



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ Η.Μ.Μ.Υ.  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ Η/Υ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ  
FUZZY PID ΚΑΙ PID ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΚΤΙΡΙΑ»**

ΠΕΤΡΟΣ Μ. ΠΑΤΕΛΗΣ  
Ηλεκτρονικός Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ

Επιτροπή Εξέτασης:  
Καθηγητής Γ. Σταυρακάκης (Επιβλέπων)  
Καθηγητής Α. Πουλιέζος  
Διδάσκουσα Π.Δ. 407/80 Κολοκοτσά Διονυσία

Χανιά 2005

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή .....	4
1.1 Γενικά για τη διαχείριση ενέργειας.....	4
1.2 Συνεισφορά Διπλωματικής Εργασίας.....	5
1.3 Σύνοψη παρουσίαση κεφαλαίων .....	6
Κεφάλαιο 2 – Περιγραφή προβλήματος και αναφορές σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις .....	8
2.1 Διατύπωση προβλήματος.....	8
2.2 Αναφορές σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις .....	10
2.2.1 Εγκατάσταση LonWork Πολυτεχνείου Κρήτης .....	10
2.2.2 Εγκατάσταση EIB Πολυτεχνείου Κρήτης .....	11
Κεφάλαιο 3 – Θεωρία Ελεγκτών .....	13
3.1 Γενικά.....	13
3.2 Proportional – Integral – Derivative (PID) Controller.....	13
3.3 Ελεγκτής PID Ασαφούς Λογικής .....	13
3.3.1 Δομή Ελεγκτή Ασαφούς Λογικής.....	15
Προεπεξεργασία.....	15
Ασαφοποίηση (Fuzzification).....	16
Λογικοί Τελεστές .....	16
Κανόνες.....	17
Συναρτήσεις Μέλους .....	17
Μηχανή Λογικής Ανάλυσης .....	18
Αποασαφοποίηση (Defuzzification) .....	19
Postprocessing.....	19
3.4 Συμβατικός PID Ελεγκτής .....	19
Σημασία και Λειτουργία των P, I και D κερδών .....	20
Κεφάλαιο 4 – Περιγραφή Συστήματος EIB.....	23
4.1 Γενικά για το πρότυπο EIB .....	23
4.2 Συνεστραμμένο Ζεύγος Καλωδίων.....	23
4.3 Άλλοι τρόποι υλοποίησης του EIBus .....	26
Γραμμή Ισχύος (Powerline) .....	26
Ασύρματη Μετάδοση .....	26
4.4 Τοπολογία και Οργάνωση Διαύλου .....	26
4.5 Τηλεγραφήματα και Πρόσβαση στο δίαυλο και συσκευές διαύλου .....	29
4.5.1 Πρόσβαση στο δίαυλο .....	29
4.5.2 Δομή Τηλεγραφήματος και Διευθυνσιοδότηση.....	30
4.6 Το λογισμικό ETS 2 και η βάση δεδομένων του κατασκευαστού.....	31
Προγραμματισμός Εγκατάστασης .....	32
Κεφάλαιο 5 – Πειραματική Μεθοδολογία.....	33
5.1 Γενικά.....	33
5.2 Βαθμονόμηση Αισθητηρίων .....	33
5.3 Υλοποίηση και Εφαρμογή του PID Ασαφούς Λογικής.....	34
5.4 Υλοποίηση και Εφαρμογή του κλασσικού PID.....	41
5.4.1 Υπολογισμός Εφαπτομένης Καμπύλης .....	43
5.5 Ενσωμάτωση Ελεγκτών στο Software.....	44
5.5.1 Ενσωμάτωση του Fuzzy PID .....	45
5.5.2 Ενσωμάτωση του κλασσικού PID .....	45
5.6 Ρύθμιση του κλασσικού PID (Tuning) .....	47
5.7 Μέθοδος Ziegler – Nichols.....	48

Κεφάλαιο 6 – Αποτελέσματα.....	51
6.1 Γενικά.....	51
6.2 Αποτελέσματα του Fuzzy PID.....	51
6.3 Αποτελέσματα του Conventional PID.....	54
Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα .....	57
7.1 Γενικά.....	57
7.2 Αποτελέσματα του Fuzzy PID και του Conventional PID .....	57
7.3 Μελλοντικές Προεκτάσεις.....	63
Κεφάλαιο 8 – Επίλογος.....	65
Παράρτημα .....	66
Βιβλιογραφία .....	70

# Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά για τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια η μεγάλη πρόοδος στην επιστήμη της Ηλεκτρονικής και της Πληροφορικής έχει οδηγήσει στην εξέλιξη «έξυπνων» ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή όχι μόνο σε σπίτια αλλά και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και μεγάλα δημόσια κτίρια.

Η εφαρμογή των εγκαταστάσεων αυτών, έχει σαν σκοπό την δημιουργία άνετου περιβάλλοντος, για τα άτομα που βρίσκονται στο χώρο του κτιρίου, αλλά και την αποδοτική διαχείριση ενέργειας του κτιρίου (Building Energy Management). Οι συχνές αναφορές για την μείωση των ποσοτήτων κλασικών πηγών ενέργειας (π.χ. πετρέλαιο) αλλά και την αρνητική επίδραση που έχουν στο περιβάλλον, έχουν στρέψει την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα στο πεδίο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά και σε εξελιγμένες τεχνικές διαχείρισης των υπάρχουσών ηλεκτρικών και μηχανολογικών κτιριακών εγκαταστάσεων.

Η υλοποίηση τέτοιων εγκαταστάσεων βασίζεται σε ασύρματα ή ενσύρματα δίκτυα όπου γίνεται χρήση των προτύπων EIB, Lonworks και BAC net. Αυτά τα πρότυπα επικοινωνίας, βρίσκουν εφαρμογές σε πληθώρα ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων αφού μπορούν να ελέγξουν τη λειτουργία τόσο των συνηθισμένων οικιακών καταναλωτών όσο και τις καταναλώσεις των μεγάλων βιομηχανικών μονάδων. Η χρήση διαύλων δικτύωσης επιτρέπει τόσο κεντρικό όσο και αποκεντρωμένο έλεγχο των ηλεκτρικών συσκευών. Με τον όρο αποκεντρωμένο έλεγχο δηλώνεται ότι οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους και αντιδρούν ανάλογα με τα σήματα που επεξεργάζονται ενώ στον κεντρικό έλεγχο η διαχείριση των συσκευών εξαρτάται εξ'ολοκλήρου από ένα κεντρικό κόμβο που μπορεί να είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η υλοποίηση πολύπλοκων ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να υλοποιηθούν με τις παραδοσιακές τεχνικές.

Ο έλεγχος των ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων που κάνουν χρήση διαύλων δικτύωσης είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή, κλασικών ή ασαφούς λογικής, ελεγκτών όπως οι PID, PD και PI και οι αντίστοιχοι ασαφούς λογικής. Οι αλγόριθμοι ελέγχου επεξεργάζονται κατάλληλα δεδομένα σχετικά με την κατάσταση του χώρου εφαρμογής και αναλόγως με τις συνθήκες λειτουργίας και τις προτιμήσεις

του χρήστη , ελέγχονται οι κατάλληλες συσκευές μέσω ενεργοποιητών. Οι παραπάνω ελεγκτές είναι εύκολοι στην εφαρμογή και υλοποίηση παρέχοντας έτσι ευελιξία στον έλεγχο πολύπλοκων εγκαταστάσεων, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προσαρμογή των συνθηκών ενός χώρου ώστε να γίνει πιο άνετη η παραμονή των ατόμων σε αυτόν.

## 1.2 Συνεισφορά της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την εφαρμογή και υλοποίηση κλασικών και ασαφούς λογικής ελεγκτών στο ήδη υπάρχον σύστημα διαχείρισης ενέργειας, με χρήση διαύλου δικτύωσης, που βρίσκεται στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Πριν περιγραφεί και αναλυθεί η υλοποίηση και εφαρμογή των ελεγκτών πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι στην τρέχουσα εργασία γίνεται ιδιαίτερη μνεία στον τρόπο με τον οποίο ένας ελεγκτής διαχειρίζεται την ηλεκτρική ενέργεια αλλά και την προσφορά του ως προς την άνεση παραμονής στο χώρο. Οι αλγόριθμοι αυτοί επεξεργάζονται δεδομένα τα οποία στέλνονται από τα αισθητήρια και ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνουν ενεργοποιούν κατάλληλα αντίστοιχες ηλεκτρικές συσκευές.

Η όλη διαδικασία της εφαρμογής και πιστοποίησης των ελεγκτών πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου και για αυτό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση ως προς τη ψύξη του χώρου του εργαστηρίου. Σκοπός της εργασίας ήταν να παρουσιάσει ένα όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστο σύστημα το οποίο να μπορεί να ρυθμίζει τη θερμοκρασία κατάλληλα αλλά και να μειώνει την κατανάλωση σε ηλεκτρική ενέργεια. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή των ελεγκτών, στο υπάρχον σύστημα, έγινε για ένα αρκετά ικανοποιητικό αριθμό ημέρων κατά τη διάρκεια των οποίων προέκυψαν πολύτιμα συμπεράσματα από τις μετρήσεις που λαμβάνονται σε κάθε κύκλο λειτουργίας του συστήματος από τις τιμές που προέρχονται από τα αισθητήρια.

Η υλοποίηση των ελεγκτών πραγματοποιήθηκε σε μια προϋπάρχουσα προγραμματιστική πλατφόρμα και το μόνο που χρειαζόταν για να εφαρμοστούν στο σύστημα ήταν η τροποποίησή της ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά του κάθε ελεγκτή. Οι τροποποιήσεις δεν απαίτησαν υψηλό προγραμματιστικό κόστος και χρόνο και έτσι φανερώνεται ότι οι ελεγκτές αυτοί είναι βολικοί ως προς την

υλοποίηση τους αλλά και ότι μπορούν να επεκταθούν εύκολα. Η πλατφόρμα είναι γραμμένη σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6.0. Στην ίδια γλώσσα επίσης στηρίζεται και η διασύνδεση μεταξύ του συστήματος και των ηλεκτρικών συσκευών που διαχειρίζεται. Μέσω της διασύνδεσης αυτής, οι είσοδοι (δηλαδή τα αισθητήρια) παραδίδουν σε κάθε κύκλο του συστήματος τις τιμές των μεγεθών που μετρούν, ενώ οι ελεγκτές ανάλογα με τη λειτουργία τους τις δέχονται εντολές και έπειτα ενεργοποιούν την αντίστοιχη συσκευή.

Η ευκολία στην υλοποίηση και εφαρμογή των ρυθμιστών ήταν ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού. Οπότε σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω η συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας ήταν να παραδώσει ένα ολοκληρωμένο και όσο δυνατόν αξιόπιστο σύστημα το οποίο να μπορεί να διαχειρίζεται ηλεκτρικές συσκευές σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη και με τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

### **1.3 Σύντομη παρουσίαση των κεφαλαίων**

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται μια γενική άποψη για το τι είναι ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας και για ποιους λόγους εφαρμόζεται. Τι είναι εκείνα που προσπαθεί να επιτύχει. Επιπλέον γίνεται μια ανάλυση για τη συνεισφορά της εργασίας αυτής και τι τελικά είναι αυτό που κατάφερε να προσφέρει.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται η αναλυτική περιγραφή του προβλήματος, αναλύοντας τον σκοπό της διπλωματικής καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να έχουν οι αλγόριθμοι που θα εφαρμοστούν στο σύστημα του εργαστηρίου ΕΗΚΑΠ. Στην συνέχεια δίνονται κάποια παραδείγματα άλλων υλοποιήσεων που έχουν γίνει στο παρελθόν για την ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε κτήρια.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται η βασική θεωρία η οποία καλύπτει τους ελεγκτές που υλοποιήθηκαν καθώς και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την ρύθμιση αυτών, ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις μας. Έτσι γίνεται περιγραφή των ασαφών (fuzzy) ελεγκτών (PID fuzzy), αφού πρώτα δοθεί μία μικρή αναφορά σε fuzzy logic, του κλασσικού ελεγκτή (PID) και της μεθόδου ρύθμισης (tuning method), Ziegler-Nichols.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση της τεχνολογίας διαύλου EIB, όπου γίνεται λόγος για το πρότυπο δικτύωσης EIB, περιγράφοντας συνοπτικά την οργάνωση, την τοπολογία του και την μετάδοση πληροφορίας. Επίσης γίνεται μία μικρή αναφορά στο λογισμικό ETS. Στην συνέχεια αναλύεται πως μπορεί να γίνει ανάπτυξη έξυπνων κόμβων συμβατών με την τεχνολογία EIB. Τέλος γίνεται μία αναλυτική περιγραφή του συστήματος το οποίο είναι εγκαταστημένο στο χώρο του εργαστηρίου σε επίπεδο τοπολογίας, περιγράφοντας έτσι 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 ενσωμάτωση τους στο σύστημα και την εξαγωγή των μετρήσεων. Αρχικά γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την βαθμονόμηση των αισθητηρίων και κυρίως του υγρασιόμετρου το οποίο είχε πρόβλημα.. Στην συνέχεια γίνεται η περιγραφή των PID fuzzy και κλασσικού PID ελεγκτών που υλοποιήθηκαν παρουσιάζοντας όλα τα βασικά μέρη που τους αποτελούν και την διαδικασία εισαγωγής τους στο σύστημα.

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

Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα για την λειτουργία των ελεγκτών και γίνεται μία συγκριτική προσπάθεια σε ότι αφορά τις απαιτήσεις για ταχύτητα, κατανάλωση ενέργειας και άλλων παραμέτρων. Επίσης δίνονται οι μελλοντικές επεκτάσεις και αλλαγές που μπορούν να γίνουν στο σύστημα.

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

## **Κεφάλαιο 2 - Περιγραφή προβλήματος και αναφορές σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις**

### **2.1 Διατύπωση του προβλήματος**

Η ευχάριστη παραμονή των ατόμων σε ένα σπίτι ή κτίριο και η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας είναι τα βασικά αντικείμενα ανάλυσης της διπλωματικής αυτής εργασίας. Οι πειραματικές μετρήσεις και δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να επιτευχθούν τα ζητούμενα, πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών έγιναν προσπάθειες να ρυθμιστούν όλες εκείνες οι περιβαλλοντικές παράμετροι που μπορούν να κάνουν άνετη τη ζωή των ατόμων σε ένα κτίριο. Η πειραματική πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή, είχε υλοποιηθεί στο παρελθόν και βασίζεται σε δίκτυο δικτύωσης κτιρίων που κάνει χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας EIB.

Η εργασία αυτή περιελάμβανε την υλοποίηση δύο αλγορίθμων ελέγχου μέσω των οποίων ρυθμίστηκαν οι περιβαλλοντικές παράμετροι. Οι δύο αλγόριθμοι ελέγχου ήταν ένας κλασικός PID και ένας ελεγκτής PID ασαφούς λογικής. Ο κλασικός PID υλοποιήθηκε προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο θερμικός έλεγχος του κτιρίου ενώ ο PID ασαφούς λογικής για τη θερμική και οπτική άνεση. Οι τιμές, τις οποίες επεξεργάζονται οι ελεγκτές, προέρχονται από τα αισθητήρια τα οποία βρίσκονται στο ισόγειο του εργαστηρίου. Τα αισθητήρια αυτά μετρούν σε κάθε κύκλο του συστήματος μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται προκειμένου να ενεργοποιηθούν συσκευές, όπως κλιματιστικά, παράθυρο και σκίαστρο, οι οποίες θα ρυθμίσουν τη θερμοκρασία και την άνεση στο χώρο. Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής (υλοποιημένος από τον προπτυχιακό φοιτητή κο Τσιαβό – «Τσιαβός» στο εξής) ήταν ήδη υλοποιημένος και απλά έγινε προσαρμογή του για να καλυφθούν οι απαιτήσεις του χώρου. Ο κλασικός PID υλοποιήθηκε με τη βοήθεια πειραματικών μετρήσεων που ελήφθησαν για κάποιες μέρες ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροί του μέσω εμπειρικών μοντέλων. Εν συνεχεία, και για την καλύτερη πιστοποίηση του κάθε ρυθμιστή, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για έναν αριθμό ημερών ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για το ποιος είναι πιο οικονομικός από άποψη

κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και ποιος είναι εκείνος που προσφέρει καλύτερες συνθήκες διαμονής εντός του χώρου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην εργασία αυτή έγιναν προσπάθειες για την βελτίωση και αναβάθμιση του υπάρχοντος συστήματος τόσο σε επίπεδο λογισμικού όσο και επίπεδο υλικού. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι οι αλγόριθμοι ελέγχου θα πρέπει να είναι εύκολοι στην υλοποίηση τους αλλά και ευέλικτοι στην περίπτωση που πραγματοποιηθεί κάποια αλλαγή στη λειτουργία τους. Επιπλέον, έγιναν προσπάθειες ώστε οι δύο ελεγκτές να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστοι ώστε να θεωρηθούν κατάλληλοι και για την εφαρμογή τους και σε άλλα κτίρια εκτός του εργαστηρίου. Το υπάρχον σύστημα χρησιμοποιεί το πρότυπο EIB και μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα κτίρια με σκοπό να ρυθμιστούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες του καθενός. Αυτό σημαίνει ότι ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αξιόπιστο, να έχει αναισθησία στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο και να εισάγει μικρή μηχανική καταπόνηση στις ελεγχόμενες συσκευές προκειμένου να μην μειώνεται άσκοπα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής τους.

Η ύπαρξη κάποιου αλγορίθμου ελέγχου κρίνεται αναγκαία καθώς χωρίς την ύπαρξη του δεν είναι δυνατόν να ελεγχθεί η ηλεκτρική εγκατάσταση και επομένως να ρυθμιστούν οι συνθήκες στο χώρο του κτιρίου (μπορεί να είναι από ένα απλό σπίτι μέχρι μια βιομηχανία).

Ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη του κάποια χαρακτηριστικά που πρέπει να ικανοποιεί το σύστημα. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η απλότητα στην υλοποίηση, η ευστάθεια ώστε να προκύπτουν οι σωστές τιμές των μετρούμενων μεγεθών, η επίτευξη του στόχου για τον κάθε αλγόριθμο ελέγχου, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το χαμηλό κόστος της εγκατάστασης.

Στην περίπτωση της κατανάλωσης ενέργειας αυτό που στην ουσία πραγματοποιήθηκε ήταν η κατάλληλη ρύθμιση των ελεγκτών έτσι ώστε να μπορούν να αποδώσουν τα αναγκαία (δηλαδή να επιτυγχάνουν το στόχο τους) αλλά με όσο το δυνατόν μικρότερη χρήση των συσκευών που χρησιμοποιούν ώστε να πετύχουν το σκοπό τους. Για παράδειγμα, για τη ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα προκειμένου οι ελεγκτές να τη ρυθμίζουν σε επιθυμητά επίπεδα χωρίς ιδιαίτερα υψηλή χρήση των συστημάτων ψύξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τόσο την ελαχιστοποίηση της καταναλούμενης ενέργειας αλλά και τη μείωση των μηχανικών καταπονήσεων, με παράλληλη ικανοποιητική παροχή ψυκτικού φορτίου 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. Έγινε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της κας Κολοκοτσά και υλοποιήθηκε στους χώρους του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Στην περίπτωση αυτή υλοποιήθηκε με χρήση της ασαφούς λογικής ένας έξυπνος κόμβος με τον οποίο ελέγχονται οι περιβαλλοντικές παραμέτροι 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 είναι να μειώνει την συνάρτηση PMV, αλλά και να ελέγχει την ποιότητα του αέρα καθώς και τα επίπεδα του εσωτερικού φωτισμού. Περιλαμβάνει και παθητικές μεθόδους θέρμανσης / ψύξης, εξαερισμού και φωτισμού, έτσι ώστε να πετυχαίνει οικονομία στην ενέργεια.

Μετά από μετρήσεις αποδείχθηκε πως το μοντέλο ικανοποιεί τις απαιτήσεις άνεσης των χρηστών και επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας. Βάση μετρήσεων υπήρξε 14% λιγότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με αυτή που θα καταναλώνονταν χωρίς τη χρήση του συστήματος.

### 2.2.2 Εγκατάσταση EIB Πολυτεχνείου Κρήτης

Στο Πολυτεχνείο Κρήτης πραγματοποιήθηκε υλοποίηση ενός fuzzy PD ελεγκτή, κατά τη διάρκεια των Μεταπτυχιακών Σπουδών του κ. Ευάγγελου Τριπολιτάκη [18], στο ήδη εγκατεστημένο σύστημα EIB που βρίσκεται στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η πειραματική πλατφόρμα στην οποία πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση αποτελείται από διασυνδεδεμένους κόμβους (αισθητήρια και ενεργοποιητές) βασιζόμενη στην υποδομή που προσφέρει το πρωτόκολλο επικοινωνίας EIB (European Installation Bus). Το σύστημα στηρίζεται στον κεντρικό έλεγχο ο οποίος πραγματοποιείται από ένα υπολογιστή και είναι υλοποιημένος με λογισμικό το οποίο εκτελεί τις διάφορες διεργασίες και σκοπός του είναι οι ρύθμιση παραμέτρων ώστε να γίνει πιο άνετη και ευχάριστη η παραμονή των ατόμων που δουλεύουν στο χώρο αυτό.

Οι κόμβοι του διαύλου τοποθετήθηκαν σε μια ράγα τύπου DIN για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Το μέσον μετάδοσης για το δίκτυο αυτό, είναι ένα συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων και επιλέχθηκε εξαιτίας της χαμηλής τιμής του, της μεγάλης αναισθησίας του στο θόρυβο και την ικανότητα μεγάλων καλωδιώσεων χωρίς την χρήση επαναληπτών. Όλες οι συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο λειτουργούν με ενέργεια από τη γραμμή μετάδοσης του διαύλου όπου τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω τάσης DC 24V. Η τάση αυτή διασφαλίζεται από ένα συγκεκριμένο τροφοδοτικό του EIB το οποίο ενσωματώνει ένα πηνίο έτσι ώστε να φιλτράρει το θόρυβο που προέρχεται από τα 220V τάσης έξω από τη γραμμή μετάδοσης. Όπως προαναφέρθηκε οι εισοδοί του συστήματος είναι τα αισθητήρια και οι έξοδοι οι ενεργοποιητές. Τα αισθητήρια λοιπόν είναι γραμμικά και έχουν έξοδο από 0-10V. Τα αισθητήρια που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα είναι : MRT, CO<sub>2</sub>, Εσωτερικής Θερμοκρασίας, Υγρασίας, Εσωτερικού Φωτισμού και Ταχύτητας στου Ανέμου. Οι ενεργοποιητές είναι συμβατοί με το EIB δυαδικοί έξοδοι (relays) που μπορούν να χειριστούν φορτία μέχρι 20A.

Ο έξυπνος κόμβος υλοποιήθηκε σε λογισμικό που επεξεργαζόταν δεδομένα τα οποία συλλέγονταν από τα αισθητήρια και έδινε στη έξοδό του τιμές οι οποίες ενεργοποιούσαν τις διάφορες συσκευές. Το λογισμικό του κόμβου είναι υλοποιημένο στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6.ενώ έγινε και χρήση βιβλιοθηκών DLL

γραμμένων στη γλώσσα C για την υλοποίηση των ελεγκτών τη διασύνδεση του συστήματος με τα αισθητήρια και τις συσκευές ελέγχου.

Για την πιστοποίηση της καλής λειτουργίας και την ποιοτική αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιήθηκαν αρκετές σειρές δοκιμών. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και για αυτό τα κλιματιστικά είναι ρυθμισμένα στη ψύξη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατηρείται ότι η συνάρτηση PMV παίρνει τιμές μικρότερες του 0.5 στο μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων ενώ το σύστημα αποκρίνεται γρήγορα στις απότομες και ξαφνικές αλλαγές της θερμοκρασίας.

## Κεφάλαιο 3 - Θεωρία Ελεγκτών

### 3.1 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τη διαδικασία ελέγχου των δεδομένων των PID fuzzy και κλασσικό PID ελεγκτών. Επίσης περιγράφονται και τα μέρη από τα οποία αποτελούνται καθώς και η λειτουργία του καθενός.

### 3.2 Proportional – Integral – Derivative (PID) Controller

Γενικά ένας PID ελεγκτής αποτελείται από τρία τμήματα. Το **proportional**, το **integral** και το **derivative** κομμάτι. Το κάθε κομμάτι λοιπόν αυτό έχει και τη δική του σημασία για την υλοποίηση του ελεγκτή PID:

- **Proportional** : δέχεται σαν παράμετρο το τρέχον σφάλμα και στην έξοδο δίνει το σφάλμα αυτό πολλαπλασιασμένο με ένα κέρδος  $K_p$
- **Integral** : το κομμάτι αυτό δέχεται σαν εισόδους το τρέχον και τα προηγούμενα σφάλματα (είναι ολοκλήρωμα από 0 έως t) και υπολογίζει το άθροισμά τους πολλαπλασιασμένο με ένα κέρδος  $K_I$
- **Derivative** : υπολογίζεται η διαφορά του τρέχοντος με του προηγούμενου σφάλματος με την προσθήκη του κέρδους  $K_D$

Επομένως η έξοδος ενός PID ελεγκτή δίνεται από τη σχέση :

$$u(t) = K_p \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{de}{dt}) \text{ ή σε μορφή Laplace}$$

$$G_s(s) = K_p \cdot (1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s)$$

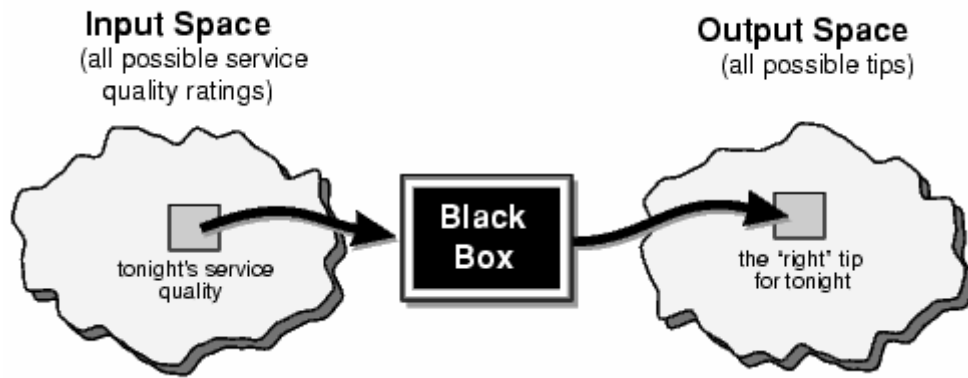
### 3.3 Ελεγκτής PID Ασαφούς Λογικής (Fuzzy PID)

Ο περισσότερο γνωστός, στη βιομηχανία, ελεγκτής είναι ο proportional – integral – derivative (PID) ελεγκτής εξαιτίας της απλής δομής του και της πολύ καλής απόδοσης του σε μεγάλο εύρος λειτουργικών συνθηκών. Ένας PID ελεγκτής ασαφούς λογικής (δηλ. fuzzy PID) μπορεί να θεωρηθεί σαν όμοιος του κλασικού PID ελεγκτή. Ένας τέτοιος ελεγκτής όπως είναι φανερό, αποτελεί συνδυασμό ενός απλού PID ελεγκτή και ενός ασαφούς ελεγκτή. Τέτοιου τύπου ελεγκτές έχουν την ικανότητα της αυτορυθμίσεως (self-tuning) και ελεγχόμενη από υπολογιστή προσαρμογή σε μη γραμμικά, χρονικά μεταβαλλόμενα και ασταθή συστήματα. Επίσης οι PID fuzzy ελεγκτές διασφαλίζουν μια αξιόπιστη επιλογή για βιομηχανικές εφαρμογές με πολλά επιθυμητά χαρακτηριστικά. Πριν την ανάλυση του παραπάνω ελεγκτή, και για να καταστεί πιο κατανοητή η λειτουργία του είναι χρήσιμο να γίνει μια περιγραφή και ανάλυση ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής.

Η **ασαφής λογική** [15] είναι ένας βολικός τρόπος για την «αντιστοίχιση» (mapping) μιας εισόδου σε μια έξοδο. Με τον όρο «αντιστοίχιση» εννοείται ότι ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου προκύπτει και η αντίστοιχη έξοδος. Μεταξύ της εισόδου και της εξόδου παρεμβάλλεται ένα «μαύρο κουτί» στο οποίο λαμβάνονται οι διάφορες αποφάσεις για να προκύψει από τα δεδομένα εισόδου η κατάλληλη έξοδος. Το μαύρο κουτί αυτό μπορεί να περιέχει διάφορους μηχανισμούς, όπως συστήματα ασαφούς λογικής, γραμμικά συστήματα, διαφορικές εξισώσεις, νευρωνικά δίκτυα. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι για να λειτουργήσει το μαύρο κουτί ο τρόπος λειτουργίας του με την ασαφή λογική είναι ο καλύτερος.

Πατέρας της ασαφούς λογικής είναι ο Lotfi Zadeh σύμφωνα με τον οποίο είναι δυνατόν κάθε προϊόν να σχεδιαστεί χωρίς την ασαφή λογική αλλά αυτή αποτελεί μια μέθοδο γρηγορότερη και φθηνότερη. Παρακάτω παρατίθεται μια λίστα στην οποία παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της ασαφούς λογικής.

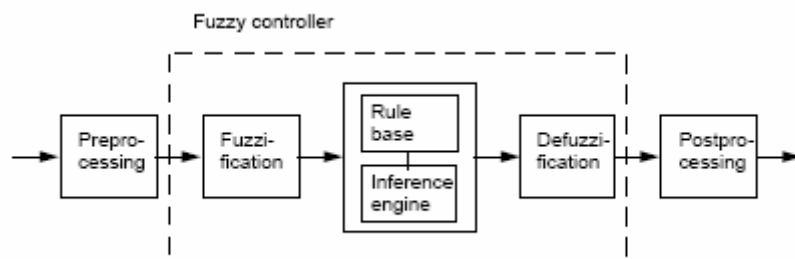
- Η ασαφής λογική είναι απλή στην κατανόηση
- Είναι ευέλικτη
- Είναι ανεκτική σε ανακριβή δεδομένα
- Μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές εξισώσεις αυθαίρετης πολυπλοκότητας
- Μπορεί να ταιριάζει με συμβατικές τεχνικές ελέγχου
- Βασίζεται στη φυσική γλώσσα



Σχήμα 3.1. Διαδικασία «χαρτογράφησης» εισόδου στην έξοδο

### 3.3.1 Δομή Ελεγκτή Ασαφούς Λογικής

Υπάρχουν συγκεκριμένα συστατικά που χαρακτηρίζουν ένα ελεγκτή ασαφούς λογικής [8] για να υποστηρίξουν τη διαδικασία σχεδίασης. Τα συστατικά αυτά φαίνονται στο σχήμα 3.1.2.



Σχήμα 3.2. Block diagram του ασαφούς ελεγκτή.

#### Προεπεξεργασία (Preprocessing)

Ένας fuzzy ελεγκτής ξεκινά πάντοτε με ένα σύνολο τιμών εισόδου που καλείται και *ασαφές σύνολο*. Το σύνολο τιμών αυτό, πολλές φορές, δεν είναι τόσο ξεκάθαρο. Για το λόγο αυτό σκοπός της προεπεξεργασίας είναι να προετοιμάσει τις τιμές αυτές προτού εισέλθουν στο σύστημα. Μερικά παραδείγματα προεπεξεργασίας είναι το φιλτράρισμα για την απομάκρυνση του θορύβου, διαφορίση και ολοκλήρωση

ή τις διακριτές ισοδυναμίες τους, μέσος όρος για τον προσδιορισμό μεγάλης ή μικρής διάρκειας κλίσεις. Πολλές φορές είναι επίσης αναγκαία και η χρήση ενός κβαντιστή (quantiser) για τη μετατροπή των τιμών εισόδου με σκοπό να βρει την καλύτερη προσέγγιση τους με βάση ένα διακριτό διάστημα τιμών (universe). Για παράδειγμα αν το 4.5 αποτελεί μια τιμή εισόδου και το διάστημα τιμών παίρνει τιμές από -5, -4, ..., 0, ..., 4,5 τότε ο κβαντιστής αυτό που θα κάνει είναι να στρογγυλοποιήσει την τιμή εισόδου και να την κάνει ίση με 5 ώστε να μπορέσει να εισέλθει στο σύστημα.

### **Ασαφοποίηση (Fuzzification)**

Η πρώτη επεξεργασία που υπόκεινται τα δεδομένα εισόδου είναι η **ασαφοποίηση**. Ο ρόλος της είναι να μετατρέψει κάθε τιμή των δεδομένων εισόδου σε βαθμούς μέλους μέσω της αναζήτησης σε μια ή περισσότερες συναρτήσεις μέλους. Επίσης η **ασαφοποίηση** αντιπαρατάσσει τα δεδομένα εισόδου με τους κανόνες για να προσδιορίσει πόσο καλά η συνθήκη του κάθε κανόνα ταιριάζει με τη συγκεκριμένη είσοδο. Υπάρχει ένα βαθμός μέλους για κάθε γλωσσικό όρο που προσαρμόζεται στην τιμή της εισόδου.

### **Λογικοί Τελεστές (Logical Operators)**

Το πιο σημαντικό σημείο για την κατανόηση της ασαφούς λογικής είναι ότι μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα υπερσύνολο μιας δυαδικής λογικής. Έτσι λοιπόν τα δεδομένα θα έχουν τιμές 1(αληθές) και 0(ψευδές). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη χρήση των βασικών πράξεων μεταξύ των τιμών. Οι βασικές παράξεις είναι οι AND, OR και NOT. Για την πραγματοποίηση των πράξεων αυτών αλγοριθμικά η πράξη AND μεταξύ δύο τιμών ισοδυναμεί με τη σύγκριση των δύο τιμών και η μικρότερη από αυτές είναι το αποτέλεσμα της πράξης. Το αντίθετο ισχύει με την πράξη OR όπου το αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη τιμή. Ενώ η πράξη NOT ισοδυναμεί με την αντιστροφή της τιμής (δηλαδή αν η τιμή εισόδου είναι 1 τότε με την πράξη αυτή θα γίνει 0).

### **Κανόνες (If – Then Rules)**

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ένα από τα πλεονεκτήματα της ασαφούς λογικής είναι ότι βασίζεται σε φυσική γλώσσα. Έτσι και οι κανόνες σύμφωνα με τους οποίους λειτουργεί ένας ελεγκτής ασαφούς λογικής στηρίζονται στη φυσική γλώσσα. Ένας κανόνας ασαφούς ελεγκτή έχει την εξής μορφή :

**if x is A then y is B**

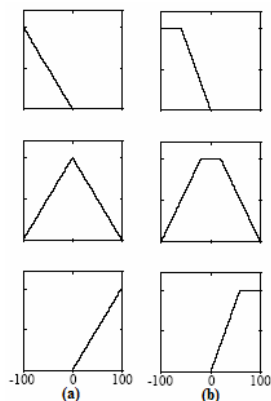
Από τη μορφή την οποία έχει ένας κανόνας παρατηρείται το γεγονός ότι αποτελεί μια τριμερή διεργασία. Στο πρώτο μέρος της διεργασίας αυτής πραγματοποιείται η **ασαφοποίηση** των εισόδων. Στο μέρος αυτό αναλύονται οι καταστάσεις του fuzzy στην προηγούμενη μορφή τους σε ένα βαθμό μέλους μεταξύ 0 και 1. Εάν υπάρχει ένα μόνο μέρος της προηγούμενης μορφής τότε αυτό είναι ο βαθμός για τον κανόνα. Το επόμενο στάδιο είναι το **εφαρμογή των ασαφών τελεστών σε πολλαπλά μέρη antecedents** σύμφωνα με το οποίο εάν υπάρχουν περισσότερα του ενός μέρη στην προηγούμενη τιμή τότε εφαρμόζονται οι λογικοί τελεστές και αναλύεται σε ένα απλό αριθμό μεταξύ του 0 και του 1. Αυτός είναι ο βαθμός υποστήριξης του κανόνα. Και το τρίτο μέρος είναι η **εφαρμογή της μεθόδου εμπλοκής** στην οποία χρησιμοποιείται ο βαθμός σε ολόκληρο τον κανόνα για να προκύψει το σύνολο τιμών της εξόδου. Το συμπέρασμα για τον κανόνα του fuzzy είναι ότι δηλώνει ένα ασαφές σύνολο για την έξοδο. Το σύνολο αυτό αναπαρίσταται από μια συνάρτηση μέλους η οποία είναι επιλεγμένη για να υποδείξει την ποιότητα του συμπεράσματος. Στην περίπτωση που η προηγούμενη τιμή είναι μερικώς αληθής (δηλαδή έχει τιμή μικρότερη του 1) τότε το σύνολο εξόδου περικόπτεται.

### **Συναρτήσεις Μέλους (Membership Functions)**

Κάθε στοιχείο του διαστήματος τιμών αποτελεί μέλος του ασαφές συνόλου μέχρι ενός βαθμού, ίσως ακόμα και του 0. Ο βαθμός της καταστάσεως μέλους για όλα τα μέλη της περιγράφει ένα ασαφές σύνολο. Τα στοιχεία των ασαφών συνόλων χαρακτηρίζονται σαν *grade of membership* (βαθμός μέλους) και αυτό γιατί η μετάβαση από την κατάσταση μέλους (membership) στην μη κατάσταση μέλους (non-membership) είναι βαθμιαία και όχι απότομη. Το σύνολο των στοιχείων που βρίσκονται στην κατάσταση μέλους (membership) καλούνται *support* του ασαφές

συνόλου. Η συνάρτηση η οποία συνδέει ένα αριθμό σε κάθε στοιχείο  $x$  του διαστήματος τιμών καλείται **συνάρτηση μέλους  $\mu(x)$** .

Παρακάτω παρατίθενται μερικά παραδείγματα συναρτήσεων μέλους.



Σχήμα.3.3. Παραδείγματα για membership functions.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται εικόνες που δείχνουν τι μορφή μπορούν να έχουν κάποιες συναρτήσεις μέλους. Στο σχήμα (a) οι συναρτήσεις έχουν τριγωνική μορφή ενώ στο σχήμα (b) έχουν τραπεζοειδή μορφή. Αυτές είναι και οι δύο μορφές που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του PID ελεγκτή ασαφούς λογικής.

### **Μηχανή Λογικής Ανάλυσης (Inference Engine)**

Στο κομμάτι αυτό της δομής ενός ασαφούς ελεγκτή πραγματοποιείται η διαδικασία σχεδίασης από μια δεδομένη είσοδο σε μια έξοδο με χρήση της ασαφούς λογικής. Η σχεδίαση αυτή έπειτα διασφαλίζει μια βάση για το ποιες αποφάσεις θα πρέπει να ληφθούν. Η διαδικασία της ασαφούς μηχανής λογικής ανάλυσης συνδέει όλα εκείνα τα κομμάτια που έχουν περιγραφεί παραπάνω, δηλαδή συναρτήσεις μέλους, τελεστές ασαφούς λογικής, και if-then κανόνες. Τα συστήματα συναντώνται σε δύο μορφές, στη Mamdani και στη Sugeno οι οποίες διαφοροποιούνται από τις εξόδους που παράγει η κάθε μια. Στην εφαρμογή που περιγράφεται στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η μορφή Mamdani. Ο τύπος Mamdani είναι η πιο γνωστή μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για αυτά τα συστήματα. Η μέθοδος αυτή είναι από τα πρώτα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποίησαν την θεωρία των ασαφών συνόλων.

### **Απασαφοποίηση (Defuzzification)**

Η είσοδος για τη διαδικασία του απασαφοποίηση είναι το ασαφές σύνολο και η έξοδος είναι ένα απλός αριθμός. Όσο το κομμάτι της ασαφοποίησης βοηθά τον υπολογισμό του κανόνα στη διάρκεια των ενδιάμεσων βημάτων, η τελική επιθυμητή έξοδος για κάθε μεταβλητή είναι ένας απλός αριθμός. Παρόλα αυτά, το ολικό άθροισμα περιγράφει ένα εύρος από τιμές εξόδου και πρέπει να αποασαφοποιηθεί έτσι ώστε να διαχωρίσει μια απλή τιμή εξόδου από το σύνολο. Ίσως η πιο δημοφιλής μέθοδος αποασαφοποίησης είναι κεντροειδής (centroid), η οποία επιστρέφει το κέντρο της περιοχής κάτω από την καμπύλη.

Άλλες μέθοδοι αποασαφοποίησης είναι οι : *centroid, bisector, middle of maximum, largest of maximum, and smallest of maximum*.

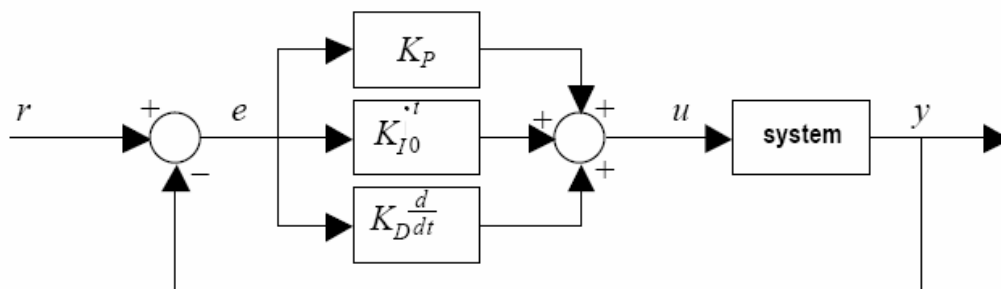
### **Postprocessing**

Στο κομμάτι αυτό του ελεγκτή ασαφής λογικής έχουμε την απεικόνιση του συνόλου τιμών σε ένα φυσικό σύνολο τιμών. Επίσης το τμήμα αυτό είναι δυνατόν να περιέχει και ένα κέρδος εξόδου που μπορεί να ρυθμιστεί, και μερικές φορές επίσης μπορεί να περιέχει και ένα ολοκληρωτή.

## **3.4 Συμβατικός PID Ελεγκτής (Conventional PID)**

Οι πιο γνωστοί συμβατικοί ελεγκτές θερμοκρασίας PID [5], είτε αναλογικοί είτε βασισμένοι σε μικροεπεξεργαστές, αποτελούνται από τρία μέρη. Από αυτό είναι φυσικό να θεωρηθεί ότι ο αλγόριθμος ελέγχου βασίζεται σε ένα αναλογικό κέρδος, σε μια ενέργεια ολοκλήρωσης και σε μια ενέργεια διαφόρισης. Μερικές φορές μια σχετική ρύθμιση του κέρδους ψύξης είναι διαθέσιμη και σε ακόμα πιο ακριβή όργανα , μπορεί να υπάρχει μια παράμετρος για την αναστολή του overshoot.

Παρακάτω παρατίθεται η σχηματική παράσταση ενός συμβατικού PID ελεγκτή κατά την οποία φαίνονται τα τρία μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τέτοιος ελεγκτής.



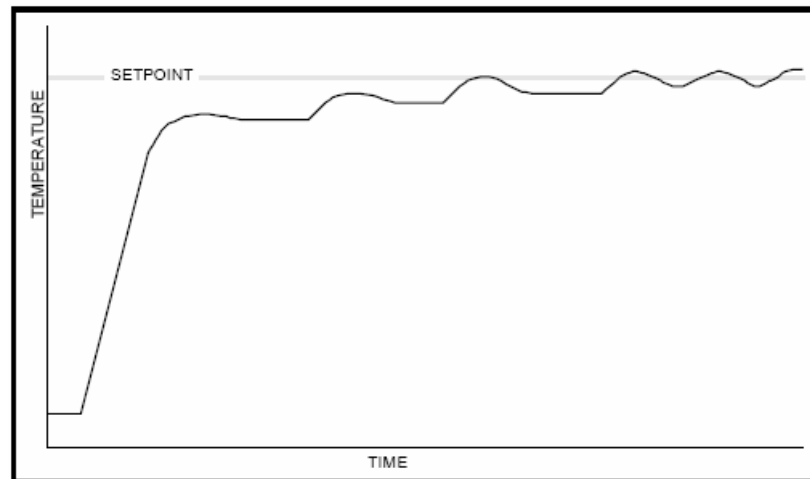
Σχήμα.3.4. Block Diagram ενός ελεγκτή PID

### Σημασία και Λειτουργία των P, I και D Κερδών

Το αναλογικό κέρδος ή αλλιώς ονομαζόμενο **proportional band** απλά ενισχύει το σφάλμα ανάμεσα στην επιθυμητή τιμή του χρήστη (set point) και στην μετρούμενη τιμή για την επαλήθευση ενός επιπέδου ισχύος. Ο όρος **proportional band (PB)** είναι εκείνος ο οποίος εκφράζει το κέρδος του ελεγκτή σε ποσοστιαία μονάδα της μετρούμενης τιμής του οργάνου. Για παράδειγμα ένα 25% PB ισοδυναμεί σε κέρδος 4 και ένα 10% PB αντιστοιχεί σε κέρδος 10. Αν θεωρηθεί η περίπτωση του ελεγκτή στην οποία η μετρούμενη τιμή είναι 1000 βαθμοί ένα 10% PB προσδιορίζει ένα εύρος ελέγχου 100 βαθμών γύρω από το setpoint. Ενώ αν η μετρούμενη τιμή είναι 25 βαθμοί κάτω από το setpoint τότε αυτό σημαίνει ότι η έξοδος του ελεγκτή θα είναι 25% θέρμανση.

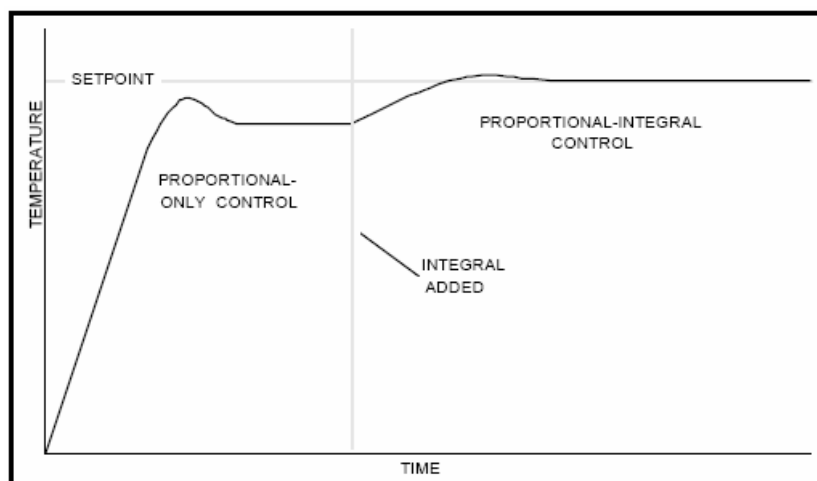
Πρέπει να σημειωθεί ότι το PB προσδιορίζει το μέγεθος της απόκρισης σε ένα σφάλματος. Αν το PB είναι πολύ μικρό το οποίο σημαίνει μεγάλος κέρδος τότε το σύστημα θα ταλαντώνεται εξαιτίας της πολύ μεγάλης απόκρισης. Ενώ μια μεγάλη τιμή στο PB, δηλαδή μικρό κέρδος, μπορεί να οδηγήσει τον έλεγχο σε μια κατάσταση που επιστημονικά ονομάζεται **wander** (κατάσταση παρεκτροπής) λόγω της έλλειψης μη αποκρισιμότητας. Η ιδανική περίπτωση είναι όταν το PB παίρνει τιμή με την οποία το σύστημα να μην αρχίζει να ταλαντούται.

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται η επίδραση περιορισμού του PB στο σημείο της ταλάντωσης.



Σχήμα.3.5. Εφαρμογή P control

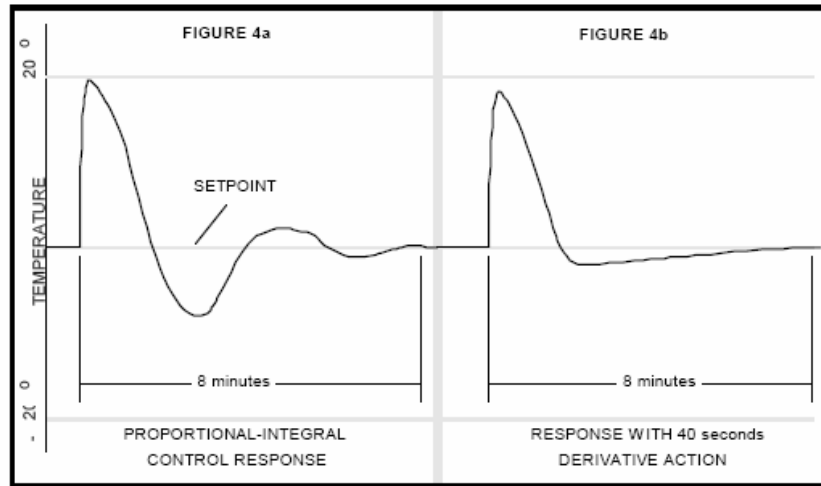
Η ενέργεια ολοκλήρωσης, είναι πιθανότατα ο πιο σημαντικός παράγοντας κατεύθυνσης ελέγχου στο set point. Ο όρος αυτός αργά αργά μετακινεί το επίπεδο εξόδου ως αποτέλεσμα του σφάλματος ανάμεσα στο set point και στην μετρούμενη τιμή. Αν η μετρούμενη τιμή είναι κάτω από το set point τότε ο όρος αυτός βαθμιαία θα αυξήσει την έξοδο με σκόπο να διορθώσει το σφάλμα. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την επίδραση του όρου ολοκλήρωσης σε ένα P ελεγκτή. Ο ελεγκτής τώρα είναι τύπου PI.



Σχήμα.3.6. Προσθήκη του I όρου.

Η ενέργεια της διαφορίσης διασφαλίζει μια ξαφνική ολίσθηση στην έξοδο σαν αποτέλεσμα της γρήγορης αλλαγής της μετρούμενης τιμής. Αν η μετρούμενη τιμή ρίχνει τον όρο διαφορίσης θα διασφαλίσει μια μεγάλη αλλαγή στην έξοδο σε μια προσπάθεια να διορθώσει τη διαταραχή πριν συνεχιστεί. Η ενέργεια διαφορίσης είναι πιθανότατα μια από τις πιο μη κατανοητές ενέργειες από τις τρεις. Επίσης είναι η πιο

ευεργετική για ανάνηψη από μικρές διαταραχές. Η διαφορική ταλάντωση είναι τυπικά μια κυκλική εκτροπή (wander) μακριά από το set point. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες κατά τις οποίες παρατηρείται η απόσβεση που προκαλεί η προσθήκη του D όρου σε ένα PI ελεγκτή.



Σχήμα.3.7. Απόσβεση λόγω προσθήκης του D όρου.

Το D κομμάτι, όποτε χρησιμοποιείται, συχνά εσφαλμένα συνδέεται με μείωση του overshoot παρά με το μεταβατική απόκριση. Για την αποτελεσματική χρήση του D όρου ώστε να διασφαλιστεί το overshoot κατά το ξεκίνημα, η σταθερή κατάσταση (steady state) μπορεί να αλλοιωθεί.

## **Κεφάλαιο 4 - Περιγραφή του Συστήματος EIB**

### **4.1 Γενικά για το πρότυπο EIB**

Το πρωτοκόλλο EIB [13] αποτελεί ένα βιομηχανικό πρότυπο το οποίο κατασκευάστηκε από την EIBA την οποία συνθέτουν ένας μεγάλος αριθμός από εταιρίες ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Η EIBA (<http://www.eiba.com>) ιδρύθηκε το 1990 και έχει σαν έδρα το Βέλγιο. Αποτελεί ένα μη κερδοσκοπικό οργανισμό με κύριο σκοπό τη διάδοση και ανάπτυξη του πρωτοκόλλου EIB. Επιπλέον η EIBA εγγυάται την προώθηση του εμπορικού σήματος, τη δημιουργία ενιαίων προδιαγραφών, την προτυποποίηση του λογισμικού αλλά και της εκπαιδευτικής διαδικασίας.

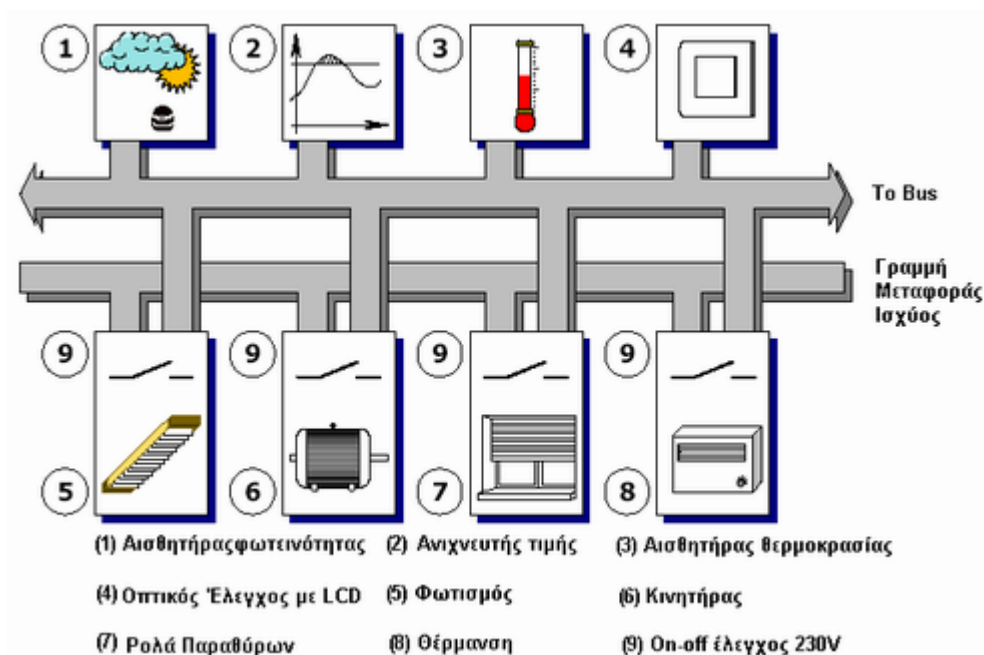
Πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι δεδομένα που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο EIB μεταδίδονται μέσω των εξής τριών φυσικών μέσων :

1. με συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων (twisted pair transmission)
2. με τη γραμμή μεταφοράς 220V (Powerline transmission)
3. με την ασύρματη ραδιοζεύξη (Wireless radio transmission)

### **4.2 Συνεστραμμένο Ζεύγος Καλωδίων**

Η μετάδοση μέσω συνεστραμμένου ζεύγους καλωδίων αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο μετάδοσης πληροφορίας στο δίκτυο. Αλλά είναι και το φυσικό μέσο που χρησιμοποιεί και το υπάρχον σύστημα που βρίσκεται στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

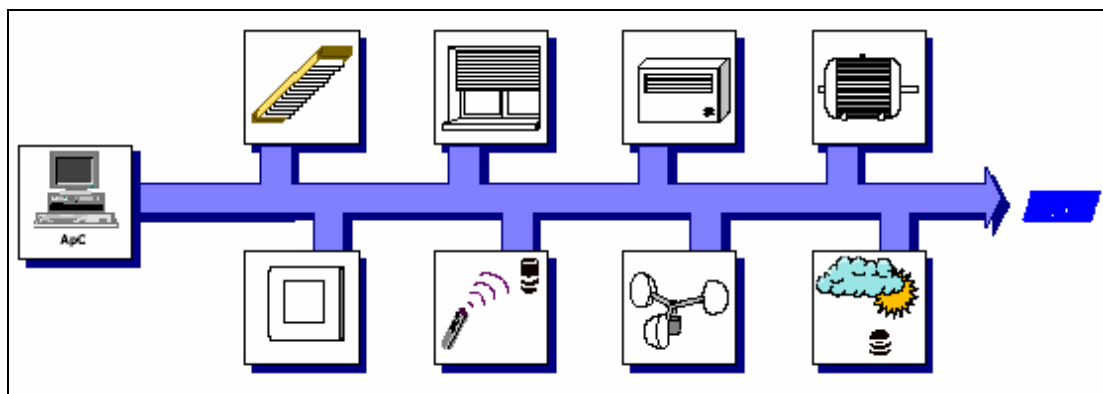
Αυτή η μέθοδος είναι η πιο διαδεδομένη για το λόγο του ότι έχει χαμηλό κόστος υλικών και παρέχει τη δυνατότητα για την κατασκευή ηλεκτρικών εγκαταστάσεων των οποίων η καλωδίωση είναι δομημένη. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του είναι ότι είναι ανεπηρέαστο από το θόρυβο και άλλες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Αυτό δίνει τη δυνατότητα της μετάδοσης της πληροφορίας μεταξύ απομακρυσμένων ηλεκτρικών συσκευών, ενώ δεν παρουσιάζονται προβλήματα κατά την τροφοδοσία του συστήματος, αφού η γραμμή μεταφοράς δεδομένων είναι υπεύθυνη και για την παροχή τροφοδοσίας ρεύματος στους κόμβους.



Σχήμα 4.1. Εγκατάσταση EIB με συνεστραμμένο ζεύγος

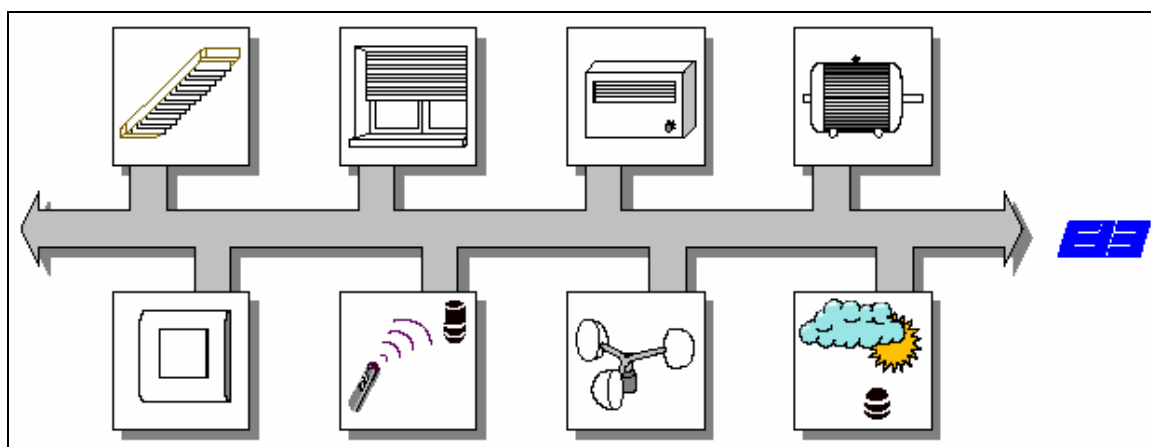
Οι συσκευές οι οποίες απαρτίζουν ένα σύστημα EIB ονομάζονται **συνδρομητές** και οι διαστάσεις τους δεν διαφέρουν από τις ηλεκτρικές συσκευές που τοποθετούνται σε κλασικούς ηλεκτρολογικούς πίνακες. Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει τη δομή ενός συστήματος που χρησιμοποιεί το πρότυπο EIB. Στο διάυλο επικοινωνίας είναι συνδεδεμένα τα αισθητήρια (δηλ. οι είσοδοι) και οι συσκευές (δηλ. οι έξοδοι) που πρέπει να ενεργοποιηθούν μέσω αυτού.

Η επικοινωνία μεταξύ των συνδρομητών είναι αμφίδρομη και πραγματοποιείται μέσω **τηλεγραφημάτων (bus telegrams)**. Κάθε συνδρομητής μπορεί να επικοινωνήσει δυνητικά με οποιονδήποτε άλλο, λόγω ότι ο τρόπος κατασκευής του διαύλου παρέχει ένα ανοιχτό σύστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ο έλεγχος του συστήματος να είναι αποκεντρωμένος, δηλαδή οι συνδρομητές, ανάλογα με τα σήματα ελέγχου που επεξεργάζονται, μπορούν να ελέγξουν την όλη εγκατάσταση. Όμως ο έλεγχος μπορεί να είναι και ο κεντρικός, σύμφωνα με τον οποίο, ένας **κύριος (master) – συνδρομητής** αναλαμβάνει να ελέγξει τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Συνήθως ο κεντρικός έλεγχος υλοποιείται από ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή που μέσω κατάλληλης προγραμματιστικής δομής χειρίζεται ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου τους συνδρομητές.



Σχήμα 4.2.Κεντρικά ελεγχόμενο σύστημα διαύλου

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι την είσοδο του συστήματος αποτελούν τα αισθητήρια και την έξοδο οι ενεργοποιητές. Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την περίπτωση του κεντρικού ελέγχου όπου ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής χειρίζεται τους συνδρομητές. Σε αντίθεση με τη δεύτερη εικόνα όπου ο έλεγχος είναι αποκεντρωμένος και μεταφέρεται στους συνδρομητές.



Σχήμα 4.3. Αποκεντρωμένο (ομότιμο) σύστημα διαύλου

Από τη δομή του διαύλου είναι φανερές οι δυνατότητες της οποίες παρέχει ακόμα και για την περίπτωση μεγάλων ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Αυτό γίνεται περισσότερο κατανοητό από το γεγονός ότι μια ηλεκτρική συσκευή μπορεί να ελέγχεται από διαφορετικά σημεία σε μια εγκατάσταση χωρίς να χρειάζεται κάποια σύνδεση της με το τμήμα του συστήματος που την ελέγχει. Επιπλέον αν μια συσκευή, για κάποιο λόγο τεθεί εκτός λειτουργίας, η εγκατάσταση δεν απενεργοποιείται αλλά συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά. Συνεχίζοντας με τα

πλεονεκτήματα του διαύλου επικοινωνίας, όπου αυτά είναι αποτέλεσμα της ιεραρχικής δομής, είναι δυνατόν να εντοπίζονται κόμβοι που αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω βλαβών ενώ είναι δυνατή η προσθήκη και η απομάκρυνση κάποιου συνδρομητή από την εγκατάσταση.

#### 4.3 Άλλοι τρόποι υλοποίησης του EIBus

Παρακάτω παρουσιάζονται άλλοι τρόποι υλοποίησης του EIBus [17].

##### **Γραμμή ισχύος (Powerline)**

Η μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιεί μία διαθέσιμη τροφοδοσία 220/400V (Γραμμή ισχύος). Η τεχνολογία αυτή είναι η πιο κατάλληλη για αναβάθμιση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων παλαιού τύπου.

##### **Ασύρματη μετάδοση(Radio transmission)**

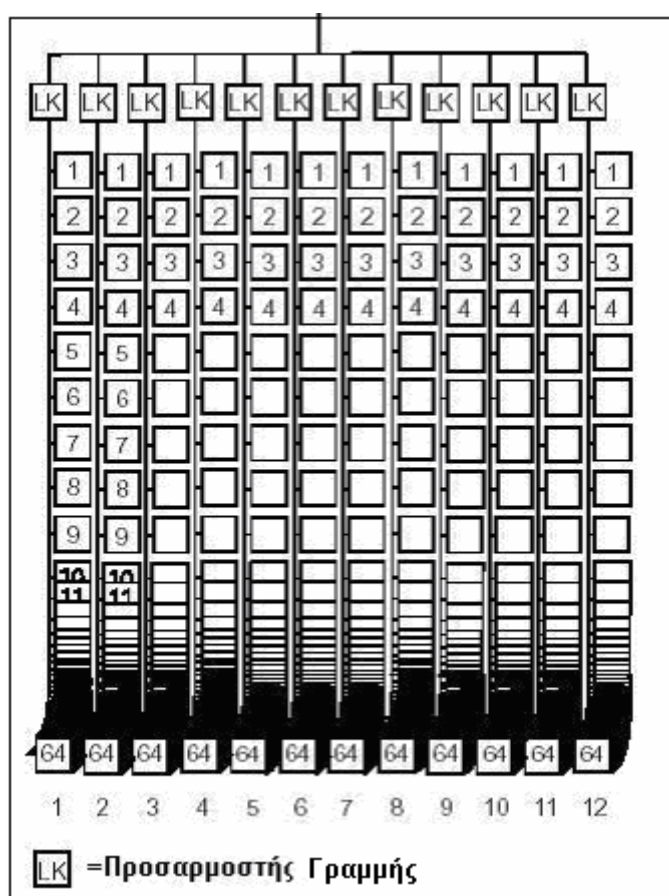
Χρησιμοποιούμε ραδιοκανάλι ώστε να μεταδώσουμε τα δεδομένα με ασύρματο τρόπο. Με την τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται λιγότερα καλώδια.

#### 4.4 Τοπολογία και Οργάνωση Διαύλου

Όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενη παράγραφο η τεχνολογία του διαύλου βασίζεται στην ιεραρχική δομή. Αυτή προσφέρει τη δυνατότητα της επέκτασης μιας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης για την εξέλιξη του EIB. Η εξέλιξη αυτή θα πρέπει να οδηγήσει σε ένα πρότυπο EIB που να είναι οικονομικά εφαρμόσιμο και να μπορεί να βρίσκει εφαρμογή από τις μικρές κλασικές ηλεκτρικές συσκευές μέχρι μεγάλες βιομηχανικές ή κτιριακές εγκαταστάσεις. Στην ιεραρχική δομή ένα σύστημα EIB αποτελείται από τις εξής μονάδες :

- **Γραμμή (Line):** είναι η πιο μικρή και απλή μονάδα στο σύστημα. Ο μέγιστος αριθμός συνδρομητών που μπορούν να τοποθετηθούν στη γραμμή είναι 64 χωρίς όμως να κρίνεται αναγκαία και η τοποθέτηση **επαναληπτών (repeaters)**. Για το συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων το μέγιστο μήκος που μπορεί να έχει μια γραμμή είναι τα 700 m με ρυθμό μετάδοσης τα 9600 bps .

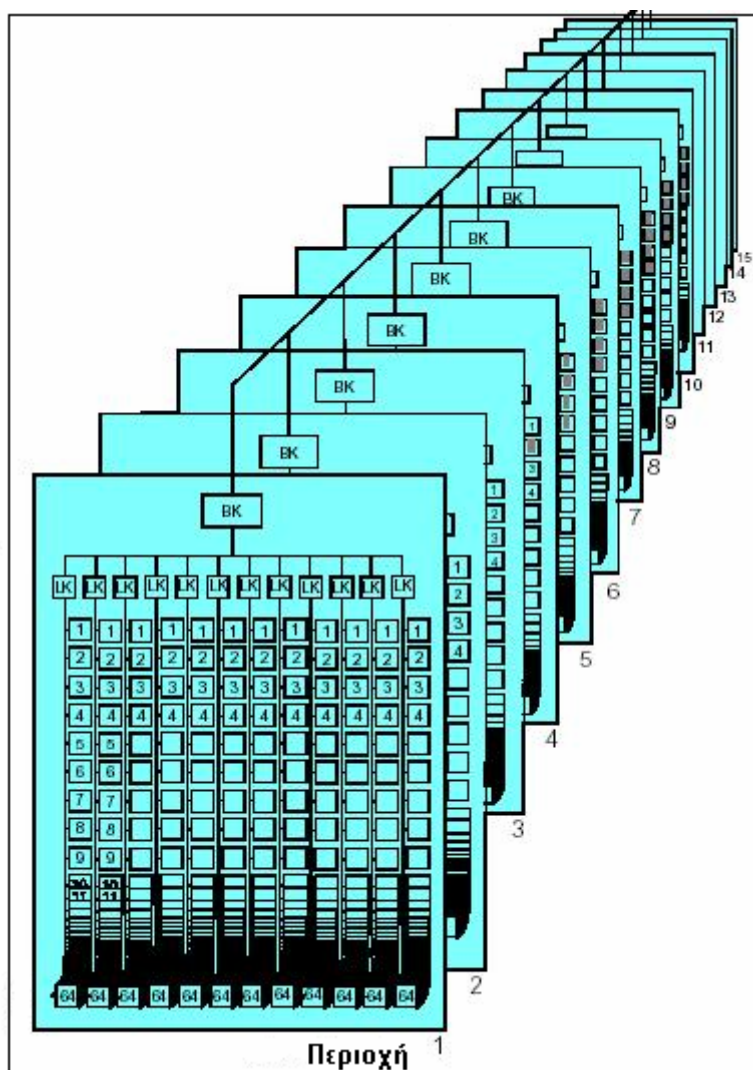
- **Περιοχές (Areas):** με τη βοήθεια των *προσαρμοστών γραμμής (Line Couplers)* είναι δυνατή η σύνδεση μέχρι και 12 γραμμών με αποτέλεσμα το σχηματισμό περιοχών με 768 συνδρομητές. Οι προσαρμοστές αυτοί επιτρέπουν την πληροφορία να φθάσει στους συνδρομητές για τους οποίους είναι υπεύθυνοι. Επιπλέον, ένας προσαρμοστής γραμμής δεν επιτρέπει τη διαρροή πληροφορίας εκτός των ορίων της περιοχής του οπότε υπάρχει ταυτόχρονη ροή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών περιοχών και έτσι αυξάνεται το συνολικό throughput του συστήματος.



Σχήμα 4.4. Σύνδεση γραμμών με προσαρμοστές

Κάθε γραμμή, που περιέχεται σε ένα σύστημα EIB, τροφοδοτείται από ένα ειδικά πιστοποιημένο τροφοδοτικό γραμμής (Line Power Supply) με αποπνικτικό πηνίο (Choke). Οι συνδρομητές τροφοδοτούνται από το πιστοποιημένο τροφοδοτικό με την αναγκαία για τη λειτουργία τους τάση. Παρόλα αυτά μερικοί συνδρομητές χρειάζονται να τροφοδοτούνται από διαφορετικές πηγές ενέργειας των 220V και όχι

από το ΕΙΒ τροφοδοτικό. Οι προσαρμοστές γραμμής μπορούν να συνδεθούν μέχρι και 15 περιοχές και ο συνολικός αριθμός των συνδρομητών φτάνει τους 11520.



Σχήμα 4.5. Πλήρης τοπολογία συστήματος βασισμένου σε διάβλο ΕΙΒ.

Οι γραμμές τροφοδοτούνται από ένα τροφοδοτικό, όπως περιγράφεται και παραπάνω, το οποίο είναι γλαβανικά απομονωμένο από τις υπόλοιπες γραμμές για την αποφυγή βραχυκυκλώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αν μια γραμμή για κάποιο λόγο βγει εκτός λειτουργίας τότε οι υπόλοιπες γραμμές δεν επηρεάζονται από τη βλάβη και το σύστημα συνεχίζει τη λειτουργία του. Η ιεραρχική δομή προσφέρει την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφοριών αρκεί να μην λαμβάνουν χώρα στη ίδια γραμμή αλλά σε διαφορετικές. Ενώ με την ταυτόχρονη μετάδοση δεν επηρεάζονται τα δεδομένα της μιας γραμμής από την άλλη.

## 4.5 Τηλεγραφήματα, πρόσβαση στο δίαυλο και συσκευές διαύλου

Την πληροφορία την οποία ανταλλάσσουν οι συνδρομητές μιας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης έχει τη μορφή τηλεγραφήματος ενώ η μετάδοση στο δίαυλο είναι συμμετρική. Για την αποφυγή των διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών κατά τη μετάδοση ενός τηλεγραφήματος γίνεται χρήση διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο γραμμών και όχι μεταξύ γραμμής και γης. Αν υπάρξει κάποια παρεμβολή κατά τη διαδικασία μετάδοσης η πληροφορία δεν αλλοιώνεται και ο ρυθμός μετάδοσης της παραμένει σταθερός. Ο ρυθμός αυτός μετάδοσης είναι 9600 bps και για ένα μέσο μέγεθος τηλεγραφήματος γύρω στα 30 *bytes*, ο μέσος χρόνος μετάδοσης είναι 25 *ms*. Τα αποτελέσματα αυτά καλύπτουν πλήρως και το υπάρχον σύστημα στο εργαστήριο.

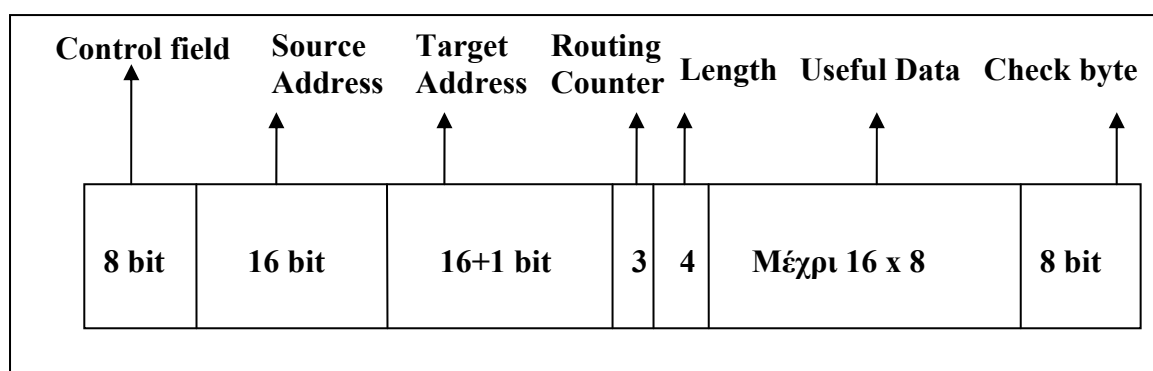
### 4.5.1 Πρόσβαση στο Δίαυλο

Κατά τη μετάδοση της πληροφορίας είναι δυνατόν να εμφανιστεί μια απρόσκοπτη ροή δεδομένων μεταξύ των συνδρομητών. Για το λόγο αυτό η μετάδοση θα πρέπει να είναι συντονισμένη. Το πρωτόκολλο EIB καθορίζει με τέτοιο τρόπο την κίνηση της πληροφορίας ώστε τα διάφορα τηλεγραφήματα να ακολουθούν μια συγκεκριμένη σειρά. Επιπλέον κρίνεται απαραίτητο ένας μόνο συνδρομητής τη φορά να χρησιμοποιεί το δίαυλο. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν περισσότεροι του ενός συνδρομητές προσπελάσουν το δίαυλο, τότε ενεργοποιείται ένας μηχανισμός που αποτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας. Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) και αποτελεί παραλλαγή του αλγορίθμου CSMA/CD. Έτσι λοιπόν αν περισσότεροι του ενός κόμβοι μεταδώσουν τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός αυτός και αποτρέπει την ταυτόχρονη αυτή μετάδοση. Οι κόμβοι που εμπλέκονται στην σύγκρουση θα επαναμεταδώσουν τα δεδομένα τους ύστερα από τυχαίο χρόνο. Ο μηχανισμός αυτός όμως δεν ενεργοποιείται στην περίπτωση κατά την οποία υπάρξει κάποιο επείγον μήνυμα. Τέτοια μηνύματα έχουν προτεραιότητα σε σχέση με τα συνηθισμένα. Έτσι στην περίπτωση που δύο κόμβοι θελήσουν να μεταδώσουν τα δεδομένα τους και ο ένας εκ των δύο θέλει να μεταδώσει κάποιο

επείγον μήνυμα, πρώτος θα μεταδώσει εκείνος που περιέχει το επείγον μήνυμα και έπειτα ο άλλος.

#### 4.5.2 Δομή Τηλεγραφήματος και Διευθυνσιοδότηση

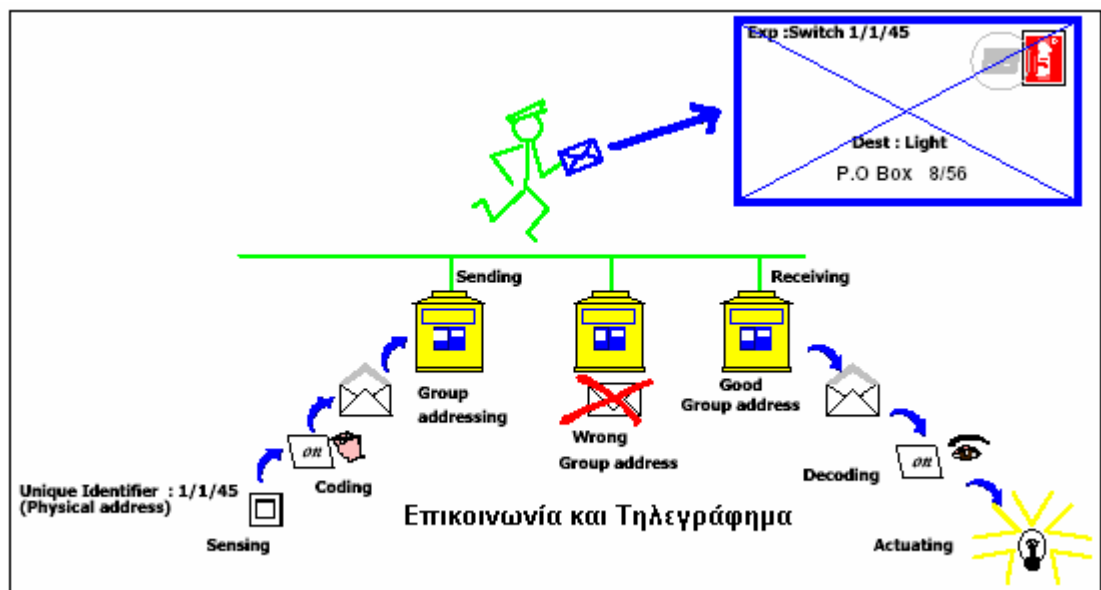
Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται η μορφή ενός τυπικού τηλεγραφήματος που ανταλλάσσεται μεταξύ των συνδρομητών του διαύλου.



Σχήμα 3.6. Δομή Τηλεγραφήματος.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται τα πεδία από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό μήνυμα. Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στο πεδίο διευθύνσεων που αποτελείται από το Target Address (διεύθυνση προορισμού) και από το Source Address (διεύθυνση πηγής). Η διεύθυνση πηγής είναι μοναδική για κάθε συνδρομητή και υποδηλώνει τη γραμμή και την περιοχή στην οποία ανήκει ο συνδρομητής ο οποίος αποστέλλει το μήνυμα. Αυτή η διεύθυνση που χαρακτηρίζεται και σαν **φυσική διεύθυνση (physical address)** αποκτάται από τον συνδρομητή κατά το σχεδιασμό της εγκατάστασης με το εργαλείο προγραμματισμού ETS.

Αυτή η διεύθυνση χρησιμοποιείται για την εύρεση κάποιου συνδρομητή αφού δηλώνει τη θέση του αλλά και για τη διόρθωση κάποιου σε περίπτωση σφάλματος. Από την άλλη πλευρά οι διευθύνσεις προορισμού χαρακτηρίζονται και σαν **λογικές διευθύνσεις (logical address)** που επιτρέπουν την συμμετοχή περισσότερων του ενός συνδρομητών. Ενώ μια συσκευή μπορεί να συμμετάσχει σε περισσότερες από μια διευθύνσεις ομάδας.



Σχήμα 4.7. Μεταφορά Τηλεγραφήματος.

Στο σχήμα 4.7 απεικονίζεται η διαδικασία μετάδοσης ενός τηλεγραφήματος μεταξύ των συσκευών μιας εγκατάστασης.

#### 4.6 Το λογισμικό ETS 2 και η Βάση δεδομένων του κατασκευαστού

Το ETS 2 αποτελεί ένα πρόγραμμα στον υπολογιστή ώστε να λειτουργήσει η εγκατάσταση ενώ αποτελεί για πολλούς τεχνικούς μια εφαρμοσμένη τεχνική. Επιτρέπει τόσο το σχεδιασμό όσο και την ανάπτυξη μιας εγκατάστασης EIB και σε επίπεδο προγραμματισμού αλλά και σε επίπεδο project management.

Το ETS 2 είναι ένα εργαλείο το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να προσφέρει ευελιξία και επεκτασιμότητα ενώ η δομή του είναι τέτοια ώστε να μπορούν να γίνουν υλοποιήσεις για εγκαταστάσεις συμβατές με το πρότυπο EIB. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος αυτού είναι ότι μπορεί να δεχθεί βάσεις δεδομένων συνδρομητών διαφορετικών κατασκευαστών δίνοντας στο σχεδιαστή τη δυνατότητα υλοποίησης εγκαταστάσεων με συσκευές, διαφορετικών κατασκευαστών, που είναι συμβατές με το EIB. Η επικοινωνία του προγράμματος με την εγκατάσταση γίνεται με τη διασύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή, στον οποίο είναι εγκατεστημένο το ETS 2, με το N-148 Interface Bus με μια RS-232 θύρα του υπολογιστή μέσω σειριακού καλωδίου.

## **Προγραμματισμός Εγκατάστασης (Project Design)**

Ένα από τα σπουδαιότερα, αν όχι το σπουδαιότερο, τμήμα του ETS 2 είναι η επιλογή του σχεδιασμού έργου (project design). Από το τμήμα αυτό ξεκινά η δημιουργία κάθε νέου έργου ενώ μπορούν να γίνουν τροποποιήσεις και αλλαγές ενός υπάρχοντος έργου. Επίσης στο τμήμα αυτό δημιουργούνται οι διευθύνσεις ομάδος καθώς δηλώνεται και η τοπολογία των συσκευών και ορίζονται οι σχέσεις των αντικειμένων επικοινωνίας με τις διευθύνσεις ομάδος. Επιπλέον μπορεί κανείς να δει σε πιο σημείο του κτιρίου βρίσκεται κάποια συσκευή και να του παρουσιαστούν οι σχέσεις στοιχείων επικοινωνίας με διευθύνσεις ομάδος. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι δεν είναι αναγκαίο να γίνει η όλη σχεδίαση στον υπολογιστή όταν αυτός είναι συνδεδεμένος στην εγκατάσταση, αλλά κάπου αλλού και στο τέλος να γίνει η μεταφορά του προγράμματος σε κάθε μια συσκευή μεταφέροντας ένα φορητό υπολογιστή στο χώρο εγκατάστασης.

## **Κεφάλαιο 5 - Πειραματική Μεθοδολογία**

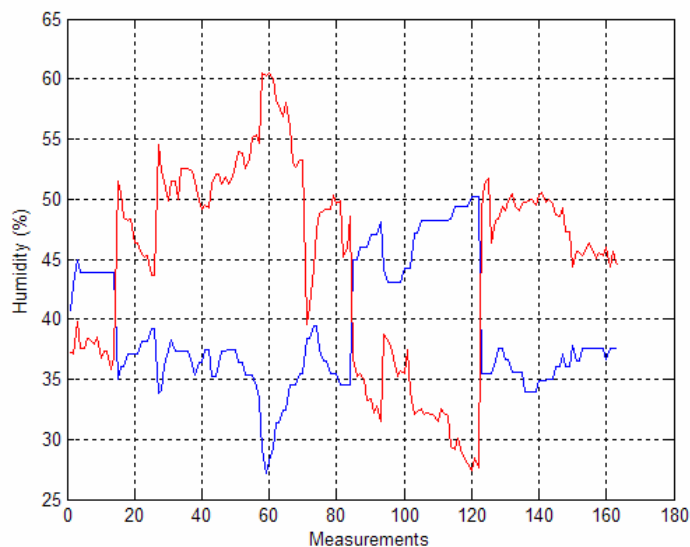
### **5.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται όλη η διαδικασία υλοποίησης και εφαρμογής των fuzzy PID και συμβατικού PID στο σύστημα EIB του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

### **5.2 Βαθμονόμηση Αισθητηρίων**

Πριν την εφαρμογή των ελεγκτών στο σύστημα EIB κρίθηκε αναγκαία η βαθμονόμηση των αισθητηρίων. Τα αισθητήρια, που βρίσκονται στο ισόγειο του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης, παίζουν σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή και πιστοποίηση των ρυθμιστών ελέγχου διότι από αυτά προέρχονται οι διάφορες τιμές τις οποίες επεξεργάζονται οι ελεγκτές. Για αυτό το λόγο πρέπει το σύστημα να επεξεργάζεται τις σωστές τιμές των παραμέτρων. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια φορητών οργάνων των οποίων οι τιμές συγκρίνονταν με τις τιμές που προέκυπταν από τα αισθητήρια. Πρακτικά οι τιμές των ψηφιακών φορητών οργάνων είναι πραγματικές και με βάση αυτές θα έπρεπε να ρυθμιστούν κατάλληλα τα αισθητήρια ώστε να δίνουν τις ίδιες ή παραπλήσιες τιμές (με όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση). Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης παρατηρήθηκε ότι εκτός από το αισθητήριο της υγρασίας όλα τα υπόλοιπα αισθητήρια έδιναν τιμές αρκετά κοντά με αυτές των φορητών οργάνων.

Για την βαθμονόμηση του υγρασιόμετρου αφιερώθηκε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα για την πιστοποίησή του. Αυτή ήρθε εις πέρας με τη βοήθεια ενός φορητού οργάνου, του Skymaster. Με το όργανο αυτό υπολογιζόταν σε κάθε κύκλο του συστήματος (με χρήση του ελεγκτή ασαφούς λογικής) η υγρασία τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Από τις διάφορες μετρήσεις προέκυψε το συμπέρασμα ότι η εξίσωση που περιγράφει την υγρασία είναι μια εξίσωση 2<sup>ου</sup> βαθμού. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές που προέκυψαν από τη μέτρηση της υγρασίας από το αισθητήριο και από το Skymaster.

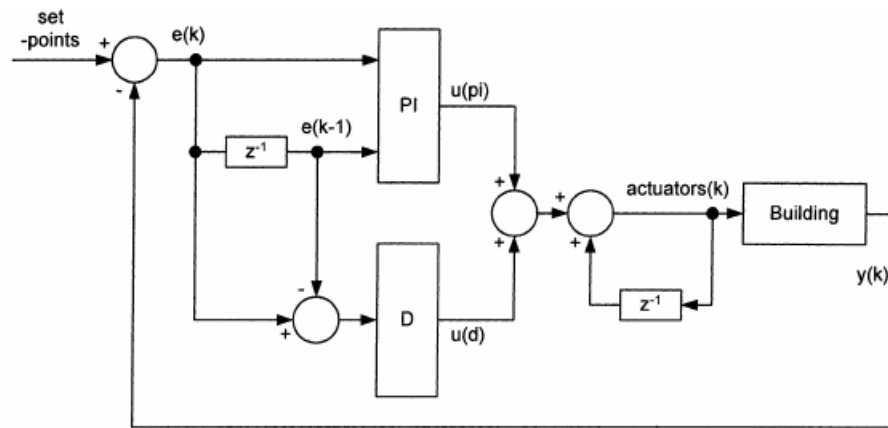


Σχήμα.5.1. Αποτελέσματα μετρήσεων υγρασίας

Από τη μελέτη του γραφήματος προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι τιμές του αισθητηρίου κυμαίνονται αντίθετα από αυτές του φορητού οργάνου. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι όταν η καμπύλη των τιμών του Skymaster αυξάνεται τότε η καμπύλη τιμών του αισθητηρίου του ΕΙΒ συστήματος μειώνεται. Για αυτό και το γράφημα έχει την παραπάνω μορφή. Για την εύρεση της εξίσωσης που περιγράφει την υγρασία έγινε προσέγγιση των τιμών με τη βοήθεια του Matlab και προέκυψε ότι η εξίσωση που περιγράφει με σχετική ακρίβεια και χαμηλό υπολογιστικό κόστος την υγρασία είναι μια εξίσωση 2<sup>ου</sup> βαθμού.

### 5.3 Υλοποίηση και Εφαρμογή του PID Ασαφούς Λογικής

Ο PID ελεγκτής που παρουσιάζεται παρακάτω είναι ένας non-adaptive PID ελεγκτής ασαφούς λογικής [1] και αποτελείται από δύο μέρη, το ένα μέρος είναι το PI κομμάτι και το άλλο είναι το D κομμάτι.



Σχήμα.5.2. Fuzzy PID block diagram

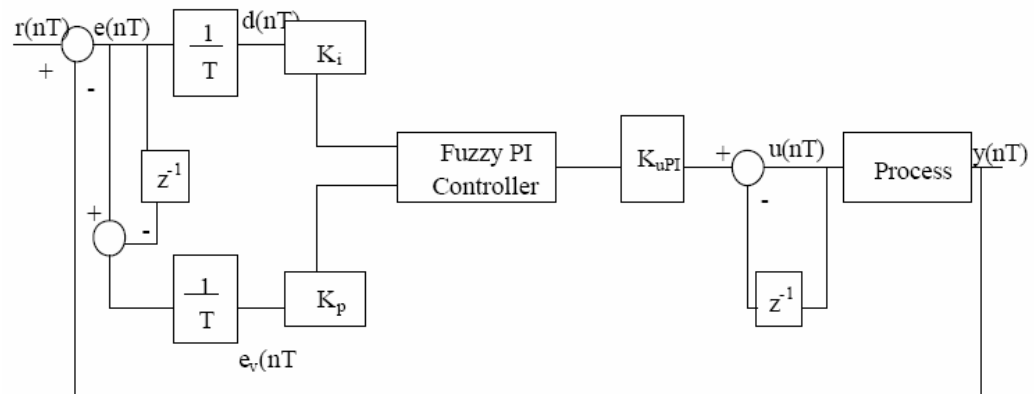
Οι μεταβλητές, οι οποίες ελέγχθησαν, είναι το PMV,  $CO_2$  και η φωτεινότητα (illuminance). Τα σφάλματα για κάθε μια από αυτές τις μεταβλητές υπολογίζονται σαν τη διαφορά μεταξύ των επιθυμητών, προς τους χρήστες, τιμών των μεταβλητών με τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές αυτών. Το τρέχον σφάλμα  $e(k)$  και το προηγούμενο σφάλμα  $e(k-1)$  αποτελούν τις εισόδους για το PI κομμάτι. Η έξοδος του PI κομματιού είναι η αλλαγή στις τιμές των ενεργοποιητών (actuators). Αυτοί οι ενεργοποιητές είναι on-off του όλου συστήματος των a/c, ο μηχανισμός ενεργοποίησης του παραθύρου, η συσκευή του σκίαστρου και τα ηλεκτρικά φώτα. Εν συνεχεία, η διαφορά μεταξύ του τρέχοντος και του προηγούμενου σφάλματος, δηλαδή ο όρος  $ce(k) = e(k) - e(k-1)$ , είναι η είσοδος του D κομματιού του οποίου η έξοδος είναι η ίδια με αυτή του PI μέρους.

Θα πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι επειδή το D κομμάτι ενός PID ελεγκτή αυξάνει το χρόνο ανόδου και μειώνει το σφάλμα σχετικά το overshoot, έπειτα από συνεννόηση με την κ. Κολοκοτσά, αποφασίστηκε να μην ληφθεί υπόψιν το D κομμάτι. Το ζήτημα ήταν ότι στην περίπτωση που ο PI πλέον ελεγκτής συμπεριφερόταν καλά, όπως και έγινε, το D κομμάτι δεν χρειαζόταν να υπολογιστεί. Σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε να υπολογιστεί. Στην ουσία ο ρυθμιστής ελέγχου που υλοποιήθηκε είναι ένας PI ασαφούς λογικής και όχι ένας PID ασαφούς λογικής. Επίσης ένα άλλο γεγονός το οποίο πρέπει να τονισθεί είναι ότι το I κομμάτι του ελεγκτή δεν υπολογίζει το συνολικό άθροισμα των σφαλμάτων (sum of errors).

Αναλυτικότερα το I κομμάτι υλοποιείται από τον τύπο  $K_I = \int_0^t e(\tau) d\tau$ . Ο τύπος αυτός

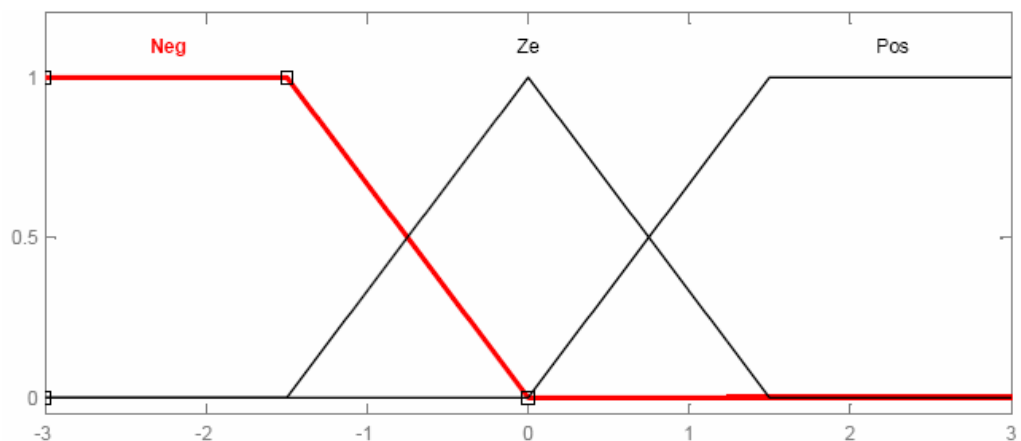
υπολογίζει το άθροισμα όλων των σφαλμάτων από την αρχή που το σύστημα θα τεθεί

σε λειτουργία. Στην πραγματικότητα όμως όσον αφορά τον ελεγκτή που εφαρμόστηκε στο σύστημα ΕΙΒ το I κομμάτι αθροίζει μόνο το τρέχον και το προηγούμενο σφάλμα κάθε φορά. Απλά διαδραματίζει το ρόλο μιας πολύ μικρής μνήμης.

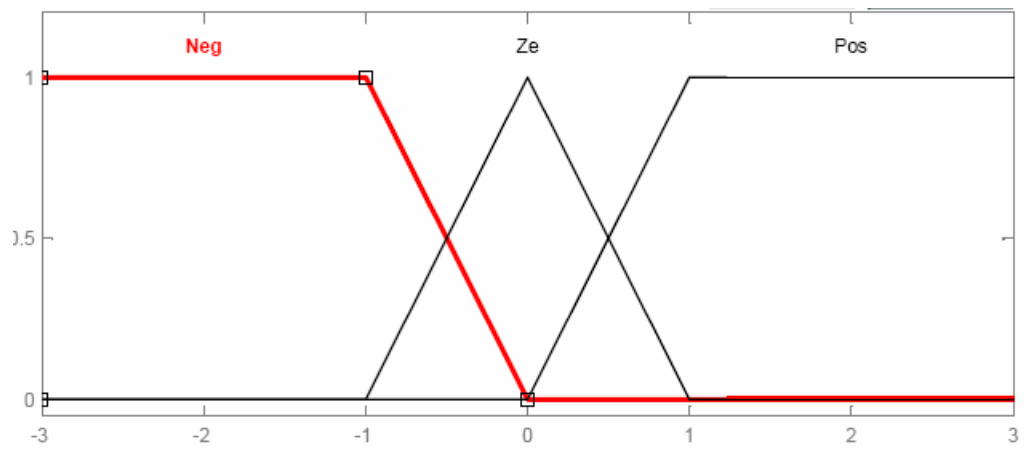


Σχήμα.5.3. Σύστημα Ελέγχου PI Controller

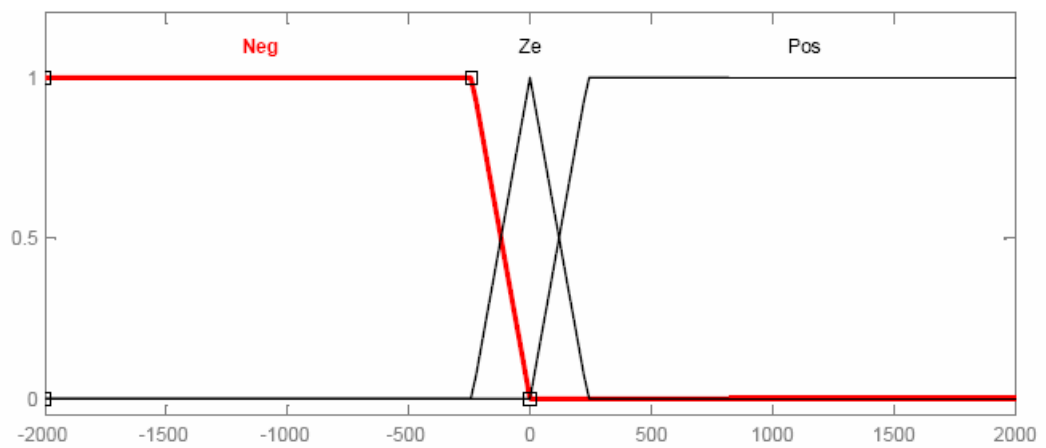
Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά οι συναρτήσεις μέλους (MF) των μεταβλητών των οποίων οι τιμές ελέγχθησαν. Πρώτα παρουσιάζονται οι MF's των εισόδων και έπειτα οι MF's των εξόδων.



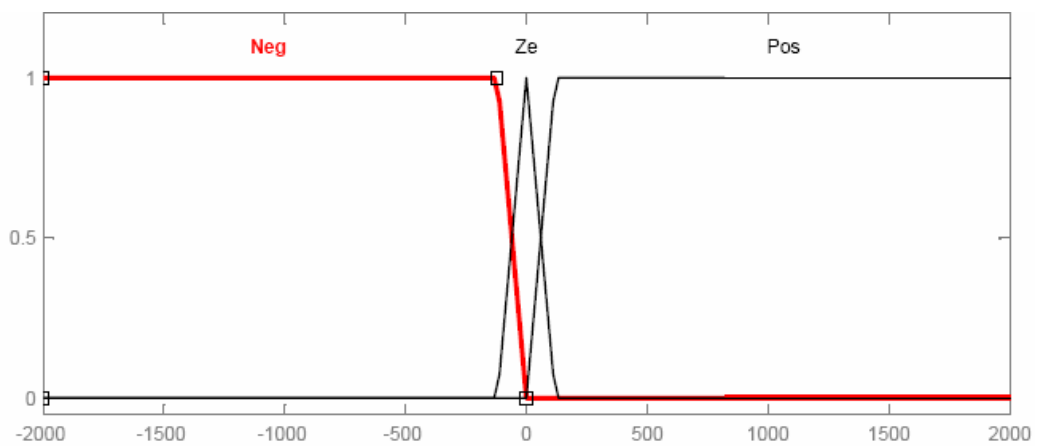
Σχήμα.5.4. Μεταβλητή Εισόδου PMVe



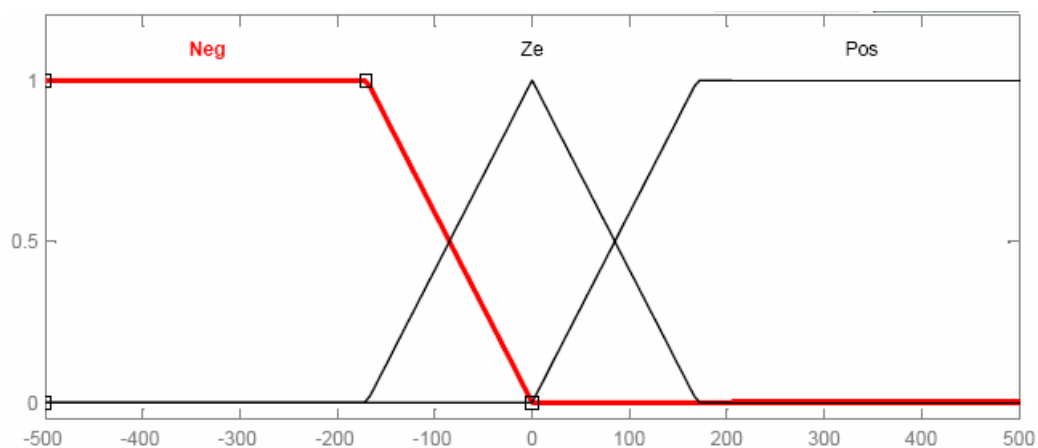
Σχήμα.5.5. Μεταβλητή Εισόδου PMVt



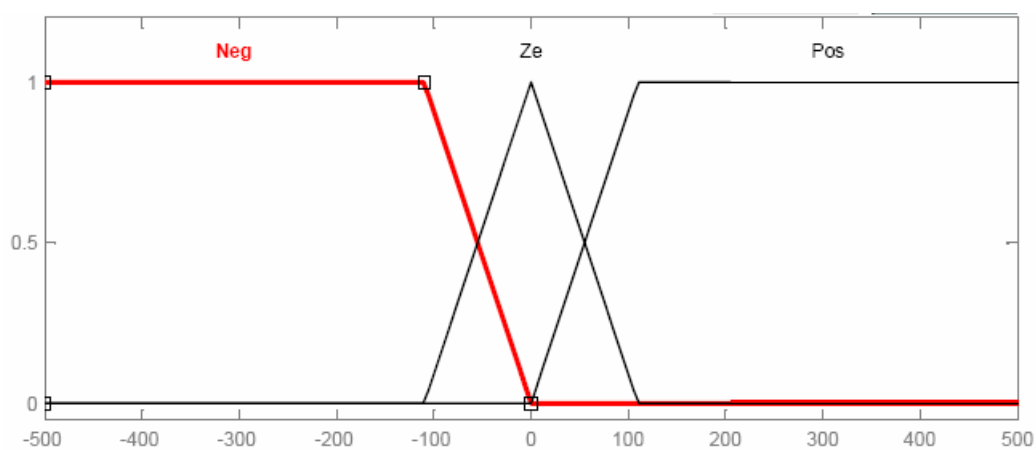
Σχήμα.5.6. Μεταβλητή Εισόδου ie



Σχήμα.5.7. Μεταβλητή Εισόδου ir

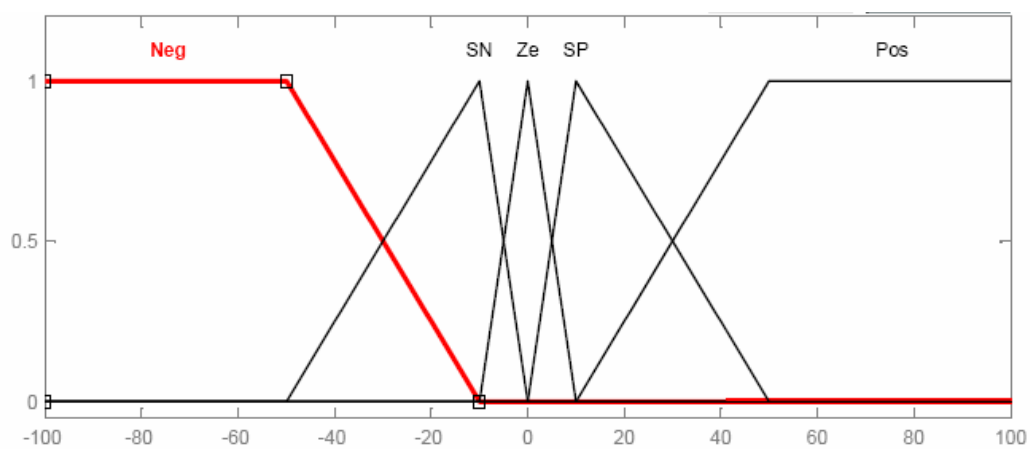


Σχήμα.5.8. Μεταβλητή Εισόδου  $CO_2e$

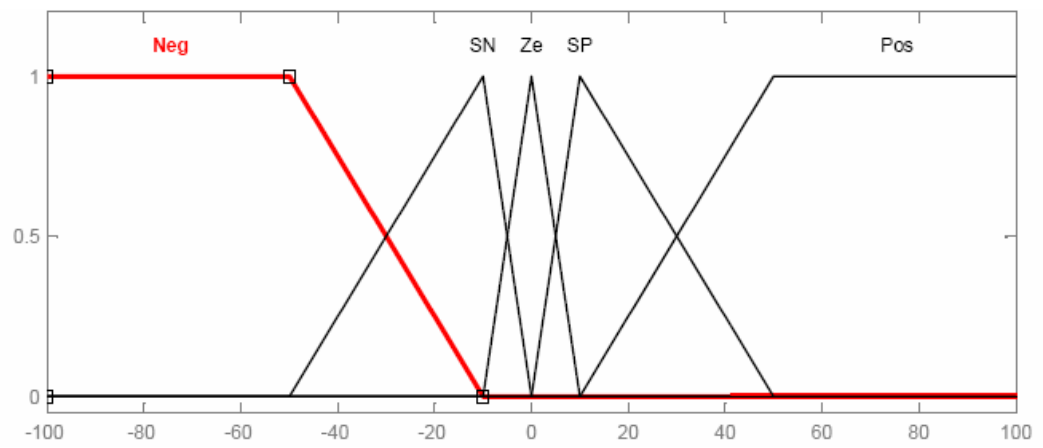


Σχήμα.5.9. Μεταβλητή Εισόδου  $CO_{2ce}$

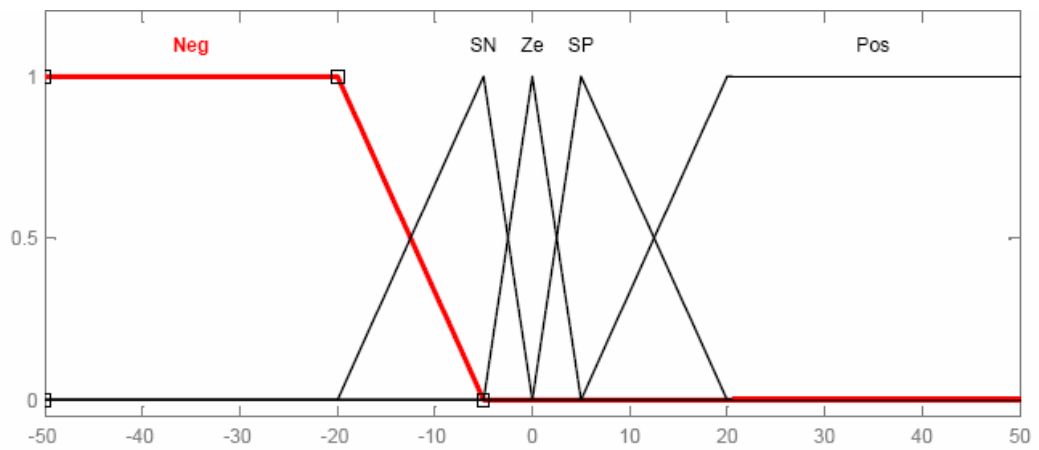
Οι συναρτήσεις μέλους για τις εξόδους είναι :



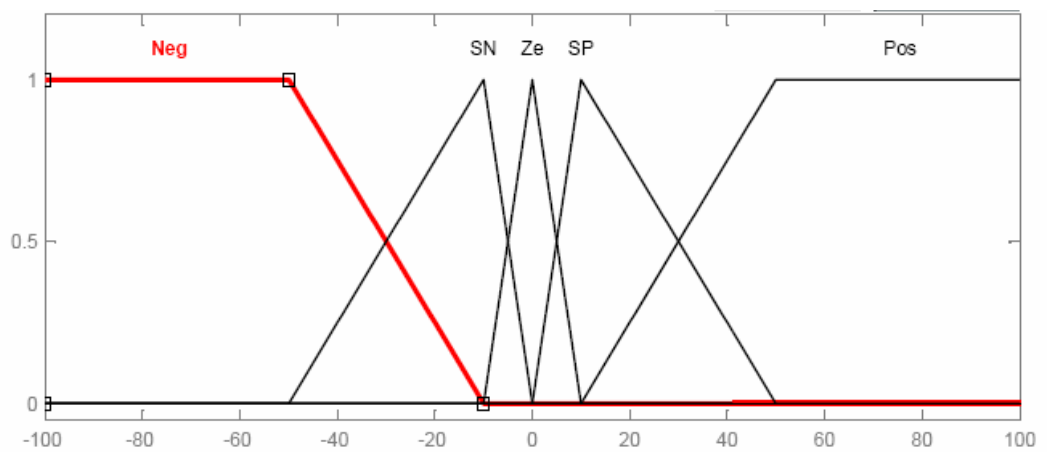
Σχήμα 5.10. Μεταβλητή Εξόδου A/C



Σχήμα.5.11. Μεταβλητή Εξόδου Lights



Σχήμα.5.12. Μεταβλητή Εξόδου Παράθυρο



Σχήμα.5.13. Μεταβλητή Εξόδου Σκίαστρο

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο ρυθμιστής αυτός χρησιμοποιεί την ασαφή λογική για τη λειτουργία του. Όποτε η απόφαση για το ποια θα είναι η έξοδος του υλοποιείται από τους κανόνες της ασαφούς λογικής.

### Κανόνες

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κανόνες με τους οποίους έγινε η υλοποίηση του PID ασαφούς λογικής και ενεργοποιούνταν ο μηχανισμός κίνησης του παραθύρου και τα κλιματιστικά για τη ρύθμιση της ροής του αέρα και για τη θέρμανση/ψύξη του χώρου του εργαστηρίου αντίστοιχα.

PMVe				
PMVce		Ze	Neg	Pos
	Ze	$ac \rightarrow Ze$	$ac \rightarrow SP$	$ac \rightarrow SN$
	Neg	$ac \rightarrow Pos$	$ac \rightarrow Pos$	$ac \rightarrow SP$
	Pos	$ac \rightarrow Neg$	$ac \rightarrow SN$	$ac \rightarrow Neg$

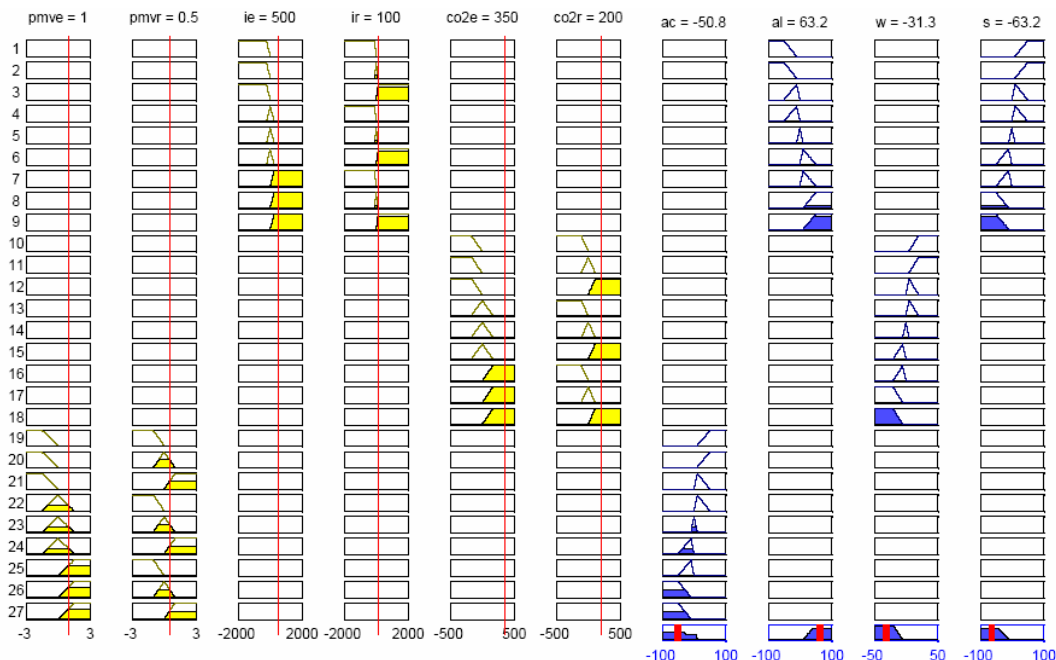
Πίνακας 5.1. Κανόνες χειρισμού των κλιματιστικών από τον fuzzy PID

CO <sub>2e</sub>				
CO <sub>2ce</sub>		Ze	Neg	Pos
	Ze	$w \rightarrow Ze$	$w \rightarrow SP$	$w \rightarrow SN$
	Neg	$w \rightarrow Pos$	$w \rightarrow Pos$	$w \rightarrow SP$
	Pos	$w \rightarrow Neg$	$w \rightarrow SN$	$w \rightarrow Neg$

Πίνακας 5.2. Κανόνες χειρισμού του παραθύρου από τον fuzzy PID

Από τους παραπάνω πίνακες με w δηλώνεται το παράθυρο και με ac τα κλιματιστικά. Στους πίνακες αυτούς φαίνονται καθαρά τι τιμές έδινε ο ελεγκτής στους ενεργοποιητές των συσκευών, ανάλογα με την τιμή της εισόδου, προκειμένου να εκτελέσουν τη συγκεκριμένη εντολή.

Στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 5.14) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα στο οποίο προσομοιώνεται στο Matlab η λειτουργία του PID ασαφούς λογικής για συγκεκριμένες συνθήκες.



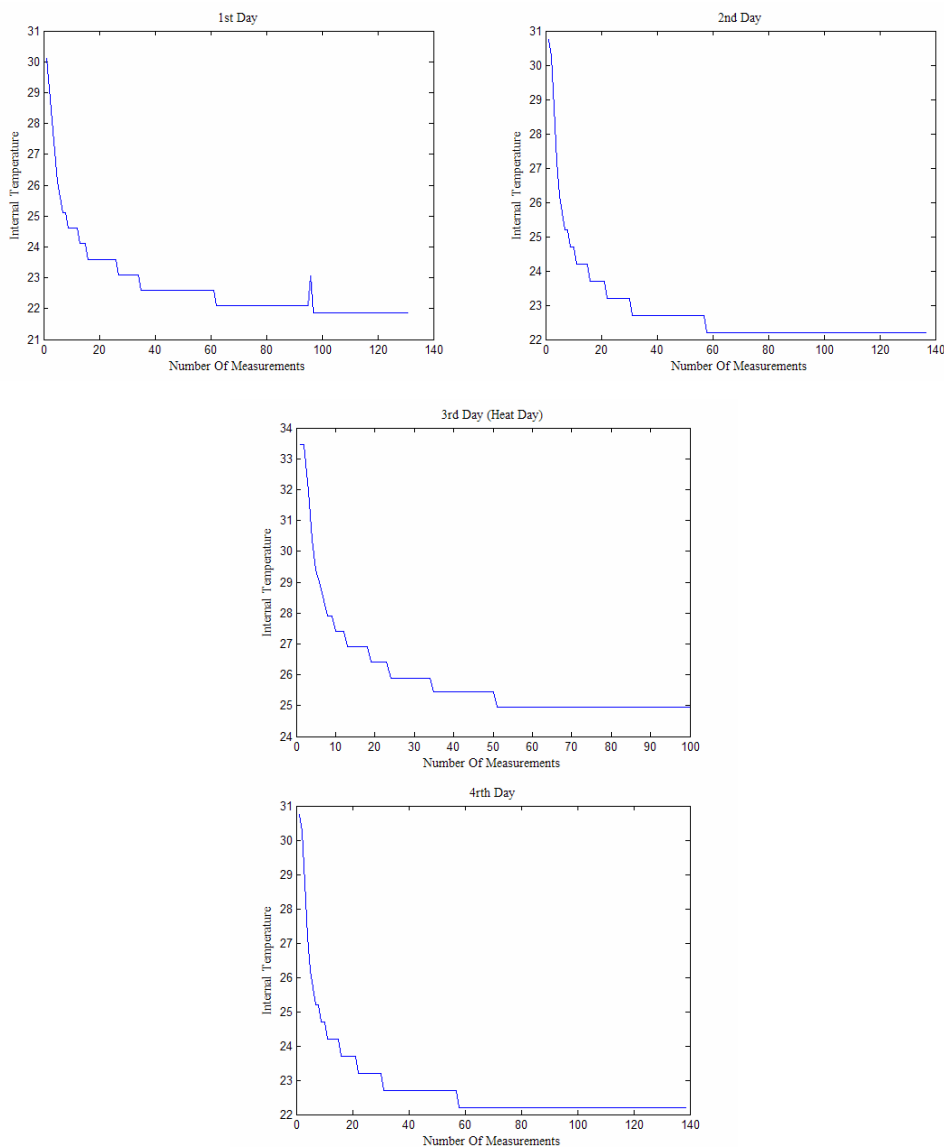
Σχήμα.5.14. Σχηματική αναπαράσταση των κανόνων

## 5.4 Υλοποίηση και Εφαρμογή του PID Ελεγκτή

Όπως αναφέρθηκε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο (Θεωρία Ελεγκτών) για να είναι δυνατή η υλοποίηση ενός ελεγκτή θα πρέπει να υπολογιστούν οι επιμέρους παράμετροί του. Στην περίπτωση του PID ελεγκτή πρέπει να υπολογιστούν τα  $K_c, T_i, T_d$ . Ο υπολογισμός αυτών των παραμέτρων, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3, έγινε με βάση τη μέθοδο των Ziegler – Nichols που ονομάζεται **process reaction curve method**. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή πρέπει να υπολογιστεί η καμπύλη του μεγέθους με βάση το οποίο θα υπολογιστούν οι παράμετροι. Το μέγεθος αυτό είναι η εσωτερική θερμοκρασία του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Για την εύρεση της καμπύλης της εσωτερικής θερμοκρασίας χρειάστηκαν 4 μέρες μετρήσεων ώστε να προκύψει η ιδανική μορφή της. Οι μετρήσεις αυτές προκύπτουν από την λειτουργία του συστήματος, μέχρι η εσωτερική θερμοκρασία να

σταθεροποιηθεί σε κάποια τιμή, όπου τα κλιματιστικά του χώρου λειτουργούσαν στο 100%. Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις για κάθε μια από τις 4 μέρες λειτουργίας του συστήματος.



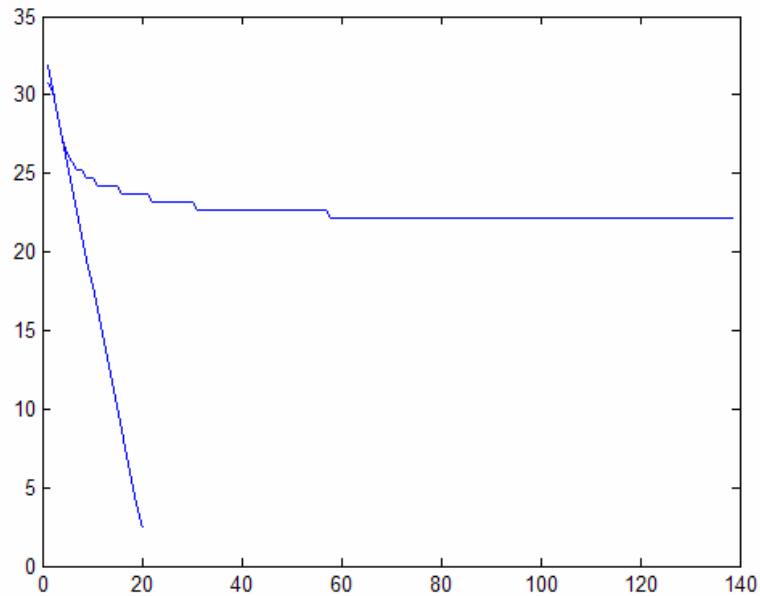
Σχήμα.5.15. Καμπύλες εσωτερικής θερμοκρασίας για 4 μέρες.

Από τις παραπάνω εικόνες προκύπτει το συμπέρασμα ότι και οι 4 καμπύλες παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού των παραμέτρων για τον κλασικό PID. Η καμπύλη όμως που τελικά επιλέχθηκε είναι εκείνη που προκύπτει από την 4<sup>η</sup> μέρα των μετρήσεων. Με τα κλιματιστικά να λειτουργούν στο 100% η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου έπεσε μέχρι τους  $22.2^{\circ}\text{C}$ . Η επιλογή για το ποια καμπύλη θα χρησιμοποιηθεί ήταν εντελώς τυχαία και δεν έγινε για κάποιο συγκεκριμένο λόγο.

Αφού λοιπόν προσδιορίστηκε η μορφή της καμπύλης της εσωτερικής θερμοκρασίας το επόμενο βήμα ήταν να υπολογιστούν οι μεταβλητές  $K, \tau_d, T$  μέσω των οποίων θα υπολογιστούν αργότερα οι παράμετροι του PID ελεγκτή. Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεταβλητών  $(K, \tau_d, T)$  χρειάστηκε να υπολογισθεί η εφαπτομένη της καμπύλης θερμοκρασίας.

#### 5.4.1 Υπολογισμός Εφαπτομένης της Καμπύλης

Η εφαπτομένη της καμπύλης είναι μια ευθεία της μορφής  $y = a \cdot x + \beta$ . Για τον υπολογισμό της κλίσης της εφαπτομένης (δηλ. του  $a$ ) έγινε χρήση του τύπου  $a = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ . Για να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη η προσέγγιση της εφαπτομένης κρίθηκε αναγκαία η εύρεση της βέλτιστης κλίσης της. Η βέλτιστη κλίση βρίσκεται στα σημεία κατά τα οποία σημειώνεται η αρχή της απότομης πτώσης της καμπύλης της θερμοκρασίας. Από διάφορες δοκιμές και έπειτα με επαλήθευση με το μάτι η βέλτιστη κλίση σημειώνεται μεταξύ της 3<sup>ης</sup> και της 4<sup>ης</sup> μέτρησης. Επομένως η κλίση  $a$  ισούται με  $a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{27.2 - 28.75}{4 - 3} = -1.55$ . Οπότε πλέον η ευθεία έχει τη μορφή  $y = -1.55 \cdot x + \beta$ . Για τον υπολογισμό του  $\beta$  έχουμε ότι  $\beta = y + 1.55 \cdot x$ . Τώρα για τιμή του  $y$  ίση με 28.75 το  $x$  έχει την τιμή 3. Οπότε το  $\beta$  είναι ίσο με 33.4. Άρα η εφαπτομένη περιγράφεται από την ευθεία με εξίσωση  $y = -1.55 \cdot x + 33.4$ . Παρακάτω παρουσιάζεται πως εφάπτεται η ευθεία αυτή την καμπύλη της εσωτερικής θερμοκρασίας.



Σχήμα.5.16. Εφαπτομένη της καμπύλης θερμοκρασίας.

Από τη μελέτη της καμπύλης παρατηρείται ότι οι παραπάνω υπολογισμοί απέδωσαν όσον αφορά την καλύτερη προσέγγιση στην εφαπτομένη της καμπύλης. Συνεχίζοντας στον υπολογισμό των  $K, \tau_d, T$ , η τιμή του  $K$  εξαρτάται από τη διαφορά της πρώτης τιμής των μετρήσεων και της τιμής στην οποία έχει σταθεροποιηθεί πλέον η θερμοκρασία. Η πρώτη τιμή των μετρήσεων (κύκλος 0 του συστήματος) είναι η 30.75 και η τιμή σταθεροποίησης είναι η 22.2, επομένως το  $K$  έχει τιμή  $K = 30.75 - 22.2 = 8.55$ . Το  $\tau_d$  είναι ο χρόνος καθυστέρησης (delay time) του συστήματος, δηλαδή είναι ο χρόνος μετά τον οποίο το σύστημα αρχίζει να αποκρίνεται. Και από την καμπύλη της θερμοκρασίας είναι ο χρόνος έπειτα από τον οποίο η θερμοκρασία σημειώνει μεγάλη πτώση (μεγάλη κλίση της καμπύλης). Από το γράφημα ο χρόνος αυτός είναι ίσος με 2 λεπτά. Δηλαδή το σύστημα χρειάζεται 2 λεπτά για να αρχίσει να αποκρίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Για να υπολογιστεί το  $T$  ακολουθείται η εξής διαδικασία : η ευθεία που προκύπτει από την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας επεκτείνεται ώστε να συναντήσει τον κάθετο άξονα της γραφικής. Το σημείο τομής της ευθείας αυτής με την εφαπτομένη είναι η τιμή του  $T$  ξεκινώντας όχι από το 0 αλλά από το  $\tau_d$ . Έτσι λοιπόν το σημείο στο οποίο τέμνει η ευθεία τον  $y$  άξονα είναι το 22.2. Άρα από την επίλυση της εξίσωσης της εφαπτομένης προκύπτει ότι το σημείο τομής είναι το 7.2. Επομένως ο χρόνος  $T$  είναι ίσος με 14.4 λεπτά. Στον πίνακα παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων

τριών τύπων ελεγκτών αλλά εκείνος ο τύπος που παρουσιάζει ενδιαφέρον για την παρούσα διπλωματική είναι ο τύπος PID. Ο υπολογισμός του γίνεται από τους τύπους που δίνει η μέθοδος των Ziegler – Nichols.

Type	$K_c$	$T_i$	$T_d$	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	0.844			0.84444		
PI	0.76	6.67		0.76	0.114	
PID	1.0133	4	1	1.01333	0.25333	1.013333

Πίνακας 5.3. Παράμετροι των P, PI και PID controller.

## 5.5 Ενσωμάτωση των Ελεγκτών στο Software

Θα πρέπει να τονισθεί, πριν την περιγραφή της ενσωμάτωσης των ελεγκτών στον κώδικα που ελέγχει το σύστημα EIB, ότι ο κώδικας προγραμματισμού των συσκευών του συστήματος αλλά και της διαχείρισης των εισόδων από τα αισθητήρια ήταν ήδη έτοιμος. Αυτό που πραγματοποιήθηκε ήταν να γίνει τροποποίηση του κώδικα στα χαρακτηριστικά και δεδομένα του κάθε ελεγκτή.

### 5.5.1 Ενσωμάτωση του PID ελεγκτή ασαφούς λογικής

Ο PID ελεγκτής ασαφούς λογικής, από την περιγραφή που δόθηκε για αυτόν στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, επειδή χρησιμοποιεί την ασαφή λογική για την υλοποίησή του κάνει χρήση ενός αριθμού κανόνων και κάποιων συναρτήσεων μέλους. Οι κανόνες και οι συναρτήσεις μέλους σημειώνονται σε notepad αρχεία και έπειτα καλείται η ανάγνωσή τους από τον κώδικα. Ο κώδικας είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού C/C++. Έπειτα τα αρχεία που τον περιέχουν έχουν μετατραπεί σε dll αρχεία, μέσω της αντίστοιχης βιβλιοθήκης, τα οποία καλούνται με κάποιες ρουτίνες στη Visual Basic. Ο ρόλος της Visual Basic είναι πολύ σημαντικός καθώς το interface μέσω του οποίου διαχειρίζονται οι διάφορες συσκευές και δεδομένα επικοινωνεί με το σύστημα. Θα πρέπει να τονισθεί ότι τα δύο αρχεία που περιέχουν τους κανόνες και τις membership functions καλούνται στα αρχεία της C/C++ για ανάγνωση. Από την ανάγνωση αυτών και μέσω κάποιων ρουτινών υπολογίζεται η

έξοδος του PID ελεγκτή ασαφούς λογικής που ενεργοποιεί τα κλιματιστικά, το σκίαστρο, τα φώτα και το παράθυρο.

### 5.5.2 Ενσωμάτωση του κλασικού PID ελεγκτή

Η διαδικασία προγραμματισμού του συμβατικού PID ελεγκτή είναι πιο απλή από αυτή που πραγματοποιήθηκε για την υλοποίηση του PID ασαφούς λογικής. Στην περίπτωση αυτή ο απαιτούμενος κώδικας υλοποίησης του γράφθηκε κατευθείαν στη Visual Basic. Έτσι λοιπόν για τον προγραμματισμό του PID ορίστηκε μια συνάρτηση με την ονομασία PID\_output και η οποία έπαιρνε σαν παραμέτρους το  $K_c, T_s, T_d, T_i$ , το τρέχον σφάλμα, το άθροισμα όλων των σφαλμάτων και τη διαφορά του τρέχοντος με του προηγούμενου σφάλματος. Ο χρόνος  $T_s$  είναι ο χρόνος δειγματοληψίας των αποτελεσμάτων και στην περίπτωση αυτή είναι τα 8 λεπτά. Η συνάρτηση αυτή στην ουσία υλοποιεί τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή η οποία έχει τη μορφή

$$u(k) = K_c \cdot (e(k) + \frac{T_o}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_d}{T_o} \cdot (e(k) - e(k-1)))$$

Έπειτα στην ρουτίνα, της Visual Basic και του προγράμματος, main\_program γινόταν κλήση αυτής της συνάρτησης όπου δεχόταν τις τιμές όλων των προαναφερθέντων παραμέτρων και υπολόγιζε την έξοδο του ελεγκτή. Για την καλύτερη και πιο αποτελεσματική λειτουργία του ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον κάποιες συνθήκες ώστε η τελική έξοδος του να είναι βέλτιστη δυνατή. Δηλαδή, αν η έξοδος του ελεγκτή είχε αρνητική τιμή αυτό σημαίνει πως η θερμοκρασία είναι μικρότερη από το set point (όπου για την συγκεκριμένη υλοποίηση ήταν στους  $28^{\circ}C$ ) τότε ο ελεγκτής έδινε έξοδο 0 δηλαδή να μην λειτουργήσουν τα κλιματιστικά. Ενώ αν έδινε στην έξοδο τιμή μεγαλύτερη του 100 τότε έδινε εντολή στα κλιματιστικά να λειτουργήσουν στο 100%.

Πέρα όμως από αυτές τις δύο περιπτώσεις όταν ο ελεγκτής έδινε στην έξοδο κάποια τιμή αυτή δεν αντιστοιχεί στην πραγματική τιμή λειτουργία των κλιματιστικών. Για το σκοπό αυτό παραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση της τιμής της συναρτήσεως με βάση το μέγιστο σφάλμα που είναι δυνατόν να εμφανιστεί κατά την λειτουργία του συστήματος. Έτσι η διαδικασία της κανονικοποίησης έχει ως εξής : η μέγιστη ένδειξη θερμοκρασίας από το αισθητήριο μέτρησης της είναι οι  $40^{\circ}C$ .

Επομένως το μέγιστο σφάλμα θα έχει τιμή  $12^{\circ}C$ . Με αυτό το σφάλμα υπολογίζεται και η έξοδος του ελεγκτή, από τη συνάρτηση μεταφοράς. Άρα

$$u(k) = 1.0133 \cdot (12 + \frac{8}{4} \cdot 12 + \frac{1}{8} \cdot 12) = 37.99,$$

Η τιμή αυτή της εξόδου αντιστοιχεί στο 100% λειτουργίας των κλιματιστικών. Επομένως το ποσοστό λειτουργίας των κλιματιστικών για κάθε έξοδο ισούται με το γινόμενο του παράγοντα κανονικοποίησης και της τιμής της συναρτήσεως

PID\_output. Ο παράγοντας κανονικοποίησης υπολογίζεται από τον λόγο  $\frac{100}{37.99}$  και είναι ίσος με 2.63. Έτσι λοιπόν κάθε τιμή της συναρτήσεως πολλαπλασιάζεται με το 2.63 και υπολογίζεται έτσι το ποσοστό λειτουργίας των κλιματιστικών.

## 5.6 Ρύθμιση του κλασικού PID ελεγκτή (Tuning)

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός proportional – integral – derivative controller έχει την εξής μορφή :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s,$$

όπου τα  $K_p, K_i, K_d$  είναι τα proportional, integral και derivative κέρδη αντίστοιχα. Η  $U(s)$  είναι η έξοδος του ελεγκτή και το  $E(s)$  είναι το σφάλμα. Μια άλλη ισοδύναμη μορφή της συναρτήσεως μεταφοράς είναι η εξής :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \cdot (1 + s \cdot T_d + \frac{T_i}{s}),$$

όπου  $T_i = \frac{K_p}{K_i}$  και  $T_d = \frac{K_d}{K_p}$  είναι γνωστά σαν οι σταθεροί χρόνοι ολοκλήρωσης και διαφορίσης αντίστοιχα, ενώ  $K_c \approx K_p$  ονομάζεται κέρδος του ελεγκτή. Μερικοί ελεγκτές και κυρίως τα παλιότερα μοντέλα είχαν αντί για κέρδος ένα proportional

band (PB). Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι  $K_c = \frac{100}{PB}$  όπου το PB είναι το proportional band και χαρακτηρίζεται ως το επι τοις εκατό σφάλμα που προκύπτει από σε 100% αλλαγή της εξόδου του ελεγκτή. Με τη χρήση του PB τότε η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{100}{PB} \cdot \left(1 + s \cdot T_d + \frac{T_i}{s}\right)$$

Αν και οι συναρτήσεις μεταφοράς, με χρήση του κέρδους, είναι πολύ δημοφιλείς, είναι ανέφικτες. Ο D όρος προκαλεί την αύξηση του κέρδους χωρίς όριο όσο η συχνότητα αυξάνεται. Το παραπάνω οδηγεί σε μια μη πραγματική μορφή της συναρτήσεως μεταφοράς. Πρακτικά οι PID ελεγκτές περιορίζουν το υψηλό κέρδος συχνότητας με τη χρήση ενός πρώτης τάξεως στοιχείου καθυστέρησης (lag), ένα low pass filter. Σκοπός της σχεδίασης ενός PID ελεγκτή είναι να προσδιοριστεί ένα σύνολο από κέρδη ( $K_p, K_i, K_d$ ) ή ( $K_c, T_i, T_d$ ) από τις παραπάνω εξισώσεις ώστε να προκύψει ένα σύνολο από απαιτήσεις απόδοσης του συστήματος κλειστού βρόχου. Τα κέρδη αυτά υπολογίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η μεταβατική απόκριση (transient response), το disturbance rejection και το σφάλμα σταθερής κατάστασης (steady-state error) να συναντηθούν. Στην πράξη δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν όλοι αυτοί οι στόχοι. Για παράδειγμα αν ο ελεγκτής έχει ρυθμιστή ώστε να διασφαλίσει καλύτερη μεταβατική απόκριση (δηλ. ελάχιστο overshoot και ελάχιστο settling time) αυτό συχνά οδηγεί σε αργή απόκριση για αναταραχές. Από την άλλη πλευρά αν το σύστημα ελέγχου έχει σχεδιαστεί από την εκλογή συντηρητικών τιμών για τα κέρδη του controller αυτή η επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε αργές αποκρίσεις στο φορτίο και στις αλλαγές του setpoint. Έτσι λοιπόν για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων προέκυψαν μέθοδοι ρύθμισης των PID ελεγκτών.

## 5.7 Μέθοδος Ziegler – Nichols

Οι Ziegler – Nichols σχεδιαστικές μέθοδοι [16] είναι οι πιο δημοφιλείς και ευρυστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές ελέγχου για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός PID ελεγκτή. Αν και αυτές οι μέθοδοι

χρονολογούνται από τις αρχές του 1940 για αναλογικούς ελεγκτές, παραμένουν ακόμα κατάλληλοι για τα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα ελέγχου.

Ήταν το έτος 1942 όταν η πρώτη μέθοδος των Ziegler και Nichols δημοσιεύθηκε και ήταν γνωστή σαν *continuous cycling method*. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το κέρδος του ελεγκτή αυξάνεται μέχρι να ξεκινήσει να ταλάντωναται στο κέρδος  $K_u$ . Αν η αντίστοιχη περίοδος της ταλάντωσης είναι  $T_u$ , τότε οι παράμετροι του PID controller μπορούν να υπολογιστούν, έτσι όπως προτείνονται από τους Ziegler και Nichols, χρησιμοποιώντας τον πίνακα 1(a).

**Table 1(a): Z-N (Continuous Cycling Method) tuning rules**

Controller	Parameters		
	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_u$		
PI	$0.45K_u$	$\frac{1}{1.2} T_u$	
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$\frac{1}{8} T_u$

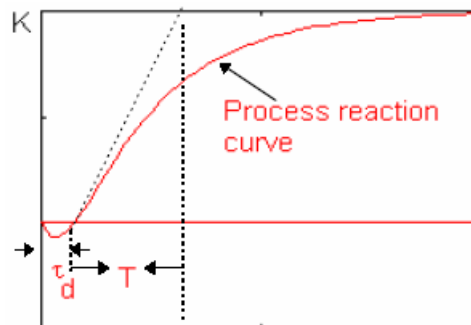
Στην 2<sup>η</sup> δημοσίευσή τους που έγινε το 1943 οι Ziegler και Nichols πρότειναν μια εναλλακτική μέθοδο γνωστή σαν *process reaction curve method*. Στην μέθοδο αυτή, η ανοιχτού βρόχου μοναδιαία βηματική απόκριση του συστήματος υπολογίζεται και συνήθως έχει τη μορφή που παρατίθεται στο σχήμα 5.17. Η απόκριση προσεγγίζεται από ευθείες γραμμές, με τα  $\tau_d$  και  $T$  και  $K$  να δηλώνονται από φαίνεται στο σχήμα. Αυτή η απόκριση, μπορεί να υπολογιστεί από τη μοναδιαία βηματική απόκριση ενός πρώτης τάξεως και καθυστέρησης χρόνου μοντέλου, και δίνεται από την εξίσωση

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau_d \cdot s}}{T \cdot s + 1}$$

και οι παράμετροι υπολογίζονται από τις εξισώσεις που φαίνονται στον πίνακα 1(b).

**Table 1 (b): Z-N (Process Reaction Curve Method) tuning rules**

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



Σχήμα.5.17. Ανοιχτού Βρόχου Βηματική Απόκριση

Οι Ziegler – Nichols μέθοδοι παρουσιάζουν 2 σημαντικά μειονεκτήματα : το σύστημα κλειστού βρόχου παρουσιάζει συχνά ταλαντώσεις από αυτό που επιθυμείται να προκύψει, ενώ ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι βασίζονται εξ' ολοκλήρου στο κέρδος και τη συχνότητα κατά τα οποία το μη αντισταθμισμένο σύστημα θα μπορούσε να ταλαντωθεί σε ένα αναλογικό loop ανάδρασης και για αυτό το λόγο μπορεί να μην είναι έγκυρο για συστήματα στα οποία οι πόλοι έναντι των μηδενικών είναι μόνο 2 και για αυτό το λόγο θα μπορούσε να έχει root loci που δεν θα διασταυρωνόταν με τον άξονα.

Θα πρέπει να σημειωθεί η μέθοδος των Ziegler – Nichols που χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση του PID είναι η process reaction curve method. Με τη μέθοδο αυτή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο υπολογισμός των παραμέτρων του PID βασίζεται στα  $\tau_d, T, K$  που υπολογίζονται από την καμπύλη. Επομένως οι παράμετροι αυτές δίνονται από τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 1(b).

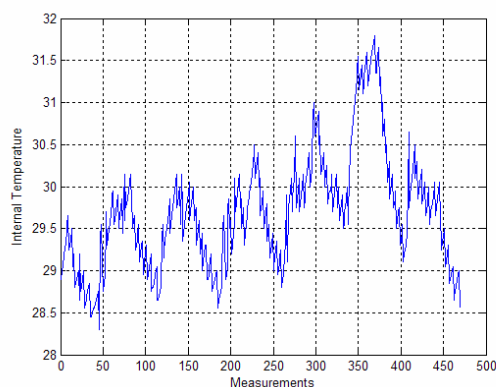
## Κεφάλαιο 6 - Αποτελέσματα

### 6.1 Γενικά

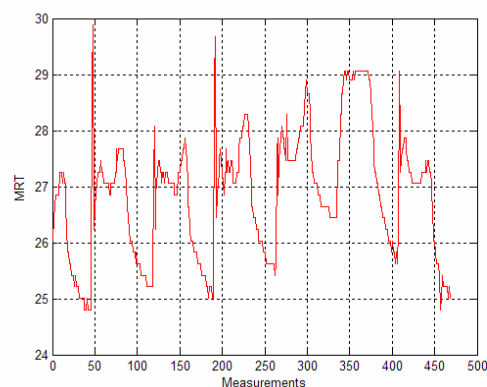
Στο κεφάλαιο αυτό της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που προέκυψαν από την εφαρμογή στο σύστημα ΕΙΒ των ελεγκτών PID ασαφούς λογικής και συμβατικού PID. Επίσης παρατίθενται γραφήματα, που παρουσιάζουν την επίδραση στη θερμοκρασία του χώρου, των παραπάνω ελεγκτών.

### 6.2 Αποτελέσματα PID ελεγκτή ασαφούς λογικής

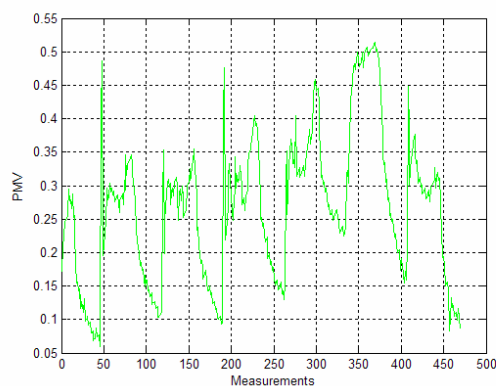
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του PID ελεγκτή ασαφούς λογικής στο σύστημα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



(α)



(β)



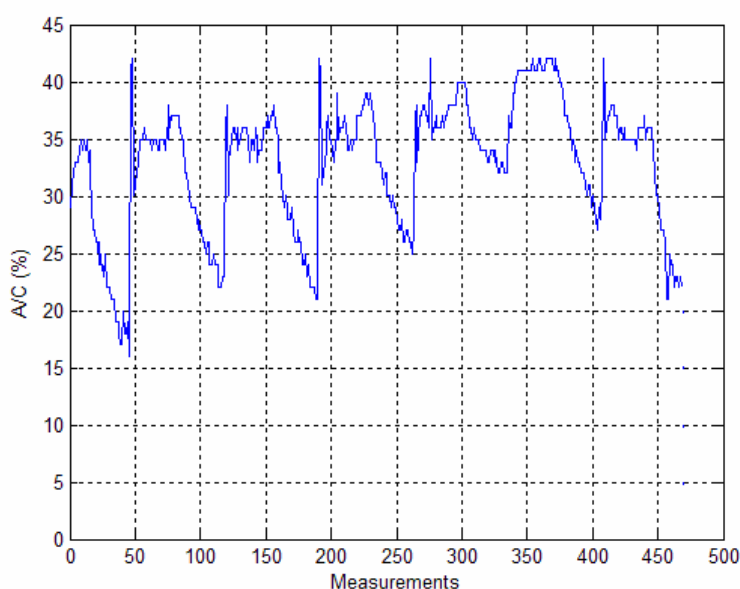
(γ)

Σχήμα.6.1. Αποτελέσματα για (α) Εσωτερική Θερμοκρασία, (β) MRT και (γ) PMV.

Τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν από την εφαρμογή του ελεγκτή στο σύστημα και λειτουργίας αυτού για 7 συνεχόμενες ημέρες. Στην εικόνα παρατίθενται η εσωτερική θερμοκρασία του εργαστηρίου, η Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία (MRT) και η συνάρτηση PMV. Η συνάρτηση PMV παίρνει τιμές από το σύνολο [-1.5 1.5] με ιδανικές τιμές από -0.5 μέχρι 0.5. Ενώ η συνάρτηση MRT είναι εξαρτημένη από την εσωτερική θερμοκρασία.

Από τη μελέτη της γραφικής παραστάσεως παρατηρείται ότι η PMV, που καθορίζει την άνεση την οποία αισθάνεται ένα άτομο στο χώρο, παίρνει τιμές μεταξύ -0.5 και 0.5 που σημαίνει ότι ο ελεγκτής καθιστά άνετη την παραμονή στο χώρο. Επίσης η εσωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ των 28-29 °C με μια μικρή διακύμανση που φθάνει και στους 30 και 31 °C. Το συμπέρασμα είναι ότι ο ελεγκτής κρατά την θερμοκρασία του χώρου σε ανεκτά επίπεδα για τον άνθρωπο με εξαίρεση τις περιπτώσεις που η θερμοκρασία έφθασε στους 31 °C και οφείλεται κυρίως στην αλλαγή της ημέρας. Τέλος το MRT (Μέση Ακτινοβολούμενη Θερμοκρασία) είναι τιμή από το αντίστοιχο αισθητήριο που εξαρτάται από την εσωτερική θερμοκρασία όποτε τα αποτελέσματα και για αυτήν τη συνάρτηση είναι πολύ ικανοποιητικά.

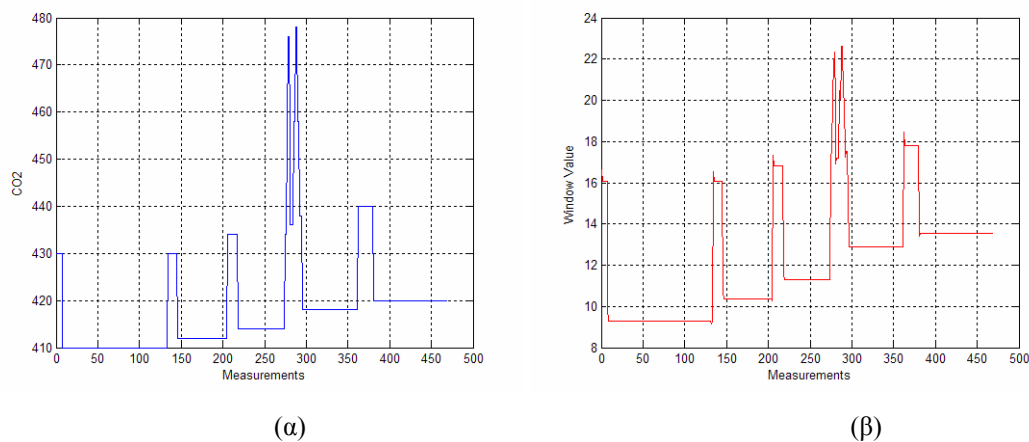
Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών προκύπτουν, από την λειτουργία των κλιματιστικών αφού μέσω αυτών, ο ελεγκτής ρυθμίζει την εσωτερική θερμοκρασία. Παρακάτω παρατίθεται γραφικά το % της λειτουργίας των κλιματιστικών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



Σχήμα.6.2. Γράφημα απόδοσης λειτουργίας κλιματιστικών

Από τη μελέτη του γραφήματος προκύπτει το συμπέρασμα ότι στο ποσοστό λειτουργίας των κλιματιστικών υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις (μεγάλα peaks). Τα peaks αυτά εμφανίζονται όταν αλλάζει η ημέρα και η θερμοκρασία του χώρου αυξάνεται απότομα. Στη διάρκεια της υπόλοιπης μέρας ο ελεγκτής μειώνει τη θερμοκρασία με αποτέλεσμα τα κλιματιστικά να μην χρειάζεται να λειτουργούν πολύ. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως τις βραδυνές ώρες όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλή με συνέπεια τη μικρή λειτουργία των κλιματιστικών. Έτσι τις πρωινές ώρες όπου η θερμοκρασία έχει ανέβει ο ελεγκτής δίνει εντολή στο σύστημα να λειτουργήσει τα A/Cs σε υψηλό ποσοστό πράγμα το οποίο επαληθεύεται από το γράφημα.

Εκτός από τα παραπάνω κατά την εφαρμογή του fuzzy PID Controller ελέγχθησαν και άλλες παράμετροι όπως είναι το  $CO_2$ , ο φωτισμός του εργαστηρίου, το σκίαστρο και το παράθυρο. Οι μετρήσεις των μεγεθών που προέκυψαν οδήγησαν στις παρακάτω απεικονίσεις.



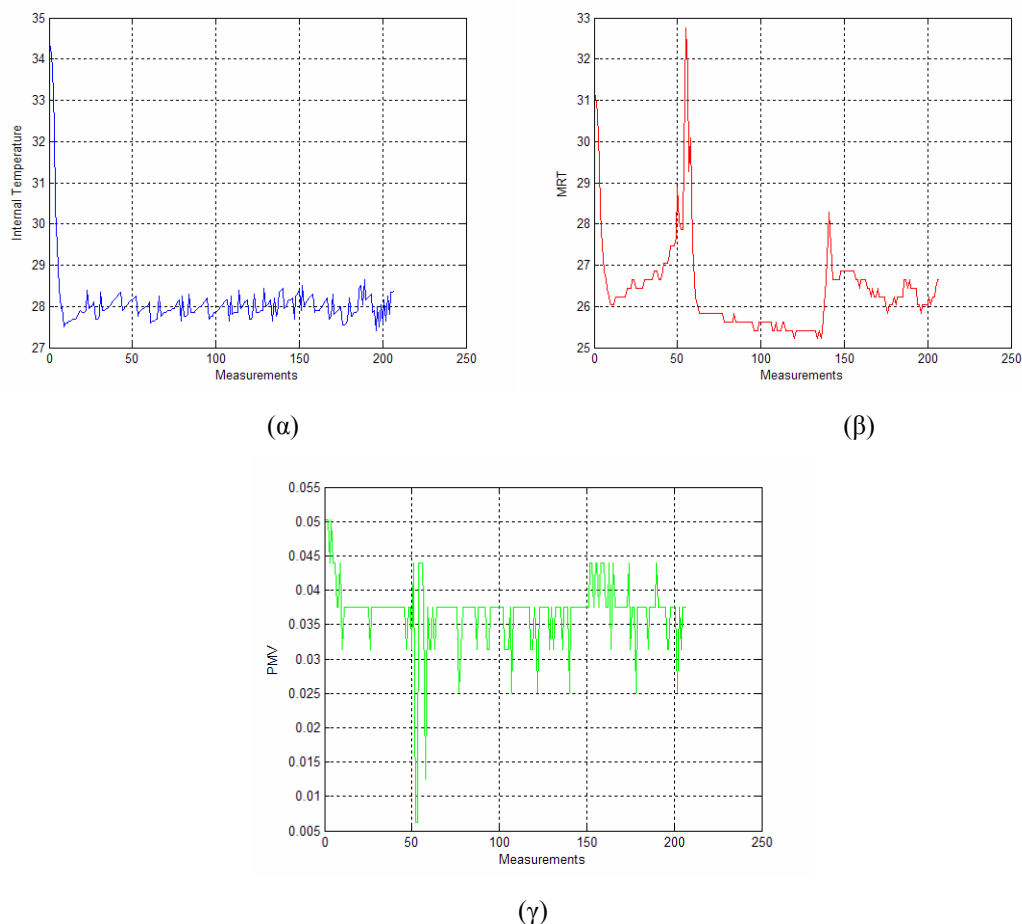
Σχήμα.6.3. Απεικόνιση (α)  $CO_2$ , (β) παράθυρου

Οι παράμετροι που απεικονίζονται παραπάνω δεν έχουν επιλεγεί τυχαία αλλά υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους. Ανάλογα με την ποσότητα του  $CO_2$  που υπάρχει στο χώρο του εργαστηρίου ενεργοποιείται ανάλογα και το παράθυρο. Από τις εικόνες (α) και (β) φαίνεται αυτή η εξάρτηση. Οι τιμές του  $CO_2$  κυμαίνονται όπως και οι τιμές του παραθύρου. Αυτό όμως έχει και μια λογική υπόσταση καθώς όταν ανέβει το επίπεδο του  $CO_2$  στο χώρο, που αυτό συμβαίνει κυρίως όταν υπάρχει κόσμος στο

εργαστήριο, το παράθυρο πρέπει να ενεργοποιηθεί και να ανοίξει έτσι ώστε να μειωθούν οι ποσότητες  $CO_2$ . Αντίστοιχα πρέπει να γίνεται και στην περίπτωση που το  $CO_2$  πέσει κάτω από μια ορισμένη τιμή όπου τότε πρέπει να ενεργοποιηθεί και πάλι ο μηχανισμός του παραθύρου και να κλείσει.

### 6.3 Αποτελέσματα κλασικού PID ελεγκτή

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται και εξηγούνται οι διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας, του MRT και PMV για τον κλασικό PID controller. Αυτές παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



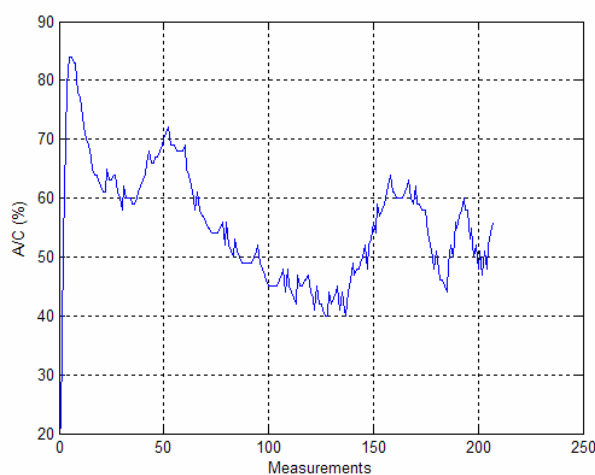
Σχήμα.6.4. Γραφήματα (α) εσωτερικής θερμοκρασίας, (β) MRT, (γ) PMV

Θα πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι η επιθυμητή για τον χρήστη θερμοκρασία του χώρου (set point) είναι οι  $28^{\circ}C$ . Από το γράφημα της εσωτερικής

θερμοκρασίας (μπλε γράφημα) παρατηρείται ότι ο ελεγκτής αυτός ρίχνει τη θερμοκρασία στο επιθυμητό επίπεδο (set point) προκαλώντας ταλαντώσεις γύρω από αυτό το σημείο. Οι ταλαντώσεις αυτές οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι τα κλιματιστικά είναι λειτουργίας on-off. Αυτό σημαίνει ότι δεν ελέγχεται το θερμικό φορτίο του κτιρίου με αποτέλεσμα την εμφάνιση των ταλαντώσεων. Από τη μελέτη του γραφήματος, προκύπτει ότι ο PID μέσω του D κομματιού καταφέρνει να αποκριθεί γρήγορα (γρήγορη πτώση της θερμοκρασίας) και μέσω του I κομματιού, που λειτουργεί σαν μνήμη, θυμάται τις προηγούμενες τιμές και ρυθμίζει την έξοδο. Επίσης το MRT είναι ανάλογο της θερμοκρασίας και τα έντονα peaks τα εμφανίζει κατά την αλλαγή της ημέρας όπου αλλάζει και η θερμοκρασία.

Όσον αφορά τη συνάρτηση PMV, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι ιδανικές τιμές αυτής βρίσκονται εντός του διαστήματος -0.5 και 0.5. Επειδή όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη διάρκεια του καλοκαιριού η συνάρτηση PMV παίρνει μόνο θετικές τιμές. Παρά το γεγονός όμως αυτό ο ελεγκτής κάνει άνετη την παραμονή των ατόμων στο χώρο αφού το PMV κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 0.5. Δηλαδή με την εφαρμογή του συμβτικού PID ελεγκτή ένας άνθρωπος μπορεί να παραμείνει στο χώρο οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας με μεγάλη άνεση.

Παρακάτω παρουσιάζεται και η χρήση των κλιματιστικών με την εφαρμογή του παραπάνω ελεγκτή.



Σχήμα.6.5. Ποσοστό λειτουργίας A/C

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει σε γενικές γραμμές τη λειτουργία των κλιματιστικών με έλεγχο από τον PID ελεγκτή. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται

από το αν η θερμοκρασία βρίσκεται πάνω από το set point ή κάτω από αυτό. Επομένως αν η θερμοκρασία του χώρου είναι μεγαλύτερη από το set point ( $28^{\circ}\text{C}$ ), τότε ο ελεγκτής δίνει εντολή στο σύστημα να λειτουργήσει τόσο ώστε η θερμοκρασία να φθάσει το set point. Για αυτό και στην πρώτη μέτρηση υπάρχει αυτή η μεγάλη άνοδος στο ποσοστό λειτουργίας των κλιματιστικών. Όταν όμως η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους  $28^{\circ}\text{C}$  τότε το I κομμάτι, που στην ουσία είναι εκείνο που καθορίζει την έξοδο, μειώνεται ο κύκλος λειτουργίας με αποτέλεσμα η μέση τιμή της εξόδου να είναι μικρότερη. Αυτό γραφικά παρατηρείται στα μεγάλα βυθίσματα που κάνουν οι τιμές των κλιματιστικών.

## **Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα**

### **7.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους δύο ελεγκτές, τον PID ασαφούς λογικής και τον κλασσικό PID. Μέσω των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός όσον αφορά την άνεση στο χώρο και την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον γίνεται και μια αναφορά για τις μελλοντικές προεκτάσεις οι οποίες μπορούν να γίνουν στο ήδη υπάρχον σύστημα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο κεφάλαιο αυτό δεν γίνεται σύγκριση των δύο ελεγκτών για να αποφασιστεί ποιος είναι καταλληλότερος από τον άλλο, αλλά γίνεται μια ποιοτική σύγκριση στο τι μπορεί να προσφέρει ο καθένας στην εφαρμογή τους στο χώρο του εργαστηρίου Ηλεκτρονικής και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

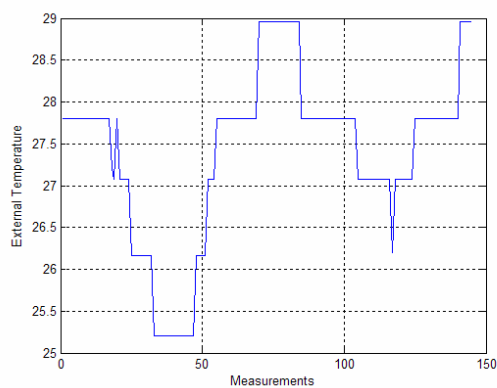
### **7.2 Αποτελέσματα του PID ασαφούς λογικής και του κλασσικού PID Ελεγκτή**

Στην παράγραφο αυτή παρατίθεται ένας πίνακας με τις μέσες τιμές των μετρούμενων μεγεθών έτσι όπως προέκυψαν μετά από 2 μέρες εφαρμογής του καθενός στο σύστημα EIB. Προτού γίνει η παρουσίαση του πίνακα πρέπει να σημειωθεί ξανά ότι πρόκειται για ποιοτική σύγκριση τιμών καθώς ο κλασσικός PID εφαρμόστηκε μόνο για τρεις ημέρες και με 8 λεπτά χρόνο δειγματοληψίας ενώ ο fuzzy PID για 8 ημέρες με χρόνο δειγματοληψίας τα 20 λεπτά. Επίσης οι συνθήκες για κάθε ημέρα αλλάζουν με αποτέλεσμα να γίνεται προσπάθεια ώστε οι μετρήσεις να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερες του ενός με του άλλου. Οι μέσοι όροι που προκύπτουν αφορούν τιμές για ολόκληρη τη μέρα (δηλαδή είναι τιμές που καταγράφονται από το πρωί μέχρι το βράδυ).

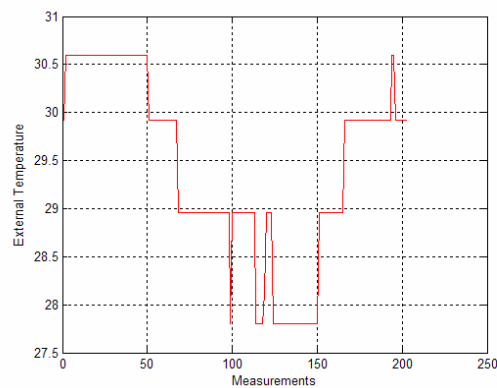
Μ.Ο. Μεγεθών\Ελεγκτές	Fuzzy PID	Conventional PID
M.O. Internal Temperature ( $^{\circ}C$ )	29.27896552	28.07364532
M.O. External Temperature ( $^{\circ}C$ )	27.40606897	29.4346798
M.O. PMV	0.218611962	0.162942887
M.O. A/Cs	-30.28965517	-55.69458128

Πίνακας 7.1. Μέσοι Όροι μετρούμενων μεγεθών

Για να προκύψουν πιο πειστικά συμπεράσματα για τον κάθε ελεγκτή παρακάτω παρατίθενται και τα γραφήματα των μετρούμενων μεγεθών για 2 μέρες μετρήσεων.

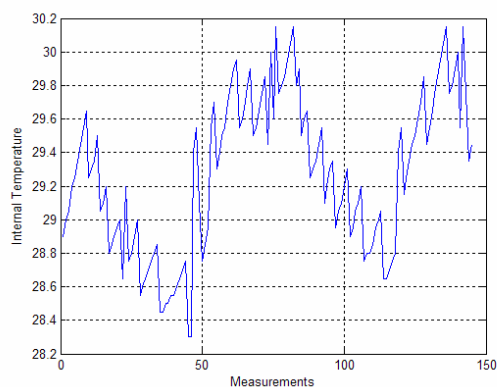


(α)

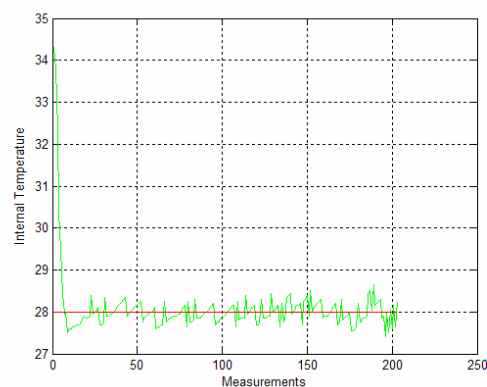


(β)

Σχήμα 7.1. (α) Εξωτερική Θερμοκρασία για fuzzy PID , (β) Εξωτερική Θερμοκρασία για PID.



(α)



(β)

Σχήμα.7.2. (α) Απόκριση fuzzy PID, (β) Απόκριση PID

Όπως προαναφέρθηκε τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν μετά από μετρήσεις δύο ημερών. Επιπλέον έγινε προσπάθεια ώστε η επιλογή των μετρήσεων του ενός να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις μετρήσεις του άλλου. Έτσι λοιπόν από τη διαλογή αυτή των τιμών προέκυψαν τα παραπάνω γραφήματα. Να σημειωθεί το γεγονός ότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά την καλοκαιρινή περίοδο και για αυτό οι μέσοι όροι των αποδόσεων των κλιματιστικών έχουν αρνητικές τιμές (έχει γίνει σύμβαση στις τιμές των ελεγκτών a/c η ψύξη να έχει αρνητικές τιμές και η θέρμανση θετικές).

Κατά την εφαρμογή του fuzzy PID στο σύστημα EIB και για εξωτερική θερμοκρασία όπως φαίνεται στο σχήμα (α) με μέση τιμή τους  $27.41933333^{\circ}\text{C}$  η απόκριση του συστήματος για την εσωτερική θερμοκρασία είναι όπως αναπαρίσταται στην εικόνα (α) του σχήματος. Από την εικόνα αυτή παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις στις τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας (έντονες ταλαντώσεις). Αυτό το φαινόμενο εξηγείται από το γεγονός ότι ο ελεγκτής ασαφούς λογικής δεν ήταν «αυστηρός» μια και σκοπό είχε την κυρίως εξοικονόμηση ενέργειας και την διατήρηση του PMV σε λογικά επίπεδα. Δηλαδή όταν η θερμοκρασία του χώρου ξεπερνούσε τους  $31-32^{\circ}\text{C}$  τότε ο ελεγκτής έδινε εντολή στα κλιματιστικά να λειτουργήσουν στο 100%. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για θερμοκρασίες χώρου μικρότερες των προαναφερόμενων τα κλιματιστικά να λειτουργούν για λίγο και ο χώρος να μην μπορεί να ψυχθεί αρκετά ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία.

Επίσης τα μεγάλα ανεβάσματα (peaks) της θερμοκρασίας σημειώνονται κατά την αλλαγή της ημέρας όπου και η εξωτερική και η εσωτερική θερμοκρασία αυξάνονται. Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και στο σχήμα της απόκρισης του PID ασαφούς λογικής, ο ελεγκτής δίνει εντολή να λειτουργήσουν αρκετά τα κλιματιστικά και για αυτό το λόγο η θερμοκρασία πέφτει. Τέλος πρέπει να τονισθεί ότι για τον ελεγκτή αυτόν δεν υπάρχει set point. Δηλαδή δεν υπάρχει μια επιθυμητή θερμοκρασία για το χρήστη ώστε να προσπαθήσει ο ελεγκτής να την προσεγγίσει.

Από την άλλη πλευρά η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, κατά την εφαρμογή του κλασσικού PID στο σύστημα, έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα (β) του σχήματος. Κατά την εφαρμογή του για 2 ημέρες η μέση τιμή της εξωτερικής θερμοκρασίας ήταν οι  $29.45719807^{\circ}\text{C}$ . Ενώ η απόκριση του συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα (β) του σχήματος. Στην εικόνα 7.2(β) φαίνεται και η

επιθυμητή προς το χρήστη θερμοκρασία του χώρου (set point). Η θερμοκρασία αυτή είναι οι  $28^{\circ}\text{C}$ .

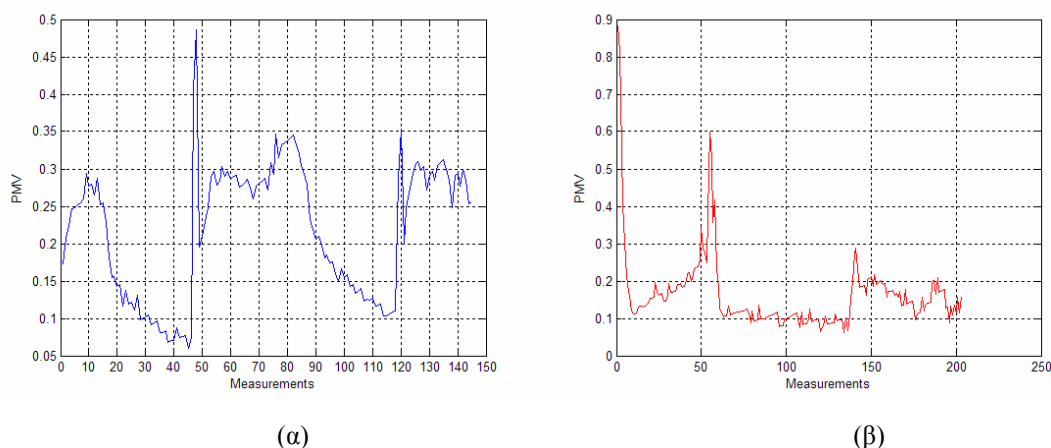
Από το γράφημα της απόκρισης του κλασσικού PID παρατηρείται ότι κατά την αρχή της εφαρμογής, όπου η εσωτερική θερμοκρασία είναι υψηλή, ο ελεγκτής δίνει εντολή στα κλιματιστικά να λειτουργήσουν τόσο όσο χρειάζεται ώστε η εσωτερική θερμοκρασία να φθάσει τους  $28^{\circ}\text{C}$ . Στην περίπτωση κατά την οποία η θερμοκρασία πέσει κάτω από το set point τότε ο ελεγκτής κανονικά δεν πρέπει να δώσει εντολή να ενεργοποιηθούν τα κλιματιστικά καθώς έχει πετύχει το σκοπό του παρόλα αυτά όμως λόγω του I κομματιού (δηλαδή λόγω συσσωρευμένου λάθους) τα κλιματιστικά λειτουργούν. Όταν όμως η θερμοκρασία παραμείνει έστω και λίγο πάνω από τους  $28^{\circ}\text{C}$  τότε θα ενεργοποιήσει τα κλιματιστικά για ένα μικρό χρονικό διάστημα, όσο δηλαδή απαιτείται για να φθάσει το set point. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο PID έχει μνήμη με αποτέλεσμα να θυμάται την προηγούμενη κατάσταση.

Από το γράφημα της θερμοκρασίας για τον κλασσικό PID, με κόκκινη γραμμή τονίζεται το set point. Όπως είναι γνωστό ο ελεγκτής αυτός προσπαθήσει να ρίξει τη θερμοκρασία στο σημείο αυτό. Στην εφαρμογή αυτή ο PID το κατορθώνει χωρίς όμως να αποφεύγονται οι ταλαντώσεις. Από την εικόνα προκύπτει ότι η θερμοκρασία ταλαντώνεται γύρω από τους  $28^{\circ}\text{C}$ . Εμφανίζεται το ίδιο πρόβλημα που αντιμετώπισε και ο PID ασαφούς λογικής. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται στην λειτουργία των κλιματιστικών η οποία είναι on-off με αποτέλεσμα να μην ελέγχεται με ακρίβεια το παρεχόμενο θερμικό φορτίο. Οι ταλαντώσεις όμως αυτές δεν δηλώνουν κάποια αδυναμία του ελεγκτή ως προς τη ρύθμιση της θερμοκρασίας. Όταν τα κλιματιστικά σταματήσουν να λειτουργούν τότε μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα μέχρι να αλλάξει ο κύκλος του συστήματος και να λειτουργήσουν πάλι. Κατά το διάστημα αυτό της παύσης η θερμοκρασία παραμένει κοντά ή κάτω από το set point, αλλά επειδή γίνεται στιγμιαία δειγματοληψία της τιμής από το αισθητήριο της θερμοκρασίας τότε σε εκείνη την χρονική στιγμή η θερμοκρασία του χώρου μπορεί να είχε αυξηθεί.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων μπορεί να οδηγήσει και σε περαιτέρω συμπεράσματα όσον αφορά τις ταλαντώσεις των καμπύλων της εσωτερικής θερμοκρασίας για κάθε ελεγκτή. Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι στον PID ασαφούς λογικής το πλάτος της μεγαλύτερης ταλάντωσης είναι 1.25 και το πλάτος της

μικρότερης 0.1. Ενώ το μέσο πλάτος των ταλαντώσεων που εμφανίζονται κατά την εφαρμογή του fuzzy PID είναι 0.444827586. Αντίστοιχα για τον κλασσικό PID το πλάτος της μεγαλύτερης ταλάντωσης είναι 0.75 και της μικρότερης 0.05. Το μέσο πλάτος είναι 0.348648649. Αυτό οδηγεί σε ένα συμπέρασμα που αναπτύχθηκε παραπάνω ότι δηλαδή ο PID ασαφούς λογικής δημιουργεί μεγαλύτερες ταλαντώσεις.

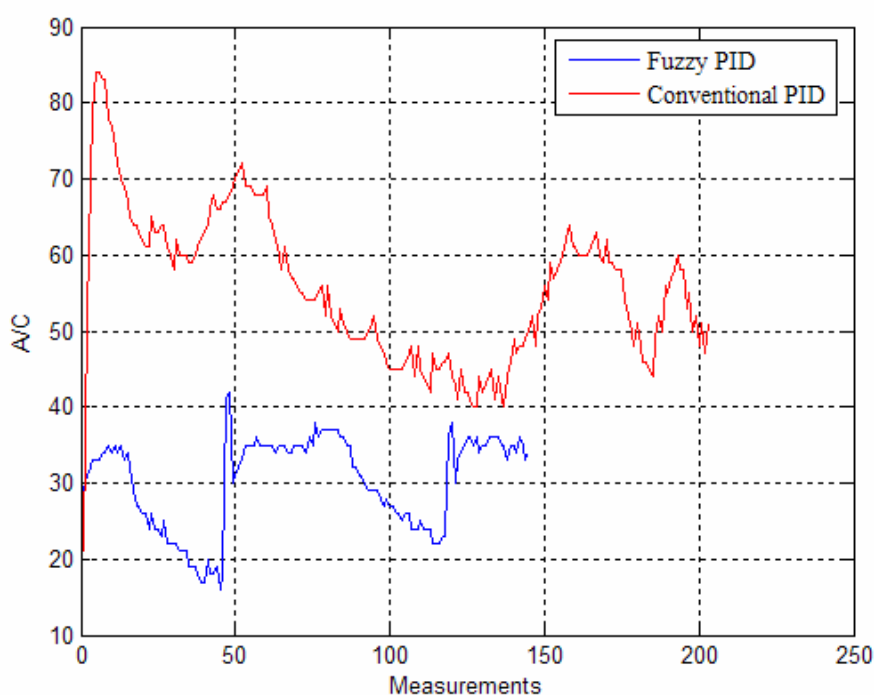
Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι ο κλασσικός PID κάνει πιο άνετη την παραμονή των ατόμων στο χώρο του εργαστηρίου. Αφού κρατά τη θερμοκρασία κοντά στο επιθυμητό σημείο με ταλαντώσεις το μήκος των οποίων είναι μικρότερο από τις ταλαντώσεις που προκύπτουν κατά την εφαρμογή του PID ασαφούς λογικής. Το συμπέρασμα αυτό δηλώνεται και από τη μέση τιμή, όπως φαίνεται από τον πίνακα, της συνάρτησης PMV για κάθε ελεγκτή. Από τις μέσες τιμές επιπλέον παρατηρείται ότι ο κλασσικός PID δημιουργεί πιο άνετες συνθήκες για την παραμονή στο χώρο. Αυτό γίνεται πιο αντιληπτό και από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.3. (α) PMV του Fuzzy PID, (β) PMV του Conventional PID

Από τα γραφήματα της συναρτήσεως PMV εξηγείται το συμπέρασμα που δόθηκε παραπάνω, ότι ο κλασσικός PID μειώνει αρκετά την PMV που εκείνη που καθορίζει το επίπεδο άνεσης στο χώρο. Η διαφορά είναι μικρή αφού και οι δύο τη διατηρούν σε χαμηλά επίπεδα αλλά ο PID κατορθώνει να τη μειώσει και άλλο. Πάντως και στους δύο ελεγκτές οι συνθήκες παραμονής στο χώρο είναι ιδανικές αφού έχουν τιμές κατά μέσο όρο κάτω από το 0.5 (οι ιδανικές συνθήκες οριοθετούνται από -0.5 μέχρι 0.5, αλλά όσο πιο κοντά είναι η PMV στο μηδέν τόσο καλύτερα νιώθει το άτομο στο χώρο).

Παρά το γεγονός ότι ο PID φθάνει τη θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα και δημιουργεί καταλληλότερες συνθήκες παραμονής στο χώρο είναι περισσότερο ενεργοβόρος από το fuzzy PID. Αυτό είναι πολύ λογικό αφού για να τα πετύχει αυτά ο κλασσικός PID πρέπει να λειτουργήσει αρκετά τα κλιματιστικά. Από τον πίνακα των μέσων όρων φαίνεται ότι πράγματι ο PID λειτουργεί σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα τα κλιματιστικά από ότι ο άλλος ελεγκτής.



Σχήμα.7.4. Διάγραμμα Χρήσης Κλιματιστικών

Το παραπάνω γράφημα φανερώνει το πόσο ενεργοβόρος είναι ο κλασσικός PID από το PID ασαφούς λογικής.

Για περαιτέρω στατιστική ανάλυση παρουσιάζονται κάποια αποτελέσματα όσον αφορά την τυπική απόκλιση του μετρούμενου μεγέθους από το μέσο όρο των μετρήσεων. Η στατιστική αυτή ανάλυση έδωσε τα εξής αποτελέσματα : για τον PID ελεγκτή ασαφούς λογικής η τυπική απόκλιση για την εσωτερική θερμοκρασία είναι  $0.4589^{\circ}\text{C}$  και για τα κλιματιστικά 6.0798%. Για τη συνάρτηση PMV η τυπική απόκλιση είναι 0.0885 και για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $1.0339^{\circ}\text{C}$ . Όσον αφορά τον άλλο ελεγκτή δηλαδή τον κλασσικό PID η τυπική απόκλιση για τα ίδια μεγέθη έδωσε : εσωτερική θερμοκρασία  $0.7354^{\circ}\text{C}$ , κλιματιστικά 9.8948%, PMV 0.1038 και εξωτερική θερμοκρασία  $0.9580^{\circ}\text{C}$ . Για την καλύτερη μελέτη των τυπικών

αποκλίσεων οι τιμές αυτές για κάθε μετρούμενο μέγεθος παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες.

<b>PID Ασαφούς Λογικής</b>	
Internal Temperature	0.4589
A/C	6.0798
PMV	0.0885
External Temperature	1.0339

Πίνακας 7.2. Παρουσίαση τιμών τυπικής αποκλίσεως για το PID ασαφούς λογικής

<b>Κλασικός PID</b>	
Internal Temperature	0.7354
A/C	9.8948
PMV	0.1038
External Temperature	0.9580

Πίνακας 7.3. Παρουσίαση τιμών τυπικής αποκλίσεως για το κλασικό PID

### 7.3 Μελλοντικές Προεκτάσεις

Η αρχιτεκτονική του συστήματος παρέχει στο σχεδιαστή δυνατότητες και παραμέτρους που μπορεί να τις χρησιμοποιήσει για περαιτέρω πειραματισμό. Από τα παραπάνω παρέχεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης εναλλακτικών αλγόριθμων ελέγχου της εγκατάστασης. Επίσης ο τρέχον ελεγκτής μπορεί να βελτιωθεί εύκολα αφού ότι παραμέτρους χρειάζεται ο σχεδιαστής του παρέχονται άμεσα ενώ μπορούν να ελεγχθούν πολύ εύκολα. Πρέπει να αναφερθεί επίσης ότι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας που υπάρχει στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων

Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης μπορεί να επεκταθεί εύκολα ώστε να καλύπτει περισσότερες ανάγκες και απαιτήσεις.

Το λογισμικό και τα υλικά που απαιτούνται για την υλοποίηση και λειτουργία του συστήματος καθιστούν δυνατή την επέκτασή του και σε άλλα κτίρια για τα οποία οι αλγόριθμοι θα λειτουργούν ξεχωριστά και αυτόνομα. Όμως ο χώρος στον οποίο είναι εγκατεστημένο το σύστημα δεν πλειροί όλες τις προϋποθέσεις για την ομαλή εξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χώρος του εργαστηρίου σε περιόδους ζέστης δεν αποβάλλει τη θερμότητα η οποία αποθηκεύεται σε αυτόν με αποτέλεσμα, κατά τις μετρήσεις, να εμφανίζονται υψηλές θερμοκρασίες ακόμα και αν τα κλιματιστικά λειτουργούν αρκετά. Για το λόγο αυτό θα ήταν χρήσιμο να γίνουν κάποιες αλλαγές προκειμένου να λειτουργήσει καλύτερα το σύστημα. Μια τέτοια αλλαγή θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση ανεμιστήρων στην οροφή του κτιρίου με αποτέλεσμα να ανακυκλώνεται καλύτερα ο αέρας στο χώρο ώστε να καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια αφού αυτό θα οδηγούσε σε λιγότερη χρήση των κλιματιστικών.

Μια άλλη λύση για το πρόβλημα των θερμικών φορτίων που αναπτύσσονται στο χώρο είναι να χρησιμοποιηθούν περισσότερα παράθυρα και αν γίνεται το ένα απέναντι στο άλλο ώστε να δημιουργείται ρεύμα αέρος και να ψύχεται περισσότερο ο χώρος. Παρά τις δύο παραπάνω λύσεις ίσως και πάλι ο χώρος να μην ψύχεται κατάλληλα οπότε κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση συστήματος εξαερισμού ώστε σε ορισμένες περιπτώσεις να αναιρείται η λειτουργία των παραθύρων όπου σε αντίθετη περίπτωση θα οδηγούσαν σε διατάραξη της λειτουργίας του συστήματος ψύξης/θέρμανσης.

## Κεφάλαιο 8 - Επίλογος

Η διπλωματική αυτή εργασία αφορούσε την υλοποίηση και τη σύγκριση των αλγορίθμων PID ασαφούς λογικής και κλασικού PID σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας υπαρχόντων κτιρίων. Σκοπός της ήταν να παρουσιάσει ποιος από τους παραπάνω δύο ελεγκτές είναι καταλληλότερος από τον άλλο στη διαχείριση ενέργειας αλλά και στη ρύθμιση των συνθηκών ώστε να γίνει πιο άνετη η παραμονή των ατόμων στο χώρο του εργαστηρίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ δεν υπήρχαν σημαντικά προβλήματα ώστε να εμποδίσουν την περάτωση της εργασίας, ο σχεδιασμός του χώρου της εγκατάστασης δε λάμβανε υπόψη τεχνικές παθητικής εξοικονόμησης ενέργειας. Για να γίνει πιο αντιληπτό αυτό πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι η εργασία εκπονήθηκε στη διάρκεια του καλοκαιριού όπου οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος και χώρου ήταν αρκετά υψηλές, με αποτέλεσμα ο χώρος, λόγω ανεπαρκής μόνωσης της οροφής και των τοίχων, να αποθήκευε τη θερμότητα αυτή κάνοντας ιδιαίτερα δύσκολο το έργο των ελεγκτών και αυξάνοντας ταυτόχρονα τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος.

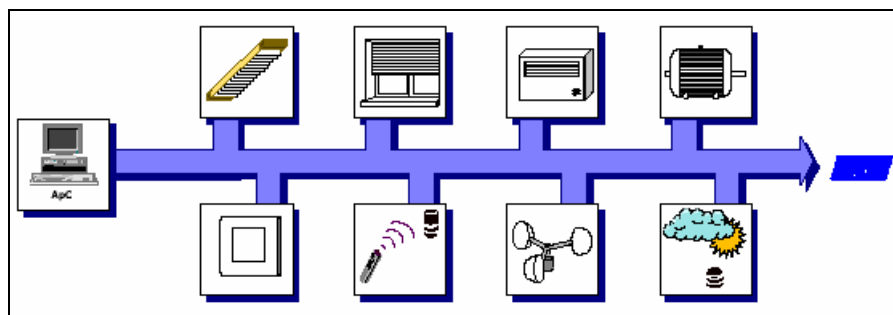
Παρά το γεγονός αυτό έγιναν προσπάθειες για βέλτιστη υλοποίηση των δύο ελεγκτών ώστε το σύστημα διαχείρισης ενέργειας να αποδίδει σύμφωνα με τις αρχικές προδιαγραφές. Σε ένα μεγάλο βαθμό αυτό έγινε πραγματικότητα και επιτεύχθηκε ο στόχος του πειράματος που ήταν η άνεση μέσα στο χώρο. Η αρχική υπόθεση ήταν ότι η θερμοκρασία και η παράμετρος PMV του χώρου θα έπρεπε να είναι τέτοιες ώστε τα άτομα που βρίσκονται στο χώρο να νιώθουν άνετα χωρίς να γίνεται δυσάρεστη η παραμονή τους. Ιδιαίτερη πρόνοια λήφθηκε για τον έλεγχο της καταναλούμενης ενέργειας και την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση αυτής. Τέλος έγινε ποσοτική και ποιοτική σύγκριση των ελεγκτών και παρατέθηκαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

## Παράρτημα

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται σχηματικές παραστάσεις (block diagrams) του συστήματος EIB καθώς και των fuzzy PID και κλασσικού PID ελεγκτών που εφαρμόστηκαν στην εγκατάσταση ενώ παρουσιάζονται όλες οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση τους και την εξαγωγή και επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων. Επίσης παρουσιάζεται και ψευδοκώδικας στον οποίο περιγράφεται η υλοποίηση και εφαρμογή του κάθε ελεγκτή στο λογισμικό του συστήματος EIB.

### Σχηματική Παράσταση Συστήματος EIB

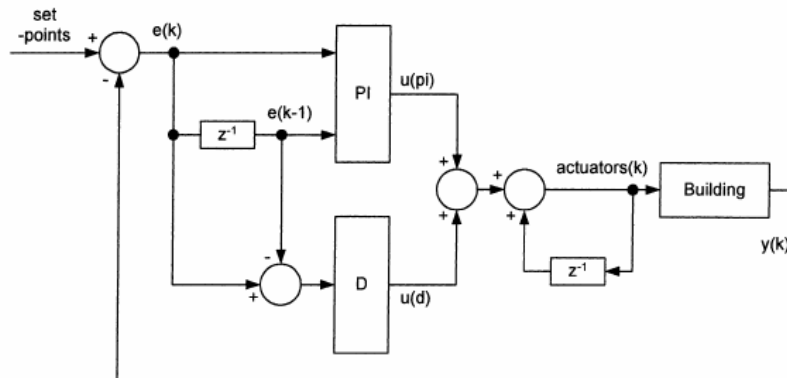
Παρουσιάζεται η μορφή της εγκατάστασης στην οποία έγινε η εφαρμογή των αλγορίθμων ελέγχου.



Σχήμα.1 Κεντρικά Ελεγχόμενο Σύστημα

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει τη μορφή της εγκατάστασης που υπάρχει στο εργαστήριο. Πράγματι η εγκατάσταση στηρίζεται στον κεντρικό έλεγχο των διαφόρων συσκευών μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

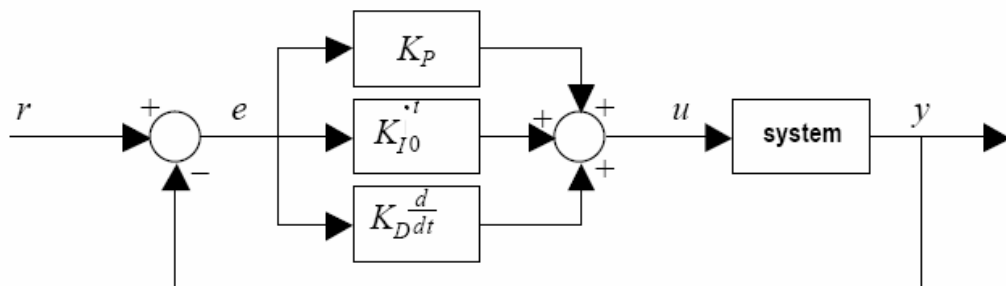
## Σχηματική Παράσταση Fuzzy PID Controller



Σχήμα.2 Block Diagram Fuzzy PID Controller (Τσιαβός)

Η σχηματική παράσταση αυτή περιγράφει πλήρως τη μορφή του fuzzy PID που υλοποιήθηκε για την περάτωση της διπλωματικής εργασίας.

## Σχηματική Παράσταση Κλασσικού PID Controller



Σχήμα.3 Block Diagram of PID Controller

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η μορφή ενός κλασσικού PID ελεγκτή στην οποία φαίνονται καθαρά τα τρία μέρη από τα οποία αποτελείται ένας τέτοιος ελεγκτής καθώς και τη λειτουργία του καθενός στην επεξεργασία της πληροφορίας.

## Ψηφιακό Φορητό Όργανο – Skymaster



Να σημειωθεί ότι το ψηφιακό αυτό όργανο μετρά όχι μόνο τη θερμοκρασία του χώρου αλλά και την υγρασία, την ταχύτητα του ανέμου και την ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα στο χώρο. Στις παραπάνω εικόνες απεικονίζεται η μορφή του καθώς και το λογότυπο της Εταιρίας κατασκευής του.

## Εξισώσεις

- **Τυπική Απόκλιση**

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

- **Μέσος Όρος**

$$\frac{\sum_{i=0}^N x_i}{N}$$

- **Συνάρτηση Μεταφοράς**

$$u(t) = (e(t) + \frac{T_0}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + \frac{T_D}{T_0} (e(t) - e(t-1)))$$

## Ψευδοκώδικας PID Conventional

Στην παράγραφο παρατίθεται ο ψευδοκώδικας υλοποίησης του κλασσικού PID ελεγκτή στη γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6.0.

Συνάρτηση PIDoutpout (temp\_error, sum\_temp\_error, dtemp\_error, Ts, Ti, Td, Kc)

$$\text{Output} = K_c \cdot \left( \text{temp\_error} + \frac{T_s}{T_i} \cdot \text{sum\_temp\_error} + \frac{T_d}{T_s} \cdot \text{dtemp\_error} \right)$$

Τέλος Συνάρτησης

Main\_Program :

sum\_temp\_error = temp\_error + previous\_temp\_error

dtemp\_error = temp\_error - previous\_temp\_error

previous\_temp\_error = temp\_error

Output = PIDoutpout (temp\_error, sum\_temp\_error, dtemp\_error, Ts, Ti, Td, Kc)

Αν output είναι ίση με 0 τότε

Output = 0

Αν output είναι μικρότερη από το 0 τότε

Output = 0

Αλλιώς

Output = κανονικοποίηση \* Output

## Βιβλιογραφία

- [1] Δ. Κολοκοτσά, Δ. Τσιαβός, Γ. Σταυρακάκης, Κ. Καλατζάκης, Ε. Αντωνιδάκης, *Advanced Fuzzy Logic controllers design and evaluation for buildings' occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction*.
- [2] R. Isermann, *Digital Control Systems*, Vol. I, Fundamentals, Deterministic Control, Springer ISBN 3 – 540 – 50266 – 1 (1989).
- [3] D. Misir, H.A. Malki, G. Chen, *Design Analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller*, Fuzzy Sets Systems 79 (1996) 297 – 314.
- [4] Π. Ν. Παρασκευόπουλου Καθ. ΕΜΠ (τμήμα ΗΜΜΥ), *Εισαγωγή Στον Αυτόματο Έλεγχο*, Τόμος Α', 1<sup>η</sup> Έκδοση, Αθήνα 2001.
- [5] D. Mitchell Carr, *PID Control and Controller Tuning Techniques*, Version 1, April 23, 1986
- [6] Δ. Κολοκοτσά, Δ. Τσιαβός, Γ. Σταυρακάκης, Κ. Καλατζάκης, Τμήμα Ηλεκτρονικών και Μηχανικών Υπολογιστών Πολυτεχνείο Κρήτης, *Fuzzy Control For Improved Buildings Energy Management Systems*.
- [7] Michail Petrov, Ivan Ganchev, Krum Kutryanski, Control Systems Department, Technical University Of Sofia, branch Plovdiv, *A Study On the Fuzzy PID Controllers*.
- [8] Jan Jantzen, *Design Of Fuzzy Controllers*.
- [9] Jan Jantzen, *Tuning Of Fuzzy PID Controllers*.
- [10] Muhidin Lelic, Corning Incorporated Science and Technology Division Corning, New York, *PID Controllers in Nineties*.
- [11] G. Ron Chen, Lecture for EE 6452 City University of Hong Kong, *Fuzzy PID Controllers for Industrial Applications*.
- [12] Petr Pivoňka, Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication Department of Control, Measurement and Instrumentation, Božetěchova 2, 602 00 Brno, Czech Republic, *Comparative Analysis of Fuzzy PI/PD/PID Controller Based on Classical PID*

*Controller Approach.*

- [13] Ευάγγελος Ι. Τριπολιτάκης, Ηλεκτρονικός Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2004, *Τεχνικές και Αλγόριθμοι Ελέγχου Ανεσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας σε κτίρια με τη χρήση διάυλων Δικτύωσης.*
- [14] Κωνσταντίνος Σ. Δαλαμαγκίδης, Χημικός Μηχανικός, Χανιά 2003, *Εφαρμογή Ενισχυμένης Μάθησης για Ανεση και Εξοικονόμηση Ενέργειας σε κτίρια.*
- [15] J.-S. Roger Jang, Ned Gulley, *MATLAB User's Guide Fuzzy Logic Toolbox, Version 1.*
- [16] Mukhtiar Ali Unar, D.J. Murray-Smith, Syed Farman Ali Shah, *Design and Tuning of fixed structure PID Controllers A Survey.*
- [17] Σαριδάκης Γεώργιος, Πτυχιακή Εργασία, *Σχεδιασμός, ανάπτυξη και εγκατάσταση επικοινωνιακού κόμβου EIBUS για σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε κτίρια.*
- [18] Ευάγγελος Ι. Τριπολιτάκης, Διονυσία Κολοκτσά, Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης, Γεώργιος Σταυρακάκης, Electronics and Computer Architecture Division, Department of Electronic and Computer Engineering Technical University of Crete, *Study and Implementation of a Fuzzy PD Thermal Comfort Controller for Embedded Fieldbus Systems Applications*
- [19] Α. Ι. Ντούνης, Κ. Κ. Λέφας, Α. Αργυρίου, Department of Electronic Engineering, Hellenic Air Force Academy, *Knowledge-Based versus Classical Control for Solar Buildings Designs. 1*