYNC.confirm θα είναι ίδια με εκείνη που επιστρέφεται από το MLMEPOLL.confirm. Αν το TRACK είναι TRUE και το δίκτυο δουλεύει χωρίς τη χρήση beacons τότε το NLME-SYNC.confirm παίρνει την κατάσταση «INVALID_PARAMETER». Για TRACK FALSE/TRUE και δίκτυο με ενεργοποιημένα beacons το NLME ορίζει την τιμή του macAutoRequest σε TRUE με τη βοήθεια του MLME-SET.request. Στη συνέχεια παράγει το NLMESYNC.request με την παράμετρο TrackBeacon σε FALSE/TRUE. Το NLMESYNC.confirm επιστρέφεται σε κατάσταση «SUCCESS».

- **NLME-SYNC-LOSS** Το NLME-SYNC-LOSS.indication δείχνει την απώλεια συγχρονισμού στο APL.
- **NLME-GET** Λειτουργεί όπως τα PLME-GET και MLME-GET με τη διαφορά ότι επεξεργάζεται τα δεδομένα της NWK PIB.
- **NLME-SET** Λειτουργεί όπως τα PLME-GET και MLME-GET με τη διαφορά ότι επεξεργάζεται τα δεδομένα της NWK PIB.
- **NLME-NWK-STATUS** Δείχνει στο APL τα σφάλματα που παρουσιάζονται στο ZigBee δίκτυο.
- **NLME-ROUTE-DISCOVERY** Το NLME-ROUTE-DISCOVERY.request ζητά την εκκίνηση του Route Discovery από ένα Coordinator ή Router. Το NLME-ROUTE-DISCOVERY.confirm θα μπει σε κατάσταση «SUCCESS» όταν το Route Discovery ολοκληρωθεί με επιτυχία και η παράμετρος DstAddrMode πάρει την τιμή 0x00. Αν η συσκευή στην οποία γίνεται το request, δεν είναι Coordinator ή Router τότε το NLME-ROUTE-DISCOVERY.confirm επιστρέφει σε «INVALID_REQUEST».

Network PDU

Το πακέτο του NWK Layer αποτελείται από τα εξής στοιχεία :

Frame Control (16 bits) : Περιέχει σήματα ελέγχου καθώς και πληροφορίες για το είδος του πακέτου και την διευθυνσιοδότηση.

Destination Address (16 bits) : Η διεύθυνση της συσκευής για την οποία προορίζεται το πακέτο.

Source Address (16 bits) : Η διεύθυνση της συσκευής που στέλνει το πακέτο.

Radius (8 bits) : Ο αριθμός των επιτρεπόμενων μεταβάσεων (hops). Κάθε φορά που γίνεται μετάβαση του πακέτου σε άλλη συσκευή, μειώνεται η τιμή του κατά ένα.

Sequence Number : Αυξάνεται κατά ένα κάθε φορά που στέλνεται ένα νέο πακέτο.

Destination IEEE Address : Περιέχει την 64bit IEEE διεύθυνση που αντιστοιχεί στην 16 bit διεύθυνση δικτύου που περιέχεται στο Destination Address του NWK Header.

Source IEEE Address : Περιέχει την 64bit IEEE διεύθυνση που αντιστοιχεί στην 16 bit διεύθυνση δικτύου που περιέχεται στο Source Address του NWK Header.

Multicast Control : Υπάρχει στο πακέτο αν η τιμή του πεδίου Multicast Flag του Frame Control είναι 1. Το Multicast Frame περιέχει τα εξής:

Multicast Mode : Ορίζει τον τύπο Multicast που θα χρησιμοποιηθεί. Μπορεί να είναι member mode ή non-member mode.

NonmemberRadius : Ορίζει την εμβέλεια σε member mode multicast που ελέγχεται από συσκευές που δεν αποτελούν members κάποιου Destination Group.

MaxNonmemberRadius : Περιέχει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το NonmemberRadius.

Source Route Subframe : Υπάρχει στον πακέτο μόνο αν η τιμή του πεδίου source route του Frame Control είναι 1 και αποτελείται από τα εξής:

- Relay Count
- Relay Index
- Relay List

NWK Header									Payload
Frame Control	Destination Address	Source Address	Radius	Sequence Number	Destination IEEE Address	Source IEEE Address	Multicast Control	Source route subframe	Frame Payload

General NWK Frame Format

Application Layer

Το APL είναι το ανώτερο επίπεδο του πρωτοκόλλου και αποτελείται από τα εξής υπο-επίπεδα : Application Support Sub-Layer, ZDO και Application Framework. Το Application Layer είναι υπεύθυνο να ανιχνεύει ZigBee συσκευές στο δίκτυο και να ορίζει το ρόλο τους. Να εξασφαλίζει την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων και τη διαχείριση διευθύνσεων. Τέλος, συντηρεί τον πίνακα Binding και προωθεί τα μηνύματα μεταξύ των Bound Devices.

Application Framework

Σ' αυτό το επίπεδο, καθορίζεται η λειτουργία της συσκευής με τη βοήθεια των Application Objects ή Endpoints. Από τα 256 Application Objects (0 – 255), το πρώτο (0) ανήκει στο ZDO (ZigBee Device Profile), το τελευταίο (255) είναι το Application Object το οποίο μεσολαβεί στη μεταφορά δεδομένων από και προς τα υπολοιπα Application Objects, τα επόμενα μέχρι και το 240^ο χρησιμοποιούνται από τον κατασκευαστή και τα 241 – 254 δε χρησιμοποιούνται και είναι διαθέσιμα για μελλοντική χρήση.

Application Profiles

Είναι κάποια πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για να καλύψουν ένα σύνολο από εφαρμογές καθώς και για να εξασφαλίσουν συμβατότητα μεταξύ εφαρμογών που αναπτύσσονται από διαφορετικούς κατασκευαστές. Ως τώρα έχουν αναπτυχθεί τα εξής:

- Home Automation
- Commercial Building Automation
- Industrial Plant Monitoring
- Telecommunications Applications
- Automatic Metering Initiative
- Personal Home and Health Care

Το **Home Automation** μπορεί να καλύψει εφαρμογές όπως έλεγχο φωτισμού, ενεργοποίηση/απενεργοποίηση συστήματος θέρμανσης/ψύξης κλπ.

Το **Commercial Building Automation** προσφέρει δυνατότητες ελέγχου φωτισμού, θερμοκρασίας, εξαερισμού, συστημάτων ασφαλείας και ελεγχόμενης πρόσβασης σε μεγάλα εμπορικά κτήρια.

Χρησιμοποιώντας το **Industrial Plant Monitoring** Profile μπορούμε να αναπτύξουμε εφαρμογές που μας βοηθούν να

ελέγξουμε τη διάβρωση και τη φθορά βιομηχανικού εξοπλισμού καθώς και εφαρμογές περιβαλλοντικού ελέγχου των βιομηχανιών με έλεγχο βιομηχανικών αποβλήτων και αέριων ρυπαντών.

Το **Telecommunications Applications** Profile χρησιμοποιείται σαν πρότυπο για ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών.

Το **Automatic Metering Initiative** καλύπτει εφαρμογές για μέτρηση κατανάλωσης ενός κτηρίου, π.χ μέτρηση κατανάλωσης ρεύματος. ??

Τέλος το **Personal Home and Health Care** αφορά εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εστίες, κέντρα αποκατάστασης, γηροκομεία, νοσοκομεία κλπ.

Η χρήση των Application Profiles φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα. Εστω ότι θέλουμε να αναπτύξουμε μία εφαρμογή η οποία αναλαμβάνει να κλείσει ή να ανοίξει τα στόρια ενός δωματίου ανάλογα με τη φωτινότητα. Για να γίνει αυτό έχουμε μία συσκευή (Coordinator) συνδεδεμένη με ένα αισθητήρα φωτός και κάποια End Devices που θα ελέγχουν το μηχανισμό που ανοιγοκλείνει τα στόρια ανάλογα με τις εντολές που δέχονται από τον Coordinator. Αν οι End Devices χρησιμοποιούν το ίδιο Application Profile, μπορούν να δουλέψουν σωστά ακόμα και αν προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές!.

Application Layer Services

Παρομοίως με τα χαμηλότερα επίπεδα που περιγράψαμε έως τώρα, το APL περιλαμβάνει επίσης υπηρεσίες δεδομένων και διαχείρισης. Οι υπηρεσίες παρέχονται από το υπό-επίπεδο APS μέσω των οντοτήτων APSDE για τα δεδομένα

και APSME για την διαχείριση. Η πρόσβαση γίνεται με τα APSDE-SAP και APSME-SAP αντίστοιχα. Το APSDE έχει μόνο ένα primitive το APSDE-DATA. Το APSDE DATA.request παράγεται όταν ζητηθεί από το ανώτερο υπό-επίπεδο η αποστολή ενός ASDU. Οι καταστάσεις στις οποίες επιστρέφει το APSDE-DATA.confirm είναι:

- **SUCCESS** Όταν το ASDU μεταφέρεται επιτυχώς στο προορισμό του.
- **NO_BOUND_DEVICE** Αν δεν υπάρχουν στοιχεία στον Binding πίνακα.
- **NOT_SUPPORTED** Αν το primitive σταλεί σε μια συσκευή που δεν υποστηρίζει Binding πίνακα.
- **SECURITY_FAIL** Όταν η προσθήκη ασφάλειας στο πακέτο δεν είναι εφικτή ενώ απαιτείται από την παράμετρο TxOptions .
- **ASDU_TOO_LONG** Όταν το ASDU έχει μεγάλο μήκος και δεν γίνεται να χωριστεί σε μικρότερα τμήματα.

Το APSDE-DATA.indication δείχνει ότι ολοκληρώθηκε η μεταφορά ενός ASDU.

Τα primitive του APSME είναι τα ακόλουθα:

- **APSME-BIND** Το APSME-BIND.request ζητάει να συνδεθούν «λογικά» δυο συσκευές μεταξύ τους. Η διασύνδεση καταγράφεται στον Binding πίνακα. Όταν υπάρχει χώρος στον Binding πίνακα η λογική σύνδεση είναι εφικτή γιατί μπορεί να καταγραφεί με αποτέλεσμα το APSME-BIND.confirm να επιστρέψει σε κατάσταση «SUCCESS». Η κατάστασή του τίθεται σε «TABLE_FULL» όταν ο πίνακας είναι πλήρης και επομένως δεν γίνεται η σύνδεση Bind. Αν το primitive σταλεί σε μια συσκευή που δεν βρίσκεται σε κάποιο δίκτυο ή σε μια συσκευή που δεν υποστηρίζει Binding πίνακα τότε το APSME-BIND.confirm γίνεται «ILLEGAL_REQUEST».
- **APSME-UNBIND** Το APSME-UNBIND.request χρησιμοποιείται για να αποσυνδεθούν συσκευές που είναι λογικά συνδεδεμένες μεταξύ τους, αφαιρώντας την καταχώρηση που είχε τοποθετηθεί στο Binding πίνακα. Η καταχώρηση διαγράφεται εφόσον υπάρχει και οι συσκευές δεν θα είναι πλέον bound devices. Συνεπώς το APSME-UNBIND.confirm γίνεται «SUCCESS». Αν η καταχώρηση δεν υπάρχει το APSME-UNBIND.confirm θα τεθεί σε «INVALID_BINDING» ενώ η κατάστασή του θα γίνει «ILLEGAL_REQUEST» αν η εν λόγω συσκευή δεν βρίσκεται σε κάποιο δίκτυο ή δεν υποστηρίζει Binding πίνακα.
- **APSME-GET** Λειτουργεί όπως τα PLME-GET, MLME-GET και NLME-GET με τη διαφορά ότι επεξεργάζεται τα δεδομένα της AIB.

- **APSME-SET** Λειτουργεί όπως τα PLME-SET, MLME-SET και NLME-SET με τη διαφορά ότι επεξεργάζεται τα δεδομένα της AIB.
- **APSME-ADD-GROUP** Το APSME-ADD-GROUP.request δημιουργείται όταν θέλουμε να προσθέσουμε ένα Endpoint σε ένα σύνολο στοιχείων ώστε οι πληροφορίες που προορίζονται για το σύνολο αυτό να καταλήγουν και στο συγκεκριμένο Endpoint. Όταν το request ολοκληρωθεί με επιτυχία η κατάσταση του APSME-ADD-GROUP.confirm γίνεται «SUCCESS». Αν η τιμή της παραμέτρου GroupAddress βρεθεί εκτός του κανονικού της πεδίου, που είναι από 0x0000 ως 0xFFFF, τότε επιστρέφεται το APSME-ADDGROUP. confirm σε «INVALID_PARAMETER».
- **APSME-REMOVE-GROUP** Το APSME-REMOVE-GROUP.request παράγεται για να αφαιρεθεί ένα Endpoint από ένα σύνολο στοιχείων ώστε τα πακέτα που προορίζονται για το σύνολο αυτό να μην καταλήγουν πλέον στο συγκεκριμένο Endpoint. Όταν ο αποκλεισμός του Endpoint γίνει με επιτυχία η κατάσταση του APSME-REMOVE-GROUP.confirm γίνεται «SUCCESS». Αν η τιμή της παραμέτρου GroupAddress βρεθεί εκτός του κανονικού της πεδίου, τότε επιστρέφεται το APSME-REMOVE-GROUP.confirm σε «INVALID_PARAMETER».
- **APSME-REMOVE-ALL-GROUPS** Το APSME-REMOVE-ALL-GROUPS.request χρησιμοποιείται για να αφαιρεθεί το Endpoint από όλα τα σύνολα στοιχείων. Όταν το Endpoint αφαιρεθεί με επιτυχία η κατάσταση του APSME-REMOVE-GROUP.confirm γίνεται «SUCCESS». Αν η τιμή της παραμέτρου Endpoint βρεθεί εκτός του κανονικού της πεδίου,

που είναι από 0x01 ως 0xF0, τότε επιστρέφεται το APSME-REMOVE-GROUP.confirm σε «INVALID_PARAMETER».

Application PDU (Protocol Data Unit)

Παρακάτω φαίνεται η δομή του πακέτου στο Application Layer.

Το APS Header αποτελείται από τα εξής:

Frame Control(8 bits) : Περιέχει πληροφορίες για τον τύπο του πακέτου, τα πλαίσια διευθυνσιοδότησης και τις ρυθμίσεις ασφαλείας.

Destination EndPoint (8 bits): Δηλώνει για ποιο EndPoint προορίζεται το πακέτο. Αν η τιμή του είναι 0x00 τότε προορισμός είναι το ZDO αλλιώς για τιμές από 0x01 – 0x0f προορισμός θα είναι το αντίστοιχο Application Object από 1 έως 240.

Group Address (16 bits) : Περιέχει τη διεύθυνση του group των συσκευών προορισμού.

Cluster Identifier (16 bits) : Αναφέρει με ποιο cluster συσχετίζεται το πακέτο.

Profile Identifier (16 bits) : Αναφέρει το profile του πακέτου.

Source Endpoint (8 bits) : Δείνει το Endpoint από το οποίο προήλθε το πακέτο.

APS Header								APS Payload
Frame Control	Destination Endpoint	Group Address	Cluster ID	Profile ID	Source Endpoint	APS counter	Extended header	Frame Payload

General APS Frame Format

Τύποι Συσκευών

Σε ένα δίκτυο που λειτουργεί με βάση τη στοίβα πρωτοκόλλων του ZigBee, οι συσκευές μπορούν να διακριθούν σε πλήρους λειτουργίας (full-function device, FFD) και μειωμένης λειτουργίας (reduced-function device, RFD). Σε κάθε δίκτυο υπάρχει πάντοτε μία FFD που έχει το ρόλο του συντονιστή του δικτύου (PAN coordinator). Οι FFDs μπορούν να επικοινωνήσουν με όλες τις άλλες συσκευές, ενώ οι RFDs μόνο με μία FFD. Οι RFDs χρησιμοποιούνται σε πολύ απλές εφαρμογές. Ένα RFD υλοποιείται με τους ελάχιστους πόρους RAM και ROM και είναι σχεδιασμένο για να είναι ένας απλός στείλε ή/και λάβε κόμβος σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο. Με ένα μειωμένο μέγεθος σωρών δεδομένων, απαιτείται λιγότερη μνήμη, κατά συνέπεια ένα λιγότερο ακριβό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα ZigBee RFDs λειτουργούν γενικά με μπαταρίες. Τα RFDs μπορούν να ψάξουν για τα διαθέσιμα δίκτυα, να μεταφέρουν τα στοιχεία από την αίτησή τους ανάλογα με τις ανάγκες, να καθορίσουν εάν το στοιχείο αιτήματος είναι εκκρεμές, να αιτηθούν δεδομένα από το συντονιστή δικτύων, και να μπου σε λειτουργία ύπνου για εκτεταμένες χρονικές περιόδους για να μειώσουν την κατανάλωση μπαταριών. Το RFD μπορεί μόνο να μιλήσει σε ένα FFD, μια συσκευή με τους ικανοποιητικούς πόρους συστημάτων για τη δρομολόγηση δικτύων. Το FFD μπορεί να χρησιμεύσει ως συντονιστής δικτύων, ένας συντονιστής συνδέσεων ή ως ακριβώς μια άλλη συσκευή επικοινωνιών. Οποιοδήποτε FFD μπορεί να μιλήσει σε άλλα FFD και RFD. Το FFD ανακαλύπτει άλλα FFD και RFD για να καθιερώσει τις επικοινωνίες, και τροφοδοτείται συνήθως από καλώδιο τροφοδοσίας.

Χαρακτηριστικά καναλιών και διαμόρφωσης

Ένα σύνολο 27 καναλιών, αριθμημένα από 0 ως 26, είναι διαθέσιμα σε 3 ζώνες συχνοτήτων. Ένα κανάλι υπάρχει μεταξύ 868 και 868,6 MHz, 10 κανάλια μεταξύ 902 και 928 MHz και 16 κανάλια μεταξύ 2,4 και 2,4835 GHz. Κάθε συσκευή θα πρέπει να υποστηρίζει όλα τα κανάλια, εκτός και αν κάποια από αυτά δεν είναι ελεύθερα στην περιοχή που λειτουργεί. Στη ζώνη μεταξύ 2,4 και 2,4835 GHz κάθε 4 bits πληροφορίας σχηματίζουν ένα σύμβολο. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η εξάπλωση φάσματος άμεσης ακολουθίας (DSSS). Με αυτή κάθε σύμβολο μετατρέπεται σε μία ακολουθία των 32 chips. Η ακολουθία αυτή διαμορφώνεται με τη χρήση της αντισταθμισμένης QPSK και μορφοποιητικό παλμό μισού ημιτόνου. Τα άρτια chips χρησιμοποιούν την κανονική μορφή του φέροντος, ενώ τα περιττά την ορθογώνια μορφή του. Οι μορφοποιητικοί παλμοί των περιττών καθυστερούν σε σχέση με αυτούς των άρτιων κατά το μισό της διάρκειας του chip. Η μετάδοση στον αέρα ξεκινά με το λιγότερο σημαντικό chip. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνετε ρυθμός μετάδοσης ίσος με 250 kbps (ο ρυθμός μετάδοσης των chip είναι 2 Mcips/s). Στις άλλες δύο ζώνες τα bits πληροφορίας διέρχονται αρχικά από έναν διαφορικό κωδικοποιητή. Η ακολουθία εξόδου του προκύπτει από την σχέση: R_n είναι το bit πληροφορίας που κωδικοποιείται, E_n είναι η έξοδος του αποκωδικοποιητή και E_{n-1} είναι το προηγούμενο κωδικοποιημένο bit. Στη συνέχεια κάθε bit

μετατρέπεται σε μία ακολουθία των 15 chips. Η ακολουθία αυτή διαμορφώνεται με BPSK και μορφοποιητικό παλμό ανυψωμένου συνημιτόνου. Σε αυτή, η φάση του φέροντος εναλλάσσεται μεταξύ δύο τιμών που απέχουν κατά 180ο σε αντιστοίχιση με την τιμή του chip που μεταδίδεται. Η μετάδοση στον αέρα ξεκινά με το λιγότερο σημαντικό chip. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνετε ρυθμός μετάδοσης ίσος με 40 kbps στη ζώνη μεταξύ 902 και 928 MHz (ο ρυθμός μετάδοσης των chip σε αυτή είναι 600 Kchips/s) και 20 kbps στη ζώνη μεταξύ 868 και 868,6 MHz (ο ρυθμός μετάδοσης των chip σε αυτή είναι 300 Kchips/s). Ο πομπός, και στις 3 ζώνες συχνοτήτων, έχει ελάχιστη ισχύ εκπομπής ίση με -3 dBm, ενώ η μέγιστη περιορίζεται από τη νομοθεσία κάθε περιοχής. Ο κάθε πομπός έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του, έτσι ώστε να εκπέμπει πάντοτε με την ελάχιστη απαιτούμενη. Η ευαισθησία του δέκτη είναι -85 dBm ή καλύτερη στη ζώνη μεταξύ 2,4-2,4835 GHz και -92 dBm ή καλύτερη στις άλλες δύο. Η ευαισθησία ορίζεται ως η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς για να έχουμε ποσοστό λανθασμένων πλαισίων μικρότερο του 1% για πλαίσια με 20 bytes ωφέλιμο φορτίο.

Πρόσβαση στο κανάλι

Οι μεταδόσεις σε κάθε κανάλι μπορούν να γίνουν με δύο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο χρησιμοποιείται ο μηχανισμός πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος, αποφυγή συγκρούσεων και χωρίς χρονοσχισμές (unslotted CSMA-CA). Κάθε συσκευή πριν να μεταδώσει, ανιχνεύει το κανάλι. Αν είναι αδρανές, αρχίζει να μεταδίδει. Αν είναι κατειλημμένο, ο αποστολέας αναβάλλει τη

μετάδοση μέχρι το κανάλι να γίνει αδρανές. Στο δεύτερο τρόπο χρησιμοποιείται το υπερπλαίσιο, το οποίο οριοθετείται από τα αναγνωριστικά σήματα και χωρίζεται σε 16 χρονοσχισμές ίσης διάρκειας. Η διάρκειά του υπολογίζεται από τη σχέση . Το αναγνωριστικό σήμα στέλνεται πάντοτε στην πρώτη χρονοσχισμή. Τα σήματα αυτά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δομή του υπερπλαισίου, για το συγχρονισμό των συσκευών του δικτύου και για τον προσδιορισμό του δικτύου. Το υπερπλαίσιο μπορεί να έχει ένα ενεργό και ένα μη ενεργό μέρος. Η δομή και η διάρκειά του καθορίζονται από το συντονιστή του δικτύου. Κατά τη διάρκεια του μη ενεργού μέρους, ο συντονιστής δεν αλληλεπιδρά με το δίκτυο του και λειτουργεί με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το ενεργό μέρος αποτελείται από την περίοδο πρόσβασης με ανταγωνισμό (CAP) και από την περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (CFP). Στην CAP κάθε συσκευή που μεταδίδει χρησιμοποιεί το μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος, αποφυγή συγκρούσεων και χρονοσχισμές (slotted CSMA-CA). Αυτό είναι το ίδιο με το unslotted CSMA-CA, με τη διαφορά ότι οι μεταδόσεις ξεκινούν πάντοτε στην αρχή κάποιας χρονοσχισμής και σε περίπτωση κατειλημμένου καναλιού, ο αποστολέας αναβάλλει τη μετάδοση για τυχαίο αριθμό χρονοσχισμών. Όταν ένα κανάλι είναι αδρανές, η μετάδοση πραγματοποιείται μόνο αν υπάρχει αρκετός χρόνος για να ολοκληρωθεί πριν τη λήξη της CAP. Η CFP περιέχει κρατημένες χρονοσχισμές και βρίσκεται ακριβώς πριν το μη ενεργό μέρος. Οι χρονοσχισμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση εφαρμογών που απαιτούν συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Η CFP περιέχει κρατημένες χρονοσχισμές και βρίσκεται ακριβώς πριν το μη ενεργό μέρος. Οι χρονοσχισμές αυτές μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση εφαρμογών που απαιτούν συγκεκριμένο εύρος ζώνης.

Συχνότητες λειτουργίας

Οι συσκευές Bluetooth και ZigBee λειτουργούν στην παγκοσμίως ελεύθερη βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη (ISM band) που βρίσκεται στα 2,4 GHz (2,4-2,4835 GHz). Επιπλέον οι συσκευές ZigBee έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν και σε άλλες δύο ζώνες συχνοτήτων, 868-868,6 MHz και 902-928 MHz, με χαμηλότερους όμως ρυθμούς μετάδοσης. Για τη λειτουργία σε αυτές τις ζώνες δεν απαιτείται κάποια άδεια. Το γεγονός αυτό είναι θετικό γιατί συντελεί στο μηδενικό κόστος λειτουργίας των παραπάνω δικτύων. Δημιουργεί όμως προβλήματα παρεμβολών, αφού σε μία περιοχή μπορούν να λειτουργούν ελεύθερα πολλά τέτοια δίκτυα. Ένας κοινός τρόπος αντιμετώπισης των παρεμβολών από άλλες συσκευές είναι η μειωμένη ισχύς εκπομπής. Επιπρόσθετα, κάθε μία από τις παραπάνω τεχνολογίες έχει λάβει και τα δικά της μέτρα για την αντιμετώπισή τους. Οι συσκευές ZigBee χρησιμοποιούν την εξάπλωση φάσματος άμεσης ακολουθίας (DSSS) για την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Σε αυτή κάθε bit πληροφορίας μετατρέπεται σε μία ακολουθία από chips. Η διάρκεια του κάθε chip είναι πολύ μικρότερη από τη διάρκεια του bit. Με αυτό τον τρόπο το σήμα πληροφορίας μεταδίδεται χρησιμοποιώντας ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το απαιτούμενο. Αυτό είναι και ο λόγος που στο ZigBee υπάρχουν

μόνο 16 κανάλια στη ζώνη συχνοτήτων 2,4-2,4835 GHz. Στην πλευρά του δέκτη οι ακολουθίες των chips μετατρέπονται στα bits πληροφορίας και το επιθυμητό σήμα επανασυμπιέζεται. Οι παρεμβολές παραμένουν απλωμένες και ελάχιστα επηρεάζουν το σήμα πληροφορίας. Οι παρεμβολές από σήματα στενής ζώνης μπορούν να απομακρυνθούν με φιλτράρισμα πριν την επανασυμπίεση, χωρίς να έχουμε μεγάλη απώλεια πληροφορίας. Η DSSS επιτρέπει σε περισσότερους χρήστες να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι.

Ισχύς εκπομπής και ακτίνα δράσης

Η ισχύς εκπομπής των συσκευών Bluetooth εξαρτάται από την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Για την κατηγορία 1 κυμαίνεται από 0 dBm ως 20 dBm, για την κατηγορία 2 από -6 dBm ως 4 dBm και η κατηγορία 3 έχει μέγιστη ισχύ εκπομπής ίση με 0 dBm. Η ακτίνα δράσης είναι 10m στην κατηγορία 3 και μπορεί να φθάσει τα 100m στην κατηγορία 1. Οι συσκευές Bluetooth έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την εκπεμπόμενη ισχύ τους στην ελάχιστη απαιτούμενη για κάθε σύνδεση. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας κυμαίνεται από 1 ως 7 ημέρες.

Οι συσκευές ZigBee έχουν ελάχιστη ισχύ εκπομπής ίση με -3 dBm, ενώ η μέγιστη περιορίζεται από τη νομοθεσία κάθε περιοχής. Η ακτίνα δράσης μπορεί να φθάσει τα 75m, ενώ η διάρκεια ζωής της μπαταρίας κυμαίνεται από 100 ως 1000 ημέρες. Για τις συσκευές IrDA η ελάχιστη και η μέγιστη εκπεμπόμενη πυκνότητα ισχύος είναι

40 και 500 mW/Sr αντίστοιχα. Η ακτίνα δράσης μπορεί να φθάσει το 1m. Για τις φορητές συσκευές, όπου η κατανάλωση ισχύος είναι χαμηλή, η ακτίνα δράσης δεν ξεπερνά τα 20 με 30cm. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας κυμαίνεται από 1 ως 7 ημέρες

Αυνατότητες δικτύων

Σε ένα δίκτυο Bluetooth μπορούν να υπάρχουν μέχρι και 8 ενεργές συσκευές ταυτόχρονα, ένας master και 7 slaves. Όλες οι μεταδόσεις γίνονται από το master προς κάποιο slave και αντίστροφα. Οι slaves δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Τα μεταδιδόμενα πλαίσια μπορούν να έχουν ωφέλιμο φορτίο μέχρι και 1021 bytes. Τα περισσότερα από αυτά περιέχουν κώδικα ανίχνευσης λαθών και κώδικα διόρθωσης λαθών, για την παροχή αξιόπιστων συνδέσεων. Επιπλέον υποστηρίζονται και οι επαναμεταδόσεις λανθασμένων πλαισίων. Το BER είναι 0,1% στην περίπτωση του βασικού ρυθμού μετάδοσης και 0,01% στην περίπτωση του επαυξημένου ρυθμού. Οι συσκευές Bluetooth παρέχουν υπηρεσίες προσανατολισμένες σε σύνδεση και υπηρεσίες χωρίς σύνδεση. Τα μεταφερόμενα δεδομένα μπορεί να είναι είτε ασύγχρονα είτε ισόχρονα. Για τα ισόχρονα δεδομένα γίνεται δέσμευση χρονοσχημάτων από το master και παρέχονται μέχρι και 3 πλήρως αμφίδρομα κανάλια. Οι συσκευές ZigBee επιτρέπουν τη δημιουργία μεγαλύτερων και πιο πολύπλοκων δικτύων. Κάθε δίκτυο μπορεί να έχει μέχρι και 65536 συσκευές, μία από αυτές θα είναι ο συντονιστής του δικτύου. Δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται όλες οι συσκευές μέσα στην ακτίνα δράσης του συντονιστή. Οι συσκευές του δικτύου διακρίνονται σε πλήρους και μειωμένης λειτουργίας. Οι

πρώτες μπορεί να είναι συνδεδεμένες με αρκετές συσκευές του δικτύου, ενώ οι δεύτερες μόνο με το γονέα τους. Ορίζονται αλγόριθμοι για την ανάθεση διευθύνσεων (16 bits) στις συσκευές του δικτύου και για τη δρομολόγηση των πλαισίων. Κάθε συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με όλες τις άλλες συσκευές του δικτύου. Τα μεταδιδόμενα πλαίσια έχουν ωφέλιμο φορτίο μέχρι 127 bytes, περιέχουν κώδικα ανίχνευσης λαθών και επαναμεταδίδονται σε περίπτωση που κάποιο λάθος ανιχνευθεί. Το ποσοστό των λανθασμένων πλαισίων είναι μικρότερο του 1% για πλαίσια με 20 bytes ωφέλιμο φορτίο. Δεν υποστηρίζεται η μετάδοση φωνής. Σε κάθε υπερπλαίσιο μπορούν να δεσμευθούν μέχρι και 7 χρονοσχισμές για την εξυπηρέτηση υπηρεσιών που απαιτούν συγκεκριμένο εύρος ζώνης.

Κεφάλαιο 4

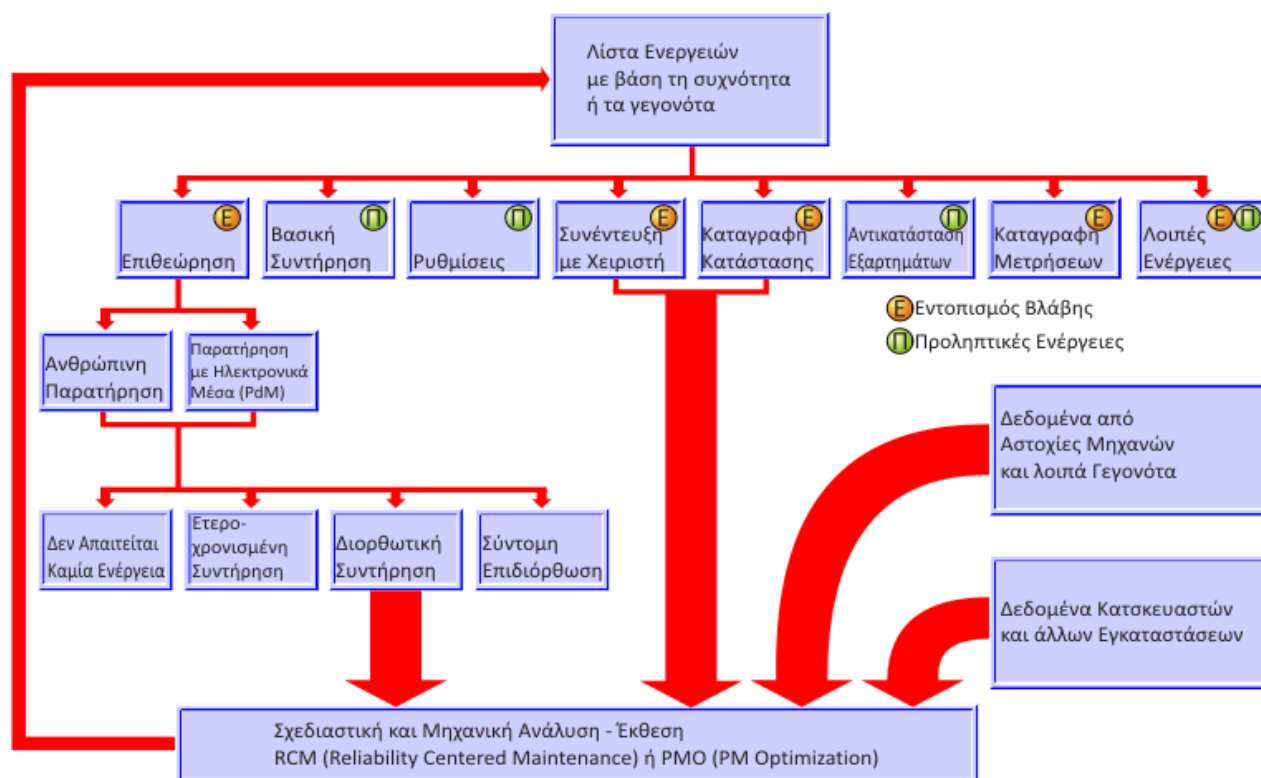
Predictive Maintenance και Preventive Maintenance

Μία σημαντική εφαρμογή στη βιομηχανία αφορά στο Preventive Maintenance (PM) το οποίο περιλαμβάνει ενέργειες με στόχο τη συντήρηση των μηχανών και των εγκαταστάσεων σε ικανοποιητική λειτουργική κατάσταση καθώς και συστηματική επιθεώρηση και διόρθωση αστοχιών πριν εξελιχθούν σε μεγάλα προβλήματα. Η συντήρηση αυτή στηρίζεται σε διαρκείς ελέγχους, μετρήσεις διορθώσεις και αντικαταστάσεις εξαρτημάτων, που στοχεύουν στην αποφυγή δημιουργίας αστοχιών. Γενικότερα, το Preventive Maintenance βασίζεται σε αυστηρό προγραμματισμό της συντήρησης των εξαρτημάτων των μηχανών και των εγκαταστάσεων.

Σήμερα το μοντέλο συντήρησης που κυριαρχεί δεν είναι μόνο η PM αλλά PM και PdM. Δηλαδή, μία συντήρηση που δεν βασίζεται απλά στον σταθερό προγραμματισμό συντήρησης και αντικατάστασης

εξαρτημάτων, αλλά βασίζεται στις πληροφορίες που συλλέγονται συνεχώς για την λειτουργία της εγκατάστασης. Οι πληροφορίες αυτές αναλύονται και επεξεργάζονται με διάφορους σύγχρονους αλγόριθμους, ώστε να προκύπτει ένα δυναμικό πρόγραμμα συντήρησης, που στοχεύει στην ελάχιστη δυνατή οικονομική επιβάρυνση του τελικού προϊόντος.

Η εξέλιξη του Predictive Maintenance (PM) είναι το Preventive Maintenance (PdM) ή Condition Based Maintenance. Με τη βοήθεια CMMS (Computerized Maintenance Management Systems), ο τρόπος αυτός συντήρησης βασίζεται σε διαδικασίες αξιολόγησης της κατάστασης του εξοπλισμού με περιοδική ή συνεχή παρακολούθηση αυτής. **Ο στόχος της PdM είναι να πραγματοποιηθεί μια συντήρηση όταν αυτή είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα και πριν το εξάρτημα παύει να έχει τη βέλτιστη απόδοσή του.** Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε πως συνδέονται οι λειτουργίες αυτές.



Η λίστα ενεργειών αποτελείται από προκαθορισμένες ή ασύγχρονες ενέργειες λόγω αλλαγής καταστάσεων. Οι ενέργειες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις ενέργειες πρόληψης και στις ενέργειες κατόπιν εντοπισμού μίας βλάβης. Με το αντίστοιχο σύμβολο δηλώνεται η κατηγορία στην οποία ανήκουν οι εκάστοτε ενέργειες. Συγκεκριμένα:

1. Με τον εντοπισμό της βλάβης πρέπει να εκτελεστεί επιθεώρηση των μηχανών, συνέντευξη με τον χειριστή, καταγραφή της κατάστασης και των μετρήσεων διαφόρων φυσικών μεγεθών.
2. Για προληπτικούς λόγους εκτελούνται βασικές συντηρήσεις, όπως λίπανση, διάφορες ρυθμίσεις, όπως σφίξιμο κοχλιών, και αντικατάσταση εξαρτημάτων.

Εκτός των παραπάνω ενεργειών μπορούν να υπάρχουν και άλλες κατηγορίες ανάλογα την ιδιαιτερότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

Η επιθεώρηση των μηχανών βασίζεται στην ανθρώπινη παρατήρηση και στις καταγραφές διαφόρων παραμέτρων από ηλεκτρονικά όργανα μετρήσεων και αισθητήρες. Αυτό ακριβώς είναι και ο ορισμός της PdM.

Με την επιθεώρηση μπορούμε να αποφανθούμε είτε ότι δεν απαιτείται καμία ενέργεια, είτε ότι χρειάζεται μία συντήρηση εκτός προγραμματισμού, είτε ότι απαιτείται τροποποίηση της συντήρησης, είτε σύντομη επιδιόρθωση της μηχανής.

Όλα τα δεδομένα, επισημάνσεις και συμπεράσματα των επιθεωρήσεων, παρατηρήσεις των χειριστών, καταγραφές των καταστάσεων, ιστορικό των μηχανών και στοιχεία των κατασκευαστών, συλλέγονται και αναλύονται στο κέντρο συντήρησης, ώστε να αναπροσαρμόζεται η λίστα των ενεργειών.

Όπως, είναι ευνόητο, αυτό το κέντρο συντήρησης θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν περισσότερες και ακριβέστερες πληροφορίες, στο ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα.

Επειδή, η ανθρώπινη παρατήρηση είναι μεν η πιο σημαντική πηγή πληροφορίας, αλλά είναι υποκειμενική και όχι σε ξεκάθαρη μορφή ώστε να γίνει ψηφιακή επεξεργασία αυτής, το μοντέλο PdM εισάγει τη συνεχή ή μη παρατήρηση της κατάστασης των μηχανών με ηλεκτρονικούς αισθητήρες και διατάξεις. Η παρατήρηση αυτή, έχει σκοπό την συγκέντρωση πληροφοριών, ώστε να παράγονται αυτόματα συμπεράσματα για την κατάσταση της λειτουργίας των μηχανών.

Ζούμε στην ψηφιακή εποχή και όλα τείνουν να ψηφιοποιούνται, διότι οποιαδήποτε ψηφιακή πληροφορία αποθηκεύεται, επεξεργάζεται και διαδίδεται πολύ εύκολα με τα μέσα της εποχής μας.

Ομοίως και οι αισθητήρες έχουν μετατραπεί σε ψηφιακούς, δηλαδή το μετρούμενο φυσικό μέγεθος μετατρέπεται σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια σε ψηφιακό, ώστε να σταλεί σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για αποθήκευση, ανάλυση και αναπαράσταση.

Η υλοποίηση της PdM, απαιτεί την χρήση ψηφιακών αισθητήρων για την παρακολούθηση διαφόρων φυσικών μεγεθών, που

χαρακτηρίζουν την εκάστοτε κατάσταση μίας μηχανής. Σήμερα, χρησιμοποιούνται ήδη αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, κραδασμών, υπέρυθρων, ακουστικών συχνοτήτων και υπέρηχων, ενώ γίνεται προσπάθεια υλοποίησης αισθητήρων ανάλυσης των λιπαντικών.

Διάφοροι αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί και αναπτύσσονται διαρκώς για την επεξεργασία αυτών των μετρήσεων.

Το νέο μοντέλο συντήρησης απαιτεί την ύπαρξη ενός υπολογιστικού κέντρου που συλλέγει όλη τη διαθέσιμη πληροφορία την αποθηκεύει και την επεξεργάζεται. Δηλαδή, τα δεδομένα όλων των αισθητήρων θα πρέπει να μεταφέρονται σε ένα υπολογιστικό κέντρο. Στην πράξη μία τέτοια προσπάθεια συναντά ανυπέρβλητα εμπόδια, όπως η καλωδίωση και η μετάδοση του αναλογικού σήματος σε μεγάλες αποστάσεις, χωρίς την ύπαρξη θορύβου. Έτσι, καθώς ο ψηφιακός αυτοματισμός των μηχανών με PLCs, Industrial PCs κτλ, είναι πια δεδομένος στις γραμμές παραγωγής, υπάρχει κατάτμηση των αισθητήρων σε ημιανεξάρτητες υπολογιστικές μονάδες και η κάθε μονάδα στέλνει την ψηφιοποιημένη πληροφορία στην κεντρική βάση επεξεργασίας. Επίσης, επειδή ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος και υπάρχει περιορισμός στη χωρητικότητα των δικτύων των υπολογιστών, προχωρήσαμε στην εκτέλεση μέρους της επεξεργασίας των μετρήσεων στις επιμέρους μονάδες και την αποστολή μόνο των αποτελεσμάτων αυτών στο κεντρικό σύστημα.

Δυστυχώς, στην εφαρμογή της θεωρίας στην πράξη, πάλι υπάρχουν πολλά προβλήματα, όπως:

1. Υπάρχει ακόμα μεγάλος αριθμός μηχανών που δεν διαθέτουν ενσωματωμένο σύστημα ψηφιακού ελέγχου ή ψηφιακούς αισθητήρες.
2. Η κάθε μηχανή έχει δικό της σύστημα ελέγχου και πρέπει να δημιουργηθούν λογισμικές εφαρμογές για το κάθε σύστημα, ώστε να υπάρχει συνεργασία των υποτμημάτων.
3. Δεν υποστηρίζουν όλα τα συστήματα κοινά πρωτόκολλα επικοινωνίας.
4. Σε περιπτώσεις, όπου απαιτούνται ειδικές μετρήσεις, δεν είναι εύκολη η διακοπή της λειτουργίας της μηχανής και η προσθήκη αισθητήρων σε αυτή.
5. Η τροποποίηση των μηχανών, ώστε να προσαρμοστούν σε νέες απαιτήσεις του PdM μοντέλου δεν είναι εύκολη και συχνά είναι δαπανηρή.

Για τους λόγους αυτούς και αρκετούς ακόμα, τους οποίους οι άνθρωποι της συντήρησης και της παραγωγής, γνωρίζουν καλλίτερα, υπήρξε τα τελευταία χρόνια η εισαγωγή του όρου «έξυπνος αισθητήρας».

Ένα δίκτυο έξυπνων αισθητήρων είναι ευρέως γνωστό με την ονομασία “Smartdust”.

Από το 2001, οπότε και ο Kristofer Pister εισήγαγε τον όρο SmartDust, έχουν γίνει μεγάλες τεχνολογικές προσπάθειες, ώστε να υλοποιηθεί αυτή η ιδέα.

SmartDust ονομάζεται ένα σύνολο από διατάξεις μεγέθους κόκκου άμμου, οι οποίες περιλαμβάνουν ηλεκτρομηχανικούς αισθητήρες,

διαθέτουν υπολογιστική μονάδα, επικοινωνούν ασύρματα και είναι ενεργειακά αυτόνομες.

Φυσικά, απέχουμε ακόμα από την πλήρη υλοποίηση του SmartDust. Ωστόσο, στην παρούσα χρονική στιγμή η τεχνολογία μας δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης των πρώτων έξυπνων αισθητήρων με αποδεκτά χαρακτηριστικά και πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα στις εφαρμογές αυτών.

Την τελευταία πενταετία υπήρξε ένα ξέσπασμα τεχνολογικών επιτευγμάτων στον τομέα των αισθητήρων MEMS, στον τομέα της ψηφιακής ασύρματης επικοινωνίας, στην παραγωγή επεξεργαστών χαμηλού κόστους και με πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος και τέλος στην αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φως, τη μηχανική κίνηση κτλ.

Οι εφαρμογές των έξυπνων αισθητήρων σήμερα είναι πολλές και σε διάφορους τομείς. Όμως, ιδιαίτερη συζήτηση, μελέτες και προσπάθειες γίνονται στον τομέα της Βιομηχανίας και συγκεκριμένα στις μεταφορές και στη συντήρηση.

Με την εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου αισθητήρων μπορεί να επιτευχθεί πραγματικά το μοντέλο του PdM.

Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να αποτελέσουν ένα εντελώς αυτόνομο δίκτυο συλλογής μετρήσεων, το οποίο θα παρακολουθεί τη κάθε μηχανή και το κάθε νευραλγικό σημείο της γραμμής παραγωγής, θα αναλύει τις μετρήσεις και θα εξάγει συμπεράσματα για την κατάσταση αυτών. Η πληροφορία αυτή θα είναι συνεχής, ενώ η τροποποίηση και προσαρμογή του συστήματος σε νέες συνθήκες και απαιτήσεις θα είναι απλή και ανέξοδη.

Το προσωπικό της συντήρησης θα έχει ένα εργαλείο που θα λειτουργεί και θα προγραμματίζεται εντελώς ανεξάρτητα από οποιοδήποτε σύστημα αυτοματισμού και ελέγχου του εργοστασίου και της εκάστοτε μηχανής. Ένα αυτόνομο σύστημα που θα το τροποποιεί , θα το επεκτείνει και θα το διαμορφώνει, χωρίς την παρακώληση της παραγωγικής διαδικασίας και την αναγκαστική εμπλοκή άλλων τμημάτων.

Τέτοια συστήματα θα αποτελούν στο άμεσο μέλλον, την ομπρέλα των γραμμών παραγωγής που θα εξασφαλίζουν τη συνεχή λειτουργία αυτών με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Κεφάλαιο 5

Toolware Monitoring

Οπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, οι tooling machines παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη βιομηχανία και η συντήρησή τους αλλά και η παρακολούθηση της κατάστασής τους αποτελούν ζητήματα μείζονος σημασίας. Για να προχωρήσουμε λοιπόν στην ανάπτυξη του συστήματος που προτείνουμε σκόπιμο είναι κάνουμε μία αναλυτική περιγραφή των παραμέτρων φθοράς των tooling machines αλλά και των μεθόδων ανάλυσης δεδομένων που αφορούν το toolware monitoring.

Σύντομη περιγραφή

Το ποσοστό χρήσης των κεφαλών ενός εργαλείου μπορεί να αυξηθεί αν εφαρμοστούν προηγμένες μέθοδοι παρακολούθησης όπως σύγχρονοι αισθητήρες και κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Για την παρακολούθηση της φθοράς ενός τρυπανιού υπάρχει ένας αριθμός από παραμέτρους όπως είναι οι δονήσεις που αναπτύσσονται στους τρεις άξονες (x , y , z vibration), ο εκπεμπόμενος ήχος (sound emission), η καταναλισκόμενη ισχύς από τα διάφορα μέρη της μηχανής, οι αναπτυσσόμενες αξονικές και εγκάρσιες δυνάμεις, η θερμοκρασία, η ροπή, οι δυνάμεις ολίσθησης που μπορούν να παρατηρηθούν. Αυτές οι παράμετροι, ή ένα μέρος αυτών, αφού ληφθούν με την χρήση των αντίστοιχων αισθητήρων, μπορούν να αναλυθούν στο πεδίο του χρόνου, στο πεδίο των συχνοτήτων ή μέσω άλλων μετασχηματισμών όπως είναι ο μετασχηματισμός κυματιδίου και η ανίχνευση περιβάλλουσας. Ύστερα με την ανάπτυξη κατάλληλων συστημάτων διάγνωσης και πρόγνωσης σφαλμάτων όπως είναι για παράδειγμα τα νευρωνικά δίκτυα και η ασαφής λογική είναι δυνατόν να γίνει πρόγνωση της κατάστασης του εργαλείου κοπής, έτσι ώστε τελικά να έχει αναπτυχθεί ένα αυτόματο διαγνωστικό σύστημα το οποίο θα έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος κοπτικών εργαλείων και για διαφορετικές συνθήκες κοπής και να είναι σε θέση να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα όσον αφορά την κατάσταση λειτουργίας της μηχανής και τον χρόνο αντικατάστασης των κοπτικών εργαλείων.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι τύποι φθοράς των κοπτικών εργαλείων, ποιων φυσικών παραμέτρων η ανάλυση είναι καταλληλότερη να χρησιμοποιηθεί και ποιες είναι οι καλύτερες μέθοδοι, ώστε να αναπτυχθεί ένα αυτόματο σύστημα το

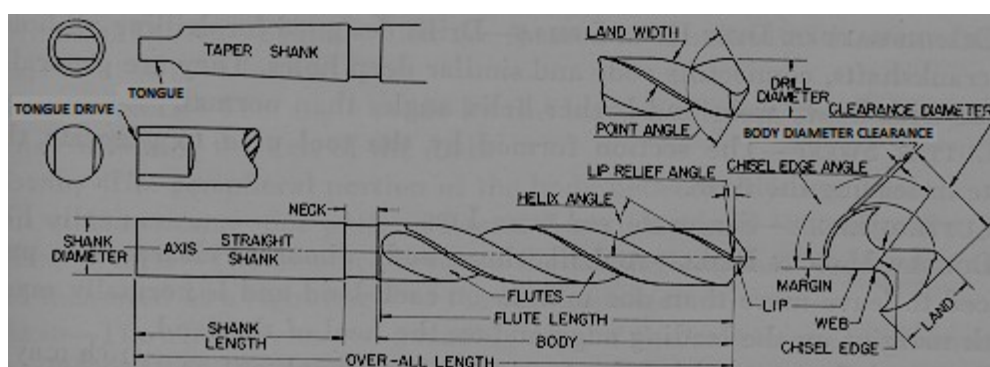
οποίο θα είναι σε θέση να παρακολουθεί την εύρυθμη λειτουργία των μηχανών κοπής και διαμόρφωσης μεταλλικών εξαρτημάτων και να προβλέπει τότε το κοπτικό εργαλείο έχει φθάσει το τέλος ζωής του και είναι ανάγκη να γίνει αντικατάσταση του.

Ορολογία διαδικασιών κοπής-κοπτικών εργαλείων

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε τη βασική ονοματολογία των διαφόρων μερών ενός κοπτικού εργαλείου (τρυπανιού), καθώς και την ορολογία των βασικών παραμέτρων κοπής.

Ονομασία μερών κοπτικών εργαλείων

Στο σχήμα 1 βλέπουμε τα μέρη από τα οποία αποτελείται η κεφαλή ενός τρυπανιού, την οποία από εδώ και πέρα θα την αναφέρουμε για ευκολία ως τρυπάνι. Η κεφαλή αυτή χωρίζεται σε τρία κύρια μέρη, τον λαιμό (neck), την κνήμη (shank) και το κυρίως σώμα (body). Το κυρίως σώμα είναι αυτό που έρχεται σε επαφή με το μέταλλο που είναι για διαμόρφωση και αυτό είναι που φθείρεται. Το κυρίως σώμα αποτελείται από αυλακώσεις (flutes), οι οποίες στον αριθμό είναι τουλάχιστον δύο



Σχήμα 1: Μέρη κεφαλής τρυπανιού

Οι ονομασίες και οι ορισμοί των μερών της κεφαλής ενός τρυπανιού είναι οι παρακάτω:

Άξονας (axis). Η νοητή διαμήκης γραμμή περιστροφής που διαμορφώνεται από την ένωση των αξόνων περιστροφής της κνήμης, του λαιμού και του κυρίως σώματος και αποτελεί τον άξονα περιστροφής του τρυπανιού.

Ολικό μήκος (overall length). Το μήκος από την άκρη της κνήμης (shank) έως τις εξωτερικές γωνίες των χειλών κοπής (cutting lips). Το ολικό μήκος είναι το άθροισμα του μήκους της κνήμης (shank length), του μήκους του κυρίου σώματος (body) και του λαιμού (neck). Δεν περιλαμβάνει το κωνικό τέλος της κνήμης (tongue) εφόσον αυτό υπάρχει, το οποίο προορίζεται για να εφαρμόζεται η κεφαλή.

Κνήμη (shank). Το μέρος του τρυπανιού από το οποίο κρατείται στην μηχανή. Αντίστοιχα έχουμε το μήκος της κνήμης (shank length) και την διάμετρο της κνήμης (shank diameter). Η κνήμη σε άλλες περιπτώσεις έχει σε όλο το μήκος της την ίδια διάμετρο (straight shank), ενώ σε άλλες η διάμετρος στην άκρη είναι μικρότερη (taper shank).

Λαιμός (neck). Το μέρος που ενώνει την κνήμη και το κυρίως μέρος, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις έχει μικρότερη διάμετρο από την κνήμη και το κυρίως σώμα.

Κυρίως σώμα (body). Το κυρίως σώμα είναι αυτό που ξεκινά από τον λαιμό και εκτείνεται μέχρι την άκρη των χειλών κοπής. Είναι αυτό που έρχεται κυρίως σε επαφή με το μέταλλο που είναι για

διαμόρφωση και αυτό είναι που φθείρεται. Το κυρίως σώμα αποτελείται από αυλακώσεις (flutes) οι οποίες είναι τουλάχιστον δύο.

Αυλάκια (flutes). Τα αυλάκια είναι ελικοειδείς ή ευθείες αυλακώσεις διαμορφωμένες στο κυρίως σώμα του τρυπανιού, οι οποίες στις άκρες τους διαμορφώνουν τα χείλη κοπής. Μέσω των αυλακώσεων αυτών είναι επιτρεπτή η αφαίρεση και απομάκρυνση των τσιπ (chips) που αφαιρούνται από το υπό διαμόρφωση μέταλλο, όπως επίσης μέσω αυτών επιτρέπεται και η ροή υγρών για την διατήρηση ανεκτών θερμοκρασιών κατά την διάρκεια κοπής. Αντίστοιχα έχουμε και το μήκος των αυλακιών (flute length), το οποίο είναι το μήκος από την αρχή των αυλακιών έως τις εξωτερικές γωνίες των χειλών κοπής.

Γωνία ελίκων (helix angle). Η γωνία που διαμορφώνεται από τον άξονα της κεφαλής και των ελίκων που διαμορφώνονται από τα αυλάκια.

Χείλη κοπής (cutting lips). Οι ακμές κοπής οι οποίες εκτείνονται από την ακμή σμίλης έως την περιφέρεια.

Γωνία ανακούφισης χειλών (lip relief angle). Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κάθετη στον κεντρικό άξονα και της εφαπτομένης στο εξωτερικό άκρο του χείλους κοπής.

Ακμή σμίλης (chisel edge). Η ακμή στο τέλος του ιστού (web) που συνδέει τα χείλη κοπής.

Γωνία ακμής σμίλης (chisel edge angle). Η γωνία που περιλαμβάνεται μεταξύ της ακμής σμίλης και του χείλους κοπής.

Ιστός (web). Το κεντρικό μέρος του κυρίου σώματος που ενώνει τις επιφάνειες (lands). Η μία άκρη του ιστού διαμορφώνει την ακμή σμίλης σε τρυπάνι δύο αυλακιών.

Πλευρική επιφάνεια (land). Το περιφερειακό τμήμα του κυρίου σώματος μεταξύ γειτονικών αυλακιών.

Πλάτος πλευρικής επιφάνειας (land width): Η απόσταση μεταξύ της αρχής και του τέλους της πλευρικής επιφάνειας.

Σημείο κοπής (point). Η επιφάνεια που έρχεται πρώτη σε επαφή με το μέταλλο. Η επιφάνεια αυτή δημιουργείται από τις άκρες των πλευρικών επιφανειών και του ιστού. Το σημείο κοπής με περιστροφή δημιουργεί μια κωνική επιφάνεια.

Γωνία σημείου (point angle). Η γωνία που σχηματίζεται από τα χείλη κοπής.

Περιθώριο (margin). Το μέρος της επιφάνειας κοπής που δεν έχει απομακρυνθεί για λόγους καθαρισμού.

Διάμετρος τρυπανιού (drill diameter). Η συνολική διάμετρος του τρυπανιού, συμπεριλαμβανομένων των περιθωρίων.

Διάμετρος καθαρισμού (clearance diameter). Η διάμετρος κοπής που αναλογεί στην επιφάνεια κοπής.

Διάμετρος καθαρισμού σώματος (body diameter clearance). Το ποσοστό της επιφάνειας κοπής που έχει αποκοπεί ώστε η επιφάνεια κοπής να μην έρχεται σε επαφή με τα τείχη της τρύπας που ανοίγει.

Ορολογία παραμέτρων κοπής

Οι βασικές παράμετροι κοπής, από τις οποίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η διαδικασία αυτή, είναι επιγραμματικά οι παρακάτω:

Ρυθμός τροφοδοσίας (feed rate): Ο ρυθμός που το τρυπάνι προχωρά μέσα στο υλικό ανά αυλάκι.

Ταχύτητα κοπής (cutting speed): Η ταχύτητα που προχωρά το τρυπάνι μέσα στο υλικό. Συνήθως μετريέται σε χιλιοστά ανά λεπτό (mm/min).

Ταχύτητα περιστροφής (rotational speed): Ο αριθμός των περιστροφών ανά λεπτό (revolutions/min)

Τύποι φθοράς κοπτικών εργαλείων

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι φθοράς κοπτικών εργαλείων: η προοδευτική και η καταστροφική φθορά. Ο πρώτος τύπος είναι συνδεδεμένος με την προοδευτική εξέλιξη φαινομένων που εμφανίζονται ως προοδευτική απώλεια υλικού σε συγκεκριμένα σημεία του κοπτικού εργαλείου, θα αναλυθούν παρακάτω, ενώ ο δεύτερος τύπος εμφανίζεται ως θραύση ή πλαστική παραμόρφωση του εργαλείου και συμβαίνει, είτε απότομα, είτε ως επακόλουθο του πρώτου τύπου. Με την αυστηρή έννοια του όρου, ως φθορά χαρακτηρίζεται μόνο ο πρώτος τύπος.

Γενικά οι παράγοντες που επηρεάζουν τη φθορά των τρυπανιών είναι πολλοί και διαφέρουν ανάλογα με τις συνθήκες κοπής καθώς και με το ζεύγος μετάλλου προς διαμόρφωση – τρυπανιού.

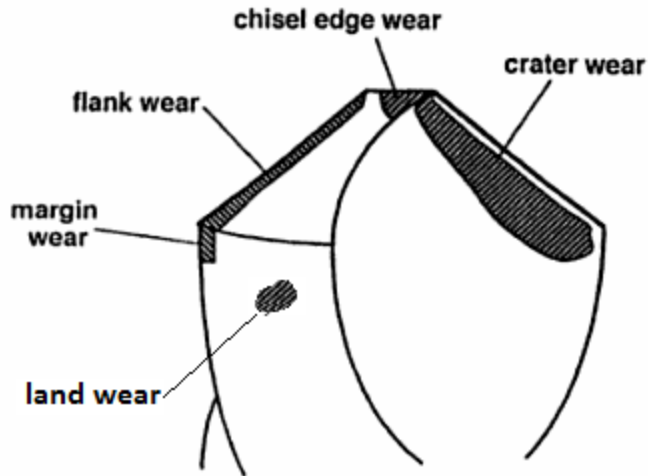
Παρόλα αυτά τρείς είναι οι καθοριστικοί:

Η διαφορά στη σκληρότητα του τρυπανιού σε σχέση με το μέταλλο προς επεξεργασία. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά, τόσο μικρότερη είναι η φθορά του εργαλείου.

Η τάση που δείχνουν τα υλικά μετάλλου - τρυπανιού για «συγκόλληση» με διάφορους φυσικό-χημικούς μηχανισμούς (όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τάση, τόσο μεγαλύτερη είναι η φθορά του τρυπανιού). Με αυτή την τάση συνδέεται και η δημιουργία ακμής (build-up edge), που αρχίζει με την προσκόλληση στρώματος υλικού του μετάλλου γύρω από τα χείλη κοπής, συνεχίζεται με την απόθεση νέων, τα οποία κάποια στιγμή θρυμματίζονται σε κομμάτια, ένα ποσοστό από τα οποία προσκολλώνται στην επεξεργασμένη επιφάνεια και την καταστρέφουν.

Θερμική αγωγιμότητα του εργαλείου, έτσι ώστε στην ιδανική περίπτωση να απάγεται εύκολα η θερμότητα.

Στο σχήμα 2 βλέπουμε τους κυριότερους τύπους προοδευτικής φθοράς σε ένα τρυπάνι. Αυτοί επιγραμματικά είναι η φθορά της ακμής σμίλης (chisel edge wear), η φθορά των χειλών κοπής ή φθορά πλαϊνών (lip or flank wear), η φθορά του περιθωρίου (margin wear), η φθορά πλευρικής επιφάνειας (land wear), η φθορά τύπου κρατήρα (crater wear) και οι αποκολλήσεις (chipping).



Σχήμα 2: Κύριοι τύποι φθοράς τρυπανιού

Φθορά ακμής σμίλης (chisel edge wear)

Η φθορά της ακμής σμίλης, η φθορά δηλαδή στην κεντρική ακμή του τρυπανιού, συμβαίνει λόγω τριβής και πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτού του τύπου η φθορά μπορεί να διπλασιάσει ή ακόμα και να τριπλασιάσει την ώση που απαιτείται και να επηρεάσει την ακρίβεια στο κεντράρισμα του τρυπήματος.

Φθορά χειλών κοπής ή φθορά πλαϊνών (lip or flank wear)

Εμφανίζεται λόγω ολίσθησης/τριβής του τρυπανιού στο μέταλλο, πλαστικής παραμόρφωσης και ανεπαρκούς ελευθερίας του τρυπανιού λόγω ακατάλληλης λείανσης του σημείου κοπής. Η φθορά του χείλους κοπής αυξάνει την απαιτούμενη ώση κοπής, την κατανάλωση και την μέγιστη θερμοκρασία του χείλους κοπής, που με τη σειρά του οδηγεί σε μαλάκωμα του τρυπανιού και περαιτέρω φθορά, όπως επίσης και σε σταδιακή μείωση του βάθους κοπής.

Φθορά περιθωρίου και φθορά πλευρικής επιφάνειας (margin and land wear)

Συμβαίνουν λόγω τριβής και μαλακώματος του τρυπανιού λόγω αυξημένων θερμοκρασιών. Αυξημένη φθορά έχει ως αποτέλεσμα αυξημένα σφάλματα στις διαστάσεις των τρυπών που ανοίγονται όπως και κακό φινίρισμα των επιφανειών του μετάλλου. Ειδικά λόγω φθοράς περιθωρίου παράγονται τρύπες μικρότερων διαστάσεων από τις απαιτούμενες εκτός και αν η φθορά αυτή συνοδεύεται από φαινόμενα δημιουργίας ακμής, οπότε μπορεί και να οδηγηθούμε σε αυξημένες διαστάσεις τελικά.

Φθορά Κρατήρα (Crater wear)

Εμφανίζεται στην επιφάνεια του αυλακιού λόγω μαλακώματος του τρυπανιού από αυξημένες θερμοκρασίες. Επίσης και οι αναπτυσσόμενες μηχανικές τάσεις σε αυτά τα σημεία είναι μεγάλες. Φθορά σε μέτριο βαθμό δεν επηρεάζει αισθητά την διαδικασία και την ποιότητα κοπής, αλλά υπερβολική φθορά μειώνει την αντοχή του τρυπανιού και οδηγεί σε πλαστική παραμόρφωση ή θραύση του μετάλλου.

Αποκολλήσεις (Chipping)

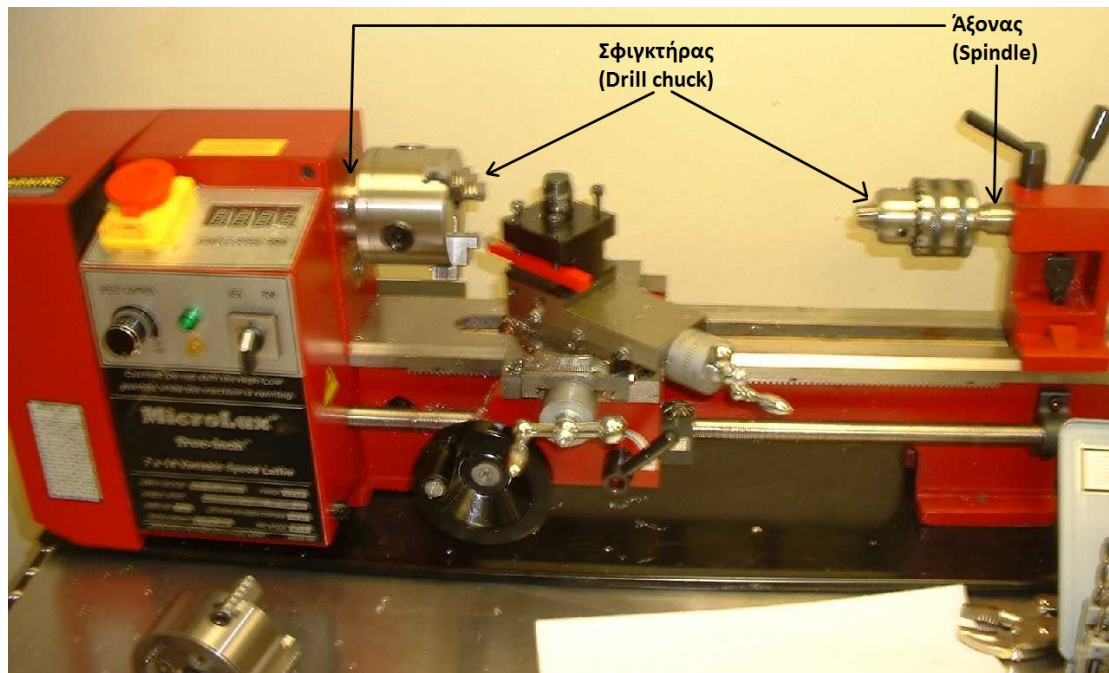
Αυτές συμβαίνουν είτε σε μικροκλίμακα οπότε εμπίπτουν στη φθορά, είτε σε μάκρο-κλίμακα οπότε εμπίπτουν στην καταστροφική θραύση. Οφείλονται σε μηχανικά σοκ και σε θερμική κόπωση που παρατηρείται συνήθως σε διακοπτόμενη κοπή. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται ρωγμές κάθετες στην ακμή κοπής.

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι αρκετές φορές στην βιβλιογραφία η φθορά περιθωρίου (margin wear) και η φθορά

πλευρικής επιφάνειας (land wear) χρησιμοποιούνται για τον ίδιο τύπο φθοράς και δεν διαχωρίζονται μεταξύ τους ως διαφορετικές. Από εδώ και στο εξής, για την αποφυγή παρανοήσεων, θα χρησιμοποιούμε μόνο τους παρακάτω όρους: φθορά πλαϊνών (flank wear) για την φθορά των χειλών κοπής, φθορά πλευρικής επιφάνειας (land wear) για την φθορά αυτή αλλά και την φθορά περιθωρίου, φθορά ακμής σμίλης (chisel edge wear), φθορά κρατήρα (crater wear) και αποκολλήσεις (chipping).

Παράμετροι παρακολούθησης της φθοράς

Μία μεγάλη ποικιλία από παραμέτρους έχουν χρησιμοποιηθεί και δοκιμαστεί ως εργαλεία παρακολούθησης της φυσιολογικής φθοράς από τη χρήση των κοπτικών εργαλείων. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις στον τρόπο παρακολούθησης, η έμμεση και η άμεση. Οι άμεσες μέθοδοι βασίζονται σε οπτική επιθεώρηση είτε ανθρώπινη είτε μέσω υπολογιστή. Οι μέθοδοι αυτοί δεν είναι αρκετά προηγμένες τεχνολογικά, όπως επίσης είναι και οικονομικά ακριβές, ώστε να είναι εφικτή η χρήση τους στη βιομηχανία. Από την άλλη, οι έμμεσες μέθοδοι παρακολούθησης παρακολουθούν παραμέτρους οι οποίες είναι σχετικές με την φθορά ενός τρυπανιού και από τις τιμές αυτών βγάζουν συμπεράσματα για την κατάσταση του κοπτικού εργαλείου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες παράμετροι που είναι δυνατόν να παρακολουθηθούν και οι οποίες σχετίζονται με την φθορά των κοπτικών εργαλείων. Στο σχήμα 3 βλέπουμε έναν οριζόντιο τόρνο με τα κύρια του μέρη, τον σφιγκτήρα (chuck) και τον άξονα (spindle).



Σχήμα 3: Οριζόντιος τόρνος

Ροπή, δύναμη ολίσθησης, δύναμη τροφοδότησης (torque, drift force, feed force)

Η μέτρηση των δυνάμεων κοπής είναι δημοφιλής μέθοδος για την παρακολούθηση των διαδικασιών κοπής. Η μέτρηση της δύναμης τροφοδότησης (feed force) είναι η πιο γνωστή μέθοδος που χρησιμοποιείται, με επόμενη να είναι η παρακολούθηση της ροπής (torque). Επίσης να αναφέρουμε ότι σε πολλές περιπτώσεις η δύναμη τροφοδότησης αναφέρεται και ως ώση (thrust force), οπότε θα χρησιμοποιούμε παρακάτω και τους δύο όρους οι οποίοι έχουν την ίδια έννοια. Η παρακολούθηση των δυνάμεων κοπής είναι φυσιολογική καθώς αυτές αυξάνονται σαν συνάρτηση της φθοράς. Από την άλλη, θεωρητικά οι δυνάμεις ολίσθησης, οι οποίες είναι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο επίπεδο το κάθετο στον άξονα κοπής, δε θα έπρεπε να υπάρχουν στην περίπτωση περιστρεφόμενου τρυπανιού με δύο κοπτικά χείλη, αφού αυτές οι δυνάμεις θεωρητικά

αλληλοεξουδετερώνονται. Όμως λόγω των ανοχών που παρατηρούνται στην παραγωγή των τρυπανιών, τα χείλη κοπής δεν είναι πανομοιότυπα οπότε το τρυπάνι είναι ελαφρώς ασύμμετρο. Για το λόγο αυτό κατά την διάρκεια κοπής, δεν χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και τα δύο χείλη, αλλά εναλλάσσονται συνεχώς μέχρι τελικά το ύψος τους να εξισωθεί. Αρχικά χρησιμοποιείται μόνο το ένα χείλος μέχρι να μειωθεί το ύψος του και να γίνει ίδιο με του δεύτερου. Το δεύτερο από τα δύο κοπτικά χείλη που είναι τώρα πιο κοφτερό, αφού δεν έχει χρησιμοποιηθεί, είναι τώρα το κυρίαρχο στη διαδικασία και η διαδικασία εναλλαγής συνεχίζεται, μέχρι και τα δύο χείλη να γίνουν ακριβώς ίδια. Αν και η μέτρηση των δυνάμεων κοπής αποτελεί μία δημοφιλή και επιτυχημένη μέθοδο παρακολούθησης σε εργαστηριακές δοκιμές, υπάρχει ένα μειονέκτημα που σχετίζεται με τη χρήση του σε κανονική παραγωγή. Οι δυνάμεις κοπής δεν είναι εύκολο να μετρηθούν και είναι δύσκολο να διακριθεί αν οι μετρηθείσες δυνάμεις προέρχονται από το τρυπάνι, τον σφιγκτήρα που κρατάει το τρυπάνι (chuck) ή τον άξονα περιστροφής (spindle). Αρκετές έρευνες και δοκιμές στην επιρροή της φθοράς ενός τρυπανιού στις δυνάμεις κοπής έχουν γίνει από αρκετούς ερευνητές. Παρακάτω παρουσιάζουμε μερικούς από τους κυριότερους.

Ο Aatola [1994] παρατήρησε ότι πήρε τις καλύτερες ενδείξεις για την φθορά των τρυπανιών μετρώντας την δύναμη τροφοδότησης και την ροπή. Ταυτόχρονα όμως προτείνει ότι οι μετατροπείς δύναμης και ροπής που χρησιμοποίησε στις δοκιμές του ίσως είχαν αρνητική επιρροή στις μετρούμενες ταλαντώσεις. Μια ακόμα επιλογή είναι να γίνει η μέτρηση των δυνάμεων κοπής του τρυπανιού από μια άλλη κατεύθυνση, για παράδειγμα στο πάγκο που

βρίσκεται κάτω από εκεί που τοποθετείται το μέταλλο που είναι για διαμόρφωση. Όμως αυτού του είδους η αλυσίδα μέτρησης είναι λίγο μεγαλύτερη επειδή οι δυνάμεις μετριοούνται αρκετά μακριά από το τρυπάνι, οπότε μπορεί τελικά να μην βγουν πολύ καλά αποτελέσματα.

Οι Von Nedeß και Himburg [1986] παρουσίασαν τις δυναμικές επιδράσεις περιλαμβανομένου της επίδρασης του τóρνου και της διαδικασίας διεργασίας στην διαδικασία διάτρησης και την επιρροή αυτών στην δύναμη τροφοδότησης και την ροπή. Επισημαίνουν ότι η φθορά του τρυπανιού προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση των δυναμικών συνιστωσών σε σχέση με την αύξηση των στατικών δυνάμεων. Οι König και Christoffel [1980] κατέληξαν σε παρόμοιο συμπέρασμα, οι δυναμικές συνιστώσες της ώσης (thrust force) και ιδιαιτέρως της ροπής θεωρούνται καλοί δείκτες της φθοράς. Επίσης ανέφεραν ότι η μέτρηση της ροπής θεωρείται κατάλληλη ως προένδειξη κινδύνου θραύσης του εργαλείου ενώ η ώση θεωρείται κατάλληλη για την ένδειξη της βλάβης του εργαλείου, αφού όμως αυτή έχει συμβεί. Ο Brinksmeier [1990] παρουσιάζει την σπουδαιότητα της μέτρησης των δυναμικών αλλαγών της ροπής με σκοπό την παρακολούθηση της προοδευτικής φθοράς του τρυπανιού καθώς και της θραύσης. Για την μέτρηση του ανώτερου συχνοτικού περιεχομένου στη ροπή του σήματος, εισήγαγε έναν νέο αισθητήρα, ο οποίος βασίζεται στην τεχνολογία ρεύματος "Eddy". Όμως, η έκδοση του καινούριου αισθητήρα που δοκιμάστηκε ήταν αρκετά μεγάλου μεγέθους και δεν είναι κατάλληλη για παρακολούθηση τρυπανιών μικρής διαμέτρου. Ο Brinksmeier [1990] προβλέπει ότι το μέγεθος του αισθητήρα μπορεί να μειωθεί και έτσι μεγαλύτερο εύρος τρυπανιών μπορούν να παρακολουθούνται.

Ο Li [1992] βεβαιώνει ότι οι δυναμικές συνιστώσες των δυνάμεων τροφοδότησης και ροπής δίνουν μία καλύτερη ένδειξη της φθοράς του εργαλείου, από ότι η απλή αύξηση των μέσων τιμών. Σ' αυτή την περίπτωση έγινε και μία προσπάθεια να καθοριστούν οι κανόνες του πως διαφορετικού τύπου φθορές μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους καθώς και η θραύση του εργαλείου. Η δυναμική επίδραση της ώσης και της ροπής τονίζεται επίσης από τους König και Christoffel [1982]. Με τρυπάνι διαμέτρου 8 mm επιδεικνύουν πόσο μεγάλη είναι η αλλαγή του φάσματος της ώσης σε συχνότητα 1050Hz. Επίσης τονίζεται πόσο μεγάλες είναι οι διαφορές στην καμπυλότητα και στο σχήμα των οπών που δημιουργούνται από καινούρια τρυπάνια σε σχέση με τα φθαρμένα. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στις αυξημένες εγκάρσιες δονήσεις του τρυπανιού.

Ο McPhee [1995] επικεντρώνεται στο συχνοτικό περιεχόμενο της ισχύος διάτρησης με τη βοήθεια δυναμομέτρου. Στη μελέτη που έγινε διαπιστώθηκε ότι το δυναμόμετρο επηρεάζει τις μετρήσεις και ότι καλύτερες συχνότητες για τρυπάνι 6mm είναι γύρω στα 800Hz, συχνότητες οι οποίες σχετίζονται με τη δυναμική του δυναμομέτρου και γύρω στα 2250Hz που θεωρήθηκε ότι έχει να κάνει με την δυναμική του τρυπανιού. Συμπεράνε ότι η ανάλυση των συχνοτήτων μπορεί να βοηθήσει στο διαχωρισμό των παρεμβολών αυτών.

Ο Lenz [1978] μελέτησε τις επιδράσεις της φθοράς στις δυνάμεις ολίσθησης. Όμως στην μελέτη τους είδαν ότι τα αποτελέσματα που βγαίνουν από τις δυνάμεις ολίσθησης και την ροπή δεν δίνουν τις ίδιες ενδείξεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κατά την διαδικασία της κοπής τα δύο χείλη κοπής εναλλάσσονται, όπως είχαμε παρατηρήσει και παραπάνω.

Δόνηση, ήχος (vibration, sound)

Οι μετρήσεις δονήσεων είναι η πιο ευρεία μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της κατάστασης μίας περιστροφικής μηχανής. Παρ' όλα αυτά δεν είναι τόσο δημοφιλής στην παρακολούθηση της φθοράς των τρυπανιών, λόγω του θορύβου των διεργασιών κοπής. Η δόνηση μετριέται σχετικά εύκολα, τοποθετώντας ένα επιταχυνσιόμετρο δίπλα στον άξονα χωρίς να απαιτείται περαιτέρω τροποποίηση της μηχανής [El-Wardany 1996]. Ο αισθητήρας δεν επηρεάζεται από την ακαμψία και τις ιδιότητες απόσβεσης της μηχανής διάτρησης και μπορεί να τοποθετηθεί επάνω στο πάγκο κοπής. Ο Abu-Mahfouz [2005] τονίζει ότι τα επιταχυνσιόμετρα όταν είναι κατάλληλα προφυλαγμένα δεν παρουσιάζουν προβλήματα λόγω της παρουσίας ψυκτικών υγρών, αποκολλήσεων καθώς και λόγω ηλεκτρομαγνητικών θορύβων και θερμικών επιρροών. Είναι λογικό να περιμένουμε ότι οι μετρήσεις δονήσεων εξαρτώνται από την φθορά του εργαλείου, γιατί σε ένα δυναμικό σύστημα όπως είναι η μηχανή κοπής μετάλλων, όταν οι δυνάμεις κοπής αυξηθούν, η δυναμική απόκριση θα αυξηθεί, οπότε και οι δονήσεις θα αυξηθούν. Όπως περιγράφηκε και παραπάνω οι δυνάμεις ολίσθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρακολούθηση της φθοράς των τρυπανιών καθώς η αύξηση των δυνάμεων αυτών λόγω της φθοράς του τρυπανιού προκαλούν αύξηση των δονήσεων. Δυστυχώς υπάρχει ένας αριθμός από μειονεκτήματα που σχετίζονται με την παρακολούθηση και καταγραφή των δονήσεων. Εκτός από την επίδραση της φθοράς του τρυπανιού, το σήμα της δόνησης επηρεάζεται και από το μέταλλο επεξεργασίας, τις συνθήκες κοπής και τη συνολική δομή της μηχανής.

Ο Abu-Mahfouz [2003] έχει χρησιμοποιήσει τη μέτρηση δονήσεων για να ανιχνεύσει την φθορά των τρυπανιών, όπως επίσης και για να εντοπίσει τους διαφορετικούς τύπους φθορών, δηλ. φθορά ακμής σμίλης, φθορά κρατήρα, φθορά πλαϊνών κτλ. Ο Narayanan [1994] επικεντρώθηκε στην ανίχνευση της φθοράς μέσω της παρατήρησης υψηλότερων συχνοτήτων, γύρω στα 10 kHz. Από τα αποτελέσματά γίνεται σαφές ότι η καλύτερη ένδειξη της φθοράς των τρυπανιών είναι σε αυτές τις συχνότητες. Εντούτοις, οι γεωμετρικές λεπτομέρειες του τρυπανιού και του σφιγκτήρα δεν αναφέρονται και δεν υπάρχει καμία εξήγηση των λόγων για τους οποίους αυτές οι συχνότητες είναι οι καλύτερες για τον έλεγχο της φθοράς των τρυπανιών. Επίσης ο Barker [1993] χρησιμοποίησε την παρατήρηση των δονήσεων για τον έλεγχο της φθοράς των τρυπανιών, τα οποία χρησιμοποιούνταν για την διάνοιξη τρυπών σε ηλεκτρονικές πλακέτες.

Όπως η δόνηση, έτσι και η ανίχνευση και επεξεργασία του ήχου που παράγεται από την διαδικασία κοπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της φθοράς του τρυπανιού. Οι μηχανικές δονήσεις του τρυπανιού, του σφιγκτήρα και της μηχανής εν μέρει μετατρέπονται σε μηχανικές ταλαντώσεις του αέρα, δηλαδή σε ήχο. Συνεπώς οι ίδιες πληροφορίες που λαμβάνονται από την παρατήρηση των δονήσεων μπορούν να ληφθούν και από τις μετρήσεις του ήχου που μπορεί να καταγράφονται με ένα μικρόφωνο. Οι μετρήσεις του ήχου, αν και είναι εύκολο να τις επεξεργαστεί κανείς δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως γιατί επηρεάζονται από τον περιβάλλοντα θόρυβο σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ότι οι δονήσεις.

Ακουστική εκπομπή και υπερηχητική δόνηση (acoustic emission, ultrasonic vibration)

Επιπροσθέτως με τις μηχανικές δονήσεις μέχρι τα 20kHz, ένα μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων, το φάσμα ακουστικής εκπομπής, έχει χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της φθοράς του τρυπανιού. Με βάση τον ορισμό της Αμερικανικής Ένωσης Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials-ASTM), η Ακουστική Εκπομπή (AE) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση μεταβατικών ελαστικών κυμάτων μέσα σε ένα υλικό λόγω της απότομης απελευθέρωσης ενέργειας. Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση ή την έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό. Η μελέτη της ακουστικής εκπομπής βασίζεται στη μετατροπή αυτών των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που διεγείρονται σε υψηλές συχνότητες από 20 ως 1200 kHz. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια της υπό εξέταση κατασκευής, ενώ στο σημείο επαφής τους με την κατασκευή τοποθετείται συνήθως κάποιο παχύρρευστο υγρό, πχ γράσο. Η χρήση της ακουστικής εκπομπής για την παρατήρηση της φθοράς των τρυπανιών δικαιολογείται γιατί στις αρκετά χαμηλές συχνότητες οι δομικές δονήσεις είναι κυρίαρχες ενώ στις πιο υψηλές συχνότητες κυριαρχούν οι δονήσεις των αρμών και των ενώσεων των εργαλειομηχανών. Οι ακόμα πιο υψηλές συχνότητες όμως, πάνω από τα 20kHz, θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλες για την ανίχνευση της φθοράς. Να παρατηρήσουμε σε αυτό το σημείο ότι σε αρκετούς τομείς της βιβλιογραφίας οι δονήσεις στο φάσμα 20-80kHz ονομάζονται

υπερηχητικές δονήσεις [Hayashi και άλλοι 1998] ενώ οι δονήσεις πάνω από τα 80kHz ανήκουν στην ακουστική εκπομπή. Εμείς θα χρησιμοποιούμε γενικά για τις δονήσεις συχνότητας άνω των 20kHz τον όρο ακουστική εκπομπή.

Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι τα αποτελέσματα που έχουν καταγραφεί από τρυπάνια μικρής διαμέτρου, 1 έως 3mm, στα οποία έχει εφαρμοστεί αυτή η παρατήρηση υπερηχητικών δονήσεων είναι αρκετά καλά. Ο König [1992] δείχνει ότι με τόσο μικρής διαμέτρου τρυπάνια, η παρακολούθηση του ρεύματος του άξονα της μηχανής (spindle current) στο οποίο θα αναφερθούμε αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο, όπως και οι δυνάμεις κοπής δεν δίνουν τόσο καλά αποτελέσματα όσο η ακουστική εκπομπή και η υπερηχητική δόνηση. Ιδιαίτερα με τρυπάνια μικρής διαμέτρου δεν είναι δυνατόν να προβλέψουμε τη θραύση ενός τρυπανιού με τις προηγούμενες μεθόδους, ενώ με την παρατήρηση της ακουστικής δόνησης μπορούμε να έχουμε κάποιες ενδείξεις. Σε μία άλλη μελέτη που έχει γίνει, ο König [1989] προτείνει τη χρήση του συχνοτικού φάσματος μεταξύ 5 και 40kHz. Ο König [1992] βρίσκει ότι τα πλεονεκτήματα χρήσης της μεθόδου ακουστικής εκπομπής για την παρακολούθηση της φθοράς του τρυπανιού και ιδιαίτερα για μικρά τρυπάνια είναι αρκετά. Ο Waschkes [1994] προτείνει τη χρήση μίας μέσης τιμής της ακουστικής εκπομπής σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από 0,1MHz έως 1MHz για την παρακολούθηση της φθοράς του τρυπανιού.

Ρεύμα άξονα μηχανής, ρεύμα τροφοδοσίας (Spindle motor current, feed drive current)

Το ρεύμα του άξονα περιστροφής του κινητήρα σχετίζεται με τη μετρούμενη ροπή, αν και η αλυσίδα που απαιτείται για την μέτρηση είναι μεγαλύτερη. Ομοίως, μετρώντας το ρεύμα τροφοδοσίας μπορεί να θεωρηθεί ίδιο με την ώση (thrust force), αν και πάλι η αλυσίδα μέτρησης είναι μεγαλύτερη. Επειδή είναι πολύ εύκολο να μετρηθούν αυτές οι δύο παράμετροι (ρεύμα άξονα περιστροφής και ρεύμα τροφοδοσίας) έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά σε δοκιμές όπως για παράδειγμα από τους Adamczyk [1998], Li [1999], Ramamurthi, Hough [1993] και Routio Säynätjoki [1995]. Ο Li [1999] παρουσίασε καλά αποτελέσματα παρακολουθώντας το ρεύμα περιστροφής και τη δύναμη τροφοδότησης για την ανίχνευση της θραύσης των μικρής διαμέτρου τρυπανιών. Τα τρυπάνια που δοκίμασε είχαν διάμετρο από 1 έως 4.5mm, είναι τόσο μικρά δηλαδή που η θραύση είναι ο αναμενόμενος τύπος φθοράς.

Οι Ramamurthi και Hough [1993] επίσης χρησιμοποίησαν το ρεύμα του άξονα περιστροφής του κινητήρα και το ρεύμα τροφοδοσίας για ανίχνευση φθοράς με καλά αποτελέσματα. Σε αυτήν την περίπτωση τα σήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν μαζί με τη μέτρηση της ώσης που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της θραύσης του τρυπανιού. Ένας από τους σκοπούς της μελέτης ήταν να δοκιμαστεί αν ο αισθητήρας ρεύματος είναι αρκετός για την πρόβλεψη της φθοράς του τρυπανιού μιας και αποτελεί την φθηνότερη και ευκολότερη μέθοδο σε σχέση με τις υπόλοιπες. Προκύπτει ότι αν η προοδευτική φθορά δεν διαγνωστεί τότε προβλέπεται η θραύση του και το ανάποδο. Σ' αυτή την περίπτωση, ο συνδυασμός δύο τεχνικών μέτρησης βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της διάγνωσης.

Ο Adamczyk [1998] τονίζει στα πειράματα του τη φάση αποδέσμευσης κατά την διαδικασίας διάτρησης. Σε αυτήν την φάση και το ρεύμα τροφοδοσίας και το ρεύμα του άξονα περιστροφής σχετίζονται ιδιαίτερα με τις φθορές πλαϊνών και πλευρικής επιφάνειας ενός τρυπανιού με μια διάμετρο 10mm. Στην πραγματικότητα ο συσχετισμός αυτός ήταν υψηλότερος με τις μετρήσεις αυτές, του ρεύματος, από ότι με μετρήσεις επιτάχυνσης. Από την άλλη, τα αποτελέσματα που αναφέρονται από τους Routio και Säynätjoki [1995] στη χρήση της ισχύος του άξονα περιστροφής δεν είναι ενθαρρυντικά.

Τεχνικές ανάλυσης σημάτων

Διάφορες τεχνικές ανάλυσης σήματος έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κατάστασης των τρυπανιών. Γενικά, με την ανάλυση ενός σήματος προσπαθούμε να αναγνωρίσουμε ποιο είναι το σημαντικό μέρος του που δίνει μία ένδειξη φθοράς και να αφαιρέσουμε το θόρυβο. Η μέθοδος για την ανάλυση ενός σήματος που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι αρκετά γρήγορη, πριν ολοκληρωθεί ο κύκλος ζωής του εργαλείου, γιατί κατά την διάρκεια της διάτρησης η φθορά του τρυπανιού είναι ένα φαινόμενο που εξελίσσεται αρκετά γρήγορα. Επίσης στην περίπτωση που το τρυπάνι παρακολουθείται ως ένα μέρος μιας μηχανής, στην οποία χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός κεφαλών, η ποσότητα των δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτούν για την ανάλυση του σήματος είναι σημαντική.

Οι δύο βασικοί μέθοδοι ανάλυσης σήματος είναι η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (time domain analysis) και η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain analysis). Αυτές οι μέθοδοι

αναλύονται στις επόμενες παραγράφους μαζί με κάποιες ακόμα που μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.

Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου ενός σήματος είναι το πρώτο πράγμα που γίνεται αφού γίνει δειγματοληψία του σήματος. Στην πράξη, κάποια στατιστικά δεδομένα αποθηκεύονται με βάση το πεδίο του χρόνου, γιατί η αποθήκευση όλων των δεδομένων που παίρνεις από τα αισθητήρια όργανα απαιτεί πολύ μεγάλο χώρο αποθήκευσης. Χαρακτηριστικά, όπως προαναφέραμε, μερικές στατιστικές παράμετροι υπολογίζονται από τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες και αυτές οι παράμετροι σώζονται και χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση της φθοράς των τρυπανιών. Η μέση τετραγωνική τιμή (RMS), ο αριθμητικός μέσος όρος, η μέση απόκλιση, η τυπική απόκλιση και η κυρτότητα είναι τυπικά παραδείγματα των στατιστικών παραμέτρων στο πεδίο του χρόνου. Οι παράμετροι αυτοί συνήθως περιέχουν όλο το συχνοτικό φάσμα των σημάτων που μετριοούνται, οπότε είναι και ευαίσθητοι αρκετά στο θόρυβο που υπεισέρχεται στο σήμα από την διαδικασία κοπής.

Οι Noori-Khajavi [1992], Noori-Khajavi και Komanduri [1993, 1995] χρησιμοποίησαν τη μέση τιμή και τη διακύμανση των τιμών που πήραν από τους αισθητήρες δύναμης και ροπής. Στις δοκιμές αυτές δεν βρέθηκε κανένας συσχετισμός των τιμών αυτών στο πεδίο του χρόνου με την φθορά των τρυπανιών. Οι Lin και Ting [1995] χρησιμοποίησαν τις μέσες τιμές της ώσης και ροπής για την ανάπτυξη ενός μοντέλου για τον υπολογισμό της δύναμης και της ροπής ως συνάρτηση της τροφοδοσίας, της διαμέτρου και της

φθοράς των τρυπανιών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της φθοράς. Οι Radhakrishnan και Wu [1981] χρησιμοποίησαν την μέση τιμή, την μέγιστη τιμή και την τυπική απόκλιση της ώσης και της ροπής και κατέληξαν ότι η τυπική απόκλιση, η οποία είναι πρακτικά το ίδιο με την RMS τιμή, είναι ο καλύτερος από τους παραπάνω δείκτες για ένδειξη της φθοράς.

Οι Thangaraj και Wright [1988] υπολόγισαν τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση και την μέγιστη τιμή της ώσης με χαμηλή συχνότητα δειγματοληψίας, 40Hz, για αρκετές διατρήσεις. Με αυτού του είδους την προσέγγιση η μέγιστη τιμή δίνει την καλύτερη ένδειξη φθοράς. Οι Valikhani & Chandrashekhar [1987] αναφέρουν ότι μετρώντας τις μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές των δυνάμεων κοπής για κάθε διάτρηση που έκαναν τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρα. Αναφέρεται πάντως ότι η διακύμανση των δυνάμεων αυτών αυξάνεται αρκετά με την φθορά, κάτι το οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν βάση για περαιτέρω σκέψη και ανάλυση. Ο Tansel αναφέρει καλά αποτελέσματα στην παρακολούθηση της θραύσης των τρυπανιών μικρού μεγέθους, με χρήση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης της ώσης. Οι Ramamurthi και Hough [1993] χρησιμοποίησαν διάφορες στατιστικές παραμέτρους από το ρεύμα του άξονα περιστροφής, το ρεύμα τροφοδοσίας και την ώση. Οι στατιστικές παράμετροι που υπολογίστηκαν είναι η μέση τετραγωνική τιμή του ρεύματος του άξονα περιστροφής, η μέση τιμή της ώσης και η μέση τετραγωνική τιμή του ρεύματος τροφοδοσίας μαζί με μια παράμετρο που δείχνει την αύξηση σε κάθε μια από αυτές ως συνάρτηση της φθοράς του τρυπανιού.

Ο Schehl [1991] χρησιμοποίησε επιτυχώς τις μέσες τετραγωνικές τιμές της ακουστικής εκπομπής αφού πρώτα είχε περάσει το σήμα από ένα ζωνοπερατό φίλτρο. Ο König [1992] πρότεινε τη χρήση του σήματος της ακουστικής εκπομπής φιλτραρισμένου από ένα ζωνοπερατό φίλτρο μαζί με τη χρήση ενός ανορθωτή. Η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι με αυτόν τον τρόπο το σήμα ακουστικής εκπομπής μπορεί να δειγματοληφθεί σε σχετικά χαμηλή συχνότητα, κάτι το οποίο είναι πολύ φτηνότερο από πλευράς ηλεκτρονικού εξοπλισμού για την μέτρηση και την ανάλυση του σήματος. Ο El-Wardany [1996] χρησιμοποίησε επιτυχώς την τιμή της κυρτότητας μαζί με μια νέα παράμετρο, τον λόγο της απόλυτης μέσης τιμής, για την ανάλυση των δονήσεων για την φθορά και την θραύση των τρυπανιών. Οι Kutzner και Schehl [1988] προτείνουν τη χρήση ενός υψηλής συχνότητας ζωνοπερατού σήματος δόνησης για τον έλεγχο των τρυπανιών μικρών διαμέτρων. Η βασική ιδέα είναι ότι η γωνιακή φυσική συχνότητα πρέπει να βρίσκεται σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων.

Ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω του ταχύ μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform, FFT)

Η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω του ταχύ μετασχηματισμού Fourier (FFT) είναι ένα μέσο καθορισμού του συχνοτικού περιεχομένου του μετρούμενου σήματος. Η βασική ιδέα είναι ότι η φθορά ενός τρυπανιού επηρεάζει το συχνοτικό περιεχόμενο του σήματος. Η μέθοδος FFT χρησιμοποιείται για την εξάλειψη των άχρηστων πληροφοριών και επικεντρώνεται στη διαχείριση της χρήσιμης πληροφορίας.

Ο Braun [1982] συζητά την χρήση του FFT για σήματα ήχου μαζί με την χρήση της ανίχνευσης περιβάλλουσας για την δημιουργία ενός δείκτη τάσης φθοράς. Ο El-Wardany [1996] χρησιμοποίησε τον μετασχηματισμό αυτό για τον υπολογισμό της φασματικής ισχύος (power spectrum) αλλά και για τον υπολογισμό του λεγόμενου "Power Cepstrum". Το φάσμα της ισχύος χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση της φθοράς τρυπανιών διαμέτρου μεγαλύτερης των 6mm. Το power cepstrum μαζί με την χρήση στατιστικών παραμέτρων, που είδαμε στις προηγούμενες παραγράφους, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της θραύσης μικρής διαμέτρου τρυπανιών (~3mm).

Οι Valikhani και Chandrashekhara [1987] έχουν χρησιμοποιήσει με επιτυχία, παράλληλα με τις στατιστικές παραμέτρους που εξηγήθηκαν νωρίτερα, την φασματική ισχύ για τον έλεγχο της φθοράς, βασισμένοι στις δυνάμεις ολίσθησης. Εντούτοις υποδεικνύουν ότι δεν έγιναν αρκετές δοκιμές και πρέπει να γίνουν περαιτέρω για να υπάρξει ικανοποιητικός αριθμός δοκιμών. Οι Govekar και Grabec [1994] χρησιμοποίησαν έναν σχετικά μικρό αριθμό σημείων, 256 στη χρονική περιοχή αντί των κλασσικών 2048, για FFT ανάλυση της ροπής και της δύναμης τροφοδότησης. Ο λόγος για αυτήν την επιλογή είναι η ανάπτυξη και χρήση των νευρωνικών δικτύων ως το ακόλουθο διαγνωστικό εργαλείο της φθοράς.

Οι Noori-Khajavi [1992], Noori-Khajavi και Komanduri [1993, 1995] αναφέρουν ότι η χρήση της πυκνότητας φασματικής ισχύος (Power Spectral Density-PSD) έδωσε καλύτερα αποτελέσματα στην παρατήρηση της φθοράς των τρυπανιών από τις στατιστικές παραμέτρους που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Η πυκνότητα φασματικής ισχύος υπολογίστηκε για την ώση, τη ροπή και τη ένταση (τέντωμα) στις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις. Σε αυτήν την περίπτωση οι σχετικά χαμηλές συχνότητες (50 με 300 Hz) έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Δεν εξετάστηκαν μεμονωμένες συχνότητες, αλλά η αλλαγή του εμβαδού της περιοχής κάτω από το διάγραμμα της πυκνότητας φασματικής ισχύος. Ο Barker [1993] δοκίμασε υψηλότερης τάξης φασματικές συναρτήσεις των δονήσεων για την ανίχνευση της φθοράς και τις σύγκρινε με την κανονική πυκνότητα φασματικής ισχύος. Με τις δοκιμές που έκανε κατέληξε ότι η προσέγγιση ανώτερης τάξης είχε υψηλότερα ποσοστά ανίχνευσης της φθοράς, αν και συγχρόνως οι λανθασμένοι συναγερμοί επίσης αυξήθηκαν.

Άλλες μέθοδοι ανάλυσης

Η **ανίχνευση περιβάλλουσας (envelope detection)** αποτελεί μια μέθοδο ανάλυσης σημάτων η οποία έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής ειδικά στην ανίχνευση σφαλμάτων στα ρουλεμάν. Η ανίχνευση περιβάλλουσας είναι ένα μέσο για να βλέπουμε το περιεχόμενο της ενέργειας του σήματος σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Τυπικά το εύρος αυτό είναι αρκετά υψηλό, της τάξης των 10kHz, και η βασική ιδέα είναι ότι με τη χρήση ζωνοπερατών φίλτρων είναι δυνατό να επικεντρωθούμε στην πληροφορία αυτού του εύρους του φάσματος. Οι Braun [1982] και Braun, Lenz [1986] προτείνουν την μέθοδο αυτή ή μια πιο ανεπτυγμένη αντίστοιχη μέθοδο ανάλυσης σήματος, η οποία μπορεί να συλλέξει πληροφορίες σε υψηλότερες συχνότητες για την παρακολούθηση της φθοράς των τρυπανιών με τη χρήση μετρήσεων σήματος ήχου. Ο Hayashi [1988] χρησιμοποίησε την μέθοδο της ανίχνευσης περιβάλλουσας για δονήσεις υψηλών συχνοτήτων (20 kHz – 80 kHz) μαζί με μια

στατιστική παράμετρο που ονομάζεται *clipped running mean*, δηλαδή ένας τρέχων μέσος όρος από τον οποίο κάποιες πολύ υψηλές τιμές που ξεπερνούν μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου αποκλείονται. Μαζί με αυτήν την παράμετρο υπολογίζεται ο αριθμός εμφάνισης τιμών που είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες από συγκεκριμένα όρια που έχουν υπολογιστεί σε σχέση και με τον ψαλιδισμένο τρέχων μέσο όρο. Όλα αυτά τα στοιχεία στη συνέχεια δίνουν μια ένδειξη για την θραύση του εργαλείου.

Η διάτρηση ενός μετάλλου για την δημιουργία οπής δεν είναι μια σταθερή διαδικασία και τα μετρούμενα σήματα ποικίλουν από την αρχή ως το τέλος της διαδικασίας διάτρησης. Οι Quadro και Branco [1997] αναφέρουν πέντε διαφορετικά στάδια, από τα οποία τα δύο θεωρούνται καλύτερα για την παρακολούθηση της φθοράς του τρυπανιού με την επεξεργασία σημάτων ακουστικής εκπομπής. Σε αυτήν την δοκιμή μελετήθηκε η ακουστική εκπομπή και συγκεκριμένα το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την περιβάλλουσα του ανορθωμένου σήματος (*Measured Area under the Rectified Signal Envelope-MARSE*). Μια άλλη προσέγγιση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση σήματος είναι η αυτοαναδρομική μοντελοποίηση (*autoregressive modeling*). Οι Radhakrishnan και Wu [1981] χρησιμοποίησαν το "**Autoregressive Moving Average**" (ARMA) μοντέλο για την μοντελοποίηση της ώσης και της τραχύτητας της επιφάνειας. Η προσέγγιση αυτή προτείνεται για χρήση σε online παρακολουθήσεις της φθοράς του τρυπανιού.

Ο **μετασχηματισμός κυματιδίου (Wavelet transform)** είναι μια ακόμα μέθοδος από την οποία μπορούν να εξαχθούν ουσιαστικές πληροφορίες από το μετρούμενο χρονικό σήμα. Συγκρίνοντας τον

με τον FFT ο οποίος μας δίνει πληροφορίες μόνο στο πεδίο της συχνότητας, ή με την ανάλυση στατιστικών παραμέτρων στο πεδίο του χρόνου, ο κυματοειδής μετασχηματισμός μπορεί να θεωρηθεί ότι τα περιέχει και τα δύο, δηλαδή πληροφορίες στα πεδία χρόνου-συχνότητας. Ο Li [1993] χρησιμοποίησε τον μετα-σχηματισμό κυματιδίου για την ανίχνευση της θραύσης του τρυπανιού η οποία βασίστηκε στις μετρήσεις του ρεύματος. Το μέγεθος του τρυπανιού στις δοκιμές ήταν μικρό, διαμέτρου από 1mm μέχρι 4.5mm. Παρόλα αυτά η διάγνωση ήταν παθητική αφού δεν υπήρξε καμία προειδοποίηση πριν από την θραύση. Ο Tansel [1993] χρησιμοποίησε τον μετασχηματισμό αυτό για την αναγνώριση ενός πολύ φθαρμένου τρυπανιού από ένα καινούργιο. Το παρατηρούμενο σήμα ήταν αυτό της ώσης. Και σε αυτήν την δοκιμή δεν υπήρχε καμία προειδοποίηση πριν την καταστροφή του τρυπανιού. Οι Heibert και Chinnam [2000] χρησιμοποίησαν τον μετασχηματισμό αυτό για την ανάλυση της ώσης και της ροπής. Κάποιες από τις παραμέτρους χρησιμοποιήθηκαν σαν είσοδοι σε ένα νευρωνικό δίκτυο, που είχε σκοπό την διάγνωση της φθοράς των τρυπανιών. Η αξιοπιστία της μεθόδου είναι συζητήσιμη και τονίζεται ότι η κλίση της αύξησης της έντασης σε κάποια σήματα αυξάνεται όσο αυτά πλησιάζουν την μέγιστη φθορά, όπως επίσης αυξάνεται η ακρίβεια της πρόβλεψης της αστοχίας όσο πλησιάζουμε στο κρίσιμο όριο.

Ο Abu-Mahfouz [2003] συνδυάζει και επίσης συγκρίνει, για την περίπτωση των σημάτων δόνησης, την αποτελεσματικότητα των στατιστικών παραμέτρων στο πεδίο του χρόνου, όπως για παράδειγμα είναι η μέση τιμή, η διακύμανση και η κυρτότητα, μαζί με κάποιες παραμέτρους που υπολογίζονται με τη χρήση του διακριτού αρμονικού μετασχηματισμού κυματιδίου και των οχτώ

υψηλότερων τιμών που υπολογίζονται με τη Burg συνάρτηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος. Στην προσέγγιση αυτή διαφορετικοί τύποι φθοράς μπορούν να ανιχνευτούν, όπως επίσης οι παράμετροι που υπολογίζονται με τον μετασχηματισμό κυματιδίου αποδεικνύονται καλύτεροι σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι ο όγκος των δεδομένων που προέρχονται από τα σήματα που παρατηρούνται και πρέπει να αποθηκεύονται για την περαιτέρω επεξεργασία είναι αρκετά μεγάλος και ειδικά στις περιπτώσεις που τα σήματα αυτά είναι αρκετά. Οπότε υπάρχει συνήθως η ανάγκη να χρησιμοποιούνται τεχνικές οι οποίες μειώνουν τον όγκο αυτό. Μία από τις πλέον χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι η λεγόμενη μέθοδος ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis). Με λίγα λόγια, η ανάλυση παλινδρόμησης βασίζεται στην προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας μεταβλητής (εξαρτημένης), βασισμένη σε μια άλλη (ανεξάρτητη). Η χρήση παλινδρομικών εξισώσεων μεγάλου πολυωνυμικού βαθμού με περιορισμένο αριθμό όρων επιλύει το πρόβλημα του μεγάλου όγκου δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτούν από τις μετρήσεις των σημάτων. Επίσης τα αποτελέσματα από την ανάλυση παλινδρόμησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από τα διαγνωστικά-προγνωστικά συστήματα που θα αναφέρουμε πιο κάτω ως είσοδοι για την έγκαιρη πρόγνωση της φθοράς των τρυπανιών. Με την ανάλυση παλινδρόμησης μπορείς να παρατηρείς την τάση που έχουν τα σήματα που μετριοούνται, οπότε μπορείς να βγάζεις συμπεράσματα για το πώς θα διαμορφωθούν μελλοντικά και έτσι να μπορέσεις να δημιουργήσεις ένα εργαλείο πρόγνωσης της φθοράς των τρυπανιών.

Συστήματα διάγνωσης-πρόγνωσης φθοράς

Οι διεργασίες των μηχανών είναι συνήθως αυτόματες. Όμως διαφόρων ειδών προβλήματα και σφάλματα καθιστούν αναγκαία την ανθρώπινη παρέμβαση. Η φθορά των τρυπανιών, όπως και η θραύση είναι κάποιοι από τους παράγοντες που εμποδίζουν την αυτοματοποίηση της παραγωγής. Η παρακολούθηση της φθοράς και της θραύσης των τρυπανιών χρειάζεται να είναι αυτόματα και το σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί να μπορεί να διαγνώσει την κατάσταση του εργαλείου αυτόματα, που σημαίνει ότι κάποιο είδος τεχνητής νοημοσύνης πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Ο Tonshoff [1998] καθορίζει τα διάφορα στοιχεία που χρειάζονται για την παρακολούθηση της φθοράς των τρυπανιών: αισθητήρας, σήματα παρακολούθησης, μοντελοποίηση και στρατηγική. Τα τρία πρώτα στοιχεία καλύφθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η στρατηγική αναφέρεται στο ότι διαφορετικές ενέργειες πρέπει να λάβουν χώρα με βάση τα παρατηρούμενα σήματα. Ένα σύστημα παρακολούθησης δίνει απλά μία ένδειξη ή ενός είδους ειδοποίηση στην περίπτωση που τα παρακολουθούμενα σήματα φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Ένα διαγνωστικό σύστημα προσπαθεί να βρει τον συσχετισμό μεταξύ των σφαλμάτων σε μια μηχανική διαδικασία και την προέλευση τους. Τα προσαρμοστικά συστήματα ελέγχου προσαρμόζουν αυτόματα τις συνθήκες της μηχανής σύμφωνα με τη στρατηγική που τους έχει δοθεί. Ο Tonshoff [1998] τονίζει τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις που παρουσιάζουν τα συστήματα αισθητήρων και πως αυτά μπορούν να προσφέρουν περισσότερες πληροφορίες. Επίσης ανέλυσε την σπουδαιότητα της κατασκευής συστημάτων αποτελούμενων από πολλά μοντέλα. Υποστηρίζει ότι η χρήση μεγάλου σχετικά αριθμού αισθητήρων και

μοντέλων έχει σαν αποτέλεσμα μια πιο αξιόπιστη και ευέλικτη εποπτική διαδικασία, η οποία έχει την δυνατότητα καλύτερου ελέγχου.

Ο Ertunc [2001] υιοθέτησε τα κρυμμένα μοντέλα Markov (Hidden Markov Models-HMM), τα οποία έχουν επιτυχώς χρησιμοποιηθεί στην αναγνώριση φωνής, για ανίχνευση φθοράς που βασίζεται στην παρακολούθηση των σημάτων ώσης και ροπής. Τρία διαφορετικά στάδια του εργαλείου αναγνωρίστηκαν: αιχμηρό, κανονικό και αμβλύ. Πρότεινε ότι διαφορετικά μοντέλα ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές συνθήκες κοπής ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Οι Ertunc και Osysu [2004] δοκίμασαν την αποκαλούμενη μέθοδο επιπέδου φάσεων (phase plane method). Αναφέρουν ότι ένα από τα οφέλη αυτής της προσέγγισης είναι η απλότητα της, αφού η ώση σχεδιάζεται ως συνάρτηση της ροπής. Έτσι αν το τρυπάνι είναι σε κανονικές συνθήκες τα αποτελέσματα παραμένουν εντός ενός προκαθορισμένου ορθογώνιου. Επίσης υποστηρίζουν ότι παρόλο που η μέθοδος είναι πολύ απλή, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την φθορά του εργαλείου.

Σύστημα Προκαθορισμένων Ορίων / Κανόνων

Ο απλούστερος τρόπος να αυτοματοποιηθεί η διάγνωση της φθοράς των εργαλείων είναι να χρησιμοποιηθούν προκαθορισμένα όρια και συγκεκριμένοι κανόνες για τα μετρούμενα σήματα και τις παραμέτρους που υπολογίζονται από αυτά. Αυτό σημαίνει ότι εάν μια τιμή μιας παραμέτρου υπερβαίνει το όριο που της έχει ορισθεί το εργαλείο θεωρείται φθαρμένο. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να γίνει πιο αξιόπιστη με το συνδυασμό των δεδομένων από διάφορους

αισθητήρες και τον υπολογισμό διάφορων παραμέτρων από αυτά τα σήματα. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν επίσης να συνδυαστούν με τις πληροφορίες από τις παραμέτρους της διαδικασίας κοπής, ώστε το αποτέλεσμα να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστο. Παραδείγματος χάρη, εάν η διάμετρος του τρυπανιού είναι σε αυτό το διάστημα τιμών, η ταχύτητα διάτρησης είναι σε αυτό το διάστημα τιμών και η ροπή είναι σε αυτό το διάστημα τιμών τότε από την επεξεργασία των μετρούμενων σημάτων και των παραμέτρων που παίρνουμε από αυτά βλέπουμε ότι το τρυπάνι δεν χρειάζεται αλλαγή ακόμα αλλά έχει ακόμα χρόνο ζωής.

Η χρήση περίπλοκων μεθόδων ανάλυσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια προσπάθεια να γίνει η χρήση των προκαθορισμένων ορίων πιο αξιόπιστη και ενδεχομένως πιο γενική. Εάν παραδείγματος χάρη η παράμετρος που χρησιμοποιείται για να διαγνωσθεί η φθορά δεν επηρεάζεται από άλλους παράγοντες, όπως πχ. η ταχύτητα κοπής, είναι ευκολότερο να τεθούν κανόνες που καθορίζουν την κατάσταση του εργαλείου. Αυτό είναι ένα βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης. Εάν πολλοί διαφορετικοί τύποι εργαλείων χρησιμοποιούνται στην εργαλειομηχανή, είναι πολύ δύσκολο να φτιαχτεί ένα σύστημα βασισμένο σε κανόνες και προκαθορισμένα όρια που να μπορεί να ανιχνεύσει την φθορά των εργαλείων και να προειδοποιήσει για την επερχόμενη θραύση. Παρόλα αυτά, οι κανόνες μπορεί να είναι πολύ απλοί για την κατάσταση της κάθε μηχανής και των αντίστοιχων εργαλείων κοπής και μπορεί πολύ απλά να καθορίζονται κάθε φορά.

Μια άλλη δυνατότητα να γίνει ο καθορισμός των ορίων γενικότερος είναι να αποθηκεύονται οι τιμές των παραμέτρων όταν τα εργαλεία είναι σε καλή κατάσταση και τα όρια να καθορίζονται

στην αρχή για τη σχέση της τρέχουσας τιμής της παραμέτρου σε σχέση με την προκαθορισμένη αρχική. Για παράδειγμα οι Thangaraj και Wright [1988] χρησιμοποίησαν την κλίση της ώσης και αναφέρουν ότι το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου δεν απαιτεί ιδιαίτερες ρυθμίσεις για τη λειτουργία του σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών κοπής. Ένα άλλο παράδειγμα δίνεται από τον El-Wardany [1996], το σύστημα του οποίου εκτελεί τις περίπλοκες αναλύσεις μόνο όταν μια ορισμένη παράμετρος φθάνει σε μια προκαθορισμένη τιμή σε σχέση με την αρχική.

Ο Adamczyk [1998] προτείνει έναν σχετικά απλό συνδυασμό κανόνων βασισμένων στις τιμές της τυπικής απόκλισης του ρεύματος τροφοδοσίας και του ρεύματος του άξονα περιστροφής κατά την σταθερή και την μεταβατική φάση της διάτρησης. Αν μια απλή συνθήκη πληρείται και στις δύο φάσεις αυτό σημαίνει ότι το τρυπάνι είναι φθαρμένο. Παρουσιάζει μια απλή διαδικασία για τον συνδυασμό των δεδομένων από τρεις διαφορετικούς αισθητήρες, δύο ρεύματος και ενός επιταχυνσιομέτρου. Ο Takata [1986] παρουσίασε μερικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας την τεχνική αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition technique), η οποία είναι βασισμένη στη αναγνώριση φωνής. Το σήμα που μετριέται με έναν αισθητήρα ήχου και αναλύεται διαμορφώνει ένα 16 X 16 πρότυπο χρόνου/συχνότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της κατάστασης της κοπής και την ανίχνευση ενός σπασμένου τρυπανιού. Ο Tönshoff [1988] περιγράφει τις αρχές μιας προσέγγισης βασισμένης σε κανόνες που στηρίζεται στις πληροφορίες από τρεις διαφορετικούς τύπους αισθητήρων: δύναμη, θερμοκρασία και δόνηση.

Ο Li [1992] χρησιμοποίησε ένα απλό σύνολο κανόνων βασισμένο στη σχέση μεταξύ της τρέχουσας τιμής και της μέσης τιμής της δύναμης τροφοδότησης, της ροπής και των δυναμικών στοιχείων τους. Ένα από τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης είναι ότι δεν υπάρχει καμία ανάγκη για εκπαίδευση και καθορισμό των ορίων, αντ' αυτού υπολογίζονται για κάθε ένα από τα εργαλεία. Το σύνολο των κανόνων μπορεί επίσης να διακρίνει μεταξύ των διάφορων τύπων φθοράς. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση έχει αναπτυχθεί βασισμένη σε δοκιμές μόνο τεσσάρων τρυπανιών, η οποία δημιουργεί ερωτήματα για το πόσο γενικά είναι τελικά τα αποτελέσματα.

Συστήματα Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Systems)

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) εισήχθη από τον Lotfi A. Zadeh του Πανεπιστημίου Berkeley της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ στα μέσα του 1960. Η θεωρία της Ασαφούς Λογικής βασίζεται στην προϋπόθεση ότι ο περιβάλλον χώρος απαρτίζεται από στοιχεία που ανήκουν σε διάφορα σύνολα με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Η ασάφεια δημιουργεί μια πλειότιμη έννοια στο χώρο της αβεβαιότητας. Παραδείγματα είναι η αλήθεια, το ψεύδος και οι ενδιάμεσες έννοιες. Τα λογικά παράδοξα και η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg συνέβαλαν στην ανάπτυξη την πλειότιμης λογικής (multi-valued logic) στη δεκαετία του 1920. Το επόμενο βήμα επέτρεψε βαθμούς αβεβαιότητας και θεωρούσε τους χαρακτηρισμούς αλήθειας και ψεύδους ως τις ακραίες τιμές ενός πεδίου μεταβολής της ασάφειας. Το 1937 ο μαθηματικός Max Black εφάρμοσε τη συνεχή λογική σε σύνολα στοιχείων και συμβόλων και ονόμασε τη δομή αυτή αβεβαιότητα. Το 1965, στη θεμελιώδη συμβολή του με τίτλο "Fuzzy Sets", ο Zadeh παρουσίασε τη θεωρία

των συνόλων πολλαπλών τιμών ή ασαφών συνόλων (fuzzy set theory). Χρησιμοποίησε τον όρο Ασαφή Λογική και πρωτοστάτησε σε ένα νέο και σημαντικότατο κύμα επιστημονικής δραστηριότητας που συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Δεν είναι λίγοι, όμως, και ειδικά στις ΗΠΑ, αυτοί που αμφισβητούν τη θεωρία του Zadeh. Αντίθετα, η Ιαπωνία την έχει ενστερνιστεί απόλυτα και η εφαρμογή της αποδίδει σημαντικά οικονομικά οφέλη.

Η θεωρία της Ασαφούς λογικής είναι κατάλληλη, τόσο για την αναπαράσταση της γνώσης και της εμπειρίας, όσο και για τη δημιουργία μηχανισμών εξαγωγής συμπερασμάτων που χρησιμοποιούν τη διαθέσιμη κωδικοποιημένη γνώση και τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών της υπό έλεγχο διεργασίας για να συμπεράνουν την πράξη ελέγχου που απαιτείται. Σημειώνεται ότι η Ασαφής Λογική έχει βρει πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία διεργασιών όσο και σε οικιακές συσκευές που έχουν κατακτήσει την αγορά. Στα χρόνια που ο Earl Cox, εισήγαγε και ξεκίνησε να χρησιμοποιεί την ασαφή λογική, είχε δει τη δύναμη και το εύρος στο οποίο αυτά τα έμπειρα συστήματα συνέφεραν σε ένα ευρύ φάσμα ασυνήθιστα δύσκολων προβλημάτων. Είχε αναλάβει την αρχιτεκτονική, το σχεδιασμό, και τον προγραμματισμό τριών έμπειρων ασαφών συστημάτων παραγωγής. Αυτά τα εργαλεία είχαν εφαρμοστεί επιτυχώς σε δύσκολες εφαρμογές του πραγματικού κόσμου, σε περιοχές όπως οι μεταφορές, η διαχειριζόμενη πρόνοια, οι οικονομικές υπηρεσίες, η εκτίμηση ασφαλιστικού κινδύνου, η εξόρυξη πληροφορίας από μια βάση δεδομένων, η ανάλυση της ευστάθειας μιας εταιρίας, η ανίχνευση απάτης διαχειριζόμενης πρόνοιας, η απόκτηση μελετών καταλληλότητας - προώθησης ενός νέου προϊόντος, και ανάλυσης πωλήσεων. Τα τελικά 38 μοντέλα

ήταν λιγότερο πολύπλοκα, μικρότερα, και ευκολότερα να κατασκευαστούν, να βελτιωθούν, να συντηρηθούν και να επεκταθούν από τα συστήματα που χτίστηκαν χρησιμοποιώντας συμβατικά συμβολικά έμπειρα συστήματα. Σημαντικό ενδιαφέρον έχει στραφεί προς την εφαρμογή της ασαφούς λογικής στον τομέα των διαδικασιών ελέγχου (control systems), ως αποτέλεσμα της τεράστιας ώθησης που δόθηκε από τα προϊόντα ασαφούς λογικής που κατασκευάστηκαν στην Ιαπωνία. Αυτή η επικέντρωση είναι κατανοητή εφόσον η ασαφής λογική παρέχει μία πολύτιμη τεχνολογία στο σχεδιασμό της εγγενούς μηχανικής νοημοσύνης. Με την ασαφή λογική, οι κατασκευαστές μπορούν να μειώσουν αισθητά το χρόνο ανάπτυξης, να μοντελοποιήσουν πολύπλοκα μη γραμμικά συστήματα, να αναπτύξουν προχωρημένα συστήματα χρησιμοποιώντας μηχανικούς ελέγχου αντί για επιστήμονες ελέγχου, και να υλοποιήσουν ελέγχους χρησιμοποιώντας πιο φτηνά ολοκληρωμένα κυκλώματα και αισθητήρες. Σημαντικό πεδίο εφαρμογών της ασαφούς λογικής μπορεί να βρεθεί στα έμπειρα συστήματα και στα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (decision support). Αυτά τα συστήματα επόμενης γενιάς χρησιμοποιούν την ασαφή λογική, τους κανόνες παραγωγής, και ένα ευρύ φάσμα τεχνικών εξαγωγής συμπερασμάτων. Η συνεργασία της ασαφούς λογικής με την τεχνολογία έμπειρων συστημάτων παρέχει ένα μηχανισμό παραγωγής ασαφών μοντέλων που προωθούν σημαντικές ομάδες προβλημάτων στην πληροφοριακή υποστήριξη αποφάσεων. Τα έμπειρα συστήματα ασαφούς λογικής μοντελοποιούν τον κόσμο με όρους της σημασιολογίας που σχετίζεται με τις υποκείμενες μεταβλητές, παρέχοντας έτσι μία πιο στενή σχέση μεταξύ των φαινομένων του πραγματικού κόσμου και των μοντέλων των υπολογιστών.

Οι κανόνες στα συστήματα κανόνων μπορούν να είναι συγκεκριμένοι, ασαφείς, δηλαδή μη ακριβείς. Οι αρχές της συγκεκριμένης λογικής μπορούν να βρεθούν σε αρκετά βιβλία, πχ από τους Rao και Rao [1993]. Οι Li και Wu [1988] ταξινομούν την φθορά των τρυπανιών σε τέσσερις ασαφείς κατηγορίες: αρχική, μικρή, κανονική και έντονη. Σε αυτήν την προσέγγιση τα ασαφή όρια καθορίζονται βασισμένα σε έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για τη συλλογή των δεδομένων της ώσης και της ροπής. Όταν τα δεδομένα αναλύονται, το αποτέλεσμα δεν είναι αυστηρό, δεν ανήκει δηλαδή σε μια μόνο κατηγορία, αλλά είναι μέλος σε κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες, με διαφορετικό βέβαια βαθμό συμμετοχής. Η προσέγγιση αυτή δείχνει να λειτουργεί, παρόλο που παρουσιάζονται μόνο δύο δοκιμές. Μόνο οι παράμετροι οι σχετικές με την ώση και τη ροπή χρησιμοποιούνται, οι μέσες τετραγωνικές τιμές συγκεκριμένα, και ο αποκαλούμενος γ-μέσος αλγόριθμος (c-mean algorithm) χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ της κατάστασης των εργαλείων και των μετρημένων παραμέτρων. Ο Du [1995] περιέγραψε τον γ-μέσο αλγόριθμο σε μια γενικότερη μορφή μαζί με άλλες πιθανές προσεγγίσεις ώστε να συνδέσει τις μετρημένες τιμές των παραμέτρων και την κατάσταση του εργαλείου. Οι Xiaoli και Zhejun [1998] χρησιμοποίησαν αυτό το είδος προσέγγισης για τον έλεγχο της φθοράς κατά τη διάρκεια της διάτρησης. Οι ελεγχόμενες επτά παράμετροι ήταν από μετρήσεις σήματος ακουστικής εκπομπής ευρείας ζώνης που είχαν αναλυθεί χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό κυματιδίου. Οι επτά παράμετροι ήταν στην πραγματικότητα ένα σύνολο που επιλέχτηκε από 16 διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Οι συντάκτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι

η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να δώσει ένα υψηλό ποσοστό επιτυχίας για ένα ευρύ φάσμα των συνθηκών κοπής.

Ο Du [1995] δικαιολόγησε τη χρήση της ασαφούς ταξινόμησης με τον ισχυρισμό ότι για την εξέταση των αβεβαιοτήτων, που είναι έμφυτες, στις διαδικασίες κοπής μετάλλων, τα ασαφή συστήματα προσφέρουν το πλεονέκτημα της προσφοράς συστηματικών μέσων για τη σχέση μεταξύ της φθοράς των εργαλείων και των διαφόρων γνωρισμάτων της διαδικασίας. Η ασαφής λογική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με νευρωνικά δίκτυα για την προεπεξεργασία των δεδομένων αλλά και την περαιτέρω επεξεργασία αφού έχουν ήδη επεξεργαστεί από το ασαφές σύστημα [Rao και Rao 1993].

Οι Li και Tso [1999] ανέπτυξαν μοντέλα παλινδρόμησης (regression models) για το ρεύμα περιστροφής του άξονα και το ρεύμα τροφοδοσίας ως συνάρτηση των μεταβλητών κοπής, δηλαδή της ταχύτητας κοπής, του ρυθμού τροφοδοσίας (feed rate) και της διαμέτρου των τρυπανιών για διάφορες καταστάσεις φθοράς πλαϊνών. Χρησιμοποιώντας την ασαφή ταξινόμηση είναι δυνατό με τα δεδομένα των δοκιμών να προβλεφθεί ο βαθμός συμμετοχής σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες φθοράς. Ο αριθμός των περιπτώσεων καθορισμού για την ανάπτυξη των συναρτήσεων παλινδρόμησης είναι δώδεκα (12). Σε αυτό το σύνολο χρησιμοποιούν οχτώ ταχύτητες κοπής, πέντε ρυθμούς τροφοδοσίας και τρεις διαμέτρους τρυπανιών. Ο αριθμός των δοκιμών που έγιναν είναι επίσης δώδεκα (12). Το αποτέλεσμα θεωρήθηκε αρκετά καλό δεδομένου ότι το ποσοστό της συνάρτησης συμμετοχής που σχετιζόταν με την φθορά πλαϊνών ήταν πάντα κοντά στην μονάδα. Εντούτοις, αν και τα αποτελέσματα θεωρούνται καλά, ο σχετικά

μικρός αριθμός δοκιμών σε σχέση με τον αριθμό των παραμέτρων δημιουργούν μερικές αμφιβολίες για το πόσο μπορεί να γενικευθεί η μεθοδολογία αυτή.

Ο Li [2000] χρησιμοποίησε την ασαφή λογική μαζί με νευρωνικά δίκτυα. Σε αυτήν την περίπτωση η παρακολούθηση της φθοράς έγινε με την καταγραφή των δονήσεων. Σαν είσοδοι χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τετραγωνικές τιμές για πέντε διαφορετικές ζώνες συχνότητων μεταξύ 0 και 2500Hz. Η φθορά των τρυπανιών ταξινομήθηκε σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες: αρχική φθορά, κανονική φθορά, αποδεκτή φθορά, έντονη φθορά και βλάβη. Το συμπέρασμα είναι ότι μια ασαφής σχέση μεταξύ της κατάστασης των εργαλείων και των παραμέτρων παρακολούθησης μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση ενός ασαφούς νευρωνικού δικτύου. Εντούτοις, το ποσοστό αναγνώρισης για την αρχική φθορά αναφέρεται να είναι 52% και για την έντονη φθορά 68%. Η βλάβη των τρυπανιών και η κοπή στον αέρα έγιναν αντιληπτές σε ένα ποσοστό 100%.

Έμπειρα συστήματα

Τα έμπειρα συστήματα είναι προγράμματα λογισμικού, όπου καταγράφεται εύκολα η αποκτημένη από την εμπειρία (πιθανόν συνδυαζόμενη και με θεωρητική επεξεργασία) γνώση ενός τεχνικού ή μηχανικού ειδικού στον γνωστικό τομέα ενός προβλήματος. Το έμπειρο σύστημα περιέχει:

τη γνώση που αποθηκεύεται συνήθως υπό μορφή κανόνων

τη λογική διαχείρισης κανόνων η οποία ονομάζεται μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων

την εξήγηση της πορείας εξαγωγής ενός συμπεράσματος.

Το συμπέρασμα ενός κανόνα μπορεί να αποτελέσει προϋπόθεση για έναν ή περισσότερους άλλους κανόνες. Με την παραπάνω μέθοδο δημιουργείται ένα δίκτυο κανόνων μέσω του οποίου μπορούν να απαντηθούν μια σειρά ερωτημάτων του χρήστη. Ένα από τα κλασικότερα είναι για παράδειγμα η επιλογή των συνθηκών κοπής. Κατά τρόπο ανάλογο, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα πρόβλεψης τραχύτητας επιφάνειας και έχουν αποκτηθεί νέες δυνατότητες. Τέτοιες είναι η δυνατότητα πρόβλεψης θερμικών σφαλμάτων εργαλειομηχανών με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η δυνατότητα πρόβ-λεψης της ελαστικής παραμόρφωσης των τεμαχίων λόγω των δυνάμεων κοπής. Μπορούμε να προσεγγίσουμε περισσότερο ορισμένες από αυτές τις παραπάνω τεχνικές ξεκινώντας από την πρόβλεψη της τραχύτητας φρεζαρισμένης επιφάνειας. Στην περίπτωση, αυτή οι παράγοντες που προσδιορίστηκαν ως σημαντικότεροι είναι η πρόωση ανά δόντι, η συνιστώσα της δύναμης κοπής κατά τη φορά της πρόωσης, το βάθος κοπής, το ποσοστό εμπλοκής του κοπτικού εργαλείου και η χρησιμοποίηση ή όχι υγρού κοπής. Στην περίπτωση της πρόβλεψης των ελαστικών παραμορφώσεων ενός τρυπανιού κατά μήκος της διαδρομής αυτού, λόγω εφαρμογής των δυνάμεων κοπής, εκτελούνται υπολογισμοί κατά τη θεωρία της ελαστικής γραμμής και γίνεται «διακριτοποίηση» του τρυπανιού σε στοιχειώδεις κυλίνδρους κώνους και σφαίρες.

Μια από τις κατακτήσεις των σύγχρονων λογισμικών διεργασιών και των έμπειρων συστημάτων είναι η μέτρηση ανοχών. Η μέτρηση ανοχών μέσω προηγμένων λογισμικών προέκυψε από τη δημιουργία παραμετρικών προγραμμάτων με σκοπό τη μέτρηση των

γεωμετρικών ανοχών ενός τρυπανιού σε ένα κέντρο διεργασιών, κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας διεργασίας του. Έχει αναπτυχθεί η δυνατότητα για μέτρηση πολλαπλών κατασκευαστικών παραμέτρων ενός τρυπανιού όπως η ευθύτητα, πόσο επίπεδο είναι, η παραλληλία, η κυκλικότητα. Για κάθε περίπτωση αναπτύχθηκε και μια ιδιαίτερη διαδικασία μέτρησης. Για παράδειγμα για την εύρεση του πόσο επίπεδο είναι, η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

Τη διαμόρφωση ενός επιπέδου από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων μιας επιφάνειας

Τη διαμόρφωση δύο ακόμα επιπέδων παράλληλων προς το πρώτο τα οποία θα διέρχονται από τα δύο ακραία σημεία εκατέρωθεν του πρώτου

Τη σύγκριση της απόστασης των δύο αυτών επιπέδων με την ανοχή.

Νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ολοκληρώνουν το σύγχρονο τοπίο του λογισμικού διεργασιών που μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά στα έμπειρα συστήματα. Παρουσιάστηκε παραπάνω η αξιοποίηση των έμπειρων συστημάτων για την ανάπτυξη τεχνικών που θα επιτρέπουν πρόβλεψη της τραχύτητας μιας υπό επεξεργασία επιφάνειας. Σε αυτό λοιπόν το πεδίο εφαρμογής πρέπει λοιπόν να σημειωθεί πως με την αξιοποίηση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων επιτεύχθηκε η πρόβλεψη λαθών. Αναφορικά με την πρόβλεψη θερμικών σφαλμάτων εργαλειομηχανών με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων καθώς και τη δυνατότητα πρόβλεψης της ελαστικής παραμόρφωσης των

τρυπανιών λόγω των δυνάμεων κοπής σημειώνεται πως παράλληλα με τα μοντέλα αυτά έχουν αναπτυχθεί κι άλλα προγράμματα όπως αυτά που επιτυγχάνουν διόρθωση αναλυτικών μοντέλων με βάση πειραματικά αποτελέσματα για συγκεκριμένες εργαλειομηχανές και στα πεδία αυτά έχουν αναπτυχθεί εργαλεία με βάση τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Αναφορικά τώρα με τη διόρθωση αναλυτικών μοντέλων που γίνεται και με τη χρήση νευρωνικών δικτύων έχουμε την ανάπτυξη τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ) κατάλληλων για γρήγορη προσομοίωση. Η προσομοίωση αυτή μέσω ΤΝΔ μπορεί να έχει εφαρμογή σε διαφορετικές περιπτώσεις μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

Στο συσχετισμό παραμέτρων και ποιότητας επιφανείας που λαμβάνεται σε σύνθετα υλικά.

Στο συσχετισμό χρόνου κοπής και παραμέτρων στρατηγικής κοπής.

Στο συσχετισμό ποιότητας επιφάνειας και συνθηκών επεξεργασίας.

Στο συσχετισμό παραμέτρων διεργασίας χύτευσης και ελαττωμάτων που μπορεί να εμφανιστούν στο χυτό.

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ευρέως διαδεδομένα στη βιομηχανία λόγω των ικανοτήτων ταξινόμησης και βελτιστοποίησης που προσφέρουν. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών υλοποίησης ενός διαγνωστικού συστήματος. Εξ ορισμού, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εκπαιδευθούν για την μοντελοποίηση μη γραμμικών εξαρτήσεων στις παραμέτρους των διαδικασιών κατασκευής και παραμέτρων που δείχνουν την φθορά του εργαλείου και την βλάβη λειτουργίας.

Η πιο ευρέως δοκιμασμένη προσέγγιση νευρωνικού δικτύου ονομάζεται δίκτυο ανατροφοδότησης πολλαπλών επιπέδων (multilayer perception (MLP) network). Τα MLP δίκτυα είναι κατάλληλα για υψηλών ταχυτήτων εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Σε πολλές περιπτώσεις, περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά έχουν εξαχθεί από έναν αισθητήρα και αυτό θεωρείται σαν μη πραγματική προσέγγιση πολυαισθητήρα. Αν και οι περισσότερες αναφορές παρουσιάζονται ως online λύσεις στην πραγματικότητα φαίνεται να είναι off-line δίκτυα, που δεν έχουν δοκιμαστεί σε πραγματικό περιβάλλον παραγωγής. Στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται δειγματοληψία των δεδομένων χρησιμοποιώντας μόνο ένα σετ από τις συνθήκες κοπής. Ένα εργαλείο για την παρακολούθηση των συστημάτων αυτών πρέπει να μπορεί να διαχειρίζεται διάφορες συνθήκες κοπής.

Οι Ling και Ko [1990] σχεδίασαν ένα απλό δίκτυο που περιλάμβανε δύο εισόδους και μία έξοδο. Η φθορά κατηγοριοποιήθηκε σε πέντε κατηγορίες. Οι είσοδοι ήταν η επιτάχυνση και το ποσοστό αύξησης της ώσης. Κατέληξαν ότι το ποσοστό αναγνώρισης φθοράς έφτασε το 85%. Όμως ο μικρός αριθμός από δοκιμές δεν περιλάμβανε διαφορετικές συνθήκες κοπής. Τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός ταξινομητή δύο κατηγοριών σε μελέτες από τους Liu [1987] και Liu, Wu [1990]. Σε αυτήν την περίπτωση το ποσοστό επιτυχίας ήταν μεγαλύτερο από 90% για μία συνθήκη κοπής.

Οι Liu και Anantharaman [1994] δοκίμασαν την επίδραση ενός αριθμού από κρυμμένα επίπεδα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο αριθμός των εισόδων ήταν εννέα και βασισμένες στα σήματα ώσης, ροπής. Το συμπέρασμα ήταν ότι τα ΤΝΔ που σχεδίασαν μπορούν να

ξεχωρίσουν ένα φθαρμένο από ένα καλό τρυπάνι σε ποσοστό 100%, όπως επίσης μπορούν να ξεχωρίσουν την μέση φθορά πλαϊνών ακόμη και για διαφορετικές συνθήκες κοπής. Βέβαια δεν είχαν συμπεριλάβει καθόλου τεκμηριωμένες αποδείξεις για την εναλλαγή των συνθηκών κοπής. Συνέκριναν διαφορετικές εκδόσεις του αριθμού των νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο, όπως και μια τροποποιημένη έκδοση με κλίσεις προσαρμοζόμενης συνάρτησης ενεργοποίησης (adaptive activation-function slopes). Το αποτέλεσμα που ανέφεραν ήταν ότι το τροποποιημένο αυτό νευρωνικό δίκτυο φτάνει σε μια λύση πολύ γρηγορότερα από ένα συμβατικό feedforward δίκτυο.

Ο Liu [1998] εισήγαγε την επίδραση των παραμέτρων κοπής, διάμετρος του τρυπανιού, ρυθμός τροφοδοσίας και ταχύτητα του άξονα περιστροφής ταυτόχρονα με τις παραμέτρους της ώσης και της ροπής που χρησιμοποιήθηκαν και νωρίτερα. Ανέφεραν ότι το ποσοστό επιτυχίας μπορεί να φτάσει ακόμα και το 100% για online διάγνωση της φθοράς και μπορεί να αναγνωριστεί η φθορά ακόμα και αν αλλάζει η διάμετρος του τρυπανιού, ο ρυθμός τροφοδοσίας και η ταχύτητα του άξονα περιστροφής. Όμως πρέπει να αναφερθεί ότι δεν υπήρξε καμία διαφοροποίηση στη σκληρότητα του μετάλλου και ότι ο συνολικός αριθμός των δοκιμών ήταν επτά, στις οποίες δοκιμάστηκαν πέντε διαφορετικά μεγέθη τρυπανιού, έξι ρυθμοί τροφοδοσίας και πέντε ταχύτητες άξονα, που σημαίνει ότι ο αριθμός των δοκιμών ήταν μικρός σε σχέση με τον αριθμό των παραμέτρων που επιδρούν.

Οι Noori-Khajavi [1992] και Noori-Khajavi και Komanduri [1993, 1995] χρησιμοποίησαν ένα νευρωνικό δίκτυο για την ολοκλήρωση των σημάτων από τους αισθητήρες ροπής, δύναμης τροφοδότησης

και δύναμης ολίσθησης. Έδειξαν ότι δεν κερδίζεται τίποτα από την ολοκλήρωση των σημάτων αυτών και είναι εξίσου καλά με τα αρχικά σήματα. Οι Govekar & Grabec [1994] χρησιμοποίησαν έναν αυτοοργανούμενο (self-organizing) νευρωνικό δίκτυο. Οι συχνότητες κάτω από τα 200Hz των σημάτων ροπής και δύναμης τροφοδότησης αποκόπηκαν και οι μεγαλύτερες συχνότητες χωρίστηκαν σε τριάντα ζώνες. Κατέληξαν ότι η μέθοδος αυτή είναι αρκετά υποσχόμενη, αν και η επίδραση των συνθηκών κοπής δεν συμπεριλήφθηκε.

Ο Tansel [1992] δοκίμασε ένα διαφορετικό νευρωνικό δίκτυο που ονομάζεται Restricted Coulomb Energy (RCE) δίκτυο. Η θεωρία του δικτύου αυτού δίνεται στην αναφορά τους. Η διαδικασία ανοίγματος κάθε τρύπας χωρίζεται σε τέσσερα στάδια και σαν είσοδοι του νευρωνικού χρησιμοποιούνται η μέση και η τυπική απόκλιση της δύναμης τροφοδότησης, συνολικά δηλαδή οχτώ (8) είσοδοι. Το ποσοστό αναγνώρισης λανθάνουσας κατάστασης ήταν πάνω από το 90%. Οι συνθήκες κοπής δεν άλλαξαν, αν και τονίστηκε ότι η δύναμη τροφοδότησης διέφερε στις διάφορες δοκιμές. Τα ίδια δεδομένα δοκιμάστηκαν και σε ένα άλλο τύπο δικτύου που βασίζεται στην Adaptive Resonance Theory (ART). Σε αυτήν την περίπτωση οι είσοδοι υπολογίστηκαν μέσω του μετασχηματισμού κυματιδίου της δύναμης τροφοδότησης. Η προσέγγιση αυτή δοκιμάστηκε σε δύο δομές του δικτύου, η μία με είκοσι δύο (22) εισόδους και η άλλη με έξι (6). Η προσέγγιση με τον μεγαλύτερο αριθμό εισόδων έδωσε καλύτερα αποτελέσματα, ένα λάθος στις εξήντα μία (61) περιπτώσεις, αλλά ήταν πιο αργό από το άλλο. Και σε αυτήν την περίπτωση δεν άλλαξαν οι παράμετροι της διαδικασίας κοπής.

Ο Tsao [2002] δοκίμασε δύο ειδών νευρωνικά δίκτυα για φθορά πλαϊνών, βασιζόμενος στις μέγιστες τιμές των σημάτων της ώσης και της ροπής. Οι μέθοδοι των δύο νευρωνικών είναι η Radial Basis Function Network (RBFN) και μια παραλλαγή της, η adaptive RBFN (ARBFN). Η εκπαίδευση του νευρωνικού έγινε με δεκαοχτώ (18) περιπτώσεις και οι εννέα (9) δοκιμές που έγιναν έδωσαν καλά αποτελέσματα. Στην περίπτωση της πρόβλεψης το μέγιστο λάθος στην φθορά των τρυπανιών ήταν στο 0.4%, επίδοση που είναι πάρα πολύ καλή. Πρέπει να αναφερθεί ότι η οι παράμετροι κοπής που άλλαξαν ήταν η ταχύτητα του άξονα περιστροφής και ο ρυθμός τροφοδοσίας (feed rate). Πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι τα αποτελέσματα που βγαίνουν από τα σήματα της ώσης και της ροπής είναι πολύ σταθερά και δείχνουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης με την φθορά και στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις των παραμέτρων κοπής.

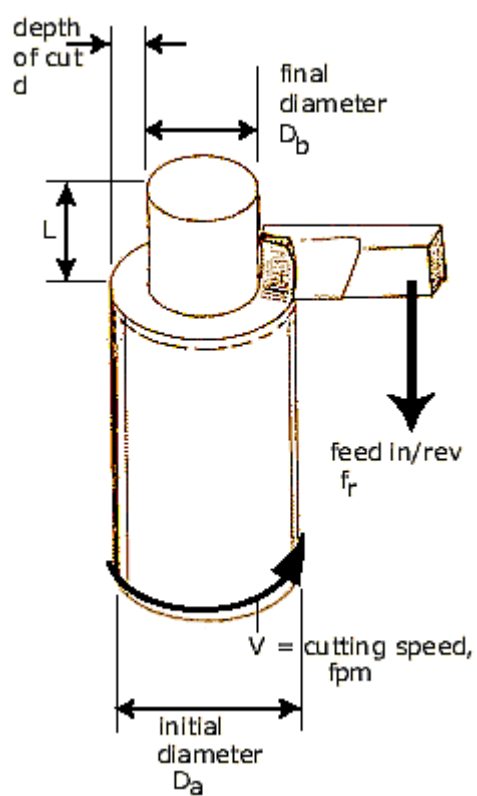
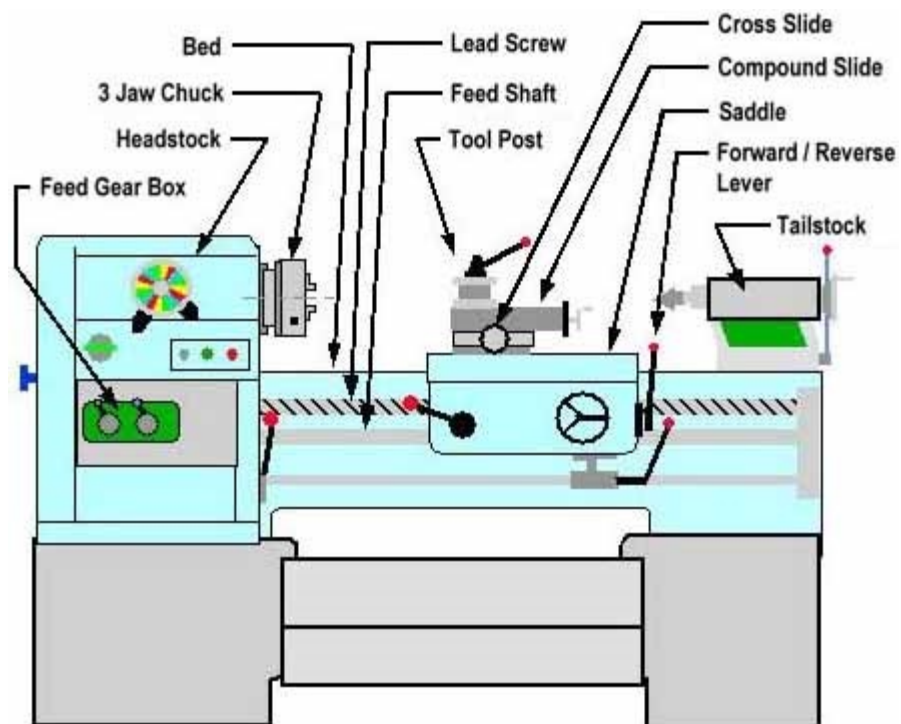
Ο Abu-Mahfouz[2003] χρησιμοποίησε ένα νευρωνικό δίκτυο πολλαπλών επιπέδων για την ανίχνευση της φθοράς του τρυπανιού και την διάκριση ανάμεσα στα διαφορετικά είδη φθοράς, βασιζόμενος στη μετρούμενη δόνηση. Από το μετρούμενο σήμα εξήχθησαν στατιστικές παράμετροι στο πεδίο του χρόνου, παράμετροι από τον μετασχηματισμό κυματιδίου και παράμετροι από την Burg συνάρτηση της φασματικής πυκνότητας ισχύος. Δοκιμάστηκαν διαφορετικοί τύποι νευρωνικών και οι παράμετροι των διαδικασιών κοπής δεν παρέμειναν σταθεροί, δηλαδή η ταχύτητα κοπής και η τροφοδοσία διέφεραν στις διάφορες δοκιμές. Το ποσοστό των σωστών προβλέψεων κυμάνθηκε στο 80% με 90% σε διάφορα ποικίλα τεχνητά είδη φθοράς που δοκιμάστηκαν. Βασιζόμενοι στις ίδιες μετρήσεις σήματος και παραμέτρων

ανάλυσης που περιγράφηκαν παραπάνω, ο Abu-Mahfouz [2005] αναφέρει τα αποτελέσματα από δύο επιπλέον προσεγγίσεις νευρωνικών δικτύων που δοκιμάστηκαν και ονομάζονται Learning Vector Quantization (LVQ) δίκτυο και Fuzzy Learning Vector Quantification (FLVQ) δίκτυο για την ανίχνευση της φθοράς πλαϊνών. Τα αποτελέσματα ήταν και σε αυτή τη περίπτωση πολύ καλά με ποσοστά επιτυχίας της τάξης του 86% για το LVQ δίκτυο και 88.8% για το FLVQ δίκτυο. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροι της διαδικασίας κοπής ποικίλουν.

Συμπεράσματα

Όπως θα έγινε κατανοητό από τις προηγούμενες παραγράφους στον τομέα των μηχανών κοπής και διαμόρφωσης μετάλλων, υπάρχουν πολλά που μπορούν να γίνουν όσον αφορά την πρόβλεψη της φθοράς των τρυπανιών. Πολλές δοκιμές έχουν γίνει από αρκετές ομάδες ανθρώπων, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν παραπάνω. Τα σήματα αναλύθηκαν στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους όπως η μέση τετραγωνική τιμή και η τυπική απόκλιση, στο πεδίο των συχνοτήτων χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως τον ταχύ μετασχηματισμό Fourier για την ανάλυση του φασματικού περιεχομένου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα στοιχεία που βγαίνουν από την επεξεργασία σημάτων όπως είναι τα αυτά της δόνησης, του ήχου και της ακουστικής εκπομπής είναι πιο κατάλληλα για την παρακολούθηση της φθοράς του τρυπανιού σε σχέση με τα στοιχεία που παίρνουμε από τη κατανάλωση ισχύος, το ρεύμα και τις δυνάμεις κοπής. Οι σχέσεις που υπάρχουν ανάμεσα στα σήματα που αναλύονται και

στην φθορά του εργαλείου αποτελούν τη βάση του συστήματος διάγνωσης. Η χρήση παλινδρομικών εξισώσεων μεγάλου πολυωνυμικού βαθμού με περιορισμένο αριθμό όρων επιλύει το πρόβλημα του μεγάλου όγκου δεδομένων που πρέπει να αποθηκευτούν από τις μετρήσεις των σημάτων, ειδικά όταν ανιχνεύεται μεγάλος αριθμός σημάτων. Αρκετά συστήματα διάγνωσης-πρόγνωσης της φθοράς, όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα, τα συστήματα ασαφούς λογικής, τα έμπειρα συστήματα και τα συστήματα προκαθορισμένων ορίων εξετάστηκαν. Οι πλειονότητα των συστημάτων δεν μπορεί να ξεχωρίσει τους διάφορους τύπους φθοράς ενός τρυπανιού. Τελικά πρέπει να παρατηρήσουμε ότι για την ανάπτυξη ενός πετυχημένου συστήματος διάγνωσης της φθοράς των τρυπανιών σε διαδικασίες κοπής, το σύστημα που θα αναπτυχθεί θα πρέπει να δοκιμαστεί σε μεγάλο αριθμό διαφορετικών τρυπανιών και συνθηκών κοπής, έτσι ώστε να μπορεί να εγκατασταθεί σε διαφορετικές μηχανές και να είναι σε θέση να συμπεραίνει πότε ένα τρυπάνι έχει ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του και χρειάζεται αλλαγή.



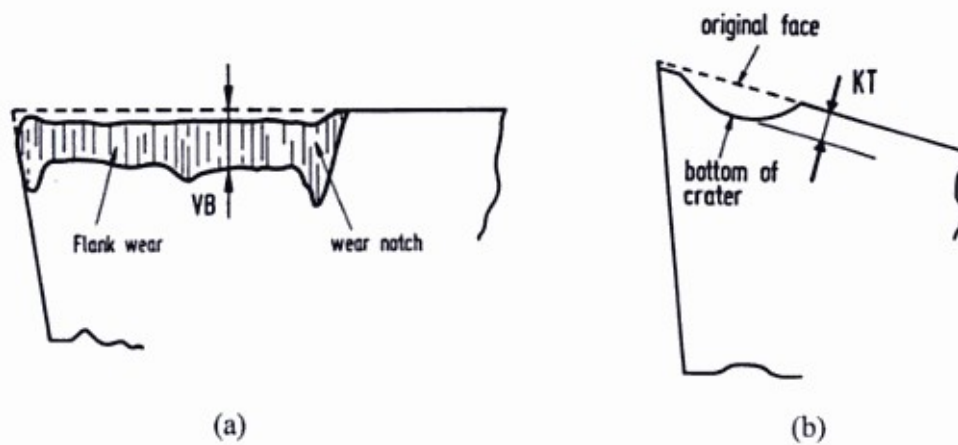


FIG. 1 – Measurement of (a) **flank**, and (b) **crater wear** (after ISO 3685-1977 (E) [8]).

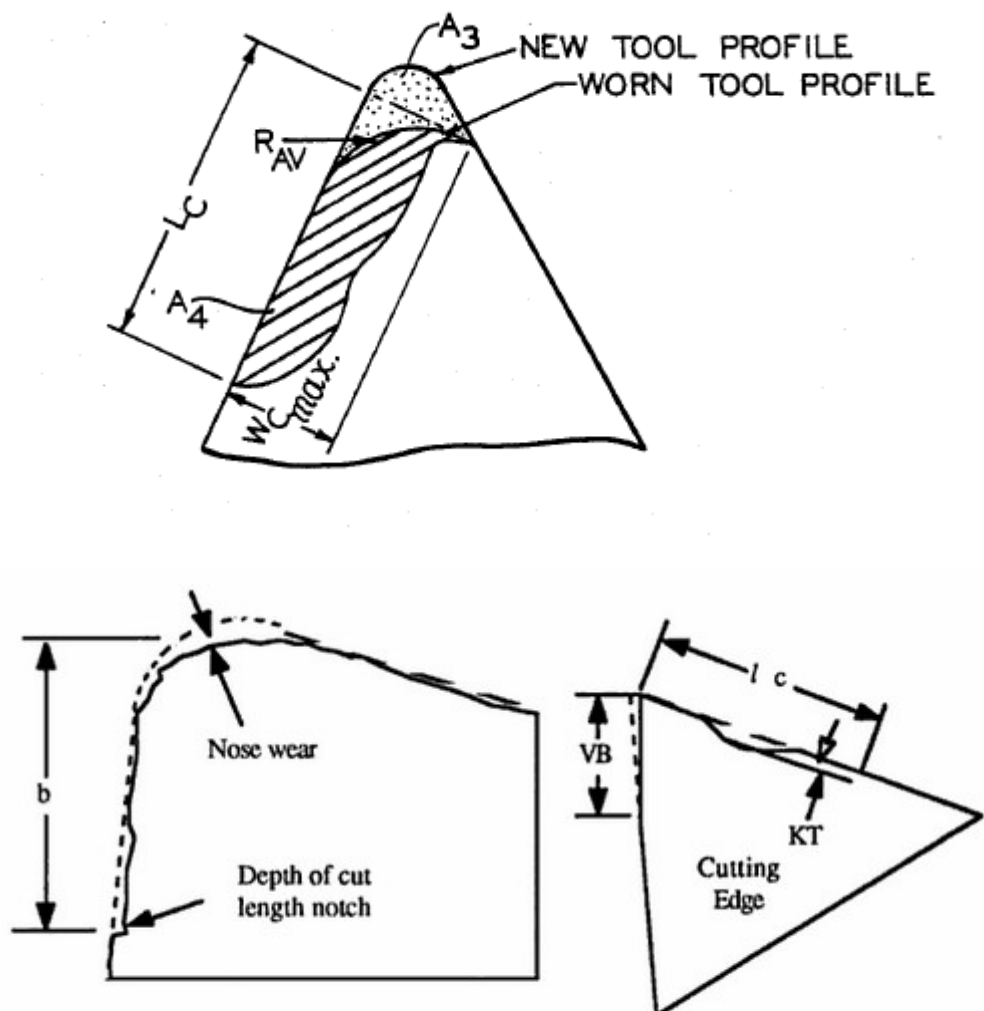
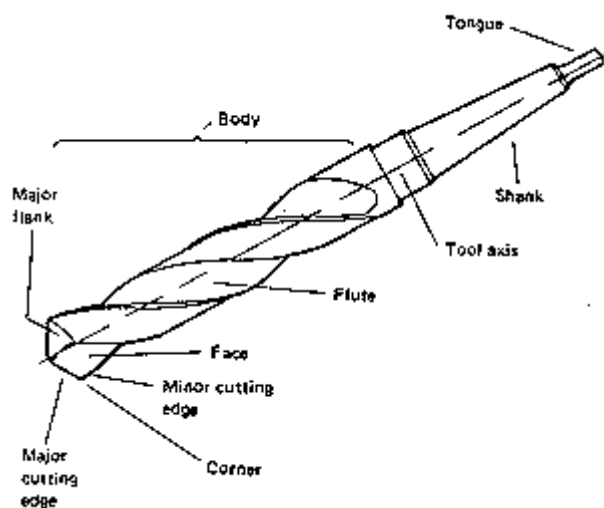
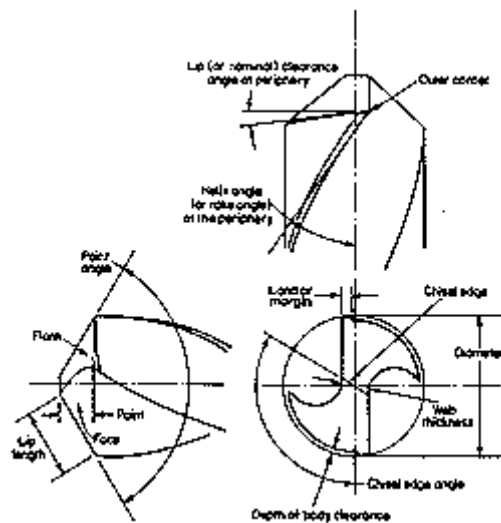
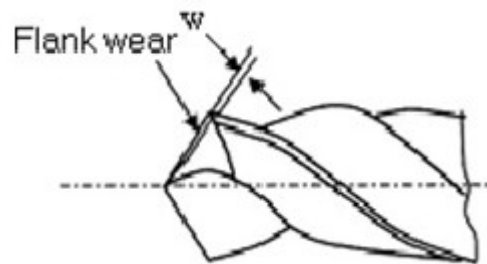
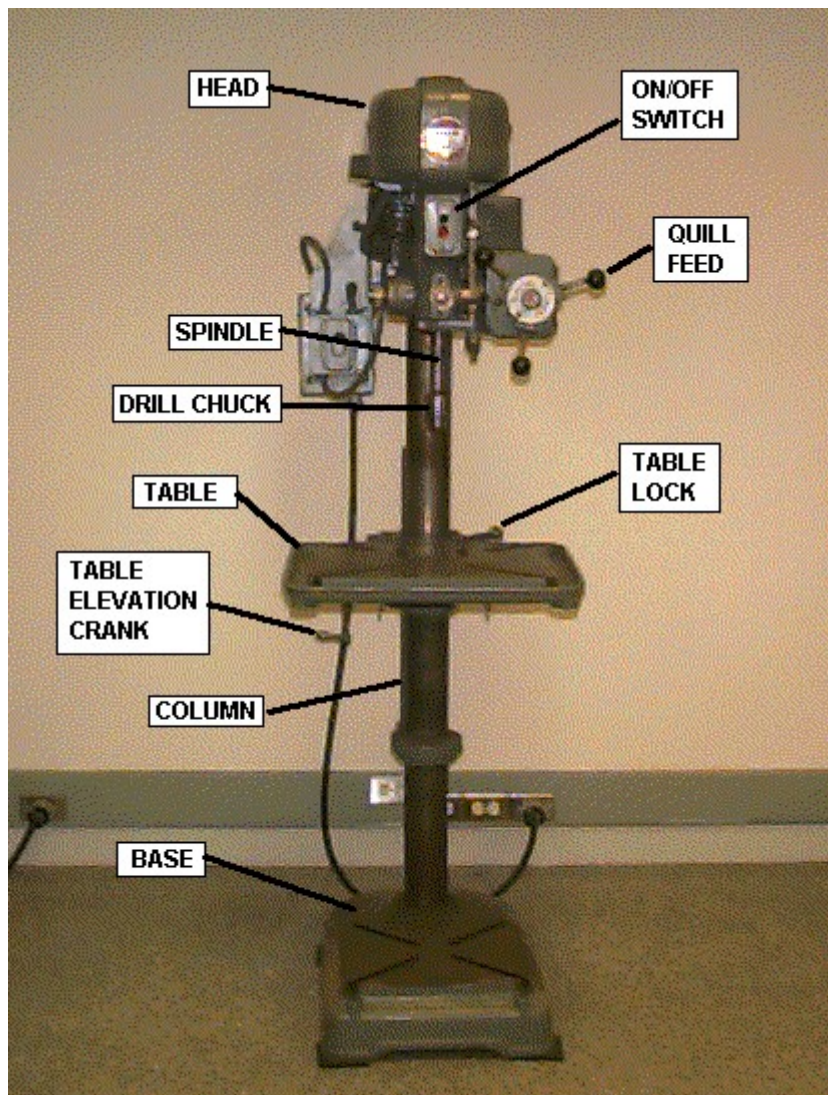


Figure 4.8 Top and edge view of a cutting edge showing nose, depth of cut notching, **crater** and **flank wear**.

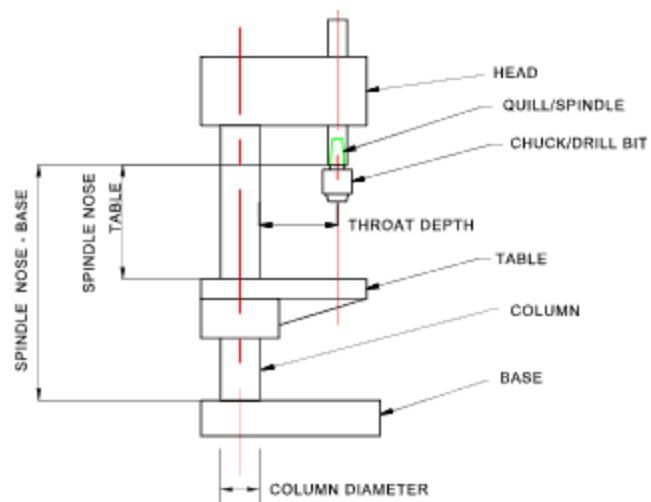
chisel, corner, crater, flank and land wear.



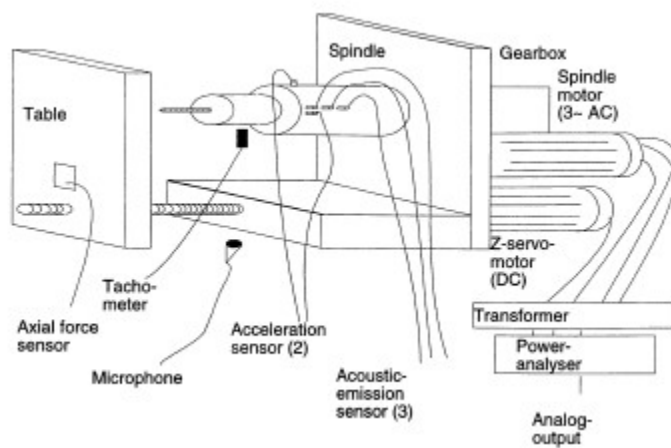
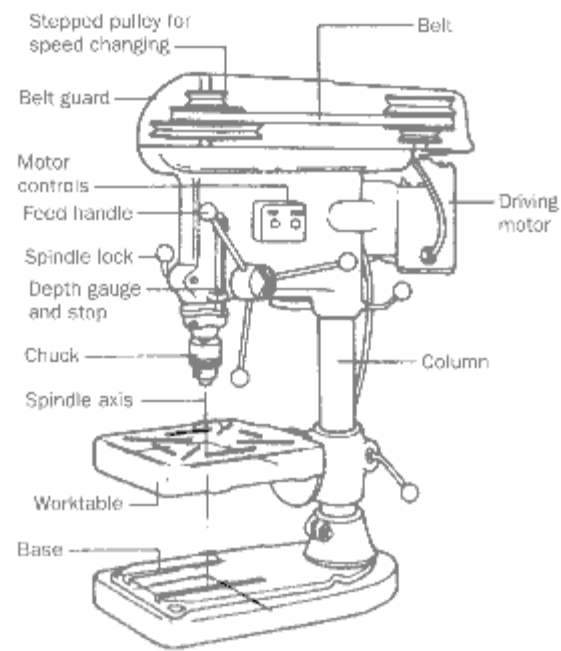




Drill chuck

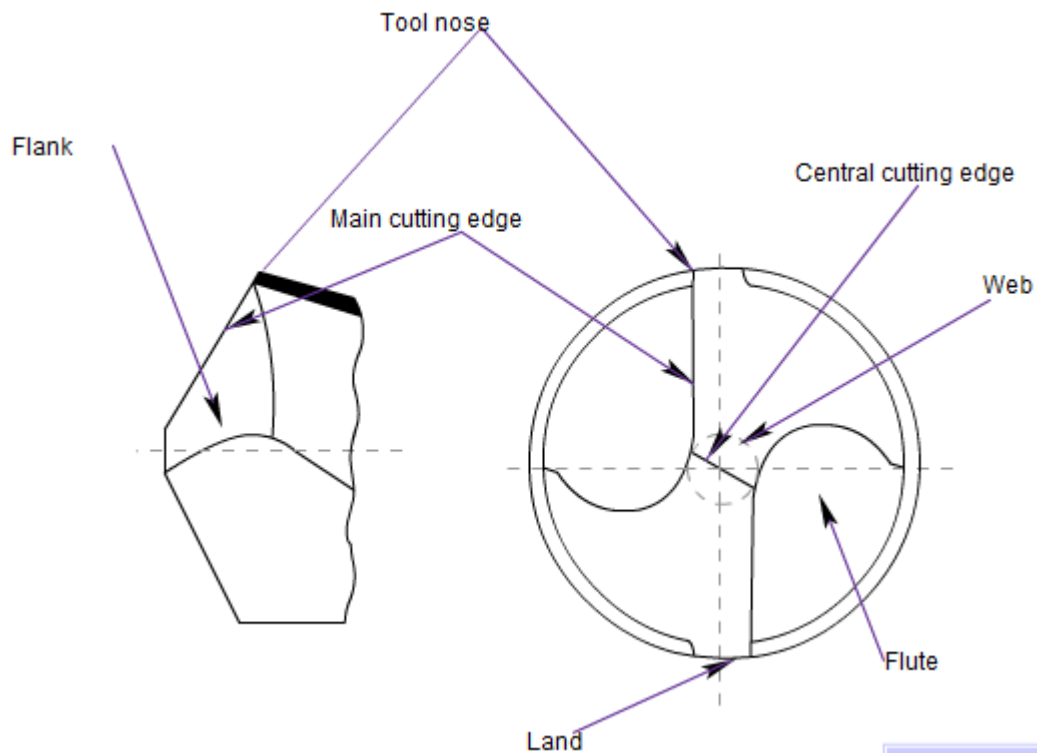
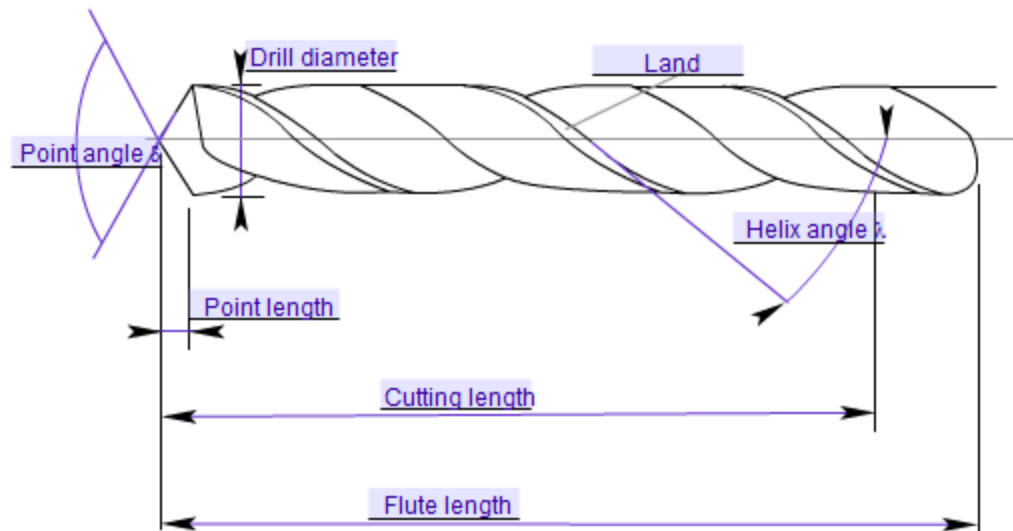


Drilling machine



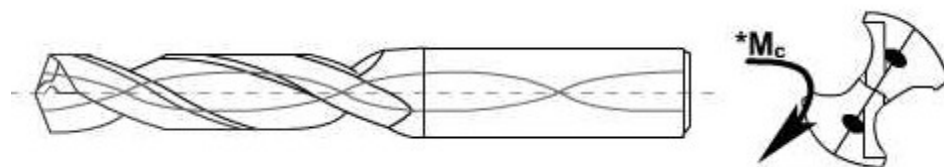
Spindle motor and feed drive current

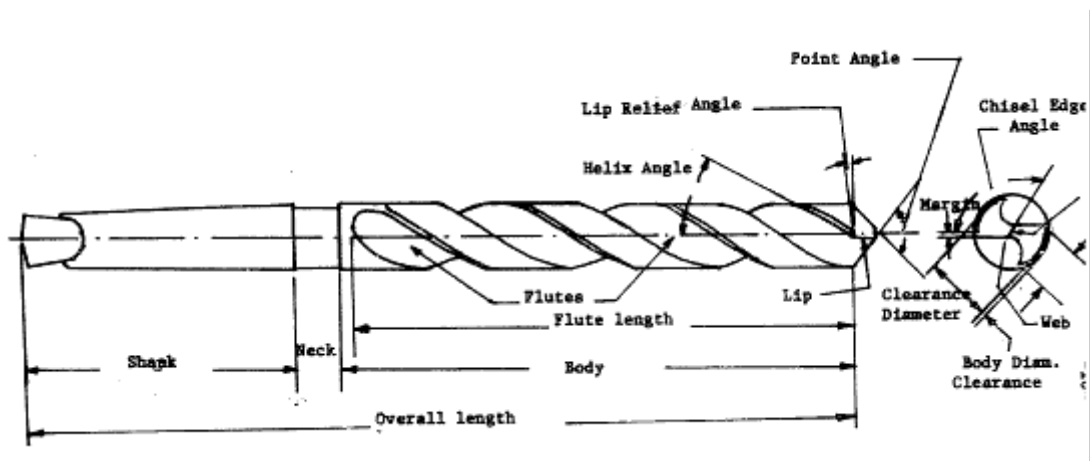
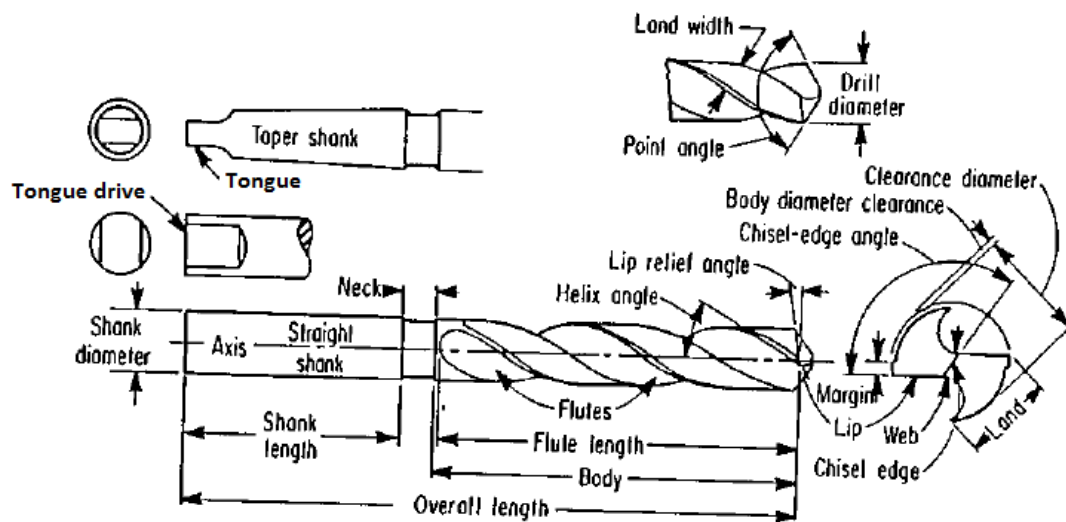
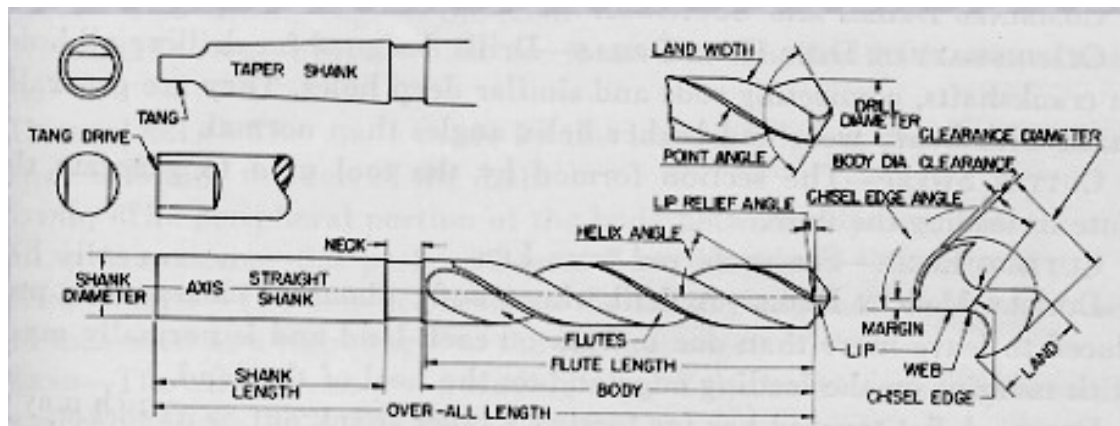
Torque, drift force and feed force

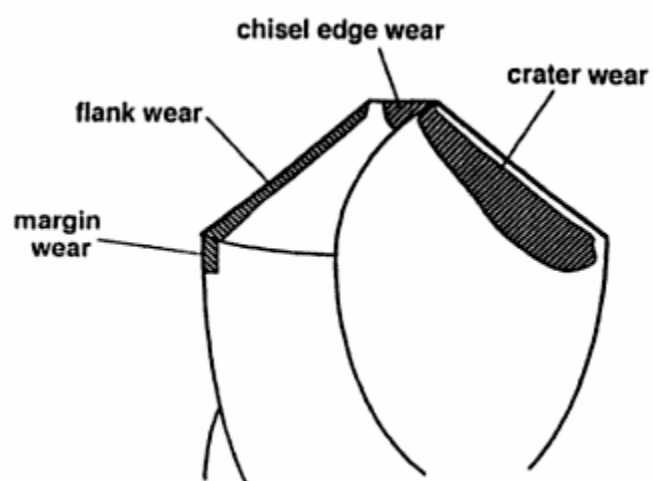
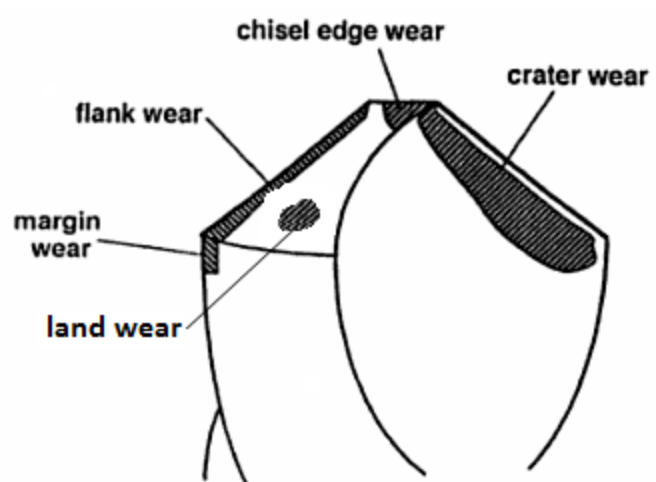


Drilling

torque:



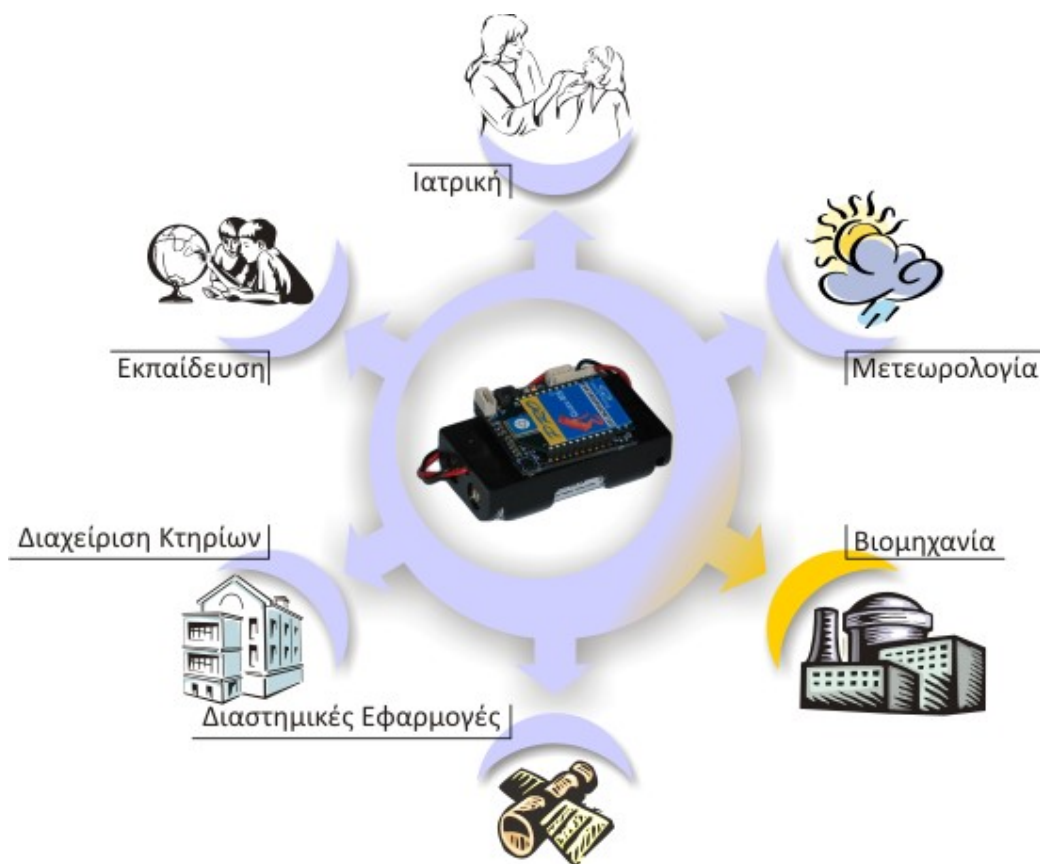




Κεφάλαιο 6

Τι είναι το PrismaSense

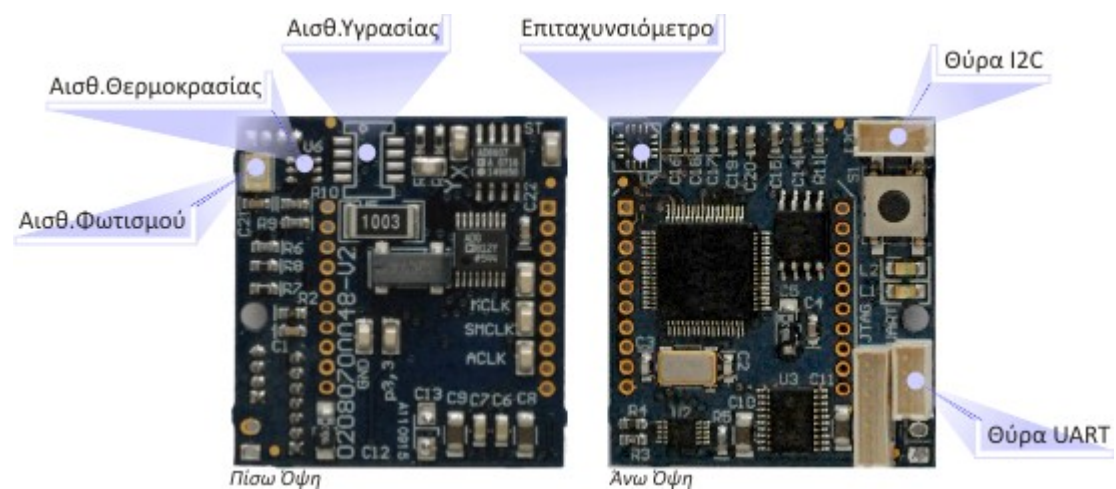
Το PrismaSense είναι μία πλατφόρμα ανάπτυξης εφαρμογών που βασίζεται σε έξυπνους αισθητήρες (Smart Sensors). Το πεδίο εφαρμογών μιας τέτοιας πλατφόρμας είναι αρκετά ευρύ, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, εμείς όμως θα εστιάσουμε σε εφαρμογές στη βιομηχανία.



Παρακάτω θα κάνουμε μία συνοπτική παρουσίαση του hardware και του software της πλατφόρμας. Περισσότερες λεπτομέρειες όσον αφορά το hardware αλλά και το software κυρίως υπάρχουν στην εργασία του συνεργάτη μου Ανδρέα Παπαγεωργίου.

Hardware

Quax MS



Το Quax-MS είναι ο βασικός πολυαισθητήρας του Prisma Sense. Έχει την δυνατότητα να λαμβάνει μετρήσεις να τις επεξεργάζεται, να τις αποθηκεύει και να στέλνει τα αποτελέσματα μέσω ασύρματης επικοινωνίας ZigBee. Επίσης, ανάλογα το λογισμικό του μπορεί να λαμβάνει εντολές για καθορισμό της λειτουργίας του.

Έχει διαστάσεις 35mm x 33mm.

Διαθέτει τον επεξεργαστή MSP430 της Texas Instruments στα 8MHz με 40KB Flash και 10KB RAM.

Έχει ενσωματωμένους αισθητήρες φωτισμού, θερμοκρασίας, υγρασίας και επιταχυνσιόμετρο δύο αξόνων.

Διαθέτει σειριακές θύρες I2C και UART για απευθείας σύνδεση με Η/Υ ή προσθήκη κι άλλων αισθητήρων.

Διαθέτει RealTimeClock και ειδική διάταξη για ξεχωριστό έλεγχο της τροφοδοσίας των αισθητήρων από τον επεξεργαστή για την μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος στο ελάχιστο δυνατό.

Στην standard έκδοση τροφοδοτείται από δύο αλκαλικές μπαταρίες AA και η αυτονομία του εξαρτάται από το λογισμικό του. Σε κατάσταση ηρεμίας ξεπερνάει τα δύο χρόνια λειτουργίας χωρίς την αλλαγή των μπαταριών.

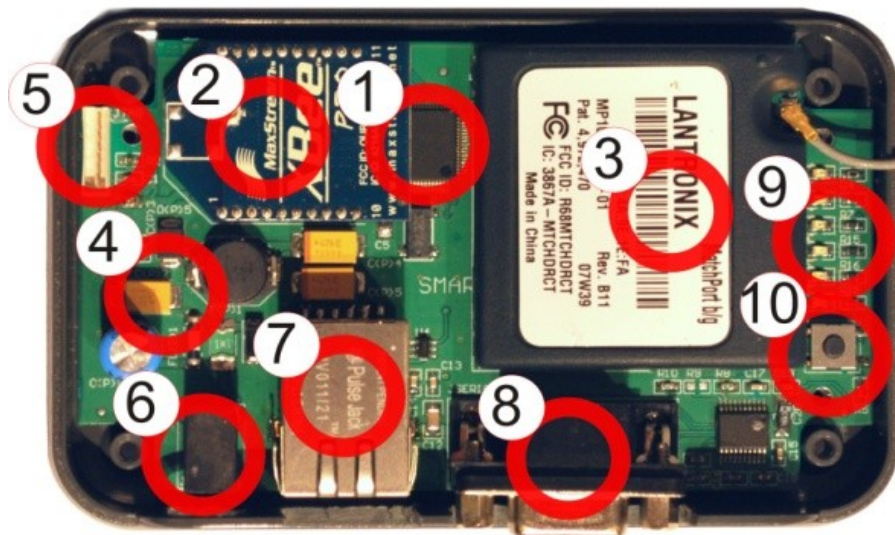
Επιπλέον, διαθέτει εξωτερική μνήμη τύπου eeprom 512Kbit , για την αποθήκευση των μετρήσεων.

Διατίθεται με διάφορους πομποδέκτες ZigBee στα 2,4GHz ανάλογα το είδος της κεραίας, όπου διατίθεται με chip antenna, απλή διαφορική ή εξωτερική, και ανάλογα την ισχύ του σήματος εκπομπής, στα 1mW ή 10mW. Οι μετρούμενες αποστάσεις εκπομπής

με ισχύ 10mW φτάνουν τα 300μέτρα σε εσωτερικό χώρο και 1χμ σε εξωτερικό.

Gateway





1. Επεξεργαστής
2. Module ZigBee
3. Module Wifi b/g
4. Switching Μετατροπέας Τάσης
5. Ακροδέκτης προγραμματισμού (JTAG)
6. Ακροδέκτης τροφοδοσίας
7. Ακροδέκτης Ethernet (RJ-45)
8. Ακροδέκτης σειριακής RS232(DB9 Female)
9. Leds Ενδείξεων
10. Πλήκτρο επιλογής ενσύρματου ή ασύρματου δικτύου υπολογιστών



Ο ρόλος του PrismaSense Gateway είναι να δημιουργεί το ασύρματο δίκτυο των αισθητήρων και να εγκαθιστά επικοινωνία με τον κεντρικό εξυπηρετητή του κέντρου συντήρησης.

Επίσης αναλαμβάνει να διαχειριστεί το δίκτυο zigbee, δηλαδή αποφασίζει ποιες συσκευές θα συνδεθούν σε αυτό, διατηρεί τον πίνακα δρομολογήσεων των πακέτων, ελέγχει τον θόρυβο στο κανάλι εκπομπής και συγχρονίζει τις συνδεόμενες συσκευές.

Επιπλέον, αναλαμβάνει να μεταφέρει όλη την πληροφορία που έχει ως παραλήπτη το κεντρικό σύστημα σε αυτό, με την σύνδεσή της είτε σε ασύρματο δίκτυο υπολογιστών WIFI 802.11b/g, είτε σε ενσύρματο δίκτυο Ethernet είτε σε απλή σειριακή επικοινωνία RS232. Υποστηρίζει και την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων και του υπολογιστικού κέντρου.

Όπως, φαίνεται και στο διάγραμμα, πάνω αριστερά, η δομή του δικτύου ZigBee είναι πλήρως επεκτάσιμη και πολύ ευέλικτη. Απλά με την προσθήκη συσκευών μπορεί να επεκταθεί η κάλυψη του δικτύου πολύ εύκολα και με μικρό κόστος. Επίσης, το δίκτυο καθίσταται ακόμα πιο ευέλικτο καθώς δεν υπάρχει πρακτικός περιορισμός στην συνύπαρξη ξεχωριστών δικτύων ZigBee. Συγκεκριμένα, μπορεί να γίνει διαχωρισμός του δικτύου των αισθητήρων σε επιμέρους δίκτυα ανάλογα το φυσικό αντικείμενο που ελέγχουν (μηχανές ή τμήματα παραγωγής). Για κάθε επιμέρους δίκτυο θα τοποθετηθεί ένα διαφορετικό gateway που θα υλοποιήσει το δικό του δίκτυο με μοναδικό κωδικό αριθμό σύνδεσης και σε διαφορετικό κανάλι εκπομπής. Αυτά τα gateways μπορούν αν συνδεθούν όλα στο υπολογιστικό κέντρο μέσω ενσύρματου ή ασύρματου δικτύου υπολογιστών.

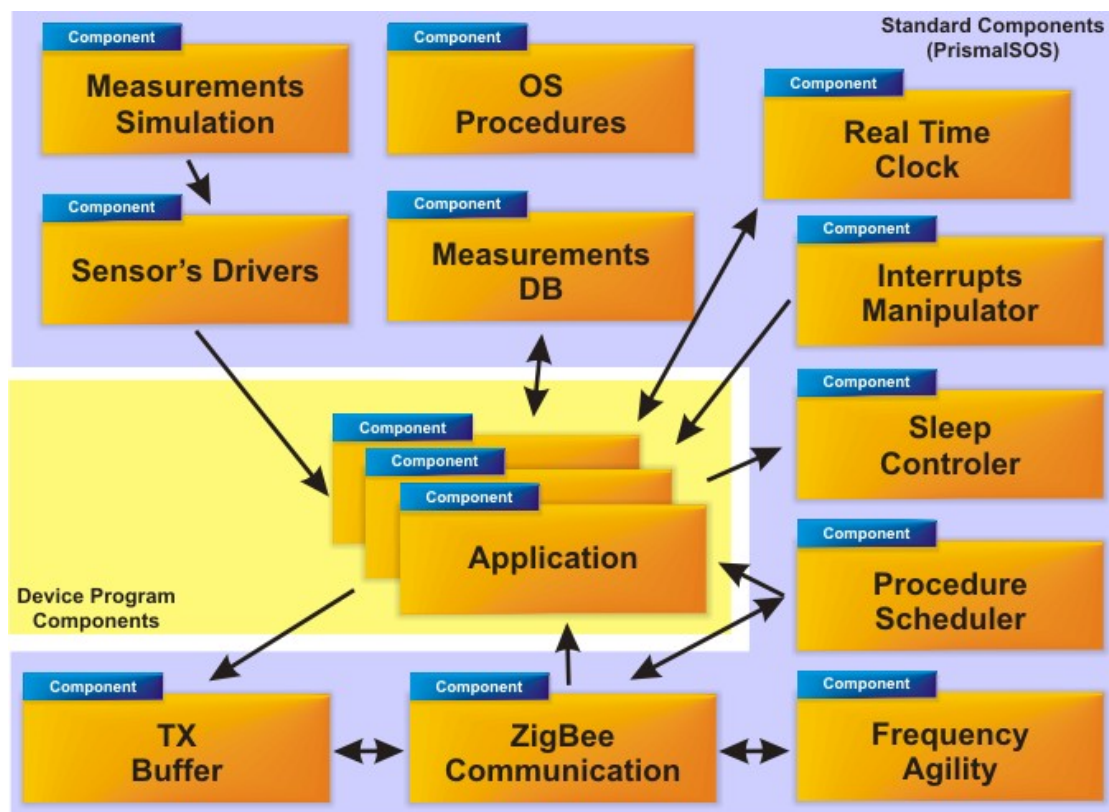
Στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν απομακρυσμένα σημεία μπορεί να συνδεθεί το gateway σε ένα GPRS Modem. Επίσης, ειδικά σε περιπτώσεις, όπως οι μεταφορές, οι αισθητήρες μπορούν να συλλέγουν τις μετρήσεις και να τις αποστέλλουν στο κεντρικό σύστημα μόλις συνδεθούν ξανά στο δίκτυο.

Software

Το PrismaSense, περιλαμβάνει και το κατάλληλο λογισμικό, το οποίο επιτρέπει τον προγραμματισμό του συστήματος. Το πρώτο μέρος του πακέτου αυτού περιλαμβάνει ένα λειτουργικό σύστημα ειδικά προσαρμοσμένο στους αισθητήρες Quax.

Δεν υπάρχει περιορισμός στην επιλογή λειτουργικού συστήματος αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα όπως το MicroC, το TinyOS κτλ. Ωστόσο το ISOS (Intelligent Sensor Operating System

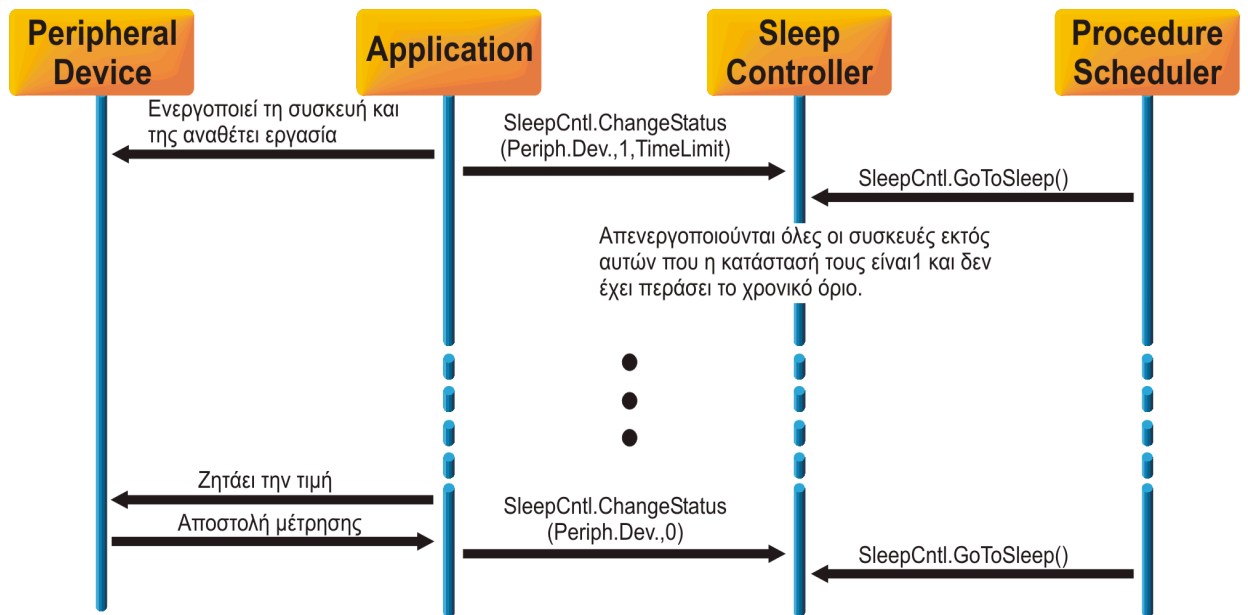
είναι ειδικά προσαρμοσμένο στους ασύρματους αισθητήρες και ειδικότερα για βιομηχανικές εφαρμογές. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι, με πολύ απλό τρόπο και λίγες γραμμές κώδικα μπορεί να δημιουργηθεί μία νέα εφαρμογή, χωρίς να μας απασχολεί ο τρόπος μετάδοσης των δεδομένων, η λειτουργία του επεξεργαστή για την εξοικονόμηση ενέργειας, η λήψη των μετρήσεων, ο συγχρονισμός του ρολογιού, η αξιοπιστία του λογισμικού κτλ.



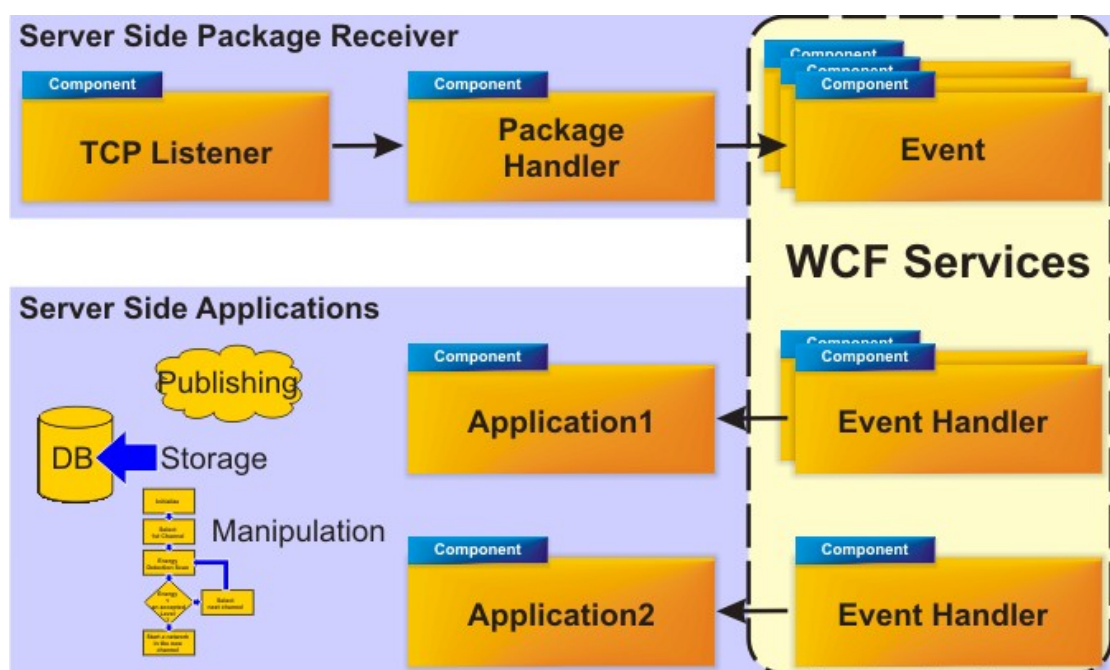
Παρακάτω βλέπουμε λίγο πιο συγκεκριμένα τη λειτουργία του λειτουργικού σε χαμηλότερα επίπεδα.

Η διεργασία που εκτελείται, ανάλογα με την εφαρμογή που εκτελείται (πχ ανάγνωση θερμοκρασίας, υγρασίας κλπ), ενεργοποιεί

την αντίστοιχη περιφεριακή συσκευή και της αναθέτει εργασία (πχ ανάγνωση θερμοκρασίας) αλλά και μεταφέρει στον Sleep Controller ένα σήμα αλλαγής κατάστασης της συγκεκριμένης περιφεριακής συσκευής στην τιμή 1 συνοδευόμενη από ένα χρονικό όριο μετά το πέρας του οποίου παύει να ισχύει η κατάσταση αυτή και η συγκεκριμένη συσκευή μπορεί να μπει σε sleep mode. Ο Procedure Scheduler εν το μεταξύ στέλνει εντολή GoToSleep στον Sleep Controller, με την οποία απενεργοποιούνται όλες οι περιφεριακές συσκευές εκτός από αυτές που η κατάσταση τους είναι 1 και δεν έχει περάσει το χρονικό όριο που ορίσαμε. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα που ορίζουμε εμείς ώστε να διασφαλίσουμε τη ακριβειότητα των δεδομένων της περιφεριακής συσκευής, εκτελείται η διεργασία Ανάγνωση, κατά την οποία η εφαρμογή ζητάει από την περιφεριακή συσκευή την τιμή που πήρε από τον αισθητήρα μέτρησης και αφού λάβει την απάντηση, ειδοποιεί τον sleep controller ότι πλέον η κατάσταση της συγκεκριμένης περιφεριακής συσκευής είναι 0, το οποίο σημαίνει ότι μετά από την περιοδική εντολή του Scheduler, ο sleep Controller θα θέσει αυτή τη συσκευή σε sleep mode.



Το δεύτερο καμμάτι του software του PrismaSense είναι το server side λογισμικό, το οποίο παρέχει εφαρμογές σε WCF Services, ώστε από οποιοδήποτε υπολογιστή συνδεδεμένο στο δίκτυο του server να μπορεί να αποστέλλει και να λαμβάνει πακέτα από τους ασύρματους αισθητήρες. Επίσης, παρέχεται εφαρμογή αποθήκευση των δεδομένων και των μετρήσεων σε MIMOSA βάση δεδομένων.



Κεφάλαιο 7

Η Εφαρμογή μας

Η εφαρμογή μας αποτελείται από ένα σύστημα *toolware monitoring*, το οποίο αρχικά περιελάμβανε μία απλή εφαρμογή λήψης δεδομένων από το επιταχυνσιόμετρο του αισθητήρα και αποστολής τους στον κεντρικό υπολογιστή. Επειτα, υλοποιήσαμε δύο αλγορίθμους (RMS και FFT) στο λογισμικό του αισθητήρα, με στόχο την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατάσταση της μηχανής. Ο αισθητήρας τοποθετείται πάνω στη μηχανή και καταγράφει τους κραδασμούς που παράγονται μέσω του επιταχυνσιομέτρου δύο αξόνων που διαθέτει. Τα δεδομένα αποστέλονται στο Gateway και από εκεί στον κεντρικό υπολογιστή όπου μέσω ειδικού software (ανεπτυγμένου από την Prisma) μπορούμε να λαμβάνουμε τα δεδομένα, να τα απεικονίζουμε γραφικά, να τα αποθηκεύουμε σε βάση δεδομένων ή σε αρχείο excel. Η ανάπτυξη των εφαρμογών έχει σε επίπεδο λειτουργικού συστήματος του αισθητήρα της PrismaSense. Λεπτομέρειες υλοποίησης της εφαρμογής καθώς και ο κώδικας μαζί με screenshots βρίσκονται στη διπλωματική του συνεργάτη μου Ανδρεά Παπαγεωργίου.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

Συμπεράσματα

Εκτός από τη θεωρητική μελέτη του χώρου του Industrial Plant Monitoring και του Toolware Monitoring , προχωρήσαμε σε μία ανάλυση και αξιολόγηση των παραμέτρων φθοράς μιας μηχανής στο κεφ. 5 και καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η υλοποίηση του αλγορίθμου FFT (Fast Fourier Transform) θα μας οδηγήσει σε μία πολύ πιο αποδοτική λύση από την ήδη υπάρχουσα όσον αφορά το toolware monitoring. Η παραπάνω παραδοχή βασίζεται στο γεγονός ότι υλοποιώντας έναν αλγόριθμο FFT που τρέχει στον αισθητήρα, αφ' ενός προσδίδουμε ευφυία στη συσκευή η οποία πλέον δε στέλνει raw data στον κεντρικό υπολογιστή, αλλά το συχνотικό περιεχόμενο του σήματος που λαμβάνει από τις δονήσεις της μηχανής, από το οποίο έχει αποδειχθεί σε μελέτες ότι μπορούμε να συμπεράνουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση της μηχανής. Αφ' ετέρου, στέλνοντας με τον τρόπο αυτό λιγότερα δεδομένα ανά μονάδα χρόνου, μειώνει την κατανάλωση του

αισθητήρα, η οποία αποτελεί βασική παράμετρο κατά τη σχεδίαση ενός WSN.

Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Στόχος μας είναι να δημιουργήσουμε ένα σύστημα με όσο το δυνατόν περισσότερη ευφυία. Στην πράξη δηλαδή, ο αισθητήρας να είναι σε θέση να εκτελέσει όχι μόνο τους υπολογισμούς αλλά βασιζόμενος σε κάποια σενάρια να στέλνει στον κεντρικό υπολογιστή αποκλειστικά events τα οποία θα δηλώνουν την κατάσταση του συστήματος και όχι raw data. Επίσης η ακριβέστερη πρόβλεψη αστοχίας της μηχανής απαιτεί υλοποίηση και δοκιμή περισσότερων αλγορίθμων. Το πρώτο βήμα έγινε με την υλοποίηση του FFT αλγορίθμου και την παρατήρηση ότι μέσω αυτού παρατηρείται μία σημαντική βελτίωση. Μια περετέρω βελτίωση στην εφαρμογή θα μπορούσε να βασιστεί στη μελέτη νευρωνικών δικτύων, έμπειρων συστημάτων αλλά και fuzzy logic συστημάτων. Τελος, σημειώνουμε ότι με την ανάθεση όσο περισσότερων λειτουργιών στον αισθητήρα, προσδίδοντάς του λειτουργικότητα και ευφυία, ωφελούμαστε σημαντικά και σε θέματα κατανάλωσης

ενέργειας του αισθητήρα, μιας και η λειτουργία αποστολής δεδομένων είναι η πιο ενεργοβόρα.

Βιβλιογραφία

- [1] Carlos de Morais Cordeiro, Dharma Prakash Argawal. Ad Hoc and Sensor Networks Theory and Application
- [2] WI-FI, BLUETOOTH, ZIGBEE and WiMAX H. LABIOD, H. AFIFI, C. DESANTIS. Springer, 2007.
- [3] Zigbee Specification ZigBee Alliance, 2007.
- [4] ZIGBEE WIRELESS NETWORKING Gislason Drew. Newnes, 2008.