



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

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε κτήρια με χρήση
του πρωτοκόλλου KNX/EIB και αλγόριθμο
προβλεπτικού ελέγχου

Λάζος Χρήστος

Εξεταστική επιτροπή:
Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος (επιβλέπων)
Καθηγητής Πουλιέζος Αναστάσιος (Μ.Π.Δ.)
Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Χανιά 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή και σκοπός της εργασίας.....	6
Κεφάλαιο 1: Διαχείριση και εξοικονόμηση ενέργειας σε κτήρια.....	8
1.1 Εξοικονόμηση ενέργειας.....	8
1.1.1 Γενικά.....	8
1.1.2 Κατανάλωση ενέργειας.....	8
1.1.3 Κοινοτική οδηγία.....	9
1.2 Έξυπνα κτήρια και διαχείριση ενέργειας.....	10
1.2.1 Η ανάπτυξη των BEMS.....	10
1.2.2 Τα κατακεκομμένα συστήματα δικτύων ελέγχου.....	13
1.3 Τα κυριότερα πρωτόκολλα επικοινωνίας.....	15
1.3.1 EIBUS.....	15
1.3.2 PROFIBUS (PROcess Field BUS).....	18
1.3.3 CANbus.....	19
1.3.4 LonWorks.....	21
1.3.5 BACnet (Building Automation and Control net).....	24
1.3.6 BitBus.....	24
1.3.7 Σύγκριση.....	26
Κεφάλαιο 2: Το πρότυπο KNX/EIB.....	28
2.1 Γενικά.....	28
2.2 Τρόποι μετάδοσης.....	29
2.2.1 Μετάδοση μέσω συνεστραμμένου ζεύγους.....	29
2.2.2 Ασύρματη μετάδοση.....	32
2.2.3 Μετάδοση με χρήση γραμμής ισχύος.....	32
2.2.4 Μετάδοση μέσω Ethernet.....	33
2.3 Τοπολογία και οργάνωση διαύλου.....	33
2.4 Μετάδοση πληροφορίας – τηλεγραφήματα.....	35

2.5 Συνδρομητές διαύλου.....	37
Κεφάλαιο 3: Εγκατάσταση KNX/EIB στο εργαστήριο ελέγχου βιομηχανικών συστημάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης.....	39
3.1 Αισθητήρες.....	41
3.2 Συσκευές ελέγχου ενεργοποιητών.....	47
3.3 Άλλες συσκευές.....	54
3.4 Κόστος εγκατάστασης.....	57
3.5 Εργαλεία λογισμικού.....	59
3.5.1 Το λογισμικό ETS (EIB Toolbox software).....	59
3.5.2 EIB OPC Server.....	64
3.5.3 Matlab.....	65
Κεφάλαιο 4: Αλγόριθμος προβλεπτικού ελέγχου.....	67
4.1 Περιγραφή του συστήματος.....	67
4.2 Κατασκευή υποδείγματος και ταυτοποίηση.....	68
4.2.1 Υπόδειγμα.....	68
4.2.2 Ταυτοποίηση.....	72
4.3 Έλεγχος.....	79
4.4 Παράμετροι σχεδιασμού.....	80
4.4.1 Επιθυμητές τιμές.....	80
4.4.2 Ορίζοντας πρόβλεψη.....	82
4.4.3 Πίνακες βαρών.....	82
4.4.4 Χρόνος δειγματοληψίας.....	84
Κεφάλαιο 5: Το γραφικό περιβάλλον.....	86
5.1 Εκκίνηση, τερματισμός.....	87
5.2 Αισθητήρες.....	87
5.3 Ενεργοποιητές.....	87
5.4 Επιθυμητές τιμές.....	88
5.5 Γραφήματα.....	88

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα.....	93
6.1 Γενική περιγραφή.....	93
6.2 Γραφήματα τελικού συστήματος.....	94
6.2.1 Αποτελέσματα από 12 έως 14-2-2008.....	94
6.2.2 Αποτελέσματα από 8 έως 9-1-2008.....	97
6.3 Γραφήματα με χρόνο δειγματοληψίας 2 min.....	100
6.3.1 Αποτελέσματα από 13 έως 14-12-2007.....	100
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα – Μελλοντικές επεκτάσεις.....	104
7.1 Συμπεράσματα.....	104
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	105
Βιβλιογραφία.....	106

Εισαγωγή και σκοπός της εργασίας

Τα ζητήματα της ενέργειας έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια πιο επίκαιρα από ποτέ. Η ανεξέλεγκτη ρύπανση και οι παγκόσμιες κλιματολογικές αλλαγές επιβάλλουν την άμεση εφαρμογή λύσεων όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής και η εξοικονόμηση ενέργειας.

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την τη δημιουργία ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου του μικροκλίματος ενός εσωτερικού χώρου. Με τον όρο μικροκλίμα εννοούμε μια σειρά από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ποιότητα του αέρα και τα επίπεδα του φωτισμού. Με την κατάλληλη ρύθμιση των παραγόντων αυτών δημιουργούνται άνετες συνθήκες παραμονής και διαβίωσης.

Το σύστημα αυτό κάνει χρήση της τεχνολογίας των διαύλων δικτύωσης κτηρίων και συγκεκριμένα του πρωτοκόλλου KNX/EIB. Πρόκειται για ένα δίκτυο τριών ειδών συσκευών, αισθητήρων, ενεργοποιητών και ενός ελεγκτή. Ο ελεγκτής, ο οποίος είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής λαμβάνει γνώση των τιμών που στέλνουν οι αισθητήρες και στέλνει τιμές στους ενεργοποιητές.

Ο σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση ενός αλγορίθμου ελέγχου τέτοιου ώστε να επιτυγχάνονται δύο στόχοι, οι καλλίτερες δυνατές συνθήκες και η κατά το δυνατό λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Προφανώς πρόκειται για δύο στόχους αντικρουόμενους, αλλά εξίσου σημαντικούς.

Προτείνεται η εφαρμογή ενός αλγορίθμου προβλεπτικού ελέγχου, ο οποίος έχοντας γνώση της παρούσας κατάστασης προβλέπει τη συμπεριφορά του συστήματος σε όλα τα δυνατά σενάρια λειτουργίας των ενεργοποιητών και επιλέγει το καλλίτερο από αυτά.

Το «υλικό» του συστήματος αποτελείται από 9 αισθητήρες, 4 ενεργοποιητές και ένα ελεγκτή. Υπάρχουν 4 εσωτερικοί αισθητήρες, θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, συγκέντρωσης CO₂ και φωτεινότητας, ενώ οι 5 εξωτερικοί είναι θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, φωτεινότητας και βροχής. Ο ελεγκτής, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι ένας υπολογιστής.

Το «υλικό» είναι εύκολα επεκτάσιμο, καθώς το δίκτυο ΕΙΒ επιτρέπει ελεύθερη τοπολογία των κόμβων. Έτσι ανά πάσα στιγμή μπορεί να προστεθεί ή να αναιρεθεί ένας κόμβος, με τις απαραίτητες αλλαγές και στο λογισμικό.

1. Διαχείριση και εξοικονόμηση ενέργειας σε κτήρια

1.1 Εξοικονόμηση ενέργειας

1.1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια παγκόσμια κρίση στον τομέα της ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας παράγεται από ορυκτούς πόρους (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης) και δυστυχώς αυτοί οι πόροι μειώνονται συνεχώς. Ταυτόχρονα υπάρχει μια παγκόσμια αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την συνεχή αύξηση του κόστους αγοράς της ενέργειας σήμερα. Παράλληλα, η παραγωγή ενέργειας μέσω της καύσης των ορυκτών καυσίμων συνεπάγεται την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) το οποίο οφείλεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου με τις γνωστές σε όλους μας συνέπειες τόσο για εμάς όσο και για το περιβάλλον.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν παράλληλα για την καταπολέμηση αυτού του φαινομένου. Ο πρώτος είναι να στραφούμε στην παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας) όπως η αιολική και η ηλιακή ενώ ο άλλος τρόπος είναι να περιορίσουμε την περιττή κατανάλωση ενέργειας.

1.1.2 Κατανάλωση ενέργειας

Η κατανομή της κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι:



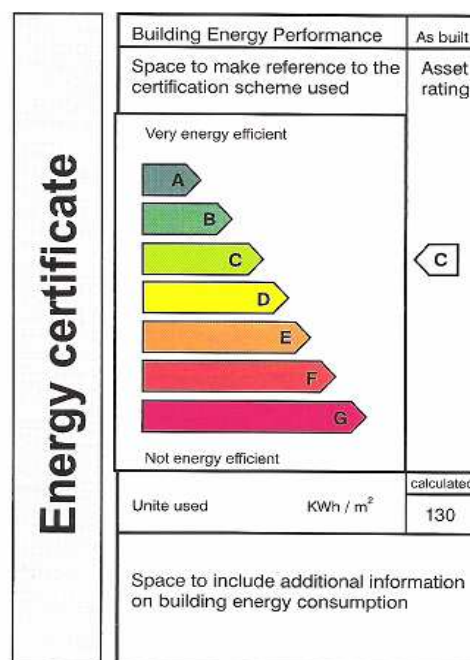
Σχήμα 1.1 Κατανάλωση ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Στην κατηγορία των κτηρίων τα 2/3 της ενέργειας οφείλεται στις οικίες (26% επί του συνόλου) και το υπόλοιπο 1/3 οφείλεται στα γραφεία (14% επί του συνόλου)[1]. Ενδεικτικά όσον αφορά τις οικίες, το 77% της ενέργειας

καταναλώνεται για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό[2] ενώ κάτι αντίστοιχο ισχύει και για τα γραφεία. Δεδομένου ότι δεν είναι όλα τα κτήρια φτιαγμένα με τον ενεργειακά βέλτιστο τρόπο (σωστή μόνωση κ.λ.π.) και δεδομένου ότι οι περισσότεροι χρήστες των κτηρίων δεν κάνουν σωστή διαχείριση της ενέργειας (ανοίγουν παράθυρα και κλιματιστικό ταυτόχρονα, αφήνουν ανοικτά τα φώτα και φεύγουν κ.α.), είναι φανερό πως υπάρχει περιττή σπατάλη ενέργειας.

1.1.3 Κοινοτική οδηγία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση θέλοντας να τηρήσει το πρωτόκολλο του Κιότο[3], το οποίο αναφέρεται στην μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 5% (σε σχέση με τις εκπομπές του 1990) μέχρι το 2010, θέσπισε το 2006 μια νέα κοινοτική οδηγία προς τα κράτη μέλη[4]. Αυτή η οδηγία αναφέρεται στην απόδοση ενεργειακής ταυτότητας σε όλα τα κτήρια. Η βαθμολογία που θα παίρνει το κάθε κτήριο θα αποδίδεται μετά από ενεργειακή μελέτη και θα εξαρτάται από την ενέργεια που καταναλώνει, από την έκταση του σε τετραγωνικά μέτρα, από το αν αξιοποιεί σωστά την ενέργεια, από το αν χρησιμοποιεί ΑΠΕ, από το αν μολώνει το περιβάλλον κ.α.



Σχήμα 1.2 Μορφή πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης κτηρίου κατηγορίας C [1]

1.2 Έξυπνα κτήρια και διαχείριση ενέργειας

Η νοημοσύνη είναι μια λέξη που χρησιμοποιείται για να υπονοήσει ότι ένας μικροεπεξεργαστής έχει ενσωματωθεί στην «ευφυή» συσκευή. Εντούτοις, εφαρμόζεται επίσης στα κτήρια, όπου δεν υπάρχει κάποιος απλός ορισμός. Ένας ορισμός είναι ένα κτήριο που παρέχει ένα παραγωγικό και οικονομικώς αποδοτικό περιβάλλον μέσω της βελτιστοποίησης τεσσάρων βασικών στοιχείων του: δομή, υπηρεσίες, διαχείριση και τις μεταξύ τους αλληλεξαρτήσεις. Η νοημοσύνη ενός κτηρίου εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των, ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστές, συστημάτων που μπορούν να υπάρξουν σε αυτό, όπως ένα δίκτυο υπολογιστών με τον κεντρικό υπολογιστή του (server), ή το σύστημα ασφάλειας με τον επικεφαλής ηλεκτρονικό υπολογιστή του. Όσο μεγαλύτερη γίνεται αυτή η αλληλεπίδραση, για παράδειγμα η διανομή των συστημάτων διαύλων και των επικοινωνιών, τόσο ευφυέστερο γίνεται το κτήριο.

1.2.1 Η ανάπτυξη των BEMS.

Τα συστήματα διαχείρισης της ενέργειας κτηρίων έχουν αναπτυχθεί παράλληλα με την επανάσταση της μικροηλεκτρονικής και της επιστήμης υπολογιστών των πρόσφατων ετών. Αυτό συμβαίνει επειδή τα BEMSs είναι στην ουσία συστήματα μικροϋπολογιστών που χρησιμοποιούνται για τις εγκαταστάσεις ελέγχου των κτιριακών λειτουργιών.

Ο πρώτος πρόγονος των BEMS ήταν το «σκληρά-καλωδιωμένο» κεντρικό σύστημα. Πρωτοεμφανίστηκε στη δεκαετία του '60 και υιοθετήθηκε στα μεγάλα κτήρια. Το σύστημα ήταν βασικά μια επέκταση των συμβατικών καλωδίων ελέγχου σε μια κεντρική κονσόλα, με πίνακες, φώτα δεικτών και ένα όργανο καταγραφής διαγραμμάτων, που επέτρεπε σε έναν χειριστή στην κονσόλα να παρακολουθεί τις απομακρυσμένες εγκαταστάσεις και να βλέπει τις θερμοκρασίες που εμφανίζονταν. Κανένας υπολογιστής ή μικροηλεκτρονική δεν περιλήφθηκε, και στηρίχθηκε στο χειριστή για να αλλάζει τις ρυθμίσεις και τους χρόνους ελέγχου.

Αυτά τα «σκληρά-καλωδιωμένα» συστήματα βελτιώθηκαν στη συνέχεια με την τηλεφωνική τεχνολογία της εποχής, που επέτρεψε στα μεμονωμένα στοιχεία των εγκαταστάσεων να συνδεθούν, μέσω **πάνελ συλλογής δεδομένων** τοπικών στις εγκαταστάσεις, σε ένα κεντρικό καλώδιο-κορμό που περνά γύρω από το κτήριο και από την κεντρική κονσόλα. Αυτή η πολυπλεξία, ελάττωσε την καλωδίωση με τη χρησιμοποίηση του ίδιου καλωδίου-κορμό για διάφορα πάνελ συλλογής δεδομένων.

Με τις ταχείες προόδους της μικροηλεκτρονικής, και τις εκατοντάδες τρανζίστορ που ενσωματώνονται σε ένα υψηλής κλίμακας ολοκλήρωσης (Large Scale Integration - LSI) τσιπ πυριτίου, με επιφάνεια περίπου 5 mm², προέκυψαν τα πρώτα βασισμένα σε υπολογιστή συστήματα ελέγχου. Αυτά τα πρώτα BEMS ήταν **συγκεντρωτικά συστήματα διαχείρισης της ενέργειας** και εμφανίστηκαν αρχικά στη δεκαετία του '70, αναπτυσσόμενα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ο **κεντρικός σταθμός** βασιζόταν σε έναν μίνι-υπολογιστή, ο οποίος περιείχε όλη την υπολογιστική ισχύ ή 'νοημοσύνη' στο σύστημα, με τους 'χωρίς-νοημοσύνη' απομακρυσμένους σταθμούς, οι οποίοι ήταν κουτιά για ρελέ και συνδέσεις με αισθητήρες και ενεργοποιητές, παρόμοια με τα προηγούμενα πάνελ συλλογής δεδομένων. Ο όρος 'ευφυής' χρησιμοποιείται επειδή ο κεντρικός σταθμός (ο μίνι-υπολογιστής) είχε τη δυνατότητα να υπολογίζει και να λαμβάνει τις αποφάσεις χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που λάμβανε από τους απομακρυσμένους σταθμούς.

Τα συστήματα αυτά ήταν πολύ ακριβά, και έτσι ήταν προσιτά μόνο για τα μεγάλα κτήρια. Αν και αφορούσαν αρχικά τον έλεγχο και την παρακολούθηση των εγκαταστάσεων κλιματισμού-εξαερισμού (HVAC) και ήταν επομένως συστήματα διαχείρισης της ενέργειας, ήταν επίσης σε θέση να ελέγχουν το φωτισμό, τους ανελκυστήρες και τους συναγερμούς ασφάλειας και πυρκαγιάς. Στην πραγματικότητα, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως συστήματα διαχείρισης κτηρίων για να βοηθήσουν στη διαχείριση των μεγάλων και σύνθετων κτηρίων, χωρίς απαραίτητα να εξοικονομούν ενέργεια. Αυτά τα πρώτα συστήματα διαχείρισης της ενέργειας κτηρίων εμφανίστηκαν πριν από την ενεργειακή κρίση του 1973/74.

Αν και αυτά τα πρώτα BEMS ήταν σε θέση να παρακολουθούν και να ελέγχουν τα συστήματα πυρκαγιάς και ασφάλειας, σπάνια εφαρμόζονταν για αυτό το σκοπό. Ακόμη και σήμερα υπάρχουν προβλήματα στην ενσωμάτωση συστημάτων όπως τα συστήματα συναγερμών πυρκαγιάς και ασφάλειας σε BEMS, συνήθως λόγω των διαφορετικών προτύπων που χρησιμοποιούνται και των διαφορετικών εμπλεκόμενων κατασκευαστών.

Η γρήγορη ανάπτυξη της LSI και της VLSI (Very Large Scale Integration - πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση), περίπου το 1980, οδήγησε σε χιλιάδες τρανζίστορ τοποθετημένα σε ένα τσιπ (στο τσιπ του Pentium υπάρχουν σήμερα εκατομμύρια τρανζίστορ). Ως εκ τούτου οι μικροϋπολογιστές, ή οι προσωπικοί υπολογιστές (PCs), έγιναν πολύ πιο ισχυροί. Και οι απομακρυσμένοι σταθμοί, μικροί μικροϋπολογιστές οι ίδιοι, αφού περιέχουν τσιπ μικροελεγκτή, κέρδισαν αρκετά σε δύναμη επεξεργασίας, αποκτώντας 'νοημοσύνη'. Αυτό τους επέτρεψε να λειτουργούν από μόνοι τους, ή να γίνουν αυτόνομοι απομακρυσμένοι σταθμοί, εξαρτώμενοι από τον κεντρικό σταθμό μόνο για ένα μικρό ποσοστό του χρόνου της λειτουργίας τους. Αυτοί οι απομακρυσμένοι σταθμοί έχουν αρκετά περισσότερες λειτουργίες ελέγχου σε σχέση με τους παλαιότερους, μη ευφυείς σταθμούς, οι οποίοι έτειναν να έχουν περισσότερο ένα ρόλο παρακολούθησης παρά ελέγχου. Πράγματι, κάθε ευφυής απομακρυσμένος σταθμός μπορεί να ελέγξει ένα μικρό κτήριο από μόνος του, και η εγκατάσταση αυτών των ευφύων απομακρυσμένων σταθμών είναι οικονομική για τα μικρού και μεσαίου μεγέθους κτήρια.

Ο κεντρικός σταθμός μπορεί να επικοινωνήσει με πολλούς απομακρυσμένους σταθμούς όταν χρειάζεται, είτε σε ένα τοπικό δίκτυο επικοινωνιών είτε μέσω άλλων δικτύων όπως το Διαδίκτυο.

Δεδομένου ότι οι μικροεπεξεργαστές έχουν γίνει ισχυρότεροι και λιγότερο ακριβοί, οι απομακρυσμένοι σταθμοί γίνονται επίσης πολύ μικρότεροι και φτηνότεροι, έτσι ώστε να μπορούν τώρα να ελέγξουν μεμονωμένα στοιχεία των εγκαταστάσεων. Οι εγκαταστάσεις γίνονται ευφυείς. Οι κατασκευαστές των BEMS παρέχουν αυτούς τους μικρούς απομακρυσμένους σταθμούς στους κατασκευαστές εξοπλισμού, έτσι ώστε οι εγκαταστάσεις τους να μπορούν να

ανατεθούν στο εργοστάσιο και να συνδεθούν απλά με το σύστημα επικοινωνιών BEMS όταν αυτό παραδίδεται.

Τα δίκτυα επικοινωνίας και τα συστήματα διαύλων έχουν αναπτυχθεί για να επιτρέψουν στον εξοπλισμό του κτηρίου να επικοινωνήσει, ακόμη και με τους διακόπτες φωτισμού.

1.2.2 Τα καταναμεμημένα συστήματα δικτύων ελέγχου

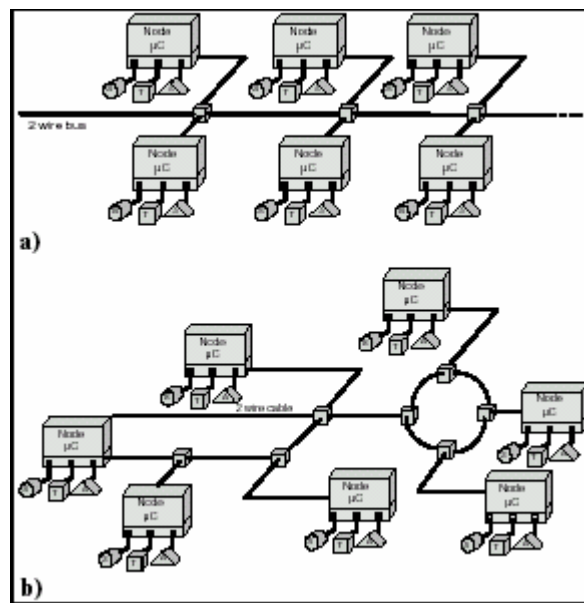
Η βιομηχανική πρόοδος στην ανάπτυξη ημιαγωγών και οι αυξανόμενες απαιτήσεις από τον τελικό χρήστη, π.χ. καλύτερη απόδοση ελέγχου, έχει οδηγήσει στα προηγμένα συστήματα ελέγχου, γνωστά ως, **σειριακά συστήματα δικτύων ελέγχου**, σχ. 1.3(a). Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτών των συστημάτων ελέγχου είναι:

- Καταναμεμμένη νοημοσύνη, με τη χρήση μικροελεγκτών.
- Δυνατότητα λειτουργιών σε πραγματικό χρόνο
- Ισοτιμη (peer-to-peer) αρχιτεκτονική.
- Η μνήμη και τα προγράμματα λογισμικού παρέχονται σε επίπεδο κόμβων.
- Το λογισμικό εφαρμόζεται σε επίπεδα πρωτοκόλλου (protocol layers).

Οι περιορισμοί των σειριακών συστημάτων δικτύων ελέγχου συναντιούνται κυρίως στην επεκτασιμότητα των δικτύων, καθώς υποστηρίζουν μια περιορισμένη ποικιλία τοπολογιών και μέσων μετάδοσης. Αυτοί οι περιορισμοί υπερνικούνται από τη νέα γενεά των **καταναμεμημένων συστημάτων δικτύων ελέγχου**, σχ. 1.3(b), που συμπεριλαμβάνουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Μίξη των μέσων επικοινωνιών (συνεστραμμένο ζεύγος, γραμμές ισχύος, ραδιοσυχνότητες, υπέρυθρες ακτίνες, οπτικές ίνες, ομοαξονικό καλώδιο).

- Μια καλύτερη, ή πληρέστερη, εφαρμογή του προτύπου της OSI, η οποία συμβάλλει στην υψηλότερη αξιοπιστία του (αναπτυσσόμενου) δικτύου.
- Ελεύθερη τοπολογία.
- Φιλικό προς το χρήστη λογισμικό και διαθέσιμα εργαλεία ανάπτυξης.
- Μονάδες διεπικοινωνίας, πύλες, γέφυρες, δρομολογητές και επαναλήπτες.



Σχήμα 1.3 Δομές καλωδίωσης συστημάτων δικτύων ελέγχου

Η κατανομή νοημοσύνης και η παροχή λειτουργιών δικτύων, σημαίνουν αξιοπιστία μέσων και καλύτερη απόδοση των συστημάτων ελέγχου. Κατά συνέπεια, η ενσωματωμένη τεχνολογία αυτοματοποίησης εισήχθη όπου επιδιώχτηκε πολύ, π.χ. αυτοματισμοί κτηρίων. Με τα κατανεμημένα συστήματα δικτύων ελέγχου έχει γίνει ένα σημαντικό βήμα προς τα ευφυή συστήματα αυτοματοποίησης κτηρίων, με συνέπεια:

- Χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες
- Βελτίωση του ανθρώπινου περιβάλλοντος, ειδικά του χώρου εργασίας
- Μεγαλύτερη κτιριακή λειτουργικότητα και οικονομία

Παρόμοια με τις εγκαταστάσεις εργοστασίων, ένα δημόσιο κτήριο περιλαμβάνει διάφορους τύπους συστημάτων δικτύων, όπως:

- Συστήματα αυτοματοποίησης κτηρίου: έλεγχος του εσωτερικού περιβάλλοντος ή ενεργοποίηση των συναγερμών.
- Συστήματα διαχείρισης κτηρίου: έλεγχος, διαχείριση και αποθήκευση των δεδομένων ελέγχου.
- Συστήματα LAN : διαχειριζόμενη ανταλλαγή πληροφοριών μέσα σε μια επιχείρηση.
- Συστήματα επικοινωνιών: παροχή των συνδέσεων για παγκόσμια επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων.

Τα συστήματα αυτοματοποίησης κτηρίου χρησιμοποιούνται για τις ακόλουθες υπηρεσίες αυτοματισμού και λειτουργίες ελέγχου:

- Θέρμανση, ψύξη, αερισμός, κλιματισμός (HVAC)
- Φωτισμός και φωτισμός έκτακτης ανάγκης
- Διαχείριση ενέργειας
- Ασφάλεια και προστασία
- Μεταφορά (ανελκυστήρες)

Αυτές οι υπηρεσίες αυτοματοποίησης υποστηρίζονται σήμερα από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως: BACNET, ARCNET, BitBus, CAN, EIBUS, LonWorks, PROFIBUS, και πολλά άλλα συστήματα βασισμένα στα πρότυπα επικοινωνίας, RS- 232, RS- 422, ή RS- 485.

1.3 Τα κυριότερα πρωτόκολλα επικοινωνίας

1.3.1 EIBUS

Η European Installation **Bus** (**EIB**) Association ιδρύεται το 1990 από 15 εταιρίες, και τώρα είναι μια ένωση σχεδόν 100 εταιριών ηλεκτρικών

εγκαταστάσεων που έχουν συνενωθεί για το σκοπό της προώθησης στην αγορά κοινών προτύπων για τις εγκαταστάσεις διαύλων.

Ο στόχος τους για ένα ομοιόμορφο σύστημα διαχείρισης κτηρίων σε όλη την Ευρώπη επιτυγχάνεται :

- Καθορίζοντας τις τεχνικές οδηγίες για τα συστήματα και τα προϊόντα.
- Επινοώντας τους ποιοτικούς κανόνες.
- Καθορίζοντας τις διαδικασίες δοκιμής.
- Καθιστώντας την τεχνογνωσία των συστημάτων διαθέσιμη στα μέλη, τα υποκαταστήματα και τους κατόχους άδειας.
- Δεσμεύοντας τα ινστιτούτα δοκιμών να εκτελούν τις ποιοτικές επιθεωρήσεις.
- Χορηγώντας σε τρίτους που περνούν τις δοκιμές τη χρήση του σήματος "EIB".
- Συμμετέχοντας ενεργά στην τυποποίηση.

Χρήση

Η εγκατάσταση διαύλου EIB είναι ιδανική για οποιοδήποτε κτήριο, είτε πρόκειται για ένα συγκρότημα γραφείων, ξενοδοχείο, σχολείο ή αυτόνομο σπίτι. Έχει βρει εμπορική επιτυχία στην ηπειρωτική Ευρώπη, ιδιαίτερα στη Γερμανία όπου έχει σημειωθεί ένας αριθμός περίπου 10 με 15 χιλιάδες εγκαταστάσεων (2001).

Η γραμμή του διαύλου

Η εγκατάσταση διαύλου EIB είναι ένα συνεστραμμένο ζεύγος που είναι τοποθετημένο παράλληλα στο κεντρικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Η γραμμή του διαύλου διασυνδέει όλους τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές μιας εγκατάστασης. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι συσκευές εντολής όπως οι διακόπτες. Άλλοι τύποι αισθητήρων περιλαμβάνουν τους

αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες φωτεινότητας κ.λπ. Οι ενεργοποιητές είναι δέκτες εντολής όπως πηγές φωτισμού, θέρμανση, άνοιγμα πορτών κ.λπ.

Σε κάθε γραμμή διαύλου μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι 64 συσκευές. Μέχρι 12 τέτοιες γραμμές μπορούν να ενωθούν μαζί σε έναν συζευκτήρα γραμμών για να διαμορφώσουν μια περιοχή διαύλου. Μέχρι 15 τέτοιες περιοχές διαύλου μπορούν στη συνέχεια να συνδεθούν με τη βοήθεια ενός συζευκτήρα περιοχής.

Τοπολογία

Η τοπολογία της εγκατάστασης μπορεί να καθορίσει ελεύθερα το δίαυλο EIB.

Η καλωδίωση μπορεί να εφαρμοστεί παράλληλα με την παροχή κεντρικών αγωγών σε ένα σχηματισμό γραμμής, αστέρα ή δέντρου.

Μετάδοση

Οι συσκευές στο δίαυλο επικοινωνούν με ρυθμό 9600 bits ανά δευτερόλεπτο.

Οι πληροφορίες που μεταδίδονται στο δίαυλο περιγράφονται ως τηλεγραφήματα. Κάθε τηλεγράφημα υποδιαιρείται στους ακόλουθους τομείς:

- Πεδίο ελέγχου
- Πεδίο διεύθυνσης
- Πεδίο δεδομένων
- Πεδίο επαλήθευσης

Τα δεδομένα στα πεδία ελέγχου και επαλήθευσης εξασφαλίζουν την χωρίς λάθη επικοινωνία. Τα δεδομένα στο πεδίο διεύθυνσης διευκρινίζουν σε ποια περιοχή, σε ποια γραμμή διαύλου, και σε ποια συσκευή απευθύνεται το τηλεγράφημα.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής επικοινωνία στο δίαυλο έχει υιοθετηθεί ένας μηχανισμός διαιτησίας που επιτρέπει σε μια μόνο συσκευή να επικοινωνεί στο δίαυλο σε κάθε χρονική στιγμή.

1.3.2 PROFIBUS (PROcess Field BUS)

Το PROFIBUS είναι το κύριο ανοικτό σύστημα fieldbus στην Ευρώπη και απολαμβάνει παγκόσμια αποδοχή. Η εφαρμογή περιλαμβάνει τους τομείς της κατασκευής και αυτοματοποίησης κτηρίων. Το PROFIBUS είναι ένα διεθνές, ανοικτό fieldbus πρότυπο που τυποποιήθηκε στο ευρωπαϊκό EN 50 170 fieldbus πρότυπο. Αυτό παρέχει τη βέλτιστη προστασία των προμηθευτών και χρηστών.

Σήμερα, όλοι οι κύριοι κατασκευαστές της τεχνολογίας αυτοματοποίησης προσφέρουν διεπαφές PROFIBUS για τις συσκευές τους. Η ποικιλία των προϊόντων περιλαμβάνει περισσότερες από 1.500 διαφορετικές συσκευές και υπηρεσίες, περίπου 400 εκ των οποίων είναι επικυρωμένες συσκευές, εξασφαλίζοντας εύκολη λειτουργία ακόμη και σε δίκτυα πολλαπλών προμηθευτών. Το PROFIBUS έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πάνω από 200.000 πραγματικές εφαρμογές σε όλο τον κόσμο και περισσότερες από 2.000.000 συσκευές έχουν εγκατασταθεί.

Η τεχνολογία PROFIBUS αναπτύσσεται και διαχειρίζεται από την οργάνωση χρηστών PROFIBUS User Organization. Η ιδιότητα μέλους σε αυτήν την οργάνωση προσφέρει αυξημένες πληροφορίες και ανταγωνιστικότητα στην αγορά. Στα μέλη περιλαμβάνονται κατασκευαστές, χρήστες και ερευνητικά ιδρύματα. Οι περιφερειακές ομάδες χρηστών σε 20 σημαντικές βιομηχανικές χώρες προσφέρουν υποστήριξη μητρικής γλώσσας σε όλο τον κόσμο. Όλες οι περιφερειακές ομάδες χρηστών είναι ενωμένες κάτω από την οργάνωση-ομπρέλα PROFIBUS International (PI) που, με περισσότερα από 750 μέλη, είναι η μεγαλύτερη οργάνωση fieldbus στον κόσμο.

Βασικές Ιδιότητες

Το PROFIBUS καθορίζει τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός σειριακού fieldbus που διασυνδέει τις κατανεμημένες ψηφιακές συσκευές από

χαμηλό (επίπεδο αισθητήρα / ενεργοποιητή) μέχρι το μεσαίο (επίπεδο κυττάρων) επίπεδο απόδοσης. Το σύστημα περιέχει master και slave συσκευές. Μια master συσκευή είναι σε θέση να ελέγξει το δίαυλο, π.χ. μπορεί να μεταφέρει μηνύματα χωρίς μακρινό αίτημα όταν έχει δικαίωμα πρόσβασης στο δίαυλο. Οι master συσκευές καλούνται ενεργοί σταθμοί στο πρωτόκολλο PROFIBUS. Χαρακτηριστικές master συσκευές είναι τα PLC (Programmable Logic Controller), CNC (Compare Numerical Controller) και ελεγκτές κυττάρων.

Οι slave συσκευές είναι απλές απομακρυσμένες συσκευές. Χαρακτηριστικές slave συσκευές είναι οι αισθητήρες, οι ενεργοποιητές και συσκευές αποστολής σημάτων. Δεν έχουν κανένα δικαίωμα πρόσβασης στους διαύλους, π.χ. μπορούν μόνο να αναγνωρίσουν τα λαμβανόμενα μηνύματα, ή κατά απαίτηση μιας master συσκευής, να μεταδώσουν μηνύματα σε αυτή τη συσκευή. Οι slave συσκευές καλούνται επίσης ως παθητικοί σταθμοί στο πρωτόκολλο PROFIBUS. Οι slave συσκευές χρειάζονται μόνο ένα μικρό μέρος του πρωτοκόλλου και επομένως το πρωτόκολλο είναι ιδιαίτερα απλό να εφαρμοστεί.

Εύκολη Συντήρηση

Λόγω του ότι το PROFIBUS μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το επίπεδο τομέων μέχρι το επίπεδο κυττάρων με ομοιόμορφο πρωτόκολλο και τεχνικές μετάδοσης, το κόστος για την εγκατάσταση, συντήρηση και κατάρτιση ελαχιστοποιούνται.

1.3.3 CANbus (Controller Area Network)

Το πρωτόκολλο CAN αναπτύχθηκε στην Ευρώπη το 1988 από την Intel και τη Bosch. Αρχικά στόχευσαν στη χρήση σε αυτοκίνητα αλλά αποδείχτηκε επίσης πολύ καλό για χρήση σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου μηχανών πραγματικού χρόνου. Μέσω της επιτυχούς χρήσης του πρωτοκόλλου CAN στα αυτοκίνητα και σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως οι συσκευές ελέγχου,

αισθητήρες και ενεργοποιητές, το CAN καθιερώθηκε στις ΗΠΑ και σε άλλα μέρη του κόσμου. Είναι διεθνώς τυποποιημένο κάτω από το πρότυπο ISO 11898.

Μεταξύ των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του είναι:

- Γρήγορη μεταφορά δεδομένων 1 MB/s εάν το μήκος διαύλου είναι λιγότερο από 40 μέτρα.
- Τα μηνύματα έχουν έναν προβλέψιμο μέγιστο χρόνο απόκρισης. Ένα μήνυμα ώθησης χωρίς δεδομένα και με την πιο υψηλή προτεραιότητα μπορεί να έχει έναν μέγιστο χρόνο απόκρισης 54 μ s στο δίαυλο εάν χρησιμοποιείται ρυθμός μεταφοράς 1 MB/s.
- Τα μηνύματα μπορεί να σταλούν από σημείο σε σημείο ή να είναι ευρείας ή πολλαπλής διανομής.
- Υποστηρίζονται απομακρυσμένα μηνύματα. Μια Λειτουργική Μονάδα μπορεί πάντα να προετοιμαστεί για να διαβιβάσει αμέσως τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα κατόπιν αιτήσεως από οποιαδήποτε άλλη μονάδα.
- 2032 (Standard CAN) ή 536.870.912 (Extended CAN) διαφορετικά μηνύματα είναι διαθέσιμα, κάθε ένα από τα οποία περιέχει 0 - 8 bytes δεδομένων.
- Ισχυρή ανίχνευση και χειρισμός σφάλματος. Εάν υπάρχει ένα αλλοιωμένο μήνυμα σε 1000 μεταδόσεις η συνολική πιθανότητα σφάλματος στα υπόλοιπα μηνύματα ανέρχεται σε 8.5×10^{-14} .
- Προγραμματίσιμος ρυθμός μεταφοράς.
- Προγραμματίσιμη διαμόρφωση οδηγών εξόδου.
- Χαμηλού κόστους CAN ελεγκτές και μικροτσίπ με ενσωματωμένους CAN ελεγκτές είναι εμπορικά διαθέσιμα από τις εταιρίες Intel, Motorola, Philips, Siemens, NEC και National.

Επισκόπηση

Τα δίκτυα CAN μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενσωματωμένο σύστημα επικοινωνιών για μικροελεγκτές καθώς επίσης και ως ανοικτό σύστημα επικοινωνιών για ευφρείς συσκευές.

Το σειριακό σύστημα διαύλου CAN, αρχικά αναπτυγμένο για χρήση στα αυτοκίνητα, χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στη βιομηχανία καθώς επίσης και στην αυτοματοποίηση κτηρίων και σε ιατρικούς εξοπλισμούς .

Απόδοση

Τοπολογία: Διαμόρφωση με μόνο μια λογική γραμμή διαύλου.

Μέσο μετάδοσης: Καλυμμένο χάλκινο καλώδιο, καθώς επίσης και οπτικές ίνες.

Μήκος διαύλου: Από 40 μέτρα για 1 Mbps ως 500 μέτρα για 125 Kbps.

Ρυθμός μετάδοσης: Από 10 Kbps έως 1 Mbps.

Ποσότητα δεδομένων: 0 έως 8 bytes ανά μήνυμα.

Αριθμός προσδιοριστικών: μέχρι 2032 .

Μήκος μηνυμάτων: μέχρι 130 bits.

Πλεονεκτήματα

Υψηλή αξιοπιστία, αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης δικτύων και της διαθέσιμης ενέργειας στο δίκτυο.

Μειονεκτήματα

Περιορισμένη αποδοχή εκτός Ευρώπης. Το πρωτόκολλο είναι αρκετά περίπλοκο ως προς την ανάπτυξή του.

1.3.4 LonWorks

Το LonWorks είναι μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε για καταναμεημένα δίκτυα ελέγχου όπου διάφορα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο καλώδιο για τη μετάδοση σημάτων. Η τεχνολογία αναπτύσσεται από την εταιρία Echelon Corporation. Η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να

ελέγξει πολλές από τις λειτουργίες σε κτήρια και βιομηχανίες. Σε ένα ευφυές σπίτι ο έλεγχος της θέρμανσης, του εξαερισμού, ο έλεγχος πρόσβασης και ο φωτισμός είναι λίγο πολύ αυτοματοποιημένα. Αυτές οι λειτουργίες απαιτούν συνήθως χωριστά καλώδια για την τροφοδοσία και τη σηματοδότηση. Ένα πρόσθετο πρόβλημα είναι τα πολλά διαφορετικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται. Με τη χρησιμοποίηση του LonWorks όλες οι λειτουργίες μπορούν να διαβιβάσουν τα σήματα και να τροφοδοτηθούν από το ίδιο καλώδιο και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί ακόμη και να χρησιμοποιηθεί η υπάρχουσα γραμμή τροφοδοσίας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του LonWorks είναι ότι διαφορετικά συστήματα μπορούν να επικοινωνήσουν, να ανταλλάξουν πληροφορίες και να αλληλεπιδράσουν με έναν τυποποιημένο τρόπο. Το αποτέλεσμα είναι ένα αποδοτικότερο και πιο εύκολο στη χρήση σύστημα.

Neurons

Το βασικό κομμάτι ενός προϊόντος LonWorks είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα αποκαλούμενο Neuron. Ένα Neuron chip χειρίζεται και το δίκτυο (μετάδοση σημάτων) και την λειτουργία I/O (εισόδου/εξόδου) μέσω ενός λειτουργικού συστήματος. Το μόνο πράγμα που απαιτείται μεταξύ του Neuron chip και του φυσικού δικτύου είναι ένας πομποδέκτης (transceiver). Κάθε μονάδα που περιέχει ένα Neuron chip, ένα πομποδέκτη και μονάδα I/O καλείται κόμβος. Το δίκτυο αποτελείται από κόμβους που επηρεάζουν το περιβάλλον τους. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους με πλήθος διαφορετικών μέσων με τη χρήση ενός κοινού πρωτοκόλλου μηνυμάτων (LonTalk).

Επεκτασιμότητα

Στην πράξη δεν υπάρχει κανένα όριο στον αριθμό σημείων ελέγχου (κόμβοι) στο δίκτυο. Πρόσθετες λειτουργίες μπορούν εύκολα να προστεθούν αργότερα χωρίς τροποποιήσεις στο υπάρχον σύστημα.

Η δομή του δικτύου αποθηκεύεται στον κόμβο και στη βάση δεδομένων του συστήματος. Ο επανασχηματισμός δεν απαιτεί οποιαδήποτε αλλαγή στα υπάρχοντα καλώδια ή τα εγκατεστημένα προϊόντα. Όλα μπορούν να γίνουν

με ένα PC. Το LonWorks χρησιμοποιεί ένα κοινό εργαλείο πρωτοκόλλου και εγκατάστασης για τις διάφορες εφαρμογές. Αυτό καθιστά εφικτό τον εύκολο συνδυασμό λειτουργιών και διεπαφών για διαφορετικά υποσυστήματα σε ένα κτήριο.

Αξιόπιστη Λειτουργία

Το LonWorks είναι πλήρως κατανεμημένο και δεν χρειάζεται κανένα κεντρικό ελεγκτή. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιων μονάδων το υπόλοιπο σύστημα θα συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά. Το πρωτόκολλο LonTalk φτιάχτηκε για τη μέγιστη αξιοπιστία σε διάφορες λειτουργίες όπως επιβεβαίωση μηνύματος, ανίχνευση λάθους, επαναμετάδοση, προτεραιότητες, προσδιορισμός αποστολέα κ.λπ.

LonTalk

Η καρδιά της τεχνολογίας LonWorks είναι το πρωτόκολλο επικοινωνίας LonTalk. Αυτό το πρωτόκολλο σχεδιάστηκε ειδικά για δίκτυα συστημάτων ελέγχου και καθορίζει τις peer-to-peer επικοινωνίες μεταξύ των συσκευών. Το πρωτόκολλο είναι βασισμένο σε έναν ενισχυμένο CSMA (Carrier Sense Media Access) αλγόριθμο πρόσβασης στο δίκτυο, ο οποίος προβλέπει ένα σχέδιο αποφυγής σύγκρουσης. Τα αποτελέσματα είναι η συνεπής απόδοση του δικτύου, χωρίς υποβάθμιση λόγω αυξημένης κυκλοφορίας στο δίκτυο. Τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου είναι:

- Εφαρμόζεται στο Neuron chip.
- Ακολουθεί το πρότυπο αναφοράς 7- Layer OSI (Open Systems Interconnection model).
- Είναι βελτιστοποιημένο για τα δίκτυα ελέγχου.
- Υποστηρίζει σύντομα μηνύματα.
- Είναι ανεξάρτητο του μέσου.
- Εξασφαλίζει κόμβους χαμηλότερου κόστους.
- Παρέχει υψηλή αξιοπιστία.

1.3.5 BACnet (Building Automation and Control net)

Το BACnet είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας για τον αυτοματισμό κτηρίων και τα δίκτυα ελέγχου ειδικά σχεδιασμένο για τις ανάγκες του αυτοματισμού κτηρίων και τον έλεγχο του εξοπλισμού.

Το BACnet αναπτύχθηκε από μια επιτροπή που διαμορφώθηκε από την Αμερικάνικη Επιτροπή Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE). Ο κύριος στόχος της επιτροπής ήταν να δημιουργήσει ένα πρωτόκολλο που θα επέτρεπε σε κτιριακά συστήματα από διαφορετικούς κατασκευαστές να επικοινωνήσουν και να συνεργαστούν με έναν αρμονικό τρόπο.

Για να επιτύχει τη διαλειτουργικότητα ενός ευρέος φάσματος του εξοπλισμού, η προδιαγραφή BACnet αποτελείται από τρία κύρια μέρη. Το πρώτο μέρος περιγράφει μια μέθοδο απεικόνισης για οποιουδήποτε τύπου εξοπλισμό αυτοματισμού κτηρίου με έναν τυποποιημένο τρόπο. Το δεύτερο μέρος καθορίζει τα μηνύματα που μπορούν να σταλούν μέσω ενός δικτύου υπολογιστών για να επιτηρήσουν και να ελέγξουν τέτοιο εξοπλισμό. Και το τρίτο μέρος καθορίζει ένα σύνολο αποδεκτών LANs που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις επικοινωνίες BACnet.

1.3.6 BitBus

Το BitBus είναι ένα fieldbus που χρησιμοποιείται για να διασυνδέσει αυτόνομες μονάδες ελέγχου, τερματικά κ.λπ. Ταιριάζει ιδιαίτερα στα μεσαίου μεγέθους τηλεγραφήματα ανταλλαγής δεδομένων (10..250 bytes) ακόμη και για μεγάλες αποστάσεις (αρκετά χιλιόμετρα).

Το BitBus είναι βασισμένο σε δύο πρότυπα:

- Το RS485, ως ηλεκτρική προδιαγραφή για την αξιόπιστη επικοινωνία.

- Το SDLC, ως πρωτόκολλο λογισμικού για συμπαγή, σύγχρονη μεταφορά μηνυμάτων.

Υψηλής ταχύτητας δικτυωμένο I/O (δίαυλοι αισθητήρα-ενεργοποιητή) είναι απαραίτητο για λυθεί ένα πρόβλημα με τους συμβατικούς προγραμματίσιμους ελεγκτές (PLC/SPS). Με τη χρησιμοποίηση πραγματικών γλωσσών προγραμματισμού, είναι πολύ απλούστερο - και πολύ ασφαλέστερο - να απομονώσει κανείς το πρόβλημα και να βάλει τη λύση του εκεί όπου το πρόβλημα είναι, π.χ. να βάλει το ρυθμιστή κοντά στη μονάδα που πρέπει να ελεγχθεί. Το BitBus είναι βελτιστοποιημένο για κατανεμημένο έλεγχο και ο πυρήνας mCAT υποστηρίζει αυτήν την ιδέα με την αφιέρωσή του στη διάβαση μηνυμάτων.

Χαρακτηριστικά

- Το BitBus μπορεί να καλύψει μεγάλες περιοχές: 1.2km με ρυθμό μετάδοσης 62.5 Kbit/s.
- Το BitBus μπορεί να χρησιμοποιήσει επαναλήπτες για να πολλαπλασιάσει τα μήκη των καλωδίων.
- Το BitBus χρησιμοποιεί το SDLC, ένα πρωτόκολλο βασισμένο στην ανταλλαγή μηνυμάτων με αυτόματη ανίχνευση λάθους. Τυποποιημένοι σειριακοί ελεγκτές, όπως ο 85C30, πραγματοποιούν το χειρισμό του πρωτοκόλλου SDLC στο υλικό ενώ τα βασισμένα σε ανταλλαγή χαρακτήρων πρωτόκολλα (απλή ασύγχρονη μετάδοση) είναι "επισημασμένα σε οποιαδήποτε ταχύτητα". Το BitBus χρησιμοποιεί ένα ενιαίο συνεστραμμένο ζεύγος συν τη γείωση για μέσο μετάδοσης. Το πρότυπο RS485 αναγνωρίζεται ευρέως για την απουσία θορύβου του.
- Το BitBus χρησιμοποιεί κωδικοποίηση NRZI : το ρολόι διαβιβάζεται με τα δεδομένα και μια πολικότητα δεν χρειάζεται να υπακούει στο ζευγάρι καλωδίων του BitBus. Ένας ελαττωματικός σταθμός ή ένας σταθμός χωρίς ενέργεια δεν μπλοκάρει το δίαυλο.

Μειονεκτήματα

Το BitBus δεν εφαρμόζεται καλά ως διαυλος I/O, π.χ. για να συνδεθούν απλοί αισθητήρες ή βαλβίδες.

1.3.7 Σύγκριση

Οι ακόλουθοι πίνακες παρουσιάζουν τις βασικές ιδιότητες και τις διαφορές μεταξύ των πρωτοκόλλων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ			
Πρωτόκολλο	Οργανισμός Που Αναπτύσσει Την τεχνολογία	Έτος Παρουσίασης	Ακολουθούμενα Πρότυπα
EIBus	European Installation Bus Association	1990	ENV 13154-2 and ANSI/EIA 776
PROFIBUS DP/PA	Siemens/PTO	DP-1994, PA-1995	EN50170
CANBus	Intel and Bosch	1988	ISO11898 ISO11519
LonWorks	Echelon Corp.	1991	ANSI
BACnet	ASHRAE	1995	ANSI/ASHRAE
BitBus	Intel	1984	IEEE1118

Πίνακας 1.1

ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ				
Πρωτόκολλο	Τοπολογία Δικτύου	Φυσικό Μέσο	Μέγιστος Αριθμός Συσκευών (Κόμβοι)	Μέγιστη Απόσταση
EIBus	Δίαυλος	Συνεστραμμένο ζεύγος, RF, Γραμμή Ισχύος	256 ανά γραμμή 65,536 συνολικά	700m μεταξύ των συσκευών 350m μεταξύ μιας μονάδας τροφοδοσίας και μιας συσκευής
PROFIBUS DP/PA	Γραμμή, Αστέρας ή Δακτύλιος	Συνεστραμμένο ζεύγος, Οπτική Ίνα	Με επαναλήπτες: 127 Χωρίς Επαναλήπτες: 32	Με Επαναλήπτες: 800m Χωρίς Επαναλήπτες: 200m Για Οπτική Ίνα: 24Km
CANBus	Δίαυλος	Συνεστραμμένο ζεύγος,	40	40m-1Mb/s, 1km-20 Kb/s
LonWorks	Δίαυλος, Δακτύλιος, Βρόχος, Αστέρας	Συνεστραμμένο ζεύγος,, Οπτική Ίνα, Γραμμή Ισχύος	32,000/ domain	2000m @ 78 kbps
BACnet	Δίκτυο	Συνεστραμμένο ζεύγος,, Οπτική Ίνα, Ομοαξονικό Καλώδιο	2 ⁴⁸	Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες
BitBus	Δίαυλος	Συνεστραμμένο ζεύγος,	Με επαναλήπτες: 250 Χωρίς επαναλήπτες: 32	Με επαναλήπτες: 13.2 Km Χωρίς επαναλήπτες: 1.2 Km

Πίνακας 1.2

2. Το πρότυπο KNX/EIB

2.1 Γενικά

Το KNX/EIB (European Installation Bus) αποτελεί ένα πρότυπο δικτύωσης κτηρίων βασισμένο σε ένα ή περισσότερους διαύλους (buses)[1]. Πρόκειται για ένα βιομηχανικό πρότυπο, το οποίο προτάθηκε από ένα σύνολο εταιριών ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, οι οποίες συνέστησαν τον ανεξάρτητο επιστημονικό φορέα EIBA (EIB Association, www.eiba.org). Στην συνέχεια, το 1999 δημιουργήθηκε η Konnex Association (www.konnex.org) ως συνένωση τριών αυτόνομων ενώσεων δικτύων διαχείρισης κτηρίων, της EIBA, της BCI και της EHSΑ. Έδρα της έγινε το Βέλγιο και τα αντίστοιχα δίκτυα των ενώσεων αυτών ήταν τα EIB, Batibus και EHS. Σήμερα η Konnex Association αποτελείται από περισσότερες από 110 ευρωπαϊκές εταιρίες που ασχολούνται με την ηλεκτρονική, τους αυτοματισμούς, τις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις, τον κλιματισμό, τις λευκές ηλεκτρικές οικιακές συσκευές κ.α. Επίσης υποστηρίζεται από πολλά πανεπιστήμια και τεχνικά εκπαιδευτήρια σε όλη την Ευρώπη (το **Πολυτεχνείο Κρήτης** είναι το μοναδικό ελληνικό πανεπιστημιακό ίδρυμα που επισήμως θεωρείται ως επιστημονικός συνεργάτης της Konnex Association).

Το παλιό πρωτόκολλο EIB και το νέο KNX είναι αμφίδρομα συμβατά γι' αυτό και αναφέρονται με το κοινό όνομα KNX/EIB (στην πραγματικότητα το KNX/EIB είναι στην ουσία το EIB με την δυνατότητα επικοινωνίας με όλες τις KNX συσκευές). Το KNX/EIB λοιπόν, είναι μία σύγχρονη μέθοδος ηλεκτρικών εγκαταστάσεων για κτιριακό αυτοματισμό. Πολλοί αναφέρουν τον όρο “έξυπνο σπίτι” για να περιγράψουν τέτοια συστήματα. Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής: υπάρχουν σε όλο το κτήριο διάφοροι αισθητήρες (θερμοκρασίας, φωτισμού, παρουσίας ανθρώπων), ένας ή περισσότεροι ελεγκτές (PLC, PC) και διάφοροι ενεργοποιητές (φώτα, ηλεκτρικά ρολά, συστήματα θέρμανσης/ψύξης). Όλα αυτά διαθέτουν κάποιον ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή και όταν συνδέονται σε κάποιο δίκτυο KNX/EIB μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους με σκοπό να δημιουργηθεί ένα έξυπνο

σύστημα κτιριακού αυτοματισμού το οποίο θα μετατρέπει ένα απλό σπίτι σε ένα “έξυπνο σπίτι”.

2.2 Τρόποι μετάδοσης

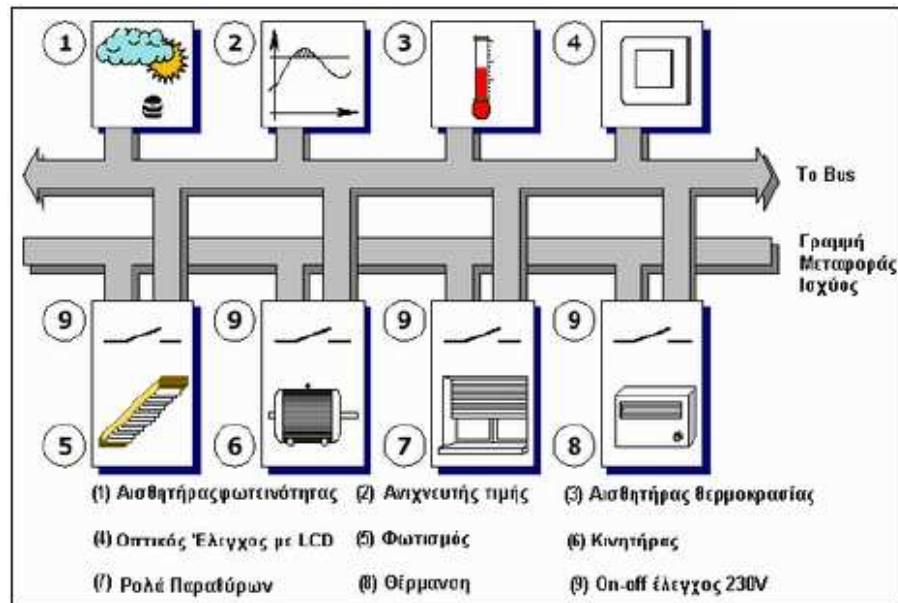
Οι κυριότερες υλοποιήσεις εγκατάστασης με το πρότυπο KNX/EIB γίνονται με τη χρήση τεσσάρων αρκετά διαδεδομένων φυσικών μέσων :

- Συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων (twisted pair)
- Ασύρματη μετάδοση (Radio Transmission)
- Γραμμή ισχύος (Power Line Transmission)
- Ethernet (KNX over IP)

Η πρώτη υλοποίηση θα περιγραφεί αναλυτικά, εφόσον είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως (επίσης χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία), ενώ οι άλλες τρεις συνοπτικά.

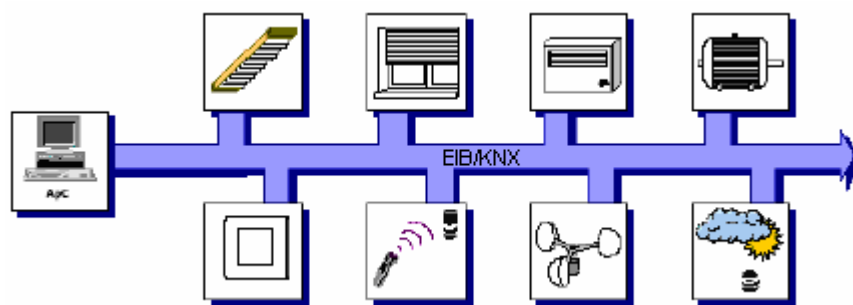
2.2.1 Μετάδοση μέσω συνεστραμμένου ζεύγους

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο διαδεδομένη για την υλοποίηση εγκαταστάσεων βασισμένων στο πρότυπο KNX/EIB. Το κόστος χρήσης συνεστραμμένου ζεύγους είναι αρκετά χαμηλό και πληρεί όλες τις προδιαγραφές για ανάπτυξη κτιριακών εγκαταστάσεων. Προσφέρει αναισθησία στο θόρυβο και στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και δεν επηρεάζει την γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος του κτηρίου, εφόσον τοποθετείται παράλληλα με αυτήν. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της απευθείας τροφοδοσίας των συσκευών από το bus με την προϋπόθεση ότι καταναλώνουν λιγότερο από 100mW. Για τους παραπάνω λόγους, το συνεστραμμένο ζεύγος προτιμάται για καλωδίωση κτηρίων μεγάλου μήκους όταν η εγκατάσταση γίνεται κατά την διάρκεια κατασκευής του κτηρίου. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ένα παράδειγμα εγκατάστασης με συνεστραμμένο ζεύγος.



Σχήμα 2.1 KNX/EIB με συνεστραμμένο ζεύγος

Οι συσκευές που είναι συμβατές με το πρότυπο KNX/EIB, επικοινωνούν μέσω του διαύλου και ονομάζονται συνδρομητές. Το KNX/EIB εξασφαλίζει στον σχεδιαστή, αλλά και στον τελικό καταναλωτή, το πλεονέκτημα της συμβατότητας των παρερχομένων προϊόντων, τώρα, αλλά και στο μέλλον. Μπορούν να τοποθετηθούν σε ράγα ηλεκτρολογικού πίνακα ή χωνευτές στον τοίχο, εφόσον επιτρέπεται. Οι συνδρομητές μπορούν να έχουν αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους μέσω μηνυμάτων. Οι προδιαγραφές του διαύλου ορίζουν ένα ανοιχτό σύστημα, στο οποίο κάθε συνδρομητής μπορεί να επικοινωνήσει με οποιοδήποτε άλλο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ο έλεγχος της εγκατάστασης να είναι αποκεντρωμένος και μοιρασμένος στους συνδρομητές που την αποτελούν, ή κεντρικός με την ύπαρξη ενός κεντρικού συνδρομητή-ελεγκτή. Στην περίπτωση κεντρικού ελέγχου, ο κύριος συνδρομητής αναλαμβάνει τον έλεγχο της εγκατάστασης και συχνά είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής ή ένα PLC. Στο επόμενο σχήμα, δίνεται ένα παράδειγμα κεντρικού ελέγχου, όπου κύριος συνδρομητής είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής, στον οποίο είναι συνδεδεμένα τα αισθητήρια και οι ενεργοποιητές (actuators) μέσω του KNX/EIB διαύλου. Αυτή η δομημένη προσέγγιση χρησιμοποιείται για την τοπολογία της εγκατάστασης, κάνοντας εύκολη τη διαχείριση των συνδεδεμένων στον δίαυλο συσκευών.



Σχήμα 2.2 Κεντρικός έλεγχος από PC

Υπάρχουν δύο είδη συνεστραμμένων ζευγών στο KNX, το TP-0 το οποίο έχει ρυθμό μετάδοσης 4800bits/s και είναι κατάλοιπο του παλιού Batibus και το TP-1 το οποίο έχει ρυθμό μετάδοσης 9600bits/s. Το TP-1 χρησιμοποιείται ευρέως και στην ουσία είναι το παλιό EIB συνεστραμμένου ζεύγους. Το TP-0 και το TP-1 είναι ασύμβατα μεταξύ τους και για ενωθούν χρειάζονται συγκεκριμένη συνδεσμολογία. Για τους περισσότερους ηλεκτρολόγους εγκαταστάτες και μελετητές το TP-1 είναι συνώνυμο του KNX/EIB.

Μέσω της τεχνολογίας KNX/EIB γίνεται δυνατός ο έλεγχος μίας συσκευής από πολλαπλά σημεία της εγκατάστασης ενώ παράλληλα, δεν υφίσταται πρόβλημα στη λειτουργία της εγκατάστασης αν ένας κόμβος παρουσιάσει βλάβη. Είναι εύκολος ο εντοπισμός βλαβών, εφόσον υπάρχει η δυνατότητα δυναμικής επέμβασης στην εγκατάσταση με τη χρήση διαφόρων εργαλείων, αλλά και η πρόσθεση, αφαίρεση ή αλλαγή ενός συνδρομητή.

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

2.2.2 Ασύρματη Μετάδοση

Είναι γνωστή σαν τεχνολογία EIB-RF και σύμφωνα με αυτή δεν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση καινούργιων γραμμών Bus. Χρησιμοποιείται ραδιοκανάλι (868 Mhz), ώστε να μεταδοθούν τα δεδομένα με ασύρματο τρόπο και τόσο τα αισθητήρια, όσο και οι τελικοί αποδέκτες, μπορούν να λειτουργούν με μπαταρίες. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 38,4kbits/s και η κάθε συσκευή μπορεί να απέχει περίπου 300m ελευθέρου χώρου. Εάν απαιτείται μεγαλύτερη απόσταση, τότε επαναλήπτες αναλαμβάνουν την επανάληψη των ράδιο-τηλεγραφημάτων. Η τεχνική αυτή είναι εξαιρετικά κατάλληλη για επέκταση ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων που έχουν υλοποιηθεί με διαφορετική τεχνολογία. Επίσης μήκος καλωδίων είναι μικρό έως μηδαμινό. Το κύριο μειονέκτημα της είναι η ανάγκη χρήσης μπαταριών καθώς και η έλλειψη τέτοιων συσκευών στην αγορά.

2.2.3 Μετάδοση με χρήση γραμμής ισχύος

Είναι μία τεχνική στην οποία η μεταφορά δεδομένων, αλλά και η τροφοδοσία γίνεται, χρησιμοποιώντας μία διαθέσιμη τροφοδοσία 230/400V (Γραμμή ισχύος). Με αυτή την τεχνολογία δεν είναι πλέον απαραίτητο να απλώνονται παράλληλα οι γραμμές του Bus με τις γραμμές ισχύος και είναι η πιο κατάλληλη για την αναβάθμιση ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων παλαιού τύπου χωρίς να χρειάζονται νέα καλώδια. Υπάρχουν δύο είδη αυτής της τεχνικής στο KNX, το PL-110 και το PL-132kHz. Το πρώτο με ρυθμό μετάδοσης 1200bits/s χρησιμοποιεί μετάδοση στα 110kHz και είναι στην ουσία το EIB Powerline. Το δεύτερο με ρυθμό μετάδοσης 2400bits/s χρησιμοποιεί μετάδοση στα 1320kHz και είναι στην ουσία το πρωτόκολλο EHS. Το PL-110 και το PL-132 είναι ασύμβατα μεταξύ τους και για ενωθούν χρειάζονται συγκεκριμένη συνδεσμολογία. Το κύριο μειονέκτημα και της τεχνικής αυτής είναι η έλλειψη τέτοιων συσκευών στην αγορά καθώς κάθε χώρα ενδέχεται να έχει διαφορετικής μορφής και αξιοπιστίας παροχή ηλεκτρικής ενέργειας

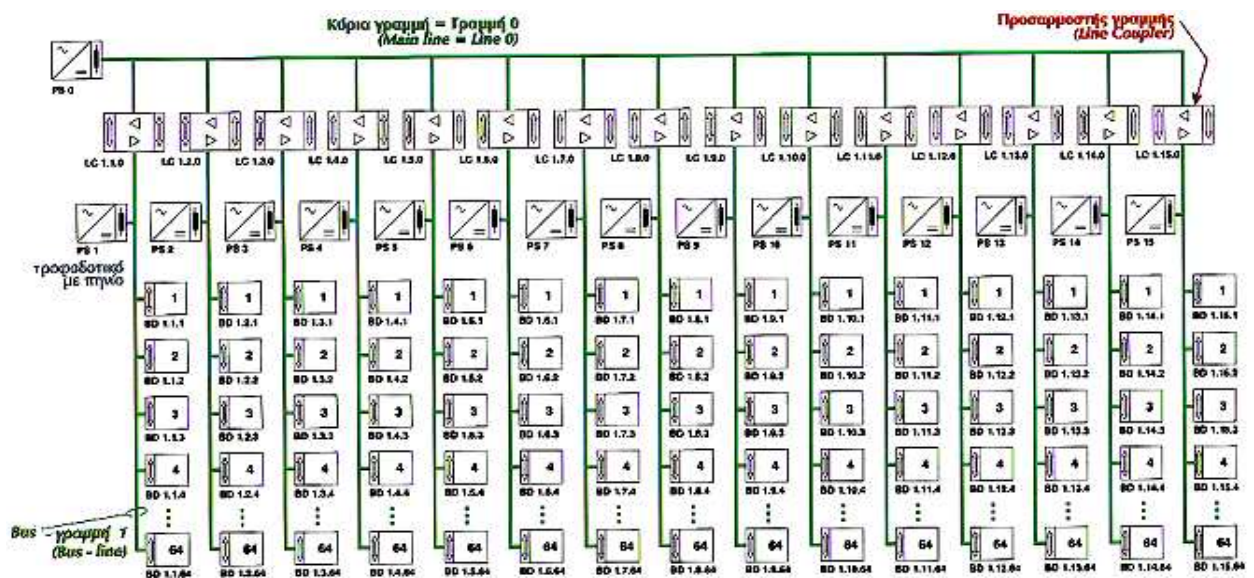
2.2.4 Μετάδοση μέσω Ethernet

Αυτή η τεχνική, γνωστή και ως KNX-over-IP, είναι η πιο πρόσφατη προσθήκη. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι ο ρυθμός μετάδοσης του Ethernet ο οποίος συνήθως είναι της τάξης του Mbit. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι το υψηλό της κόστος αφού ένας προσαρμοστής δικτύου Ethernet π.χ. στα 10Mbit/s είναι ακριβότερος από έναν απλό προσαρμοστή για συνεστραμμένο ζεύγος στα 9,6Kbit/s. Γι' αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε αισθητήρα και ενεργοποιητή αλλά κυρίως μόνο για την επικοινωνία μιας συμβατικής KNX/EIB εγκατάστασης με υπολογιστές ενός δικτύου Ethernet (ίσως και Internet) ή για την επικοινωνία μεταξύ συμβατικών KNX/EIB εγκαταστάσεων με σκοπό να δημιουργηθεί μια μεγαλύτερη εγκατάσταση.

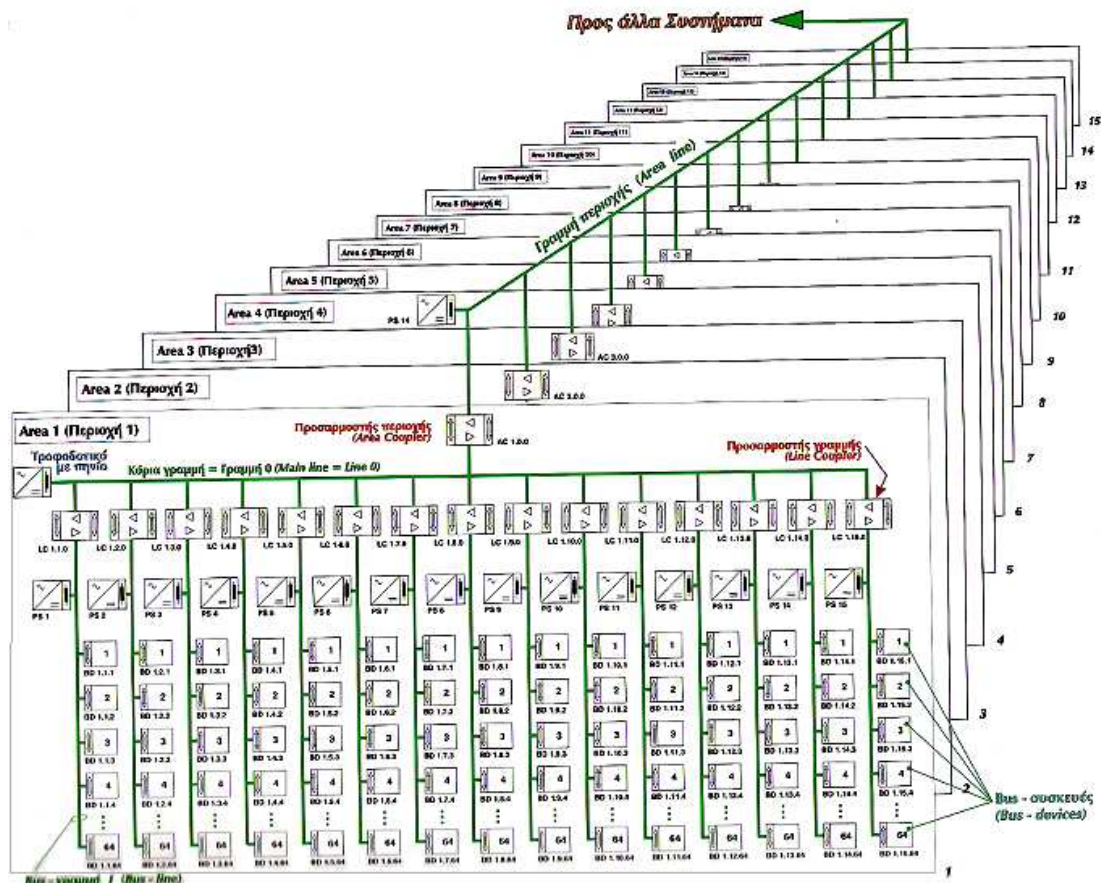
2.3 Τοπολογία και οργάνωση διαύλου

Σημαντική παράμετρος στη σχεδίαση και δημιουργία εγκαταστάσεων που βασίζονται σε τεχνολογία KNX/EIB, είναι η ιεράρχηση και η οργάνωση της τοπολογίας της. Αυτό που έχει προταθεί για το σχεδιασμό της καλωδίωσης είναι μία ιεραρχική δενδροειδής δομή. Η γραμμή (line) αποτελεί τη μικρότερη και απλούστερη μονάδα διαύλου σε όλο το σύστημα KNX/EIB. Ο μέγιστος αριθμός συνδρομητών διαύλου που μπορούν να εγκατασταθούν σε μία γραμμή είναι 64. Σε περίπτωση που απαιτείται εγκατάσταση περισσότερων από 64, τότε θα πρέπει να γίνει η χρήση επαναληπτών (repeaters), τότε ο μέγιστος αριθμός των συνδρομητών γίνεται 255. Η μέγιστη απόσταση συσκευών σε γραμμής με χρήση συνεστραμμένου ζεύγους είναι 700 μέτρα με ταχύτητα 9600bps. Η αμέσως μεγαλύτερη δομική μονάδα στην ιεραρχία είναι περιοχή (area). Σε μία περιοχή με τη χρήση ειδικών συσκευών, που λέγονται προσαρμοστές γραμμής (line couplers), μπορούν να συνδεθούν έως 15 γραμμές. Ο συνολικός αριθμός συνδρομητών που μπορούν να φιλοξενηθούν χωρίς επαναλήπτες φτάνει τους 960. Για τη λειτουργία κάθε γραμμής

απαιτείται ένα πιστοποιημένο KNX/EIB τροφοδοτικό. Το κάθε τροφοδοτικό αναλαμβάνει την τροφοδοσία των συνδρομητών, που είναι συνδεδεμένοι στην εν λόγω γραμμή. Τέλος, με τη χρήση προσαρμοστών περιοχών (area couplers) μπορούν να συνδεθούν μέχρι και 15 περιοχές μαζί. Έτσι ο συνολικός αριθμός συνδρομητών που μπορούν να φιλοξενηθούν είναι 14400. Κάθε γραμμή λειτουργεί ανεξάρτητα από τις άλλες, έτσι αν συμβεί οποιοδήποτε πρόβλημα σε μια γραμμή (δυσλειτουργία τροφοδοτικού ή συσκευής, βραχυκύκλωμα, προσθήκη νέων συσκευών) τότε δεν θα επηρεαστούν οι υπόλοιπες. Επίσης ο διαχωρισμός του διαύλου σε περιοχές και γραμμές, παρέχει το πλεονέκτημα ότι η κίνηση δεδομένων, σε μία γραμμή ή περιοχή, είναι απομονωμένη και δεν επηρεάζει τη ροή των πληροφοριών στις υπόλοιπες γραμμές και περιοχές, έτσι αυξάνεται η φαινομενική ταχύτητα του δικτύου. Γι' αυτό, όταν οι συσκευές είναι περισσότερες από 64, είναι προτιμότερο να τοποθετούνται σε πολλές γραμμές και όχι σε μόνο μία με την χρήση επαναληπτών. Ακολουθούν δύο σχήματα που αναπαριστούν την παραπάνω τοπολογία του KNX/EIB.



Σχήμα 2.3 Μία περιοχή με 15 γραμμές

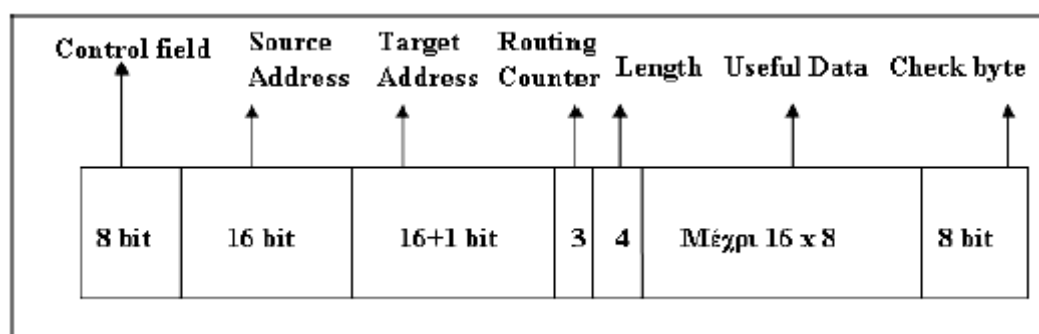


Σχήμα 2.4 Ένα σύστημα με 15 περιοχές

2.4 Μετάδοση πληροφορίας - τηλεγραφήματα

Οι πληροφορίες ανταλλάσσονται μεταξύ των συνδρομητών του διαύλου με τη μορφή τηλεγραφημάτων. Οι πληροφορίες μεταδίδονται συμμετρικά στη γραμμή του Bus με ρυθμό μετάδοσης 9600bits/sec καθορίζοντας έτσι το μέσο χρόνο μετάδοσης ενός τηλεγραφήματος στα 25 msec. Για λόγους ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης χρησιμοποιείται, για τη μετάδοση, διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο γραμμών και όχι διαφορά δυναμικού σε σχέση με το δυναμικό της γης. Το πρωτόκολλο KNX/EIB επιβάλλει τα ξεχωριστά μηνύματα πληροφορίας να μεταδίδονται στη γραμμή του διαύλου ακολουθώντας συγκεκριμένη σειρά. Επιπλέον, επιβάλλεται κάθε χρονική στιγμή, ο διάυλος να χρησιμοποιείται για εκπομπή πληροφορίας από ένα μόνο συνδρομητή. Ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης που χρησιμοποιείται, είναι ο CSMA/CA, μία παραλλαγή του CSMA/CD του Ethernet. Υπάρχει

βέβαια πρόβλεψη για τα επείγοντα τηλεγραφήματα, σύμφωνα με την οποία δίνεται υψηλή προτεραιότητα σε αυτά έναντι άλλων συμβατικών.



Σχήμα 2.5 Δομή τηλεγραφήματος

Αποτελείται από μία σειρά από χαρακτήρες, οργανωμένους σε πεδία. Η χρήσιμη πληροφορία βρίσκεται στο πεδίο των δεδομένων. Το τηλεγράφημα ελέγχεται για την ορθότητα του μέσω του πεδίου Check byte (checksum). Τα πεδία διεύθυνσης περιλαμβάνουν την διεύθυνσεις του αποστολέα (source address) και την διεύθυνση των παραληπτών (target address).

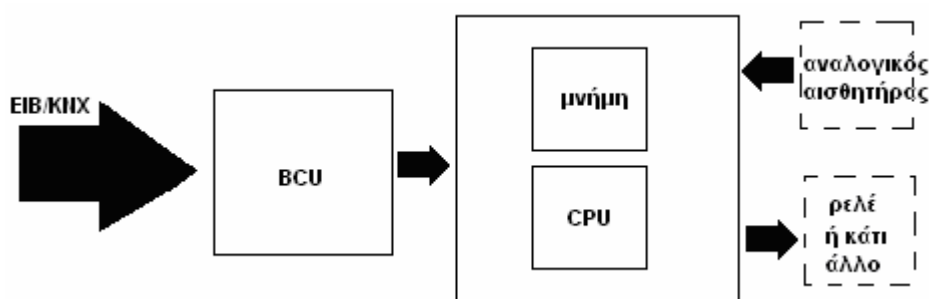
Η διεύθυνση της πηγής είναι πάντα η φυσική διεύθυνση (physical address), η οποία είναι μοναδική για κάθε συνδρομητή. Αυτή καθορίζει την περιοχή και τη γραμμή που βρίσκεται ο κάθε συνδρομητής. Η διεύθυνση προορισμού καθορίζει τη συσκευή ή τις συσκευές, οι οποίες είναι δέκτες του τηλεγραφήματος. Για τη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

Οι συνδρομητές διαύλου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τους αισθητήρες, τους ελεγκτές και τους ενεργοποιητές. Οι αισθητήρες δίνουν εντολές ή πληροφορίες στο σύστημα (μπορεί να είναι και απλά button), οι ελεγκτές αξιοποιώντας τις πληροφορίες δίνουν εντολές (PC, PLC, θερμοστάτες, χρονοδιακόπτες κτλ.) ενώ οι ενεργοποιητές (ηλ. κινητήρες, καλοριφέρ, κλιματιστικά) τις εκτελούν. Η διασύνδεση αυτών γίνεται με την αντιστοίχιση

της ίδιας διεύθυνσης ομάδας στα αντικείμενα επικοινωνίας τους κάνοντας έτσι δυνατή την αποκατάσταση της μεταξύ τους επικοινωνίας.

2.5 Συνδρομητές διαύλου

Ο κάθε συνδρομητής διαύλου αποτελείται από το υποσύστημα προσαρμογής διαύλου (BCU – bus coupling unit) το οποίο αναλαμβάνει την αποστολή και την λήψη των τηλεγραφημάτων στον δίαυλο και το υποσύστημα εφαρμογής. Το υποσύστημα εφαρμογής διαθέτει επεξεργαστή και αξιοποιεί την επικοινωνία με τις άλλες συσκευές μέσω του δικτύου για να κάνει κάτι χρήσιμο. Αν η συσκευή είναι τύπου αισθητήρα αναλαμβάνει να δειγματοληπτεί τον αναλογικό αισθητήρα που διαθέτει και να στέλνει το σήμα του περιοδικά (ή όχι) στο δίκτυο. Αν είναι συσκευή τύπου ενεργοποιητή τότε για παράδειγμα αναλαμβάνει να ανοίγει και να κλείνει τα ρελέ που διαθέτει με βάση τα μηνύματα που δέχεται και ένα πρόγραμμα που τρέχει στον επεξεργαστή του. Ένας προσωπικός υπολογιστής μπορεί να γίνει ελεγκτής ή απλά επόπτης του δικτύου με την προσθήκη ειδικής συσκευής σε θύρα RS-232 ή USB και με την χρήση λογισμικού όπως OPC server και Etec Falcon. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται PC και το λογισμικό EIB-OPC server συνεργασία με το MATLAB με σκοπό να παρθούν πειραματικές μετρήσεις από την λειτουργία του συστήματος που υλοποιήθηκε.



Σχήμα 2.6 Συνδρομητής διαύλου

Κάθε συσκευή KNX/EIB μπορεί να προγραμματιστεί με σκοπό να αλλάζουν οι επιμέρους παράμετροι της (πόσο συχνά να στέλνει μηνύματα, τι τύπο δεδομένων να χρησιμοποιεί για την αποστολή, που να στέλνει τα μηνύματα κτλ.). Αυτό γίνεται με το λογισμικό ETS με το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί μια οποιαδήποτε μεγάλη εγκατάσταση KNX/EIB.

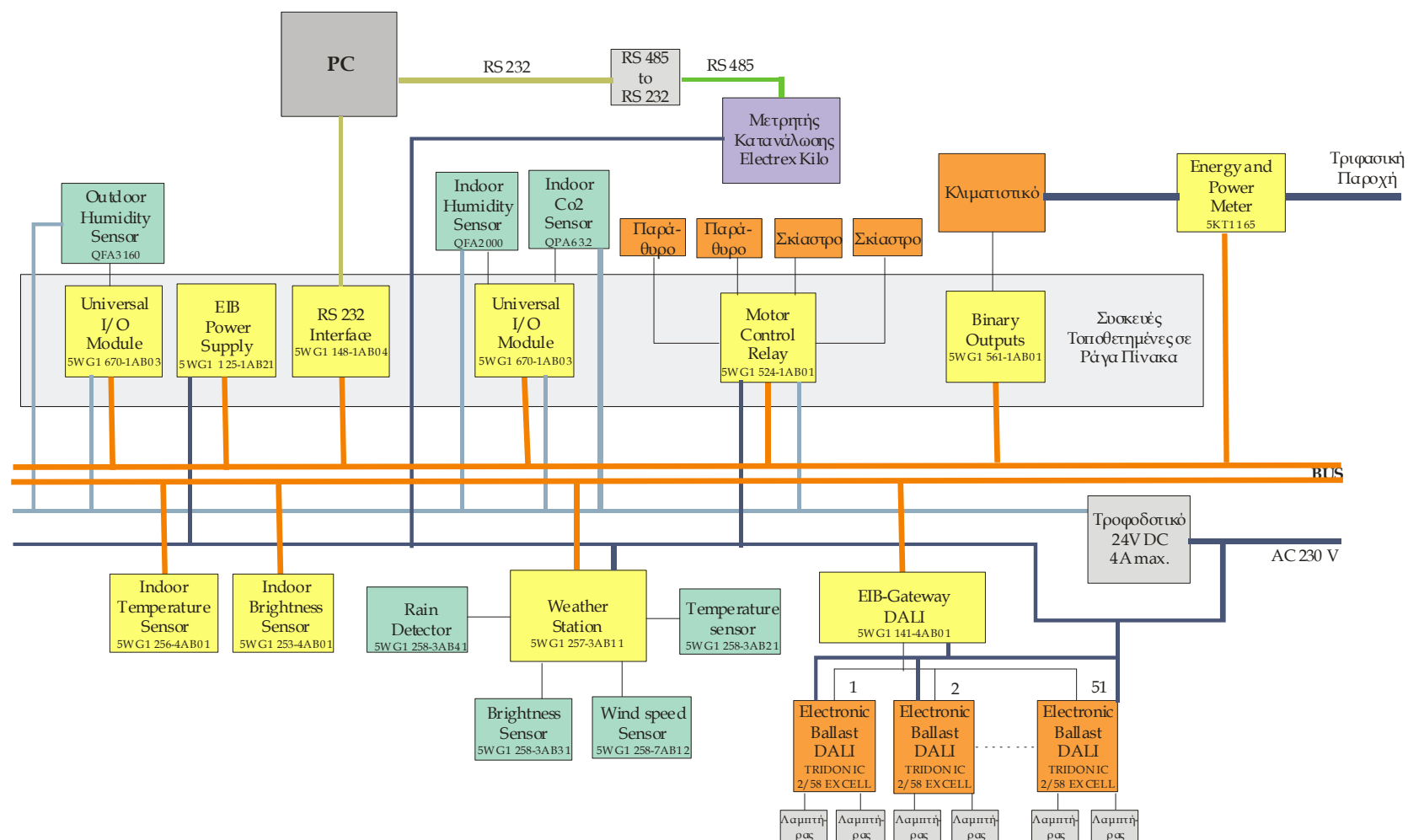
3. Εγκατάσταση KNX/EIB στο εργαστήριο ελέγχου βιομηχανικών συστημάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης

Η εγκατάσταση αυτή υπάρχει από το 2007 και έγινε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Όλες οι συσκευές συνδέθηκαν σε μία γραμμή του δικτύου KNX/EIB, έτσι το όλο δίκτυο εκφυλίστηκε σε απλό δίαυλο (bus). Η εγκατάσταση περιλαμβάνει συνολικά 9 αισθητήρες και 6 ενεργοποιητές. Ο αριθμός των συσκευών KNX/EIB είναι όμως διαφορετικός επειδή υπάρχουν συσκευές οι οποίες για παράδειγμα ελέγχουν ταυτόχρονα δύο ενεργοποιητές ή είναι συνδεδεμένες με περισσότερους από έναν αισθητήρες. Η συνολική εγκατάσταση φαίνεται στο σχήμα 3.1. Με κίτρινο χρώμα φαίνονται οι συσκευές EIB, με πράσινο οι αισθητήρες και με πορτοκαλί οι ενεργοποιητές.

Ο χώρος του εργαστηρίου στον οποίο έγινε η εγκατάσταση είναι περίπου 125 τετραγωνικά μέτρα και το ύψος είναι περίπου 3,5 μέτρα, άρα ο όγκος είναι περίπου 437,5 κυβικά μέτρα.



Εικόνα 3.1 Πανοραμική άποψη του εργαστηρίου Ελέγχου Βιομηχανικών Συστημάτων



Σχήμα 3.1 Το «υλικό» του συστήματος και οι συνδεσμολογίες

3.1 Αισθητήρες

Εσωτερικός αισθητήρας φωτεινότητας

Ο αισθητήρας αυτός (Siemens 5WG1 252-4AB02) συνδέεται απευθείας στο δίκτυο KNX/EIB, έχει εύρος μέτρησης 200-1900 lux και ανάλυση 7,68 lux. Τοποθετήθηκε ψηλά στο κέντρο του εργαστηρίου με κατεύθυνση προς τα κάτω έτσι ώστε να μετράει σωστά την εσωτερική φωτεινότητα του εργαστηρίου. Η συσκευή αυτή τροφοδοτείται από το bus[5].

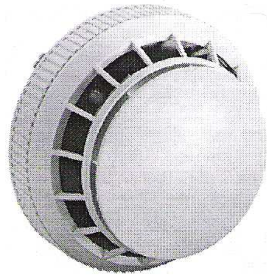


Εικόνα 3.2 Εσωτερικός αισθητήρας φωτεινότητας

Εσωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή KNX/EIB η οποία λέγεται Combined Fire Alarm. Αυτή η συσκευή (Siemens 5WG1 256-4AB01) ειδικεύεται στην μέτρηση της θερμοκρασίας και του καπνού με σκοπό την αναγνώριση ύπαρξης φωτιάς. Οι έξοδοι της (οι οποίες είναι είσοδοι στο σύστημα μας) μπορεί να είναι η τιμή της θερμοκρασίας, με εύρος τιμών -25 έως 70 °C και ανάλυση 0.5 °C, και η τιμή της μέτρησης του καπνού. Αν και η μέτρηση της θερμοκρασίας δεν είναι καθόλου ακριβής, μπορεί να μας οδηγήσει σε ένα σύστημα που δουλεύει χρησιμοποιώντας λογική τύπου θερμοστάτη όπως στις συμβατικές. Η μέτρηση του καπνού γίνεται μετρώντας την οπτική καθαρότητα του αέρα και για αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της συγκέντρωσης του CO₂ (το CO₂ είναι διάφανο). Η μέτρηση του καπνού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση φωτιάς ως ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του συστήματος μας. Επίσης η συσκευή αυτή διαθέτει για είσοδο μία σειρήνα η οποία ενεργοποιείται από μόνη της όταν

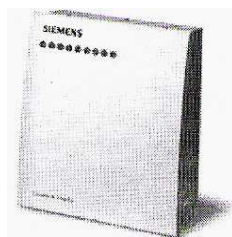
αναγνωριστεί φωτιά αλλά μπορεί να ενεργοποιηθεί και από οποιαδήποτε άλλη συσκευή μέσω του δικτύου. Μια καλή ιδέα είναι να ενεργοποιείται για λίγο όταν ο χρήστης έχει ρυθμίσει το σύστημα στο χειροκίνητο και κάνει οποιαδήποτε ενέργεια η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα σπατάλη ενέργειας π.χ. να ανοίγει παράθυρο ενώ δουλεύει το κλιματιστικό. Η συσκευή αυτή τροφοδοτείται από το bus[5].



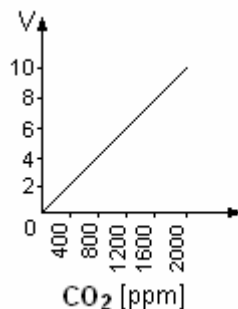
Εικόνα 3.3 Combined fire alarm

Αισθητήρας συγκέντρωσης CO₂

Ο αισθητήρας αυτός (Siemens QPA63.2) μπορεί να μετράει δύο μεγέθη, την συγκέντρωση του CO₂ με εύρος μέτρησης 0 - 2000 ppm και ανάλυση 20 ppm, και την συγκέντρωση VOC σε κάποιο σχετικό σύστημα μέτρησης (το VOC είναι η μέτρηση πολλών πτητικών ουσιών και γι' αυτό δεν υπάρχει απόλυτη μονάδα μέτρησης). Αυτός ο αισθητήρας δεν συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, αλλά έχει ως έξοδο δύο καλώδια (ένα για το CO₂ και ένα για το VOC) με τιμές 0-10V για την αναπαράσταση των τιμών που μετράει. Επίσης τροφοδοτείται από το τροφοδοτικό "LOGO! Power".



Εικόνα 3.4 Αισθητήρας CO₂



Σχήμα 3.2 Η έξοδος του αισθητήρα CO₂

Εσωτερικός αισθητήρας σχετικής υγρασίας

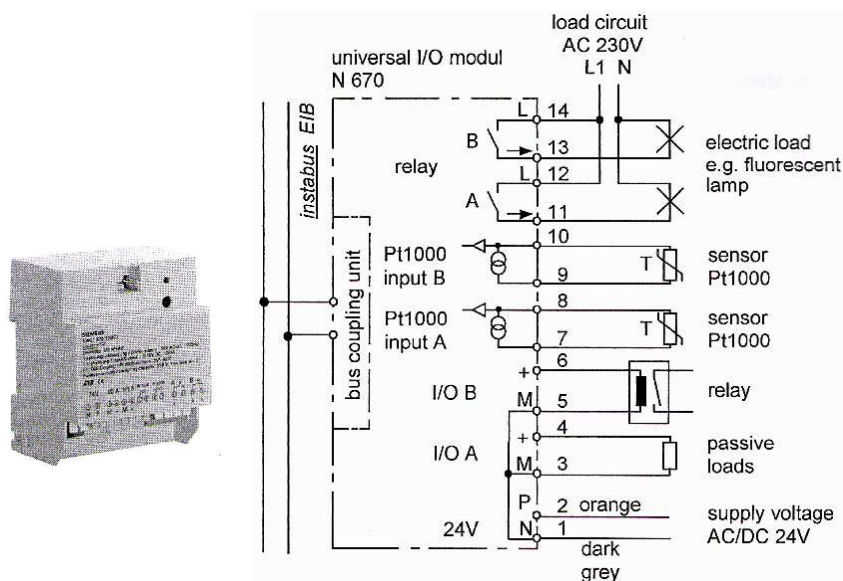
Ο αισθητήρας αυτός (Siemens QFA2000) μπορεί να μετράει τη σχετική υγρασία εσωτερικού χώρου με εύρος μέτρησης 0 – 100% και ανάλυση 1%. Αυτός ο αισθητήρας δεν συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, αλλά έχει ως έξοδο ένα καλώδιο με τιμές 0-10V για την αναπαράσταση των τιμών που μετράει. Επίσης τροφοδοτείται από το τροφοδοτικό “LOGO! Power”.



Εικόνα 3.5 Εσωτερικός αισθητήρας σχετικής υγρασίας

Universal I/O module

Για να σταλούν η τιμή του CO₂ και της σχετικής υγρασίας στο δίκτυο πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια συσκευή η οποία θα έχει δύο αναλογικές εισόδους τάσης DC 0-10V και η οποία θα συνδέεται στο δίκτυο KNX/EIB με σκοπό να στέλνει την τιμή αυτή στις υπόλοιπες συσκευές. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το Universal I/O Module N670 (Siemens 5WG1 670-1AB03) το οποίο διαθέτει 2 θύρες που μπορούν να προγραμματιστούν ως εισόδοι ή ως έξοδοι (είτε αναλογικές είτε ψηφιακές), 2 εισόδους για αισθητήρες τύπου Pt1000 και 2 εξόδους τύπου ρελέ. Η συσκευή αυτή τροφοδοτείται από το bus.



Σχήμα 3.3 Τρόποι λειτουργίας του Universal I/O Module

Οι έξοδοι του αισθητήρων CO₂ και σχετικής υγρασίας συνδέονται ως εισοδοι στις θύρες I/O A και B που φαίνονται στο σχήμα 3.6[5].

Εξωτερικοί αισθητήρες του weather station

Το weather station (Siemens 5WG1 257-3AB11) είναι μια KNX/EIB συσκευή η οποία μπορεί να συνδεθεί με πολλούς και διαφορετικούς αισθητήρες με σκοπό να μετρηθούν διάφορες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Έχει εγκατασταθεί στην ταράτσα ακριβώς πάνω από το εργαστήριο με σκοπό να παρθούν μετρήσεις για το εξωτερικό περιβάλλον του εργαστηρίου. Η συγκεκριμένη συσκευή διαθέτει 4 εισόδους, στις εισόδους αυτές έχουν συνδεθεί ένας αισθητήρας βροχής, ένας φωτεινότητας, ένας θερμοκρασίας και ένας ταχύτητας του αέρα. Η συσκευή αυτή τροφοδοτείται από την συμβατική παροχή ηλ. ενέργειας (230V AC, 50 hertz) και η οποία στην συνέχεια μετασχηματίζεται και τροφοδοτεί τους αισθητήρες.



Σχήμα 3.4 Το weather station χωρίς και με τους αισθητήρες



Εικόνα 3.6 Αισθητήρες που συνδέονται στο weather station
(βροχής, φωτεινότητας, θερμοκρασίας, ταχύτητας του αέρα)



Εικόνα 3.7 Οι αισθητήρες του weather station τοποθετημένοι στην τάρατσα του εργαστηρίου

Ο αισθητήρας βροχής (Siemens 5WG1 258-3AB41) μπορεί να δώσει μόνο δύο τιμές 1 όταν βρέχει και 0 όταν δεν βρέχει, έτσι είναι μια ψηφιακή είσοδος στο σύστημα μας. Ο αισθητήρας φωτεινότητας (Siemens 5WG1 258-3AB31) έχει εύρος μέτρησης 0 - 40.000 lux με ανάλυση 156,24 lux και είναι ιδανικός για μέτρηση της εξωτερικής φωτεινότητας. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας (Siemens 5WG1 258-3AB21) έχει εύρος μέτρησης -20 έως +40 βαθμούς κελσίου και ανάλυση 0,24 °C. Τέλος ο αισθητήρας ταχύτητας ανέμου (Siemens 5WG1 258-7AB12) έχει εύρος μέτρησης 0- 35 m/s και ανάλυση 0,27m/s[5].

Εξωτερικός αισθητήρας σχετικής υγρασίας

Ο αισθητήρας αυτός (Siemens QFA3160) μπορεί να μετράει τη σχετική υγρασία φ με εύρος μέτρησης 0 - 100% και ανάλυση 1%. Αυτός ο αισθητήρας δεν συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, αλλά έχει ως έξοδο ένα καλώδιο με τιμές 0-10V για την αναπαράσταση των τιμών που μετράει. Επίσης τροφοδοτείται από το τροφοδοτικό "LOGO! Power".

Για να σταλεί η τιμή της εξωτερικής σχετικής υγρασίας στο δίκτυο χρησιμοποιείται ένα Universal I/O Module ίδιο με αυτό αναφέρθηκε και για τη σύνδεση των εσωτερικών αισθητήρων CO₂ και σχετικής υγρασίας.

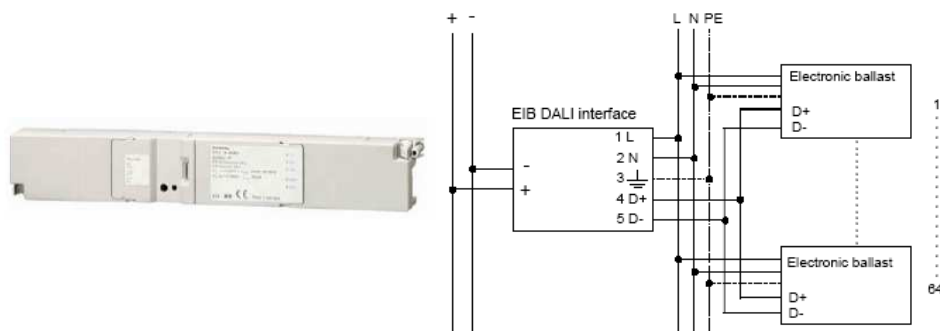


Εικόνα 3.8 Εξωτερικός αισθητήρας σχετικής υγρασίας

3.2 Συσκευές ελέγχου ενεργοποιητών

Οι συσκευές ελέγχου ενεργοποιητών είναι 3 και ελέγχουν τα φώτα, το σύστημα θέρμανσης ψύξης, τα παράθυρα και τα σκίαστρα.

Ενεργοποιητής φωτισμού: Η συσκευή αυτή με όνομα EIB DALI Interface (Siemens 5WG1 141-4AB01) είναι στην ουσία μια γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ ενός δικτύου EIB με ένα σύστημα DALI (Digital Addressable Lighting Interface – ψηφιακή διευθυνσιοδοτούμενη διεπαφή φωτισμού). Το DALI είναι ένα σύστημα το οποίο μπορεί να ελέγξει μέχρι 64 διαφορετικές ομάδες φωτιστικών σωμάτων. Στην ουσία τα φωτιστικά σώματα του εργαστηρίου (51 συνολικά χωρισμένα σε 10 ομάδες) είναι συνδεδεμένα σε ένα σύστημα DALI και μέσω της συσκευής DALI Interface μπορούν να ελεγχθούν μέσω του δικτύου KNX/EIB. Τα φώτα ελέγχονται μέσω του KNX/EIB από κοινού ως μία ομάδα και μπορούν είτε απλά να ανοίγουν και να κλείνουν (έλεγχος on/off) είτε να ρυθμίζεται η φωτεινότητά τους σε 256 διακριτές στάθμες. Στην περίπτωση που είναι νύκτα (άρα ο φυσικός/εξωτερικός φωτισμός είναι 0) και αν όλα τα φώτα είναι ανοικτά τότε ο εσωτερικός φωτισμός μπορεί να φτάσει μέχρι 400 lux. Η συσκευή αυτή τροφοδοτείται από την συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.5 EIB DALI Interface

Στο εργαστήριο υπάρχουν συνολικά 102 λαμπτήρες φθορισμού τύπου T8, οι 94 είναι ονομαστικής ισχύος 58W και οι 8 ονομαστικής ισχύος 18W. Ανά 2 συνδέονται σε μια συσκευή electronic ballast DALI. Συνολικά

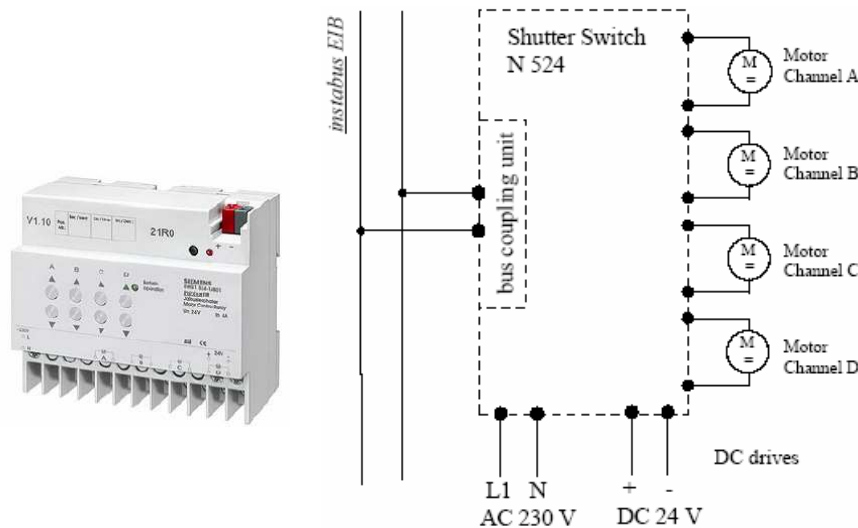
εγκαταστάθηκαν 47 συσκευές TRIDONIC pca excel one4all 2×58 W και 4 συσκευές TRIDONIC pca excel one4all 2×18 W.



Εικόνα 3.9 Electronic ballast DALI, Tridonic pca excel one4all

Ενεργοποιητές παραθύρων και σκιάστρων: Η συσκευή Shutter switch N524 N561 (Siemens 5WG1 524-1AB01) συνδέεται με τους ηλεκτρικούς κινητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε δύο παράθυρα και σε δύο ηλεκτρικά σκίαστρα στο εργαστήριο[5]. Η συσκευή αυτή προορίζεται για τον έλεγχο ηλεκτρικών κινητήρων για σκίαστρα. Η κίνηση του κάθε παραθύρου και του κάθε σκιάστρου γίνεται με έναν DC ηλ. κινητήρα ενώ η πολικότητα της DC τάσης είναι αυτή που καθορίζει το αν θα γίνει άνοιγμα ή κλείσιμο. Επίσης το πόσο θα ανοίξει ή το πόσο θα κλείσει εξαρτώνται από το πόσο χρόνο εφαρμόζεται τάση στον κινητήρα. Η συσκευή αυτή με την κατάλληλη συνδεσμολογία μπορεί να δέχεται ως είσοδο από το KNX/EIB μια τιμή για την θέση των σκιάστρων και αυτόματα να ανοίγει και να κλείνει τα κατάλληλα ρελέ για τον χρόνο που χρειάζεται με σκοπό τα σκίαστρα να έρθουν στην επιθυμητή θέση. Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να ελέγχεται ακόμα και η θέση των περσίδων. Ακόμα, σε αυτήν την συσκευή μπορεί να συνδεθεί ακόμα και κινητήρας για άνοιγμα και για κλείσιμο παραθύρων (αν και το όνομα της συσκευής περιγράφει ότι προορίζεται μόνο για σκίαστρα) αφού τα παράθυρα ελέγχονται με τον ίδιο τρόπο που ελέγχονται τα σκίαστρα. Η συσκευή Shutter switch μπορεί να ελέγξει μέχρι 4 ηλεκτρικούς κινητήρες, έτσι σε αυτήν έχουν συνδεθεί οι κινητήρες από δύο παράθυρα και από δύο σκίαστρα. Η συσκευή

αυτή τροφοδοτείται από την συμβατική παροχή ηλ. ενέργειας για να λειτουργήσει και από το τροφοδοτικό “LOGO! Power” για λειτουργήσουν οι κινητήρες.



Σχήμα 3.6 Shutter switch

Παράθυρα

Τα δύο υπό έλεγχο παράθυρα είναι διαστάσεων 80×30 cm το καθένα. Σε κάθε παράθυρο τοποθετήθηκε ο ηλεκτρικός μηχανισμός ανοίγματος, Turning Sash Drive SHD 50/450 της εταιρίας D+H. Οι κινητήρες λειτουργούν με τάση 24V DC και έχουν μέγιστη ένταση ρεύματος 1A.



Εικόνα 3.10 Ο μηχανισμός που τοποθετήθηκε στα παράθυρα

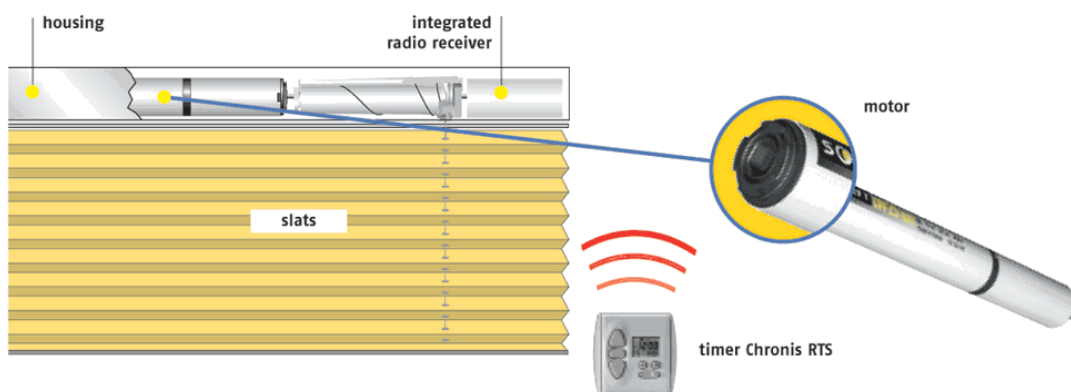


Εικόνα 3.11 Παράθυρο με μηχανισμό ανοίγματος στο εργαστήριο

Σκίαστρα

Υπάρχουν δυο υπό έλεγχο σκίαστρα. Το ένα καλύπτει παράθυρο διαστάσεων 175×125 cm και το άλλο παράθυρο διαστάσεων 175×85 cm.

Τα σκίαστρα που τοποθετήθηκαν (Somfy Concept 25) λειτουργούν με τάση 24V DC και έχουν μέγιστη ένταση ρεύματος 0,5A.



Εικόνα 3.12 Τα ηλεκτρικά σκίαστρα που τοποθετήθηκαν



Εικόνα 3.13 Ηλεκτρικό σκίαστρο εγκατεστημένο στο εργαστήριο

Το σύστημα θέρμανσης/ψύξης: Το κλιματιστικό Fyrogenis MFS D12 ήταν ήδη εγκατεστημένο στο χώρο του εργαστηρίου. Δεν είναι διαθέσιμα τα πλήρη και ακριβή χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου συστήματος (BTU κτλ.). Αυτά τα οποία γνωρίζουμε είναι τα εξής: λειτουργεί με τριφασική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και καταναλώνει συνολικά περίπου 30KW όταν λειτουργεί. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η δυνατότητα ψύξης που έχει είναι 38400 kcal/h (η δυνατότητα θέρμανσης δεν είναι γνωστή). Ο χώρος του εργαστηρίου στον οποίο και είναι εγκατεστημένο είναι περίπου 125 τετραγωνικά μέτρα και το ύψος είναι περίπου 3,5 μέτρα, άρα ο όγκος είναι περίπου 437,5 κυβικά μέτρα[5].

Το συγκεκριμένο σύστημα θέρμανσης/ψύξης είχε και ένα χειριστήριο/ελεγκτή από το οποίο ο χρήστης μπορούσε να ενεργοποιήσει το όλο σύστημα στο ζεστό ή στο κρύο καθώς και να ενεργοποιήσει την ανακύκλωση του αέρα για να έχει

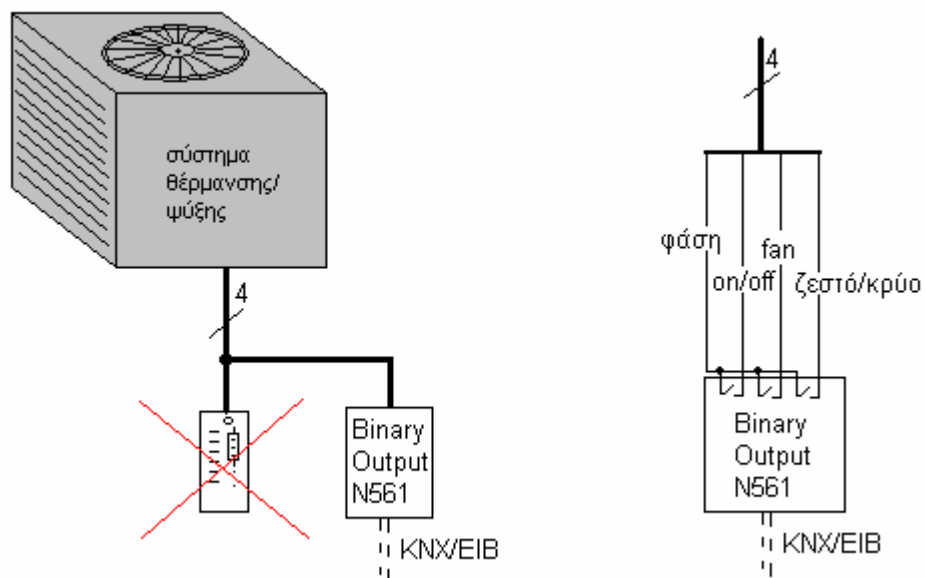
όλος ο χώρος ομοιόμορφη θερμοκρασία. Δεν υπήρχε η δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής θερμοκρασίας (καθώς το σύστημα είναι παλιό, 1995) ούτε η δυνατότητα να ρυθμιστεί η ισχύς θέρμανσης/ψύξης (π.χ. το πλήθος των αντιστάσεων σε περίπτωση θέρμανσης ή οι στροφές του κινητήρα του συμπιεστή σε περίπτωση ψύξης). Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αποσυνδέθηκε το παραπάνω χειριστήριο και στην θέση του συνδέθηκε η KNX/EIB συσκευή όνομα Binary Output N561 η οποία περιγράφεται παρακάτω. Το σύστημα θέρμανσης/ψύξης ελέγχεται με 4 καλώδια, την φάση (230V 50hertz), το on/off, το heat/cool και το out. Βραχυκυκλώνοντας κάποιο από τα καλώδια on/off, heat/cool ή out με την φάση τότε παίρνει την λογική τιμή 1, αλλιώς παίρνει την τιμή 0. Όταν το on/off είναι 0 τότε δεν λειτουργεί τίποτα, όταν είναι 1 τότε λειτουργεί ο κινητήρας ανακύκλωσης του αέρα, όταν είναι και το out ανοικτό τότε το σύστημα μπαίνει σε λειτουργία θέρμανσης ή ψύξης ανάλογα με την τιμή του heat/cool. Η ανακύκλωση του αέρα είναι αναγκαία μετά από την λειτουργία στο κρύο για να μην βγει εκτός λειτουργίας το σύστημα θέρμανσης/ψύξης λόγω δημιουργίας πάγου σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

on / off	Heat / cool	out	λειτουργία
0	0	0	εκτός λειτουργίας
0	0	1	εκτός λειτουργίας
0	1	0	εκτός λειτουργίας
0	1	1	εκτός λειτουργίας
1	0	0	ανακύκλωση αέρα
1	0	1	λειτουργία στο κρύο
1	1	0	ανακύκλωση αέρα
1	1	1	λειτουργία στο ζεστό

Πίνακας 3.1. Λειτουργία του συστήματος θέρμανσης/ψύξης σε σχέση με τις λογικές τιμές των καλωδίων ελέγχου

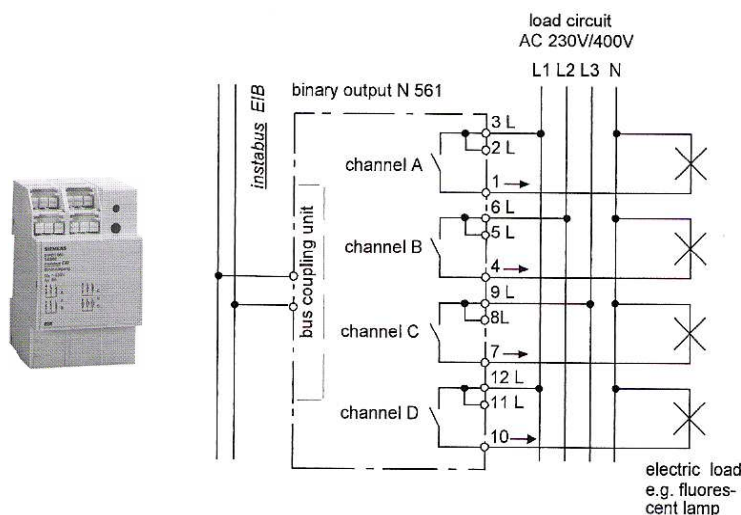


Εικόνα 3.14 Το κλιματιστικό που χρησιμοποιήθηκε



Σχήμα 3.7 Συνδεσμολογία του Binary Output N561 με το σύστημα θέρμανσης/ψύξης

Ενεργοποιητής συστήματος θέρμανσης/ψύξης: Στον χώρο του εργαστηρίου υπάρχει εγκατεστημένο ένα σύστημα θέρμανσης/ψύξης. Αυτό όταν αγοράστηκε ήταν συνδεδεμένο με έναν απλό ελεγκτή τύπου θερμοστάτη ο οποίος αποσυνδέθηκε και την θέση του πήρε η συσκευή KNX/EIB με όνομα Binary Output N561 (Siemens 5WG1 561-1AB01). Αυτή η συσκευή είναι στην ουσία 4 έξοδοι τύπου ρελέ οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν μέσω του δικτύου KNX/EIB και τροφοδοτείται από το bus.



Σχήμα 3.8 Binary Output N561

Ανοίγοντας και κλείνοντας αυτά τα ρελέ μπορεί να ελεγχθεί το σύστημα θέρμανσης/ψύξης ρυθμίζοντας έτσι αν και για πόσο θα λειτουργεί ή αν θα λειτουργεί στην κατάσταση θέρμανση ή στην κατάσταση ψύξη.

3.3 Άλλες συσκευές

Διασύνδεση με PC : Η συσκευή αυτή (Siemens 5WG1 148-1AB04) είναι η διεπαφή μεταξύ του KNX/EIB και ενός PC μέσω της σειριακής θύρας RS-232. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του δικτύου (δηλαδή για τον προγραμματισμό των συσκευών) μέσω του λογισμικού ETS και για την παρακολούθηση του. Επίσης το PC μπορεί μέσω αυτής της συσκευής και του λογισμικού OPC server ή Etec Falcon ή άλλου να μετατραπεί σε ελεγκτή του δικτύου. Η συσκευή αυτή τροφοδοτείται από bus.

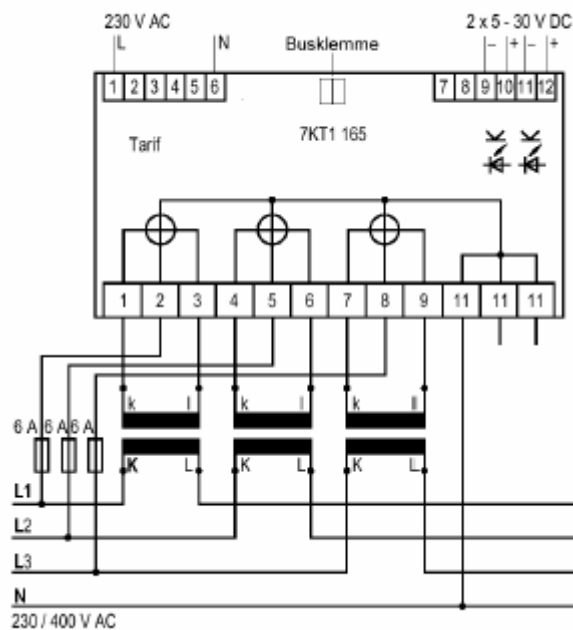
Τροφοδοτικά : Εκτός από την τροφοδοσία των συσκευών ισχύος μέσω της συμβατικής παροχής ηλεκτρισμού χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά τροφοδοτικά για τις συσκευές χαμηλής ισχύος. Μέσω της συμβατικής παροχής τροφοδοτούνται τα φώτα, το σύστημα θέρμανσης/ψύξης κάποιες KNX/EIB συσκευές και προφανώς τα υπόλοιπα τροφοδοτικά καθώς και ο υπολογιστής. Χρησιμοποιήθηκε το πιστοποιημένο KNX/EIB τροφοδοτικό EIB power supply (Siemens 5WG1 125-1AB21) για να τροφοδοτήσει με συνεχή τάση 24V (πρακτικά 29V) τον δίαυλο. Το μέγιστο ρεύμα του τροφοδοτικού αυτού είναι 640mA και είναι υπεραρκετό για το σύστημα αυτό. Επίσης χρησιμοποιήθηκε το τροφοδοτικό “LOGO! Power” για την τροφοδοσία των κινητήρων στα παράθυρα και στα σκίαστρα, καθώς και για τους αισθητήρες CO₂ και υγρασίας. Η τάση αυτού του τροφοδοτικού είναι 24V DC και το μέγιστο ρεύμα είναι 4Amp.

Τριφασικοί μετρητές ισχύος και κατανάλωσης ενέργειας: Δύο τέτοιοι μετρητές τοποθετήθηκαν, ένας για το κλιματιστικό και ένας για την υπόλοιπη εγκατάσταση.

Για την καταγραφή της κατανάλωσης του κλιματιστικού χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Energy and Power Meter N165 (Siemens 7KT1 165). Ο μετρητής αυτός είναι Συσκευή EIB. Καταγράφει την συνολική κατανάλωση σε Wh ή VAh και την τιμή της ισχύος σε W σε κάθε φάση. Η συνδεσμολογία γίνεται με τη χρήση μετασχηματιστών έντασης ρεύματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 3 μετασχηματιστές 100/5 A.



Εικόνα 3.15 Energy and Power Meter 7KT1 165

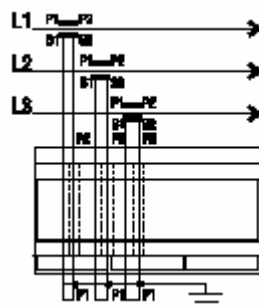


Σχήμα 3.9 Συνδεσμολογία του Energy and Power Meter 7KT1 165

Για την καταγραφή της κατανάλωσης στο υπόλοιπο σύστημα χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Electrex Kilo. Καταγράφει την κατανάλωση σε Wh ή VAh και την τιμή της ισχύος σε W για κάθε φάση χωριστά ή για τις τρεις φάσεις συνολικά. Η συνδεσμολογία γίνεται με τη χρήση μετασχηματιστών έντασης ρεύματος. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 3 μετασχηματιστές 50/5 A. Ο μετρητής αυτός συνδέεται με τον υπολογιστή του συστήματος μέσω σειριακής θύρας RS 485, η οποία μετατρέπεται σε RS 232, με τη χρήση κατάλληλου μετατροπέα.



Εικόνα 3.16 Electrex Kilo power and energy meter



Σχήμα 3.10 Η συνδεσμολογία του Electrex Kilo

Στην παρούσα εργασία δεν αναφέρονται καταγραφές από τους εν λόγω μετρητές, καθώς η εγκατάστασή τους έγινε πρόσφατα.

3.4 Κόστος εγκατάστασης

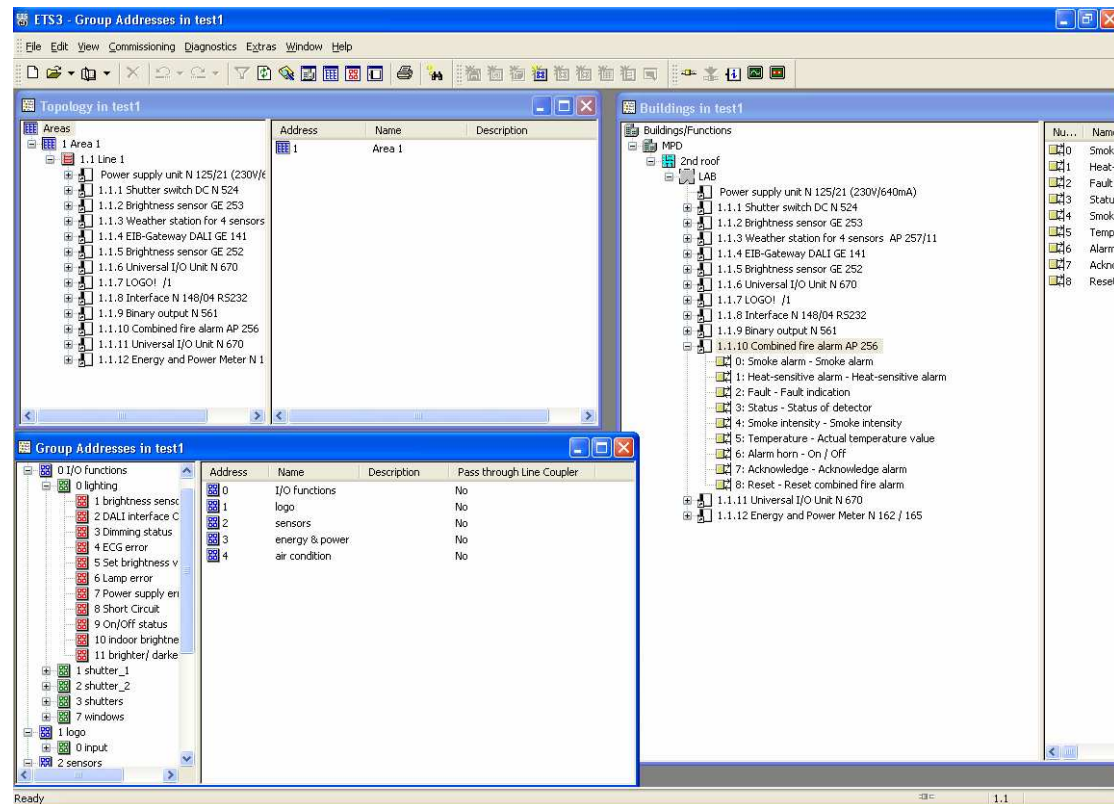
Είδος	Ποσ.	Τιμή (€)
Αισθητήρας Φωτεινότητας 5WG1 152-4AB02	1	143,17
Binary output 5WG1 561-1AB01	1	129,12
Motor Control Relay 5WG1 524-1AB01	1	198,65
Universal I/O Module 5WG1 670-1AB03	2	344,96
EIB Gateway DALI 5WG1 141-4AB01	1	319,97
Μετρητής Ενέργειας και Ισχύος 7KT1 165	1	422,97
El. Ballast TRIDONIC PCA one4all 2×58W	47	2726,00
El. Ballast TRIDONIC PCA one4all 2×18W	4	232,00
Τροφοδοτικό LOGO! Power 24V DC/4A	1	71,14
Αισθητήριο CO ₂ QPA63.2	1	261,82
Αισθητήριο Θερμοκρασίας 5WG1 256-3AB01	1	124,42
Μηχανισμός παραθύρων SHD 50/450-V	2	1241,10
Ηλεκτρικά στόρια Somfy (Concept 25)	2	1134,45
Αισθητήρας Υγρασίας QFA3160 + kit τοποθέτ.	1	326,29
Αισθητήρας Υγρασίας QFA2000	1	138,09
Μετασχηματιστής Έντασης Ρεύματος 50/5 A	3	23,59
Τροφοδοτικό EIB 5WG1 125-1AB21	1	226,80

Interface RS 232 5WG1 148-1AB04	1	173,52
Data Rail 5WG1 190-8AB52	1	19,73
Weather Station 5WG1 257-3AB11	1	398,88
Αισθητήρας ταχύτητας ανέμου 5WG1 258-7AB02	1	236,16
Αισθητήρας θερμοκρασίας 5WG1 258-3AB21	1	70,13
Αισθητήρας φωτεινότητας 5WG1 258-3AB31	1	66,46
Αισθητήρας βροχής 5WG1 258-3AB41	1	146,88
Hating Transformer for W. St. 5WG1 258-8AB01	1	41,04
Mast Mounting for W. St. 5WG1 258-8AB21	1	31,38
Ηλεκτρολογικό Υλικό (εκτίμηση)	1	150,00
Λοιπά έξοδα (εκτίμηση)	1	100,00
Μερικό Σύνολο		9208,72
Φ.Π.Α. (19%)		1749,66
Σύνολο		10958,38

Πίνακας 3.2 Το κόστος της εγκατάστασης

3.5 Εργαλεία λογισμικού

3.5.1 Το λογισμικό ETS (EIB Tool Software)



Εικόνα 3.17 Ο προγραμματισμός του συστήματος στο ETS

Για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο λογισμικού ETS (EIB Tool Software), το οποίο λειτουργεί τόσο σε επίπεδο προγραμματισμού και οργάνωσης αυτής όσο και σε επίπεδο διαχείρισης έργου.

Το ETS (EIB Tool Software) είναι ένα πρόγραμμα το οποίο έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την ευελιξία και την επεκτασιμότητα, έχοντας τέτοια δομή ώστε υποστηρίζει μελλοντικές υλοποιήσεις στην τεχνολογία EIB. Βασικό χαρακτηριστικό του προγράμματος είναι ότι μπορεί να δεχτεί την βάση δεδομένων συνδρομητών οποιοσδήποτε κατασκευαστή επιτρέποντας στο σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει σε μια εγκατάσταση συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών συμβατές με το πρότυπο EIB, οι οποίες θα διαχειρίζονται με ενιαία διεπαφή (*interface*).

Για να μπορεί να επικοινωνήσει το πρόγραμμα με την εγκατάσταση πρέπει να υπάρχει φυσική διασύνδεση του Η/Υ που έχει εγκατεστημένο το ETS με το N-

148 Interface του Bus με μια RS-232 θύρα του υπολογιστή, μέσω σειριακού καλωδίου [2].

Ένα από τα σπουδαιότερα τμήματα του ETS είναι η επιλογή σχεδιασμού έργου (*project design*). Από εκεί ξεκινά η δημιουργία κάθε νέου έργου και μπορούν να γίνουν όλες οι αλλαγές και οι τροποποιήσεις ενός υπάρχοντος. Επιπλέον στο τμήμα αυτό δημιουργούνται οι διευθύνσεις ομάδας όπως επίσης δηλώνεται η τοπολογία των συσκευών και ορίζονται οι σχέσεις των αντικειμένων επικοινωνίας με τις διευθύνσεις ομάδας. Παράλληλα, μπορεί κανείς να δει σε πιο σημείο του κτιρίου βρίσκεται κάποια συσκευή και να του παρουσιαστούν οι σχέσεις στοιχείων επικοινωνίας με διευθύνσεις ομάδας.

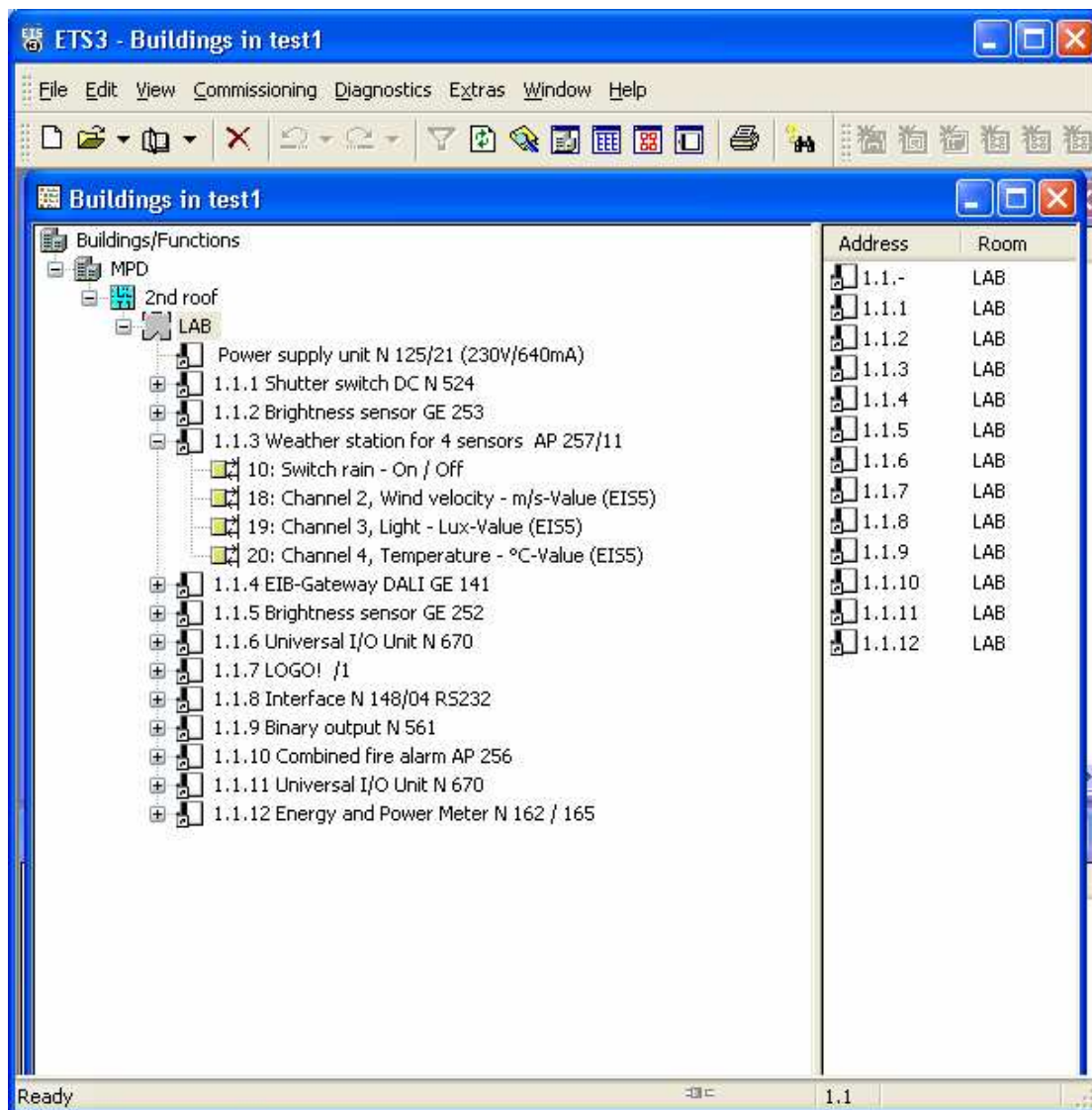
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι δεν είναι αναγκαίο να γίνει η όλη σχεδίαση στον υπολογιστή όταν αυτός είναι συνδεδεμένος στην εγκατάσταση, αλλά κάπου αλλού και στο τέλος να γίνει η μεταφορά του προγράμματος σε κάθε μια συσκευή μεταφέροντας τον φορητό υπολογιστή στο χώρο εγκατάστασης[2].

Πρέπει να τονιστεί ότι το ETS χρησιμοποιείται μόνο κατά την εγκατάσταση ή την αναβάθμιση του συστήματος και δεν είναι απαραίτητο και τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

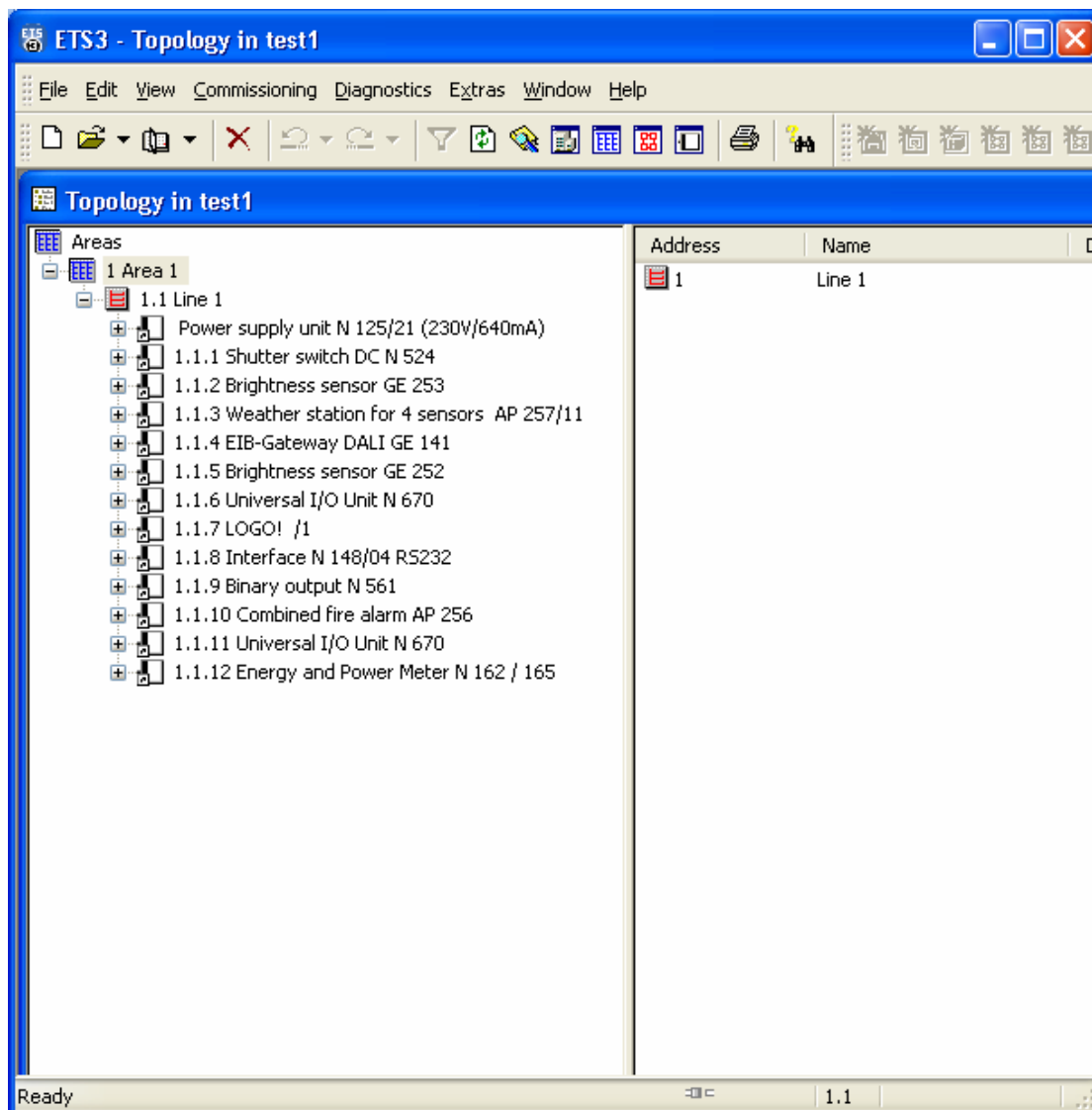
Ο προγραμματισμός στο ETS συνολικά συνίσταται σε:

- Προσδιορισμό των συσκευών,
- Καθορισμό της τοπολογίας,
- Διευθυνοδότηση των συσκευών,
- Καθορισμό των παραμέτρων λειτουργίας των συσκευών
- Καθορισμό των διευθύνσεων ομάδας(*group addresses*) και της ιεραρχίας τους.

Για κάθε συσκευή EIB αντλούμε το πρόγραμμά της από μια βάση δεδομένων, καθορίζουμε τις παραμέτρους, δίνουμε διεύθυνση και προσδιορίζουμε την τοπολογία, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.18 και 3.19.



Εικόνα 3.18 Προσδιορισμός των συσκευών και καθορισμός των φυσικών διευθύνσεων τους.



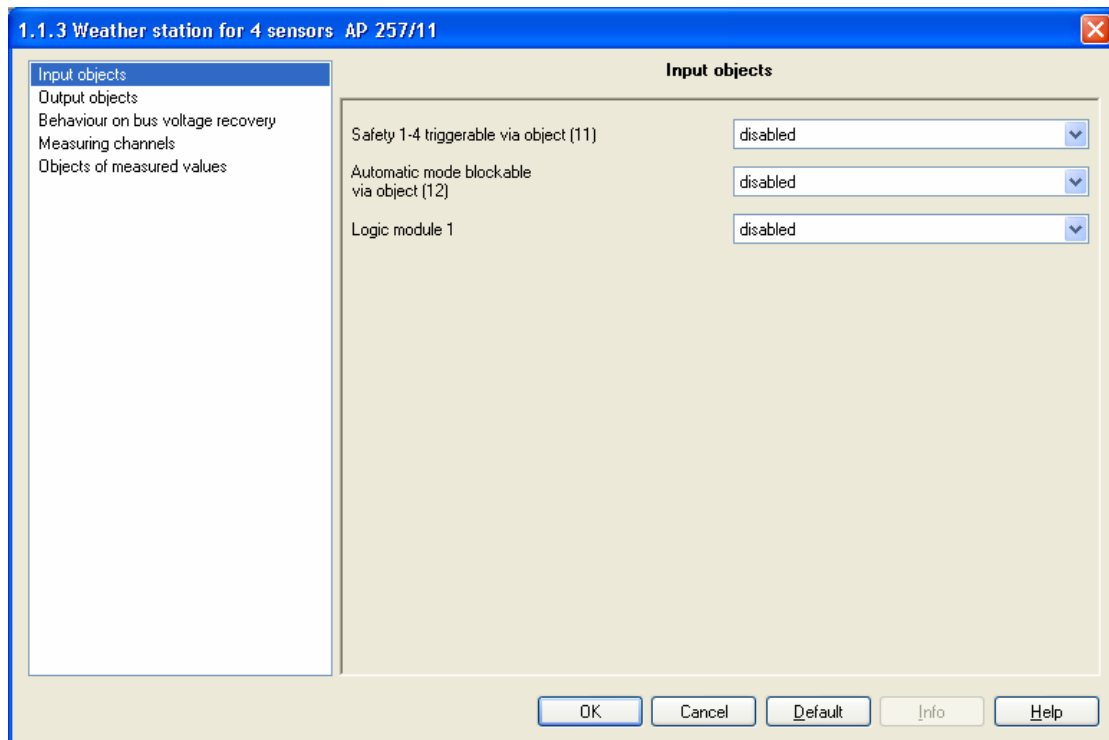
Εικόνα 3.19 Καθορισμός της τοπολογίας.

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των παραμέτρων για κάθε συσκευή, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20 για την περίπτωση weather station.

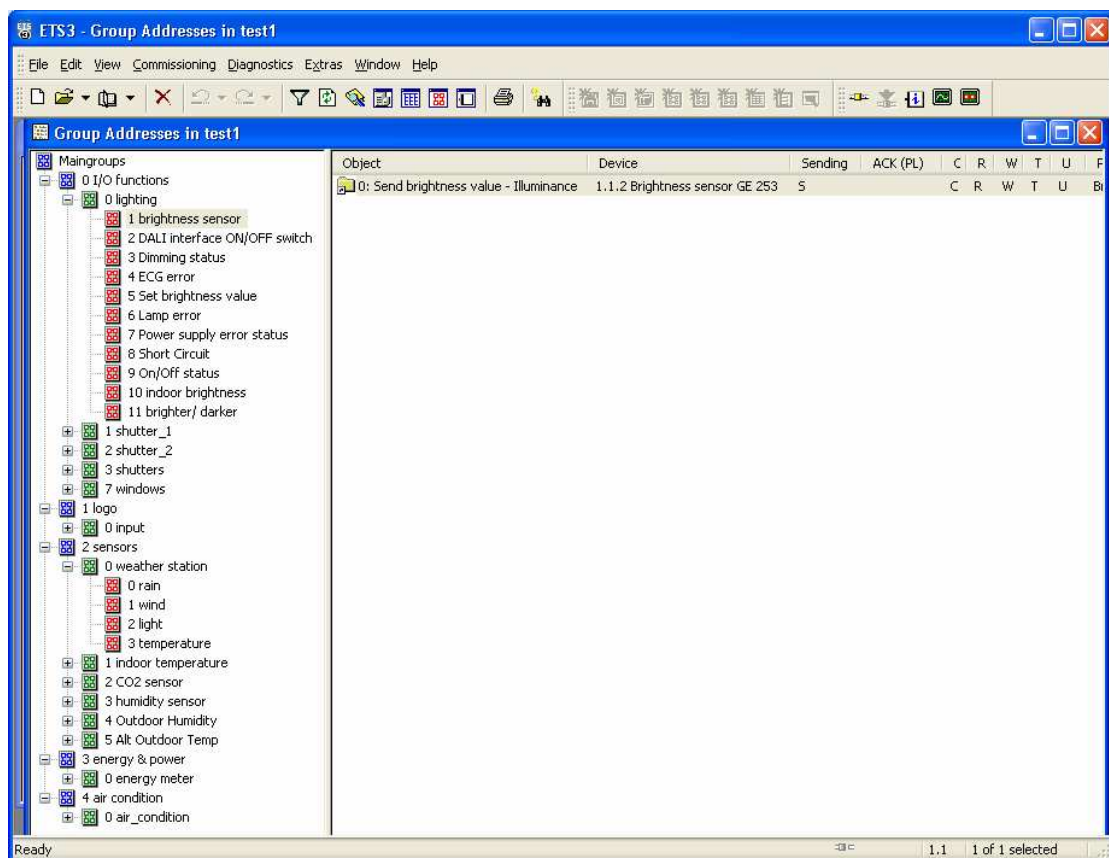
Στη συνέχεια γίνεται ο καθορισμός των διευθύνσεων ομάδας και της ιεραρχίας τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.21.

Ακολουθεί ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή κάθε συσκευής, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.22 για την περίπτωση του Universal I/O Unit.

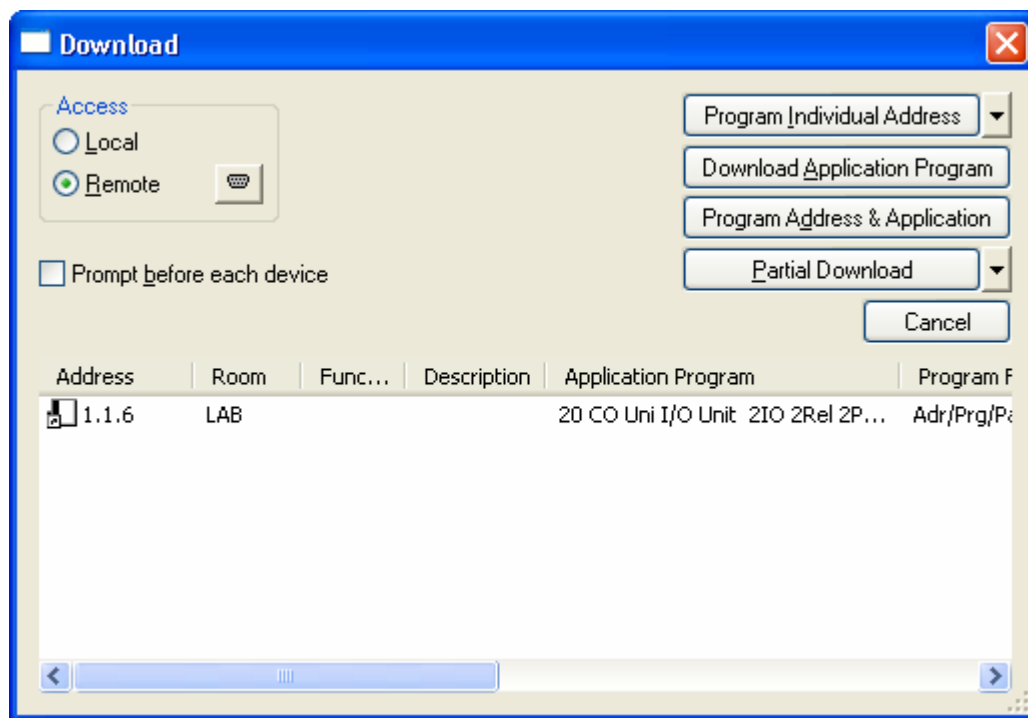
Τέλος εξάγεται ένα αρχείο με τις διευθύνσεις ομάδας το οποίο εν συνέχεια «φορτώνεται» στον EIB OPC server.



Εικόνα 3.20 Καθορισμός των παραμέτρων του weather station



Εικόνα 3.21 Καθορισμός των διευθύνσεων ομάδας



Εικόνα 3.22 Προγραμματισμός της συσκευής Universal I/O Module

3.5.2 EIB OPC Server

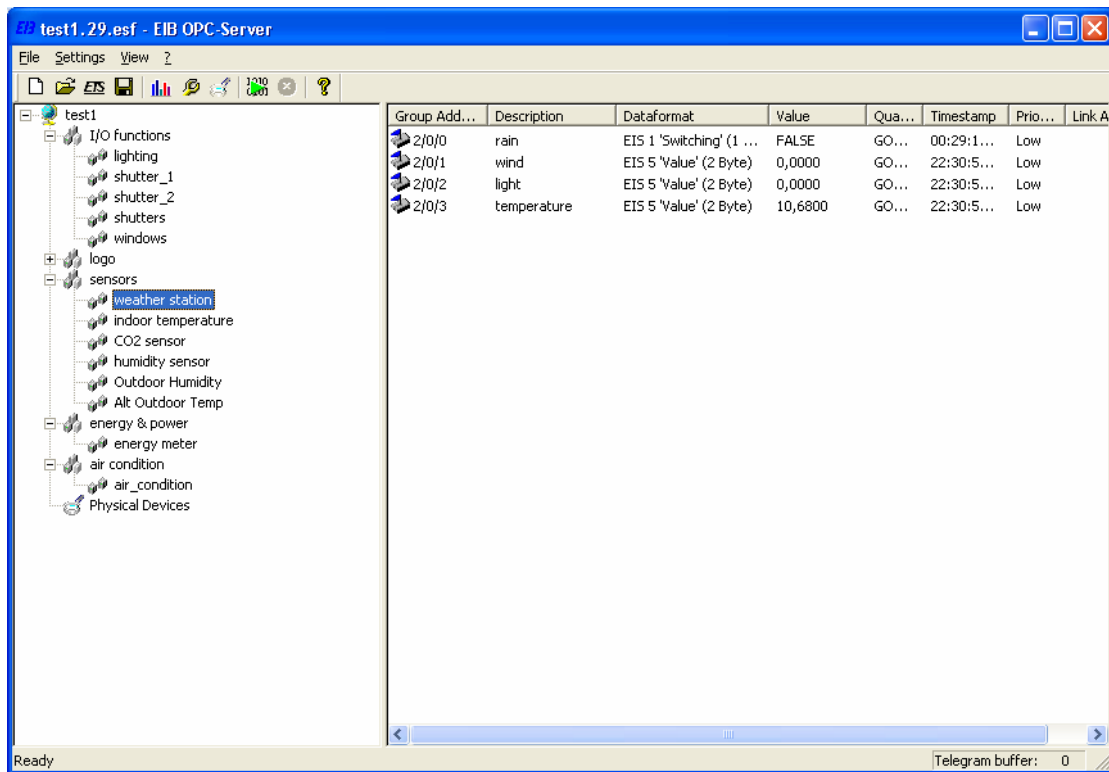
Ο EIB OPC Server, είναι μια 32-bit εφαρμογή για λειτουργικά συστήματα Windows η οποία κάνει χρήση της τεχνολογίας OLE for Process Control και παρέχει στις εφαρμογές Windows που την υποστηρίζουν, πρόσβαση στον διαυλο για επικοινωνία εισόδου/ εξόδου.

Μέσω του OPC server και των σχετικών clients ο χρήστης αποκτά πρόσβαση στους συνδρομητές μέσω μεταβλητών από τις οποίες διαβάζει και στις οποίες γράφει τιμές οι οποίες μπορούν να μεταφερθούν σε άλλους αποδέκτες στον διαυλο.

Μέσω του OPC server η διαδικασία επικοινωνίας με το διαυλο και η ανάπτυξη δοκιμαστικών εφαρμογών είναι αρκετά γρήγορη και εύκολη διαδικασία. Ο χρήστης δεν ενδιαφέρεται για την τοπολογία και την λειτουργία του διαύλου. Αντίθετα, έχει ως προγραμματιστική διεπαφή τις μεταβλητές που παρέχονται από τον server.

Το αρχείο με τις διευθύνσεις ομάδας που παράχθηκε στο ETS, εισάγεται στον EIB OPC server. Αυτές οι διευθύνσεις ομάδας αποτελούν τις μεταβλητές στις οποίες αποκτά πρόσβαση ο OPC client, που θα δούμε στη συνέχεια.

Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2.0 του EIB OPC server.



Εικόνα 3.23 Ο EIB OPC server με τις διευθύνσεις ομάδας του συστήματος

3.5.3 Matlab

Η ανάπτυξη του υπόλοιπου λογισμικού έγινε σε περιβάλλον Matlab, κάνοντας χρήση των εργαλείων που παρέχει το πακέτο Matlab R2006b.

Το OPC toolbox του πακέτου Matlab παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας clients για την επικοινωνία με τους OPC servers που είναι ήδη εγκατεστημένοι στο υπολογιστή. Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2.0.3 του εν λόγω toolbox που υπάρχει στην έκδοση R2006b της Matlab.

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε εκτελεί διαδοχικά τις εξής λειτουργίες:

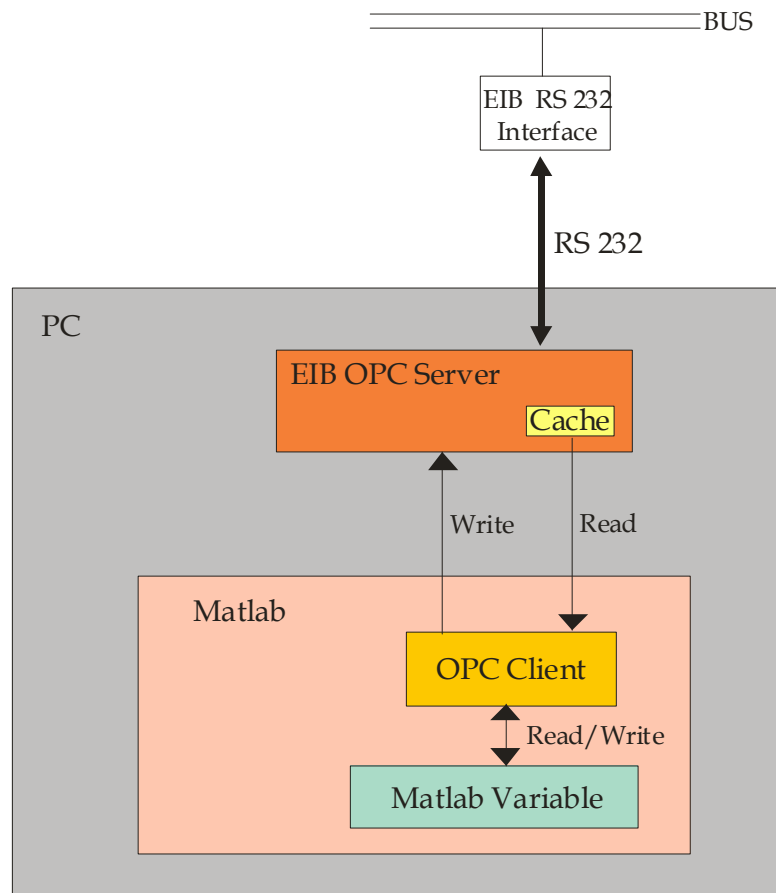
- δημιουργεί, με εντολή του χρήστη, έναν OPC client, μέσω του OPC toolbox,
- συνδέεται με τον EIB OPC server,

και ανά 10 λεπτά:

- διαβάζει τις τιμές των αισθητήρων,
- εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου που παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο

- στέλνει τιμές στους ενεργοποιητές.

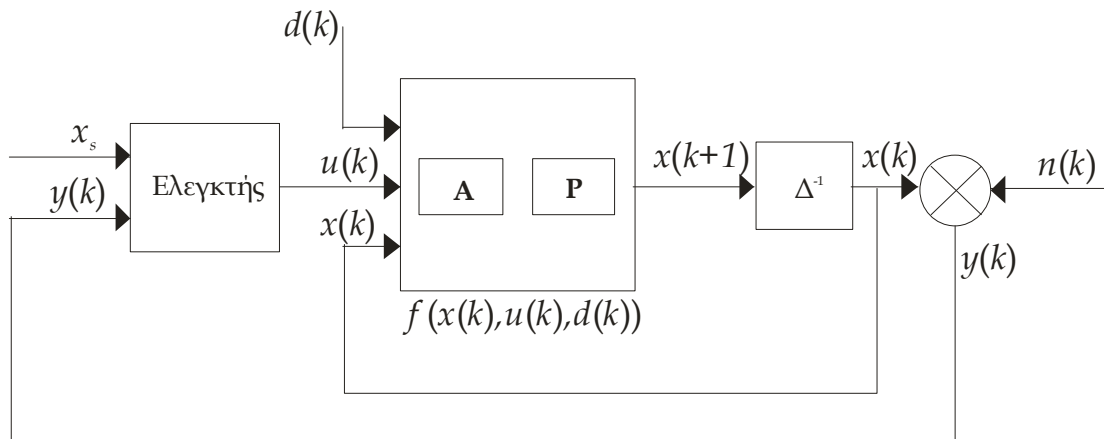
Για τον εύκολο χειρισμό του συστήματος αναπτύχθηκε ένα γραφικό περιβάλλον με τη χρήση του εργαλείου GUIDE (graphical user interface development environment) της Matlab και το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.11 Το «λογισμικό» του συστήματος

4. Αλγόριθμος προβλεπτικού ελέγχου

4.1 Περιγραφή του συστήματος



Σχήμα 4.1 Το δομικό διάγραμμα ελέγχου

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται το δομικό διάγραμμα ελέγχου του συστήματος, το οποίο αναπαρίσταται από τις εξισώσεις:

- Μη γραμμική εξίσωση κατάστασης: $x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k))$
- Μετρήσεις με θόρυβο: $y(k) = x(k) + n(k)$
- Ελεγκτής: $u(k) = g(x_s, y(k))$

Το διάνυσμα κατάστασης είναι,

$$x(k) = [CO_{2,in}(k) \quad Hum_{in}(k) \quad T_{in}(k) \quad Ill_{in}(k) \quad CO_{2,out}(k) \quad Hum_{out}(k) \quad T_{out}(k) \quad Ill_{out}(k)]^T$$

$$= [x_{in}^T(k) \quad x_{out}^T(k)]^T$$

όπου,

$CO_{2,in}(k)$ η εσωτερική συγκέντρωση CO_2 (ppm)

$Hum_{in}(k)$ η εσωτερική σχετική υγρασία (%)

$T_{in}(k)$ η εσωτερική θερμοκρασία ($^{\circ}C$)

$Ill_{in}(k)$ η εσωτερική φωτεινότητα (lux)

$CO_{2,out}(k)$ η εξωτερική συγκέντρωση CO_2 (ppm)

$Hum_{out}(k)$ η εξωτερική σχετική υγρασία (%)

$T_{out}(k)$ η εξωτερική θερμοκρασία ($^{\circ}C$)

$Ill_{out}(k)$ η εξωτερική φωτεινότητα (lux)

Το διάνυσμα μετρήσεων είναι,

$$y(k) = x(k) + n(k)$$

όπου $n(k)$ είναι ο άγνωστος θόρυβος στις μετρήσεις.

Το διάνυσμα ελέγχου είναι,

$$u(k) = [W(k) \quad L(k) \quad S(k) \quad AC(k)]^T$$

όπου,

S	άνοιγμα σκιάστρων	0: τελείως κλειστά, 1: τελείως ανοικτά
W	άνοιγμα παραθύρων	0: τελείως κλειστά, 1: τελείως ανοικτά
AC	επίπεδο κλιματισμού (ποσοστό του χρόνου δειγματοληψίας)	-1: ψύξη καθ' όλη την περίοδο, +1: θέρμανση καθ' όλη την περίοδο
L	επίπεδο τεχνητού φωτισμού (%)	0: τα φώτα κλείνουν, 100: τα φώτα ανοίγουν πλήρως

Το διάνυσμα των επιθυμητών τιμών είναι:

$$x_s = [CO_{2,sp} \quad Hum_{sp} \quad T_{sp} \quad Ill_{sp}]^T$$

όπου,

$CO_{2,sp}$ η επιθυμητή τιμή για τη συγκέντρωση CO_2

Hum_{sp} η επιθυμητή τιμή για τη σχετική υγρασία

T_{sp} η επιθυμητή τιμή για τη θερμοκρασία

Ill_{sp} η επιθυμητή τιμή για τη φωτεινότητα

Τέλος, k είναι η χρονική στιγμή δειγματοληψίας, $d(k)$ είναι οι μη μετρήσιμες διαταραχές, όπως η ανθρώπινη παρουσία, το άνοιγμα της πόρτας, το κάπνισμα ή κάποια πηγή θερμότητας, A είναι οι ενεργοποιητές και P η συνολική εγκατάσταση.

4.2 Κατασκευή υποδείγματος και ταυτοποίηση

4.2.1 Υπόδειγμα

Για την κατασκευή του υποδείγματος του συστήματος επιλέχθηκε ένα γραμμικό ως προς τις παραμέτρους υπόδειγμα της μορφής,

$$x_p(k+1) = x_p(k) + \lambda_1 \cdot f_1(u(k), x_p(k), d(k)) + \dots + \lambda_m \cdot f_m(u(k), x_p(k), d(k)) \quad (4.1)$$

όπου λ_i οι τιμές των συντελεστών προς εκτίμηση[6]. Να σημειωθεί ότι η (4.1) είναι διαφορετική για κάθε αισθητήρα.

Πιο αναλυτικά, για κάθε εσωτερικό αισθητήρα επιλέχθηκαν τα ακόλουθα υποδείγματα.

A. CO₂

$$CO_{2,in}(k+1) = CO_{2,in}(k) + a_1 \cdot W(k) [CO_{2,out}(k) - CO_{2,in}(k)] \quad (4.2)$$

Η εξίσωση αυτή σημαίνει ότι υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση CO₂ την χρονική στιγμή $k+1$ είναι γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσης την χρονική στιγμή k , του ανοίγματος των παραθύρων W και της εξωτερικής συγκέντρωσης.

B. Σχετική υγρασία

$$Hum_{in}(k+1) = Hum_{in}(k) + \beta_1 \cdot W(k) [Hum_{out}(k) - Hum_{in}(k)] + \beta_2 \cdot AC(k) \quad (4.3)$$

Η εξίσωση αυτή σημαίνει ότι υποθέτουμε ότι η σχετική υγρασία την χρονική στιγμή $k+1$ είναι γραμμική συνάρτηση της σχετικής υγρασίας την χρονική στιγμή k , του ανοίγματος των παραθύρων W , του επιπέδου κλιματισμού AC και της εξωτερικής υγρασίας Hum_{out} .

Γ. Εσωτερική θερμοκρασία

$$T_{in}(k+1) = T_{in}(k) + \gamma_1 \cdot W(k) [T_{out}(k) - T_{in}(k)] + \gamma_2 \cdot AC(k) + \gamma_3 \cdot [T_{out}(k) - T_{in}(k)] \quad (4.4)$$

Η εξίσωση αυτή σημαίνει ότι υποθέτουμε ότι η εσωτερική θερμοκρασία την χρονική στιγμή $k+1$ είναι γραμμική συνάρτηση της εσωτερικής θερμοκρασίας την χρονική στιγμή k , του ανοίγματος των παραθύρων W και του επιπέδου κλιματισμού AC . Η συνεισφορά της θερμοκρασίας μέσω του ανοίγματος είναι συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασιακού δυναμικού $[T_{out}(k) - T_{in}(k)]$.

Δ. Φωτισμός

$$Ill_{in}(k+1) = \delta_1 \cdot S(k) \cdot Ill_{out}(k) + \delta_2 \cdot L(k) + \delta_3 \cdot Ill_{out}(k) \quad (4.5)$$

Η εξίσωση αυτή σημαίνει ότι υποθέτουμε ότι ο φωτισμός την χρονική στιγμή $k+1$ είναι γραμμική συνάρτηση του ανοίγματος των σκιάστρων S , του επιπέδου τεχνητού φωτισμού L και της εξωγενούς συνεισφοράς σε φωτισμό (ήλιος) λόγω διάχυσης.

Συνολικά, και με βάση τις εξισώσεις (4.2)-(4.5), το σύστημα εκφράζεται ως,

$$x(k+1) = Ax(k) + \sum_{j=1}^4 G_j x(k) u_j(k) + Bu(k) \quad (4.6)$$

ή

$$\begin{aligned}
x(k+1) = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\gamma_3 & 0 & 0 & 0 & \gamma_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_1(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_2(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_3(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_4(k) \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_1 & 0 & 0 & 0 & \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_2 & 0 & 0 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k)W(k) \\
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k)S(k) + \mathbf{0} \cdot x(k)L(k) + \mathbf{0} \cdot x(k)AC(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_2 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_1 \\ 0 & \delta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} u(k)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Για τις μεταβλητές εξωτερικού χώρου (μετρήσιμες ή θεωρούμενες σταθερές, όπως της συγκέντρωσης CO₂) υποθέσει μια άγνωστη χρονικά μεταβαλλόμενη σχέση,

$$x_{i+4}(k+1)=\varphi_i(k)\cdot x_{i+4}(k) \quad \text{για } i=1 \dots 4$$

Έχοντας έτοιμο το υπόδειγμα προχωράμε με την ταυτοποίηση του συστήματος.

4.2.2 Ταυτοποίηση

Για κάθε εσωτερικό αισθητήρα η μέθοδος εκτίμησης των παραμέτρων λ_i , που αναφέρονται στη γενική εξίσωση (4.1), είναι αυτή των ελαχίστων τετραγώνων, που προκύπτει από τις σχέσεις,

$$\begin{bmatrix} x_p(2)-x_p(1) \\ x_p(3)-x_p(2) \\ \vdots \\ x_p(n-1)-x_p(n-2) \\ x_p(n)-x_p(n-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(u(1), x_p(1)) & \dots & f_m(u(1), x_p(1)) \\ f_1(u(2), x_p(2)) & \dots & f_m(u(2), x_p(2)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(u(n-2), x_p(n-2)) & \dots & f_m(u(n-2), x_p(n-2)) \\ f_1(u(n-1), x_p(n-1)) & \dots & f_m(u(n-1), x_p(n-1)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix}$$

ή

$$x=F\lambda$$

Η εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων δίνεται από την,

$$\hat{\lambda}=(F^T F)^{-1} F^T x \quad (4.8)$$

Με βάση την (4.8) η πρόβλεψη της $x_p(k+1)$ δοθέντων των $x_p(k)$, $u(k)$ είναι,

$$x_p(k+1)= x_p(k)+ \hat{\lambda}_1 \cdot f_1(u(k), x_p(k))+ \dots + \hat{\lambda}_m \cdot f_m(u(k), x_p(k)) \quad (4.9)$$

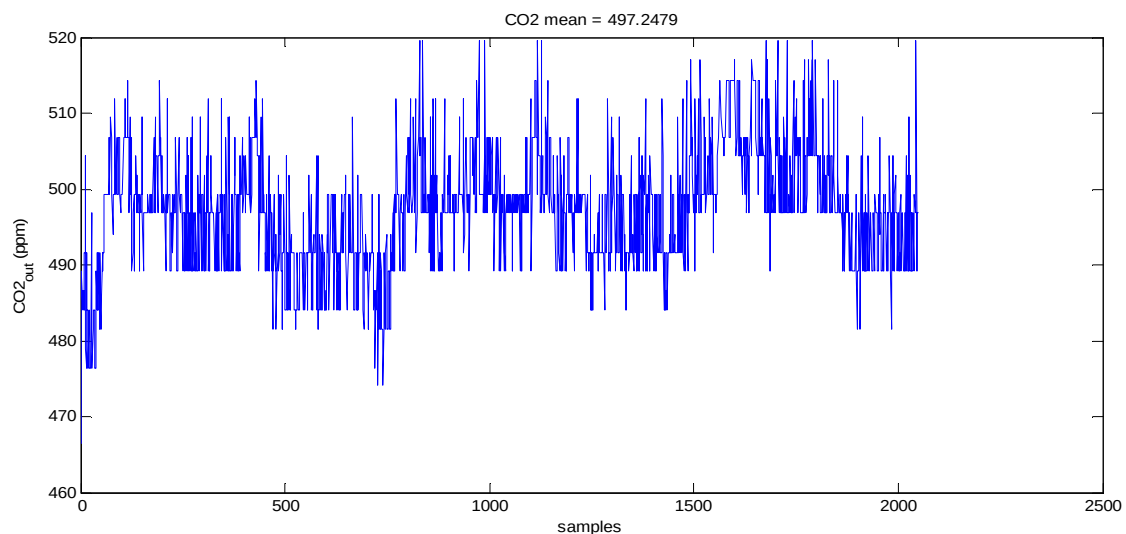
Η εκτίμηση των παραμέτρων έγινε ξεχωριστά για κάθε ενεργοποιητή, θέτοντας το σύστημα σε λειτουργία επί 48 ώρες. Κάθε 2 λεπτά παίρνουμε μετρήσεις απ' όλους τους αισθητήρες και τις καταγράφουμε μαζί με την

ώρα/ημερομηνία και τη τιμή του ενεργοποιητή σε αρχείο. Οι τιμές του ενεργοποιητή μεταβάλλονται σταδιακά από το ελάχιστο ως το μέγιστο σε διάστημα 24 ωρών κατά 10% τη φορά, έτσι ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση να διεγείρεται το σύστημα από όλο το φάσμα των τιμών των εισόδων. Το δεύτερο 24ωρο θα επαναλαμβάνεται το μοτίβο αυτό.

Στο τέλος θα έχουμε 4 αρχεία, ένα για κάθε ενεργοποιητή. Εφαρμόζοντας την εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν τα υποδείγματα. Στα γραφήματα που τα συνοδεύουν φαίνονται οι πραγματικές και οι προβλεπόμενες τιμές των αισθητήρων και οι τιμές των ενεργοποιητών. Για τους αισθητήρες που επηρεάζονται από δύο ενεργοποιητές παρουσιάζουμε δύο γραφήματα.

A. CO₂

Καθώς δεν διαθέτουμε εξωτερικό αισθητήρα CO₂ τοποθετήσαμε για περίπου 66 ώρες τον εσωτερικό αισθητήρα ως εξωτερικό και καταγράψαμε τις μετρήσεις που φαίνονται στο γράφημα,



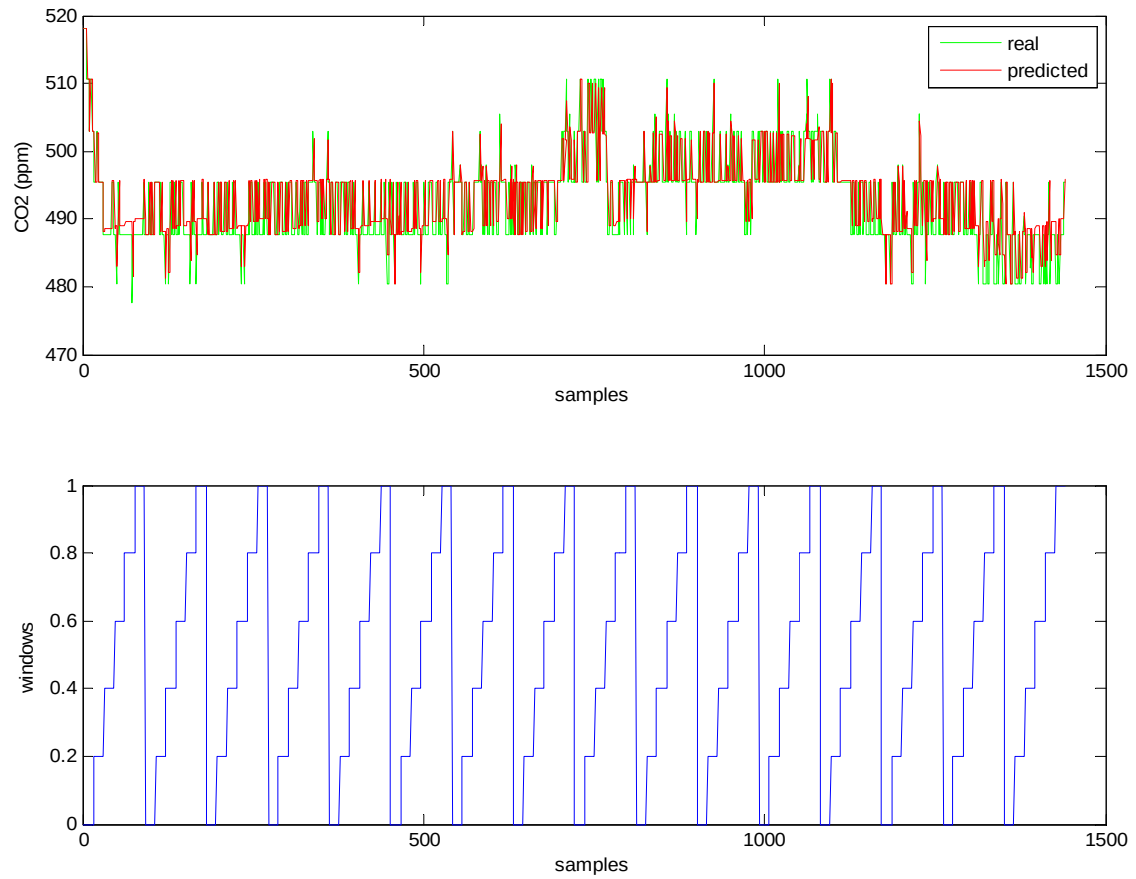
Σχήμα 4.2 Μετρήσεις του εξωτερικού CO₂ για περίπου 66 ώρες

Όπως βλέπουμε η συγκέντρωση του CO₂ στον εξωτερικό χώρο κυμαίνεται σε ένα σχετικά μικρό ένα εύρος τιμών (475.. 520 ppm) με μέση τιμή 497,2479 ppm. Για να δημιουργήσουμε το υπόδειγμα θα την θεωρήσουμε σταθερή στο χρόνο και ίση με τη μέση τιμή της.

Το υπόδειγμα που προκύπτει είναι,

$$CO_{2,in}(k+1)=CO_{2,in}(k)+0,215\cdot W(k)[497,2479-CO_{2,in}(k)]$$

Το αντίστοιχο γράφημα είναι,

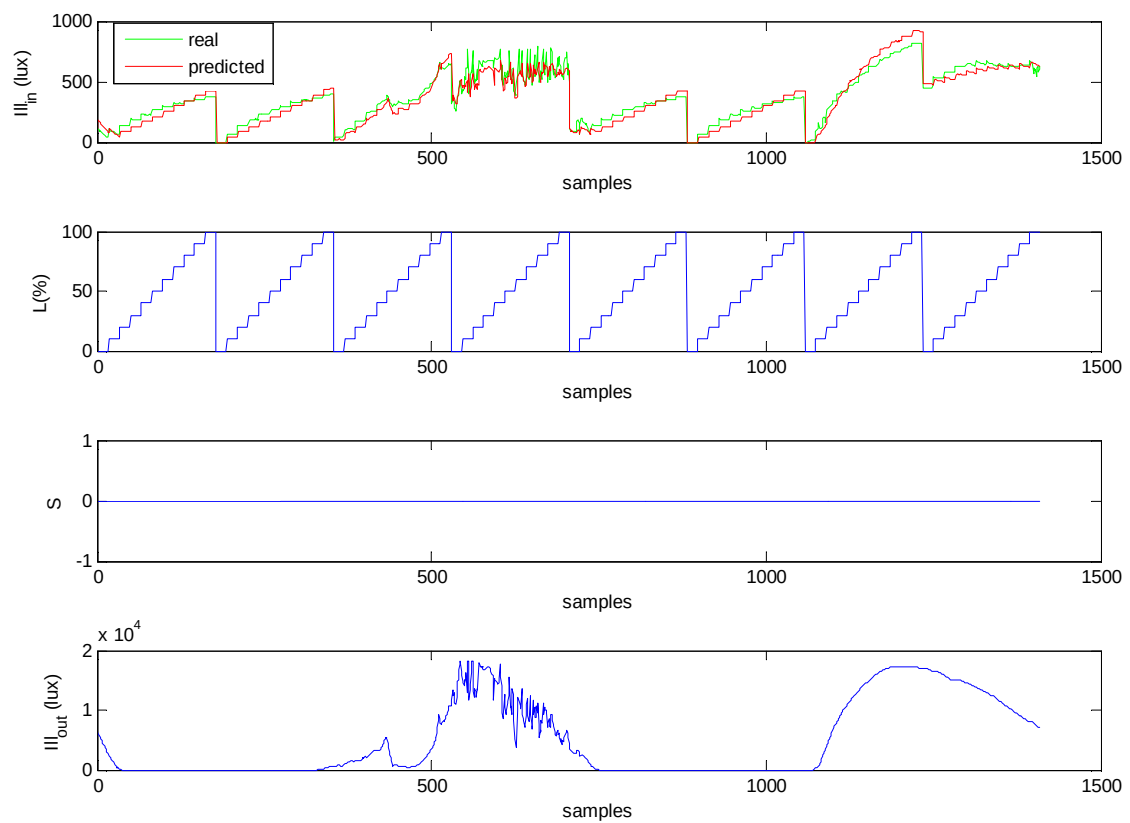


Σχήμα 4.3 Υπόδειγμα CO₂

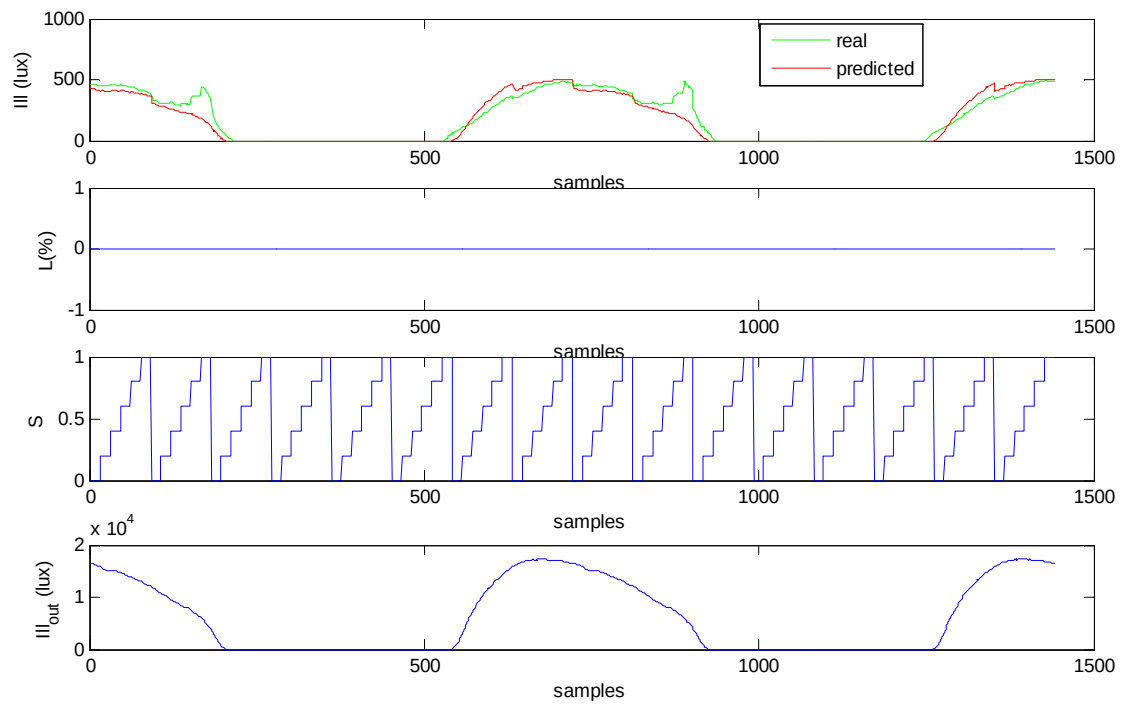
Β. Φωτισμός

$$Ill_{in}(k+1)=0,0033\cdot S(k)\cdot Ill_{out}(k)+4,05\cdot L(k-1)+0,008\cdot Ill_{out}(k)$$

Τα αντίστοιχα γραφήματα είναι,



Σχήμα 4.4 Υπόδειγμα φωτισμού με κλειστά σκίαστρα

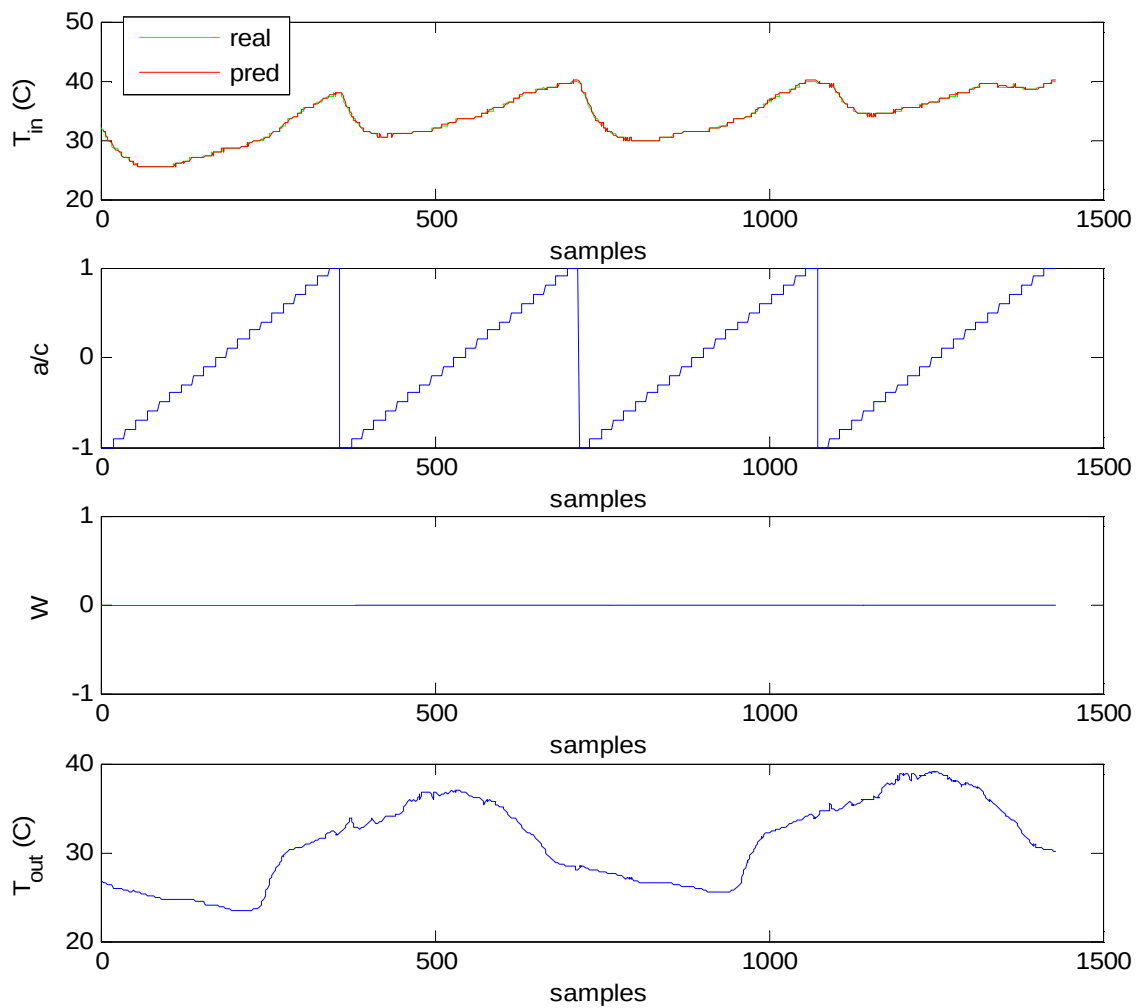


Σχήμα 4.5 Υπόδειγμα φωτισμού με κλειστά φώτα

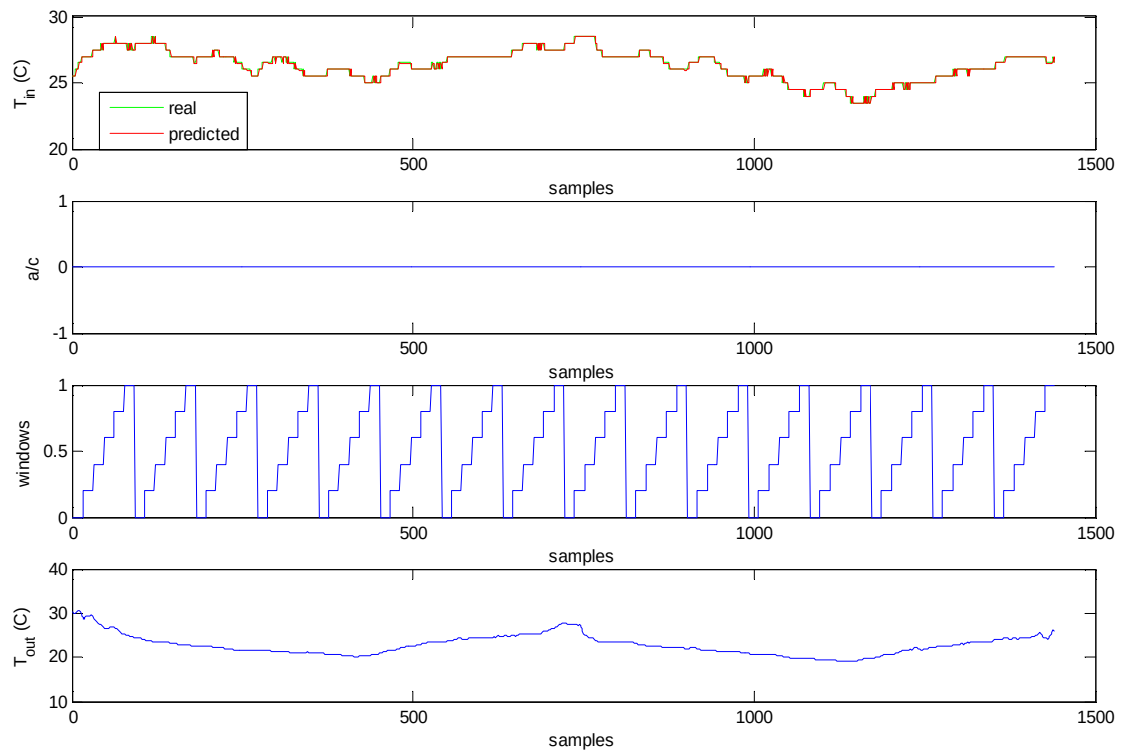
Γ. Εσωτερική θερμοκρασία

$$T_{in}(k+1)=T_{in}(k)+0,0029\cdot W(k)[T_{out}(k)-T_{in}(k)]+0,0756\cdot AC(k) +$$
$$0,0039\cdot [T_{out}(k)-T_{in}(k)]$$

Τα αντίστοιχα γραφήματα είναι,



Σχήμα 4.6 Υπόδειγμα θερμοκρασίας με κλειστά παράθυρα

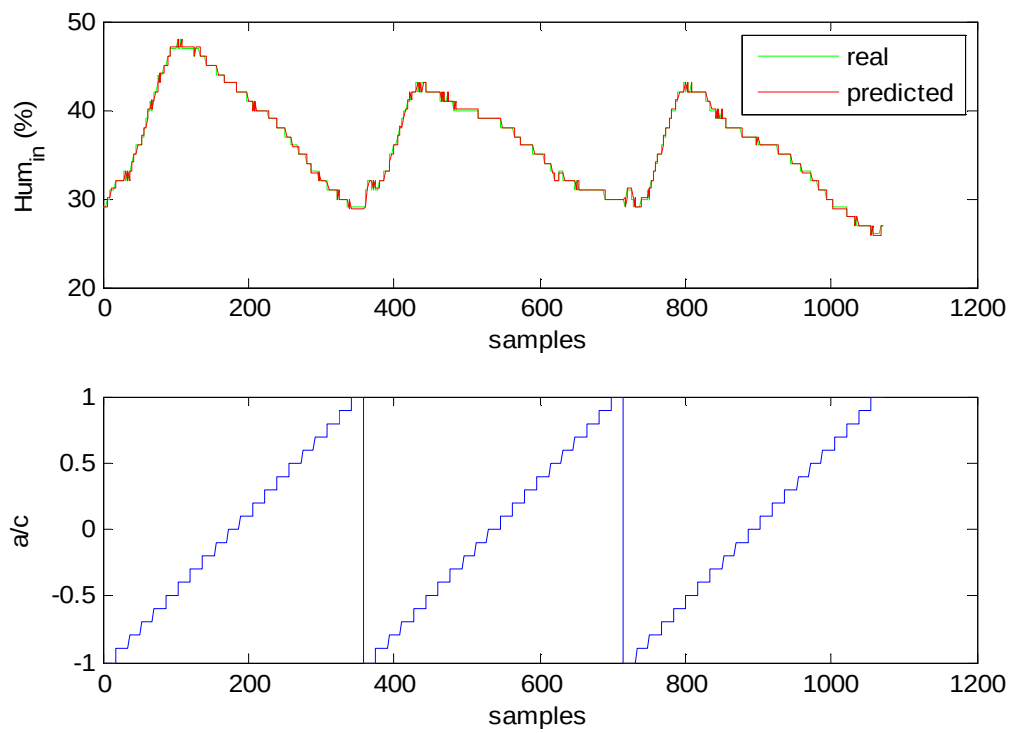


Σχήμα 4.7 Υπόδειγμα θερμοκρασίας με κλειστό *air condition*

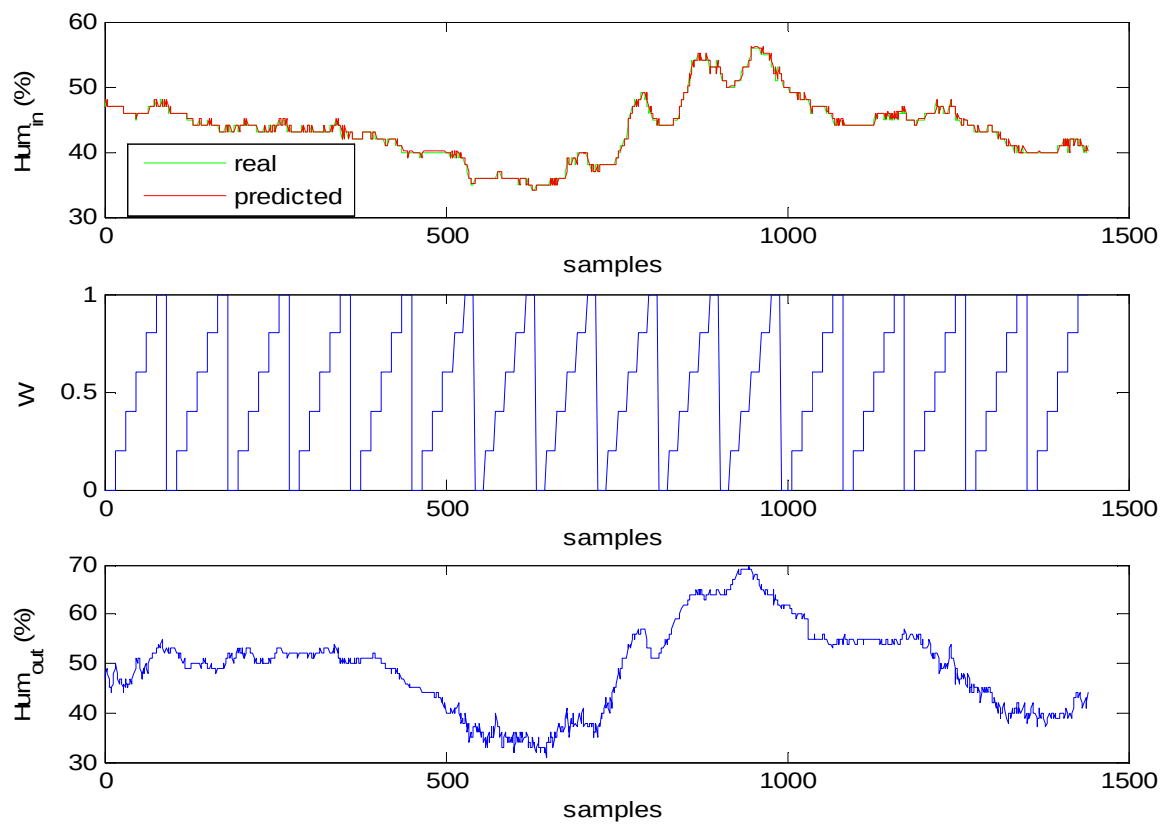
Δ. Σχετική υγρασία

$$Hum_{in}(k+1)=Hum_{in}(k)+0,0077 \cdot W(k)[Hum_{out}(k)-Hum_{in}(k)]+0,0747 \cdot AC(k)$$

Ακολουθούν τα αντίστοιχα γραφήματα. Στο σχήμα 4.8 δεν υπάρχει γράφημα για την εξωτερική υγρασία, γιατί όταν καταγράφηκαν οι μετρήσεις δεν υπήρχε εξωτερικός αισθητήρας σχετικής υγρασίας στην εγκατάσταση.



Σχήμα 4.8 Υπόδειγμα σχετικής υγρασίας με κλειστά παράθυρα



Σχήμα 4.9 Υπόδειγμα σχετικής υγρασίας με κλειστό air condition

4.3 Έλεγχος

Έχοντας έτοιμο το υπόδειγμα, συνεχίζουμε με τον ελεγκτή.

Οι απαιτήσεις του σχεδιασμού είναι να κρατηθούν οι εσωτερικές καταστάσεις κοντά στις επιθυμητές τιμές (set-points) x_s με το ελάχιστο δυνατό κόστος σε κατανάλωση ενέργειας. Ένας κατάλληλος δείκτης απόδοσης θα μπορούσε έτσι να είναι¹,

$$J(k) = \|x_{in}(k+1) - x_s\|_Q^2 + \|u(k)\|_R^2$$

όπου οι Q, R είναι πίνακες βαρών[7].

Αυτός ο δείκτης μπορεί να υπολογιστεί στο τέλος ενός κατάλληλου ορίζοντα, N χρονικά δείγματα από την παρούσα στιγμή. Στο υπόδειγμά μας τα χρονικά δείγματα απέχουν μεταξύ τους 2 min. Επομένως το πρόβλημά μας μπορεί να οριστεί ως,

$$\min_{u \in U} J = \|x_{in}(k+N) - x_s\|_Q^2 + \|u(k)\|_R^2 \quad (4.10)$$

Εδώ κάνουμε τις ακόλουθες παραδοχές για χάρη απλοποίησης:

- Οι τιμές ελέγχου παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του ορίζοντα πρόβλεψης, $u(k)=u(k+1)=\dots=u(k+N)$.
- Οι μελλοντικές τιμές των εξωτερικών διαταραχών υποτίθενται επίσης σταθερές και ίσες με την τελευταία μετρημένη τιμή $x_{out}(k)=x_{out}(k+1)=\dots=x_{out}(k+N)=\tilde{x}_{out}(k)$.

Επιπλέον, για να εκτελέσουμε την ελαχιστοποίηση στην (4.10) μπορούμε να δεχτούμε τα εξής:

- Οι έλεγχοι για τα σκίαστρα (S) και το άνοιγμα παραθύρων (W) δεν έχουν κανένα «κόστος», εκτός από την ενεργοποίηση των αντίστοιχων μοτέρ (παθητικό κόστος). Κατά συνέπεια μπορούν να μην εισαχθούν στον όρο ελέγχου της (4.10).
- Ο ενεργοποιητής φωτισμού (L) έχει επιπτώσεις μόνο σε μια κατάσταση (φωτισμός), και επομένως μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ανεξάρτητα.

¹ Χρησιμοποιείται η παράσταση $\|y\|_Q^2 = y^T Q y$

Κατά συνέπεια οι πίνακες βαρών διαμορφώνονται ως εξής:

$$Q = a \cdot \text{diag}[q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4], \quad R = (1 - a) \cdot \text{diag}[0 \quad r_1 \quad 0 \quad r_2]$$

όπου τα q_i , r_i , a επιλέγονται έτσι ώστε να απεικονιστούν οι διαφορές στις κλίμακες των μεταβλητών, καθώς και η ισορροπία μεταξύ της ρύθμισης της τιμής μιας μεταβλητής και του αντίστοιχου κόστους του ελέγχου (οι σωστές τιμές προκύπτουν μετά από μια σειρά δοκιμών).

Επίσης παρόλο που η ελαχιστοποίηση της (4.10) μπορεί να γίνει αναλυτικά ([7]), επιλέξαμε για χάρη απλότητας να διακριτοποιήσουμε το σύνολο U , έτσι ώστε η ελαχιστοποίηση να είναι μια απλή αναζήτηση. Το διακριτό σύνολο επιλέχθηκε ως:

- Για το άνοιγμα των παραθύρων:

$$U_{d,W} = \{0, 0.1, \dots, 1\}$$

- Για τα φώτα:

$$U_{d,L} = \{0, 10, \dots, 100\}$$

- Για τα σκίαστρα:

$$U_{d,S} = \{0, 0.1, \dots, 1\}$$

- Για το κλιματιστικό:

$$U_{d,AC} = \{-1, -0.9, \dots, 0, \dots, 0.9, 1\}$$

4.4 Παράμετροι σχεδιασμού

Για την ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος επιλέχθηκαν οι ακόλουθοι παράμετροι.

4.4.1 Επιθυμητές τιμές

Η επιλογή των κατάλληλων επιθυμητών τιμών είναι μια πολύ σημαντική σχεδιαστική παράμετρος, αφού από αυτήν εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό οι κλιματικές συνθήκες στον χώρο όπου λειτουργεί το σύστημα.

A. CO₂

Η μέτρηση των επιπέδων ppm του CO₂ (CDPL) είναι ένας αξιόπιστος τρόπος για τη μέτρηση των εσωτερικών ρύπων ενός κτηρίου, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν στους ανθρώπους συμπτώματα όπως νύστα, πονοκέφαλους, ή υποτονική δραστηριότητα. Για να εξαλειφθούν οι περιπτώσεις τέτοιων συμπτωμάτων λόγω της κακής ποιότητας αέρα, η συγκέντρωση CDPL πρέπει να συντηρείται στα επίπεδα των 600 ppm και κάτω. Το «εθνικό ίδρυμα για την επαγγελματική ασφάλεια και υγεία» των Η.Π.Α. (N.I.O.S.H.) θεωρεί ότι οι συγκεντρώσεις CO₂ που υπερβαίνουν τα 1.000 ppm είναι ένας δείκτης για τον ανεπαρκή εξαερισμό[8]. Επίσης ο «αμερικανικός σύλλογος των μηχανικών θέρμανσης, κατάψυξης και κλιματισμού» (ASHRAE) συστήνει να μην υπερβαίνει τα 1.000 ppm σε εσωτερικούς χώρους[8].

Έχοντας αυτά τα δεδομένα επιλέξαμε να ορίσουμε την επιθυμητή τιμή στα 600 ppm, επειδή το όριο αυτό θεωρείται ασφαλές και ο αερισμός γίνεται με το άνοιγμα των παραθύρων χωρίς σημαντικό κόστος σε ενέργεια.

B. Σχετική υγρασία

Η σχετική υγρασία σε εσωτερικούς χώρους πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 30% και 60% σύμφωνα με το πρότυπο 55-1992 «*θερμικές περιβαλλοντικές συνθήκες για την ανθρώπινη κατοικία*» του ASHRAE[9][10]. Η υψηλή υγρασία κατά τους θερμούς καλοκαιρινούς μήνες προκαλεί στον άνθρωπο ιδρώτα και κάνει την ατμόσφαιρα αποπνικτική, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες κάνει το κρύο διαπεραστικό. Η χαμηλή υγρασία κάτω από 30%, οδηγεί προκαλεί στον άνθρωπο ταλαιπωρία, όπως ξηρό δέρμα και υπερβολική δίψα.

Έτσι επιλέξαμε να ορίσουμε την επιθυμητή τιμή στο 50% και να ορίσουμε ένα «παράθυρο» $\pm 10\%$, στο οποίο θα θεωρούμε τη σχετική υγρασία ικανοποιητική, αφού θα κυμαίνεται μεταξύ 40 και 60 %.

Γ. Θερμοκρασία

Για την θερμοκρασία δεν επιλέξαμε μια συγκεκριμένη επιθυμητή τιμή, καθώς η επιθυμητή θερμοκρασία εξαρτάται κάθε φορά από παράγοντες όπως η εποχή, ο ρουχισμός κ.α.

Η επιθυμητή τιμή προκύπτει λοιπόν από ένα αλγόριθμο, με βάση την εσωτερική και την εξωτερική θερμοκρασία, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1. Να σημειώσουμε ότι όταν η εσωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 21 και 26 °C δεν επιδιώκουμε να την αλλάξουμε.

$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	$T_{sp}(^{\circ}\text{C})$
≥ 26	> 36	$T_{out} - 10$
	≤ 36	26
≥ 21 and < 26	οποιαδήποτε	T_{in}
< 21	οποιαδήποτε	21

Πίνακας 4.1 Αλγόριθμος για την επιθυμητή τιμή της θερμοκρασίας

Δ. Φωτισμός

Ο φωτισμός σε γραφεία, σύμφωνα με το πρότυπο 1926.56 της «διοίκησης επαγγελματικής ασφάλειας & υγείας» του υπουργείου εργασίας των Η.Π.Α., πρέπει να είναι τουλάχιστον 300 lux [11].

Για την περίπτωση μας επιλέξαμε επιθυμητή τιμή 350 lux.

Επομένως το διάνυσμα των επιθυμητών τιμών γίνεται

$$x_s = [600 \ 50 \ T_{sp} \ 350]$$

4.4.2 Οριζοντας πρόβλεψης

Για τον οριζοντα πρόβλεψης αποφασίσαμε να μην επιλέξουμε πολύ μεγάλη τιμή, ώστε να μην απομακρυνθούμε πολύ από την πραγματικότητα ως προς τις εξωτερικές διαταραχές. Από την άλλη, μια πολύ μικρή τιμή θα περιόριζε τα περιθώρια πρόβλεψης. Για τους λόγους αυτούς και μετά από δοκιμές καταλήξαμε στην τιμή $N=5$.

4.4.3 Πίνακες βαρών

Ο πίνακας Q αφορά την εγγύτητα στις επιθυμητές τιμές. Επιλέγουμε τιμές τέτοιες στα βάρη, ώστε να γίνει μια σχετική κανονικοποίηση. Για να γίνει η κανονικοποίηση διαιρούμε τη μεγαλύτερη τιμή από το διάνυσμα των επιθυμητών τιμών με την επιθυμητή τιμή για κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση της θερμοκρασίας η επιθυμητή τιμή είναι τουλάχιστον 21 $^{\circ}\text{C}$ και μπορεί να φτάσει τους καλοκαιρινούς μήνες πάνω από 30 $^{\circ}\text{C}$. Έτσι διαιρούμε με το 25 σαν μια μέση τιμή.

Οπότε για τις εσωτερικές διαταραχές,

$$w_{CO_2}=600/600=1, w_{Hum}=600/50=12, w_{Tin}=600/25=24$$

Ο φωτισμός ελαχιστοποιείται ανεξάρτητα, οπότε δεν απαραίτητη η κανονικοποίηση και επιλέγουμε,

$$w_{III}=1$$

Για τις εξωτερικές διαταραχές ,

$$w_{CO_2}=0, w_{Hum}=0, w_T=0, w_{III}=0$$

Τα βάρη δεν έχουν την ίδια τιμή σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά επηρεάζονται και από τις επιθυμητές τιμές. Πιο συγκεκριμένα,

A. CO₂

Το επιθυμητή τιμή (600 ppm) σε αυτή την περίπτωση έχει την έννοια ότι οι επιθυμητές τιμές συγκέντρωσης CO₂ είναι 600 ppm και κάτω. Δηλαδή θα ήταν λάθος να θέλουμε να προσεγγίσουμε την επιθυμητή τιμή όταν είμαστε κάτω από αυτή. Όταν η συγκέντρωση του CO₂ μικρότερη από 600 ppm θέλουμε τα παράθυρα να παραμένουν κλειστά, εκτός και αν άλλοι λόγοι, όπως η θερμοκρασία ή η υγρασία, επιβάλλουν το άνοιγμά τους. Για να το εκφράσουμε αυτό, το βάρος για το CO₂ θα γίνει για αυτές τις τιμές $w_{CO_2}=0$.

CO_{2in} (ppm)	w_{CO_2}
>600	1
≤600	0

Πίνακας 4.2 Το βάρος για το CO₂

B. Σχετική υγρασία

Ομοίως για τη σχετική υγρασία το βάρος θα είναι 0 όταν είμαστε μέσα στο «παράθυρο» επιθυμητών τιμών που έχουμε ορίσει (40% - 60%).

Hum_{in} (%)	w_{Hum}
≥40 and ≤60	0
<40 or >60	10

Πίνακας 4.3 Το βάρος για τη σχετική υγρασία

Γ. Θερμοκρασία

Όταν η εσωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 21 και 26 °C δεν επιθυμούμε να την αλλάξουμε έτσι το βάρος σε αυτές τις περιπτώσεις θα είναι 0.

$T_{in} (^{\circ}\text{C})$	W_{Tin}
≥ 21 and < 26	0
< 21 or ≥ 26	20

Πίνακας 4.4 Το βάρος για την εσωτερική θερμοκρασία

Δ. Φωτισμός

Για το φωτισμό το βάρος είναι πάντα 1.

Συνολικά είναι,

$$Q = a \cdot \text{diag}[w_{CO2} \quad w_{Hum} \quad w_{Tin} \quad 1]$$

Ο πίνακας R αφορά το κόστος σε ηλεκτρική ενέργεια για τους ενεργοποιητές. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει θεωρούμε το κόστος για τα παράθυρα και τα σκίαστρα 0.

Για το κλιματιστικό ορίζουμε βάρος 8 για να το «τιμωρήσουμε» σε σχέση με το άνοιγμα των παραθύρων, με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι απαραίτητο, γιατί έχει μεγάλη κατανάλωση σε ηλεκτρική ενέργεια. Το νούμερο αυτό προέκυψε με δοκιμές.

Αντίστοιχα για τα φώτα ορίζουμε βάρος 1.

$$R = (1 - a) \cdot \text{diag}[0 \quad 1 \quad 0 \quad 8]$$

Τέλος επιλέγουμε συντελεστή $a=0.5$ γιατί δίνουμε την ίδια βαρύτητα στους δύο όρους της ελαχιστοποίησης.

4.4.4 Χρόνος δειγματοληψίας

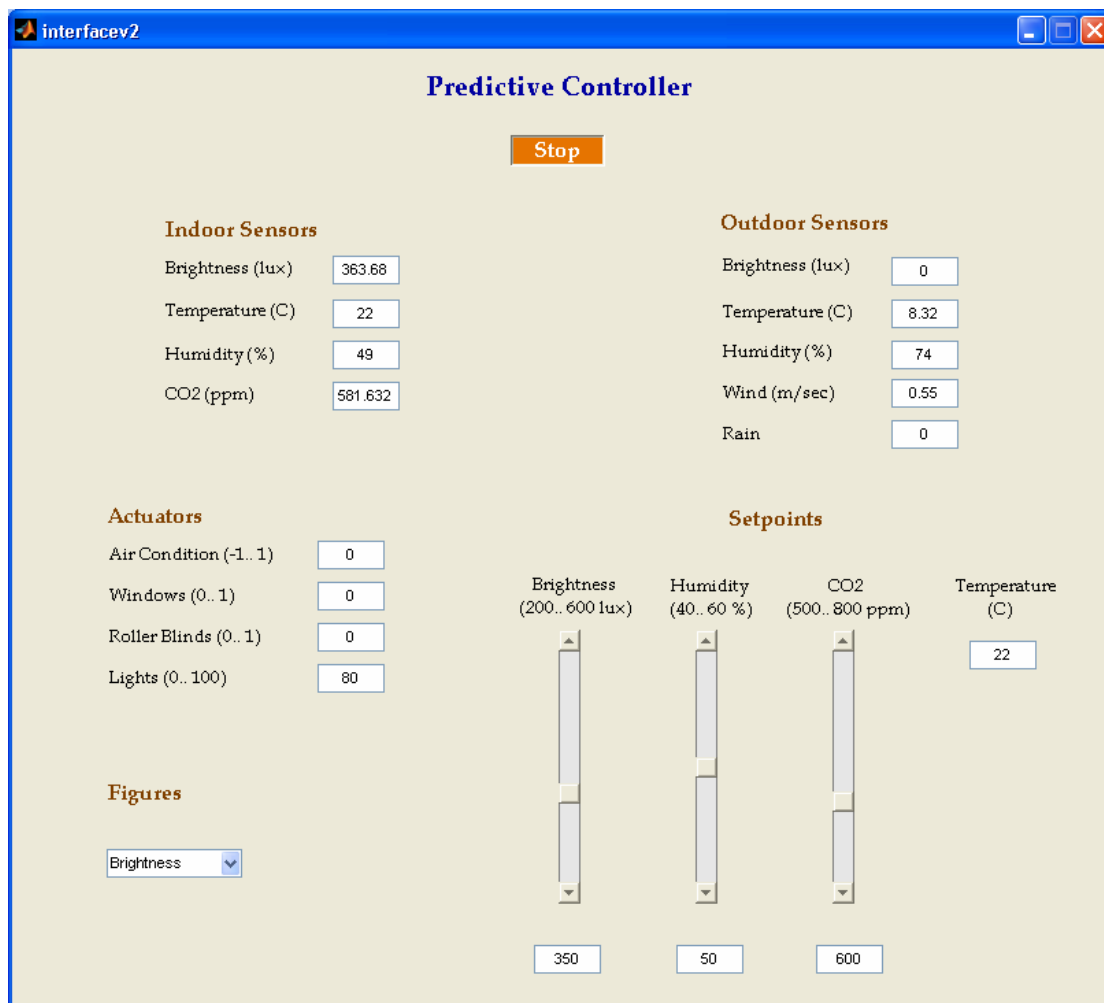
Η αρχική πρόθεση ήταν να ορίσουμε ως χρόνο δειγματοληψίας 2 min, να «τρέχει» δηλαδή ο ελεγκτής κάθε 2 min, για να προσαρμόζεται το σύστημα

γρήγορα στις μεταβολές λόγω διαταραχών. Τελικά ο χρόνος δειγματοληψίας που επιλέχθηκε είναι 10 min. Αυτό συνέβη λόγω του κλιματιστικού:

Το συγκεκριμένο κλιματιστικό δεν έχει διαβαθμίσεις ως προς την απόδοσή του. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι μόνες εντολές που του δίνουμε είναι «άνοιξε/κλείσε» και «κρύο/ζεστό». Οι ενδιάμεσες καταστάσεις, εκτός από το πλήρως κρύο (-1) ή το πλήρως ζεστό (1), επιτυγχάνονται με ποσοστό επί του χρόνου λειτουργίας. Αν π.χ. του δώσουμε την εντολή -0,8 θα λειτουργήσει για $(0,8 \times \text{χρόνος δειγματοληψίας})$ min στο «κρύο». Για να αποφύγουμε λοιπόν τις συχνές εκκινήσεις του κλιματιστικού, οι οποίες θα είχαν ως συνέπεια αφενός την καταπόνηση της συσκευής και αφετέρου την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, ορίσαμε εν τέλει τον χρόνο δειγματοληψίας στα 10 min.

5. Το γραφικό περιβάλλον

Για την εύκολη παρακολούθηση και χειρισμό του συστήματος αναπτύχθηκε ένα γραφικό περιβάλλον, στο οποίο απεικονίζονται οι τιμές των αισθητήρων, οι τιμές που αποστέλλονται στους ενεργοποιητές, καθορίζονται οι επιθυμητές τιμές, γίνεται έναρξη ή τερματισμός του συστήματος και κατ' επιλογή εμφανίζονται γραφήματα με το ιστορικό κατά το τελευταίο 24ωρο. Έτσι ένας απλός χειριστής μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα, χωρίς να γνωρίζει περισσότερες λεπτομέρειες για τα χαμηλότερα επίπεδα υλοποίησης.



Εικόνα 5.1 Το γραφικό περιβάλλον

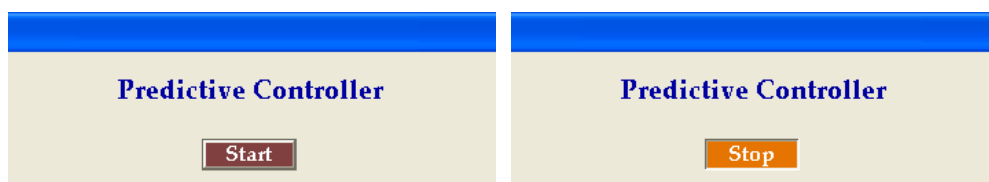
Στην εικόνα 5.1 φαίνεται ένα στιγμιότυπο του γραφικού περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Διακρίνονται έξι περιοχές:

- Κουμπι start/stop
- Εσωτερικοί αισθητήρες
- Εξωτερικοί αισθητήρες

- Ενεργοποιητές
- Επιθυμητές τιμές
- Γραφήματα

5.1 Εκκίνηση, τερματισμός

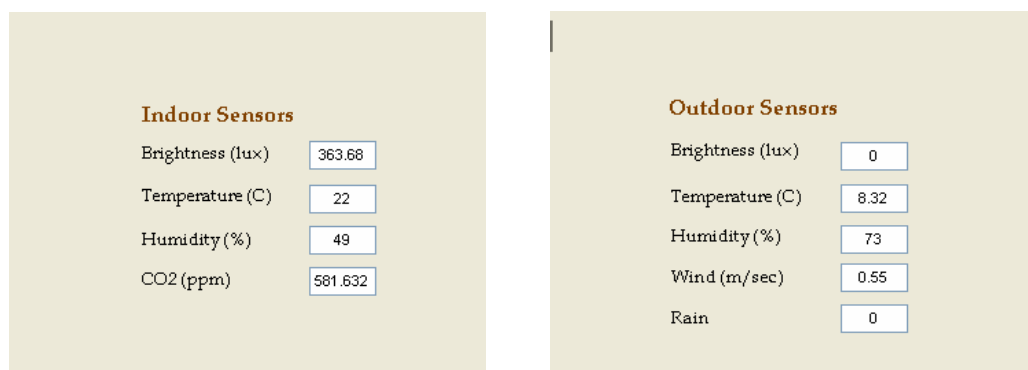
Υπάρχει το κουμπί «start/stop». Πατώντας το «start», το σύστημα ξεκινάει και το κουμπί μετατρέπεται σε «stop». Πατώντας το «stop», το σύστημα σταματάει, σε όλους τους ενεργοποιητές αποστέλλεται η τιμή 0 και το κουμπί μετατρέπεται σε «start».



Εικόνα 5.2 Το κουμπί «start/ stop»

5.2 Αισθητήρες

Υπάρχουν δύο περιοχές για την απεικόνιση των τιμών των αισθητήρων, μια για τους εσωτερικούς και μια για τους εξωτερικούς. Οι τιμές ανανεώνονται κάθε 10 λεπτά, όταν γίνεται και ο έλεγχος.



Εικόνα 5.3 Απεικόνιση των τιμών των αισθητήρων

5.3 Ενεργοποιητές

Υπάρχει μια περιοχή για την απεικόνιση των τιμών που αποστέλλονται στους ενεργοποιητές μετά από κάθε έλεγχο, δηλαδή ανά 10 min.

Actuators

Air Condition (-1.. 1)	0
Windows (0.. 1)	0
Roller Blinds (0.. 1)	0
Lights (0.. 100)	80

Εικόνα 5.4 Απεικόνιση των τιμών των ενεργοποιητών

5.4 Επιθυμητές τιμές

Σε αυτή την περιοχή ο χειριστής του συστήματος μπορεί να καθορίζει τις επιθυμητές τιμές για τη φωτεινότητα, την υγρασία και τη συγκέντρωση του CO₂ μετακινώντας τις αντίστοιχες μπάρες ή εισάγοντας την τιμή στο αντίστοιχο πλαίσιο. Το set-point της θερμοκρασίας προκύπτει αυτόματα από τον αλγόριθμο που έχει αναφερθεί και δεν έχουμε τη δυνατότητα επέμβασης.

Setpoints

Brightness (200.. 600 lux)	Humidity (40.. 60 %)	CO ₂ (500.. 800 ppm)	Temperature (C)
350	50	600	22

Εικόνα 5.5 Περιοχή απεικόνισης και καθορισμού των set-points

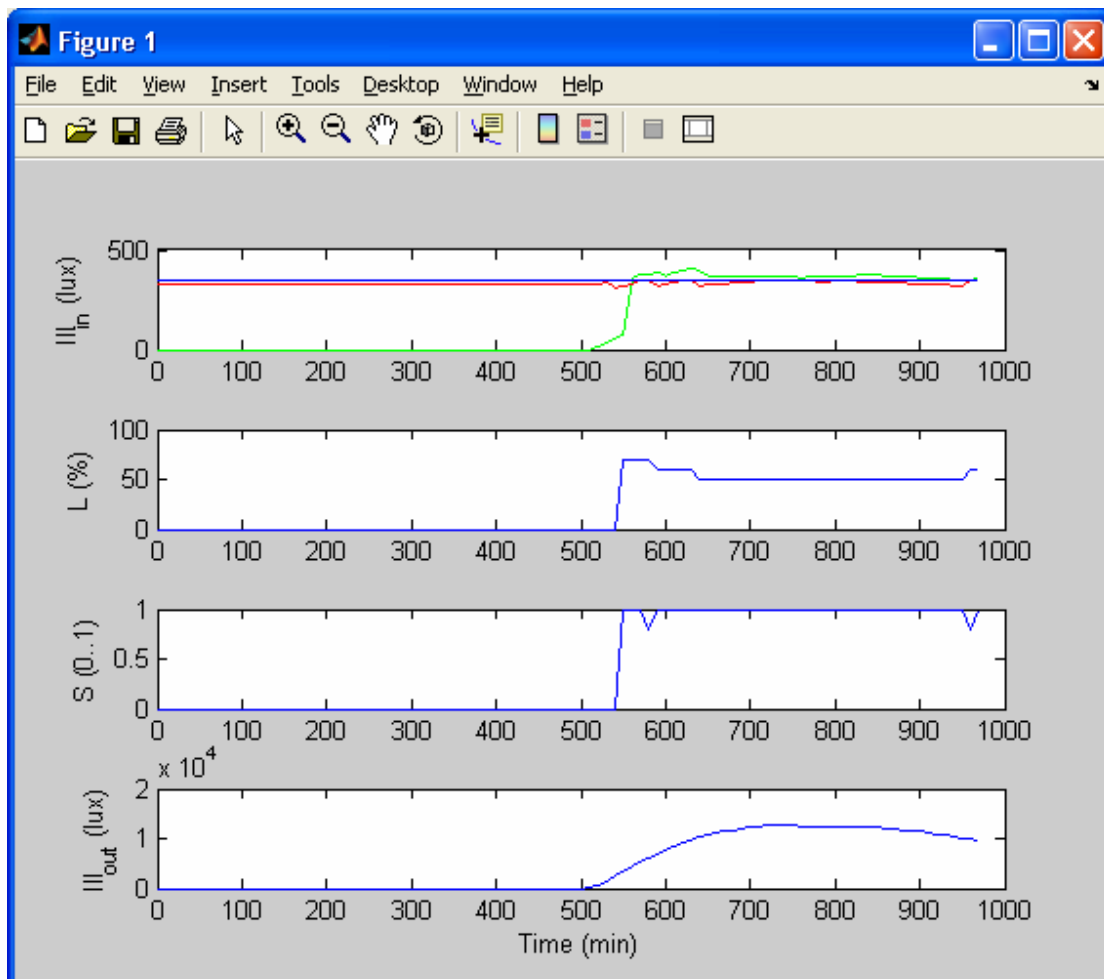
5.5 Γραφήματα

Σε αυτή την περιοχή μπορούμε να δούμε γραφήματα για το ιστορικό του συστήματος. Επιλεγούμε από το σχετικό μενού φωτεινότητα, θερμοκρασία, υγρασία ή CO₂ και ανοίγει ένα νέο παράθυρο με τα κατάλληλα γραφήματα.

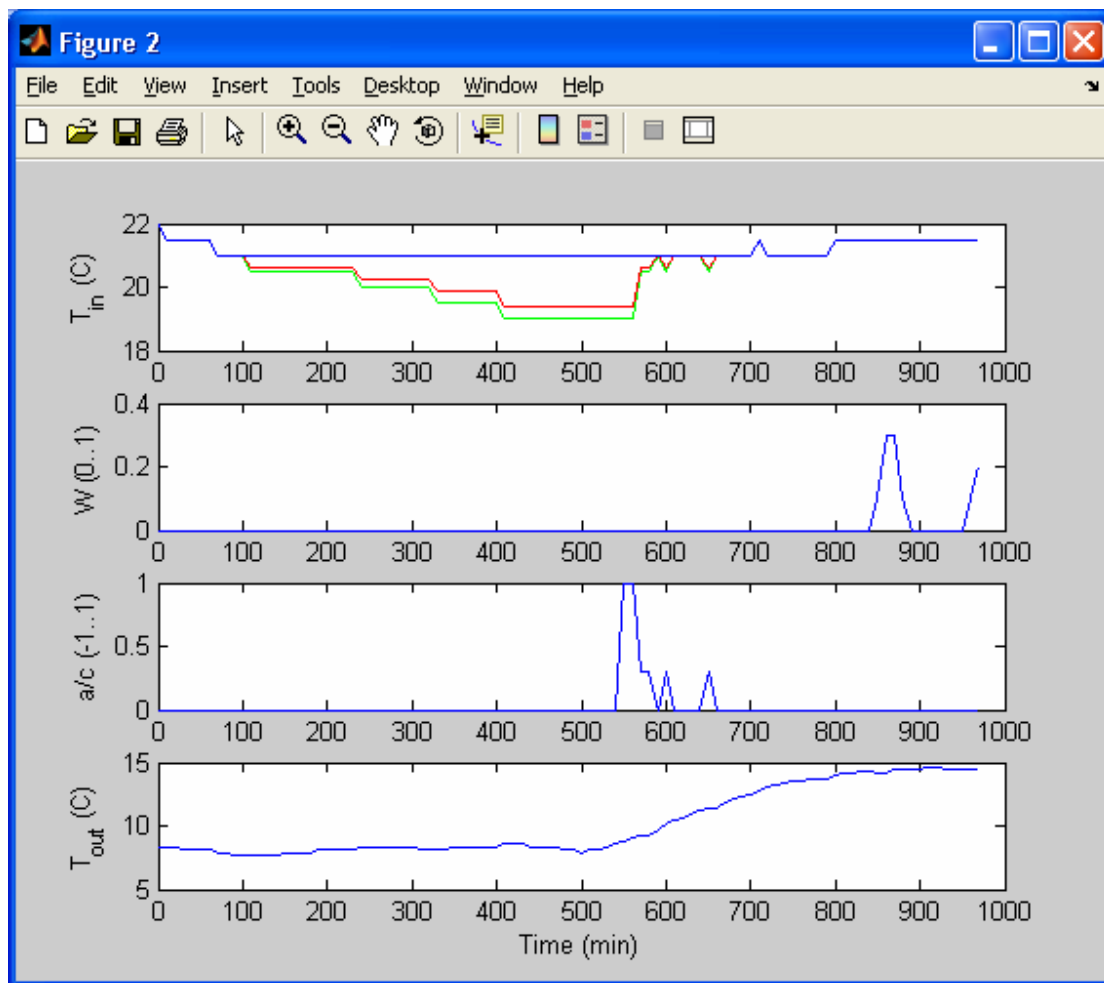
Στο πρώτο γράφημα το πράσινο χρώμα αντιπροσωπεύει τις πραγματικές τιμές, το κόκκινο τις τιμές που υπολογίζει ο προβλεπτικός αλγόριθμος και το μπλε τα set-points.



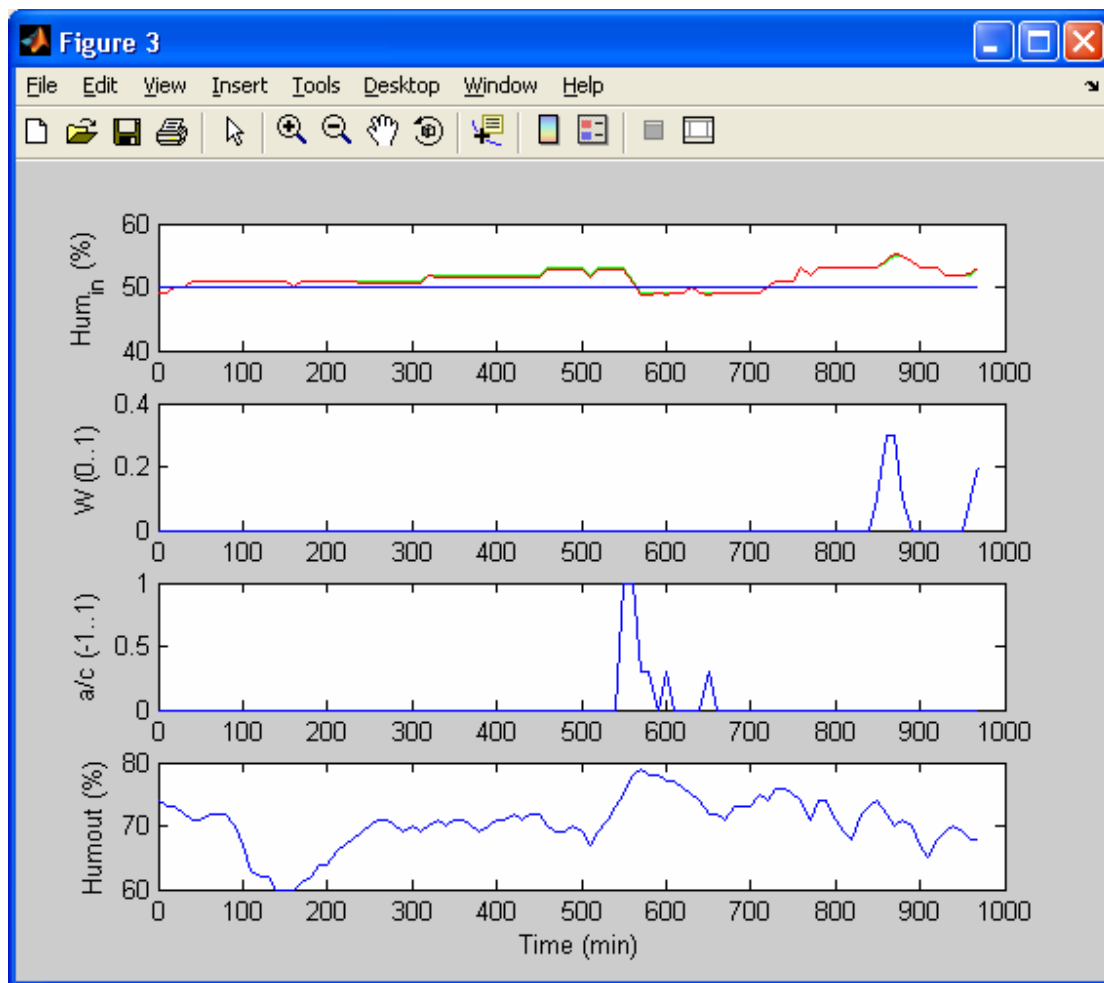
Εικόνα 5.6 Το μενού επιλογής των γραφημάτων



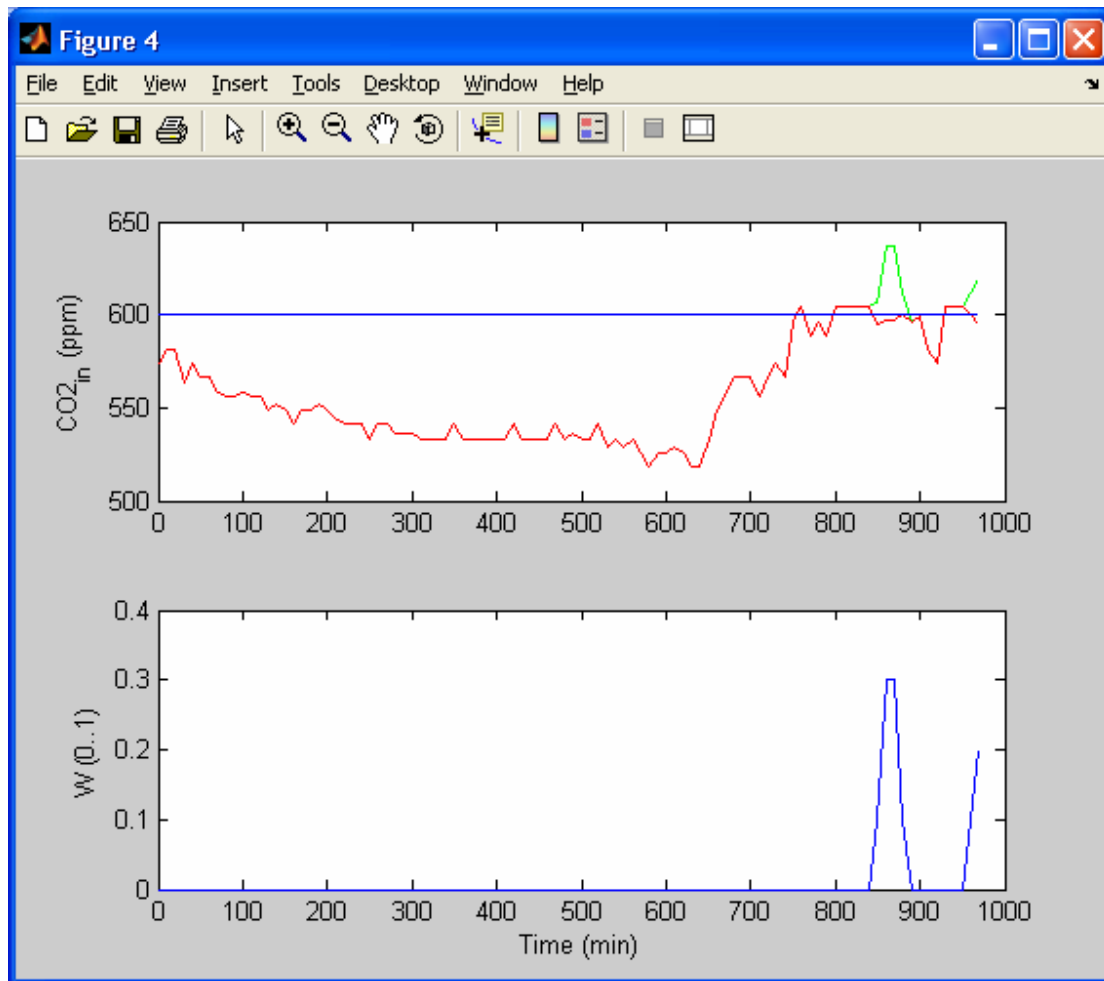
Εικόνα 5.7 Το παράθυρο με τα γραφήματα για το φωτισμό



Εικόνα 5.8 Το παράθυρο με τα γραφήματα για τη θερμοκρασία



Εικόνα 5.9 Το παράθυρο με τα γραφήματα για τη σχετική υγρασία



Εικόνα 5.10 Το παράθυρο με τα γραφήματα για τη συγκέντρωση CO_2

Για τα παραπάνω γραφήματα να σημειώσουμε το σύστημα για το χρονικό διάστημα 0 έως 530 min παρέμεινε κλειστό, γιατί είχε οριστεί χρονοδιακόπτης που το απενεργοποιούσε κατά τις νυχτερινές ώρες. Ο αλγόριθμος ελέγχου βέβαια εκτελούνταν κανονικά, αλλά οι ενεργοποιητές λάμβαναν την τιμή 0.

6. Αποτελέσματα

6.1 Γενική περιγραφή

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος όλα τα δεδομένα καταγράφονται σε ένα αρχείο. Τα δεδομένα αυτά αφορούν το χρόνο, τις μετρήσεις από τους αισθητήρες, τις τιμές των ενεργοποιητών, τις τιμές που υπολογίζει ο προβλεπτικός αλγόριθμος και οι επιθυμητές τιμές. Από τα αρχεία αυτά, μετά από επεξεργασία στο Matlab, παράγονται γραφήματα που μας επιτρέπουν να εξάγουμε συμπεράσματα για την καλή λειτουργία του συστήματος.

Θα παρουσιαστούν γραφήματα με μετρήσεις από τον Δεκέμβριο του 2007 και τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο του 2008, όταν το σύστημα πήρε την τελική του μορφή. Επίσης θα παρουσιαστούν γραφήματα από το Νοέμβριο και το Δεκέμβριο του 2007 όταν το σύστημα λειτουργούσε με χρόνο δειγματοληψίας 2 min.

Οι μετρήσεις λαμβάνονται ανά 10 ή 2 min αντίστοιχα, όσο δηλαδή είναι και η περίοδος λειτουργίας του ελεγκτή, και είναι οι ίδιες ακριβώς που χρησιμοποιούνται στο διάνυσμα κατάστασης του ελεγκτή.

Για την καλύτερη παρακολούθηση των αποτελεσμάτων τα γραφήματα παρουσιάζονται ως καμπύλες συνεχούς χρόνου, ενώ στην πραγματικότητα είναι διακριτού.

Τα γραφήματα παρουσιάζονται ανά περίπτωση με τις ακόλουθες μορφές.

A. CO₂

Για τη συγκέντρωση του CO₂ παρουσιάζονται δυο γραφήματα. Στο πρώτο φαίνονται οι μετρήσεις του εσωτερικού αισθητήρα με πράσινο χρώμα, οι τιμές που υπολογίζει ο προβλεπτικός έλεγχος με κόκκινο χρώμα και η επιθυμητή τιμή με μπλε χρώμα, ενώ στο δεύτερο φαίνονται οι τιμές του ενεργοποιητή των παραθύρων. Ο x-άξονας εκφράζει το χρόνο σε min, από την έναρξη των μετρήσεων.

B. Σχετική υγρασία

Για τη σχετική υγρασία παρουσιάζονται τέσσερα γραφήματα. Στο πρώτο φαίνονται οι μετρήσεις του εσωτερικού αισθητήρα με πράσινο χρώμα και οι τιμές που υπολογίζει ο προβλεπτικός έλεγχος με κόκκινο χρώμα. Το «παραθύρο» των επιθυμητών τιμών (40 – 60%) ορίζεται από τις διακεκομμένες γραμμές, ενώ η μπλε γραμμή ορίζει τη μέση επιθυμητή τιμή (50%). Στο

δεύτερο φαίνονται οι τιμές του ενεργοποιητή των παραθύρων. Στο τρίτο φαίνονται οι τιμές του ενεργοποιητή του κλιματιστικού. Στο τέταρτο τέλος γράφημα φαίνονται οι τιμές τις εξωτερικής υγρασίας που μετρούνται. Ο x-άξονας εκφράζει το χρόνο σε min, από την έναρξη των μετρήσεων.

Γ. Θερμοκρασία

Για τη θερμοκρασία παρουσιάζονται τέσσερα γραφήματα. Στο πρώτο φαίνονται οι μετρήσεις του εσωτερικού αισθητήρα με πράσινο χρώμα, οι τιμές που υπολογίζει ο προβλεπτικός έλεγχος με κόκκινο χρώμα και η επιθυμητή τιμή με μπλε χρώμα. Στο δεύτερο φαίνονται οι τιμές του ενεργοποιητή των παραθύρων. Στο τρίτο φαίνονται οι τιμές του ενεργοποιητή του κλιματιστικού. Στο τέταρτο τέλος γράφημα φαίνονται οι τιμές τις εξωτερικής θερμοκρασίας που μετρούνται. Ο x-άξονας εκφράζει το χρόνο σε min, από την έναρξη των μετρήσεων.

Δ. Φωτισμός

Για το φωτισμό παρουσιάζονται τέσσερα γραφήματα. Στο πρώτο φαίνονται οι μετρήσεις του εσωτερικού αισθητήρα με πράσινο χρώμα, οι τιμές που υπολογίζει ο προβλεπτικός έλεγχος με κόκκινο χρώμα και η επιθυμητή τιμή με μπλε χρώμα. Στο δεύτερο φαίνονται οι τιμές του ενεργοποιητή των φώτων. Στο τρίτο φαίνονται οι τιμές του ενεργοποιητή του σκίαστρων. Στο τέταρτο τέλος γράφημα φαίνονται οι τιμές τις εξωτερικής φωτεινότητας που μετρούνται. Ο x-άξονας εκφράζει το χρόνο σε min, από την έναρξη των μετρήσεων.

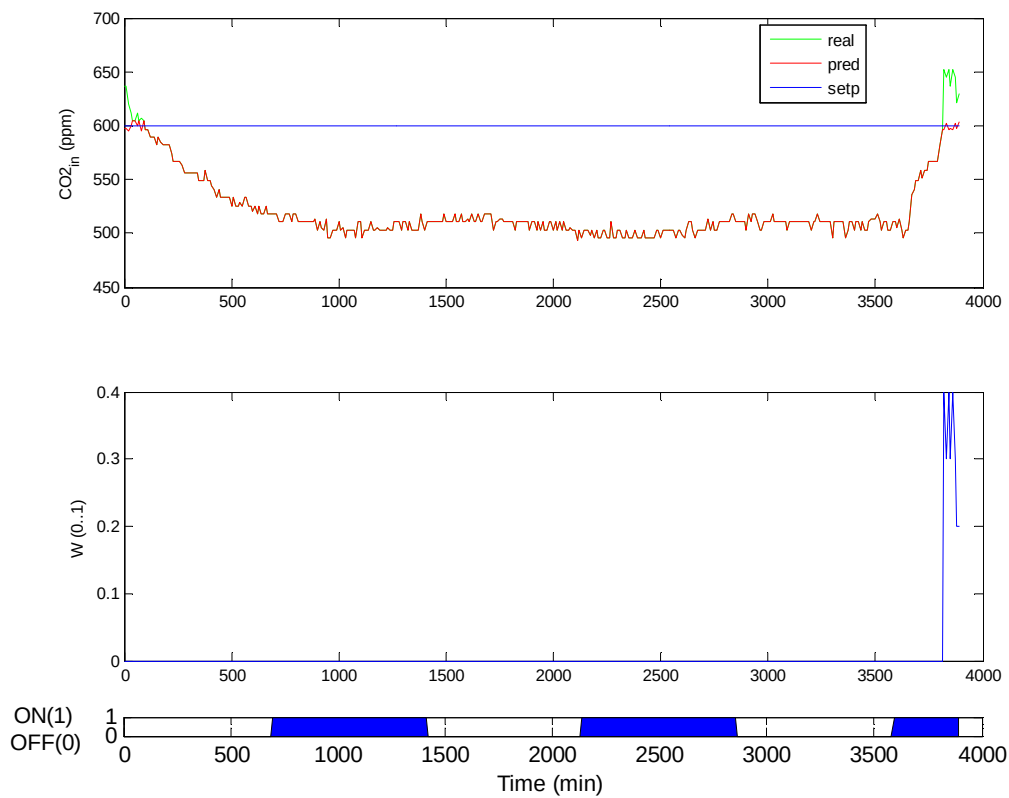
6.2 Γραφήματα τελικού συστήματος

6.2.1 Αποτελέσματα από 11 έως 14-1-2008

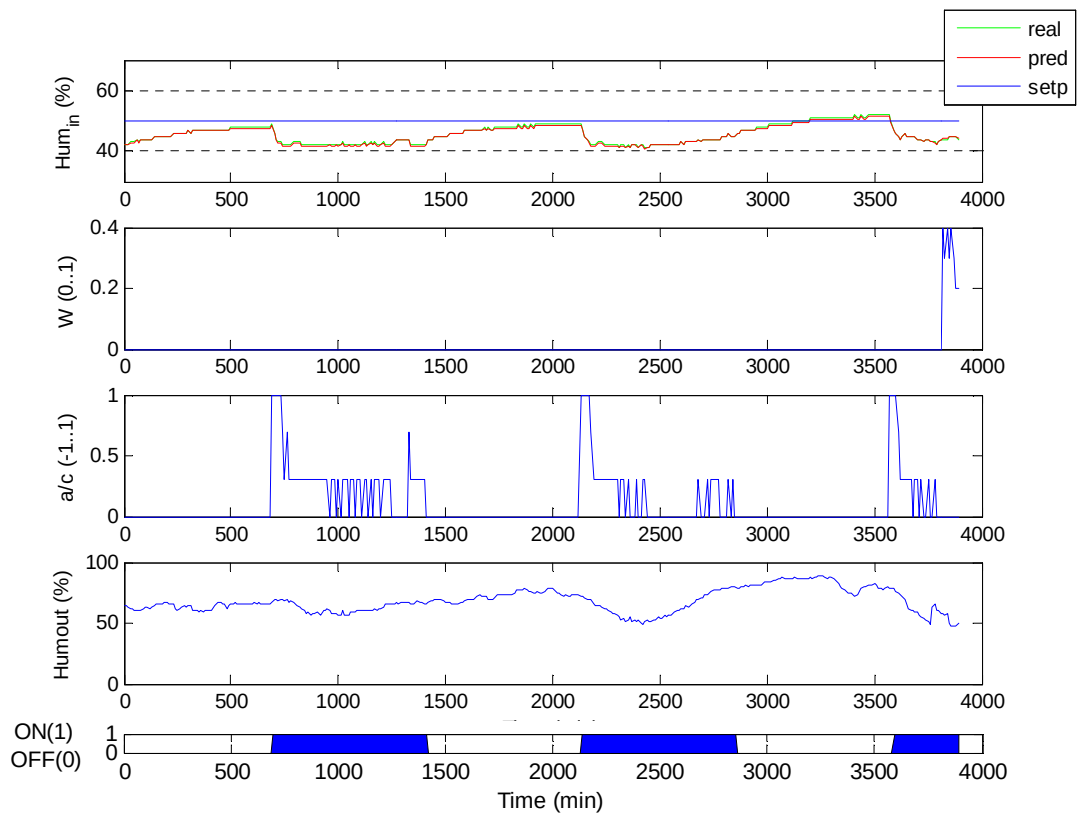
Πρόκειται για συνεχόμενες μετρήσεις συνολικής διάρκειας 3900 min, δηλαδή 65 ωρών.

Να σημειώσουμε ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αυτών λειτουργεί χρονοδιακόπτης που απενεργοποιεί το σύστημα για τις ώρες 8.00μμ με 8.00πμ. Ο προβλεπτικός αλγόριθμος εκτελείται κανονικά σε αυτά τα διαστήματα και τα αποτελέσματά του φαίνονται στα ακόλουθα γραφήματα, αλλά όλοι οι ενεργοποιητές λαμβάνουν την τιμή 0. Πρόκειται για τα διαστήματα, 0.. 700min, 1420.. 2140min και 2860.. 3580min.

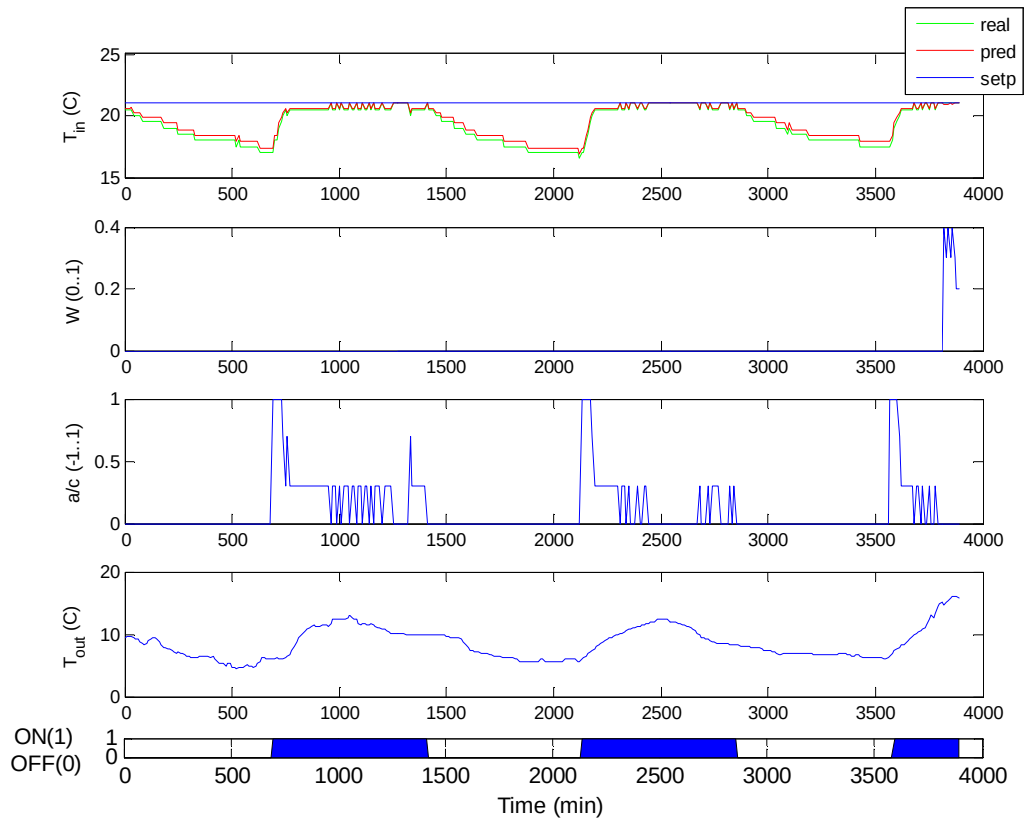
Σε κάθε σχήμα υπάρχει ένα γράφημα που δείχνει αν το σύστημα είναι ενεργό (ON(1) – μπλε χρώμα) ή όχι (OFF(0)).



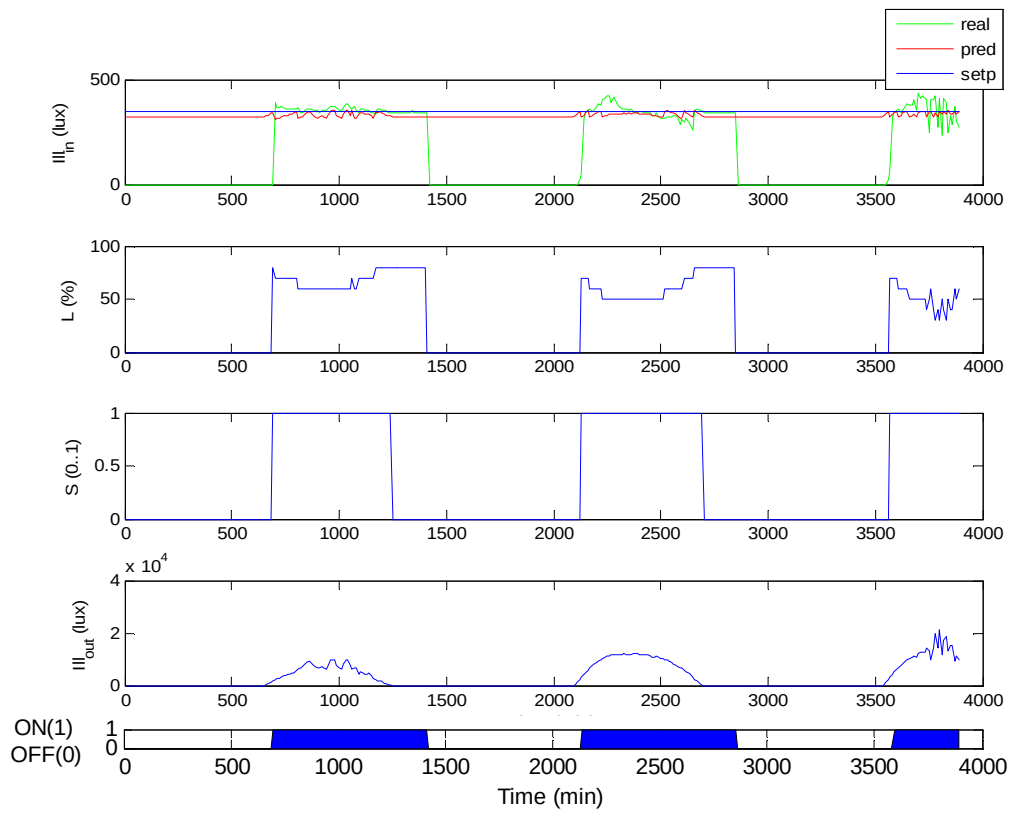
Σχήμα 6.1 Μετρήσεις CO₂



Σχήμα 6.2 Μετρήσεις σχετικής υγρασίας



Σχήμα 6.3 Μετρήσεις θερμοκρασίας



Σχήμα 6.4 Μετρήσεις φωτεινότητας

Σχολιασμός γραφημάτων

A. CO₂

Όπως φαίνεται στα αντίστοιχα γραφήματα στο μεγαλύτερο διάστημα δεν υπήρχε ανθρώπινη παρουσία. Όταν υπήρξε ανθρώπινη παρουσία και η συγκέντρωση του CO₂ ξεπέρασε το όριο της επιθυμητής τιμής το σύστημα αντέδρασε άμεσα ανοίγοντας τα παράθυρα και η τιμή του CO₂ μειώθηκε.

B. Σχετική υγρασία

Η τιμή της σχετικής υγρασίας κυμάνθηκε για όλο το διάστημα μέσα στα όρια του «παραθύρου» γύρω από την επιθυμητή τιμή (40 - 60%).

Γ. Θερμοκρασία

Στα διαστήματα που το σύστημα είναι ενεργό η εσωτερική θερμοκρασία συντηρείται στην επιθυμητή τιμή ή λίγο χαμηλότερα με μικρή χρήση του κλιματιστικού. Τα παράθυρα ανοίγουν μόνο όταν το επιβάλλουν λόγοι αερισμού καθώς η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλή.

Δ. Φωτεινότητα

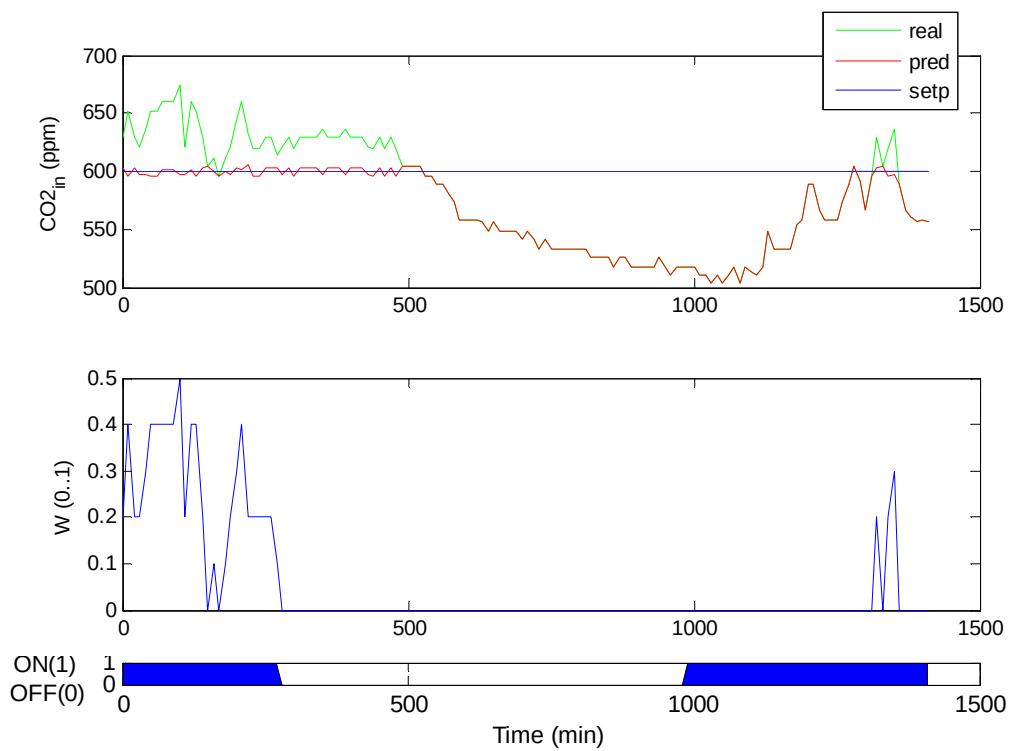
Η φωτεινότητα διατηρείται πάντα κοντά στην επιθυμητή τιμή, με κάποιες μικρές διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις οφείλονται στη συνεχή εναλλαγή συννεφιάς ηλιοφάνειας και δεν κρίνονται σημαντικές, γιατί τέτοιες μικρές διαφορές δεν επηρεάζουν την καλή ορατότητα, ούτε κουράζουν γιατί δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές.

6.2.2 Αποτελέσματα από 8 έως 9-1-2008

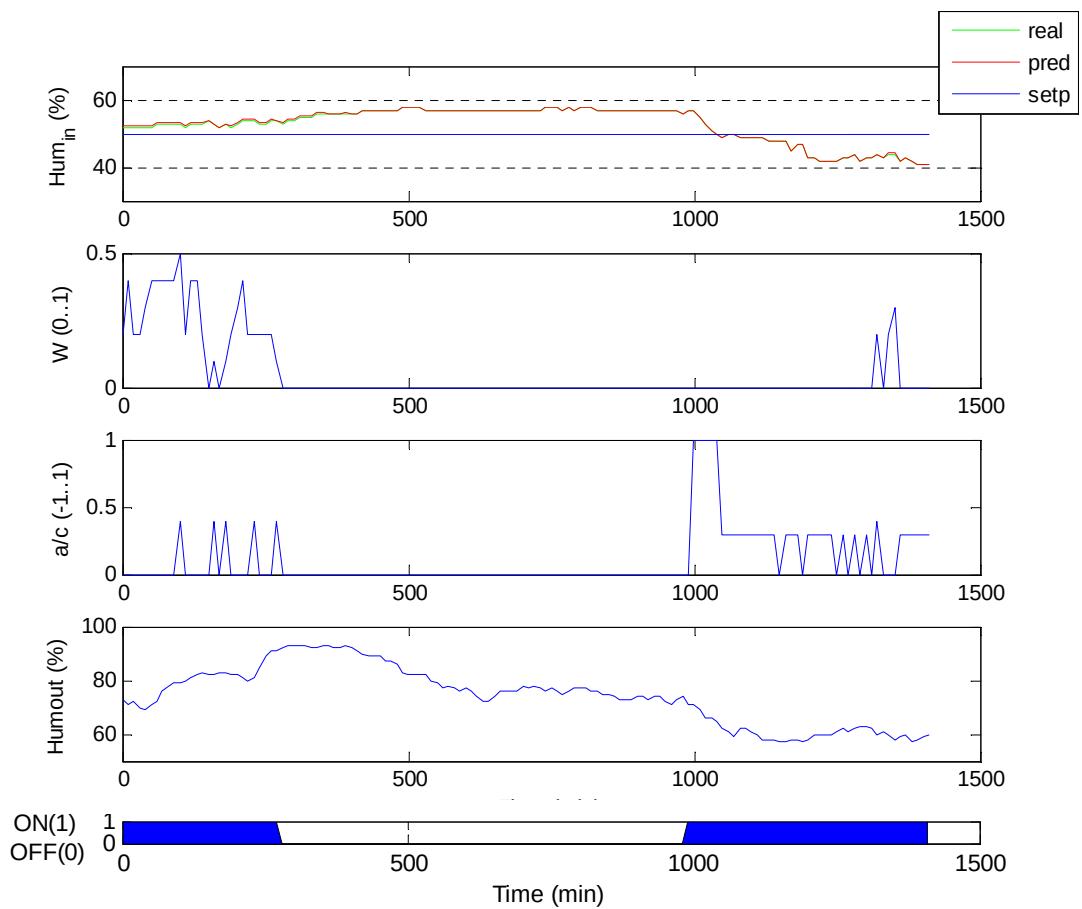
Πρόκειται για συνεχόμενες μετρήσεις συνολικής διάρκειας 1410 min, δηλαδή 23,5 ωρών.

Να σημειώσουμε ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αυτών λειτουργεί χρονοδιακόπτης που απενεργοποιεί το σύστημα για τις ώρες 8.00μμ με 8.00πμ. Ο προβλεπτικός αλγόριθμος εκτελείται κανονικά σε αυτά τα διαστήματα και τα αποτελέσματά του φαίνονται στα ακόλουθα γραφήματα, αλλά όλοι οι ενεργοποιητές λαμβάνουν την τιμή 0. Πρόκειται για το διάστημα 280.. 1000min.

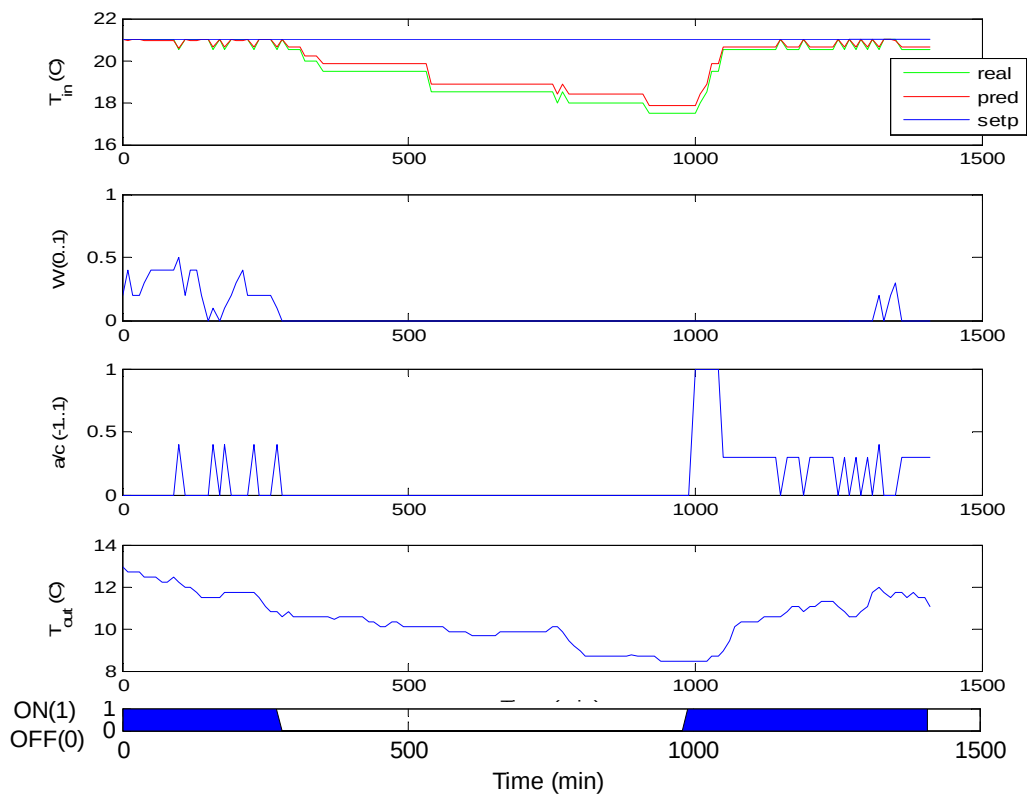
Σε κάθε σχήμα υπάρχει ένα γράφημα που δείχνει αν το σύστημα είναι ενεργό (ON(1) – μπλε χρώμα) ή όχι (OFF(0)).



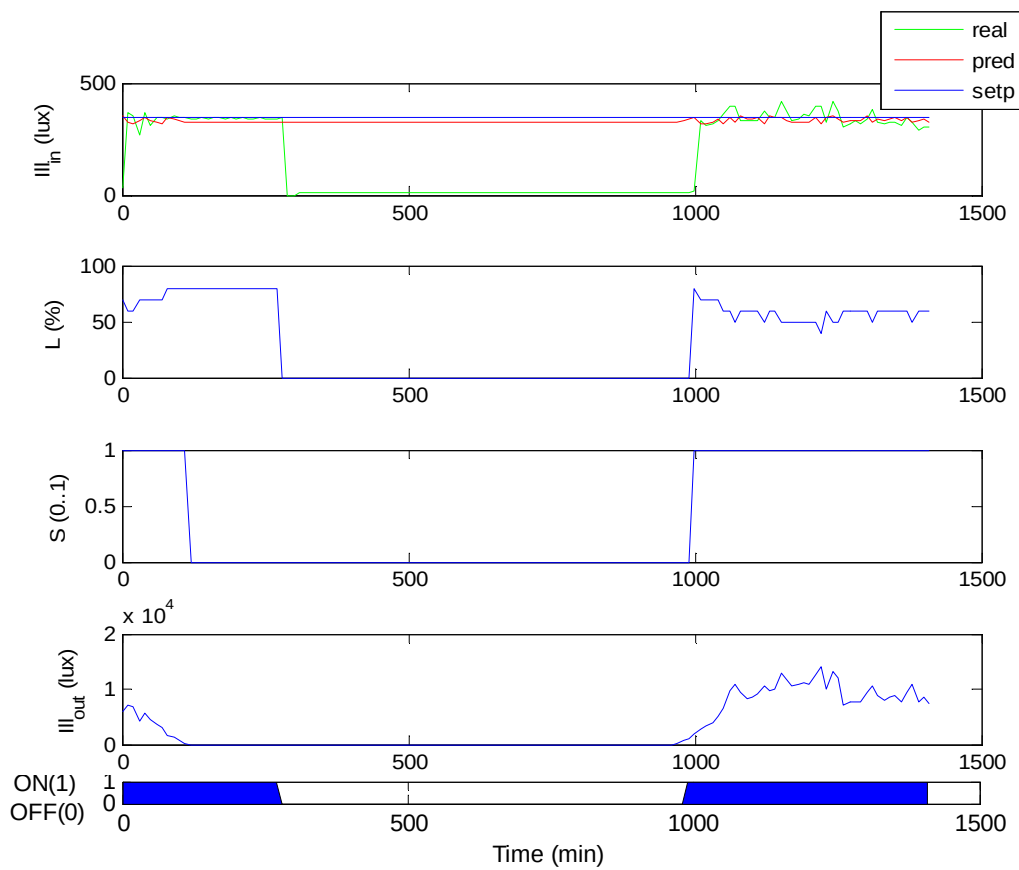
Σχήμα 6.5 Μετρήσεις CO_2



Σχήμα 6.6 Μετρήσεις σχετικής υγρασίας



Σχήμα 6.7 Μετρήσεις θερμοκρασίας



Σχήμα 6.8 Μετρήσεις φωτεινότητας

Σχολιασμός γραφημάτων

A. CO₂

Όπως φαίνεται στα αντίστοιχα γραφήματα σε πολλές περιπτώσεις που η συγκέντρωση του CO₂ ξεπερνάει το όριο της επιθυμητής τιμής, το σύστημα αντιδρά άμεσα ανοίγοντας τα παράθυρα και η τιμή του CO₂ περιορίζεται σε επίπεδα λίγο πάνω ή κάτω από το set-point.

B. Σχετική υγρασία

Η τιμή της σχετικής υγρασίας κυμάνθηκε για όλο το διάστημα μέσα στα όρια του «παραθύρου» γύρω από την επιθυμητή τιμή (40 - 60%).

Γ. Θερμοκρασία

Στα διαστήματα που το σύστημα είναι ενεργό η εσωτερική θερμοκρασία συντηρείται στην επιθυμητή τιμή ή λίγο χαμηλότερα με μικρή χρήση του κλιματιστικού. Τα παράθυρα ανοίγουν μόνο όταν το επιβάλλουν λόγοι αερισμού καθώς η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλή.

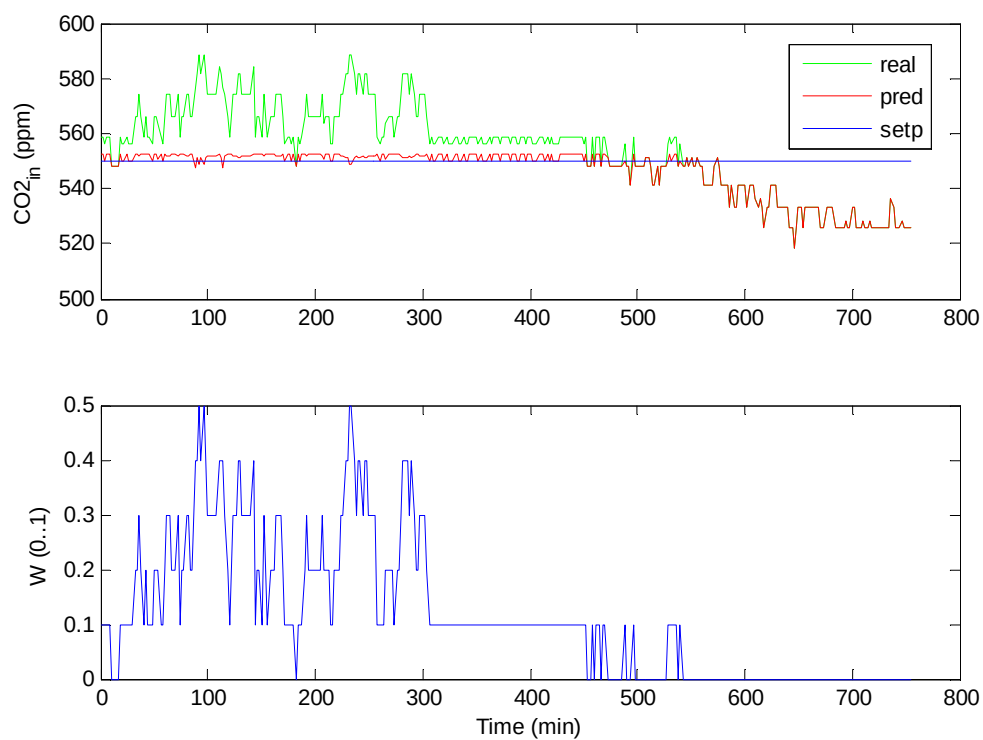
Δ. Φωτεινότητα

Η φωτεινότητα διατηρείται πάντα κοντά στην επιθυμητή τιμή, με κάποιες μικρές διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις οφείλονται στη συνεχή εναλλαγή συννεφιάς ηλιοφάνειας και δεν κρίνονται σημαντικές, γιατί τέτοιες μικρές διαφορές δεν επηρεάζουν την καλή ορατότητα, ούτε κουράζουν γιατί δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές.

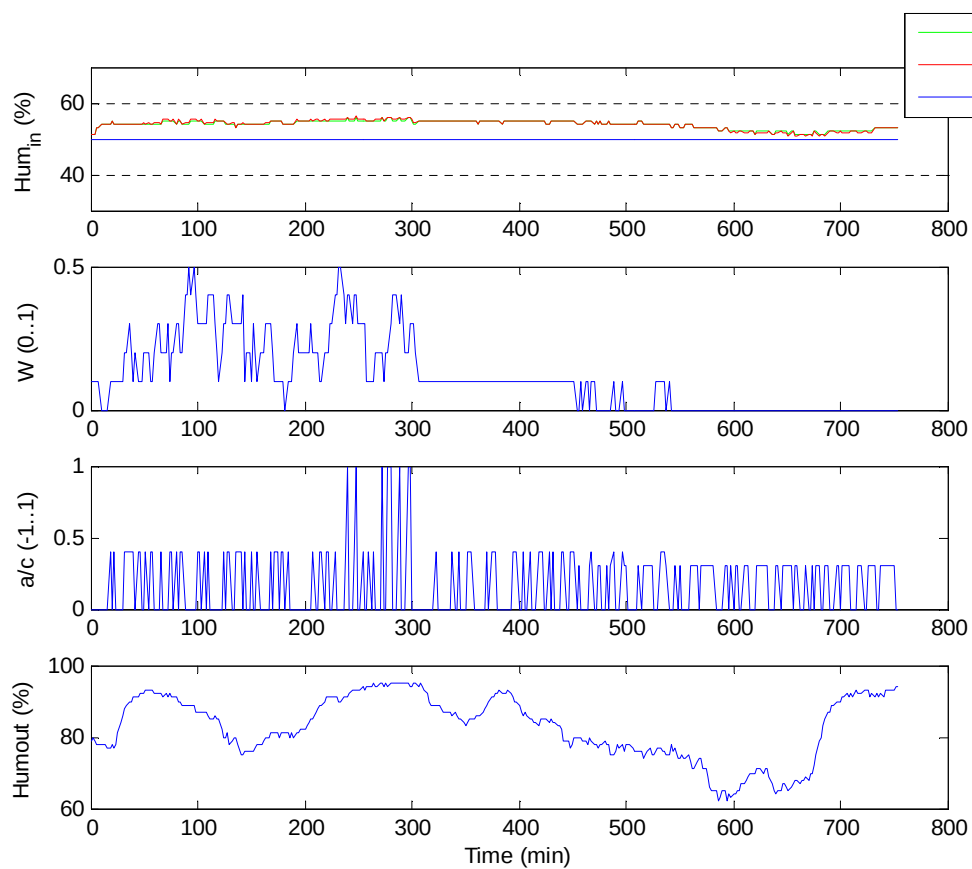
6.3 Γραφήματα με χρόνο δειγματοληψίας 2 min

6.2.1 Αποτελέσματα από 13 έως 14-12-2007

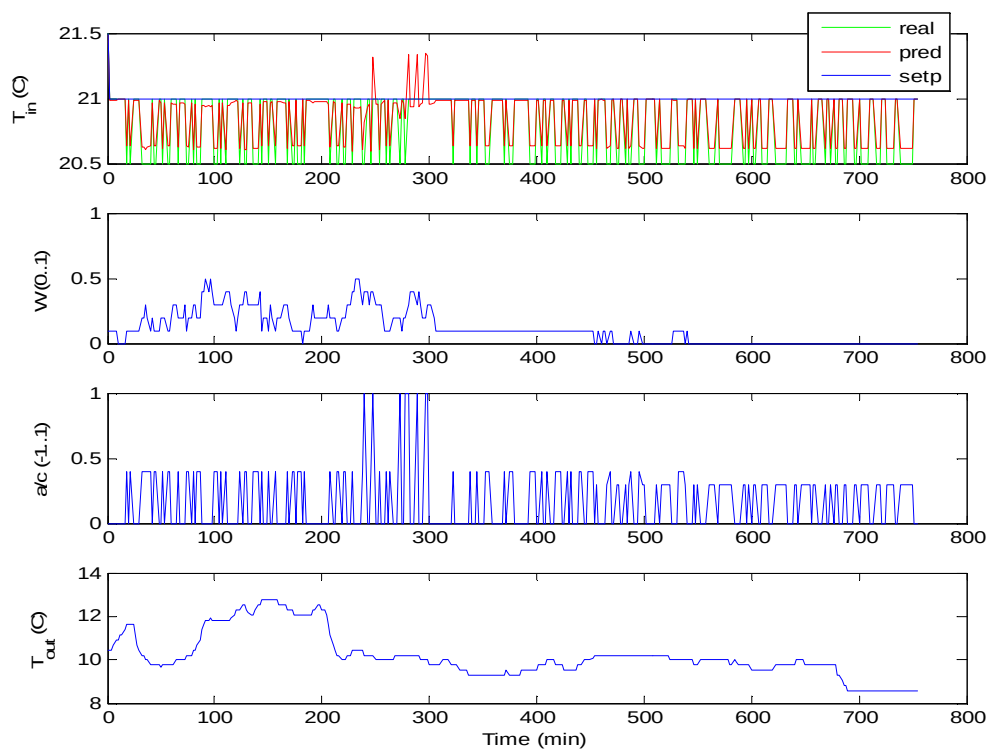
Πρόκειται για συνεχόμενες μετρήσεις συνολικής διάρκειας 754 min, δηλαδή περίπου 12,5 ωρών. Το σύστημα είναι συνεχώς ενεργοποιημένο.



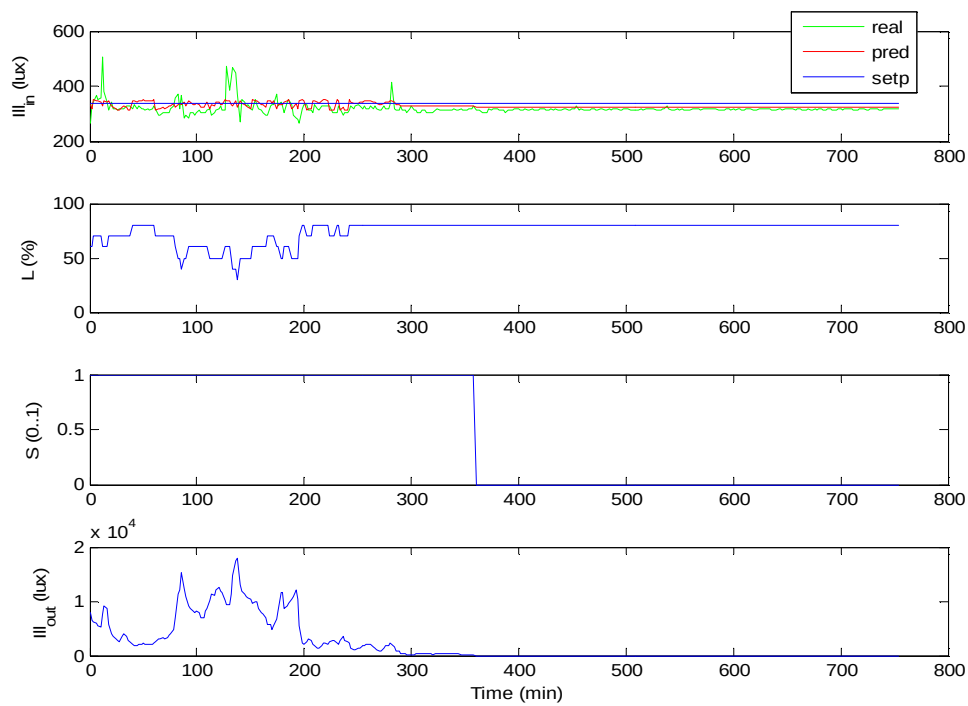
Σχήμα 6.9 Μετρήσεις CO_2



Σχήμα 6.10 Μετρήσεις σχετικής υγρασίας



Σχήμα 6.11 Μετρήσεις θερμοκρασίας



Σχήμα 6.12 Μετρήσεις φωτεινότητας

Σχολιασμός γραφημάτων

A. CO₂

Όπως φαίνεται στα αντίστοιχα γραφήματα σε πολλές περιπτώσεις που η συγκέντρωση του CO₂ ξεπερνάει το όριο του set-point, το σύστημα αντιδρά άμεσα ανοίγοντας τα παράθυρα και η τιμή του CO₂ περιορίζεται σε επίπεδα λίγο πάνω ή κάτω από την επιθυμητή τιμή.

B. Σχετική υγρασία

Η τιμή της σχετικής υγρασίας κυμάνθηκε για όλο το διάστημα μέσα στα όρια του «παραθύρου» γύρω από την επιθυμητή τιμή (40 - 60%). Σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις η τιμή της είναι αυξημένη, κάτι που οφείλεται στα μεγάλα διαστήματα κατά τα οποία το παράθυρο ανοίγει σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα υψηλή τιμή της εξωτερικής σχετικής υγρασίας.

Γ. Θερμοκρασία

Η εσωτερική θερμοκρασία συντηρείται στην επιθυμητή τιμή ή λίγο χαμηλότερα με μικρή χρήση του κλιματιστικού, αλλά πολλές εκκινήσεις και παύσεις. Τα παράθυρα ανοίγουν μόνο όταν το επιβάλλουν λόγοι αερισμού καθώς η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλή.

Δ. Φωτεινότητα

Η φωτεινότητα διατηρείται πάντα κοντά στην επιθυμητή τιμή, με κάποιες μικρές διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις οφείλονται στη συνεχή εναλλαγή συννεφιάς ηλιοφάνειας και δεν κρίνονται σημαντικές, γιατί τέτοιες μικρές διαφορές δεν επηρεάζουν την καλή ορατότητα, ούτε κουράζουν γιατί δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές. Κάποιες μεγάλες κορυφές οφείλονται σε διαταραχές που δεν «έπιασε» έγκαιρα ο εξωτερικός αισθητήρας και κάποιες άλλες σε απευθείας είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας από παράθυρα που δεν καλύπτονται με σκίαστρα.

Γενικά σε αυτές τις μετρήσεις παρατηρούμε συχνές αλλαγές στους ενεργοποιητές, λόγω της μικρής περιόδου. Ειδικά για το κλιματιστικό οι αλλαγές αυτές δεν είναι επιθυμητές, όπως προαναφέραμε, γιατί καταπονείται, καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και ενδεχομένως δεν προλαβαίνει να αποδώσει σύμφωνα με τις δυνατότητές του. Για τους παραπάνω λόγους απορρίφθηκε η περίπτωση της περιόδου 2 λεπτών.

7. Συμπεράσματα – Μελλοντικές επεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Το παρόν σύστημα ικανοποιεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τις αρχικές σχεδιαστικές επιλογές. Ανταποκρίνεται άμεσα στις περιβαλλοντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια του χρόνου ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει ευσταθή συμπεριφορά για όσο διάστημα δοκιμάστηκε. Παράλληλα, μετά από μεγάλο διάστημα συνεχούς λειτουργίας παρατηρήθηκε εξαιρετική σταθερότητα τόσο του υλικού, όσο και του λογισμικού.

Σε επίπεδο ελεγκτή τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά καθώς ο αλγόριθμος εκτελείται με επιτυχία και επιλέγει πραγματικά πολύ καλές λύσεις με γνώμονα πάντα την προσέγγιση στο set-point και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Εκεί που παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών τιμών και των προβλεπόμενων είναι στην περίπτωση του CO₂. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημα έχει μικρές δυνατότητας επέμβασης, αφού τα ελεγχόμενα παράθυρα είναι μικρά, ενώ οι διαταραχές που προκαλούνται από την είσοδο και έξοδο ατόμων είναι πολύ μεγαλύτερες και μη προβλέψιμες. Και σε αυτή την περίπτωση όμως το σύστημα καταφέρνει να ελέγχει τα επίπεδα του CO₂ κοντά στο set-point.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι έγινε επιτυχής ενσωμάτωση τεχνολογίας δικτύωσης διαύλου κατοικίας, σε ήδη υπάρχουσα ηλεκτρολογική εγκατάσταση, χωρίς το παραμικρό πρόβλημα στη λειτουργία της. Βέβαια η εξαρχής εγκατάσταση δικτύωσης διαύλου είναι προτιμότερη, καθώς απλοποιεί τις διαδικασίες καλωδίωσης και γίνονται καλύτερες επιλογές συσκευών. Το όλο σύστημα σε περιπτώσεις πανικού μπορεί να μεταχθεί σε κλασσικό χειροκίνητο έλεγχο, για τα φωτιστικά σώματα και το κλιματιστικό. Επιπρόσθετα ενοποιήθηκαν συστήματα ελέγχου σε λογισμικό με το σύστημα του διαύλου δικτύωσης. Πολλοί ξεχωριστοί ελεγκτές οι οποίοι αναγκαστικά με χρήση άλλης τεχνολογίας θα ήταν ανεξάρτητοι, ενοποιούνται σε έναν κάνοντας έτσι αποδοτικότερη χρήση της πληροφορίας της κατάστασης (*state*) του συστήματος, που συγκεντρώνεται από τα αισθητήρια. Σε αυτό, συνεισφέρει ιδιαίτερα το ότι η πληροφορία μεταξύ των κόμβων σε επίπεδο υλικού και των επιμέρους ελεγκτών σε επίπεδο λογισμικού, μέσω του διαύλου, είναι διαμοιρασμένη και προσβάσιμη από όλους.

7.1 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η ελεύθερη τοπολογία δικτύωσης του συστήματος αφήνει περιθώρια για την προσθήκη περισσότερων αισθητήρων και ενεργοποιητών χωρίς σημαντικές αλλαγές.

Για την περίπτωση του CO₂ η προσθήκη εξωτερικού αισθητήρα CO₂, αλλά και περισσότερων παραθύρων προς έλεγχο μπορεί να βελτιώσει αισθητά το υπόδειγμα.

Στην περίπτωση του φωτισμού προτείνεται η εγκατάσταση περισσότερων ελεγχόμενων σκιάστρων ώστε να υπάρχει η δυνατότητα για περισσότερο ηλιακό φως, το οποίο είναι καλύτερο ποιοτικά σε σχέση με το τεχνητό και δεν κοστίζει. Επίσης προτείνεται η εγκατάσταση περισσότερων εσωτερικών αισθητήρων, προσανατολισμένων στα παράθυρα, για να κλείνουν τα συγκεκριμένα σκιάστρα σε περιπτώσεις απευθείας εισόδου ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να ενοχλεί.

Στην περίπτωση της ψύξης θέρμανσης, απαιτείται η αντικατάσταση του κλιματιστικού με άλλο, που να παρέχει την δυνατότητα κλιμακωτής λειτουργίας, για λόγους έχουν ήδη αναφερθεί. Ακόμη θα μπορούσε να αντικατασταθεί ο αισθητήρας θερμοκρασίας με άλλον μεγαλύτερης ανάλυσης σε σχέση με την ανάλυση του υπάρχοντα αισθητήρα, που είναι 0,5 °C.

Επίσης περισσότερες δοκιμές και μετρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου μπορούν να οδηγήσουν στην βελτίωση του αλγορίθμου ελέγχου ή την επιλογή ενδεχομένως πιο κατάλληλων αλγορίθμων ελέγχου.

Επιπλέον μπορούν να δοκιμαστούν και άλλοι αλγόριθμοι και να γίνουν συγκρίσεις για την απόδοσή τους.

Τέλος, με την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού και χρήση του διαδικτύου είναι εφικτή η τηλεμέτρηση και ο απομακρυσμένος έλεγχος της εγκατάστασης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τούλογλου Σ., KNX/EIB Τεχνική Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 2006.
- [2] Τριπολιτάκης Ε., Τεχνικές και Αλγόριθμοι Ελέγχου Άνεσης και Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Κτήρια με τη χρήση Διαύλων Δικτύωσης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2004.
- [3] www.wikipedia.org/wiki/Kyoto_Protocol
- [4] Οδηγία 2002/91/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 16/12/2002 για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων.
- [5] Χατζηλάμπρος Π., Σύστημα ελέγχου οπτικής/θερμικής άνεσης και ποιότητας αέρα ζώνης κτηρίου με την χρήση PLC και του δικτύου KNX/EIB, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007.
- [6] D. Kolokotsa, A. Pouliezios, G. Stavrakakis, Sensor fault detection in building energy management systems. Proceedings, 5th International Conference on Technology and Automation ICTA '05, 15-16 October 2005, Salonica, Greece, pp. 282-287.
- [7] Ekman M., Modeling and Control of Bilinear Systems, Applications to the activated sludge process, Dissertation for PhD in automatic control, Uppsala University, 2005.
- [8] en.wikipedia.org/wiki/Indoor_air_quality
- [9] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 1992.
- [10] en.wikipedia.org/wiki/Humidity
- [11] U.S. Department of Labor, Standard Number: 1926.56 Safety and Health Regulations for Construction, Occupational Health and Environmental Controls, Illumination.