



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ Η.Μ.Μ.Υ.

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ Η/Υ

Διπλωματική Εργασία

Υλοποίηση και σύγκριση αλγορίθμων ελέγχου PD,
PI και fuzzy PD σε διαχείριση ενέργειας σε
υπάρχοντα κτίρια.

Καφετζής Γεώργιος

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής ΜΠΔ Πουλιέζος Αναστάσιος

Διδάσκουσα Π.Δ. 407/80 Κολοκοτσά Διονυσία

ΧΑΝΙΑ 2005

*Ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθειά τους, τους καθηγητές
Σταυρακάκη Γεώργιο
Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο
Κολοκοτσά Διονυσία
και τον διδακτορικό φοιτητή Ευάγγελο Ι. Τριπολιτάκη*

*Ευχαριστώ τον καθηγητή ΜΠΔ, Πουλιέζο Αναστάσιο
για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	5
1.1 Γενικά	5
1.2 Επιστημονική συνεισφορά.....	6
1.3 Περιγραφή κεφαλαίων.....	7
Κεφάλαιο 2 – Περιγραφή προβλήματος και αναφορές	9
2.1 Διατύπωση του προβλήματος	9
2.2 Αναφορές σε υπάρχοντα συστήματα.....	11
2.2.1 Εγκατάσταση LONworks Πολυτεχνείου Κρήτης	11
2.2.2 Εγκατάσταση EIB Πολυτεχνείου Κρήτης	11
Κεφάλαιο 3 - Θεωρία ελεγκτών	13
3.1 Γενικά	13
3.2 Ελεγκτές ασαφούς λογικής.....	13
3.2.1 Γενικά για ασαφή λογική	13
3.2.2 Ειδικότερα για ελεγκτές ασαφούς λογικής	16
3.3 Κλασικοί ελεγκτές.....	21
3.3.1 Γενικά.....	21
3.3.2 Αναλυτικότερα για τους ελεγκτές	21
3.3.3 Τα χαρακτηριστικά των P, I και D ελεγκτών P ελεγκτών	23
3.3.4 PD Ελεγκτής.....	24
3.3.5 PI Ελεγκτής	26
3.3.6 Επιλογή του Sample Time	28
3.3.7 Μέθοδοι ρύθμισης και παραμετροποίησης ελεγκτών	28
3.4 Ασαφείς και κλασικοί ελεγκτές	31
Κεφάλαιο 4 - Περιγραφή του συστήματος EIB.....	32
4.1 Περιγραφή Προτύπου EIB.....	32
4.1.1 Γενικά για το πρότυπο EIB	32
4.1.2 Μετάδοση μέσω συνεστραμμένου ζεύγους	32
4.1.3 Ασύρματη Μετάδοση	34
4.1.4 Μετάδοση με χρήση γραμμής ισχύος.....	35
4.1.5 Τοπολογία και Οργάνωση διαύλου	35
4.1.6 Μετάδοση πληροφορίας - τηλεγραφήματα.....	36
4.1.7 Ανάπτυξη έξυπνων κόμβων – βιβλιοθήκη EteC Falcon.....	38

4.2 Περιγραφή εγκατάστασης ΕΙΒ του εργαστηρίου ΕΗΚΑΠΕ του Πολυτεχνείου Κρήτης.....	39
4.2.1 Γενικά.....	39
4.2.2 Περιγραφή και τοπολογία της εγκατάστασης.....	40
4.2.3 Αισθητήρια και ελεγχόμενες συσκευές	41
Κεφάλαιο 5 - Πειραματική διαδικασία	44
5.1 Βαθμονόμηση υγρασιόμετρου	44
5.2 PD ελεγκτής ασαφούς λογικής.....	46
5.2.1 Γενικά.....	46
5.2.2 Είσοδοι/Εξοδοι και συναρτήσεις συμμετοχής	47
5.2.3 Κανόνες ελέγχου	50
5.2.4 Ενσωμάτωση αλγορίθμου ελεγκτή	52
5.3 Κλασικός PI ελεγκτής.....	54
5.3.1 Γενικά.....	54
5.3.2 Εύρεση παραμέτρων ελεγκτή (Ziegler-Nichols).....	54
5.3.3 Επιλογή sample time T_0 και τελική μορφή ελεγκτή.....	58
5.3.4 Ενσωμάτωση αλγορίθμου ελεγκτή	59
5.4 Κλασικός PD ελεγκτής.....	60
5.4.1 Γενικά.....	60
5.4.2 Εύρεση παραμέτρων ελεγκτή (Cohen Coon).....	61
5.4.3 Διαδικασία εξαγωγής τελικής μορφής ελεγκτή.....	61
5.4.4 Ενσωμάτωση αλγορίθμου ελεγκτή	67
Κεφάλαιο 6 - Πειραματικά αποτελέσματα.....	69
6.1 Γενικά	69
6.2 Αποτελέσματα για τον PD ελεγκτή ασαφούς λογικής	69
6.3 Αποτελέσματα για τον κλασικό PI ελεγκτή.....	76
6.4 Αποτελέσματα για τον κλασικό PD ελεγκτή	80
Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα και Μελλοντικές προεκτάσεις.....	84
7.1 Σύγκριση ελεγκτών - συμπεράσματα	84
7.2 Μελλοντικές Προεκτάσεις.....	89
Επίλογος	92
Βιβλιογραφία	93
Παράρτημα	96

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Την τελευταία εικοσαετία, οι εξελίξεις στο χώρο του αυτοματισμού σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις σε κτίρια είναι ραγδαίες. Σε αυτό έχει συμβάλει η μεγάλη πρόοδος, τόσο στον τομέα της ηλεκτρονικής, όσο και στον τομέα της πληροφορικής, επιτρέποντας έτσι τη χρήση εξελιγμένων (έξυπνων) ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων από ένα απλό σπίτι (έξυπνο σπίτι) μέχρι μία βιομηχανική εγκατάσταση ή ένα μεγάλο δημόσιο κτίριο.

Η ανάπτυξη τέτοιων εγκαταστάσεων σε κτίρια εκτός από την άνεση και την ευκολία που προσφέρουν στους χρήστες τους, οδήγησε και στην έρευνα για τη διαχείριση ενέργειας σε αυτά (Building Energy Management). Στις μέρες μας, έχει γίνει εντονότερη η παγκόσμια ευαισθητοποίηση για τις δυσάρεστες συνέπειες που μπορεί να έχει η αλόγιστη χρήση των κλασικών πηγών ενέργειας, τόσο για το οικοσύστημα, αλλά και για τη διάρκεια ζωής αυτών στον πλανήτη. Γίνεται λοιπόν λόγος για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες τροφοδότησης μικρών και μεγάλων κτιρίων. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να συνδυαστεί με την έξυπνη διαχείριση των κλασικών πηγών ενέργειας, με χρήση αυτόματων ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, τόσο σε καινούργια κτίρια, όσο και σε παλιά, τα οποία χρησιμοποιούν παλαιού τύπου ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις. Σε αυτό συντελεί και η ανάπτυξη της ασύρματης τεχνολογίας η οποία επιτρέπει την επικοινωνία συσκευών χωρίς την ύπαρξη (συνεστραμμένων) καλωδίων. Έτσι, πληθαίνει ολοένα ο αριθμός τέτοιων εγκαταστάσεων που υλοποιούνται και στη χώρα μας, τόσο σε σπίτια, όσο και σε μεγάλα δημόσια κτίρια και βιομηχανίες.

Η τεχνολογία αυτή υλοποιείται πάνω σε ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα συσκευών, χρησιμοποιώντας για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, πρότυπα διαύλων, όπως το EIB το LonWorks ή το BAC net. Οι συμβατές συσκευές με αυτά τα πρότυπα, μπορεί να είναι από καθημερινές λευκές ηλεκτρικές συσκευές, μέχρι συστήματα κλιματισμού, φωτισμού και μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Η πληθώρα των συμβατών συσκευών προωθεί όλο και περισσότερο τη χρήση αυτών των τεχνολογιών αυτοματισμού. Ο έλεγχος των συσκευών σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να είναι αποκεντρωμένος, όπου οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους και ενεργούν ανάλογα με σήματα ελέγχου, τα οποία προκύπτουν από τις ίδιες, ή κεντρικός, όπου

ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ελέγχει το σύνολο των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Με τις τεχνικές αυτές, είναι εύκολη η υλοποίηση πολύπλοκων εγκαταστάσεων, που με τις συμβατικές τεχνολογίες δε θα ήταν δυνατόν να δημιουργηθούν.

Ένας συνήθης τρόπος ελέγχου τέτοιων συστημάτων, είναι με τη χρήση fuzzy logic (ασαφούς λογικής) ή κλασσικών ελεγκτών τύπου PID, PD PI. Πρόκειται για ελεγκτές εύκολους σχετικά στην υλοποίηση και γρήγορους σε απόκριση, ανάλογα με τα ελεγχόμενα μεγέθη. Τα αποτελέσματα τους είναι ικανοποιητικά και έχουν δοκιμαστεί ερευνητικά, αλλά και εμπορικά, σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών, ώστε να θεωρούνται ένας αξιόπιστος τρόπος ελέγχου. Οι ελεγκτές ασαφούς λογικής, οι οποίοι έχουν πολλούς βαθμούς ελευθερίας, ελέγχουν μέχρι υψηλής τάξης συστήματα και είναι πλήρως ορισμένοι από τους σχεδιαστές τους. Οι κλασσικοί ελεγκτές με την απλή και εύκολη παραμετροποίησή τους, επιτρέπουν τη γρήγορη υλοποίηση τους και την προβλέψιμη συμπεριφορά τους.

Με τις δυνατότητες αυτές, είναι πλέον εύκολη η δημιουργία συστημάτων, τα οποία ελέγχουν με αποδοτικό τρόπο τις περιβαλλοντικές συνθήκες σε ένα κτίριο, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στην εξοικονόμηση ενέργειας, χωρίς όμως να παραβλέπουν την άνεση των ανθρώπων που το χρησιμοποιούν.

1.2 Επιστημονική συνεισφορά

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο σκοπό, την εφαρμογή και την ποιοτική αξιολόγηση αλγορίθμων, που υλοποιούν κλασσικούς και ελεγκτές ασαφούς λογικής, για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών σε ένα κτίριο. Οι αλγόριθμοι αυτοί επεξεργάζονται δεδομένα, τα οποία αποστέλλονται από αισθητήρια και ανάλογα με τη λογική κάθε ελεγκτή ενεργοποιούν συσκευές εξόδου, οι οποίες ρυθμίζουν τις συνθήκες στον χώρο του κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η ρύθμιση παραμέτρων, όπως η εσωτερική θερμοκρασία και η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα, που κάνει πιο άνετη τη διαβίωση των ατόμων στο χώρο. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας από το σύστημα μέσω κατάλληλης ρύθμισης των ελεγκτών.

Οι ελεγκτές εφαρμόστηκαν την περίοδο του καλοκαιριού, μία ενεργειακά απαιτητική εποχή για τη χώρα μας εφόσον, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, οι ανάγκες για ψύξη των κτηρίων είναι μεγάλες και δαπανηρές. Σημειώνεται δε, ότι η

εφαρμογή τους πραγματοποιήθηκε για μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να βελτιστοποιηθούν και να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα, τόσο σε επίπεδο ρύθμισης συνθηκών, όσο και σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι, προέκυψε ένα λειτουργικό σύστημα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά κτίρια ανεξάρτητα την πολυπλοκότητά τους, εφόσον η δομή του υποστηρίζει την προσθήκη πολλών κόμβων και την εύκολη αλλαγή των παραμέτρων των ελεγκτών.

Η εφαρμογή των ελεγκτών έγινε πάνω σε μία έτοιμη πειραματική πλατφόρμα που είχε υλοποιηθεί στο παρελθόν, από φοιτητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, και είναι βασισμένη στο πρότυπο δικτύωσης κτηρίων EIB. Η υλοποίησή τους έγινε σε γλώσσες προγραμματισμού Visual C++ και Visual Basic 6.0 κάνοντας εύκολη την εφαρμογή και διασύνδεση τους με ένα ήδη υπάρχον πρόγραμμα, πάνω στο σύστημα, υλοποιημένο σε γλώσσα Visual Basic 6.0. Με την υλοποίηση αυτή, εξασφαλίστηκε η εύκολη παραμετροποίηση τους, ώστε να γίνονται με τρόπο απλό οι παρεμβάσεις, οι οποίες θα οδηγήσουν σε βέλτιστα αποτελέσματα. Το υπάρχον πρόγραμμα αναλαμβάνει την επικοινωνία των αλγορίθμων με τα αισθητήρια και τους ενεργοποιητές που είναι εγκατεστημένα στο σύστημα. Παράλληλα, προσφέρει ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη (graphic user interface) για την εποπτεία αυτού και των ενεργειών που γίνονται.

Η παρούσα υλοποίηση βοήθησε στην επαλήθευση και στην πιστοποίηση των αλγορίθμων. Έγιναν εκτεταμένοι έλεγχοι και μετρήσεις, οι οποίες οδήγησαν σε χρήσιμα συμπεράσματα για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών σε κτίρια, και η καταγραφή τους προσφέρει μία αρκετά καλή πηγή πληροφοριών για τέτοιου είδους εφαρμογές ελέγχου. Παράλληλα, αποτελεί, μία πολλά υποσχόμενη εφαρμογή που τελευταία αρχίζει να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και επιδέχεται σημαντικών βελτιώσεων και εφαρμογών. Σημαντική επιστημονική προσπάθεια και συνεισφορά, είναι αυτή του Πολυτεχνείου Κρήτης με την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων για έλεγχο περιβαλλοντικών συνθηκών και διαχείρισης ενέργειας.

1.3 Σύντομη παρουσίαση των κεφαλαίων

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται η αναλυτική περιγραφή του προβλήματος, αναλύοντας τον σκοπό της διπλωματικής, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν οι αλγόριθμοι ελέγχου του συστήματος του εργαστηρίου ΕΗΚΑΠΕ (Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας). Στη

συνέχεια, δίνονται κάποια παραδείγματα άλλων υλοποιήσεων που έχουν γίνει στο παρελθόν για τη ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε κτίρια.

Στο Κεφάλαιο 3, δίνεται η βασική θεωρία, η οποία καλύπτει τους ελεγκτές που υλοποιήθηκαν, καθώς και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση αυτών, ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Έτσι, γίνεται περιγραφή των ασαφών ελεγκτών (PD fuzzy), αφού πρώτα δοθεί μία μικρή αναφορά σε ασαφή λογική, των κλασσικών ελεγκτών (PD, PI), και των μεθόδων ρύθμισης (tuning methods), Ziegler-Nichols και Cohen Coon.

Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται η παρουσίαση της τεχνολογίας διαύλου EIB, όπου γίνεται λόγος για το πρότυπο δικτύωσης EIB, περιγράφοντας συνοπτικά την οργάνωση του, την τοπολογία του, και τη μετάδοση πληροφορίας. Επίσης, γίνεται μία μικρή αναφορά στο λογισμικό ETS. Στη συνέχεια, αναλύεται πώς μπορεί να γίνει ανάπτυξη έξυπνων κόμβων συμβατών με την τεχνολογία EIB. Τέλος, παρατίθεται μία αναλυτική περιγραφή του συστήματος, το οποίο είναι εγκαταστημένο στο χώρο του εργαστηρίου, σε επίπεδο τοπολογίας, περιγράφοντας όλες τις συσκευές EIB που χρησιμοποιήθηκαν, τα αισθητήρια και τους ενεργοποιητές.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται λόγος για την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση των ελεγκτών, την ενσωμάτωσή τους στο σύστημα και την εξαγωγή των μετρήσεων. Αρχικά, γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση των αισθητηρίων, κυρίως του υγρασιόμετρου στο οποίο παρουσιάστηκε πρόβλημα. Στη συνέχεια, γίνεται η περιγραφή του PD ελεγκτή ασαφούς λογικής που υλοποιήθηκε, παρουσιάζοντας όλα τα βασικά μέρη που τον αποτελούν και τη διαδικασία εισαγωγής του στο σύστημα. Συνεχίζοντας, στους κλασσικούς ελεγκτές αναλύονται οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για την παραμετροποίηση τους, καθώς και η ενσωμάτωσή τους στο σύστημα.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη μορφή γραφημάτων και κάποιες παρατηρήσεις για την λειτουργία των ελεγκτών.

Στο Κεφάλαιο 7, παρατίθενται τα συμπεράσματα για τη λειτουργία των ελεγκτών και γίνεται μία συγκριτική προσπάθεια σε ό,τι αφορά τις απαιτήσεις για απόδοση, κατανάλωση ενέργειας και άλλων παραμέτρων. Παράλληλα, αναφέρονται οι μελλοντικές επεκτάσεις και αλλαγές που μπορούν να γίνουν στο σύστημα.

Εν κατακλείδι, ακολουθούν ο επίλογος, η βιβλιογραφία και το παράρτημα στο οποίο γίνονται παραπομπές από το κυρίως κείμενο.

Κεφάλαιο 2 - Περιγραφή προβλήματος και αναφορές

2.1 Διατύπωση του προβλήματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό, την υλοποίηση και εφαρμογή αλγορίθμων ελέγχου, για τη ρύθμιση των περιβαλλοντικών παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία, ποιότητα αέρα) στο χώρο του εργαστηρίου ΕΗΚΑΠΕ του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εφαρμογή των αλγορίθμων έγινε σε υπάρχουσα πειραματική πλατφόρμα, η οποία είχε υλοποιηθεί στο παρελθόν, και βασίζεται πάνω σε δίαυλο δικτύωσης κτηρίων EIBus του ανεξάρτητου επιστημονικού φορέα EIBA. Οι παράμετροι που ελέγχθηκαν, ρυθμίζονταν λαμβάνοντας υπόψη την άνετη και ευχάριστη διαβίωση των ανθρώπων που εργάζονται στο χώρο. Παράλληλα, λήφθηκε υπόψη η απαίτηση για εξοικονόμηση ενέργειας που καταναλώνεται κυρίως από τις συσκευές ψύξης / θέρμανσης του κτιρίου.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η υλοποίηση τριών ελεγκτών: ενός κλασσικού PD και ενός κλασσικού PI για τον θερμικό έλεγχο του κτιρίου, καθώς και ενός ασαφούς PD για τον έλεγχο της θερμικής άνεσης και της ποιότητας του αέρα. Στον ασαφή ελεγκτή, έγινε η προσαρμογή ενός ήδη υλοποιημένου ελεγκτή στο σύστημα EIB του εργαστηρίου. Οι αλγόριθμοι ελέγχου έπαιρναν ως είσοδο μετρούμενα μεγέθη από αισθητήρια, όπως θερμοκρασία, MRT (Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία), υγρασία και έδιναν εντολές σε ενεργοποιητές, όπως παράθυρα, κλιματιστικά. Στη συνέχεια, ελήφθησαν μετρήσεις για έναν ικανοποιητικό αριθμό ημερών, οι οποίες περιλάμβαναν σημαντικά και παράλληλα ενδεικτικά μεγέθη για τη συμπεριφορά του συστήματος. Τέλος, μετά την επεξεργασία των μετρήσεων, έγινε η σύγκριση των αλγορίθμων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων για τον πιο κατάλληλο και οικονομικό αλγόριθμο για το σύστημα. Παράλληλα, με την υλοποίηση των αλγορίθμων, εκτελέστηκαν εργασίες για τη βελτίωση του υπάρχοντος συστήματος σε επίπεδο λογισμικού (αλλαγές στον υπάρχοντα κώδικα επίβλεψης και επικοινωνίας), και υλικού (βαθμονόμηση οργάνων).

Το σύστημα κάνει χρήση του διαύλου δικτύωσης EIB και προσφέρει μία ολοκληρωμένη λύση, η οποία μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε διαφορετικές εγκαταστάσεις με διαφορετικούς εξοπλισμούς και απαιτήσεις συνθηκών. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως το σύστημα πρέπει να είναι αξιόπιστο, ανεπηρέαστο στις εξωτερικές διαταραχές, ανεκτικό στο θόρυβο, και να προστατεύει τις συνδεδεμένες

σε αυτό συσκευές (μικρή μηχανική καταπόνηση). Επιπρόσθετα, πρέπει να είναι εύκολη η αναβάθμισή του, τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και σε προγραμματιστικό. Σαν αποτέλεσμα αυτού, οι αλγόριθμοι των ελεγκτών πρέπει να είναι εύκολα υλοποιήσιμοι και ευέλικτοι, ώστε να μπορούν να δεχθούν εύκολα διαμορφώσεις και αλλαγές. Σύμφωνα με το πρότυπο του διαύλου, αισθητήρια τα οποία μπορεί να είναι τοποθετημένα σε διάφορα σημεία της εγκατάστασης, συνδέονται σε ένα κεντρικό κόμβο, ο οποίος στη συνέχεια δίνει εντολές, με κατάλληλες τιμές, σε ενεργοποιητές για τους οποίους ισχύει το ίδιο. Κατά αυτό τον τρόπο, ο σχεδιαστής εστιάζει την προσοχή του στον αλγόριθμο ελέγχου και όχι στον τρόπο επικοινωνίας των μερών του συστήματος.

Χωρίς τη χρήση κάποιου αλγόριθμου ελέγχου δεν θα ήταν δυνατή η εκμετάλλευση, αλλά και η λειτουργία των εγκαταστάσεων δικτύωσης κτηρίων, είτε πρόκειται για ένα έξυπνο σπίτι, είτε για μία βιομηχανία. Συνεπώς, η ανάπτυξη αλγορίθμων που ελέγχουν τα συστήματα σε κάθε περίπτωση είναι ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία. Βασικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνει ένα σχεδιαστής υπόψη του είναι: α) η απλότητα στην υλοποίηση, που οδηγεί σε γρήγορη εξαγωγή αποτελεσμάτων και γρήγορη εφαρμογή αυτών στους ενεργοποιητές (όχι καθυστερήσεις στην εκτέλεση του κώδικα), β) η ευστάθεια, ώστε το σύστημα να δίνει επιτρεπτές τιμές εντός ορίων και να μην οδηγείται σε σφάλματα εφαρμογής, γ) η γρήγορη σύγκλιση στο επιθυμητό επίπεδο (set-point) για το μέγεθος που ελέγχεται (γρήγορα αποτελέσματα για κρίσιμα συστήματα), δ) το χαμηλό κόστος σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας από τους ενεργοποιητές του συστήματος αλλά και την απαίτηση σε υλικό πέραν αυτού που παρέχεται από την υπάρχουσα εγκατάσταση, και ε) η ανοχή σε προβλήματα των αισθητήριων. Πιο συγκεκριμένα, για την κατανάλωση ενέργειας, πρέπει οι αλγόριθμοι να είναι σχεδιασμένοι, ώστε οι έξοδοι αυτών να είναι σχετικά συντηρητικές. Με τον όρο αυτό εννοείται πως θα πρέπει να μην να εξυπηρετούν τις απαιτήσεις για θερμική και οπτική άνεση, αλλά να μη γίνεται αυτό εις βάρος της κατανάλωσης ενέργειας. Ένα τέτοιο παράδειγμα στην εγκατάσταση του εργαστηρίου, είναι η αποφυγή άσκοπων αλλαγών θέσης του παραθύρου, οι οποίες δεν επιφέρουν καμία αλλαγή στις περιβαλλοντικές συνθήκες στο χώρο.

2.2 Αναφορές σε υπάρχοντα συστήματα

2.2.1 Εγκατάσταση LONworks Πολυτεχνείου Κρήτης

Στο Πολυτεχνείο Κρήτης έχει γίνει η υλοποίηση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας σε κτίρια βασισμένο σε τεχνολογία διαύλου LONworks, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της καθηγήτριας κας Κολοκοτσά, που υλοποιήθηκε στους χώρους του εργαστηρίου ΕΗΚΑΠΕ.

Στη συγκεκριμένη εργασία αναπτύχθηκε ένας έξυπνος κόμβος, βασισμένος σε ασαφή λογική, ο οποίος έλεγχε τις περιβαλλοντικές παραμέτρους του χώρου του εργαστηρίου. Η τεχνολογία διαύλου ήταν αυτή του LON και συμπεριλάμβανε ένα ολοκληρωμένο σύστημα LONWorks. Οι συσκευές, οι οποίες ελέγχονταν ήταν: ηλεκτρικά παράθυρα και σκίαστρα, κλιματιστικά και φωτιστικά σώματα. Τα αισθητήρια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: αισθητήρια εσωτερικής/εξωτερικής θερμοκρασίας, εσωτερικού/εξωτερικού φωτισμού, υγρασίας, διοξειδίου του άνθρακα, ταχύτητας του αέρα, ταχύτητας του ανέμου και μέσης εκπεμπόμενης θερμοκρασίας (MRT).

Ο αλγόριθμος σχεδιάστηκε στο Fuzzy Logic Toolbox του πακέτου MATLAB και περιείχε 89 κανόνες που καλύπτουν όλα τα δυνατά σενάρια συνθηκών. Σκοπός του, ήταν να διατηρεί την συνάρτηση PMV σε επιτρεπτά όρια, αλλά και να ελέγχει την ποιότητα του αέρα, καθώς και τα επίπεδα του εσωτερικού φωτισμού. Έδινε έμφαση σε παθητικές μεθόδους θέρμανσης / ψύξης, εξαερισμού και φωτισμού, ώστε να εξοικονομεί ενέργεια.

Μετά από μετρήσεις αποδείχθηκε πως το μοντέλο ικανοποιούσε τις απαιτήσεις άνεσης των χρηστών και πως είχε πετύχει εξοικονόμηση ενέργειας. Βάσει μετρήσεων, υπήρξε 14% λιγότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με αυτή που θα καταναλωνόταν χωρίς τη χρήση του συστήματος.

2.2.2 Εγκατάσταση ΕΙΒ Πολυτεχνείου Κρήτης

Στο Πολυτεχνείο Κρήτης πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση ενός PD ελεγκτή ασαφούς λογικής, κατά τη διάρκεια των Μεταπτυχιακών Σπουδών του κ. Ευάγγελου Ι. Τριπολιτάκη, στο εγκατεστημένο σύστημα ΕΙΒ που βρίσκεται στο εργαστήριο ΕΗΚΑΠΕ. Η πειραματική πλατφόρμα, στην οποία πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση αποτελείται από διασυνδεδεμένους κόμβους (αισθητήρια και ενεργοποιητές) βασισμένη στην υποδομή που προσφέρει το πρωτόκολλο επικοινωνίας ΕΙΒ

(European Installation Bus). Το σύστημα βασιζόταν στον κεντρικό έλεγχο, ο οποίος πραγματοποιόταν από ένα υπολογιστή και λειτουργούσε με λογισμικό, το οποίο εκτελούσε τις διάφορες διεργασίες. Σκοπός του ελεγκτή, ήταν η ρύθμιση περιβαλλοντικών παραμέτρων, ώστε να γίνει πιο άνετη και ευχάριστη η παραμονή των ατόμων που δουλεύουν στο χώρο.

Το μέσο μετάδοσης για το δίκτυο είναι το συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων, το οποίο επιλέχθηκε εξαιτίας της χαμηλής τιμής του, της μεγάλης αναισθησίας στο θόρυβο και της ικανότητας μεγάλης καλωδίωσης χωρίς τη χρήση επαναληπτών. Όλες οι συσκευές που ήταν συνδεδεμένες στο δίκτυο τροφοδοτούνταν από τη γραμμή μετάδοσης του διαύλου μέσω τάσης DC 24V. Τα αισθητήρια (είσοδοι), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα είναι : MRT, CO_2 , Εσωτερικής Θερμοκρασίας, Υγρασίας, Εσωτερικού Φωτισμού και Ταχύτητας στου Ανέμου. Οι ενεργοποιητές (έξοδοι) ήταν ηλεκτρονόμοι (ρελέ) τα οποία έλεγχαν: δύο κλιματιστικά, τρεις ομάδες φωτισμού, ένα ηλεκτρικό ρολό σκίασης και ένα ηλεκτρικά κινούμενο παράθυρο.

Ο κώδικας του ασαφούς ελεγκτή ήταν υλοποιημένος σε γλώσσα Visual Basic 6.0 και Visual C\C++. Δημιουργήθηκαν βιβλιοθήκες DLL, οι οποίες εμπεριείχαν τον αλγόριθμο της εφαρμογής και καλούνταν μέσα από ένα πρόγραμμα, υλοποιημένο σε Visual Basic. Αυτό αναλάμβανε τη διασύνδεσή του συστήματος με τα αισθητήρια και τους ενεργοποιητές, καθώς και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του ελεγκτή.

Για την πιστοποίηση της λειτουργικότητας του συστήματος, πραγματοποιήθηκαν σειρές από δοκιμές. Οι δοκιμές αυτές έγιναν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και για αυτό τα κλιματιστικά ήταν ρυθμισμένα στην ψύξη. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, προέκυψε ότι η συνάρτηση PMV έλαβε τιμές μικρότερες του 0.5 στο μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων, ενώ το σύστημα αποκρίθηκε γρήγορα στις απότομες και ξαφνικές αλλαγές της θερμοκρασίας. Αποδείχθηκε λοιπόν, πως το μοντέλο ανταποκρινόταν στις απαιτήσεις άνεσης των χρηστών, με τις τιμές των ελεγχόμενων μεγεθών να είναι σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα.

Κεφάλαιο 3 - Θεωρία ελεγκτών

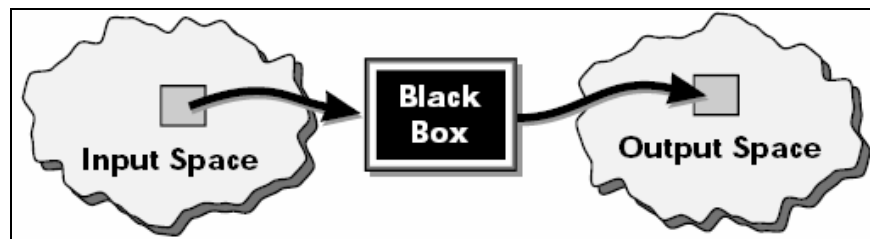
3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται η βασική θεωρία των ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση ΕΙΒ του εργαστηρίου. Η θεωρία περιλαμβάνει ανάλυση δύο τύπων, των ελεγκτών ασαφούς λογικής και των κλασικών.

3.2 Ελεγκτές ασαφούς λογικής

3.2.1 Γενικά για ασαφή λογική

Ασαφής λογική, είναι ένας εύκολος τρόπος για να αντιστοιχηθεί ένα σύνολο εισόδων σε ένα σύνολο εξόδων. Πατέρας της είναι ο Lotfi Zadeh, ο οποίος σημείωσε ότι «σε κάθε περίπτωση μπορούμε να λύσουμε ένα πρόβλημα χωρίς ασαφή λογική, αλλά η ασαφής λογική είναι πιο γρήγορη και φθηνή». Λέγοντας αντιστοιχία των εισόδων σε κάποιες εξόδους, εννοείται ένα μαύρο κουτί το οποίο αυτό ανάλογα με την είσοδο αποφασίζει ποια έξοδος είναι η κατάλληλη. Αυτό το μαύρο κουτί είναι ένα σύστημα ασαφούς λογικής.



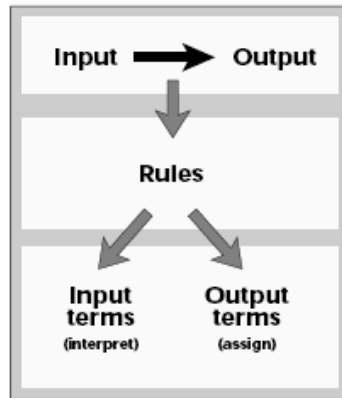
Σχήμα 3.1 – Μία αντιστοιχία εισόδων \ εξόδων

Κάποιοι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιείται είναι οι παρακάτω:

- Είναι εύκολη στην κατανόηση.
- Είναι ευέλικτη και ανεκτική σε ανακριβή δεδομένα.
- Μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές συναρτήσεις αυθαίρετης πολυπλοκότητας.
- Μπορεί να αναμιχθεί με συμβατές τεχνικές ελέγχου.
- Βασίζεται στην φυσική γλώσσα.

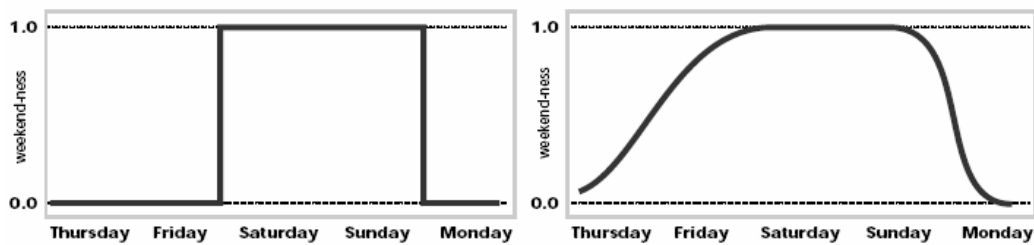
Ο τελευταίος λόγος ίσως είναι ο πιο σημαντικός, γιατί την κάνει εύκολα κατανοητή στους ανθρώπους, εφόσον « μιλάει » την γλώσσα τους.

Η βασική ιδέα πίσω από την ασαφή λογική είναι να γίνεται δυνατή η ερμηνεία των τιμών του διανύσματος εισόδων, και σύμφωνα με κάποιους κανόνες, να ανατίθενται τιμές στο διάνυσμα των εξόδων. Στο σχήμα 3.2 δίνεται μία γενική περιγραφή ενός ασαφούς συστήματος.



Σχήμα 3.2 – Γενική περιγραφή ασαφούς συστήματος

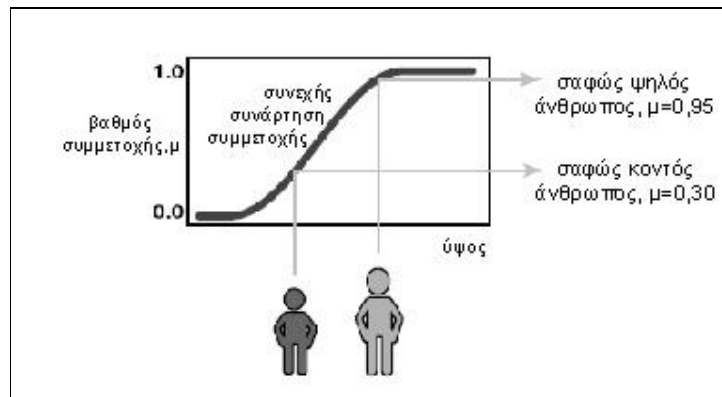
Η ασαφή λογική ξεκινά με τη σύλληψη ενός fuzzy set (ασαφές σύνολο). Ένα ασαφές σύνολο είναι ένα σύνολο με καλά ορισμένα όρια, χωρίς κάποια διακοπή (crisp). Σε αντίθεση με τη δυαδική (Boolean) λογική (1/ναι-0/όχι), δηλαδή το ότι κάτι μπορεί να ανήκει σε ένα σύνολο ή όχι, στην ασαφή λογική όλα τα στοιχεία ανήκουν σε ένα σύνολο σε κάποιο βαθμό. Δίνει δηλαδή τη δυνατότητα της απάντησης σε ένα ερώτημα ναι ή όχι, με μία απάντηση, σχεδόν ναι ή σχεδόν όχι. Άρα η απάντηση μπορεί να είναι ναι, όχι ή μία από τις πολλές ανάμεσα στο ναι και το όχι. Στο σχήμα 3.3 δίνεται ένα παράδειγμα σύγκρισης των δύο λογικών για το πόσο οι μέρες της εβδομάδας συμμετέχουν στο σαββατοκύριακο.



Σχήμα 3.3 – Μέρες του σαββατοκύριακου με δυαδική και ασαφή λογική

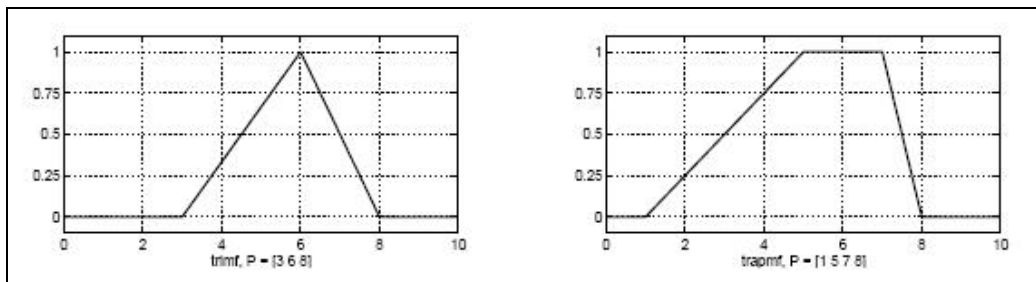
Επόμενο βασικό στοιχείο της ασαφούς λογικής, είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής (membership functions - MF). Μία συνάρτηση συμμετοχής είναι μία καμπύλη, η οποία ορίζει πως κάθε σημείο στο σύνολο των εισόδων αντιστοιχεί σε μία τιμή συμμετοχής (ή βαθμό συμμετοχής) μεταξύ του 0(όχι) και του 1(ναι). Στο

παρακάτω σχήμα, δίνεται ένα παράδειγμα, όπου μία συνάρτηση συμμετοχής ορίζει την μετάβαση από ένα κοντό σε ένα ψηλό άνθρωπο.



Σχήμα 3.4 – Συνάρτηση συμμετοχής για το ύψος

Οι απλούστερες συναρτήσεις συμμετοχής σχηματίζονται από ευθείες γραμμές. Οι πιο απλές και αυτές που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι οι τριγωνικές και οι τραπεζοειδείς, παραδείγματα των οποίων δίνονται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 – Τριγωνική και τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής

Περαιτέρω, μία συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να είναι γκαουσιανή, πολυωνυμική, ασυμμετρική, σιγμοειδής κ.τ.λ.

Τελευταίο βασικό στοιχείο στην ασαφή λογική είναι οι κανόνες. Πρόκειται για υποθετικές προτάσεις, if then κανόνες, οι οποίοι την κάνουν χρήσιμη. Η μορφή ενός απλού κανόνα if then δίνεται παρακάτω:

if x is A then y is B

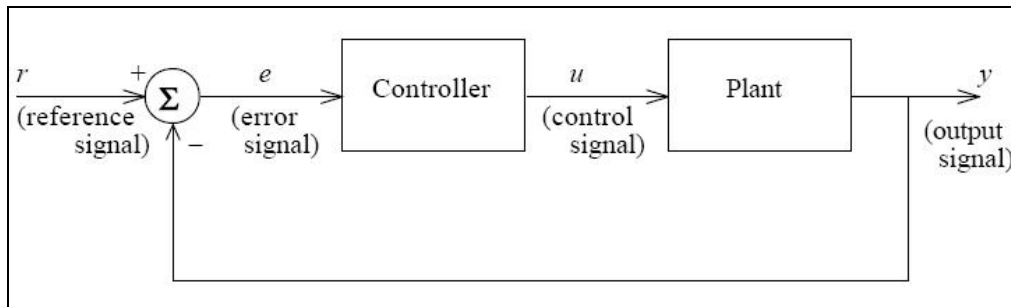
Το A και το B είναι οι γλωσσικές τιμές οι οποίες ορίζονται από τα ασαφή σύνολα. Το if μέρος του κανόνα (x is A) ονομάζεται υπόθεση, ενώ το then μέρος του κανόνα (y is B) συμπέρασμα. Η υπόθεση μπορεί να έχει πολλαπλά μέρη. Σε αυτή την περίπτωση, το κάθε μέρος υπολογίζεται ταυτόχρονα και τελικά προκύπτει ένας

αριθμός, χρησιμοποιώντας κάποιο λογικό τελεστή, όπως AND ($\min(A,B)$), OR ($\max(A,B)$) ή NOT ($1-A$).

3.2.2 Ειδικότερα για ελεγκτές ασαφούς λογικής

Οι ελεγκτές ασαφούς λογικής (fuzzy logic controllers - FLC) έχουν εμφανιστεί ως μία πολύ ενεργός και χρήσιμη περιοχή έρευνας στην θεωρία της ασαφούς λογικής. Έχουν επιτυχώς εφαρμοστεί για τον έλεγχο πολλών φυσικών διαδικασιών, αλλά από την άλλη μεριά ερευνάται ακόμα η ομοιότητά τους με τους συμβατικούς ελεγκτές. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ελεγκτών, οι Mamdani, οι οποίοι παρουσιάστηκαν πρώτη φορά το 1975, και οι Takagi – Sugeno (TS), οι οποίοι παρουσιάστηκαν το 1985. Η κύρια διαφορά τους είναι πως οι μεν Mamdani χρησιμοποιούν ασαφή σύνολα (fuzzy sets), ενώ οι TS απασχολούν γραμμικές συναρτήσεις. Οι περισσότεροι Mamdani ελεγκτές, αν όχι όλοι, είναι μη γραμμικοί ελεγκτές με μεταβλητά κέρδη. Πιο συγκεκριμένα οι Mamdani PD και PI είναι μη γραμμικοί, ενώ ο Mamdani PID έχει μεταβλητά κέρδη.

Το γενικό διάγραμμα ενός συστήματος με ελεγκτή δίνεται στο σχήμα παρακάτω.

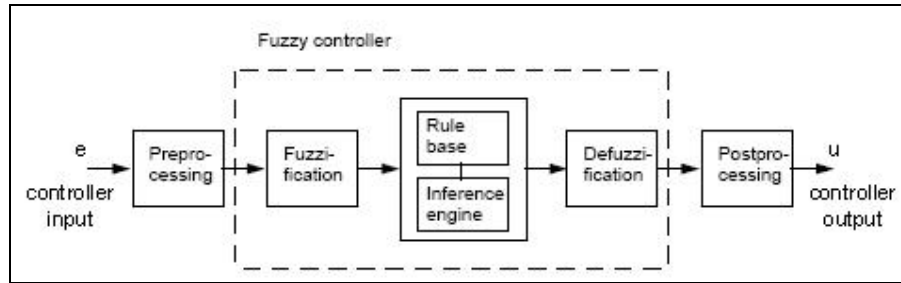


Σχήμα 3.6 – Διάγραμμα συστήματος με ελεγκτή

Αυτό που προσπαθεί να πετύχει ο ελεγκτής είναι η μείωση έως εξάλειψη του λάθους,

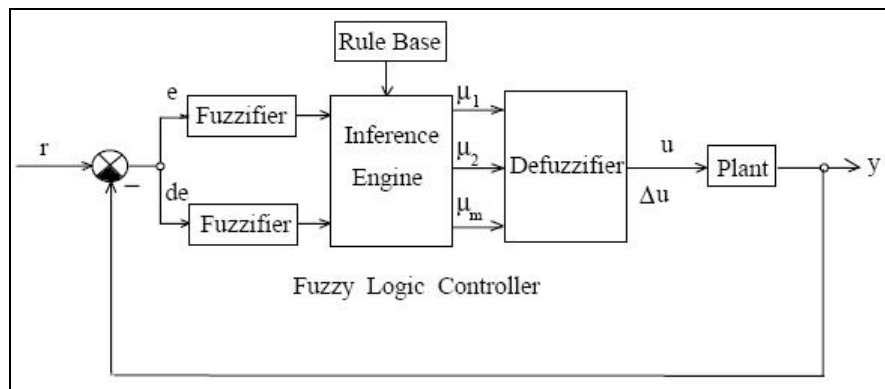
$$\text{δηλαδή: } e(t) = r(t) - y(t) \rightarrow 0 \text{ (} t \rightarrow \infty \text{)}$$

Έτσι, αναζητείται ο ελεγκτής ασαφούς λογικής που θα κάνει αυτό. Το γενικό διάγραμμα ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής είναι αυτό που δίνεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 – Διάγραμμα ελεγκτή ασαφούς λογικής

Ο τύπος των ελεγκτών ασαφούς λογικής που μελετήθηκε είναι ο PD, ο οποίος παράγει το σήμα ελέγχου u λαμβάνοντας υπόψη το παρόν λάθος του συστήματος, e , και την μεταβολή του λάθους, de . Πρόκειται για έναν ταχύ ελεγκτή, ο οποίος φτάνει γρήγορα στο επιθυμητό αποτέλεσμα, αλλά είναι δύσκολο να εξαλείψει το steady state error. Επίσης, είναι απλός στην υλοποίηση και αρκετά εφαρμόσιμος. Το διάγραμμα ενός συστήματος με PD ελεγκτή ασαφούς λογικής είναι το παρακάτω.



Σχήμα 3.8 – Διάγραμμα συστήματος με PD ελεγκτή ασαφούς λογικής

Όπως προκύπτει και από το σχήμα 3.7, για την κατασκευή του ελεγκτή χρειάζεται μία διαδικασία που πρέπει να τηρηθεί. Πρώτα, γίνεται η προεπεξεργασία (preprocessing) και στη συνέχεια ακολουθούν η ασαφοποίηση (fuzzyfication), το πέρασμα από τους κανόνες σε συνδυασμό με τη μηχανή εξαγωγής αποτελέσματος (inference engine), και τέλος, η απασαφοποίηση (defuzzyfication) και η μετεπεξεργασία (postprocessing). Θα αναλυθεί κάθε κομμάτι συνοπτικά.

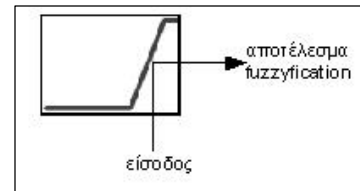
Preprocessing (Προεπεξεργασία)

Πολύ συχνά οι είσοδοι προέρχονται από μετρήσεις, που λαμβάνονται με τη βοήθεια κάποιου εξοπλισμού μετρήσεων, και μπορεί να είναι σε ακατάλληλη μορφή για να χρησιμοποιηθούν από τον ελεγκτή. Έτσι, το στάδιο της προεπεξεργασίας τις επεξεργάζεται, ώστε να είναι έτοιμες. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει κανονικοποίηση σε κάποια δεδομένη περιοχή, φιλτράρισμα ώστε να απαλειφθεί ο

θόρυβος, κβάντιση, ολοκλήρωση, διαφορίση και άλλες πολλές τεχνικές. Όταν η είσοδος του ελεγκτή είναι το λάθος (error), τότε η στρατηγική ελέγχου είναι μία στατική αντιστοιχία μεταξύ των εισόδων και των σημάτων ελέγχου. Ένας δυναμικός ελεγκτής απαιτεί και επιπλέον εισόδους, όπως ολοκληρώματα, παράγωγους ή προηγούμενες τιμές μετρήσεων πίσω στον χρόνο. Όλα αυτά δημιουργούνται κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας και κάνουν τον ελεγκτή πολυδιάστατο. Σε έναν πολυδιάστατο ελεγκτή απαιτούνται περισσότεροι κανόνες και είναι πιο δύσκολο να σχεδιαστεί.

Fuzzyfication (Ασαφοποίηση)

Στο βήμα αυτό, καθορίζεται ο βαθμός κατά τον οποίο οι εισοδοί ανήκουν στα ασαφή σύνολα (fuzzy sets), χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις συμμετοχής. Το στάδιο της ασαφοποίησης ταιριάζει τα δεδομένα των εισόδων με τις υποθέσεις των κανόνων, ώστε να καθορίσει πόσο καλά η υπόθεση κάθε κανόνα ταιριάζει με μία συγκεκριμένη τιμή που είναι είσοδος του συστήματος εκείνη την στιγμή.



Σχήμα 3.9 – Fuzzyfication

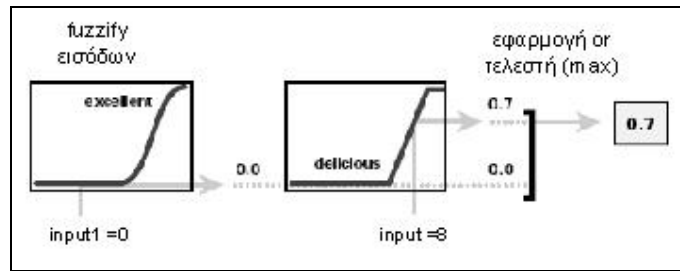
Κανόνες (Rules)

Οι κανόνες μπορεί να χρησιμοποιούν πολλές μεταβλητές, τόσο στην υπόθεση όσο και στο συμπέρασμα. Έτσι οι ελεγκτές μπορούν να εφαρμοστούν σε προβλήματα πολλών εισόδων και εξόδων (MIMO), αλλά και σε προβλήματα μίας εισόδου και εξόδου (SISO). Ένα τυπικό πρόβλημα SISO είναι να ρυθμιστεί ένα σήμα ελέγχου βασιζόμενο σε ένα σήμα λάθους. Μπορεί όμως ο ελεγκτής να χρειαστεί ως εισόδους ακόμα, την μεταβολή λάθους και το συσσωρευμένο λάθος.

Οι κανόνες έχουν την μορφή που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.1, δηλαδή την μορφή ενός κανόνα if then. Για παράδειγμα δίνεται ο παρακάτω κανόνας.

If error is Zero and change in error is Pos then output is PM

Τα ονόματα Zero, Pos και PM είναι ετικέτες των ασαφών συνόλων. Θα πρέπει να σημειωθεί, πως η σύνδεση των εισόδων σε περίπτωση που σε ένα κανόνα υπάρχουν περισσότερες από μία γίνεται με λογικό AND, λογικό OR ή λογικό NOT. Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση σύνδεσης εισόδων.



Σχήμα 3.10 – Εφαρμογή λογικού OR

Συναρτήσεις συμμετοχής (Membership functions)

Ένα οποιαδήποτε στοιχείο μπορεί να είναι μέλος ενός ασαφούς συνόλου σε κάποιο βαθμό έως καθόλου. Έτσι, ένα ασαφές σύνολο περιγράφεται από το βαθμό συμμετοχής των μελών του. Η συνάρτηση που συνδέει ένα αριθμό σε κάθε στοιχείο x ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής $\mu(x)$. Ο κάθε σχεδιαστής έρχεται αντιμέτωπος με το ερώτημα, πώς να κατασκευάσει τις συναρτήσεις συμμετοχής, ερώτηση που αναλύεται σε δύο άλλες: ποια θα είναι τα σχήματα αυτών και ποιος είναι ο επαρκής αριθμός τους. Σύμφωνα με την θεωρία των ασαφών συνόλων, η επιλογή του σχήματος και του πλάτους είναι υποκειμενική υπόθεση, αλλά κάποιοι απλοί κανόνες μπορούν να δοθούν.

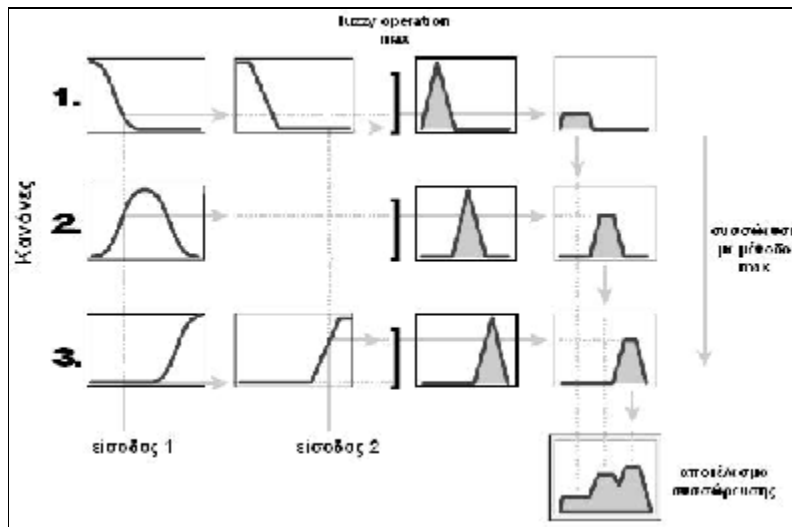
- Μία συνάρτηση συμμετοχής πρέπει να είναι αρκετά πλατιά, ώστε να υποστηρίζει την ύπαρξη θορύβου στη μετρούμενη είσοδο.
- Είναι επιθυμητό να υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των συναρτήσεων μίας εισόδου, ώστε ο ελεγκτής να μην επιλέγει καταστάσεις, οι οποίες επιστρέφουν μη επιθυμητές εξόδους.

Σε ό,τι αφορά την μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής μπορεί να είναι τριγωνικές, τραπεζοειδείς, πολυωνυμικές, σιγμοειδείς κ.α.

Μηχανή εξαγωγής αποτελέσματος

Στο στάδιο αυτό, γίνεται η συσσώρευση (aggregation), όλων των εξόδων. Με τον όρο συσσώρευση, εννοείται η ενοποίηση των εξόδων κάθε κανόνα. Αυτό γίνεται συνδυάζοντας όλα τα ασαφή σύνολα, που αντιπροσωπεύουν τις εξόδους των κανόνων, σε ένα ασαφές σύνολο έτοιμο να δεχθεί το επόμενο βήμα, την απασαφοποίηση. Η συσσώρευση πραγματοποιείται μία φορά για κάθε μεταβλητή εξόδου και το αποτέλεσμα της είναι ένα ασαφές σύνολο για κάθε μεταβλητή. Οι μέθοδοι που υποστηρίζονται για την συσσώρευση των εξόδων είναι οι: max

(μέγιστη), min (μικρότερη), sum (άθροισμα των συνόλων όλων των κανόνων) και probabilistic or (πιθανοκρατικό or).

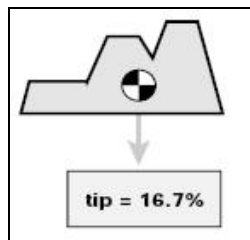


Σχήμα 3.11 – Συσσώρευση εξόδων

Defuzzification (απασαφοποίηση)

Στο στάδιο αυτό, το τελικό ασαφές σύνολο που έχει παραχθεί πρέπει να μετατραπεί σε έναν αριθμό, ώστε να μπορεί να σταλεί σαν σήμα ελέγχου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να γίνει αυτό. Η πιο δημοφιλής είναι η centroid of an area, η οποία επιστρέφει το κέντρο μίας περιοχής κάτω από μία καμπύλη. Ακολουθεί την παρακάτω σχέση και γραφική αναπαράσταση δίνεται στο σχήμα 3.12.

$$u = \frac{\sum_i \mu(x_i) x_i}{\sum_i \mu(x_i)}$$



Σχήμα 3.12 – Centroid

Άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι: bisector (λαμβάνεται η συνιστώσα της κάθετης γραμμής που χωρίζει την περιοχή κάτω από την καμπύλη σε δύο ίδια μισά), middle of maximum (ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών του συνόλου των εξόδων), largest of maximum (ο μεγαλύτερος των μέγιστων τιμών του συνόλου των εξόδων),

και smallest of maximum (ο μικρότερος των μέγιστων τιμών του συνόλου των εξόδων).

Postprocessing (μετεπεξεργασία)

Υπάρχει περίπτωση η έξοδος του ελεγκτή να χρειάζεται επεξεργασία, ώστε να δοθεί στο σύστημα. Για παράδειγμα, μπορεί να χρειάζεται να μετατραπεί σε σύστημα διεθνών μονάδων, όπως volt, meter, tons per hour. Όπως και στο πρώτο στάδιο μπορεί να γίνει μία επεξεργασία της εξόδου με διάφορους τρόπους. Συχνά το στάδιο αυτό περιλαμβάνει ένα κέρδος εξόδου, το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί ή ακόμα και έναν ολοκληρωτή.

3.3 Κλασικοί ελεγκτές

3.3.1 Γενικά

Οι κλασικοί PID (proportional integral derivative) ελεγκτές είναι οι πιο δημοφιλείς ελεγκτές του εικοστού αιώνα. Πολλοί μηχανικοί παγκοσμίως χρησιμοποιούν τέτοιους ελεγκτές στις καθημερινές τους εργασίες. Σύμφωνα με πηγές, το 1977 οι 34 στους 37 αναλογικούς βιομηχανικούς ελεγκτές ήταν PID τύπου [Seraji, 1983]. Το ίδιο ισχύει και στις μέρες μας, όπου το 90% των υπαρχόντων βιομηχανικών ελεγκτών είναι PID. Αυτοί αναμένεται να κυριαρχήσουν και στον επόμενο αιώνα εξαιτίας της αξιοπρόσεκτης αποτελεσματικότητας, της απλής υλοποίησής και της ευρείας εφαρμογής τους. Αν και έγιναν διαθέσιμοι εμπορικά το 1930, [Ziegler 1975] το ενδιαφέρον για τη σχεδίαση τους συνεχίζει να παραμένει υψηλό.

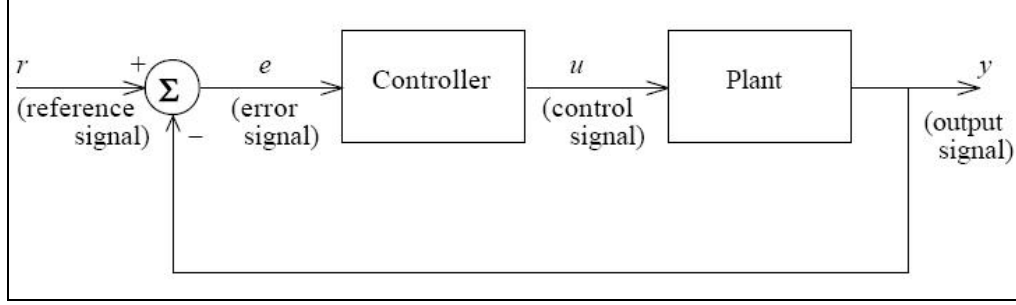
Παρά τα πλεονεκτήματα και την εύκολη προσέγγισή τους, ο σχεδιασμός ενός PID ελεγκτή αποτελεί μία πρόκληση για τους μηχανικούς και τους ερευνητές. Πολλοί μέθοδοι για τη ρύθμισή τους έχουν προταθεί, αλλά κάθε μέθοδος έχει τους περιορισμούς της.

3.3.2 Αναλυτικότερα για τους ελεγκτές

Οι ελεγκτές PID αποτελούνται από τρία μέρη. Το αναλογικό P (Proportional), το ολοκληρωτικό I (Integral) και το διαφορικό D (Derivative) και έχουν την γενική συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \quad \text{ή} \quad \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (1)$$

όπου οι παράμετροι (κέρδη) K_p , K_i και K_d αντιστοιχούν στον αναλογικό, ολοκληρωτικό και διαφορικό όρο αντίστοιχα. Ειδικές περιπτώσεις των PID ελεγκτών είναι οι ρυθμιστές PI και PD. Το γενικό διάγραμμα ενός συστήματος, το οποίο ελέγχεται από έναν ελεγκτή, είναι το παρακάτω:



Σχήμα 3.13 – Διάγραμμα συστήματος με ελεγκτή

Το Plant είναι το σύστημα το οποίο πρέπει να ελεγχθεί, ενώ ο Controller είναι αυτός που παράγει το σήμα ελέγχου u (control signal). Τα σήματα τα οποία λαμβάνουν μέρος είναι: r (reference ή set point), η τιμή του ελεγχόμενου μεγέθους που πρέπει να επιτευχθεί, y (output signal), η παρούσα έξοδος του συστήματος, e (error signal), το λάθος το οποίο δίνεται σαν είσοδο στον ελεγκτή. Ανάλογα με τον ελεγκτή μπορεί να υπολογιστεί η παράγωγος και το ολοκλήρωμα του λάθους. Το σήμα u στέλνεται στο σύστημα και η καινούργια έξοδος y προκύπτει. Αυτή στέλνεται πίσω (feedback), και υπολογίζεται το καινούργιο λάθος το οποίο τροφοδοτείται στον ελεγκτή σαν καινούργια είσοδος. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται και συνεχίζεται.

Μία άλλη ισοδύναμη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς (1) του ελεγκτή είναι :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left[1 + sT_d + \frac{T_i}{s} \right] \quad (2)$$

όπου $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ η σταθερά ολοκλήρωσης, $T_d = \frac{K_d}{K_p}$ η σταθερά διαφορίσης και

$K_c \approx K_p$. Στο πεδίο του χρόνου μπορούμε να την αναλύσουμε :

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

και για μικρό χρόνο δειγματοληψίας T_o , αυτή η εξίσωση μπορεί να μετατραπεί σε μία διαφορική εξίσωση. Ο διαφορικός όρος (D) αντικαθιστάτε από μίας πρώτης τάξης έκφραση διαφοράς και ο ολοκληρωτικός όρος (I) από ένα άθροισμα. Έτσι έχουμε:

$$u(k) = K_c \left[e(k) + \frac{T_o}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_d}{T_o} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (4)$$

3.3.3 Τα χαρακτηριστικά των P, I και D ελεγκτών

P ελεγκτής

Ένας αναλογικός ελεγκτής (K_p) δίνει μία συνεισφορά η οποία εξαρτάται από την στιγμιαία τιμή του λάθους ελέγχου e . Μπορεί να ελέγξει μία σταθερή εγκατάσταση, αλλά προσφέρει περιορισμένη επίδοση. Μειώνει το rise time και θα μειώσει, αλλά δεν θα εξαλείψει το steady-state error. Το τελευταίο γίνεται, γιατί η απόκριση συχνότητας του είναι οριοθετημένη για όλες τις συχνότητες. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η έκφραση proportional band (PB) για να περιγράψει την αναλογική δράση. Η ισοδύναμη εξίσωση είναι η $PB[\%] = \frac{100\%}{K_p}$. Το PB ορίζεται ως το λάθος το οποίο απαιτείται, ώστε να έχουμε 100% αλλαγή της εξόδου ελέγχου.

I ελεγκτής

Ένας ολοκληρωτικός ελεγκτής (K_i) δίνει μία έξοδο η οποία είναι ανάλογη του υπολογιζόμενου λάθους, κάτι το οποίο δείχνει πως είναι ένας τρόπος ελέγχου αργής αντίδρασης. Καταφέρει να μειώσει το τελικό λάθος. Αθροίζοντας ακόμα και ένα μικρό λάθος την φορά, παράγει ένα σήμα ελέγχου αρκετά μεγάλο για να οδηγήσει την έξοδο του συστήματος κοντά στο set-point. Έτσι, επιτυγχάνεται γρήγορα το set-point, λαμβάνοντας υπόψη του τα προηγούμενα λάθη στις ταλαντώσεις. Μπορεί να οδηγήσει το steady-state error στο μηδέν στην παρουσία μίας βηματικής εισόδου και διαταραχών.

D ελεγκτής

Ένας διαφορικός ελεγκτής (K_d) δρα στον ρυθμό αλλαγής του λάθους ελέγχου. Πρόκειται για έναν γρήγορο τρόπο ελέγχου ο οποίος συναγωνίζεται τον P

και I ελεγκτή όταν η έξοδος αλλάζει γρήγορα, αλλά εξαφανίζεται στην παρουσία σταθερών λαθών ($e(k) - e(k-1) = 0$ αφού $e(k) = e(k-1)$). Αυξάνει την σταθερότητα του συστήματος, μειώνει τα overshoots (υπερυψώσεις), αλλά δεν έχει καμία επίδραση στο τελικό λάθος.

Οι επιδράσεις κάθε ελεγκτή K_p , K_i , K_d δίνονται συνοπτικά στον πίνακα 3.1.

Αυτές οι συσχετίσεις μπορεί να μην είναι ακριβής εφόσον τα K_p , K_i , K_d εξαρτώνται το ένα από το άλλο.

Response	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-State Error
K_p	Μειώνεται	Αυξάνεται	Μικρή Αλλαγή	Μειώνεται
K_i	Μειώνεται	Αυξάνεται	Αυξάνεται	Εξαλείφεται
K_d	Μικρή Αλλαγή	Μειώνεται	Μειώνεται	Μικρή Αλλαγή

Πίνακας 3.1, Επιδράσεις ελεγκτών

Στην διπλωματική εργασία, μελετηθήκαν οι PD και PI ελεγκτές, που στις δύο επόμενες ενότητες θα αναλυθούν συνοπτικά.

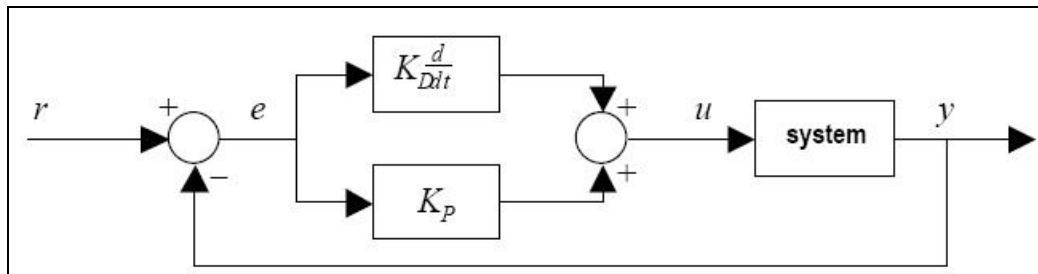
3.3.4 PD Ελεγκτής

Ο PD ελεγκτής αποτελείται από δύο μέρη, το αναλογικό και το διαφορικό. Η εξίσωση που τον περιγράφει είναι η:

$$G_c(s) = K_p + sK_d \text{ ή}$$

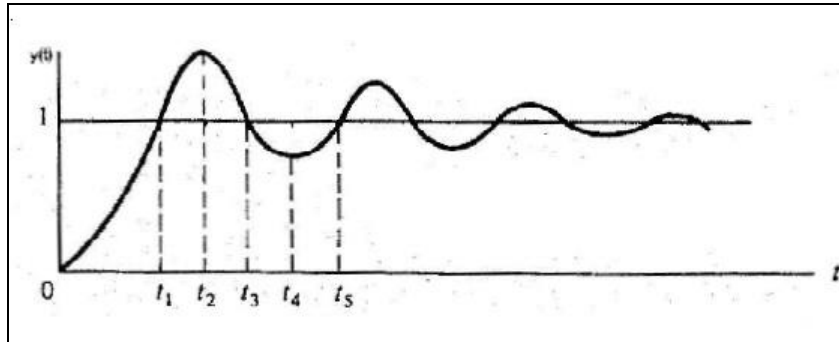
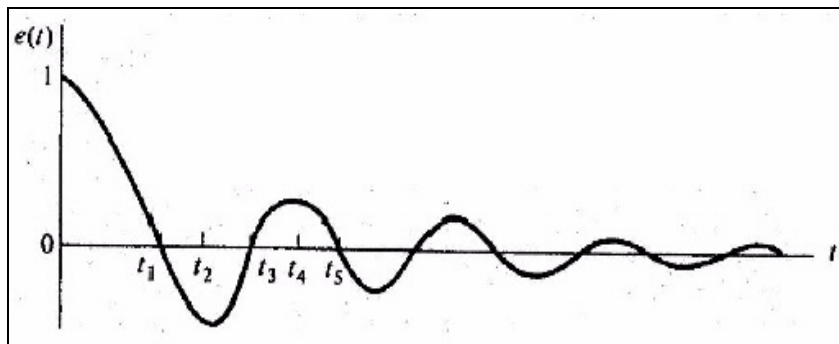
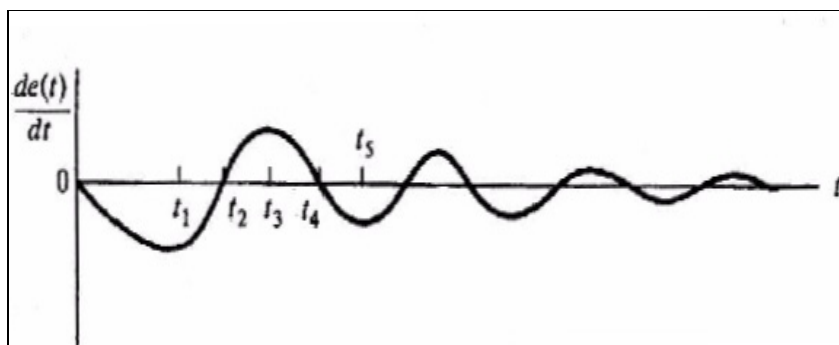
$$u(k) = K_c \left[e(k) + \frac{T_d}{T_o} (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (5)$$

και το διάγραμμα του δίνεται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14 – Διάγραμμα του PD controller

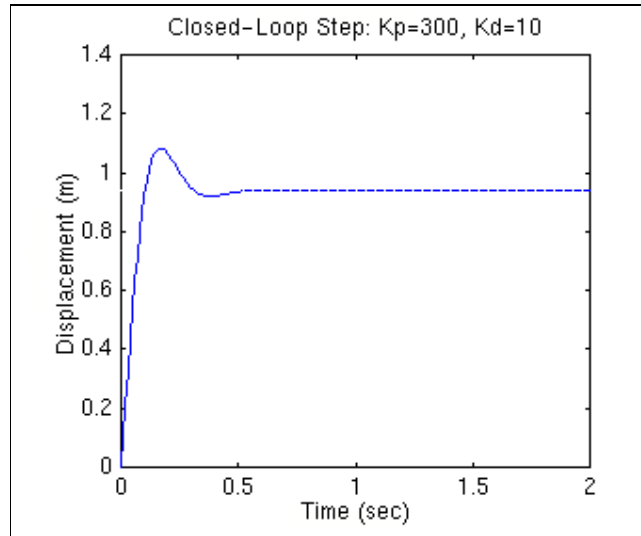
Ο ελεγκτής παίρνει σαν είσοδο το λάθος e και υπολογίζει την παραγωγή του. Πρόκειται δηλαδή για ένα ελεγκτή δύο εισόδων (λάθους και παραγώγου του λάθους), και μίας εξόδου (σήμα ελέγχου u). Είναι ένας συνδυασμός ενός P και ενός D ελεγκτή, των οποίων οι εξοδοί αθροίζονται για να παραχθεί η έξοδος u . Στη συνέχεια αυτή η έξοδος δίνεται στο σύστημα. Για διέγερση την μοναδιαία βηματική συνάρτηση οι κυματομορφές των $y(t)$, $e(t)$ και $\frac{de(t)}{dt}$ δίνονται στα παρακάτω σχήματα.

Σχήμα 3.15 – Κυματομορφή εξόδου $y(t)$ Σχήμα 3.16 – Κυματομορφή λάθους $e(t)$ Σχήμα 3.17 – Κυματομορφή παραγώγου λάθους $e'(t)$

Η κυματομορφή της παραγώγου του λάθους δίνει πληροφορίες για την αναμενόμενη αύξηση ή μείωση των overshoots (υπερύψωσης). Αν η κλίση της $e(t)$ ή της $y(t)$ είναι

μεγάλη, τότε η υπερύψωση είναι μεγάλη. Ο όρος sK_d εκτιμά το γεγονός αυτό και κάνει μία προσπάθεια για την μείωση των overshoots.

Για ένα σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς $G_p = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$ ο PD έχει απόκριση που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.18 – Απόκριση PD

Παρατηρείται πώς μειώνονται, τόσο οι υπερυψώσεις, όσο και το settling time, αλλά υπάρχει μικρή επίδραση στο steady-state error. Γενικά, αν ο PD ελεγκτής σχεδιαστεί σωστά, τότε μπορεί να επιτύχει γρήγορο rise time και μικρό ή καθόλου overshoot. Λειτουργεί σαν ένα υψιπερατό φίλτρο.

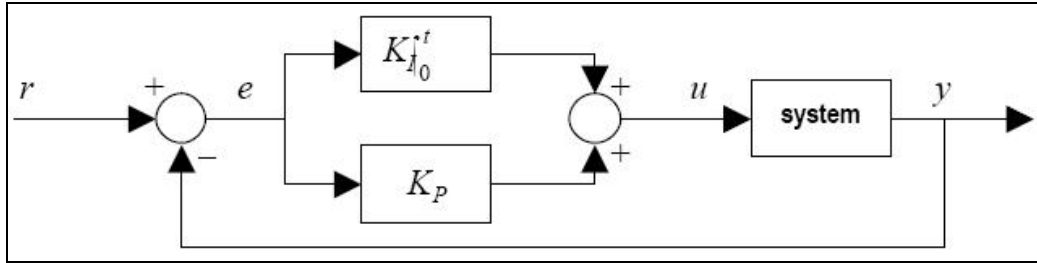
3.3.5 PI Ελεγκτής

Ο PI ελεγκτής αποτελείται και αυτός από δύο μέρη, το αναλογικό και το ολοκληρωτικό. Η εξίσωση που τον περιγράφει είναι η:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{ή}$$

$$u(k) = K_c \left[e(k) + \frac{T_o}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) \right] \quad (6)$$

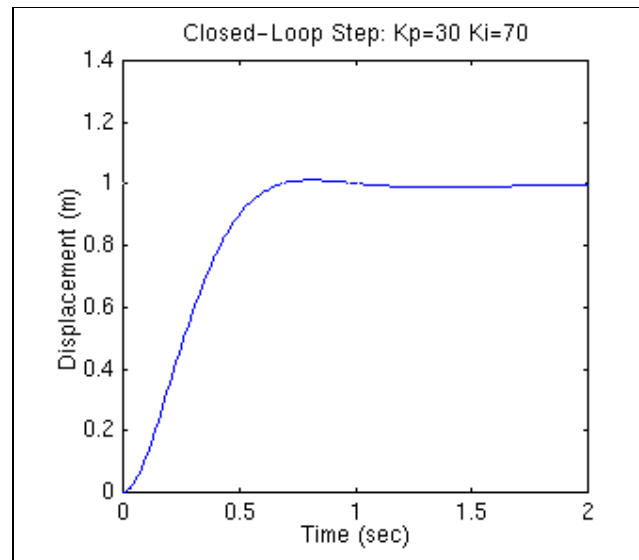
και το διάγραμμα του δίνεται στο σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19 – Διάγραμμα του PI controller.

Ο ελεγκτής παίρνει σαν είσοδο το λάθος e και υπολογίζει το ολοκλήρωμά του. Πρόκειται δηλαδή, για ένα ελεγκτή δύο εισόδων (λάθους και ολοκληρώματος του λάθους), και μίας εξόδου (σήμα ελέγχου u). Είναι ένας συνδυασμός ενός P και ενός I ελεγκτή, των οποίων οι εξοδοί αθροίζονται για να παραχθεί η έξοδος u . Στη συνέχεια αυτή η έξοδος δίνεται στο σύστημα.

Για το ίδιο σύστημα που δόθηκε στον PD ελεγκτή η απόκριση του PI δίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.20 – Απόκριση PI

Η επίδραση του PI είναι ευεργετική ως προς το steady-state error, το οποίο μπορεί να εξαλείψει. Αντίθετα, οι επιπτώσεις ως προς την ευστάθεια δεν είναι ευεργετικές. Μπορεί το σύστημα να πέσει σε αστάθεια για ορισμένες τιμές των K_i και K_p . Τέλος, η απόκριση μπορεί να έχει μικρές ή καθόλου υπερυψώσεις (overshoots), αλλά ο χρόνος ανύψωσης (rise time) είναι μεγάλος. Λειτουργεί σαν ένα βαθυτερατό φίλτρο.

3.3.6 Επιλογή του Sample Time

Ελεγκτές που βασίζονται σε δειγματοληπτημένα δεδομένα, έχουν συνήθως χαμηλή επίδοση σε συνεχή συστήματα ελέγχου. Αυτό εξηγείται με το ότι τα δειγματοληπτούμενα σήματα περιέχουν λιγότερη πληροφορία από ότι τα συνεχή. Η επιλογή του sampling time είναι αρκετά σημαντική παράμετρος για ένα τέτοιο ελεγκτή. Για ελεγκτές σαν αυτούς που εξετάστηκαν, μπορεί να γίνει η υπόθεση πως η επίδοσή τους εκφυλίζεται με την αύξηση του sample time. Αντίθετα, όσο μικρότερο είναι, τόσο καλύτερη συμπεριφορά έχει ο ελεγκτής. Ωστόσο, εάν ο χρόνος δειγματοληψίας γίνει πολύ μικρός, περαιτέρω βελτίωση της συμπεριφοράς του ελεγκτή δεν θα υπάρξει.

Η επιλογή του sample time δεν εξαρτάται μόνο από την επιθυμητή επίδοση του ελεγκτή, αλλά κι από παράγοντες όπως:

- Τη δυναμική της διαδικασίας.
- Το φάσμα των διαταραχών.
- Τον εξοπλισμό μετρήσεων.
- Το φορτίο υπολογισμού ή το κόστος κάθε επανάληψης ελέγχου (control loop).
- Το μοντέλο διαδικασίας που χρησιμοποιείται .

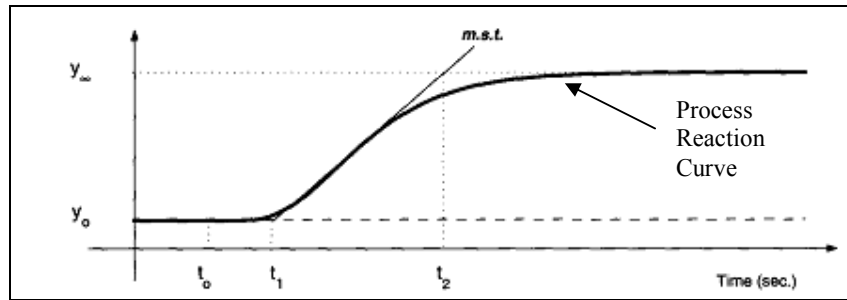
3.3.7 Μέθοδοι ρύθμισης και παραμετροποίησης ελεγκτών

Ο στόχος του σχεδιασμού ενός ελεγκτή είναι να καθοριστούν τα κέρδη (K_p , K_i , K_d) ή (K_c , T_d , T_i), ώστε να βρεθεί η δομή του και να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις επιδόσεων. Τα κέρδη πρέπει να υπολογιστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι απαιτήσεις για σωστή απόκριση, απόρριψη των διαταραχών και μείωση του steady-state error να καλυφθούν. Πρακτικά, δεν είναι εύκολο να ικανοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις. Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί, ώστε να μπορούν να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες. Κάποιες από αυτές είναι οι: Ziegler-Nichols, Cohen and Coon, Ho-Hang-Cao, εσωτερικό μοντέλο ελέγχου κ.α. Εδώ, θα αναλυθούν οι μέθοδοι Ziegler-Nichols και Cohen Coon, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των ελεγκτών που υλοποιήθηκαν.

Ziegler-Nichols

Πρόκειται για μία μέθοδο γνωστή ως process reaction curve method. Σε αυτήν, η απόκριση του ανοιχτού βρόγχου (έχοντας βγάλει τον ελεγκτή από το

σύστημα) σε unit step είσοδο μετράται και προσεγγίζεται με μικρές ευθείς γραμμές δίνοντας μία καμπύλη της μορφής που φαίνεται στο σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21 – Απόκριση συστήματος σε unit step είσοδο

Στη συνέχεια, χαράσσεται η εφαπτομένη στο σημείο της καμπύλης, όπου η πρώτη παράγωγος είναι μέγιστη (point of inflection), κάτι το οποίο φαίνεται και στο σχήμα 3.21. Υπολογίζονται τα μεγέθη τ_d , T και K όπου $\tau_d = t_1 - t_0$ ο χρόνος καθυστέρησης, $T = t_2 - t_1$ ο χρόνος αντίδρασης και $K = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}$. Η απόκριση μπορεί

να προσεγγιστεί με μία unit step απόκριση πρώτης τάξης συν τον χρόνο καθυστέρησης. Η εξίσωση αυτής είναι,

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau_d s}}{Ts + 1}.$$

Οι κανόνες για την εξαγωγή των παραμέτρων των ελεγκτών δίνονται στον πίνακα 3.2.

Parameters			
Controller	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{T}{K\tau_d}$		
PI	$\frac{0.9T}{K\tau_d}$	$\frac{\tau_d}{0.3}$	
PID	$\frac{1.2T}{K\tau_d}$	$2\tau_d$	$0.5\tau_d$

Πίνακας 3.2, Παράμετροι ελεγκτών Ziegler-Nichols

Η μέθοδος αυτή, αν και απλή, έχει δύο μειονεκτήματα. Πρώτον, ότι ο κλειστός βρόχος (closed loop) που προκύπτει έχει συχνά ταλαντώσεις. Δεύτερον, ότι βασίζεται αποκλειστικά στο κέρδος και στη συχνότητα, στα οποία ανισόροπα συστήματα θα ταλαντώνονταν στην παρουσία ενός αναλογικού feedback loop.

Cohen Coon

Είναι και αυτή μία process reaction curve method, στην οποία ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την Ziegler-Nichols, για την εξαγωγή της καμπύλης. Παράγει απόκριση κλειστού βρόγχου με λόγο εξασθένισης (decay ratio), $\frac{1}{4}$. Το βασικό πλεονέκτημα της είναι η απλότητα υλοποίησης, αλλά το μειονέκτημα της είναι πως οι αποκρίσεις έχουν ταλαντώσεις. Στον πίνακα 3.3, δίνονται οι κανόνες για την εξαγωγή των παραμέτρων, όπου τα K , T και τ_d υπολογίζονται όπως στην μέθοδο Ziegler-Nichols.

Controller	Parameters		
	K_c	T_i	T_d
P	$\frac{K\tau_d}{T\left(1+\frac{\tau_d}{3T}\right)}$		
PI	$\frac{K\tau_d}{T\left(0.9+\frac{\tau_d}{2T}\right)}$	$\frac{\tau_d\left(30+3\frac{\tau_d}{T}\right)}{9+20\frac{\tau_d}{T}}$	
PD	$\frac{K\tau_d}{\left(1.25T+\frac{\tau_d}{6}\right)}$		$\frac{\tau_d\left(6-2\frac{\tau_d}{T}\right)}{22+3\frac{\tau_d}{T}}$
PID	$\frac{K\tau_d}{T\left(1.3+\frac{\tau_d}{6T}\right)}$	$\tau_d\left[\frac{32+6\left(\frac{\tau_d}{T}\right)}{13+8\left(\frac{\tau_d}{T}\right)}\right]$	$\frac{4\tau_d}{11+2\left(\frac{\tau_d}{T}\right)}$

Πίνακας 3.3, Παράμετροι ελεγκτών Cohen Coon

3.4 Ασαφείς και κλασικοί ελεγκτές

Οι κλασικοί ελεγκτές έχουν μία συγκεκριμένη δομή, η οποία με την σωστή επιλογή των τριών κερδών παρέχει πολύ καλό έλεγχο σε γραμμικά συστήματα πρώτης και δεύτερης τάξης. Ένας ελεγκτής ασαφούς λογικής έχει περισσότερο ή λιγότερο γενική δομή, με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, επιτρέποντας στον σχεδιαστή να επιτύχει περίφημα ή να αποτύχει τελείως να ελέγξει από ένα πρώτης τάξης γραμμικό σύστημα μέχρι ένα υψηλής τάξης μη γραμμικό σύστημα. Τέλος, η σχεδιαστική διαδικασία για έναν κλασικό ελεγκτή είναι πιο εύκολο να περιγράψει, εφόσον βασίζεται στην εύρεση των κερδών, ενώ σε ένα ελεγκτή ασαφούς λογικής απαιτείται ο σχεδιασμός των εισόδων, των συναρτήσεων συμμετοχής και των κανόνων, μια πιο πολύπλοκη διαδικασία.

Κεφάλαιο 4 - Περιγραφή του συστήματος EIB

4.1 Περιγραφή Προτύπου EIB

4.1.1 Γενικά για το πρότυπο EIB

Το EIB (European Installation Bus) αποτελεί ένα πρότυπο διαύλου δικτύωσης κτιρίων. Πρόκειται για ένα βιομηχανικό πρότυπο, το οποίο προτάθηκε από ένα σύνολο εταιριών ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, οι οποίες συνέστησαν τον ανεξάρτητο επιστημονικό φορέα EIBA (EIB Association) με έδρα το Βέλγιο. Είναι μία σύγχρονη μέθοδος ηλεκτρικών εγκαταστάσεων για κτιριακό αυτοματισμό που στη σημερινή εποχή είναι περισσότερο γνωστή σαν “έξυπνο σπίτι”. Στην EIBA συμμετέχουν πάνω από εκατό εταιρίες που ασχολούνται με την ηλεκτρονική, τους αυτοματισμούς, τις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις, τον κλιματισμό, τις λευκές ηλεκτρικές οικιακές συσκευές κ.α.



Σχήμα 4.1 – Επίσημο Λογότυπο EIB

Οι κυριότερες υλοποιήσεις εγκατάστασης με το πρότυπο EIB γίνονται με τη χρήση τριών αρκετά διαδεδομένων φυσικών μέσων :

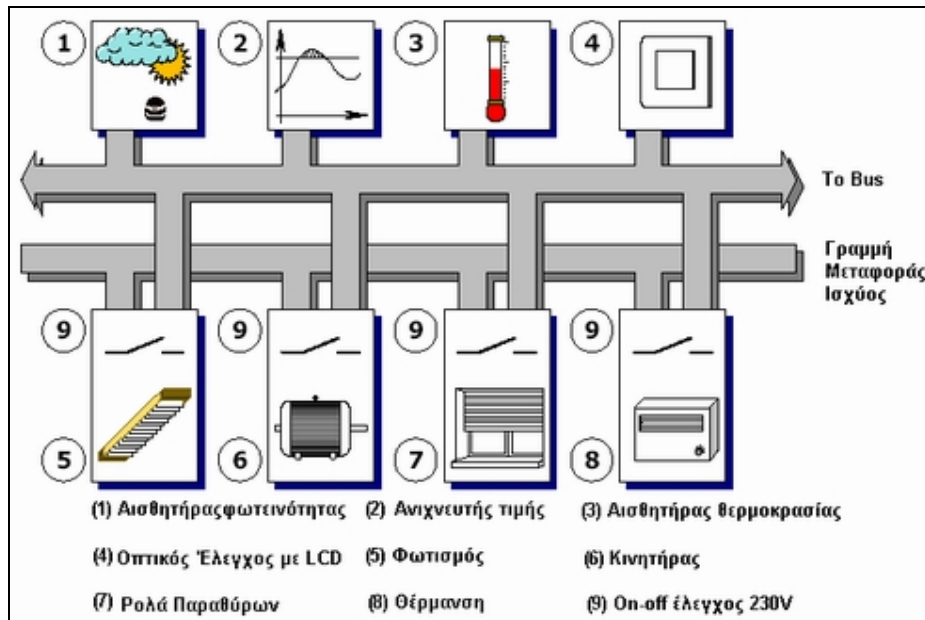
- Συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων (twisted pair)
- Ασύρματη μετάδοση (Radio Transmission)
- Γραμμής ισχύος (Power Line Transmission)

Η πρώτη υλοποίηση θα περιγραφεί αναλυτικά, εφόσον είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως, ενώ οι άλλες δύο πιο συνοπτικά.

4.1.2 Μετάδοση μέσω συνεστραμμένου ζεύγους

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο διαδεδομένη για την υλοποίηση εγκαταστάσεων βασισμένων στο πρότυπο EIB. Το κόστος χρήσης συνεστραμμένου ζεύγους είναι αρκετά χαμηλό και πληρεί όλες τις προδιαγραφές για ανάπτυξη κτιριακών εγκαταστάσεων. Επίσης, προσφέρει αναισθησία στο θόρυβο και στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τέλος, δεν επηρεάζεται η γραμμή μεταφοράς

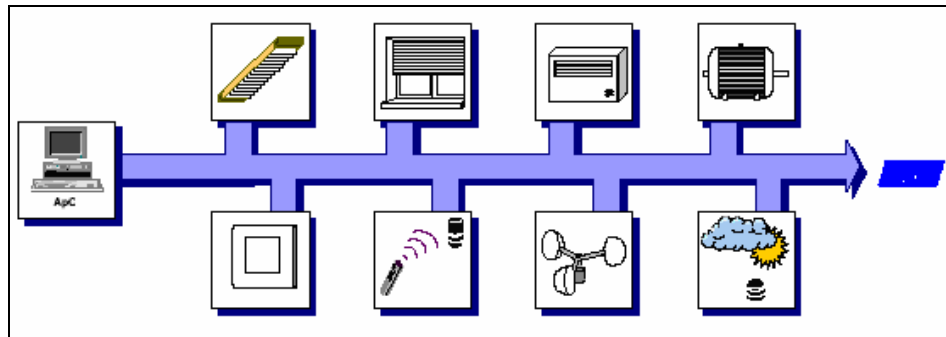
ηλεκτρικού ρεύματος του κτιρίου, εφόσον τοποθετείται παράλληλα με αυτήν. Για τους παραπάνω λόγους, το συνεστραμμένο ζεύγος προτιμάται για καλωδίωση κτηρίων μεγάλου μήκους. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ένα παράδειγμα εγκατάστασης με συνεστραμμένο ζεύγος.



Σχήμα 4.2 – Εγκατάσταση με συνεστραμμένο ζεύγος

Οι συμβατές συσκευές με το πρότυπο EIB που επικοινωνούν μέσω του διαύλου ονομάζονται συνδρομητές και είναι εξωτερικά (όσον αφορά τις διαστάσεις τους) όμοιες με τις κλασσικές ηλεκτρολογικές συσκευές. Το EIBus εξασφαλίζει στον σχεδιαστή, αλλά και στον τελικό καταναλωτή, το πλεονέκτημα της συμβατότητας των παρεχόμενων προϊόντων, τώρα, αλλά και στο μέλλον. Μπορούν να τοποθετηθούν σε ράγα ηλεκτρολογικού πίνακα ή χωνευτές στον τοίχο, εφόσον επιτρέπεται. Οι συνδρομητές μπορούν να έχουν αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους μέσω μηνυμάτων. Οι προδιαγραφές του διαύλου ορίζουν ένα ανοιχτό σύστημα, στο οποίο κάθε συνδρομητής μπορεί να επικοινωνήσει με οποιοδήποτε άλλο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ο έλεγχος της εγκατάστασης να είναι αποκεντρωμένος και μοιρασμένος στους συνδρομητές που την αποτελούν, ή κεντρικός (ύπαρξη ενός κύριου συνδρομητή). Στην περίπτωση κεντρικού ελέγχου, ο κύριος συνδρομητής αναλαμβάνει τον έλεγχο της εγκατάστασης και συχνά είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής – συνδρομητής. Στο επόμενο σχήμα, δίνεται ένα παράδειγμα κεντρικού ελέγχου, όπου κύριος συνδρομητής είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, στον οποίο

είναι συνδεδεμένα τα αισθητήρια και οι ενεργοποιητές (actuators) μέσω του EIB διαύλου.



Σχήμα 4.3 – Κεντρικά ελεγχόμενο σύστημα διαύλου.

Αυτή η δομημένη προσέγγιση χρησιμοποιείται για την τοπολογία της εγκατάστασης, κάνοντας εύκολη τη διαχείριση των συνδεδεμένων στον δίαυλο συσκευών. Επιπρόσθετα, μέσω της τεχνολογίας EIB γίνεται δυνατός ο έλεγχος μίας συσκευής από πολλαπλά σημεία της εγκατάστασης ενώ παράλληλα, δεν υφίσταται πρόβλημα στη λειτουργία της εγκατάστασης αν ένας κόμβος παρουσιάσει βλάβη. Είναι εύκολος ο εντοπισμός βλαβών, εφόσον υπάρχει η δυνατότητα δυναμικής επέμβασης στην εγκατάσταση με τη χρήση διαφόρων εργαλείων, αλλά και η πρόσθεση, αφαίρεση ή αλλαγή ενός συνδρομητή. Τέλος, με τη χρήση του λογισμικού ETS είναι εύκολος ο επαναπρογραμματισμός και η αλλαγή της τοπολογίας της εγκατάστασης, αν αυτό είναι απαραίτητο να γίνει.

Το ETS είναι ένα εργαλείο λογισμικού, που λειτουργεί τόσο σε επίπεδο προγραμματισμού και οργάνωσης της εγκατάστασης, όσο και σε επίπεδο διαχείρισης έργου (Project Management). Βασικό χαρακτηριστικό του προγράμματος είναι ότι μπορεί να δεχθεί την βάση δεδομένων συνδρομητών οποιουδήποτε συμβατού κατασκευαστή με το πρότυπο EIB. Αυτό επιτρέπει στο σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει συσκευές (συνδρομητές) διαφορετικών κατασκευαστών στον σχεδιασμό της εγκατάστασης του.

4.1.3 Ασύρματη Μετάδοση

Είναι γνωστή σαν τεχνολογία EIB-RF και σύμφωνα με αυτή δεν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση καινούργιων γραμμών Bus. Χρησιμοποιείται ραδιοκανάλι, ώστε να μεταδοθούν τα δεδομένα με ασύρματο τρόπο και τόσο τα αισθητήρια, όσο και οι τελικοί αποδέκτες, μπορούν να λειτουργούν με μπαταρίες.

Περίπου 300m ελεύθερου χώρου μπορεί να απέχει η μία συσκευή από την άλλη. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη απόσταση, τότε επαναλήπτες αναλαμβάνουν την επανάληψη των ράδιο-τηλεγραφημάτων. Με την τεχνική αυτή έχουμε λιγότερη χρήση καλωδίων, και είναι εξαιρετικά κατάλληλη για επέκταση ήδη υπαρχόντων εγκαταστάσεων που έχουν υλοποιηθεί με διαφορετική τεχνολογία.

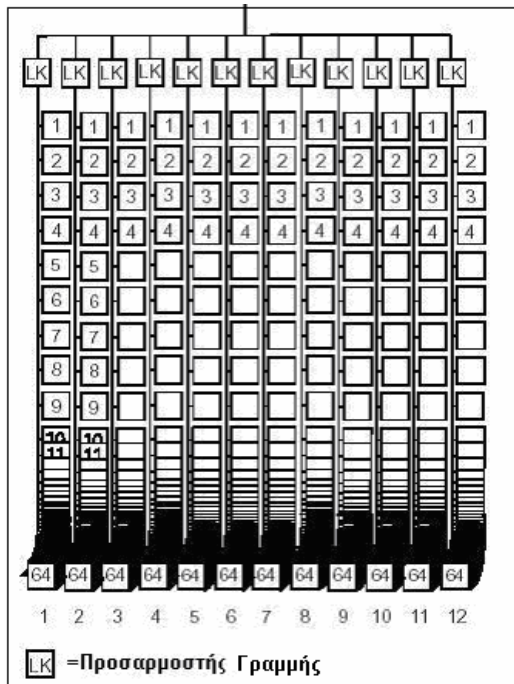
4.1.4 Μετάδοση με χρήση γραμμής ισχύος

Γνωστή ως EIB Powerline είναι μία τεχνική, στην οποία η μεταφορά δεδομένων, αλλά και η τροφοδοσία γίνεται, χρησιμοποιώντας μία διαθέσιμη τροφοδοσία 220/400V (Γραμμή ισχύος). Με αυτή την τεχνολογία δεν είναι πλέον απαραίτητο να απλώνονται παράλληλα οι γραμμές του Bus με τις γραμμές ισχύος και είναι η πιο κατάλληλη για την αναβάθμιση ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων παλαιού τύπου. Κύρια χαρακτηριστικά του EIB Powerline είναι η οικονομία, η ελαστικότητα και αξιοπιστία μετάδοσης.

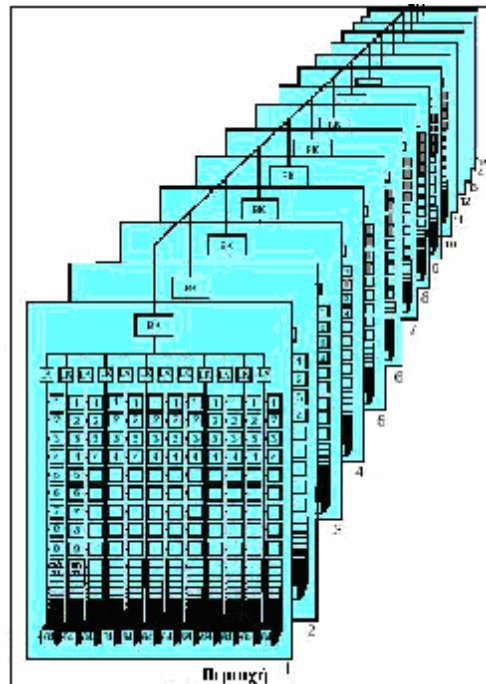
4.1.5 Τοπολογία και Οργάνωση διαύλου

Σημαντική παράμετρος στη σχεδίαση και δημιουργία εγκαταστάσεων που βασίζονται σε τεχνολογία διαύλου EIB, είναι η ιεράρχηση και η οργάνωση της τοπολογίας της. Αυτό που έχει προταθεί για το σχεδιασμό της καλωδίωσης είναι μία ιεραρχική δενδροειδής δομή. Η γραμμή (line) αποτελεί τη μικρότερη και απλούστερη μονάδα διαύλου σε όλο το σύστημα EIB. Ο μέγιστος αριθμός συνδρομητών διαύλου που μπορούν να εγκατασταθούν σε μία γραμμή είναι 64. Σε περίπτωση που απαιτείται η εγκατάσταση περισσότερων από 64, τότε θα πρέπει να γίνει η χρήση επαναληπτών (repeaters). Το μέγιστο μήκος γραμμής με χρήση συνεστραμμένου ζεύγους είναι 700 μέτρα με ταχύτητα 9600bps. Η αμέσως μεγαλύτερη δομική μονάδα στην ιεραρχία είναι η περιοχή (area). Σε μία περιοχή με τη χρήση ειδικών συσκευών, που λέγονται προσαρμοστές γραμμής (line couplers), μπορούν να συνδεθούν έως 12 γραμμές. Ο συνολικός αριθμός συνδρομητών που μπορούν να φιλοξενηθούν φτάνει τους 768. Για τη λειτουργία κάθε γραμμής απαιτείται ένα τροφοδοτικό πιστοποιημένο στο EIB πρότυπο. Το κάθε τροφοδοτικό αναλαμβάνει την τροφοδοσία των συνδρομητών, που είναι συνδεδεμένοι στην εν λόγω γραμμή. Τέλος, με τη χρήση προσαρμοστών περιοχών (area couplers) μπορούν να συνδεθούν μέχρι και 15 περιοχές μαζί, δίνοντας ένα συνολικό αριθμό συνδρομητών, που

μπορούν να φιλοξενηθούν, τους 11520. Ακολουθούν δύο σχήματα που αναπαριστούν την παραπάνω τοπολογία του EIB διαύλου.



Σχήμα 4.4 - Σύνδεση γραμμών με προσαρμοστές



Σχήμα 4.5 - Τοπολογία EIB διαύλου

Ο διαχωρισμός του διαύλου σε περιοχές και γραμμές, παρέχει το πλεονέκτημα ότι η κίνηση δεδομένων, σε μία γραμμή ή περιοχή, είναι απομονωμένη και δεν επηρεάζει τη ροή των πληροφοριών στις υπόλοιπες γραμμές και περιοχές.

4.1.6 Μετάδοση πληροφορίας - τηλεγραφήματα

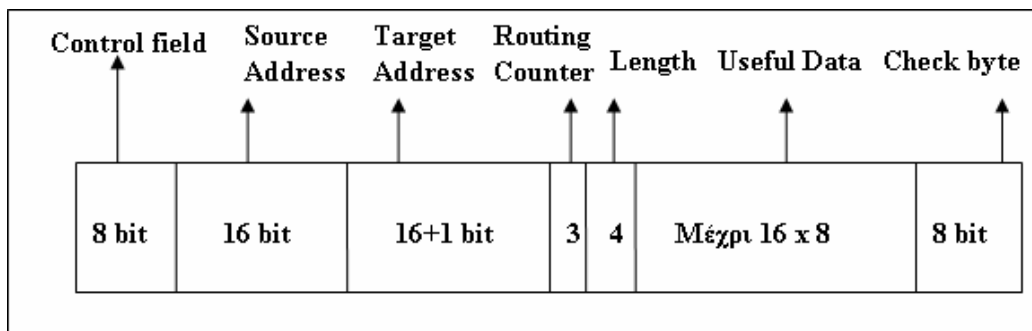
Οι πληροφορίες ανταλλάσσονται μεταξύ των συνδρομητών του διαύλου με τη μορφή τηλεγραφημάτων. Οι πληροφορίες μεταδίδονται συμμετρικά στη γραμμή του Bus με ρυθμό μετάδοσης 9600bits/sec καθορίζοντας έτσι το μέσο χρόνο μετάδοσης ενός τηλεγραφήματος στα 25 msec. Για λόγους ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης χρησιμοποιείται, για τη μετάδοση, διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο γραμμών και όχι διαφορά δυναμικού σε σχέση με το δυναμικό της γης.

Το πρωτόκολλο EIB επιβάλλει τα ξεχωριστά μηνύματα πληροφορίας να μεταδίδονται στη γραμμή του διαύλου ακολουθώντας συγκεκριμένη σειρά. Επιπλέον, επιβάλλεται κάθε χρονική στιγμή, ο δίαυλος να χρησιμοποιείται για εκπομπή πληροφορίας από ένα μόνο συνδρομητή. Ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης που

χρησιμοποιείται, είναι ο CSMA/CA, μία παραλλαγή του CSMA/CD του Ethernet. Υπάρχει βέβαια πρόβλεψη για τα επείγοντα τηλεγραφήματα, σύμφωνα με την οποία δίνεται υψηλή προτεραιότητα σε αυτά έναντι άλλων συμβατικών.

Η δομή του τηλεγραφήματος δίνεται στο σχήμα 4.6. Αποτελείται από μία σειρά από χαρακτήρες, οργανωμένους σε πεδία. Η πληροφορία στο πεδίο των δεδομένων, αλλά και τα υπόλοιπα πεδία, ελέγχονται για την ορθότητά τους μέσω των δεδομένων, τα οποία περιέχονται στα πεδία ελέγχου και του πεδίου checksum.

Τα πεδία διεύθυνσης περιλαμβάνουν τις διευθύνσεις του αποστολέα (source address) και του παραλήπτη (target address). Η διεύθυνση της πηγής είναι πάντα η φυσική διεύθυνση (physical address), η οποία είναι μοναδική για κάθε συνδρομητή. Αυτή καθορίζει την περιοχή και τη γραμμή που βρίσκεται ο κάθε συνδρομητής. Η διεύθυνση προορισμού καθορίζει τη συσκευή ή τις συσκευές, οι οποίες είναι δέκτες του τηλεγραφήματος. Για τη διεύθυνση αποστολής χρησιμοποιούνται διευθύνσεις ομάδας (group address), οι οποίες επιτρέπουν μία ή περισσότερες συσκευές, να παίρνουν μέρος στην ίδια λήψη, ανεξαρτήτως της τοποθεσίας τους στο δίαυλο.



Σχήμα 4.6 – Δομή Τηλεγραφήματος

Οι συνδρομητές διαύλου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές. Οι αισθητήρες δίνουν εντολές ή πληροφορίες στο σύστημα, ενώ οι ενεργοποιητές εκτελούν εντολές. Η διασύνδεση αυτών γίνεται με την αντιστοίχιση της ίδιας διεύθυνσης ομάδας στα αντικείμενα επικοινωνίας τους, τόσο του αισθητηρίου, όσο και του ενεργοποιητή, κάνοντας έτσι δυνατή την αποκατάσταση της μεταξύ τους επικοινωνίας.

4.1.7 Ανάπτυξη έξυπνων κόμβων – βιβλιοθήκη EteC Falcon

Για το σχεδιασμό εφαρμογών που κάνουν χρήση της υποδομής EIB, εκτός από το λογισμικό ETS, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικοί τρόποι. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα σχεδιασμού και υλοποίησης έξυπνων κόμβων, συμβατών με το EIB, με διάφορες προσεγγίσεις, όπως EIB-IDE, Falcon API και EIB OPC Server. Παρακάτω θα αναλυθεί η δεύτερη προσέγγιση (Falcon API), εφόσον είναι αυτή που χρησιμοποιείται στο σύστημα της εφαρμογής.

Για την προγραμματιστική εκμετάλλευση του διαύλου EIB, η εταιρία EIBA έχει αναπτύξει τις βιβλιοθήκες eteC Falcon, οι οποίες προσφέρουν μία σειρά μεθόδων που αναλαμβάνουν την εγγραφή, την ανάγνωση μηνυμάτων προς και από τον δίαυλο, καθώς και άλλες βοηθητικές ρουτίνες. Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν από αρκετές γλώσσες προγραμματισμού, όπως Visual C++, Visual Basic, Java και άλλες. Πιο συγκεκριμένα, προσφέρονται για τις συναρτήσεις εγγραφής / ανάγνωσης μηνυμάτων, μέθοδοι που ελέγχονται από συμβάντα ή μέθοδοι που είναι blocking. Στις πρώτες, η διαδικασία ανάγνωσης ή εγγραφής γίνεται ασύγχρονα, ενώ στις δεύτερες σύγχρονα αναγκάζοντας την εφαρμογή να περιμένει απάντηση.

Σε περιβάλλον Visual Basic, στο οποίο σχεδιάστηκε και το σύστημα που παρουσιάζεται, η υλοποίηση εφαρμογής μπορεί να γίνει με χρήση των στοιχείων που προσφέρει το Falcon. Αρχικά, ενσωματώνεται κώδικας στις αρχικές δηλώσεις του προγράμματος, ο οποίος αρχικοποιεί την επικοινωνία με το δίαυλο διεπικοινωνίας και εκτελείται κάθε φορά που το πρόγραμμα εκκινεί. Στον κώδικα αυτό, γίνεται η δημιουργία ενός αντικειμένου σύνδεσης, με τη χρήση της ειδικής κλάσης ClassCreator της βιβλιοθήκης eteC Falcon. Στη συνέχεια, γίνεται η ρύθμιση του τρόπου σύνδεσης με τον δίαυλο, η επιλογή της συσκευής διεπικοινωνίας που παρεμβάλεται μεταξύ διαύλου και υπολογιστή, η ρύθμιση της ταχύτητας επικοινωνίας στα 9600bps, καθώς και η σειριακή θύρα, στην οποία είναι τοποθετημένη η συσκευή. Τέλος, δημιουργείται ένα στιγμιότυπο του αντικειμένου σύνδεσης, το οποίο έχει πρόσβαση στο δίαυλο και ονομάζεται αντικείμενο ομάδας δεδομένων. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι κυριότερες μέθοδοι του αντικειμένου ομάδας δεδομένων, καθώς και μία σύντομη περιγραφή τους.

Μέθοδος	Περιγραφή
DataGroupObject.ReadSync	Αναλαμβάνει την ανάγνωση δεδομένων από μία συγκεκριμένη διεύθυνση ομάδας του διαύλου. Είναι μέθοδος blocking και περιμένει απάντηση. Σε αντίθετη περίπτωση επιστρέφει σφάλμα.
DataGroupObject.Write	Επιστρέφει μία παράμετρο σφάλματος η οποία όταν είναι 0 τότε η εγγραφή ήταν επιτυχής, ενώ όταν είναι διάφορη τότε έχει υπάρξει σφάλμα κατά την διαδικασία της εγγραφής. Είναι και αυτή μέθοδος blocking.
Πίνακας 4.1, Κύριες μέθοδοι αντικειμένου ομάδας δεδομένων	

Η σύνταξη των παραπάνω μεθόδων είναι η παρακάτω:

Input3Value = DataGroupObj.ReadSync("1/6/2", PriorityLow, 6)

Ως παραμέτρους παίρνει τη διεύθυνση της ομάδας προς ανάγνωση, την προτεραιότητα της απάντησης και έναν αριθμό που σχετίζεται με τη δρομολόγηση του μηνύματος.

DeviceWriteError = DataGroupObj.Write("1/2/1", PriorityLow, 6, True, &H1)

Στις παραμέτρους προστίθεται μία ακόμα, η οποία περιέχει την τιμή που θα εγγραφεί.

4.2 Περιγραφή εγκατάστασης EIB του εργαστηρίου ΕΗΚΑΠΕ του Πολυτεχνείου Κρήτης

4.2.1 Γενικά

Στο εργαστήριο ηλεκτρικών κυκλωμάτων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΕΗΚΑΠΕ) του Πολυτεχνείου Κρήτης, έχει γίνει η εγκατάσταση ενός συστήματος EIB, με σκοπό τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών στο κτίριο και την ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό οδηγεί στην εξοικονόμηση χρημάτων και στη φιλική συμπεριφορά προς το περιβάλλον. Η εξοικονόμηση προσφέρεται μέσω της μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας για το φωτισμό και τη ψύξη /

θέρμανση του κτιρίου. Σε ό,τι αφορά το κτίριο, πρόκειται για μία διώροφη κατασκευή με αρκετά μεγάλο χώρο παρατηρήσεων.

4.2.2 Περιγραφή και τοπολογία της εγκατάστασης

Στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου έχουν τοποθετηθεί οι συσκευές διαύλου EIB και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, ο οποίος είναι ο κύριος συνδρομητής. Στον υπολογιστή είναι εγκατεστημένο το λογισμικό ETS, καθώς και το πρόγραμμα παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος, το οποίο έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα Visual Basic και C++. Οι περισσότερες συσκευές είναι τύπου N και μπορούν να τοποθετηθούν σε ράγα πίνακα. Στο ισόγειο του κτιρίου υπάρχουν οι είσοδοι και έξοδοι της εγκατάστασης. Τις εισόδους της εγκατάστασης αποτελούν τα αισθητήρια. Αυτά είναι το αισθητήριο MRT (Mean Radiant Temperature), υγρασίας, ροής αέρα, θερμοκρασίας, φωτισμού και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Εξωτερικά του εργαστηρίου έχουν τοποθετηθεί ένα εξωτερικό αισθητήριο θερμοκρασίας, ένα ανεμόμετρο και ένα εξωτερικό φωτόμετρο. Τα εξωτερικά στοιχεία συνδέονται στη μονάδα Weather Station της Siemens. Οι έξοδοι αποτελούνται από ένα κινητήρα που ελέγχει (ανοίγει ή κλείνει) ένα παράθυρο, δύο κλιματιστικά, τρεις ομάδες φώτων και ένα κινητήρα που ανεβάζει ή κατεβάζει το σκιάστρο.

Είσοδοι	Έξοδοι
Εσωτερικό αισθητήριο MRT	3 ομάδες φωτισμού με σώματα φθορισμού
Εσωτερικό αισθητήριο θερμοκρασίας	2 κλιματιστικά
Εσωτερικό αισθητήριο υγρασίας	1 ηλεκτρομηχανικό παράθυρο κινούμενο από μοτέρ
Εσωτερικό αισθητήριο περιεκτικότητας CO_2	1 ρόλερ σκίασης
Εσωτερικό αισθητήριο ροής αέρα	
Εσωτερικό φωτόμετρο	
Εξωτερικό αισθητήριο θερμοκρασίας	
Εξωτερικό φωτόμετρο	
Εξωτερικό ανεμόμετρο	
Πίνακας 4.2, Είσοδοι και έξοδοι εγκατάστασης	

Οι συσκευές EIBus που χρησιμοποιούνται είναι ένα πιστοποιημένο τροφοδοτικό EIB της Siemens, ένα πηνίο καθώς και μία θύρα RS-232 της Siemens. Αυτές αποτελούν

τις απαραίτητες συσκευές για τη δημιουργία μίας EIB εγκατάστασης. Περαιτέρω, χρησιμοποιούνται η συσκευή I/O Module (Box) Universal N-670 της Siemens (διπλή αναλογική είσοδος και οι 2 εξοδοί ρελέ), στις οποίες την πρώτη αναλογική έξοδος συνδέεται το αισθητήριο MRT και στη δεύτερη το αισθητήριο ροής αέρα. Στο ένα ρελέ έχει συνδεθεί τροφοδοσία 24V και με το κλείσιμο του τροφοδοτεί τον κινητήρα του παραθύρου, εκτελώντας το άνοιγμά του. Το δεύτερο ρελέ είναι υπεύθυνο για το κλείσιμο του παραθύρου. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μία τετραπλή αναλογική είσοδος της ABB που στις τέσσερις εισόδους της, παίρνει τις εξόδους των αισθητηρίων CO₂, θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτεινότητας. Στην εγκατάσταση χρησιμοποιούνται επίσης, δύο διπλές δυαδικές εξόδους της Siemens. Η μία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των κλιματιστικών και η άλλη για τον έλεγχο τριών ομάδων φωτισμού. Τέλος, μία συσκευή δυαδικής εξόδου χρησιμοποιείται για το σύστημα σκίασης, μία έξοδος για κάθε λειτουργία (UP ή DOWN), καθώς και το Weather Station της Siemens για να μεταφράζει τα σήματα που λαμβάνει από τα συνδεδεμένα σε αυτόν αισθητήρια, σε μηνύματα κατανοητά στο Bus.

Συσκευές EIBus
RS-232 N-148, Power supply, πηνίο I/O Module Universal N-670 Siemens 2 Binary outputs 4 fold Binary output 2 fold Analogue input 4 fold (ABB) Brightness controller Weather Station
Πίνακας 4.3, Συσκευές EIBus που χρησιμοποιούνται

4.2.3 Αισθητήρια και ελεγχόμενες συσκευές

Στο σημείο αυτό θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των αισθητηρίων και των ελεγχόμενων συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση.

Αισθητήρια θερμοκρασίας

Χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρια θερμοκρασίας, ένα για εσωτερική και ένα για εξωτερική αντίστοιχα. Και τα δύο έχουν εύρος από -10 έως 40 °C Κελσίου.

Παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά και έχουν βαθμονομηθεί με τη βοήθεια θερμόμετρου υδραργύρου. Για τη λειτουργία του εσωτερικού αισθητηρίου χρειάστηκε πρόσθετη τροφοδοσία DC 24V.

Αισθητήριο υγρασίας

Το αισθητήριο δίνει σε εκατοστιαία κλίματα το ποσοστό της σχετικής υγρασίας στον χώρο της εγκατάστασης. Είναι γραμμικό και δίνει στην έξοδό του τιμές από 0 έως 10V DC. Για τη λειτουργία του χρησιμοποιείται πρόσθετη τροφοδοσία DC 24V. Χρειάστηκε να γίνει βαθμονόμηση του αισθητηρίου, διαδικασία η οποία περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.

Αισθητήρια φωτισμού

Γίνεται χρήση δύο αισθητηρίων φωτισμού. Το ένα είναι στην κλίμακα των Klux, έχει γραμμική συμπεριφορά και είναι τοποθετημένο στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου. Το δεύτερο βρίσκεται στο ισόγειο του κτιρίου, έχει εύρος τιμών 0 – 4000 lux και γραμμική συμπεριφορά.

Αισθητήριο MRT

Μετράει τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, είναι γραμμικό και έχει έξοδο 0-10 V DC.

Αισθητήριο CO₂

Το αισθητήριο μετράει τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στο χώρο της εγκατάστασης. Έχει γραμμική συμπεριφορά και έξοδο 0 – 5V DC. Το εύρος τιμών είναι από 386 έως 4000 ppm.

Αισθητήρια ταχύτητας αέρα

Είναι γραμμικό και μετράει την ταχύτητα του αέρα σε m/sec. Το εύρος τιμών εξόδου είναι 0-10V DC. Επιπρόσθετα, υπάρχει εξωτερικό αισθητήριο ταχύτητας ανέμου που συνδέεται με το Weather Station.

Ελεγχόμενες συσκευές Θέρμανσης / Ψύξης

Υπάρχουν δύο μονάδες θέρμανσης / ψύξης των 36.000 btu η κάθε μία. Ανάλογα με την εποχή, επιλέγεται ο σχετικός διακόπτης που αλλάζει τη λειτουργία τους από θέρμανση σε ψύξη. Ο έξυπνος κόμβος ρυθμίζει τον κύκλο λειτουργίας τους από 0 έως 100% της περιόδου του συστήματος.

Ελεγχόμενες συσκευές εσωτερικού φωτισμού

Η οροφή του εργαστηρίου καλύπτεται από τρεις ομάδες φωτιστικών σωμάτων, κάθε μια από τις οποίες έχει 8 λαμπτήρες φθορισμού. Οι ομάδες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, καθώς έχουν διαφορετικές διευθύνσεις ομάδας.

Ηλεκτρικό παράθυρο

Λόγω έλλειψης μονάδας κεντρικού εξαερισμού, έγινε η μετατροπή ενός συμβατικού παραθύρου σε ηλεκτρικό, το οποίο μπορεί να ελεγχθεί από τον έξυπνο κόμβο. Έχει κινητήρα DC των 300mA στα 24V και για τη λειτουργία του προς κάθε κατεύθυνση απαιτείται τάση 24 Volt συγκεκριμένης φοράς.

Ηλεκτρικό σκίαστρο

Ελέγχεται από τον έξυπνο κόμβο και πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί ένα AC κινητήρα, ο οποίος ελέγχεται από μια διπλή δυαδική έξοδο, η οποία τροφοδοτείται με 220 V AC.

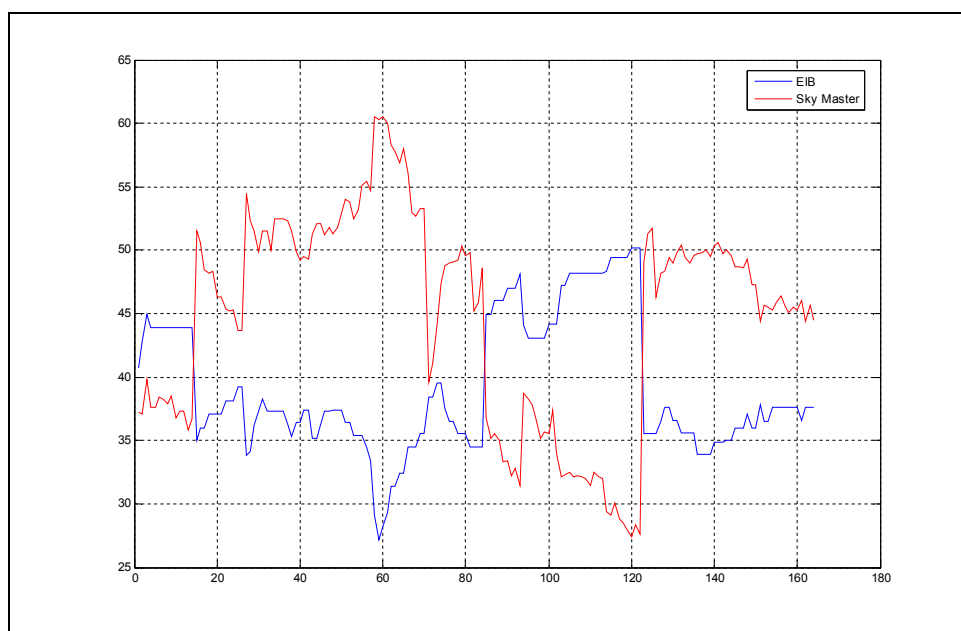
Σχηματική αναπαράσταση και φωτογραφίες της εγκατάστασης υπάρχουν στο παράρτημα.

Κεφάλαιο 5 - Πειραματική διαδικασία

5.1 Βαθμονόμηση υγρασιόμετρου

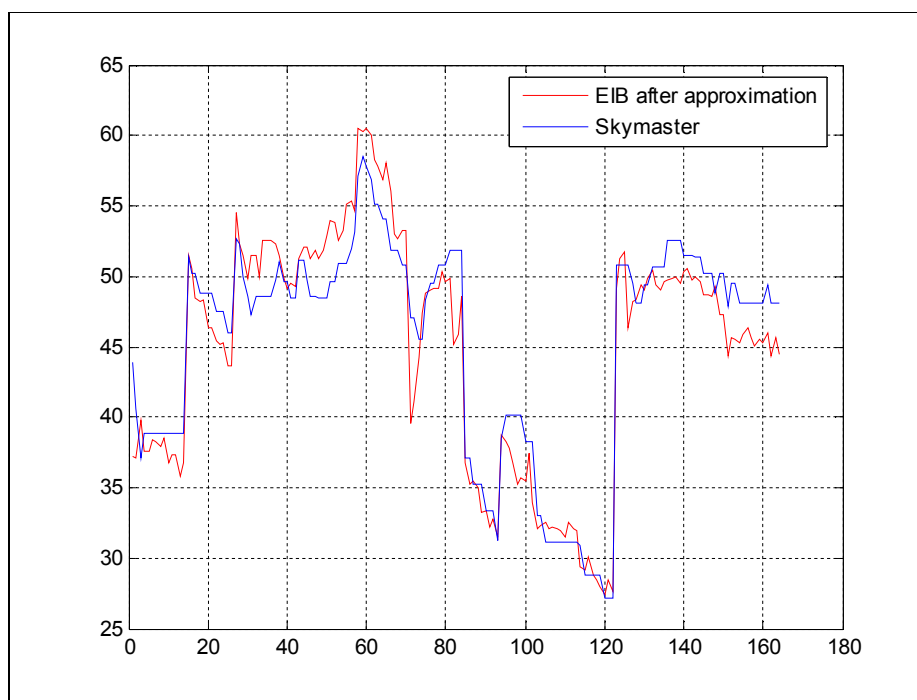
Μία από τις πρώτες εργασίες που έγιναν στο σύστημα, ήταν η βαθμονόμηση των αισθητηρίων. Αρχικά έγινε η σύγκριση των τιμών που έδιναν τα αισθητήρια του συστήματος με αυτές των φορητών οργάνων μετρήσεων. Στα πιο πολλά αισθητήρια οι τιμές που μετρήθηκαν ήταν πολύ κοντά με τα φορητά όργανα και έτσι θεωρήθηκαν σωστά βαθμονομημένα. Στο μόνο αισθητήριο στο οποίο παρατηρήθηκε μία απόκλιση, ήταν το αισθητήριο υγρασίας. Για αυτό ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία για τη βαθμονόμηση του.

Έγινε η καταγραφή των μετρήσεων τόσο στις τιμές που έδινε το αισθητήριο στην οθόνη του υπολογιστή, όσο και στις τιμές που έδινε το φορητό όργανο μετρήσεων Skymaster Weather Meter (SM-28), για ένα αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων του συστήματος. Προδιαγραφές του φορητού οργάνου δίνονται στο παράρτημα. Οι ημέρες στις οποίες έγιναν μετρήσεις ήταν, τόσο με κόσμο (υψηλά ποσοστά υγρασίας), όσο και χωρίς στο εργαστήριο (χαμηλά ποσοστά υγρασίας). Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε είκοσι λεπτά. Δίνονται τα διαγράμματα των μετρήσεων (αισθητηρίου EIB, Skymaster) στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 – Μετρήσεις αισθητηρίου EIB και Skymaster

Με κόκκινο παριστάνονται οι τιμές υγρασίας που μέτρησε το φορητό όργανο Skymaster, ενώ με μπλε αυτές του αισθητηρίου EIB. Αυτό που παρατηρήθηκε, ήταν πως οι μετρήσεις ήταν αντιδιαμετρικές γύρω από ένα κέντρο κοντά στα 42,5%. Δηλαδή, όταν το αισθητήριο EIB μέτραγε 27,2% υγρασία, το φορητό όργανο μέτραγε 60,3%. Η πραγματική τιμή υγρασίας που εισηγήθηκε σαν είσοδος στον ελεγκτή, θεωρήθηκε ότι ήταν η τιμή που μετρά το φορητό όργανο Skymaster. Για το λόγο αυτό, έγινε η προσέγγιση της καμπύλης μετρήσεων του φορητού οργάνου, με μία εξίσωση δευτέρου βαθμού χρησιμοποιώντας το εργαλείο Matlab. Αυτή είναι η : $y = -0.02931x^2 + 0.9067x + 55.5$. Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση, οι τιμές που μετρούνται με το αισθητήριο EIB προσεγγίζονται σε αυτές του οργάνου, δηλαδή τις πραγματικές. Δίνονται στο σχήμα 5.2 οι μετρήσεις του οργάνου Skymaster (μπλε χρώμα) και οι μετρήσεις του αισθητηρίου, αφού πρώτα έχουν προσεγγιστεί σε αυτές του οργάνου (κόκκινο χρώμα).



Σχήμα 5.2 – Μετρήσεις αισθητηρίου EIB και Skymaster

Δοκιμάστηκαν και άλλες προσεγγίσεις, όπως με εξισώσεις πρώτου και τρίτου βαθμού. Τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά για την εξίσωση πρώτου βαθμού. Για την εξίσωση τρίτου βαθμού τα αποτελέσματα ήταν παραπλήσια με του δεύτερου. Υιοθετήθηκε λοιπόν, η προσέγγιση με την εξίσωση δευτέρου βαθμού, η οποία

χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση, σε Visual Basic, του ελεγκτή για την παραγωγή της τελικής τιμής υγρασίας. Το x στην παραπάνω εξίσωση αντικαταστάθηκε με την μετρούμενη τιμή υγρασίας που έδινε το αισθητήριο EIB.

5.2 PD ελεγκτής ασαφούς λογικής

5.2.1 Γενικά

Ο ελεγκτής PD ασαφούς λογικής [12] που υλοποιήθηκε είναι μία προσαρμογή ενός υπάρχοντος Mamdani ελεγκτή στο σύστημα EIB του εργαστηρίου. Πρόκειται για έναν ελεγκτή, στον οποίο λαμβάνονται υπόψη οι προτιμήσεις των χρηστών (εκπαιδευτικό, ερευνητικό προσωπικό και φοιτητές που στεγάζονται στο κτίριο). Έτσι, ο χρήστης αντιμετωπίζεται ως ένα δυναμικό μέρος της στρατηγικής ελέγχου. Ο ελεγκτής εφαρμόστηκε στο κτίριο του εργαστηρίου χωρίς τροποποιήσεις, εφόσον δε λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά και τα στοιχεία του κτιρίου. Λειτουργήσε καλά κάτω από την ύπαρξη διαταραχών και είναι εύκολος στο προγραμματισμό και την εκτέλεση. Έχει απλή αρχιτεκτονική, μικρό αριθμό κανόνων και γρήγορο χρόνο υπολογισμού.

Οι στόχοι του ελεγκτή είναι:

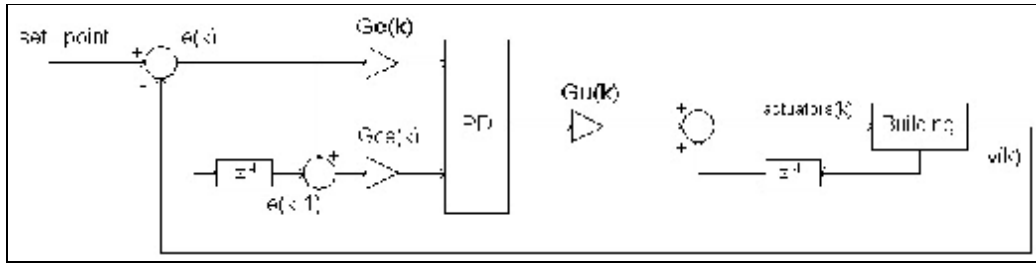
- Ικανοποίηση των προτιμήσεων των χρηστών σε ό,τι αφορά τη θερμική άνεση και την καλή ποιότητα εσωτερικού αέρα (ποσότητα CO_2)
- Βέλτιστη αντίδραση των μεταβλητών ελέγχου, αποφεύγοντας τα overshooting και τις ταλαντώσεις που επιφέρουν περιττή κατανάλωση ενέργειας.

Η εσωτερική θερμική άνεση ελέγχεται από τη συνάρτηση PMV (predicted mean vote). Η τελευταία εξαρτάται από την εσωτερική θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου, την MRT, τα επίπεδα κίνησης στο χώρο και μια παράμετρο ρουχισμού. Όταν η PMV κυμαίνεται από -0,5 έως 0,5, το 90% του πληθυσμού είναι ευχαριστημένο, σύμφωνα με μετρήσεις.

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα εξαρτάται από την ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα. Η συγκέντρωση CO_2 στον αέρα είναι η μεταβλητή που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ποιότητας του. Καλό είναι να κρατείται κάτω από τα 800 ppm.

5.2.2 Είσοδοι/Εξοδοι και συναρτήσεις συμμετοχής

Το διάγραμμα του PD ελεγκτή δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

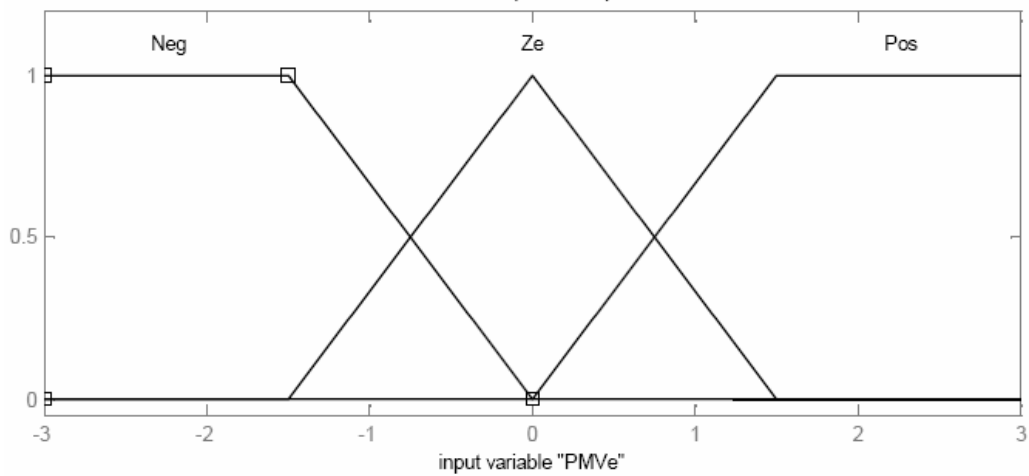


Σχήμα 5.1 - Διάγραμμα PD ελεγκτή ασαφούς λογικής

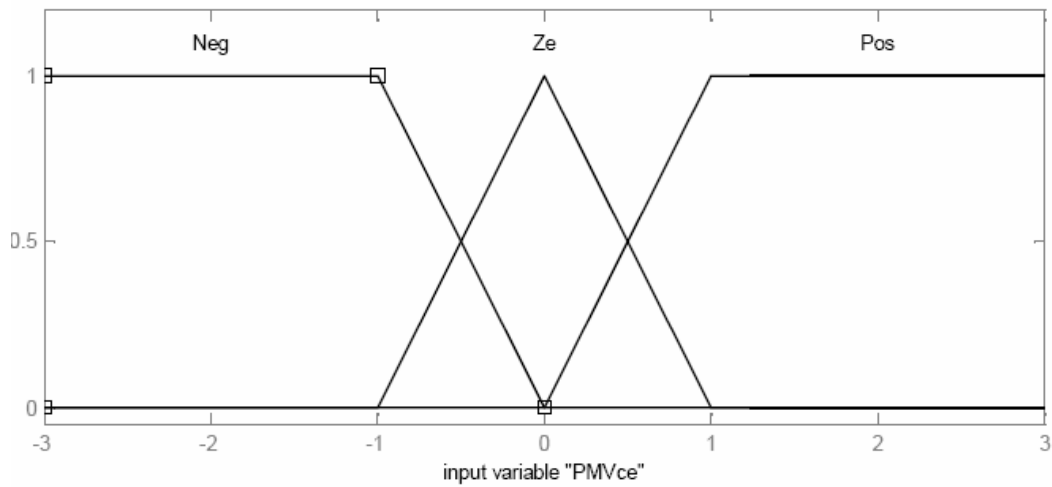
Το ίδιο μοντέλο ελεγκτή εφαρμόζεται για τον έλεγχο τόσο της εσωτερικής θερμικής άνεσης όσο και της ποιότητας του εσωτερικού αέρα. Ο αριθμός των εισόδων είναι πολύ μικρός. Δύο εισοδοι τροφοδοτούν τον PD ελεγκτή, το παρόν λάθος $e(k)$ και η αλλαγή λάθους $ce(k)$. Το λάθος ορίζεται ως η διαφορά του set point, δηλαδή της τιμής στην οποία είναι επιθυμητό να έρθει το ελεγχόμενο μέγεθος, και της παρούσας μετρούμενης τιμής του, $e(k) = \text{set point} - \text{measured value}$. Η διαφορά λάθους ορίζεται ως η διαφορά του παρόντος λάθους και του προηγούμενου, δηλαδή αυτού που υπολογίστηκε στον προηγούμενο κύκλο μέτρησης του συστήματος, $ce(k) = e(k) - e(k-1)$. Η έξοδος του ελεγκτή είναι η αλλαγή στους actuators οι οποίοι, στην περίπτωση της εγκατάστασης, είναι τα κλιματιστικά και ο μηχανισμός του παραθύρου. Οι εισοδοι και οι εξοδοι δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

ΕΙΣΟΔΟΙ	ΕΞΟΔΟΙ
PMVe	A\C
PMVce	
CO ₂ e	Window
CO ₂ ce	
Πίνακας 5.1, Είσοδοι και Έξοδοι Ελεγκτή	

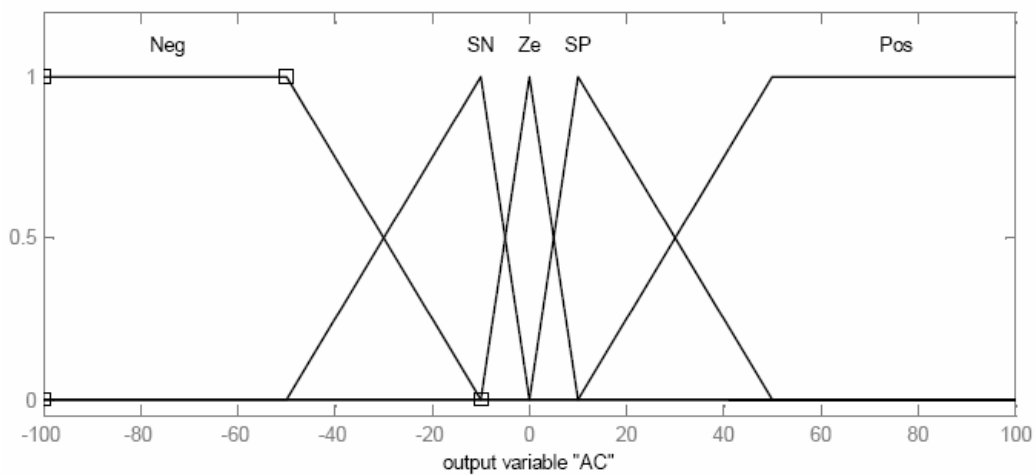
Το σύνολο εισόδων \ εξόδων καλύπτεται με τριγωνικές και τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής (membership functions). Τρεις συναρτήσεις συμμετοχής για τις εισόδους και πέντε για τις εξόδους, και για τα δύο ελεγχόμενα μεγέθη. Στα σχήματα 5.2 έως 5.4 δίνονται οι συναρτήσεις συμμετοχής εισόδων \ εξόδων για τον έλεγχο της εσωτερικής θερμικής άνεσης.



Σχήμα 5.2 - Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου PMVe



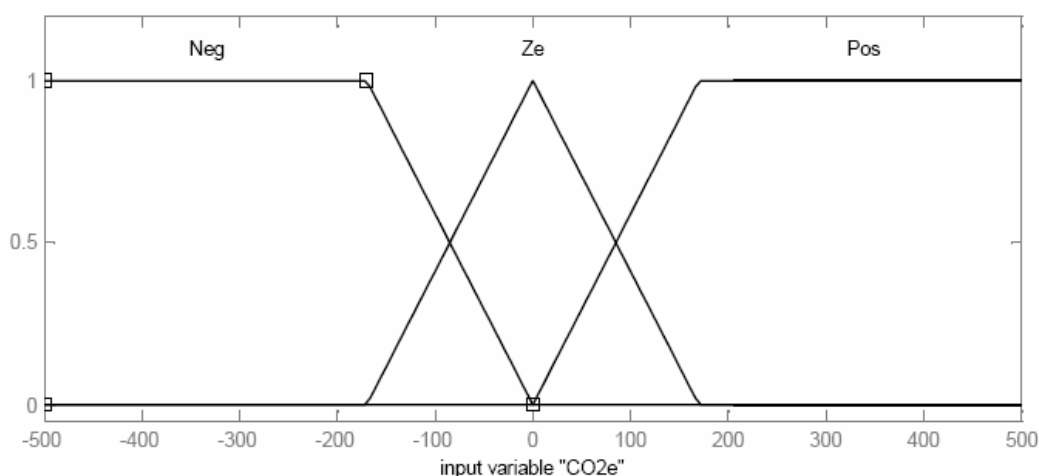
Σχήμα 5.3 - Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου PMVce



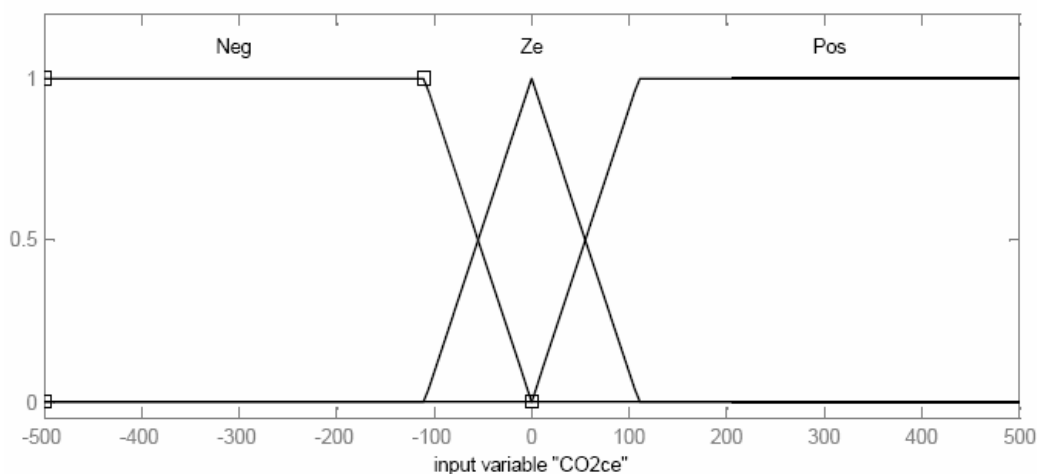
Σχήμα 5.4 - Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου AC

Για την παραγωγή του PMVe, θεωρήθηκε το set point ίσο με 0, εφόσον η PMV κυμαίνεται από -0,5 έως 0,5 και για την ακρίβεια από -0.5 έως -0.7 κατά τη διάρκεια

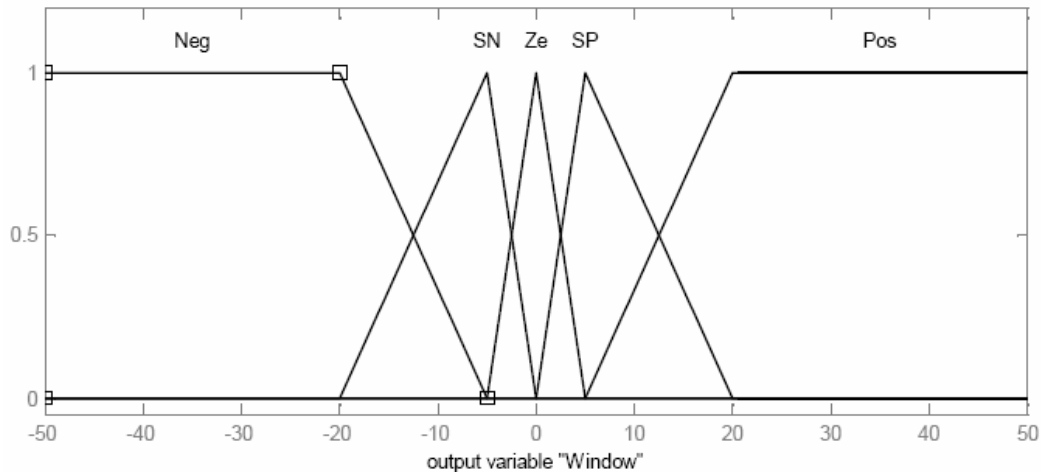
του χειμώνα, και +0.5 έως +0.7 κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, στην οποία πήραν μέρος οι μετρήσεις. Όσον αφορά τις συναρτήσεις συμμετοχής των σχημάτων 5.2, 5.3, negative (NEG) = αρνητική είσοδος, positive (POS) = θετική είσοδος και zero (ZE) = μηδενική είσοδος. Δεδομένων των συναρτήσεων συμμετοχής της εξόδου, negative (NEG) και positive (POS) τιμές δίνουν ένα δυνατό σήμα ελέγχου στους actuators, όταν τα λάθη (είσοδοι του ελεγκτή) είναι μεγάλα, ενώ small negative (SN) και small positive (SP) τιμές δίνουν ένα μικρό σήμα ελέγχου διόρθωσης, όταν τα λάθη (είσοδοι του ελεγκτή) είναι μικρά. Το zero (ZE) δίνει ένα μηδενικό σήμα ελέγχου. Στα σχήματα 5.5 έως 5.7, δίνονται οι συναρτήσεις συμμετοχής εισόδων \ εξόδων για τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα.



Σχήμα 5.5 - Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου CO_2e



Σχήμα 5.6 - Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου CO_2ce



Σχήμα 5.7 - Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου Window

Για την παραγωγή του CO₂ e, θεωρήθηκε το set point ίσο με 400 ppm, όταν η τιμή 386 ppm αντιστοιχεί στην φυσιολογική του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Παρομοίως και εδώ, negative (NEG) = αρνητική είσοδος, positive (POS) = θετική είσοδος και zero (ZE) = μηδενική είσοδος. Δεδομένων των συναρτήσεων συμμετοχής της εξόδου, negative (NEG) και positive (POS) τιμές δίνουν ένα δυνατό σήμα ελέγχου στον actuator, όταν τα λάθη (είσοδοι του ελεγκτή) είναι μεγάλα, ενώ small negative (SN) και small positive (SP) τιμές δίνουν ένα μικρό σήμα ελέγχου διόρθωσης, όταν τα λάθη (είσοδοι του ελεγκτή) είναι μικρά. Το zero (ZE) δίνει ένα μηδενικό σήμα ελέγχου.

5.2.3 Κανόνες ελέγχου

Οι κανόνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι σχεδιασμένοι ώστε να αποφεύγονται οι υπερψώσεις και δίνονται στον πίνακα 5.2 και πίνακα 5.3, για τον έλεγχο της εσωτερικής θερμικής άνεσης και της ποιότητας του αέρα αντίστοιχα.

PMVe	PMVce		
	NEG	ZE	POS
NEG	AC → NEG	AC → NEG	AC → SN
ZE	AC → SN	AC → ZE	AC → SP
POS	AC → SP	AC → POS	AC → POS
Πίνακας 5.2, Ασαφείς κανόνες για την εσωτερική θερμική άνεση			

Είναι εμφανής από τους κανόνες, η απουσία παθητικής ψύξης / θέρμανσης, εφόσον ο μόνος τρόπος για να γίνει ψύξη ή θέρμανση βάσει κανόνων, είναι η ρύθμιση των κλιματιστικών (actuators). Λείπει δηλαδή η ρύθμιση του παραθύρου βάσει της συνάρτησης PMV. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα κλιματιστικά να παραμένουν ανοιχτά για αρκετή ώρα, που συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Αρνητικές τιμές εξόδου υποδηλώνουν ότι πρέπει να γίνει ψύξη ενώ θετικές τιμές ότι πρέπει να γίνει θέρμανση. Σε ό,τι αφορά τους κανόνες (NEG) = αρνητικό, (SN) = λίγο αρνητικό, (ZE) = μηδενικό, (SP) = λίγο θετικό, (POS) = θετικό. Πρέπει επίσης να σημειωθεί, πως η ρύθμιση της θερμικής άνεσης με βάση την συνάρτηση PMV και όχι την θερμοκρασία (έλλειψη set-point για θερμοκρασία), επηρεάζει τις τιμές της τελευταίας στο χώρο.

CO ₂ e	CO ₂ ce		
	NEG	ZE	POS
NEG	Window → POS	Window → POS	Window → SP
ZE	Window → SP	Window → ZE	Window → SN
POS	Window → SN	Window → NEG	Window → NEG
Πίνακας 5.3, Ασαφείς κανόνες για την εσωτερική ποιότητα αέρα			

Το άνοιγμα ή το κλείσιμο του παραθύρου επηρεάζει την εσωτερική θερμοκρασία του χώρου, αλλά αυτό γίνεται με βάση τους κανόνες για τον έλεγχο ποιότητας του αέρα. Άρα όπως προαναφέρθηκε, δεν έχει προβλεφθεί παθητική ψύξη / θέρμανση, αν και αυτή κατά ένα μέρος γίνεται από κανόνες που δεν έχουν σχέση με αυτή. Σχετικά με την ποιότητα αέρα, όταν η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα αυξηθεί, τότε το παράθυρο ανοίγει, ώστε φρέσκος αέρας να μπει στο χώρο του εργαστηρίου και κλείνει όταν η συγκέντρωση του διοξειδίου είναι κοντά στα επιτρεπτά όρια. Αρνητικές τιμές εξόδου σημαίνουν κλείσιμο παραθύρου, ενώ θετικές τιμές άνοιγμα. Σε ό,τι αφορά τους κανόνες (NEG) = μεγάλο κλείσιμο, (SN) = μικρό κλείσιμο, (ZE) = μηδενικό κλείσιμο \ άνοιγμα, (SP) = μικρό άνοιγμα, (POS) = μεγάλο άνοιγμα.

Τέλος, η μέθοδος συσσώρευσης (aggregation) που ακολουθήθηκε ήταν η μέγιστη (max), ενώ η μέθοδος απασαφοποίησης (defuzzyfication) ήταν η centroid of an area.

5.2.4 Ενσωμάτωση αλγορίθμου ελεγκτή

Για την υλοποίηση του PD fuzzy ελεγκτή έγινε η χρήση ενός μοντέλου, του συγκεκριμένου αλγορίθμου, σε γλώσσα ANSI C. Ο κώδικας τοποθετήθηκε σε ένα DLL (δυναμική βιβλιοθήκη), με τη βοήθεια της Visual C ++, και κλήθηκε από ένα πρόγραμμα υλοποιημένο σε Visual Basic. Αυτό ήταν υπεύθυνο για την επίβλεψη και τον έλεγχο του συστήματος EIB. Οι συναρτήσεις οι οποίες έγιναν export από το DLL, είναι οι παρακάτω:

- *Dgpinput*: περνάει τις εισόδους από το κύριο πρόγραμμα στο DLL.
- *Dgpfuzzy_execute*: υπεύθυνη για την επεξεργασία των εισόδων και την παραγωγή των αποτελεσμάτων.
- *Dgpshow*: συνάρτηση διεπικοινωνίας, η οποία δίνει στο χρήστη τις τιμές των actuators.

Ο κώδικας του ασαφούς ελεγκτή κάνει χρήση δύο αρχείων text, τα οποία περιγράφουν τις συναρτήσεις συμμετοχής και τους κανόνες του ελεγκτή. Αυτά είναι τα αρχεία mfdefine.txt και rules.txt. Για παράδειγμα., οι συναρτήσεις συμμετοχής του σχήματος 5.2 για το PMVe περιγράφονται στο αρχείο mfdefine.txt όπως παρακάτω.

input#	1	mf	1	name1 trig	-3	-3	-1.5	0	1
input#	1	mf	2	name2 trig	-1.5	0	0	1.5	1
input#	1	mf	3	name3 trig	0	1.5	3	3	1

Αντίστοιχα, οι κανόνες του πίνακα 5.2, περιγράφονται στο αρχείο rules.txt, όπως παρακάτω.

1	1	0	0	1	0
2	1	0	0	2	0
3	1	0	0	4	0
1	2	0	0	1	0
2	2	0	0	3	0
3	2	0	0	5	0
1	3	0	0	2	0
2	3	0	0	4	0
3	3	0	0	5	0

Είναι προφανές πως αλλάζοντας κατάλληλα τα συγκεκριμένα αρχεία ο χρήστης μπορεί να εισάγει τους δικούς του κανόνες και να δώσει στο σύστημα τις δικιές του προτιμήσεις για τα ελεγχόμενα μεγέθη.

Εκτός από τα δύο αρχεία, στον αλγόριθμο του ελεγκτή δίνονται ως είσοδοι το PMVe, το PMVce, το CO₂e και το CO₂ce. Αυτά κρατούνται σε τέσσερις αντίστοιχες μεταβλητές στο κύριο πρόγραμμα (visual basic) και δίνονται στο DLL

μέσω της συνάρτησης διεπικοινωνίας Dgpinput, η οποία τις παίρνει ως παραμέτρους. Πρέπει να σημειωθεί, πως η τιμή της PMV, η οποία χρειάστηκε για την παραγωγή του PMVe, προκύπτει με χρήση ενός άλλου DLL με συνάρτηση διεπικοινωνίας την Dreturn_pmv. Στη συνέχεια γίνεται η επεξεργασία αυτών και η εξαγωγή του αποτελέσματος για τους actuators μέσω της συνάρτησης Dgpfuzzy_execute. Οι τιμές των εξόδων βρίσκονται σε δύο μεταβλητές, οι οποίες δίνονται στο κύριο πρόγραμμα μέσω των συναρτήσεων Dgprshow1 και Dgprshow2. Εκεί αποθηκεύονται σε δύο άλλες μεταβλητές και ακολουθούνται οι ρουτίνες για την εφαρμογή των τιμών αυτών στους ελεγκτές.

Στη ρουτίνα που ελέγχει το άνοιγμα ή το κλείσιμο του παραθύρου ο actuator δέχεται εντολή για άνοιγμα ή κλείσιμο δευτερολέπτων. Συνεπώς, κλάσματα του χρόνου για το μέγιστο άνοιγμα ή κλείσιμο του παραθύρου δίνουν τη θέση αυτού. Επιλέχθηκε να ελέγχεται η διαφορά της παρούσας τιμής του actuator με την προηγούμενη πριν δοθεί εντολή σε αυτόν. Αν είναι μεγαλύτερη ή ίση από 10 μονάδες στην εκατοστιαία (0-100%) κλίμακα, το παράθυρο κλείνει. Αν είναι μικρότερη ή ίση από 10 μονάδες (αρνητικό πρόσημο μεταβολής) τότε το παράθυρο ανοίγει. Σε άλλη περίπτωση δίνεται η μηδενική εντολή, δηλαδή να μην κινηθεί. Αυτό έγινε προς αποφυγή καταπόνησης του μηχανισμού του παραθύρου, εφόσον μικρές αλλαγές στην θέση του δεν προκαλούν ουσιαστικές διαφορές στα μετρούμενα μεγέθη (π.χ.: ποσότητα CO₂ στον αέρα)

Στη ρουτίνα για τον έλεγχο των air condition χρησιμοποιήθηκε διαμόρφωση εύρους χρόνου (PWM), της οποίας τον κύκλο εργασίας (duty cycle) καθορίζει ο ελεγκτής.

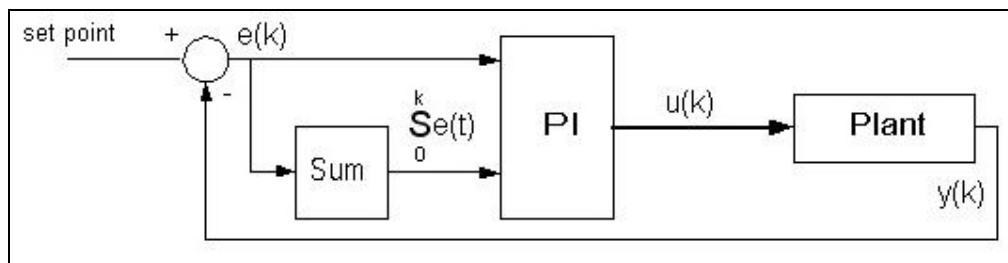
Η διαδικασία συλλογής μετρήσεων, ασαφούς ελέγχου και αποστολής εντολών στους ενεργοποιητές γινόταν κάθε 20 λεπτά. Ο χρόνος αυτός επιλέχθηκε διότι μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις στις συσκευές, και γιατί επιτρέπει την ομαλή λειτουργία των κλιματιστικών. Για τις παραπάνω περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε ειδικό στοιχείο ελέγχου της Visual Basic, LongTimer, το οποίο είναι χρονοδιακόπτης και μπορεί να πάρει τιμές μέχρι 4 ημέρες. Για τα 20 λεπτά η τιμή του main timer είναι 1200000 msec.

5.3 Κλασικός PI ελεγκτής

5.3.1 Γενικά

Ο PI ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε, εφαρμόστηκε για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του χώρου του εργαστηρίου και έχει τα βασικά χαρακτηριστικά των PI ελεγκτών, όπως δόθηκαν στο κεφάλαιο της θεωρίας. Το διάγραμμα του ελεγκτή δίνεται στο σχήμα 5.8 και η συνάρτηση μεταφοράς του είναι:

$$u(k) = K_c \left[e(k) + \frac{T_o}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) \right]$$



Σχήμα 5.8 – Διάγραμμα PI ελεγκτή

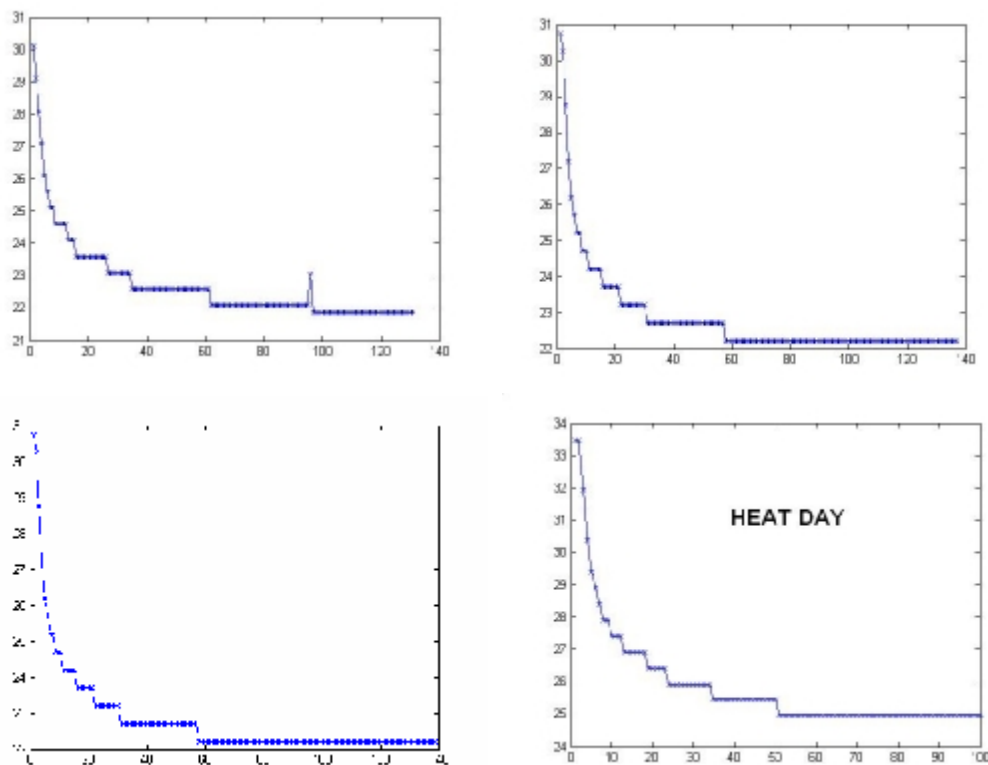
Οι είσοδοι του ελεγκτή είναι δύο, το παρόν λάθος της θερμοκρασίας και το άθροισμα των λαθών της. Το λάθος ορίζεται ως η διαφορά του set point, δηλαδή της τιμής στην οποία είναι επιθυμητό να φτάσει η θερμοκρασία, και της παρούσας μετρούμενης θερμοκρασίας, $e(k) = \text{set point} - \text{measured temp}$. Επιλέχθηκε set point 28 βαθμούς κελσίου, επειδή θεωρήθηκε κατάλληλη θερμοκρασία για την εποχή του καλοκαιριού. Το άθροισμα των λαθών ορίζεται ως το άθροισμα όλων των προηγούμενων συν το τωρινό, από την αρχή της ενεργοποίησης του συστήματος μέχρι τον παρόντα κύκλο. Οι ενεργοποιητές που χρησιμοποιήθηκαν, είναι τα δύο κλιματιστικά στα οποία εφαρμόστηκε η έξοδος του ελεγκτή.

5.3.2 Εύρεση παραμέτρων ελεγκτή (Ziegler-Nichols)

Αναγκαία διαδικασία για την εφαρμογή του ελεγκτή στο σύστημα ήταν η εύρεση των παραμέτρων του K_c και T_i . Για αυτό ακολουθήθηκε η μέθοδος Ziegler-Nichols, όπως περιγραφική στη θεωρία. Σημαντικό ρόλο για την υλοποίηση του ελεγκτή έπαιξε και η κατάλληλη επιλογή του sample time T_0 .

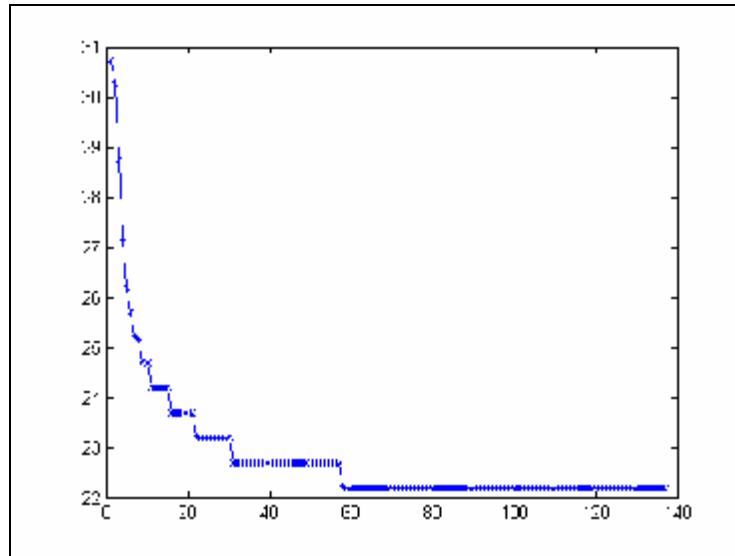
Αρχικά, βγήκε ο ελεγκτής από το σύστημα και στη συνέχεια εφαρμόστηκε μία βηματική είσοδος. Αυτό έγινε βάζοντας τα κλιματιστικά από την απόλυτη ηρεμία, να

δουλέψουν στο μέγιστο για αρκετό διάστημα (κοντά στις 5 ώρες). Παράλληλα, λαμβάνονταν μετρήσεις της θερμοκρασίας ανά 2 λεπτά. Ο χρόνος των 2 λεπτών επιλέχθηκε για την εξασφάλιση υψηλής πυκνότητας μετρήσεων, ώστε η καμπύλη που θα προκύψει να είναι όσο το δυνατόν πιο χαρακτηριστική για τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η διαδικασία για την εξαγωγή της καμπύλης εφαρμόστηκε για αρκετές μέρες, περιλαμβάνοντας και μέρα καύσωνα, για να μπορεί εξαχθεί η συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό που διαπιστώθηκε, ήταν ότι το σύστημα ανταποκρινόταν κατά ανάλογο τρόπο για όλες τις μέρες. Για μέρες με φυσιολογική ζέστη το σύστημα κατάφερε να ελαττώσει την θερμοκρασία από τους 30 με 31 βαθμούς, κοντά στους 22. Σε μέρα καύσωνα από τους 33 με 34, κοντά στους 25. Παρακάτω δίνονται οι καμπύλες θερμοκρασίας κάποιων ημερών συμπεριλαμβανομένης της ημέρας του καύσωνα.



Σχήμα 5.9 – Γραφικές θερμοκρασίας

Εφόσον όλες οι καμπύλες θερμοκρασίας έχουν την ίδια μορφή, επιλέχθηκε η πάνω δεξιά, από το σχήμα 5.9, για την εφαρμογή της μεθόδου Ziegler-Nichols. Αυτή δίνεται και στο σχήμα 5.10 για καλύτερη εποπτεία της.

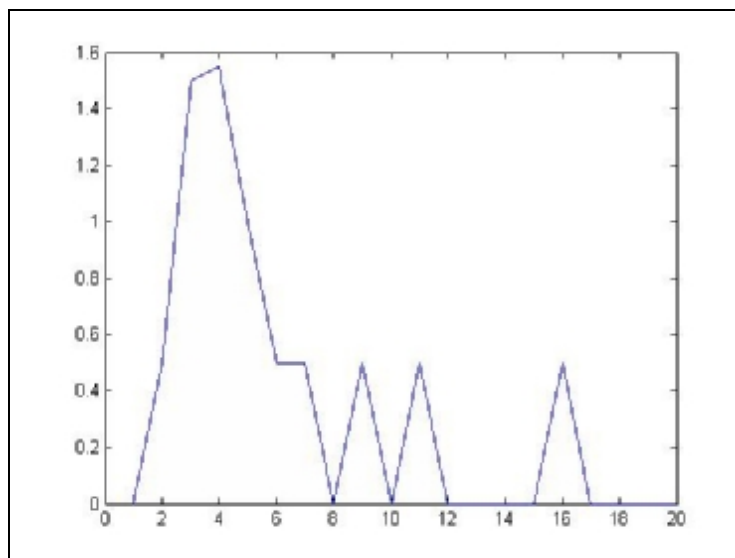


Σχήμα 5.10 – Καμπύλη μέρας στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος

Πρώτα, βρέθηκε το σημείο στο οποίο η παράγωγος είναι μέγιστη (point of inflection), ώστε να χαραχθεί εκεί η εφαπτομένη της καμπύλης. Η εφαπτομένη είναι της μορφής $y = ax + b$, για την οποία πρώτα υπολογίζεται η κλίση της, a , στο σημείο που η παράγωγος είναι μέγιστη και στη συνέχεια, το b εφαρμόζοντας κάποιο σημείο (x, y) στην εξίσωση.

Η κλίση a υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο: $\frac{dy}{dx} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$.

Η παράγωγος για κάθε μετρούμενο σημείο της καμπύλης υπολογίζεται και σχεδιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.11 – Παράγωγος καμπύλης θερμοκρασίας

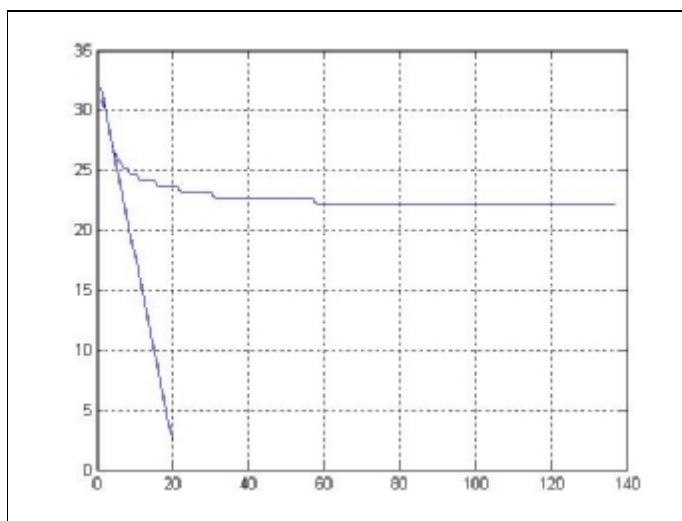
Είναι μέγιστη στην τέταρτη μέτρηση, όταν η θερμοκρασία είναι 27,2 βαθμούς κελσίου. Έτσι, παίρνοντας την 4^η και την 3^η μέτρηση για τα σημεία (x_2, y_2) και (x_1, y_1) αντίστοιχα, η κλίση της εφαπτομένης υπολογίζεται ως εξής:

$$a = \frac{dy}{dx} = \frac{27.2 - 28.75}{4 - 3} = -1.55$$

Το b υπολογίζεται εφαρμόζοντας το σημείο (2,30.25) στην εξίσωση $y = -1.55x + b$.

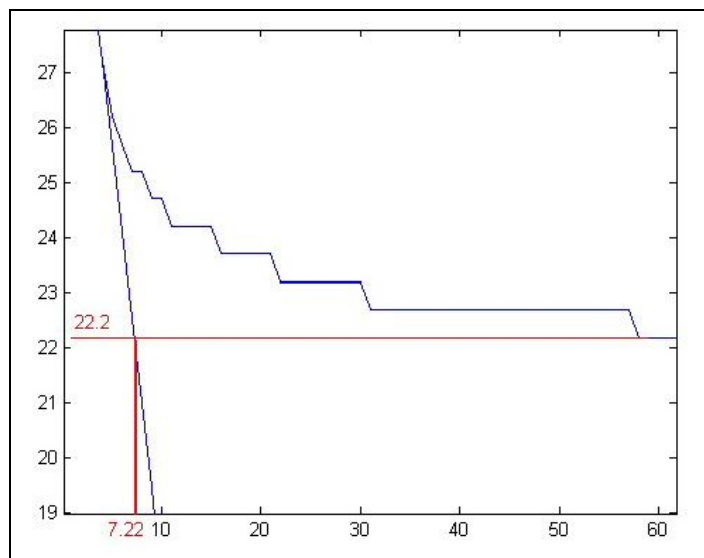
$$b = 30.25 + 1.5 \times 2 = 33.4$$

Η εξίσωση της εφαπτομένης είναι η $y = -1.55x + 33.4$ και σχεδιάζεται μαζί με την καμπύλη στο σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.12 – Καμπύλη με εφαπτομένη στο point of inflection

Για λόγους ευκολίας εύρεσης των παραμέτρων, δίνεται το σχήμα 5.13 εστιάζοντας στην περιοχή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 5.13 – Εστίαση του σχήματος 5.12

Σύμφωνα με τη μέθοδο, πρέπει να υπολογιστούν πρώτα οι χρόνοι T και τ_d και το κέρδος K . Ο χρόνος καθυστέρησης τ_d υπολογίστηκε ότι ήταν 2 λεπτά, ενώ ο χρόνος αντίδρασης 12,44 λεπτά. Το T είναι ο χρόνος από τον χρόνο καθυστέρησης μέχρι τη χρονική στιγμή που η εφαπτομένη τέμνει την ευθεία της θερμοκρασίας, στην οποία το σύστημα καταλήγει, δηλαδή τους 22,2 βαθμούς. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 5.13. Το K είναι η διαφορά της τελικής θερμοκρασίας που φτάνει το σύστημα, από την αρχική που είχε ο χώρος πριν τη βηματική είσοδο. Είναι:

$$K = 30,75 - 22,2 = 8,55.$$

Σύμφωνα με τους κανόνες εξαγωγής των παραμέτρων που δόθηκαν στην θεωρία προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

	K_c	T_i	T_d
P	0.7275		
PI	0.6547	6.6666667	
PID	0.8729	4	1
Πίνακας 5.4, Παράμετροι ελεγκτών			

5.3.3 Επιλογή sample time T_o και τελική μορφή ελεγκτή

Σύμφωνα με τις παραμέτρους που προέκυψαν για το PI και τη συνάρτηση μεταφοράς ο ελεγκτής είναι ο παρακάτω:

$$u(k) = 0,6547 [e(k) + \frac{T_o}{6.6666667} \sum_{i=0}^{k-1} e(i)]$$

Αρκετά σημαντική διαδικασία είναι η επιλογή του T_o , εφόσον παίζει κύριο ρόλο στη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή και πιο συγκεκριμένα, στο κέρδος του I μέρους ($\frac{T_o}{6.6666667}$). Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το sample time του προηγούμενου ελεγκτή ασαφούς λογικής, δηλαδή τα 20 λεπτά. Αυτό που διαπιστώθηκε μετά από μία πειραματική διαδικασία, ήταν ότι τα 20 λεπτά είναι πολύ μεγάλος χρόνος δειγματοληψίας. Το αποτέλεσμα αυτού ήταν πως ο ελεγκτής μετά από ένα μικρό αριθμό κύκλων λειτουργίας έδινε έξοδο, πάντα 100% στα κλιματιστικά. Αυτό εξηγείται με το ότι, το κέρδος του I μέρους είναι αρκετά μεγάλο ($\frac{20}{6.6666667}$), ώστε

να κυριαρχεί στην εξίσωση του ελεγκτή. Έτσι, δίνεται ένα μεγάλο κέρδος στο άθροισμα των λαθών $\sum_{i=0}^{k-1} e(i)$, το οποίο μεγαλώνει συνέχεια, με αποτέλεσμα μία μεγάλη έξοδος από τον ελεγκτή. Ακόμα και τις στιγμές που η θερμοκρασία πέφτει κάτω από το set point (28°C), το συσσωρευμένο λάθος είναι αρκετά μεγάλο, για να δώσει άλλη έξοδο πέραν του 100%.

Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη μείωση του sample time στα 8 λεπτά. Η συνάρτηση μεταφοράς για τον PI conventional ελεγκτή καταλήγει να είναι:

$$u(k) = 0,6547 [e(k) + \frac{8}{6.6666667} \sum_{i=0}^{k-1} e(i)]$$

5.3.4 Ενσωμάτωση αλγορίθμου ελεγκτή

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου σε προγραμματιστικό επίπεδο, έγιναν κάποιες αλλαγές στο υπάρχον κύριο πρόγραμμα (Visual Basic). Αρχικά, οριστήκαν μεταβλητές για να κρατούν το παρόν λάθος και το άθροισμα των λαθών. Στη συνέχεια, ορίστηκε η συνάρτηση PI_output, η οποία υπολογίζει την έξοδο του ελεγκτή. Αυτή παίρνει ως ορίσματα το χρόνο δειγματοληψίας, το T_i , το λάθος και το άθροισμα λαθών των θερμοκρασιών. Αφού υπολογιστεί η έξοδος του ελεγκτή από τη συνάρτηση PI_output, το αποτέλεσμα περνάει από μία ρουτίνα if then στην οποία ελέγχεται αν είναι θετικό. Αν είναι, τότε κανονικοποιείται, ώστε να δοθεί στα κλιματιστικά σε κλίμακα 0-100%. Η κανονικοποίηση έγινε ως εξής: το μέγιστο λάθος που μπορεί να υπάρξει είναι $40^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C} = 12^{\circ}\text{C}$, εφόσον η μέγιστη θερμοκρασία που μετρά το αισθητήριο είναι 40°C . Άρα το 100% της εξόδου του ελεγκτή είναι:

$$u = 0,6547 [12 + \frac{8}{6.6666667} \times 12] = 17.27$$

και για να έρθει το 17,27 σε κλίμακα 0-100% πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 5,78, έτσι ώστε $17,27 \times 5,78 \approx 100\%$. Άρα, η κανονικοποίηση της εξόδου γίνεται πολλαπλασιάζοντας το αποτέλεσμα του ελεγκτή με το 5,78. Σε περίπτωση που η έξοδος του ελεγκτή είναι 100 ή μεγαλύτερη, τότε δε γίνεται κανονικοποίηση και η είσοδος στα κλιματιστικά είναι 100%.

Αν η έξοδος είναι αρνητική, δηλαδή ο ελεγκτής ζητά να γίνει θέρμανση (θερμοκρασία κάτω από το set point), τότε επιλέγεται να δίνεται μηδενική εντολή (0%) στα κλιματιστικά. Αυτό γίνεται, διότι δεν υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής από

ψύξη σε θέρμανση από το σύστημα, και γιατί θεωρήθηκε πως την καλοκαιρινή περίοδο δεν είναι επιθυμητό τα κλιματιστικά να παρέχουν θέρμανση.

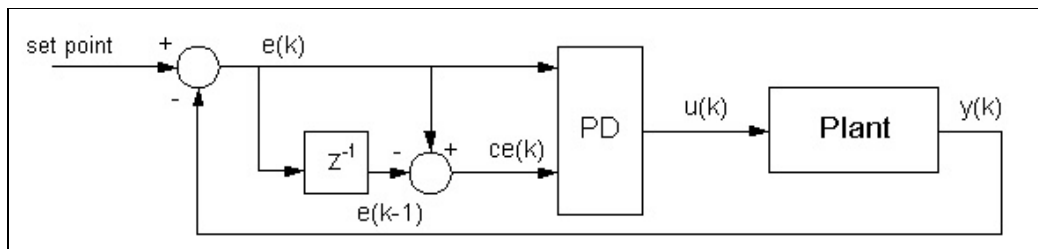
Τέλος, η έξοδος του ελεγκτή (κανονικοποιημένη ή όχι) δίνεται στη ρουτίνα εφαρμογής της, στους ενεργοποιητές. Η ρουτίνα αυτή λειτουργεί όπως και στον PD ασαφούς λογικής. Στην περίπτωση αυτή, ο main timer έχει την τιμή 480000 msec για να μετράει τα 8 λεπτά.

5.4 Κλασικός PD ελεγκτής

5.4.1 Γενικά

Ο PD ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε, εφαρμόστηκε για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του χώρου του εργαστηρίου και έχει τα βασικά χαρακτηριστικά των PD ελεγκτών, όπως δόθηκαν στο κεφάλαιο της θεωρίας. Το διάγραμμα του ελεγκτή δίνεται στο σχήμα 5.14 και η συνάρτηση μεταφοράς του είναι:

$$u(k) = K_c \left[e(k) + \frac{T_d}{T_o} (e(k) - e(k-1)) \right]$$



Σχήμα 5.14 -- Διάγραμμα PD ελεγκτή

Οι είσοδοι του ελεγκτή είναι δύο, το παρόν λάθος της θερμοκρασίας και η διαφορά λάθους $ce(k)$, της θερμοκρασίας. Το λάθος ορίζεται ως η διαφορά του set point, δηλαδή της επιθυμητής θερμοκρασίας στο χώρο, και της παρούσας μετρούμενης θερμοκρασίας, $e(k) = \text{set point} - \text{measured temp}$. Για την εποχή του καλοκαιριού, που εφαρμόστηκε ο ελεγκτής, θεωρούμε πως ιδανική εσωτερική θερμοκρασία είναι οι 28 βαθμοί κελσίου. Η διαφορά λάθους ορίζεται ως η διαφορά του παρόντος και του προηγούμενου, δηλαδή του αυτού που υπολογίστηκε στον προηγούμενο κύκλο μέτρησης του συστήματος, $ce(k) = e(k) - e(k-1)$. Οι ενεργοποιητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα δύο κλιματιστικά, στα οποία εφαρμόστηκε η έξοδος του ελεγκτή.

5.4.2 Εύρεση παραμέτρων ελεγκτή (Cohen Coon)

Για την εύρεση των παραμέτρων του ελεγκτή ακολουθήθηκε η μεθοδολογία Cohen Coon, όπως δόθηκε στην θεωρία του κεφαλαίου 3.

Η καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή του σχήματος 5.10 και οι χρόνοι καθυστέρησης τ_d , αντίδρασης T αλλά και το κέρδος K είναι αυτά που υπολογίστηκαν στην μέθοδο Ziegler-Nichols για τον PI ελεγκτή. Είναι $\tau_d = 2$ λεπτά, $T = 12,44$ λεπτά και $K = 8,55$. Σύμφωνα με τους κανόνες εξαγωγής των παραμέτρων που δόθηκαν στη θεωρία προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

	K_c	T_i	T_d
P	1,3046		
PI	1,402	4,9990	
PD	1,0766		0,505148
PID	1,03603	4,6149	0,70661
Πίνακας 5.5, Παράμετροι ελεγκτών Cohen Coon			

5.4.3 Διαδικασία εξαγωγής τελικής μορφής ελεγκτή

Στην παράγραφο αυτή, αναλύεται, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή της τελικής μορφής του ελεγκτή, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Αυτή περιλαμβάνει τη σωστή επιλογή του sample time T_0 , της συνάρτησης μεταφοράς, και της κανονικοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί στην ενσωμάτωση του αλγορίθμου του ελεγκτή.

Ο ελεγκτής σύμφωνα με τις παραμέτρους που προέκυψαν με την μέθοδο Cohen Coon έχει την παρακάτω μορφή:

$$u(k) = 1,0766 [e(k) + \frac{0,505148}{T_0} (e(k) - e(k-1))]$$

Η συνεισφορά του D μέρους δεν είναι πολύ μεγάλη και αυτό γιατί δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις του λάθους, εφόσον η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται αυθαίρετα. Όσο μάλιστα αυξάνεται ο χρόνος δειγματοληψίας, μικραίνει το κέρδος του D μέρους και η συνεισφορά του στην έξοδο. Παράλληλα, αυξάνεται το κέρδος του P μέρους το οποίο είναι και ο κυρίαρχος παράγοντας στον ελεγκτή. Με την

αύξηση του κέρδους του P επιτυγχάνεται μεγαλύτερη έξοδος στα κλιματιστικά. Σε ό,τι αφορά την κανονικοποίηση, σημαντικό ρόλο παίζουν τα όρια στα οποία γίνεται αυτή, θεωρώντας πάντα ως κατώτερο το set-point και ως ανώτερο τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να υπάρχει στον χώρο. Όσο πιο στενά είναι τα όρια, τόσο πιο μεγάλος είναι ο παράγοντας της κανονικοποίησης και τόσο πιο μεγάλη η έξοδος στα κλιματιστικά. Φυσικά, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ταλαντώσεις λόγω της on-off λειτουργίας των κλιματιστικών. Αυτό εξηγείται ως εξής: αν ο παράγοντας της κανονικοποίησης είναι πολύ μεγάλος, τότε ο ελεγκτής δίνει πολύ μεγάλη έξοδο ακόμα και για μικρή απόκλιση από το set-point. Έτσι, μπορεί η θερμοκρασία να πέσει πολύ κάτω από αυτό με αποτέλεσμα στην επόμενη μέτρηση ο ελεγκτής να δώσει μηδενική έξοδο, εφόσον το λάθος είναι αρνητικό. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, μέχρι την επόμενη μέτρηση, η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί αρκετά, επειδή τα κλιματιστικά δεν λειτουργούν καθόλου (off λειτουργία). Αυτό συμβάλει στην ύπαρξη αρκετών ταλαντώσεις μέχρι η θερμοκρασία να σταθεροποιηθεί σε κάποια περιοχή. Φυσικά εξαρτάται και από το χρόνο δειγματοληψίας, που αν είναι μεγάλος, τότε οι ταλαντώσεις έχουν και μεγαλύτερο πλάτος. Διαπιστώνεται η ύπαρξη ενός tradeoff, στο οποίο πρέπει να βρεθεί μία χρυσή τομή.

Αρχικά, επιλέχθηκε ο χρόνος δειγματοληψίας και η κανονικοποίηση του κλασικού PI ελεγκτή. Ο ελεγκτής είχε την παρακάτω μορφή:

$$u(k) = 1,0766 \left[e(k) + \frac{0,505148}{8} (e(k) - e(k-1)) \right]$$

και η κανονικοποίηση έγινε θεωρώντας πως το μέγιστο λάθος που μπορεί να υπάρξει είναι $40^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C} = 12^{\circ}\text{C}$, εφόσον η μέγιστη θερμοκρασία που μετρά το αισθητήριο είναι 40°C και το set-point 28°C . Άρα, το 100% της εξόδου του ελεγκτή είναι:

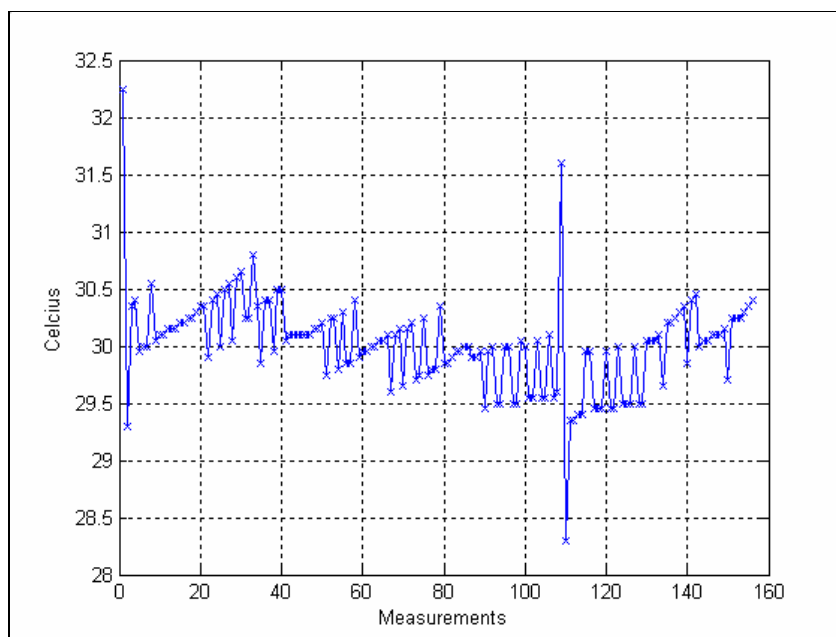
$$u = 1,0766 \left[12 + \frac{0,505148}{8} \times 12 \right] = 13,73.$$

Για να έρθει το 13,73 σε κλίμακα 0-100%, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 7,28, έτσι ώστε $13,73 \times 7,28 \approx 100\%$. Δοκιμάζοντας πειραματικά την κανονικοποίηση αυτή, δηλαδή τον πολλαπλασιασμό του αποτελέσματος του ελεγκτή με το 7,28, διαπιστώθηκε πως η έξοδος στα κλιματιστικά ήταν αρκετά μικρή για να μειωθεί η θερμοκρασία του χώρου. Για τον λόγο αυτό αυξήθηκε ο παράγοντας της κανονικοποίησης από το 7,28 στο 14,56, θεωρώντας πως το μέγιστο σφάλμα που

μπορεί να εμφανιστεί δεν είναι 12°C αλλά 6°C ($34^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C} = 6^{\circ}\text{C}$). Έγινε δηλαδή, στένεμα των ορίων της κανονικοποίησης. Το 100% της εξόδου είναι:

$$u = 1,0766 \left[6 + \frac{0,505148}{8} \times 6 \right] = 6,86$$

και για να έρθει το 6,86 σε κλίμακα 0-100% πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 14,56, έτσι ώστε $6,86 \times 14,56 \approx 100\%$. Μετά τη δοκιμή αυτής της κανονικοποίησης, διαπιστώθηκε, πως ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν αρκετά μικρός για να υπάρχει αποτελεσματική ψύξη του χώρου και η παρουσία ταλαντώσεων ήταν μεγάλη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.15.

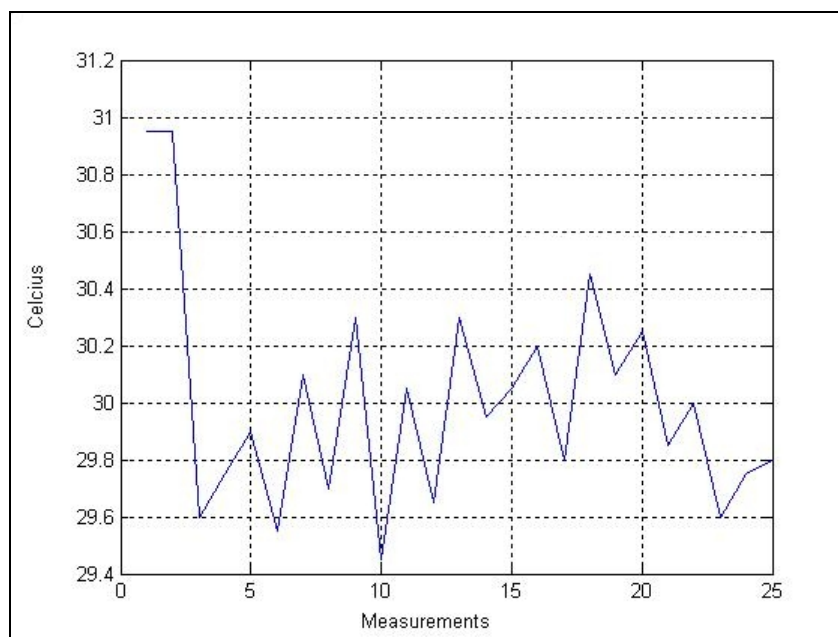


Σχήμα - 5.15, Εσωτερική θερμοκρασία

Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, αποφασίστηκε η αλλαγή αυτού σε 20 λεπτά, μικραίνοντας έτσι το D μέρος και μεγαλώνοντας παράλληλα το P. Η κανονικοποίηση έγινε όπως παρακάτω:

$$\text{Το 100\% της εξόδου είναι: } u = 1,0766 \left[6 + \frac{0,505148}{20} \times 6 \right] = 6,62$$

και για να έρθει το 6,62 σε κλίμακα 0-100%, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 15,10, ώστε $15,10 \times 6,62 \approx 100\%$. Μετά από αυτή την εφαρμογή, διαπιστώθηκε, πως ο ελεγκτής δούλεψε καλύτερα, αλλά ποτέ η θερμοκρασία δεν έφτασε το set-point των 28°C . Αυτό έγινε γιατί η ψύξη δεν ήταν αρκετή. Η θερμοκρασία μειώθηκε κοντά στους $29,4^{\circ}\text{C}$ και κυμαινόταν σε μία περιοχή από $29,4 - 30,4^{\circ}\text{C}$ κάτι που φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.

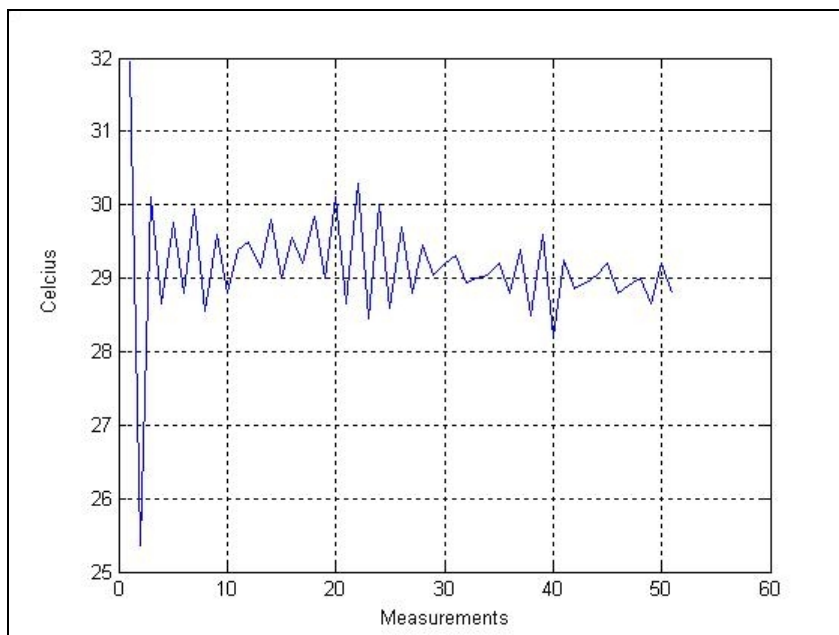


Σχήμα - 5.16, Εσωτερική θερμοκρασία

Ακολούθησε μία διαφορετική κανονικοποίηση θεωρώντας πως το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να εμφανιστεί είναι 4°C ($32^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C} = 4^{\circ}\text{C}$), δίνοντας έτσι έναν παράγοντα κανονικοποίησης ίσο με 22,65. Αυτό προκύπτει όπως παρακάτω:

$$\text{Το } 100\% \text{ της εξόδου είναι: } u = 1,0766 \left[4 + \frac{0,505148}{20} \times 4 \right] = 4,41.$$

Για να έρθει το 4,41 σε κλίμακα 0-100%, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 22,65, έτσι ώστε $22,65 \times 4,41 \approx 100\%$. Ύστερα από την δοκιμή αυτής της κανονικοποίησης εξακριβώθηκε πως ο χρόνος των 20 λεπτών ήταν αρκετά μεγάλος, ώστε σε συνδυασμό με την on-off λειτουργία των κλιματιστικών, να μην υπάρχει αρκετή ψύξη μεταξύ των μετρήσεων, και η θερμοκρασία να ανεβαίνει αρκετά στην off λειτουργία. Μάλιστα όταν η μετρούμενη θερμοκρασία ήταν κοντά στο set-point, τότε η έξοδος του ελεγκτή ήταν μικρή, κοντά στο 16%, χρόνος που δεν ήταν αρκετός για να διατηρήσει τη θερμοκρασία του χώρου. Έτσι, υπήρχαν ταλαντώσεις σε μία περιοχή μακριά από το set-point ($29\text{--}30^{\circ}\text{C}$), κάτι το οποίο φαίνεται και στο σχήμα 5.17.

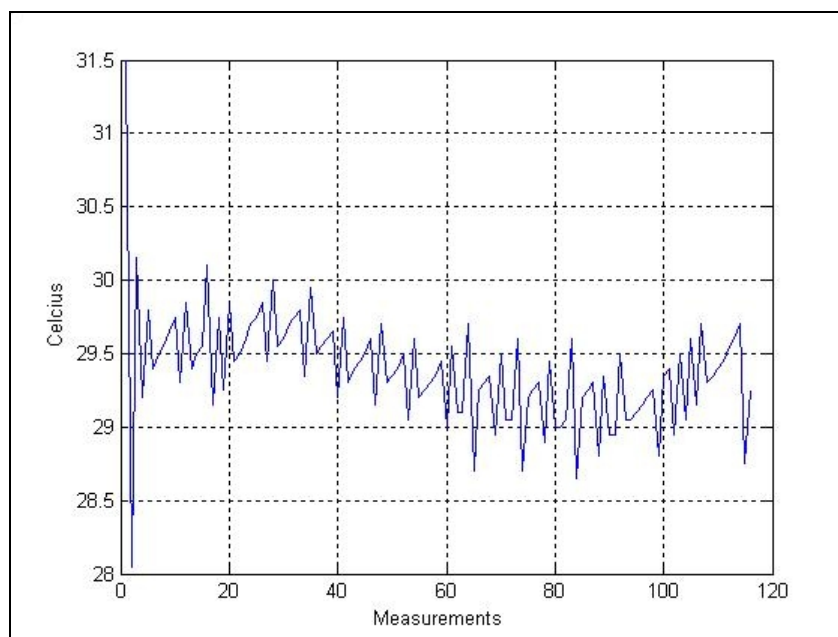


Σχήμα - 5.17, Εσωτερική θερμοκρασία

Στη συνέχεια έγινε δοκιμή με χρόνο δειγματοληψίας τα 12 λεπτά, ώστε να υπάρχει λιγότερος χρόνος για να αυξηθεί η θερμοκρασία κατά την off λειτουργία των κλιματιστικών. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε κανονικοποίηση θεωρώντας πως το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να εμφανιστεί είναι 5°C ($33^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C} = 5^{\circ}\text{C}$), δίνοντας έτσι έναν παράγοντα κανονικοποίησης ίσο με 17,83. Αυτή προκύπτει όπως παρακάτω:

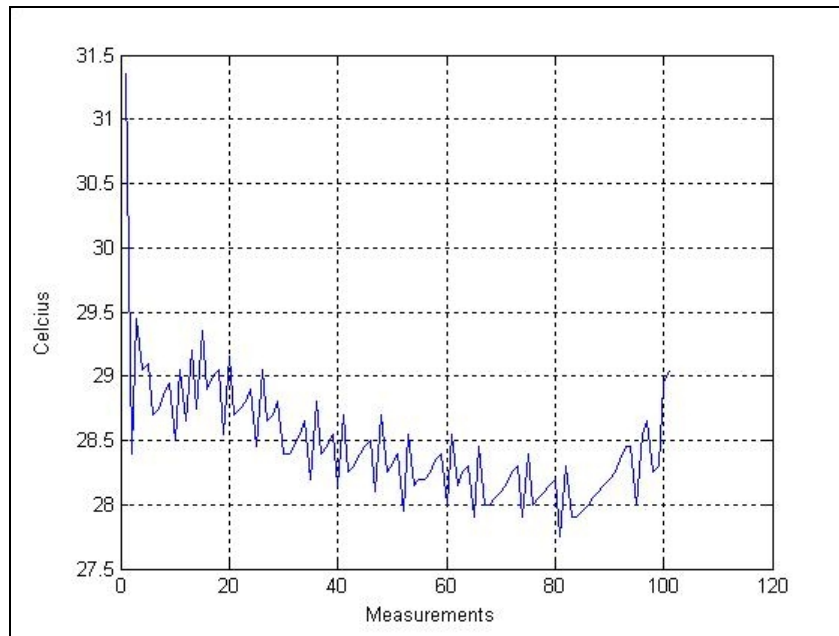
$$\text{Το } 100\% \text{ της εξόδου είναι: } u = 1,0766 \left[5 + \frac{0,505148}{12} \times 5 \right] = 5,6$$

και για να έρθει το 5,6 σε κλίμακα 0-100%, πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 17,83, έτσι ώστε $17,83 \times 5,6 \approx 100\%$. Αφού εφαρμόστηκε ο ελεγκτής, και για το χρόνο των 12 λεπτών, διαπιστώθηκε, πως πάλι η θερμοκρασία κυμαίνονταν σε μια περιοχή γύρω από τους $29,5^{\circ}\text{C}$, χωρίς να φτάσει κάτω από το set-point. Επίσης, υπήρχαν ταλαντώσεις οι οποίες οφείλονται στην on-off λειτουργία των κλιματιστικών. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 5.18.



Σχήμα - 5.18, Εσωτερική θερμοκρασία

Μετά και από την επιλογή του χρόνου δειγματοληψίας στα 12 λεπτά έγινε αλλαγή του set-point σε 26°C , και κανονικοποίηση σε ένα εύρος 26°C έως 33°C με μέγιστο σφάλμα 7°C ($33^{\circ}\text{C} - 26^{\circ}\text{C} = 7^{\circ}\text{C}$). Έτσι, το σύστημα μπορεί να σταθεροποιήσει την θερμοκρασία σε μία περιοχή κοντά στους 28°C , εφόσον θα δίνεται αρκετή ψύξη, ακόμα και όταν αυτή τους πλησιάζει. Πρόκειται δηλαδή, για μία εμπειρική μετατόπιση της καμπύλης, κοντά στους 28°C , που θεωρήθηκαν ιδανικοί για την καλοκαιρινή περίοδο. Οι 26°C δεν πρόκειται να επιτευχθούν, λαμβάνοντας υπόψη την συμπεριφορά, του συστήματος. Εξάλλου πρόκειται για ένα set-point, το οποίο εξυπηρετεί τον σκοπό του ελέγχου, δηλαδή την επίτευξη μιας περιοχής κοντά στους 28°C . Οι ταλαντώσεις αναμένονται και πάλι, λόγω της on-off λειτουργίας των κλιματιστικών, τα οποία δεν παρέχουν συνέχεια ψύξης, ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία σταθερή. Μετά τη δοκιμή αυτών των αλλαγών, παρατηρήθηκε πως το σύστημα δούλεψε αρκετά ικανοποιητικά, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 5.19.



Σχήμα - 5.19, Εσωτερική θερμοκρασία

Η μόνη τελική αλλαγή που έγινε, ήταν στα όρια της κανονικοποίησης, σε 32°C - 26°C με μέγιστο σφάλμα τους 6°C . Αυτό έγινε, ώστε να μεγαλώσει λίγο η εξόδος των κλιματιστικών. Η κανονικοποίηση έχει ως εξής:

Το 100% της εξόδου είναι: $u = 1,0766 \left[6 + \frac{0,505148}{12} \times 6 \right] = 6,73$

και για έρθει το 6,73 σε κλίμακα 0-100% πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το 14,86, έτσι ώστε $14,86 \times 6,73 \approx 100\%$.

Έτσι, η τελική μορφή του ελεγκτή είναι η παρακάτω

$$u(k) = 1,0766 \left[e(k) + \frac{0,505148}{12} (e(k) - e(k-1)) \right]$$

με set-point τους 26 βαθμούς, χρόνο δειγματοληψίας, T_s , τα 12 λεπτά και κανονικοποίηση με έναν παράγοντα 14,86.

5.4.4 Ενσωμάτωση αλγορίθμου ελεγκτή

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου σε προγραμματιστικό επίπεδο, έγιναν κάποιες αλλαγές στο υπάρχον κύριο πρόγραμμα (Visual Basic). Αρχικά, οριστήκαν μεταβλητές για να κρατούν το παρόν λάθος και την διαφορά λάθους. Στη συνέχεια, ορίστηκε η συνάρτηση PD_output, η οποία υπολογίζει την έξοδο του ελεγκτή. Αυτή παίρνει ως ορίσματα το χρόνο δειγματοληψίας, το T_d , το λάθος και τη διαφορά λάθους της θερμοκρασίας. Αφού υπολογιστεί η έξοδος του ελεγκτή από την

συνάρτηση PD_output, το αποτέλεσμα περνάει από μία ρουτίνα if then, στην οποία ελέγχεται αν είναι θετικό. Σε περίπτωση που είναι, κανονικοποιείται ώστε να δοθεί στα κλιματιστικά σε κλίμακα 0-100%, χρησιμοποιώντας την κανονικοποίηση στην οποία καταλήξαμε στην ενότητα 5.4.3. Σε περίπτωση που η έξοδος του ελεγκτή είναι 100 ή μεγαλύτερη, τότε δε γίνεται κανονικοποίηση και η είσοδος στα κλιματιστικά είναι 100%.

Αν η έξοδος είναι αρνητική, δηλαδή ο ελεγκτής ζητά να γίνει θέρμανση (θερμοκρασία κάτω από το set point), τότε επιλέγεται να δίνεται μηδενική εντολή (0%) στα κλιματιστικά. Αυτό γίνεται για τους ίδιους λόγους με τον PI ελεγκτή.

Τέλος, η έξοδος του ελεγκτή (κανονικοποιημένη ή όχι) δίνεται στη ρουτίνα εφαρμογής της στους ενεργοποιητές. Η ρουτίνα αυτή λειτουργεί όπως και στον PI ελεγκτή. Στην περίπτωσή αυτή ο main timer έχει την τιμή 720000 msec για να μετράει τα 12 λεπτά.

Κεφάλαιο 6 - Πειραματικά αποτελέσματα

6.1 Γενικά

Για τον έλεγχο σωστής λειτουργίας των τριών ελεγκτών κρίθηκε σκόπιμη η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές οδήγησαν στη βελτίωση και πιστοποίηση της σωστής λειτουργίας των ελεγκτών. Αυτές λαμβάνονταν από τον έξυπνο κόμβο και καταγράφονταν σε ένα αρχείο κειμένου, διαφορετικό για κάθε ελεγκτή. Στη συνέχεια με τη βοήθεια ενός script, το οποίο υλοποιήθηκε σε Visual C, μετατρέπονταν σε μορφή ικανή για να αξιοποιηθεί με το Microsoft Excel. Τελικά, οι μετρήσεις για όλους τους ελεγκτές κατηγοριοποιήθηκαν σε ένα αρχείο excel και από εκεί ήταν δυνατή η εύκολη επεξεργασία τους, όπως ο σχεδιασμός διαγραμμάτων με τη βοήθεια του εργαλείου Matlab. Όλες οι μετρήσεις πήραν μέρος την καλοκαιρινή περίοδο (Ιούνιος – αρχές Σεπτεμβρίου).

6.2 Αποτελέσματα για τον PD ελεγκτή ασαφούς λογικής

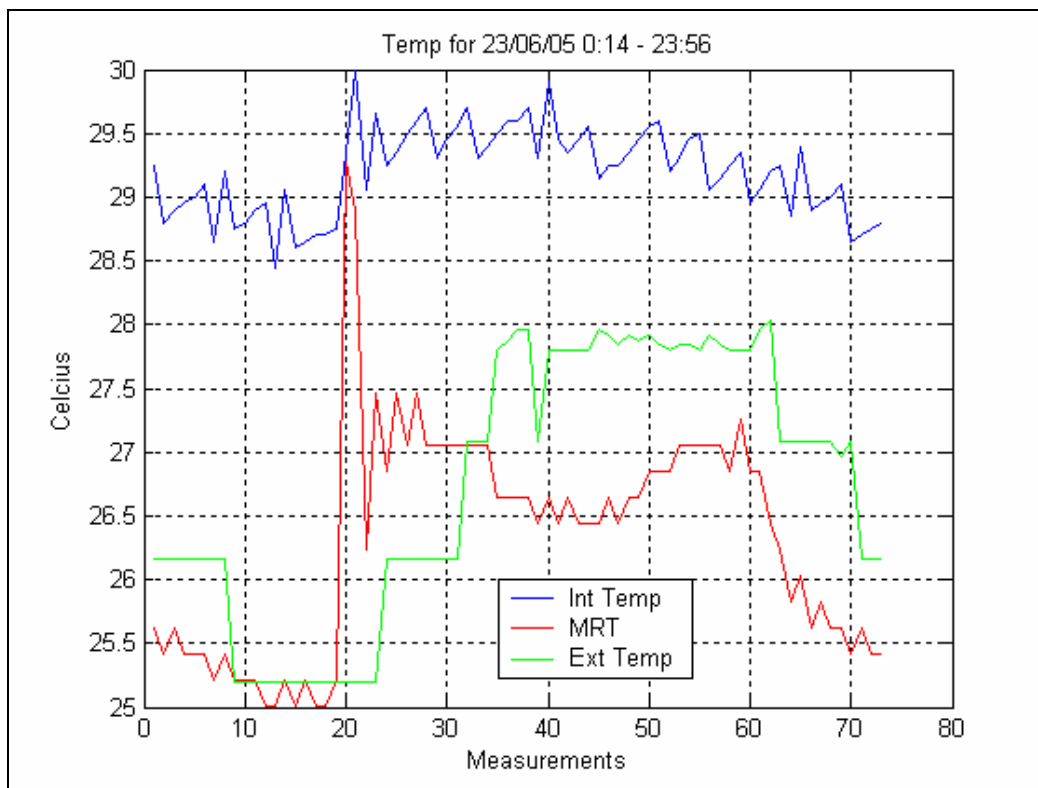
Στον PD ελεγκτή ασαφούς λογικής έγινε έλεγχος, τόσο της θερμικής άνεσης, όσο και της ποιότητας αέρα στο χώρο του εργαστηρίου. Τα μεγέθη τα οποία εξετάστηκαν είναι τα παρακάτω: εσωτερική θερμοκρασία, εξωτερική θερμοκρασία, MRT, συνάρτηση PMV, ο κύκλος των κλιματιστικών, η τιμή του διοξειδίου του άνθρακα και η θέση του παραθύρου. Σε ό,τι αφορά τις μετρήσεις του CO₂, δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες μεταβολές, και αυτό γιατί δεν υπήρχε ικανοποιητικός αριθμός ατόμων στο εργαστήριο, ώστε να αυξηθεί η ποσότητα του στον αέρα.

Οι μετρήσεις έλαβαν μέρος για έξι ημέρες, από 22/06/05 13:33 μέχρι 27/06/05 14:37, και το σύστημα λειτούργησε χωρίς προβλήματα καθ' όλη την διάρκεια των ημερών. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 20 λεπτά. Για παράδειγμα 10 μετρήσεις αντιστοιχούν σε χρόνο 200 λεπτών. Η περίοδος λειτουργίας των κλιματιστικών μπορεί να είναι από 0 έως 20 λεπτά (0-100% κύκλος εργασίας). Ο χρόνος αυτός επιλέχθηκε, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται τα μηχανικά μέρη του συστήματος ψύξης, με το να ανοιγοκλείνουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα κλιματιστικά. Η τεχνολογία των κλιματιστικών δεν επέτρεπε την ηλεκτρονική ρύθμιση των στροφών του κινητήρα και της μεταβολής του παρεχόμενου ψυκτικού ή θερμικού φορτίου, επιβάλλοντας την τελική επιλογή της on

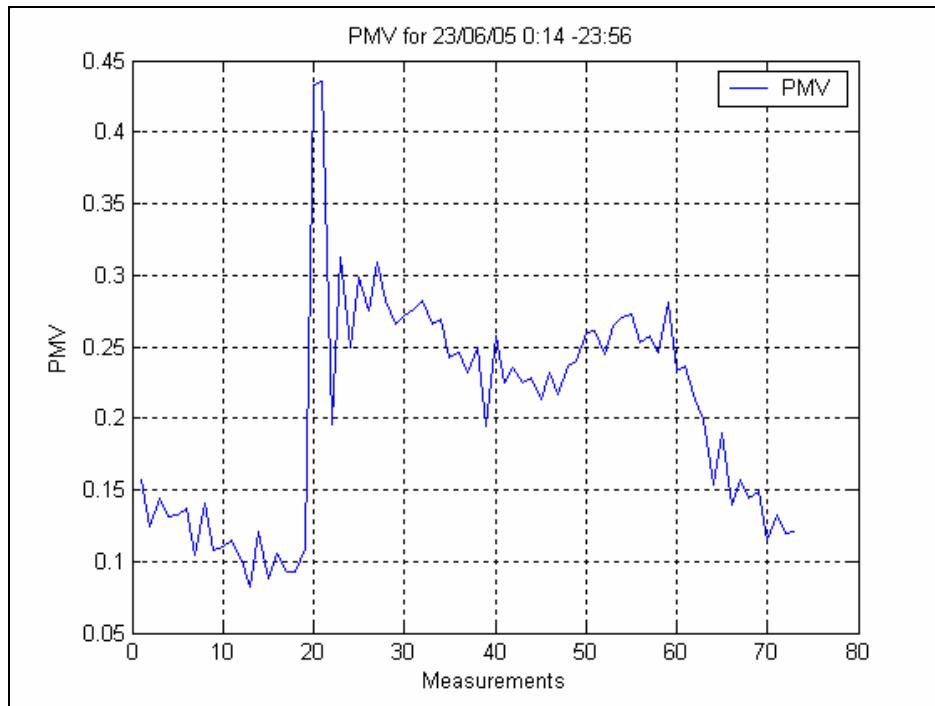
– off λειτουργίας, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Πρέπει να σημειωθεί πως οι μετρήσεις ήταν μετρήσεις περιόδου, δηλαδή κάθε 20 λεπτά. Κατά τη διάρκεια των 20 λεπτών τα μετρούμενα μεγέθη μπορεί να παρουσιάζουν διακυμάνσεις.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σχεδιαγράμματα θερμοκρασιών και συνάρτησης PMV για δύο μέρες του Ιουνίου, καθώς και τα συνολικά διαγράμματα για όλες τις ημέρες. Ανά ημέρα δίνονται οι τιμές των θερμοκρασιών (εσωτερική, εξωτερική, MRT), της συνάρτησης PMV καθώς και του κύκλου λειτουργίας (%) των κλιματιστικών.

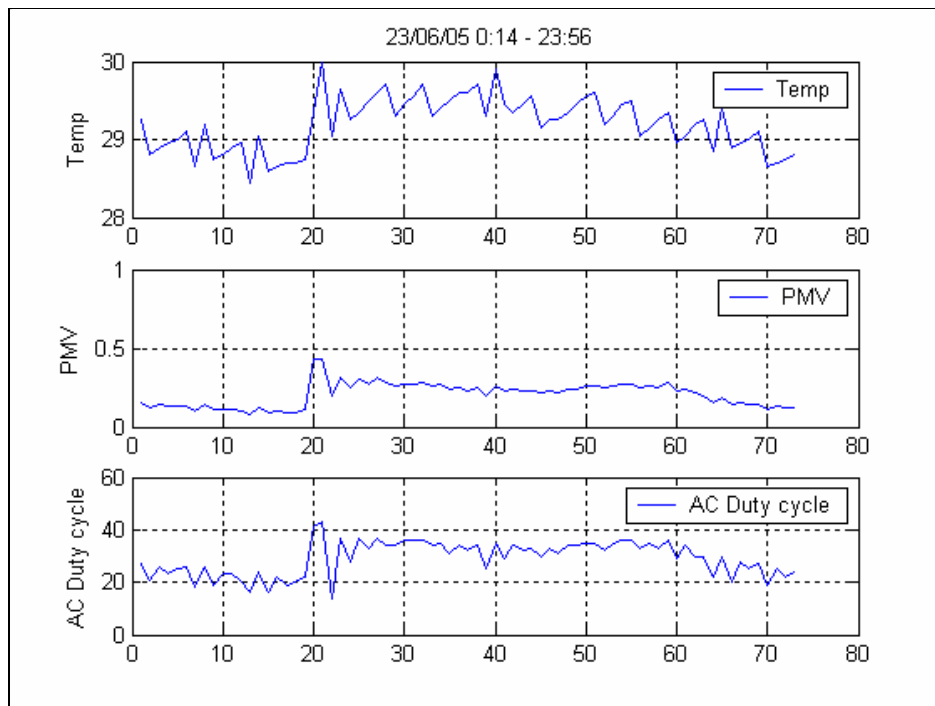
Για τις 23/06/05 0:14 – 23:56 είναι:



Σχήμα 6.1 – Μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, εξωτερικής, MRT για τις 23/06/05 0:14 – 23:56

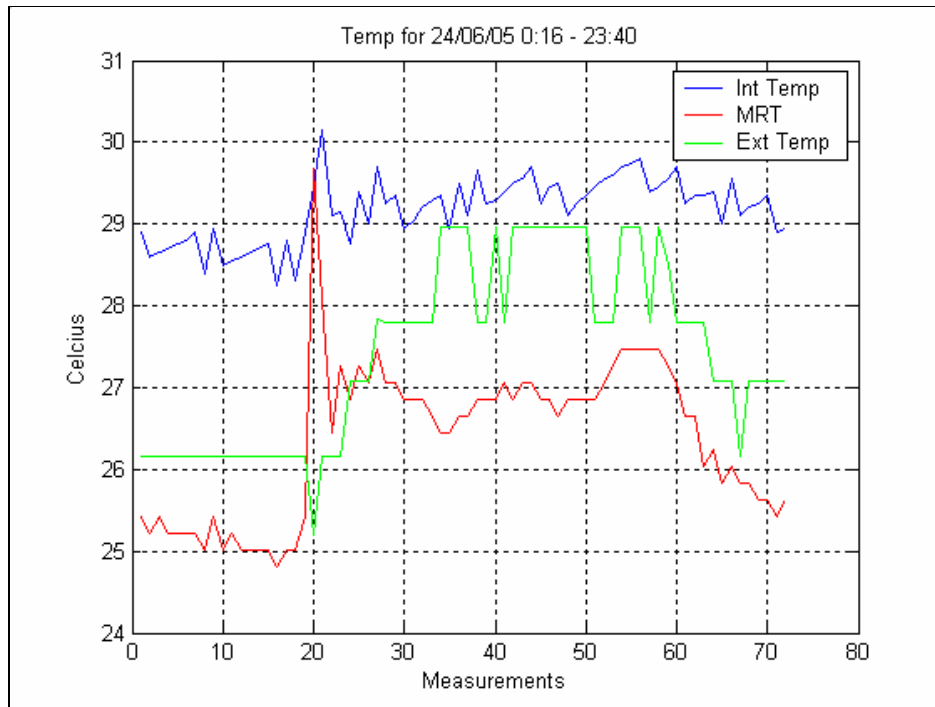


Σχήμα 6.2 – Μετρήσεις συνάρτησης PMV για τις 23/06/05 0:14 – 23:56

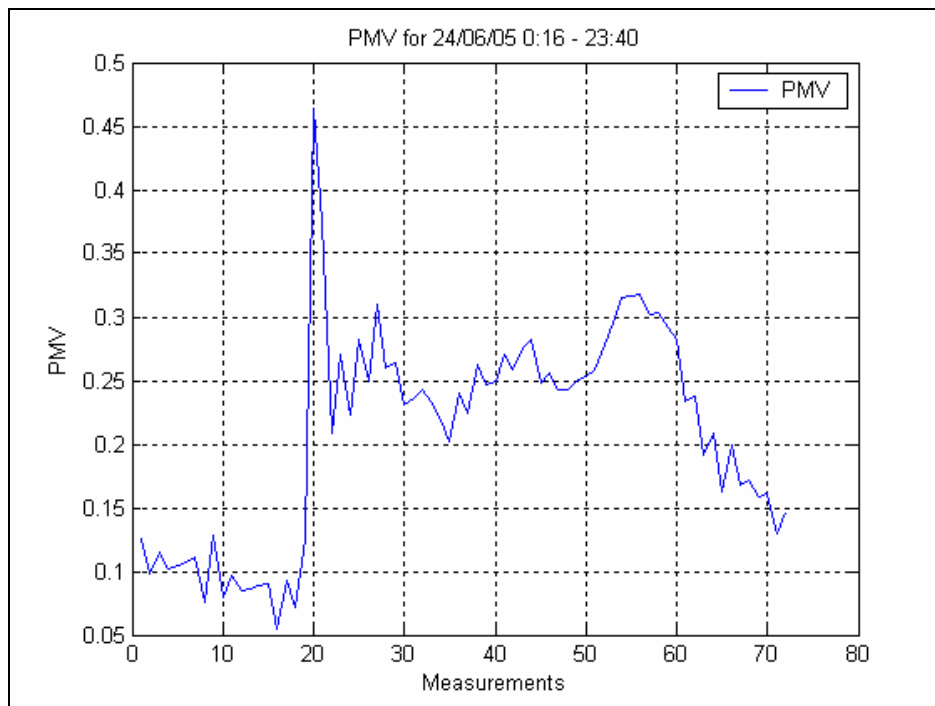


Σχήμα 6.3 - Συγκεντρωτικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, κύκλου λειτουργίας κλιματιστικού και συνάρτησης PMV για τις 23/06/05 0:14 – 23:5

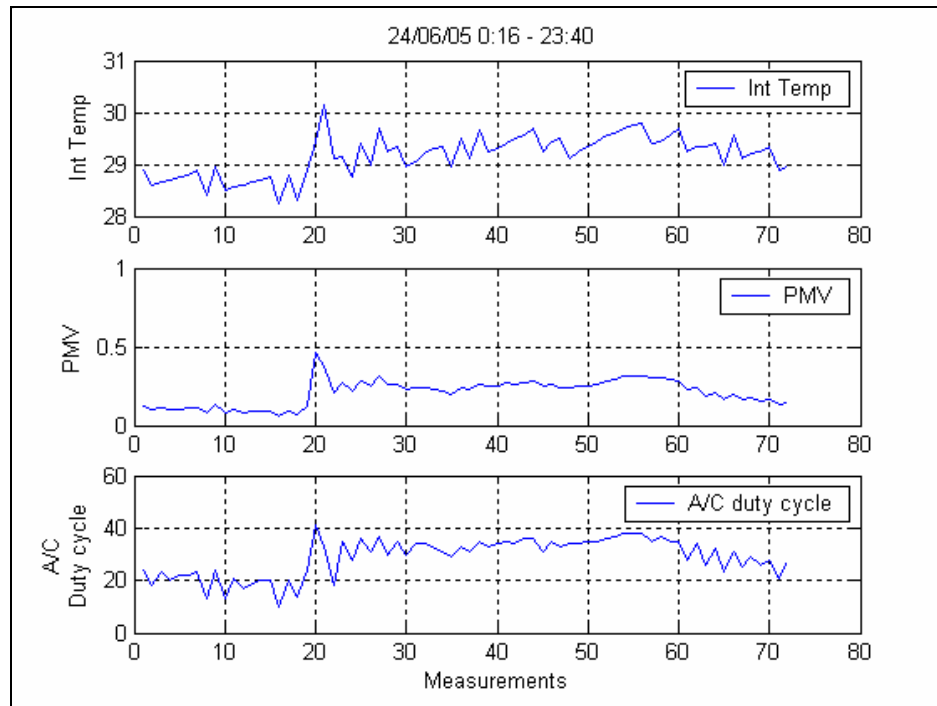
Για τις 24/06/05 0:16 – 23:40 είναι:



Σχήμα 6.4 - Μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, εξωτερικής, MRT για τις 24/06/05 0:16 – 23:40

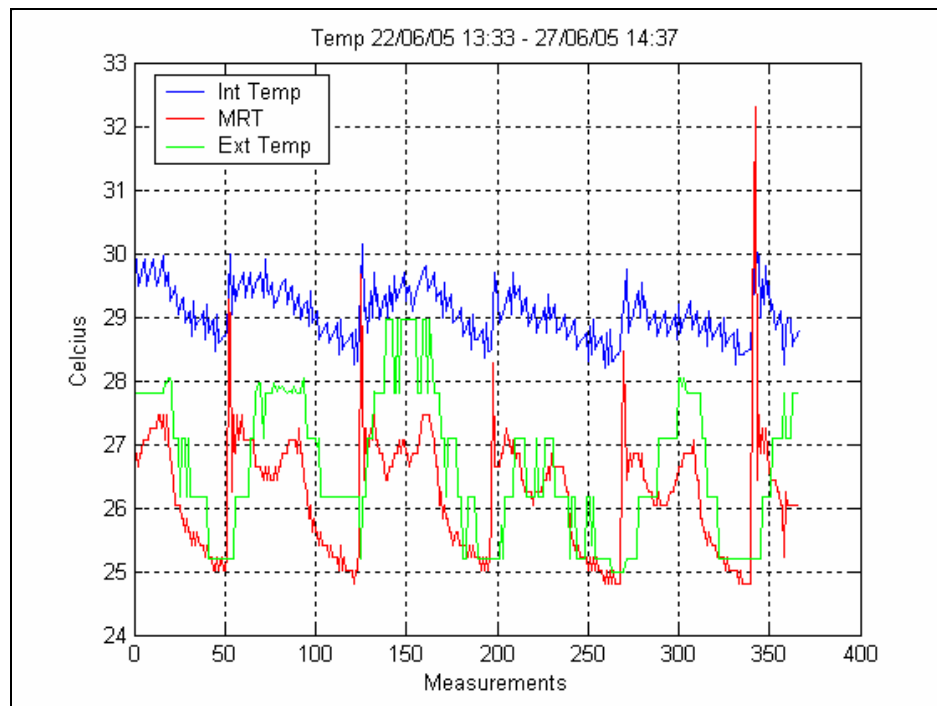


Σχήμα 6.5 – Μετρήσεις συνάρτησης PMV για τις 24/06/05 0:16 – 23:40

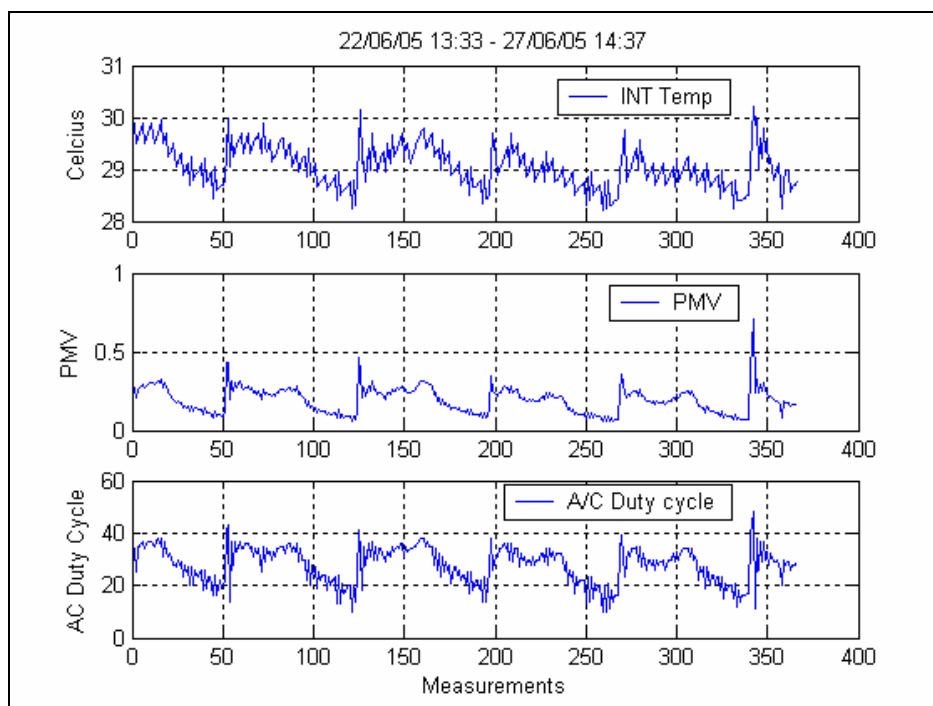


Σχήμα 6.6 - Συγκεντρωτικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, κύκλου λειτουργίας κλιματιστικού και συνάρτησης PMV για τις 24/06/05 0:16 – 23:40

Συνολικές μετρήσεις για τις έξι ημέρες από 22/06/05 13:33 μέχρι 27/06/05 14:37:



Σχήμα 6.7 – Συνολικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, εξωτερικής, MRT για τις έξι ημέρες, από 22/06/05 13:33 μέχρι 27/06/05 14:37

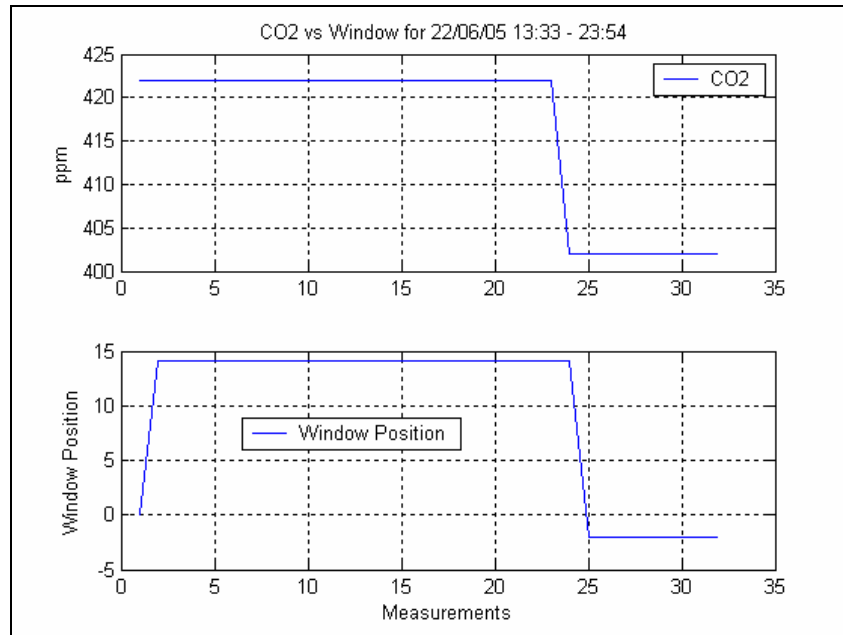


Σχήμα 6.8 - Συγκεντρωτικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, κύκλου λειτουργίας κλιματιστικού και συνάρτησης PMV για τις έξι ημέρες (22/06/05 13:33 - 27/06/05 14:37)

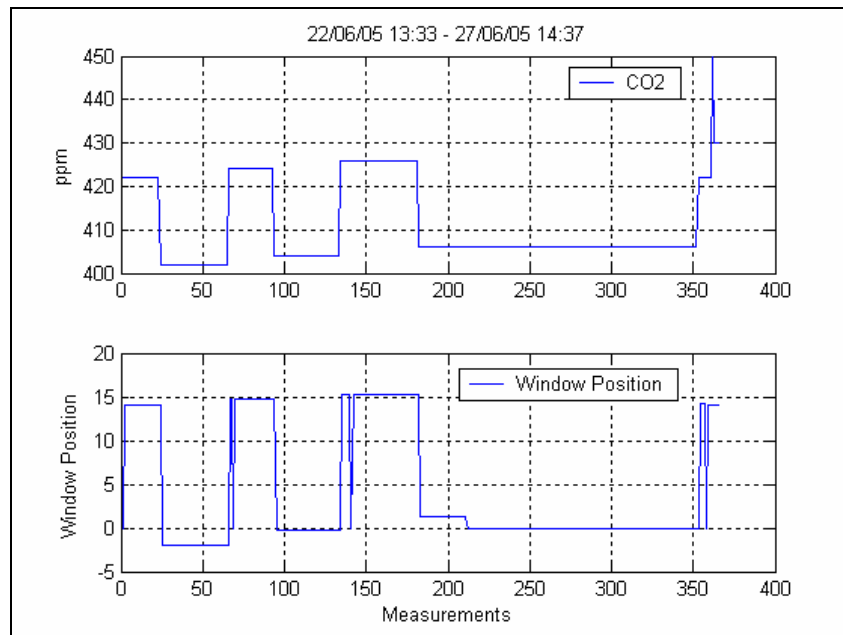
Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται πως η έξοδος της ψύξης (A/C duty cycle) ακολουθεί τις μεταβολές της θερμοκρασίας, της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας (MRT) και της PMV. Ανταποκρίνεται αρκετά γρήγορα στις περιβαλλοντικές μεταβολές και φέρνει το σύστημα σε ένα επιτρεπτό επίπεδο τιμών. Απότομες μεταβολές στη θερμοκρασία, αλλά και στην PMV οφείλονται κυρίως στην ανατολή και δύση του ηλίου, όπου παρατηρείται απότομη αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας. Σε ό,τι αφορά την συνάρτηση PMV, ο μέσος όρος (0,2135) είναι κάτω από το όριο του 0,5 με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να είναι αποδεκτές. Ακόμα και την πιο ζεστή μέρα στην οποία η θερμοκρασία φτάνει τους 30 °C η συνάρτηση PMV διατηρείται κάτω από την τιμή 0,7, που είναι το ανώτερο σημείο άνεσης για το καλοκαίρι. Γενικότερα δεν παρατηρείται κάποια σύγκλιση της θερμοκρασίας ή της συνάρτησης PMV σε μία τιμή και αυτό εξηγείται με το ότι ο αλγόριθμος δεν λαμβάνει υπόψη του πολύ προηγούμενες τιμές, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω στους συμβατικούς ελεγκτές. Πρόκειται δηλαδή, για έναν ελεγκτή του οποίου η έξοδος εξαρτάται από την είσοδο που δέχεται και μόνο. Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τις off περιόδους των κλιματιστικών και η έλλειψη κάποιου set-point για αυτήν, συμβάλουν επίσης στη μη επίτευξη της σύγκλισης, εφόσον η θερμοκρασία δε διατηρείται σε κάποια επίπεδα για κάποιο χρονικό διάστημα. Παράλληλα, συντελούν

και στην ύπαρξη ταλαντώσεων. Τέλος, ο έλεγχος της εξόδου των κλιματιστικών από την συνάρτηση PMV, οδηγεί και αυτός στη μη σύγκλιση της θερμοκρασίας σε κάποια τιμή και στην ύπαρξη ταλαντώσεων.

Στη συνέχεια, δίνονται τα σχεδιαγράμματα των μετρήσεων του CO₂ στο χώρο του εργαστηρίου και της θέσης του παραθύρου για μία μέρα, αλλά και για όλη την διαδικασία μετρήσεων, των έξι ημερών.



Σχήμα 6.9 – Μετρήσεις CO₂ και θέσης παραθύρου για τις 22/06/05 13:33 – 23:54



Σχήμα 6.10 – Συνολικές Μετρήσεις CO₂ και θέσης παραθύρου από τις 22/06/05 13:33 μέχρι τις 27/06/05 14:37

Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.9 και 6.10, το παράθυρο ανοίγει όταν η ποσότητα του διοξειδίου είναι πάνω από το επιτρεπτό και κλείνει, όταν το διοξείδιο φτάσει σε ανεκτά όρια. Ενδιάμεσα, έχει ανοίξει λιγότερο ή περισσότερο, ανάλογα με την μετρούμενη ποσότητα του διοξειδίου. Ακολουθεί όπως φαίνεται, τις μετρήσεις του διοξειδίου και έτσι επιτυγχάνεται η διατήρηση της καλής ποιότητας αέρα στο χώρο (φυσιολογικά επίπεδα CO_2). Δε γίνονται άσκοπες μετακινήσεις, όπως περιγράφηκε και στην πειραματική διαδικασία, και συντελεί στην μείωση της μηχανικής καταπόνησης του ηλεκτρικού μοτέρ κίνησης.

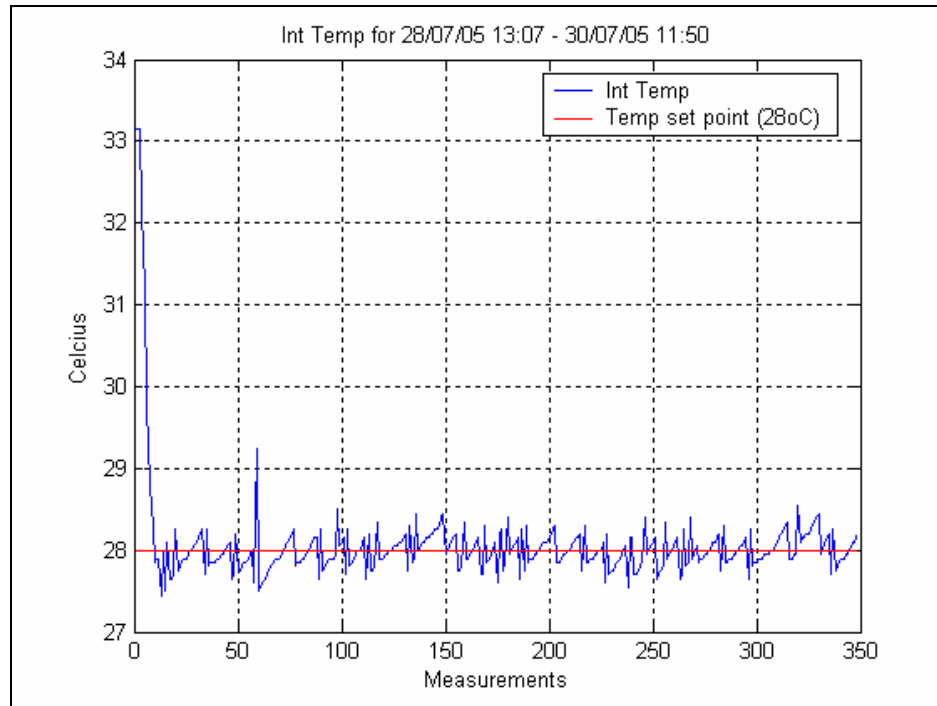
6.3 Αποτελέσματα για τον κλασσικό PI ελεγκτή

Στον κλασσικό PI ελεγκτή έγινε έλεγχος της θερμοκρασίας στο χώρο του εργαστηρίου. Τα μεγέθη τα οποία εξετάστηκαν είναι τα παρακάτω: εσωτερική θερμοκρασία, εξωτερική θερμοκρασία, MRT, συνάρτηση PMV και ο κύκλος των κλιματιστικών.

Οι μετρήσεις διήρκεσαν τρεις ημέρες, από 28/07/05 13:07 μέχρι 30/07/05 11:50, και το σύστημα λειτούργησε χωρίς προβλήματα καθ' όλη την διάρκεια των ημερών. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 8 λεπτά. Για παράδειγμα 10 μετρήσεις αντιστοιχούν σε χρόνο 800 λεπτών. Ο χρόνος αυτός επιλέχτηκε για λόγους που αναφέρθηκαν στο κεφαλαίο 5 πετυχαίνοντας υψηλή πυκνότητα μετρήσεων. Η περίοδος λειτουργίας των κλιματιστικών μπορεί να είναι από 0 έως 8 λεπτά (0-100% κύκλος εργασίας). Πρέπει να σημειωθεί, πως οι μετρήσεις ήταν μετρήσεις περιόδου, δηλαδή κάθε 8 λεπτά. Κατά τη διάρκεια των 8 λεπτών τα μετρούμενα μεγέθη μπορεί να παρουσιάζουν διακυμάνσεις.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σχεδιαγράμματα για τη θερμοκρασία (εσωτερική, εξωτερική, MRT), τη συνάρτηση PMV και του κύκλου λειτουργίας των κλιματιστικών συνολικά για τις τρεις ημέρες που διήρκεσαν οι μετρήσεις.

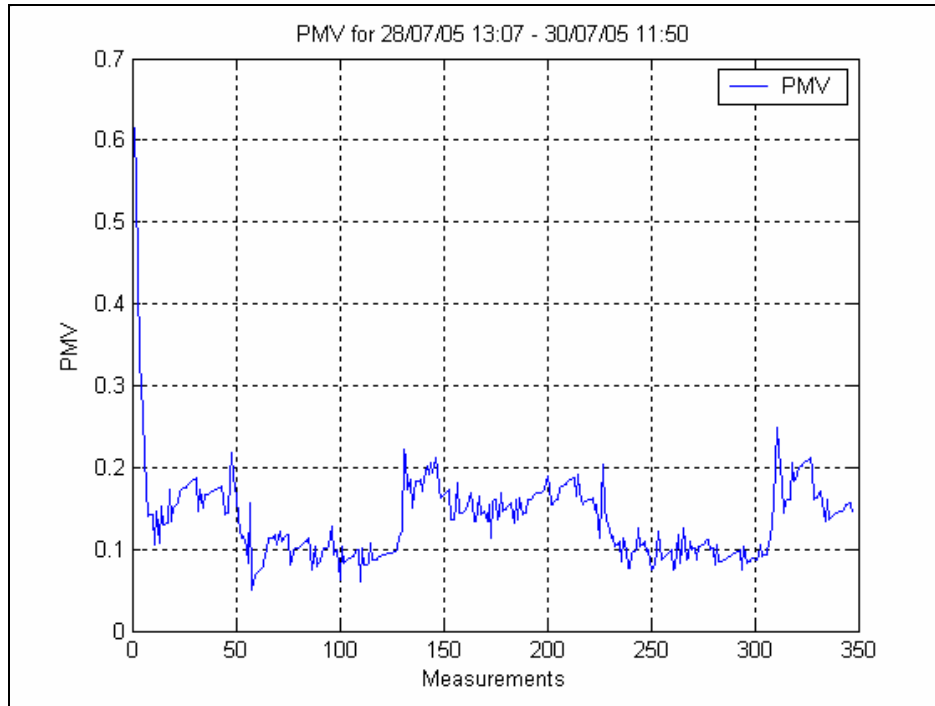
Συνολικές μετρήσεις για τις τρεις ημέρες από 28/07/05 13:07 μέχρι 30/06/05 11:50:



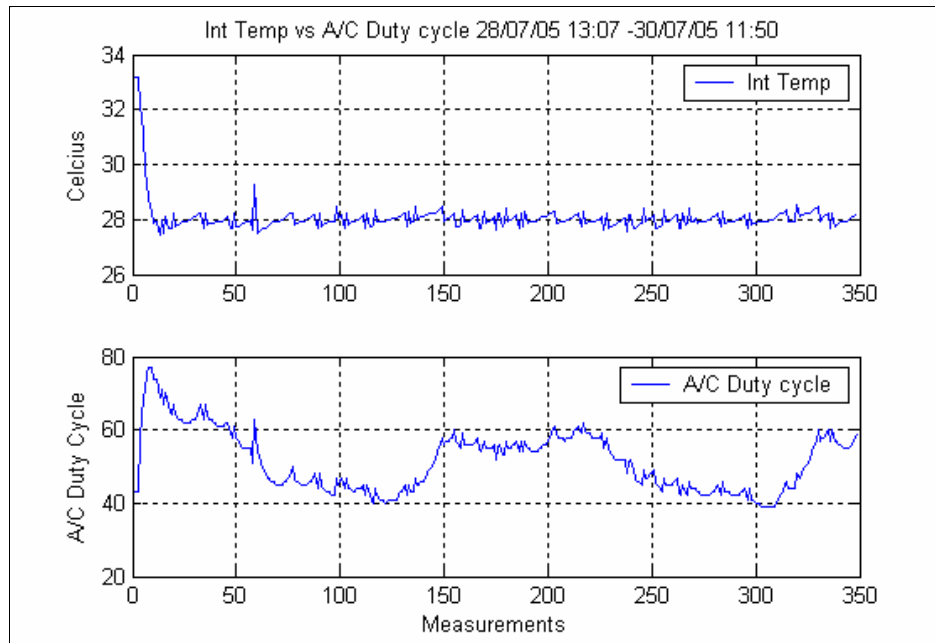
Σχήμα 6.11 – Συνολικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας από 28/07/05 13:07 έως 30/07/05 11:50



Σχήμα 6.12 – Συνολικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, εξωτερικής, MRT από 28/07/05 13:07 έως 30/07/05 11:50



Σχήμα 6.13 - Συνολικές μετρήσεις συνάρτησης PMV από 28/07/05 13:07 έως 30/07/05 11:50



Σχήμα 6.14 - Συγκεντρωτικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας και κύκλου λειτουργίας κλιματιστικού από 28/07/05 13:07 έως 30/07/05 11:50

Από τα παραπάνω σχήματα, φαίνεται πως το σύστημα συγκλίνει στην επιθυμητή περιοχή τιμών θερμοκρασίας, κοντά στους 28°C , σε μικρό χρονικό διάστημα 80 λεπτών (περίπου στην δέκατη μέτρηση). Η έξοδος της ψύξης (A/C duty cycle) ακολουθεί τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της μέσης ακτινοβολούμενης

θερμοκρασίας (MRT) οδηγώντας το σύστημα κοντά στην ισορροπία. Οι μικρές ταλαντώσεις που παρατηρούνται, οφείλονται στην εύρεση παραμέτρων του ελεγκτή με τη μέθοδο Ziegler-Nichols, αλλά και στο ότι πρόκειται για πειραματική διαδικασία.. Ο ελεγκτής ανταποκρίνεται γρήγορα στις περιβαλλοντικές μεταβολές και φέρνει το σύστημα στο επιθυμητό επίπεδο τιμών. Πρέπει να σημειωθεί, πως την περίοδο των μετρήσεων οι θερμοκρασίες ήταν αρκετά υψηλές, κάτι το οποίο φαίνεται και στην καμπύλη της εξωτερικής θερμοκρασίας στο σχήμα 6.12.

Παρατηρώντας την καμπύλη του κύκλου λειτουργίας των κλιματιστικών, διαπιστώνεται πως εξελίχθηκε όπως αναμενόταν. Αρχικά, παίρνει μικρές τιμές, ενώ στην πορεία (εφτά κύκλους) αυξάνεται μέχρι το 77%. Αυτό οφείλεται στη συσσώρευση του συνολικού λάθους ($\sum e(t)$), το οποίο αρχίζει με μηδενική τιμή και αυξάνεται μέχρι η θερμοκρασία να πέσει στο set point. Στη συνέχεια, μειώνεται τόσο το συνολικό λάθος, όσο και ο κύκλος λειτουργίας των κλιματιστικών. Η μικρή ταλάντωση που παρατηρείται, οφείλεται στο ότι το συνολικό λάθος δεν εξαλείφεται ποτέ. Έτσι, ακόμα και μία μικρή απόκλιση πάνω από το set point το μεγαλώνει, μεγαλώνοντας παράλληλα και τον κύκλο λειτουργίας, ενώ μία μικρή κάτω από το set point το μικραίνει, μικραίνοντας παράλληλα και τον κύκλο λειτουργίας. Επίσης, με τη συσσώρευση του λάθους, ακόμα και όταν η θερμοκρασία είναι κοντά στο set-point, δίνεται πάντα μία ικανή έξοδος στα κλιματιστικά, ώστε να παρέχουν ψύξη, που θα τη διατηρήσει στα επιθυμητά επίπεδα (περιοχή γύρω από τους 28 βαθμούς). Η τεχνολογία των κλιματιστικών, συμβάλει και αυτή στην ύπαρξη ταλαντώσεων, εφόσον με τη λειτουργία on – off, για κάποιες χρονικές στιγμές διακόπτεται η παροχή ψύξης, οδηγώντας σε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας. Ο μικρός χρόνος ελέγχου και δειγματοληψίας των 8 λεπτών αποτρέπει τη μεγάλη αύξηση, αλλά καταπονεί περισσότερο τα μηχανικά μέρη των κλιματιστικών.

Η συνάρτηση PMV διατηρήθηκε σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα με το μέσο όρο (0,1160) κάτω από το 0,5, διατηρώντας καλές συνθήκες θερμικής άνεσης για τους χρήστες του χώρου.

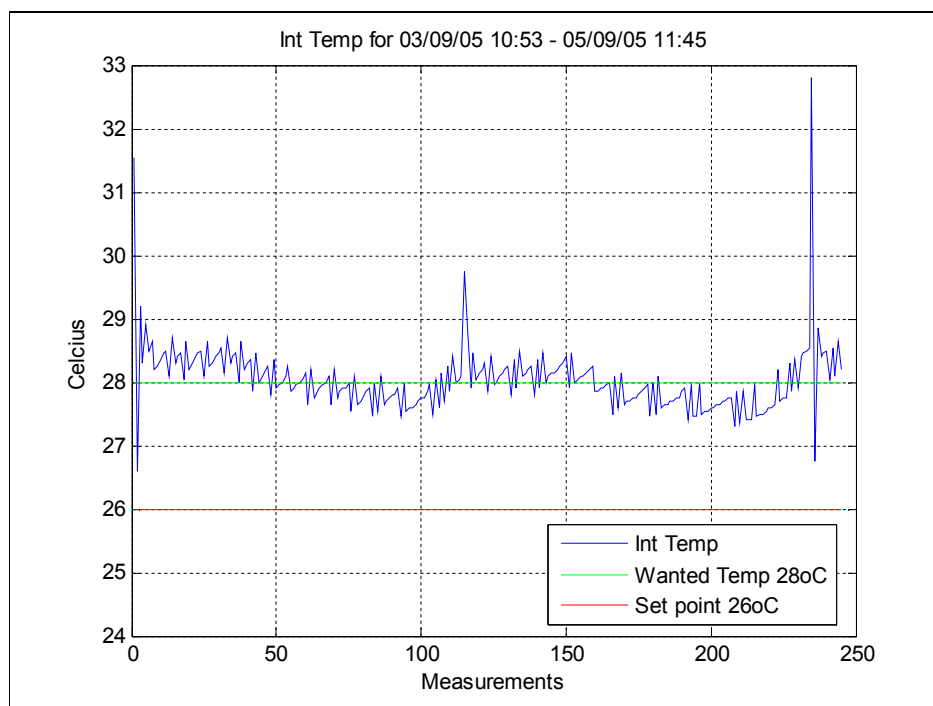
6.4 Αποτελέσματα για τον κλασσικό PD ελεγκτή

Στον κλασσικό PD ελεγκτή έγινε έλεγχος της θερμοκρασίας στο χώρο του εργαστηρίου. Τα μεγέθη τα οποία εξετάστηκαν είναι τα παρακάτω: εσωτερική θερμοκρασία, εξωτερική θερμοκρασία, MRT, συνάρτηση PMV και ο κύκλος των κλιματιστικών.

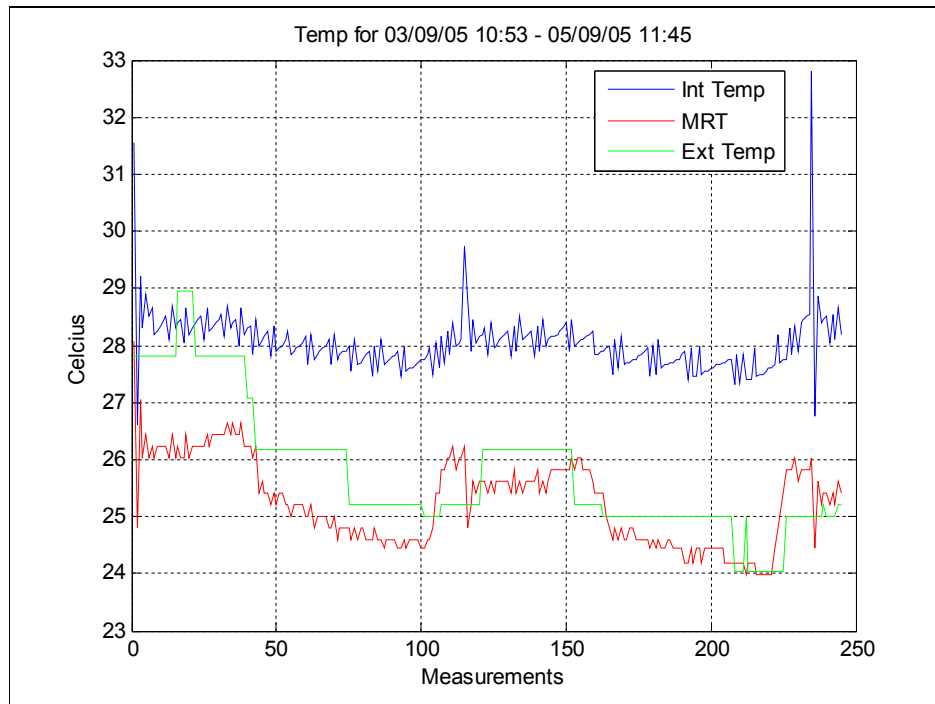
Οι μετρήσεις έγιναν σε χρονικό διάστημα τριών ημερών, από 03/09/05 10:53 μέχρι 05/09/05 11:45, και το σύστημα δούλεψε χωρίς προβλήματα καθ' όλη τη διάρκεια των ημερών. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 12 λεπτά. Για παράδειγμα 10 μετρήσεις αντιστοιχούν σε χρόνο 120 λεπτών. Ο χρόνος αυτός επιλέχθηκε για λόγους που αναφέρθηκαν στο κεφαλαίο 5. Η περίοδος λειτουργίας των κλιματιστικών μπορεί να είναι από 0 έως 12 λεπτά (0-100% κύκλος εργασίας). Πρέπει να σημειωθεί, πως οι μετρήσεις ήταν μετρήσεις περιόδου, δηλαδή κάθε 12 λεπτά. Κατά τη διάρκεια των 12 λεπτών τα μετρούμενα μεγέθη μπορεί να παρουσιάζουν διακυμάνσεις.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σχεδιαγράμματα για την θερμοκρασία (εσωτερική, εξωτερική, MRT), τη συνάρτηση PMV και του κύκλου λειτουργίας των κλιματιστικών συνολικά για τις τρεις ημέρες που διήρκεσαν οι μετρήσεις.

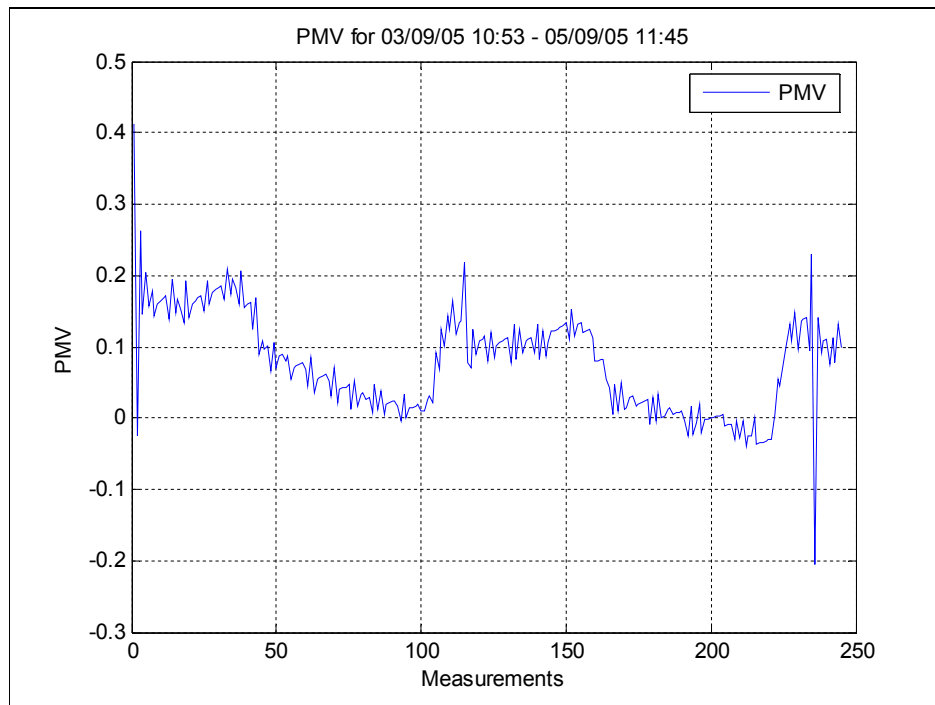
Συνολικές μετρήσεις για τις τρεις ημέρες από 03/09/05 10:53 μέχρι 05/09/05 11:45:



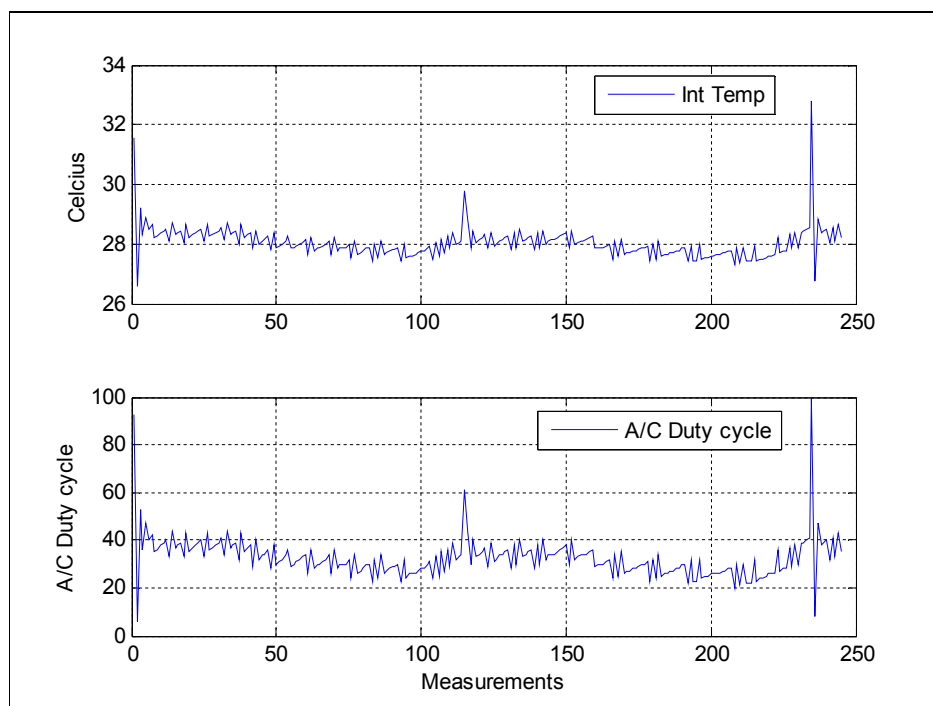
Σχήμα 6.15 – Συνολικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας από 03/09/05 10:53 έως 05/09/05 11:45



Σχήμα 6.16 – Συνολικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας, εξωτερικής, MRT από 03/09/05 10:53 έως 05/09/05 11:45



Σχήμα 6.17 - Συνολικές μετρήσεις συνάρτησης PMV από 03/09/05 10:53 έως 05/09/05 11:45



Σχήμα 6.18 - Συγκεντρωτικές μετρήσεις εσωτερικής θερμοκρασίας και κύκλου λειτουργίας κλιματιστικού από 03/09/05 10:53 έως 05/09/05 11:45

Παρατηρείται πως το σύστημα ενήργησε όπως αναμενόταν, μειώνοντας δηλαδή τη θερμοκρασία κοντά στο επιθυμητό επίπεδο των 28 βαθμών αρκετά γρήγορα, περίπου στα 60 λεπτά (5 κύκλοι). Το σύστημα αντιδρά γρήγορα στις μεταβολές της θερμοκρασίας και δίνει τέτοια έξοδο στα κλιματιστικά, ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία σε μία περιοχή γύρω από τους 28° C. Σε αυτό συμβάλει η επιλογή του set-point των 26° C στον αλγόριθμο, δίνοντας έξοδο κατάλληλη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Η έξοδος της ψύξης (A/C duty cycle) ακολουθεί τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας (MRT) οδηγώντας το σύστημα κοντά στην ισορροπία. Κάποιες υψηλές μεταβολές που παρατηρούνται τόσο στη θερμοκρασία, όσο και στην έξοδο των κλιματιστικών που την ακολουθεί, οφείλονται στην αλλαγή των ημερών όπου η θερμοκρασία αυξάνεται απότομα. Και πάλι όμως το σύστημα καταφέρνει να ρίξει την θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα σχετικά γρήγορα, κοντά στους 5 κύκλους λειτουργίας. Ταλαντώσεις που παρατηρούνται, οφείλονται στην τεχνολογία των κλιματιστικών, η οποία επιτρέπει μόνο τη λειτουργία on-off. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τις χρονικές στιγμές που είναι off, να μην παρέχεται καθόλου ψύξη και η θερμοκρασία να αυξάνεται απότομα. Ο χρόνος των 12 λεπτών δεν επιτρέπει τη μεγάλη αύξηση και οι

έξοδοι στα κλιματιστικά δεν παίρνουν συνολικά πολύ μεγάλες τιμές. Αξιοσημείωτο είναι, πως οι μέρες στις οποίες πήραν μέρος οι μετρήσεις, ήταν σχετικά κρύες (αρχές Σεπτεμβρίου). Τέλος, ταλαντώσεις, σύμφωνα με τη θεωρία, οφείλονται και στη μεθοδολογία εύρεσης παραμέτρων του ελεγκτή, Cohen Coon.

Η συνάρτηση PMV διατηρήθηκε σε πολύ καλά επίπεδα με το μέσο όρο (0,0780) κάτω από το 0,5, διατηρώντας ικανοποιητικές συνθήκες θερμικής άνεσης για τους χρήστες του χώρου.

Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

7.1 Σύγκριση ελεγκτών - συμπεράσματα

Στην ενότητα, αυτή γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης των τριών ελεγκτών με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία δόθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η εξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων σε κοντινές περιόδους (καλοκαιρινοί μήνες), διευκολύνει την διενέργεια συγκρίσεων, εφόσον οι περιβαλλοντικές συνθήκες που ελέγχονται είναι σχεδόν οι ίδιες. Τα μεγέθη, τα οποία μπορούν να συγκριθούν για τους αλγορίθμους, είναι: η κατανάλωση ενέργειας, η οποία εκφράζεται από τη λειτουργία των κλιματιστικών, η πτώση της θερμοκρασίας, και η άνεση στον χώρο, η οποία εκφράζεται από την συνάρτηση PMV. Δίνεται ο παρακάτω πίνακας, ο οποίος περιέχει ενδεικτικές τιμές για τους ελεγκτές και τη συμπεριφορά τους.

	PD fuzzy		PI κλασικός		PD κλασικός	
	M.O.	σ	M.O.	σ	M.O.	σ
Εσωτερική Θερμοκρασία	29,23 ° C	0,37 ° C	28,06 ° C	0,6 ° C	28,03 ° C	0,53 ° C
Εξωτερική Θερμοκρασία	27,15 ° C	1,05 ° C	29,12 ° C	0,87 ° C	25,78 ° C	1,14 ° C
MRT	26,41 ° C	0,88 ° C	26,06 ° C	0,6 ° C	25,26 ° C	0,75 ° C
PMV	0,2135	0,078	0,1160	0,059	0,0780	0,07
A/C Duty Cycle	29,57 %	6,67 %	51,52 %	8,24 %	32,55 %	8,58 %

Πίνακας 7.1, Ενδεικτικές τιμές για τους ελεγκτές

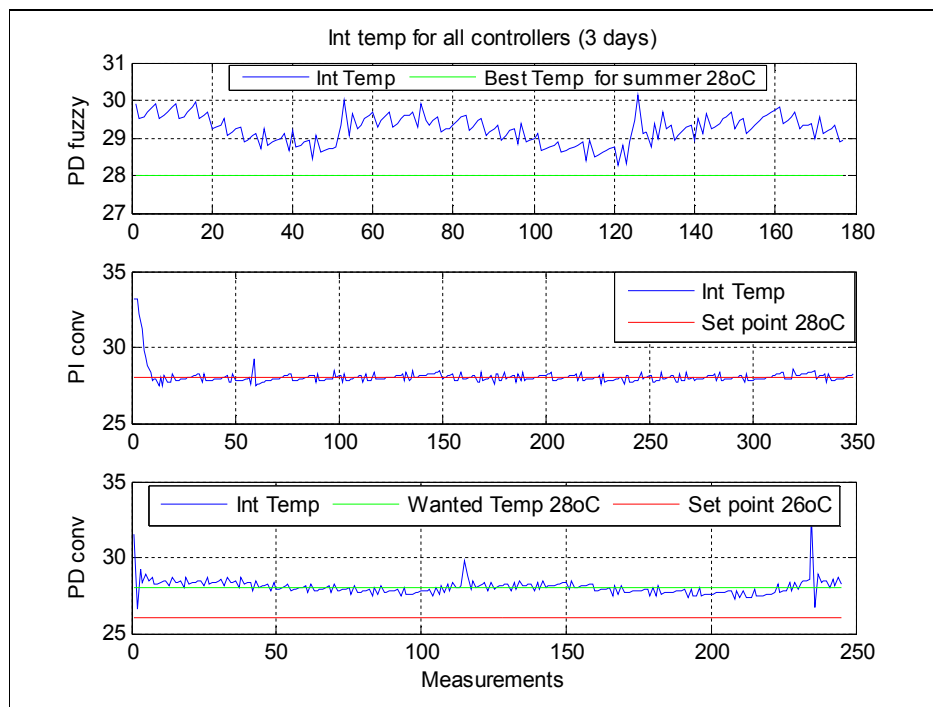
Οι παραπάνω μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις υπολογίστηκαν για τον ίδιο αριθμό ημερών (3 ημέρες) και για παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες (περίοδος καλοκαιριού). Θα πρέπει να σημειωθεί, πως η περίοδος που έλαβαν χώρα οι μετρήσεις για τον PI ελεγκτή ήταν η πιο ζεστή (μέσα καλοκαιριού), ενώ οι υπόλοιποι ελεγκτές, PD ασαφούς λογικής και κλασικός PD, δούλεψαν σε πιο κρύες μέρες (αρχές και τέλη καλοκαιριού αντίστοιχα). Επίσης, οι ελεγκτές εφαρμόστηκαν με διαφορετικούς χρόνους περιόδου, 20 λεπτά για τον PD ασαφούς λογικής, 8 λεπτά για τον κλασικό PI και 12 λεπτά για τον κλασικό PD. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για

τη σύγκριση των ελεγκτών, γιατί με αυτόν το τρόπο προκύπτει η πραγματική μέση χρονική διάρκεια για την οποία δούλευαν τα κλιματιστικά σε κάθε ελεγκτή. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας 7.2, στον οποίο φαίνονται οι μεσοί όροι του κύκλου λειτουργίας των κλιματιστικών εκφρασμένοι σε χρόνο.

	PD fuzzy	PI κλασικός	PD κλασικός
Χρόνος περιόδου	20 min	8 min	12 min
M.O. A/C Duty Cycle (%)	29,57 %	51,52 %	32,55 %
M.O. A/C Duty Cycle (min)	5,9 min	4,1 min	3,9 min
Πίνακας 7.2, A/C Duty cycle για τα κλιματιστικά			

Σε ό,τι αφορά την επίτευξη της επιθυμητής εσωτερικής θερμοκρασίας στο χώρο, μπορεί από τις παραπάνω τιμές να βγει το συμπέρασμα πως οι δύο κλασικοί ελεγκτές είχαν αποτελέσματα πιο κοντά στο set-point (28°C). Αν μάλιστα ληφθεί υπόψη η εξωτερική θερμοκρασία, μπορεί να ειπωθεί, πως ο κλασικός PI ελεγκτής είχε τη μεγαλύτερη απόδοση, αφού κατάφερε να μειώσει τη θερμοκρασία στο set-point σε μία περίοδο όπου η ζέστη ήταν στα υψηλότερα επίπεδα (μέσα καλοκαιριού). Όπως διατυπώθηκε και στο κεφάλαιο 6, σημαντικό ρόλο σε αυτή τη εξέλιξη έπαιξε το συσσωρευμένο λάθος, το οποίο εξαναγκάζει τον ελεγκτή να δώσει αρκετή έξοδο στα κλιματιστικά, ακόμα και όταν η θερμοκρασία είναι κοντά στο set-point. Ο κλασικός PD ελεγκτής κατάφερε να μειώσει τη θερμοκρασία πλησιέστερα στους 28 βαθμούς σε σχέση με τον ασαφή PD, ο οποίος δεν έχει κάποιο set-point για τη θερμοκρασία και δεν φτάνει ποτέ τους 28 βαθμούς. Αν όμως συγκριθούν οι εξωτερικές θερμοκρασίες, φαίνεται πως οι μέρες στις οποίες εφαρμόστηκε ο κλασικός PD ήταν πιο κρύες, γεγονός που κάνει πιο εύκολο και γρήγορο το έργο του. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί, πως στον PD ασαφούς λογικής υπήρχε ο έλεγχος για την ποιότητα του αέρα, ο οποίος επηρέαζε και παθητικά την ψύξη του χώρου. Με το άνοιγμα και κλείσιμο του παραθύρου, μειωνόταν η αποδοτικότητα της ψύξης των κλιματιστικών, αφού ζεστός αέρας έμπαινε στο χώρο. Υπήρχε δηλαδή, μία τάση εξίσωσης της εξωτερικής και της εσωτερικής θερμοκρασίας. Και οι δύο κλασικοί ελεγκτές συγκλίνουν αρκετά γρήγορα στην επιθυμητή θερμοκρασία, με τον PI να τη διατηρεί πάντα σε μία περιοχή γύρω από το set-point, ενώ τον PD να επιτρέπει κάποια peaks, τα οποία οφείλονται στις αλλαγές των ημερών. Ο PD μείωσε τη θερμοκρασία πιο γρήγορα στα επιθυμητά επίπεδα, κοντά στα 60 λεπτά, έναντι του PI

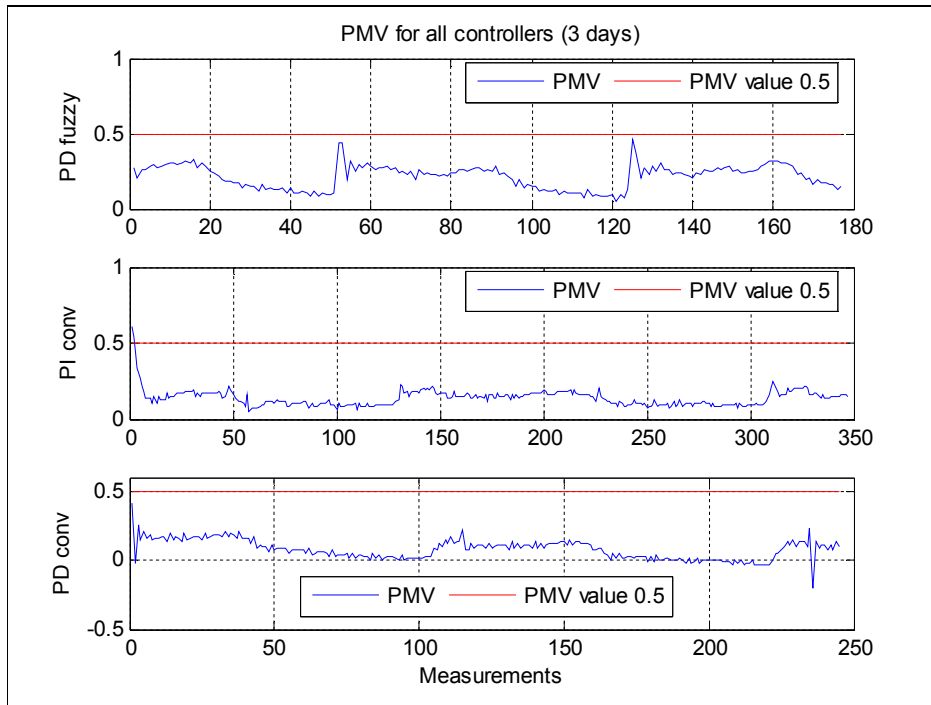
ο οποίος χρειάστηκε 80 λεπτά. Δεν πρέπει να παραληφθεί όμως το γεγονός, ότι ο PI δούλεψε σε πιο θερμές μέρες. Σε αντίθεση, ο PD ασαφούς λογικής δε συγκλίνει σε κάποια τιμή, την οποία να διατηρεί και στη συνέχεια. Αυτό είναι αποτέλεσμα του ότι πρόκειται για έναν ελεγκτή χωρίς μνήμη, ο οποίος αποφασίζει βασιζόμενος στην τρέχουσα μετρούμενη τιμή. Επίσης, η έλλειψη set-point για τη θερμοκρασία και ο έλεγχος των κλιματιστικών βάσει της συνάρτησης PMV, οδηγούν και αυτά στη μη σύγκλιση της θερμοκρασίας. Τέλος, σε όλους τους ελεγκτές παρατηρήθηκαν ταλαντώσεις στις μετρήσεις θερμοκρασίας, κάτι που οφείλεται κυρίως στην on-off λειτουργία των κλιματιστικών, αλλά και στις διαδικασίες εύρεσης των παραμέτρων των ελεγκτών. Όλα τα παραπάνω μπορούν να διαπιστωθούν και εποπτικά από το σχήμα 7.1, στο οποίο δίνονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας για χρόνο τριών ημερών.



Σχήμα 7.1 – Εσωτερική θερμοκρασία και για τους τρεις ελεγκτές

Σημαντική παράμετρος για συστήματα ελέγχου περιβαλλοντικών συνθηκών σε κτίρια, είναι η άνεση των χρηστών που τα χρησιμοποιούν, είτε πρόκειται για προσωπικό το οποίο εργάζεται σε μία επιχείρηση, είτε για τους ιδιοκτήτες ενός έξυπνου σπιτιού. Η άνεση αυτή εκφράζεται από τη συνάρτηση PMV. Στην περίπτωση μας, και οι τρεις ελεγκτές κατάφεραν να διατηρήσουν τη συνάρτηση PMV σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα, αρκετά κάτω από 0,5, που για την εποχή του

καλοκαιριού είναι πολύ καλή επίδοση. Δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές σε ό,τι αφορά την εξέλιξη της συνάρτησης PMV κατά την διάρκεια των ημερών και για τους τρεις ελεγκτές κάτι που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

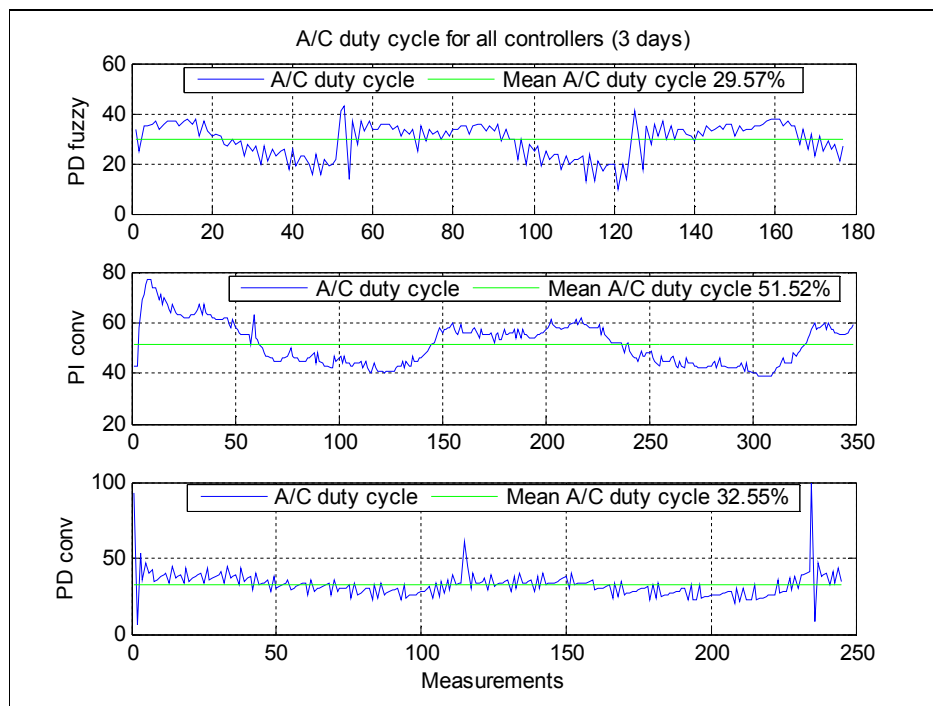


Σχήμα 7.2 – Συνάρτηση PMV και για τους τρεις ελεγκτές

Αυτό που παρατηρήθηκε μόνο, είναι η ύπαρξη κάποιων peaks στους PD ελεγκτές, τα οποία οφείλονται στην αλλαγή των ημερών. Σε αντίθεση, στον PI ελεγκτή η PMV διατηρείται συνεχώς σε μία περιοχή. Σε αυτό συμβάλει το συσσωρευμένο λάθος. Ταλαντώσεις που παρατηρούνται οφείλονται στη λειτουργία των κλιματιστικών, η οποία επηρεάζει βασικά μεγέθη, όπως η θερμοκρασία, και από τα οποία εξαρτάται η συνάρτηση PMV. Τέλος, όσον αφορά την αποδοτικότητα των ελεγκτών, ο PI κατάφερε να ελέγξει την PMV σε πολύ καλά επίπεδα παρουσία μεγάλης ζέστης. Ακολουθούν οι PD ελεγκτές, οι οποίοι εφαρμόστηκαν σε μέρες με μικρότερη ζέστη, πετυχαίνοντας απόδοση παραπλήσια με τον PI για τον κλασικό PD, και μικρότερη από τον PI για τον PD ασαφούς λογικής.

Σε ό,τι αφορά την ενέργεια που καταναλώνεται από το σύστημα, αυτή μπορεί να αποδοθεί στην ενέργεια που καταναλώνουν τα δύο κλιματιστικά και εξαρτάται από τον κύκλο λειτουργίας αυτών. Θα πρέπει να σημειωθεί, πως ο PD ασαφούς λογικής έχει μία επιπλέον κατανάλωση ενέργειας, η οποία προέρχεται από τη λειτουργία του παραθύρου (άνοιγμα/κλείσιμο) κατά τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα. Αυτή όμως η ενέργεια που δαπανάται, είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την

ενέργεια που δαπανούν τα κλιματιστικά και δεν προσμετράτε. Αν μάλιστα ληφθεί υπόψη, το ότι έχει γίνει πρόβλεψη στον αλγόριθμο για ακύρωση άσκοπων μετακινήσεων του παραθύρου, τότε η ενέργεια που δαπανά ο μηχανισμός του γίνεται ακόμα πιο ασήμαντη. Παρακάτω, δίνεται ένα συγκεντρωτικό σχήμα για τον κύκλο λειτουργίας των κλιματιστικών σε κάθε ελεγκτή.



Σχήμα 7.3 – A/C Duty Cycle και για τους τρεις ελεγκτές

Όπως προαναφέρθηκε, οι τρεις ελεγκτές εφαρμόστηκαν στο σύστημα με διαφορετική περίοδο λειτουργίας, 20 λεπτά για τον PD ασαφούς λογικής, 8 λεπτά για τον κλασικό PI και 12 λεπτά για τον κλασικό PD. Δεν αρκεί μόνο να εξεταστεί η έξοδος που έδινε ο εκάστοτε ελεγκτής σαν ποσοστό, αλλά και πώς αυτό μεταφράζεται σε χρόνο. Αυτή η πληροφορία υπολογίστηκε στον πίνακα 7.2. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά και εξετάζοντας τις μετρήσεις στο σχήμα 7.3, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα. Ο PI έχει τα υψηλότερα ποσοστά λειτουργίας των κλιματιστικών με μέσο χρόνο λειτουργίας τα 4,1 λεπτά. Πρόκειται για χρόνο, ο οποίος είναι μεγάλος για χρόνο περιόδου 8 λεπτών. Αυτό είναι αποτέλεσμα του συσσωρευμένου λάθους, το οποίο δίνει υψηλή έξοδο στα κλιματιστικά, ακόμα και όταν η θερμοκρασία είναι κοντά στο set-point. Τον PI ελεγκτή ακολουθεί σε κατανάλωση ο κλασικός PD, με μέσο χρόνο λειτουργίας των κλιματιστικών τα 3,9 λεπτά για χρόνο περιόδου 12 λεπτών, και στη συνέχεια ο PD ασαφούς λογικής με μέσο χρόνο λειτουργίας τα 5,9

λεπτά για χρόνο περιόδου 20 λεπτών. Οι PD ελεγκτές παρατηρείται ότι βρίσκονται πολύ κοντά, αν και ο κλασικός PD λειτούργησε σε περίοδο με μικρότερη ζέστη από τον PD ασαφούς λογικής. Αυτό τον κάνει λιγότερο οικονομικό. Γενικά, οι διαφορές στην καταναλωθείσα ενέργεια δεν ήταν πολύ μεγάλες, ώστε η χρήση κάποιου ελεγκτή να γίνει απαγορευτική.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί πως η καταπόνηση των μηχανικών μερών των κλιματιστικών ήταν διαφορετική για κάθε ελεγκτή. Όσο μικρότερη ήταν η περίοδος λειτουργίας, (π.χ. 8 λεπτά) τόσο πιο σύντομα εναλλάσσονταν η on και η off περίοδος, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καταπόνηση των μερών των κλιματιστικών. Για τον κλασικό PI υπήρξε η μεγαλύτερη καταπόνηση, και τον ακολουθούν ο κλασικός PD και ο PD ασαφούς λογικής.

Συμπερασματικά, μπορεί να εξαχθεί πως πιο αποδοτικός ελεγκτής ήταν ο κλασικός PI, αν μάλιστα ληφθεί υπόψη η ζεστή περίοδος στην οποία εφαρμόστηκε. Από την άλλη μεριά, έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τους υπολοίπους. Υπάρχει δηλαδή, ένα tradeoff μεταξύ της απόδοσης και της ενέργειας που θα καταναλώνεται. Έτσι, είναι στην ευχέρεια του χρήστη το τι θα επιλέξει. Αν θέλει υψηλή και γρήγορη απόδοση χωρίς να τον νοιάζει η ενέργεια που καταναλώνεται, μπορεί να επιλέξει τον PI ελεγκτή. Σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλος περιορισμός στην κατανάλωση, μπορεί να χρησιμοποιήσει κάποιον από τους PD ελεγκτές.

7.2 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Τα χαρακτηριστικά τόσο του προτύπου EIB πάνω στο οποίο είναι υλοποιημένο το σύστημα του εργαστηρίου, όσο και του λογισμικού που έχει δημιουργηθεί, αφήνουν πολλά περιθώρια για αλλαγές και πειραματισμό σε επίπεδο υλικού και λογισμικού. Μπορούν να γίνουν επεκτάσεις, οι οποίες θα δώσουν καλύτερα αποτελέσματα τόσο σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας, όσο και σε επίπεδο βελτίωσης περιβαλλοντικών συνθηκών του χώρου. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα κτίρια, στα οποία θα προσαρμόζεται στις απαιτήσεις τους, και θα λειτουργεί αυτόνομα, βασισμένο στους αλγορίθμους ελέγχου.

Στο χώρο του εργαστηρίου μπορούν να γίνουν οι παρακάτω αλλαγές και επεκτάσεις: Η αντικατάσταση των υπάρχοντων κλιματιστικών μονάδων με μονάδες ψύξης/θέρμανσης, στις οποίες θα επιτρέπεται ρύθμιση των στροφών του κινητήρα.

Αυτό θα έχει αποτέλεσμα τη συνεχή παροχή ψύξης ή θέρμανσης με διαφορετική ένταση ανάλογα με την έξοδο του ελεγκτή, κάτι το οποίο θα οδηγήσει σε πιο ομαλά (χωρίς ταλαντώσεις) και γρήγορα αποτελέσματα. Επιπλέον, θα επιτρέψει την υλοποίηση αλγορίθμων, στους οποίους θα γίνεται η επιλογή ψύξης ή θέρμανσης και θα μπορούν να εφαρμοστούν για όλες τις εποχές του χρόνου. Στο ίδιο πλαίσιο μπορεί να γίνει και η εγκατάσταση ανεμιστήρων οροφής, οι οποίοι θα ελέγχονται από το σύστημα. Αυτό θα βοηθήσει στην καλύτερη ανακύκλωση του αέρα στο χώρο, αλλά και στη ψύξη αυτού με αποτέλεσμα τη λιγότερη χρήση των κλιματιστικών, αν το επιτρέπουν οι κλιματολογικές συνθήκες. Σε ό,τι αφορά τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, μπορεί να γίνει η εγκατάσταση και άλλων ηλεκτρικών παραθύρων, ελεγχόμενα παρόμοια με το υπάρχον, τα οποία θα δημιουργούν ρεύματα και θα αερίζουν γρήγορα και αποτελεσματικά τον χώρο. Παράλληλα, η εγκατάσταση ενός συστήματος εξαερισμού, ενεργοποίηση του οποίου θα γίνεται στην περίπτωση που τα παράθυρα δεν θα ανοίγουν εις βάρος της ψύξης ή θέρμανσης, είναι μία καλή προέκταση. Η ισορροπία των λειτουργιών των παραπάνω επεκτάσεων θα οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα σε ό,τι αφορά τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και θα βελτιώσει την ταχύτητα επίτευξης των επιθυμητών περιβαλλοντικών συνθηκών. Τέλος, για μικρότερη κατανάλωση θα μπορούσε να γίνει η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων, συσσωρεύοντας ενέργεια σε μία διάταξη μπαταριών, η οποία θα τροφοδοτεί μέρη του συστήματος.

Σε επίπεδο λογισμικού μπορεί να γίνει η βελτίωση των υπαρχόντων ελεγκτών, εφόσον συναρτήσεις οι οποίες έχουν υλοποιηθεί επιτρέπουν εύκολα και γρήγορα την αλλαγή των παραμέτρων κάθε ελεγκτή. Επιπρόσθετα, μπορεί να γίνει η εφαρμογή άλλων αλγορίθμων ελέγχου, οι οποίοι θα είναι πιο αποδοτικοί και ακριβείς, αν χρησιμοποιηθούν τεχνικές μηχανικής μάθησης, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, και στατιστικά μοντέλα πρόγνωσης. Επίσης, μπορεί να ενσωματώνουν μηχανισμούς, οι οποίοι θα επιτρέπουν τη σωστή λειτουργία τους σε όλες τις κλιματολογικές συνθήκες ανάλογα με την εποχή του έτους. Αρκετά ενδιαφέρον θα ήταν να γίνει η ανάπτυξη αλγορίθμων, περιορισμένης επεξεργαστικής ισχύς, ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν σε μικροελεγκτές ή FPGAs (embedded software). Αυτό θα οδηγήσει στην ανάπτυξη καινούργιων κόμβων, οι οποίοι θα είναι εξίσου αποδοτικοί με τον κεντρικό και θα μπορούν να ελέγξουν κάποιες επιμέρους λειτουργίες του συστήματος. Πρόκειται για αποκεντρωμένο έλεγχο, ο οποίος συμβάλει στην αξιοπιστία και την αυτονομία του συστήματος.

Τέλος, με τη βοήθεια του διαδικτύου μπορεί να γίνει η δημιουργία συστημάτων, τα οποία θα ελέγχονται και θα παρακολουθούνται από απόσταση σε πραγματικό χρόνο. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί και στο υπάρχον σύστημα του εργαστηρίου σχεδιάζοντας κατάλληλη ιστοσελίδα και αλγόριθμο διασύνδεσης με αυτήν. Το ίδιο μπορεί να γίνει ακόμα και με τη χρήση τηλεφωνικών συσκευών, όπως υποστηρίζει το πρότυπο EIB. Γίνεται λοιπόν ευκολότερη, η αντιμετώπιση προβλημάτων αλλά και η εφαρμογή αλλαγών στον εκάστοτε ελεγκτή οποιαδήποτε στιγμή.

Επίλογος

Η εφαρμογή αλγορίθμων που υλοποιούν ελεγκτές, σαν αυτούς που δοκιμάστηκαν στο σύστημα ΕΙΒ του εργαστηρίου ΕΗΚΑΠΕ του Πολυτεχνείου Κρήτης, δίνει την δυνατότητα ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών σε κτίρια ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας. Η εύκολη παραμετροποίηση των ελεγκτών, βοηθάει στο να μπορούν να εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε κτίριο, ρυθμίζοντας τους ανάλογα με τις απαιτήσεις του κτιρίου και των χρηστών του. Οι πειραματικές μετρήσεις, που έλαβαν μέρος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής, απέδειξαν ότι με τον κατάλληλο εξοπλισμό λαμβάνονται πολύ καλά αποτελέσματα σε ότι αφορά την θερμική άνεση, την ποιότητα αέρα καθώς και την μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Αυτά τα αποτελέσματα αξιοποιούνται αυτόματα και έξυπνα από το εκάστοτε σύστημα, χωρίς την παρέμβαση των χρηστών του, δημιουργώντας παράλληλα τις κατάλληλες συνθήκες διαβίωσης με τις μικρότερες απαιτήσεις ενέργειας. Η επιλογή ποιού ελεγκτή θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση, εξαρτάται από τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις των χρηστών σε απόδοση και κατανάλωση ενέργειας.

Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων και η υποστήριξη τους από μεγάλες εταιρίες, που δραστηριοποιούνται στο χώρο αυτό, θα οδηγήσει στην καλύτερη διαχείριση των συμβατικών πηγών ενέργειας, που στην εποχή μας έχουν αρχίσει να εξαλείφονται, καθώς και στην καλύτερη προστασία του οικοσυστήματός. Ο συνδυασμός μάλιστα τέτοιων συστημάτων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μία πολλά υποσχόμενη εφαρμογή, η οποία θα μειώσει κατά πολύ την καταναλωμένη ενέργεια που παράγεται από συμβατικές πηγές και θα κάνει πιο οικονομικό τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων σε κτίρια.

Βιβλιογραφία

- [1] Benjamin C.Kuo, *Automatic Control Systems Fifth Edition*, Prentice-Hall International Editions 1987
- [2] Rolf Isermann, *Digital Control Systems Volume I Fundamentals, Deterministic Control 2nd Revised Edition*, Springer – Verlag 1989-c1991
- [3] Σαρρής Γ., *EIB Η νέα τεχνική ηλεκτρικών εγκαταστάσεων*, εκδ. Τζιόλα, Θεσ/νίκη , 2002
- [4] Π. Ν. Παρασκευόπουλου, *Εισαγωγή στον αυτόματο έλεγχο*, Ε.Μ. Πολυτεχνείο Αθήνα 1991
- [5] Π. Ν. Παρασκευόπουλου, *Έλεγχος συστημάτων με υπολογιστές*, Ε.Μ. Πολυτεχνείο Αθήνα 2001
- [6] J.-S. Roger Jang, Ned Gulley, *Matlab Fuzzy Logic Toolbox User Guide Version 1*, The MathWorks, Inc. April 1997
- [7] Michail Petrov, Ivan Ganchev, Krum Kutryanski, *A Study on the Fuzzy PID Controller*, Control Systems Department Technical University Sofia
- [8] Jan Jantzen, *Design of Fuzzy Controllers*, Technical University of Denmark, Department of Automation 1998
- [9] Yongsheng Ding, Hao Ying, Shihuang Shao, *Typical Takagi–Sugeno PI and PD fuzzy controllers: analytical structures and stability analysis*, 2002 Elsevier Science Inc.
- [10] G. Ron Chen, *Fuzzy PID Controllers for Industrial Applications*, Lecture for EE 6452 City University of Hong Kong
- [11] Kolokotsa D., Stavrakakis G. , Kalaitzakis K. , Tsiavos D., *Fuzzy Control for Improved Buildings Energy Management Systems*, Proceedings of European Symposium on Intelligent Techniques, Chania Greece 1999
- [12] Kolokotsa D., Stavrakakis G.S. , Kalaitzakis K. , Tsiavos D. Antonidakis E., *Advanced Fuzzy Logic Controllers Design and Evaluation for Buildings' Occupants Thermal - Visual Comfort and Indoor Air quality Satisfaction*, Technical University Of Crete, 2001 Elsevier Science B.V.
- [13] Dave Misir, Heidar A. Malki, Guanrong Chen, *Design and Analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller*, University of Houston, 1996 Elsevier B.V.

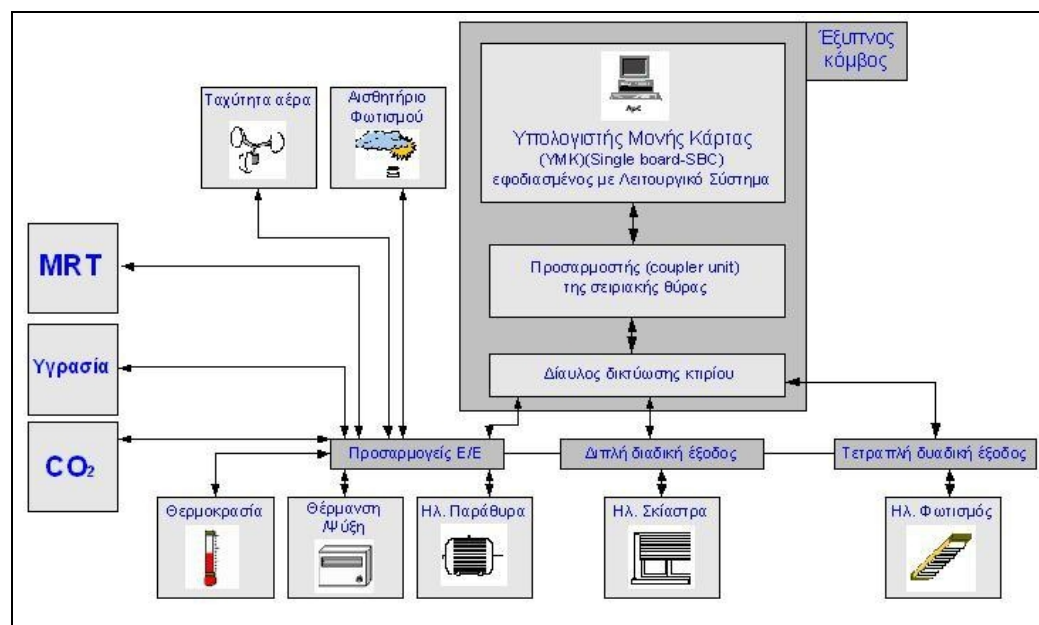
- [14] Mukhtiar Ali Unar, D.J. Murray Smith, Syed Farmar Ali Shah, *Design and Tuning of fixed structure PID Controllers A Survey*
- [15] E.I Tripolitakis, Kolokotsa D., Stavrakakis G., Kalaitzakis K., *Study and Implementation of a Fuzzy PD Thermal Comfort Controller for Embedded Fieldbus Systems Applications*, Technical University Of Crete, Greece
- [16] D. Mitchell Carr, *PID Control and Controller Tuning Techniques Version 1*, April 23, 1986 AN-CNTL-13
- [17] Baogang Hu, George K. I. Mann, Raymond G. Gosine, *New Methodology for Analytical and Optimal Design of Fuzzy PID Controllers*, IEEE Transactions on fuzzy systems, VOL. 7, NO. 5, October 1999
- [18] A. I. Dounis, C. C. Lefas, A. Argiriou, *Knowledge Based versus Classical Control for Solar-Buildings Design*, 1995 Elsevier Science Limited
- [19] Sanjay Kumar, S. Sinha, T. Kojima, H. Yoshida, *Development of parameter based fault detection and diagnosis technique for energy efficient building management system*, 2001 Elsevier Science
- [19] Μεταπτυχιακή εργασία Ευάγγελου Ι. Τριπολιτάκη, *Τεχνικές και αλγόριθμοι άνεσης και εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια με τη χρήση διαύλων δικτύωσης*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Η.Μ.Μ.Υ., Χανιά 2004
- [20] Πτυχιακή εργασία Σαριδάκη Γεώργιου, *Σχεδιασμός, ανάπτυξη και εγκατάσταση επικοινωνιακού κόμβου EIBUS για σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε κτίρια*, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Ηλεκτρονικής
- [21] Μεταπτυχιακή εργασία Κωνσταντίνου Σ. Δαλαμαγκίδη, *Εφαρμογή ενισχυμένης μάθησης για άνεση και εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Η.Μ.Μ.Υ., Χανιά 2003
- [22] SM-28 SKYMASTER Manual V 4.05 – English, *Speedtech Instruments*
- [23] How to write C DLLs and call them from Visual Basic,
<http://support.microsoft.com/default.aspx?scid=KB;en-us;q106553>
- [24] EIBA, <http://www.eiba.com>
- [25] PID controller, <http://www.ecircuitcenter.com/Circuits/pid1/pid1.htm>
- [26] Temperature Control: PID vs fuzzy, <http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA372359>
- [27] Classical PID Control, <http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/F0A687D6706719686256D6D005F9C56>
- [28] Control Tutorial for Matlab, <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/PID/PID.html>
- [29] Improve PID code, <http://www.jashaw.com/pid/code2.html>

- [30] PID algorithms and tuning methods, <http://www.jashaw.com/pid/tutorial/index.html>
- [31] Finding the gradient, <http://revisioncentre.co.uk/gcse/maths/gradients.html>
- [32] PID control, <http://www.embedded.com/2000/0010/0010feat3.htm>

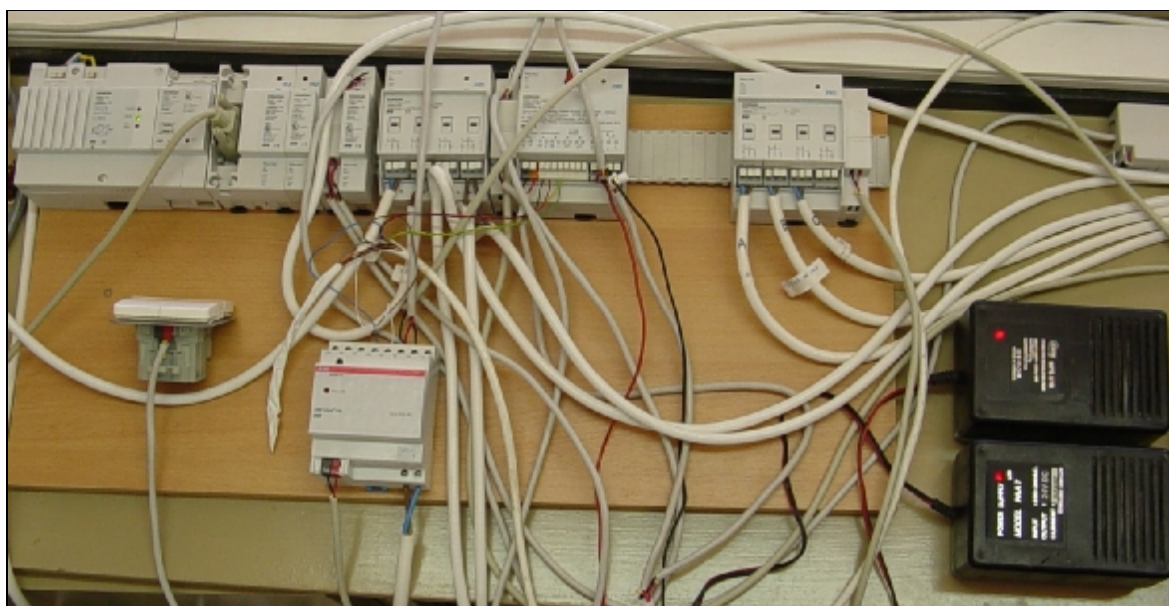
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α. Σχηματική αναπαράσταση συστήματος ΕΙΒ

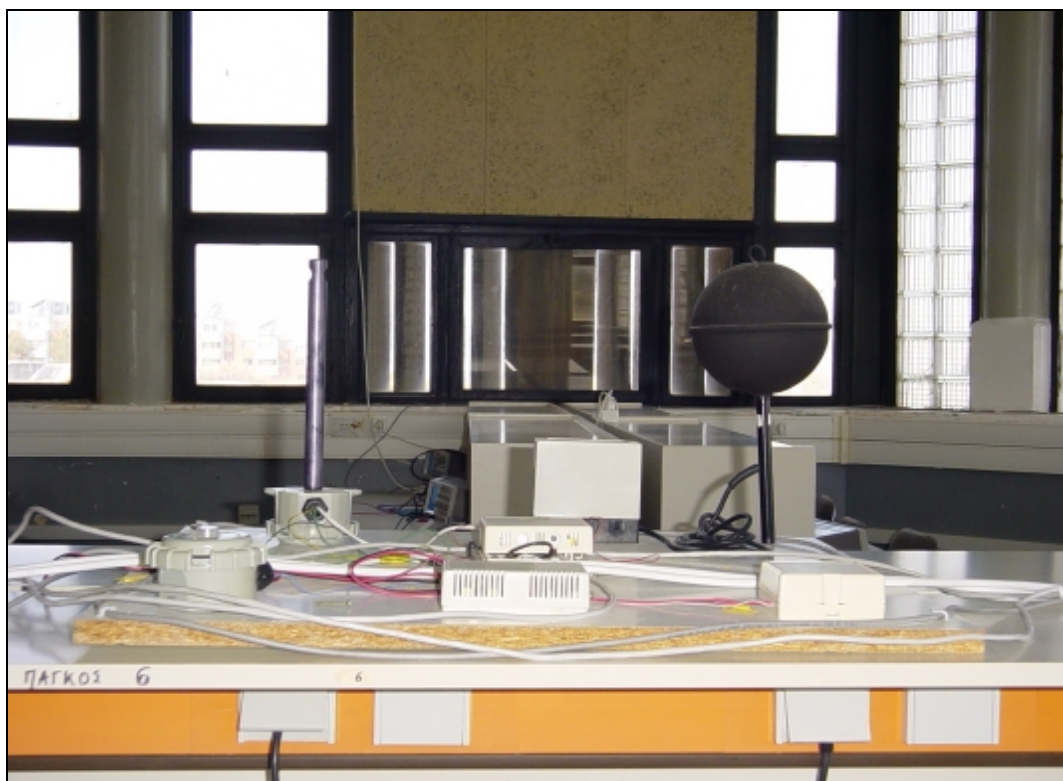
Στο μέρος αυτό δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος στο εργαστήριο ΕΗΚΑΠΕ καθώς και φωτογραφίες μερών του συστήματος.



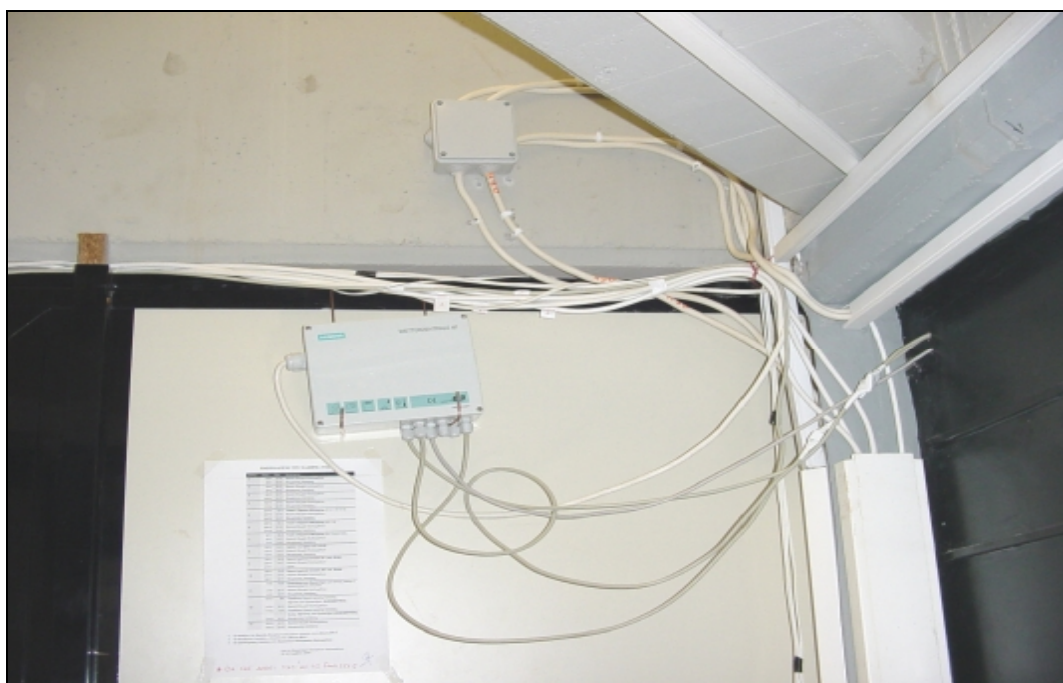
Σχήμα 1 – Σχηματική αναπαράσταση συστήματος



Σχήμα 2 – ΕΙΒ συσκευές



Σχήμα 3 – Αισθητήρια συστήματος



Σχήμα 4 – Weather Station

B. Προδιαγραφές φορητού οργάνου μετρήσεων Skymaster(SM-28)

Το φορητό όργανο μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε είναι το Skymaster Weather meter (SM-28) της Speedtech Instruments προδιαγραφές του οποίου δίνονται παρακάτω.



Σχήμα 7 – Φορητό όργανο μετρήσεων Skymaster

Windspeed

Current, Average, & Maximum windspeed measured with built-in high sensitivity impeller. Display speed in knots, Mph, Kmh, feet, meters, or the beaufort scale. Range: 0.4 to 89Mph (0.6 to 142 Kmh)

Barometer

Digital display of current air pressure with 16-hour history bar graph. Units include inches of mercury (inHg) or millibars/hectopascals (hpa mbar). Range: 400-1100 hPa (11.8-32.5 inHg).

Temperature

Displays current temperature in Celsius or Fahrenheit. Range: 5-122 F (-15 -50 C)

Heat Index

Displays the measure of how humidity acts along with temperature to reduce the body's ability to cool itself. Range: 69.8-155.8 F (20.9-105 C)

Windchill

Displays the effect of wind on reducing the apparent air temperature on the skin.

Dew Point

Displays the temperature at which the air (at its current humidity level) will become saturated with moisture and form dew or fog. Range: -31.2-155.8 F (-35.1-68.8 C).

Relative Humidity

Displays the current relative humidity (moisture content of the air). Comes pre-calibrated, but may be calibrated for demanding field requirements. Range: 0-99%

Altitude

Registers altitudes based on barometric pressure changes. Range: -650 to 9,000 meters.

ACCURACY

Windspeed: +/- 3%
Temp/Windchill: +/- 2F (1C)
Rel Humidity: +/- 3%
Dew Point: +/- 3F (1.5C)
Heat Index: +/- 4F (2C)
Barometer: +/- 3 hpa

Γ. Μαθηματικοί τύποι

Στο κεφάλαιο 7 χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση των ελεγκτών ο μέσος όρος αλλά και η τυπική απόκλιση, τύποι των οποίων δίνονται παρακάτω.

$$\text{Μέσος όρος: } M.O. = \frac{\sum_{i=0}^N x_i}{N}$$

$$\text{Τυπική απόκλιση: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (x_i - M.O.)^2}{N}}$$