ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

# Μελέτη και κατασκευή σε μικρογραφία αυτόματης βιομηχανικής μετάγγισης και δοσομέτρησης υγρών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
Αλέξανδρου Παπαθανασίου

**Επιβλέπων:** Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

# Μελέτη και κατασκευή σε μικρογραφία αυτόματης βιομηχανικής μετάγγισης και δοσομέτρησης υγρών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
Αλέξανδρου Παπαθανασίου

Επιβλέπων: Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10η Οκτωβρίου 2024.

| | | |
|---|---|---|
| ..... | ..... | ..... |
| Γεώργιος Κορρές | Άρης Δημέας | Ιωάννης Γκόνος |
| Καθηγητής Ε.Μ.Π. | Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Αλέξανδρος Παπαθανασίου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλέξανδρος Παπαθανασίου

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή μιας μικρογραφίας βιομηχανικής διαδικασίας δοσομέτρησης και μετάγγισης υγρών, περιλαμβάνοντας όλο το φάσμα των μηχανολογικών, ηλεκτρολογικών, ηλεκτρονικών και δικτυακών πτυχών της. Ιδιαίτερη έμφαση, κατά τη θεωρητική προσέγγιση, δίνεται στην επέκταση της διασυνδεσιμότητας κατά τα πρότυπα του Industry 4.0 ώστε να αξιοποιούνται δεδομένα εκτός τυπικής ιεραρχίας αυτοματισμού PLC[1]-HMI[2]-SCADA[3].

Το τελικό παραδοτέο είναι μια φορητή διάταξη επίδειξης που φέρει ένα κλειστό κύκλωμα υγρού αντλούμενο από πνευματική πηγή ισχύος, με τους αισθητήρες/επενεργητές και τον πίνακα αυτοματισμού. Ο πίνακας πέρα από αυτοματισμό (PLC), οθόνη χειρισμού (HMI) και ένα τοπικό δίκτυο Modbus TCP/IP, παρέχει διασύνδεση με ενδεικτικά τμήματα ενός εργοστασίου πέραν της παραγωγής, όπως η συντήρηση, η αποθήκη και η μηχανογράφηση.

Η εργασία είναι διαρθρωμένη σε 6 κεφάλαια, ακολουθώντας τα στάδια ανάπτυξης της διεργασίας. Σε καθένα παρουσιάζεται θεωρητικά το αντίστοιχο σκέλος που έπειτα εξειδικεύεται στην προκείμενη κατασκευή.

Το πρώτο κεφάλαιο αφορά τη στοχοθεσία και τις προδιαγραφές του ζητούμενου συστήματος.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά το μηχανολογικό σκέλος. Παρουσιάζεται ο αέρας ως πηγή ισχύος (πνευματικό σύστημα), τα στοιχεία που απαρτίζουν το κύκλωμα της μετάγγισης-δοσομέτρησης (υδραυλικό σύστημα) και τελικά το πνευματικό και το υδραυλικό σχέδιο της διάταξης.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά το ηλεκτρολογικό σκέλος. Παρουσιάζονται τα στοιχεία των κυκλωμάτων ισχύος και σηματοδοσίας (κλασικοί αυτοματισμοί), το κανονιστικό πλαίσιο που τα διέπει και τελικά το ηλεκτρολογικό σχέδιο της διάταξης.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά τον βιομηχανικό αυτοματισμό. Καλύπτει τον έλεγχο του μηχανήματος με PLC και τη διεπαφή (interface) του χειριστή μηχανήματος με HMI. Παρατίθενται ο κώδικας των προγραμμάτων του PLC και του HMI της διάταξης.

Το πέμπτο κεφάλαιο εστιάζει στις επικοινωνίες συσκευών και μηχανημάτων ενός εργοστασίου. Χωρίζεται, αφενός, στην παρουσίαση των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται, αφετέρου στην αρχιτεκτονική διασύνδεσης του βιομηχανικού ελέγχου με τα υπόλοιπα εταιρικά συστήματα. Καταλήγει στη δικτύωση της διάταξης αλλά και στην πρόταση αρχιτεκτονικής διασύνδεσης.

Το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζει την ολοκληρωμένη διάταξη μαζί συμπεράσματα από τη λειτουργία της και προτάσεις βελτίωσης.



# Λέξεις κλειδιά

Δοσομέτρηση, Βιομηχανικός αυτοματισμός, PLC, HMI, SCADA, Modbus, MQTT, IIoT


[1] Προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (Programmable logic controller)
[2] Human machine interface
[3] Supervisory control and data acquisition

## Abstract

The purpose of the thesis is to design and construct a demonstration of an industrial fluid dosing and transfer process, encompassing the whole range of its mechanical, electrical, electronic, and networking aspects. Emphasis is placed on the process's interoperability per the Industry 4.0 trends to provide process data beyond the automation pyramid of PLC-HMI-SCADA.

The deliverable is a portable demo frame carrying a closed loop of water that is pumped by a pneumatic source, along with the sensors, actuators and control panel for the automation. The control panel contains the equipment for the process automation (PLC), operator's interface (HMI) and a local Modbus TCP/IP network; it also supports connectivity with plant departments besides the production, such as the maintenance, the warehouse and management.

The thesis is arranged in 6 chapters that follow the process design. In each chapter, the theoretical background is presented and is then applied to the process implementation.

The first chapter concerns the specifications and planning of the system.

The second chapter concerns the mechanical part. It presents the pneumatic and hydraulic components, followed by the process's drawings.

The third chapter concerns the electrical part. It presents the elements of the power and signaling circuits (classic automation), the regulatory framework that governs them, and finally, the schematics of the process.

The fourth chapter deals with industrial automation. It covers machine control with PLC and machine operator interface with HMI. The code of the process's PLC and HMI programs is listed.

The fifth chapter focuses on the communications of a factory's devices and machines. It is divided into two parts: first, a presentation of the protocols used, and then, the interconnection architecture of industrial control with the rest of the corporate IT systems. It concludes with the networking of the process along with a proposal of an architectural interconnection where the process's data are utilized.

The sixth chapter presents the complete process demo, remarks from its operations, and suggestions for improvement.



## Keywords

Dosing process, Industrial automation, PLC, HMI, SCADA, Modbus, MQTT, IIoT

## Ευχαριστίες

Θα ήθελε να ευχαριστήσω τον καθηγητή Γεώργιο Κορρέ που με εμπιστεύθηκε με την ανάθεση της παρούσας εργασίας και μου παρείχε τη δυνατότητα να μελετήσω ένα θέμα που με ενδιαφέρει ιδιαίτερα.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου, και ιδιαίτερα προς τον πατέρα και τον θείο μου, που είναι πάντα δίπλα μου.

# Περιεχόμενα

Περίληψη ..... 5
Abstract ..... 6
Περιεχόμενα ..... 8
Λίστα εικόνων ..... 10
Λίστα πινάκων ..... 12
1. Στοχοθεσία και προδιαγραφές ..... 13
2. Πνευματικά - υδραυλικά ..... 15
2.1. Ο αέρας ως ισχύς ..... 16
2.2. Αντλίες ..... 17
2.2.1. Διαφραγματική αντλία ..... 18
2.2.1.1. Η αντλία της διάταξης ..... 20
2.3. Ροόμετρα ..... 21
2.3.1. Ροόμετρο της διάταξης ..... 23
2.4. Βαλβίδες ..... 24
2.5. Υδραυλικά διαγράμματα ..... 26
2.6. Σχέδιο της διάταξης ..... 27
3. Ηλεκτρολογικά ..... 30
3.1. Ρελέ ..... 30
3.2. Ασφάλειες - μικροαυτόματοι ..... 31
3.3. Προστασία ..... 32
3.4. Κανονισμοί ..... 33
3.5. Σχέδιο της διάταξης ..... 34
4. Αυτοματισμοί ..... 39
4.1. PLC ..... 39
4.1.1. Ορισμός ..... 39
4.1.2. Συγκρίσιμες τεχνολογίες ..... 39
4.1.3. Δομή ..... 40
4.1.3.1. CPU ..... 40
4.1.3.2. I/O - Ψηφιακά ..... 41
4.1.3.3. IO - Αναλογικά ..... 43
4.1.4. Μοντέλο της διάταξης ..... 45
4.1.5. Μεταβλητες (tags) PLC της διάταξης ..... 47
4.1.6. Πρόγραμμα PLC ..... 50
4.1.6.1. Main ..... 50
4.1.6.2. LVL ..... 51
4.1.6.3. M1-MANUAL ..... 54
4.1.6.4. M2-DOSE ..... 54
4.1.6.5. M3-FILL ..... 55
4.1.6.6. FLMTR_BUFFER ..... 55
4.2. HMI ..... 57
4.2.1. Γενικά ..... 57
4.2.2. Μοντέλο της διάταξης ..... 57
4.2.3. Μεταβλητές (tags) HMI της διάταξης ..... 59
4.2.4. Προβολές και μακροεντολές διάταξης ..... 60
4.2.4.1. Βασική προβολή- υπόβαθρο ..... 62
4.2.4.2. Ρυθμίσεις δικτύου ..... 63
4.2.4.3. Ρυθμίσεις συστήματος ..... 63
4.2.4.4. Γράφημα -δειγματοληψία στάθμης ..... 64

4.2.4.5. Γράφημα ροής ..... 64
4.2.4.6. Λειτουργία full manual ..... 67
4.2.4.7. Λειτουργία semi manual ..... 68
4.2.4.8. Λειτουργία δοσομέτρησης ..... 68
4.2.4.9. Λειτουργία πλήρωσης ..... 70
4.2.4.10. Μήνυμα προειδοποίησης ..... 70
5. Επικοινωνίες ..... 71
5.1. Πρωτόκολλα ..... 71
5.1.1. RS232 και RS485 ..... 71
5.1.2. Στοίβα TCP/IP ..... 72
5.1.3. Modbus ..... 73
5.1.4. OPC ..... 75
5.1.5. MQTT ..... 77
5.1.6 Δίκτυο της διάταξης ..... 79
5.1.6.1 Gateway ..... 80
5.2. Διασυνδεσιμότητα ..... 82
5.2.1. Καθιερωμένο: SCADA ..... 82
5.2.1.1. Πυραμίδα αυτοματισμού ..... 85
5.2.2. Τάση: Industry 4.0 και IIoT ..... 86
5.2.3. Πρόταση: Data hub ..... 88
5.2.3.1. MQTT topics της διάταξης ..... 89
5.2.3.2. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική ..... 90
6. Συμπεράσματα και προτάσεις ..... 93
6.1 Συμπεράσματα ..... 93
6.2 Προτάσεις ..... 95
Βιβλιογραφία ..... 97

# Λίστα εικόνων

1.1 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος 13
2.1 Σύγκριση ισχύος/βάρος των ηλεκτρικών και των υδραυλικών κινητήρων 17
2.2 Σύγκριση τύπων αντλίας 18
2.3 Τομή διαφραγματικής αντλίας 18
2.4 Φάσεις λειτουργίας διαφραγματικής αντλίας 19
2.5 Κυκλωματικό ανάλογο διαφραγματικής αντλίας 19
2.6 Ροή αέρα εντός του πνευματικού κινητήρα 20
2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη αντλίας της διάταξης 21
2.8 Στιγμιότυπο ροομέτρου Coriolis, σε τομή 22
2.9 Στιγμιότυπα κυματομορφών από διάταξη Coriolis 23
2.10 Διάγραμμα λειτουργίας και κυματομορφή ροομέτρου διάταξης 24
3.1 Γήρανση επαφών ρελέ σε γραμμή επαγωγικού φορτίου λόγω αιχμών τάσης 31
3.2 Διάκριση των μέσων προστασίας από ηλεκτροπληξία 33
3.3 Συσχέτιση των κανονιστικών προτύπων μεταξύ των φορέων τυποποίησης 33
3.4 Όρια πεδίου εφαρμογής των κανονισμών πινάκων χαμηλής τάσης (EN 61439) και πινάκων ως μέρος μηχανημάτων (EN 60204) 34
4.1 Διάρθρωση ενός PLC 40
4.2 Κύκλος σάρωσης 41
4.3 Απλοποιημένο κύκλωμα εισόδου AC δυαδικού σήματος 42
4.4 Πλευρά μεταδότη 4-20mA αισθητήρα 44
4.5 Πλευρά εισόδου 4-20mA PLC 44
4.6 Βασική προβολή - υπόβαθρο της διάταξης 62
4.7 Προβολή ρυθμίσεων δικτύου της διάταξης 63
4.8 Προβολή παραμέτρων συστήματος της διάταξης 63
4.9 Προβολή γραφήματος στάθμης της διάταξης 64
4.10 Προβολή γραφήματος ροής της διάταξης 65
4.11 Προβολή full manual της διάταξη 67
4.12 Προβολή semi manual της διάταξης 68
4.13 Προβολή δοσομέτρησης της διάταξης 68
4.14 Προβολή πλήρωσης της διάταξης 70
4.15 Προβολή σφάλματος της διάταξης 70
5.1 Η έννοια της ενθυλάκωσης και η ροή πληροφορίας στη στοίβα TCP/IP 72
5.2 Πεδίο εφαρμογής των Modbus RTU και TCP σε μια βιομηχανική εγκατάσταση [ 73
5.3 Ανταλλαγή μηνυμάτων Modbus, επιτυχής και ανεπιτυχής 74
5.4 Συσχέτιση χάρτη μνήμης πρωτοκόλλου με τη μνήμη της συσκευής 74
5.5 Πεδίο εφαρμογή του OPC σε μια βιομηχανική εγκατάσταση 75
5.6 Σχήμα επικοινωνίας OPC DA 76
5.7 Ανταλλαγή μηνυμάτων OPC DA 76
5.8 Παράδειγμα ανταλλαγής μηνυμάτων MQTT 78
5.9 Υποδομή MQTT Sparkplug για τη διάρθρωση SCADA 79
5.10 Μετατροπή Modbus RTU σε Modbus TCP/IP στο gateway 80
5.11 Δομή βιομηχανικού δικτύου, χωρισμένο σε 3 ζώνες 83
5.12 Άποψη του δικτύου ελέγχου ως προς τις SCADA λειτουργίες, μοναδικός server 84
5.13 Άποψη του δικτύου ελέγχου ως προς τις SCADA λειτουργίες, καταμερισμός των server 84
5.14 Συνδέσεις οντοτήτων εντός SCADA για την εκτέλεση αιτήματος προβολής από HMI 84

5.15 Η πυραμίδα του αυτοματισμού 85
5.16 Μετάβαση από την πυραμίδα αυτοματισμού σε αδιαμεσολάβητη επικοινωνία 86
5.17 Ροή πληροφορίας και ενεργειών για μια απλή αντικατάσταση βαλβίδας 87
5.18 Ιεραρχικό μοντέλο ISA95 για την περιγραφή του εξοπλισμού 89
6.1 Η τελική διάταξη 94
6.2 Η τελική διάταξη (εστιασμένη) 95
6.3 Ο πίνακας αυτοματισμού της διάταξης 95

# Λίστα πινάκων

1.1 Σύγκριση πνευματικών, υδραυλικών και ηλεκτρικών συστημάτων 16
1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας 20
3.1 Τα πρότυπα με εφαρμογή στη σχεδίαση ενός πίνακα αυτοματισμού 34
4.1 Προκαθορισμένη διάρθρωση περιοχών μνήμης του CLICK 46
4.2 Χάρτης μνήμης προγράμματος PLC της διάταξης 47
4.3 Χάρτης μνήμης προγράμματος HMI της διάταξης 60

# 1. Στοχοθεσία και προδιαγραφές

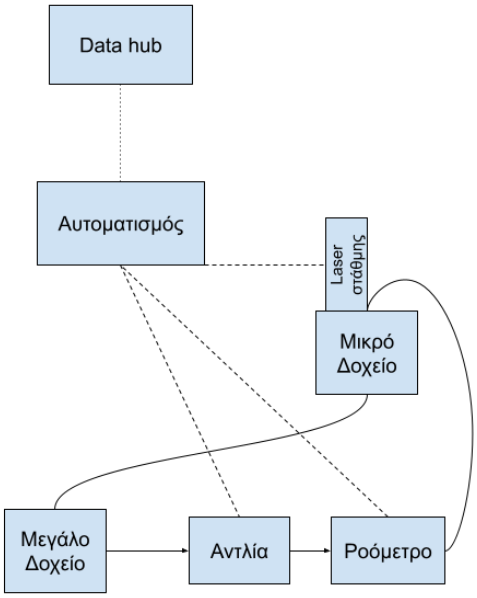
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή μιας μικρογραφίας βιομηχανικής διαδικασίας, που θα περιλαμβάνει όλο το φάσμα των μηχανολογικών, ηλεκτρολογικών, ηλεκτρονικών και δικτυακών πτυχών της. Ιδιαίτερη έμφαση κατά τη θεωρητική προσέγγιση δίνεται στην επέκταση της διασυνδεσιμότητας κατά τα πρότυπα του Industry 4.0 ώστε να αξιοποιούνται δεδομένα εκτός τυπικής ιεραρχίας αυτοματισμού PLC-HMI-SCADA.

Τα κριτήρια που καθοδηγούν την εργασία, από τον σκοπό, στη σχεδίαση μέχρι και την υλοποίηση είναι δύο: ο ρεαλισμός και η φορητότητα. Ρεαλισμός, για να εξεταστούν στην πληρότητά τους όλα τα τεχνικά θέματα μιας διεργασίας. Αλλά και για να αναδειχθούν όλα τα προβλήματα που πρέπει να λάβει υπόψη ένας αυτοματισμός που δε φαίνονται στο χαρτί ή σε μια προσομοίωση. Η δε φορητότητα ώστε να μπορεί να επιδειχθεί σε αίθουσα.

Επιλέχθηκε ως μοντέλο βιομηχανικής διεργασίας η δοσομέτρηση και μετάγγιση υγρού επειδή είναι πολύ συνηθισμένη εφαρμογή. Απαντάται σε βιομηχανίες τροφίμων, ποτών, φαρμάκων, καλλυντικών, χημικές βιομηχανίες και βιομηχανίες χρωμάτων. Επίσης έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε κλειστό κύκλωμα πάνω σε ένα φορητό σκελετό, όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω. Άρα είναι κατάλληλη για μεταφορά από πάγκο εργαστηρίου σε αίθουσα και η επίδειξη μπορεί να επαναληφθεί αυτόματα, χωρίς επιτόπιες παρεμβάσεις. Τέλος, καλύπτει και τον παράγοντα ασφάλειας κατά την επίδειξη, καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα μηχανικά μέρη ή θερμές επιφάνειες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τραυματισμό.

Για να εξυπηρετείται η φορητότητα της διάταξης από το εργαστήριο σε αίθουσα για επίδειξη, επιλέχθηκε ένας ανοιχτός, ελαφρύς μεταλλικός σκελετός περίπου 1,5×1×0.5m που μπορεί να τοποθετηθεί πάνω σε τραπέζι και μεταφέρεται από δύο άτομα. Στη μία του πλευρά υπάρχει φύλλο διάτρητης λαμαρίνας 1,5×1m με πάνω του στερεωμένος όλος ο εξοπλισμός πλην του αεροσυμπιεστή

Στην καρδιά της διάταξης είναι η αντλία που μεταφέρει υγρό από ένα δοχείο σε ένα άλλο. Στη μεταφορά παρεμβάλλεται ένα ροόμετρο. Μόλις μετρηθεί η επιθυμητή ποσότητα, διακόπτεται η άντληση. Η αντλία λειτουργεί με αέρα ώστε να μην υπάρχει το βάρος του ηλεκτροκινητήρα και να πιάνει λίγο χώρο πάνω στην πλάτη του σκελετού. Σημειώνεται ότι οι διαφραγματικές αντλίες είναι πολύ συνηθισμένες στη μεταφορά κάθε είδους υγρών.



Σχήμα 1.1 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος

Η άντληση γίνεται από ένα μεγαλύτερο δοχείο σε ένα μικρότερο, λίγων λίτρων το καθένα για οικονομία βάρους αλλά και να μπορεί να έχει κάποια διάρκεια η διαδικασία ώστε να γίνεται ταυτόχρονα ο σχολιασμός της. Για να μπορεί να επαναλαμβάνεται η διαδικασία όσες φορές απαιτηθεί, το

μικρότερο δοχείο είναι τοποθετημένο ψηλότερα και με έναν σωλήνα στη βάση του και μια βαλβίδα επιτυγχάνεται η αποστράγγιση πίσω στο μεγαλύτερο δοχείο με ελεύθερη ροή.

Τα όργανα μέτρησης είναι το ροόμετρο και ένας αισθητήρα στάθμης στο μικρό δοχείο. Ο αισθητήρας στάθμης συμπληρώνει το ροόμετρο, για ασφάλεια και ρύθμιση. Τα όργανα ελέγχου είναι οι βαλβίδες που ανοιγοκλείνουν τη ροή της αντλίας και η βαλβίδα αποστράγγισης. Όλα τα όργανα είναι βιομηχανικής χρήσης. Ενδεικτικά, στην επιλογή υλικού θα προτιμηθεί τροφοδοσία 24V DC όπως στις βιομηχανίες έναντι των 3.3V του μοντελισμού. Ή πρωτόκολλο Modbus έναντι σύνδεσης με webservice.

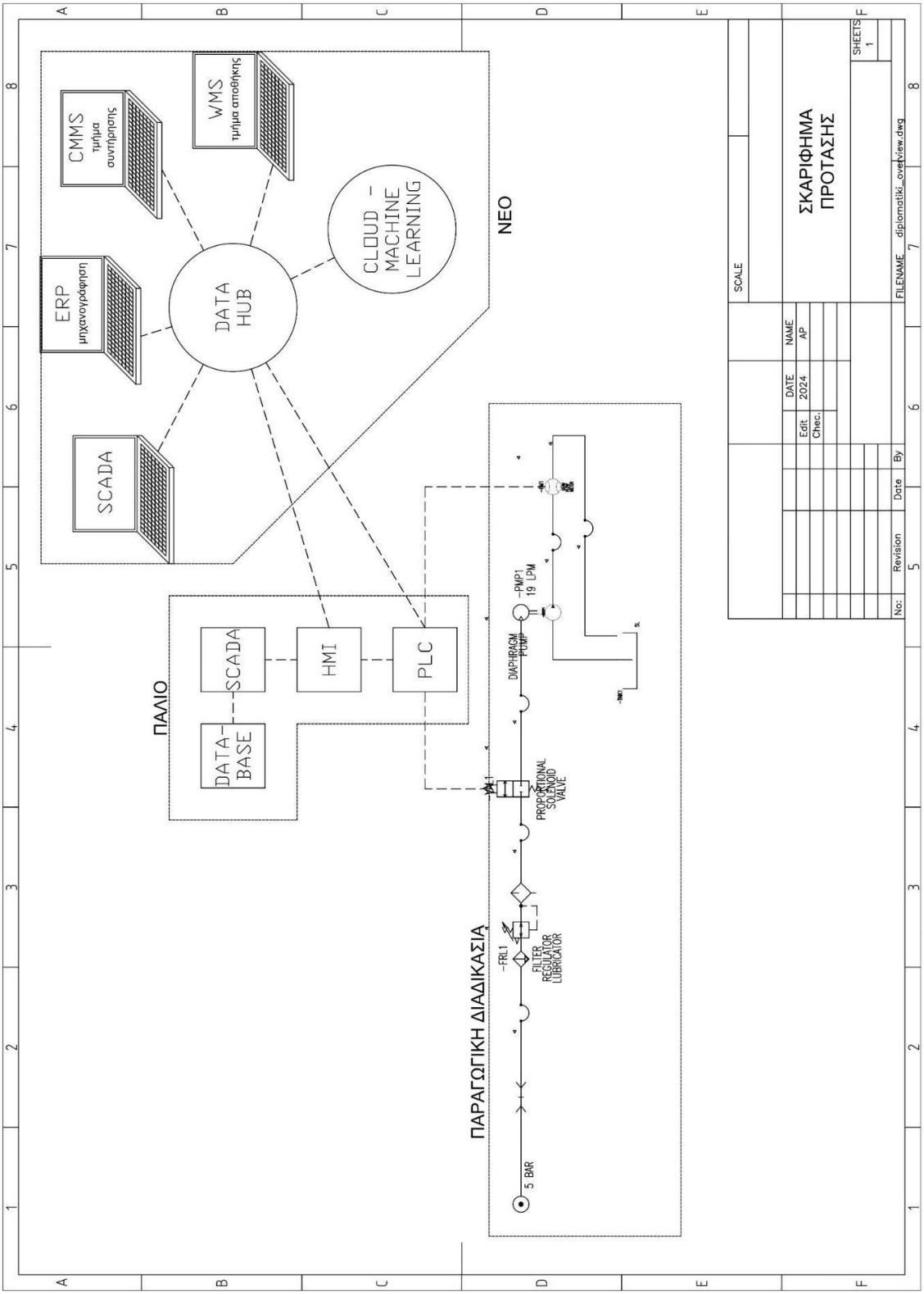
Για την αυτοματοποίηση της διεργασίας προβλέπεται ηλεκτρολογικός πίνακας με PLC και οθόνη (HMI) για τοπική εποπτεία και παραμετροποίηση. Ο πίνακας τροφοδοτεί τα υλικά της διάταξης σύμφωνα με το κανονιστικό πλαίσιο και τα υλικά επιλέγονται κατά τις βέλτιστες πρακτικές. Με το PLC σχηματίζεται βρόχος ανάδρασης μεταξύ αντλίας και ροομέτρου ή αντλίας και αισθητήρα στάθμης, βάσει επιλογής κατά τη χρήση. Ο έλεγχος είναι τύπου on-off και ενσωματώνει συναγερμούς (alarms), εάν το σύστημα λειτουργήσει εκτός προδιαγραφών. Στην οθόνη υπάρχει γραφικό επιστασίας της διάταξης, με υπολογισμό μετρήσεων επί της διεργασίας και δυνατότητα ορισμού των παραμέτρων λειτουργίας. Τα στοιχεία αυτοματισμού συνδέονται μεταξύ τους είτε με σήματα on-off είτε μέσω πρωτοκόλλου Modbus.

Η διασύνδεση της διάταξης με λογισμικό που δεν αφορά την παραγωγή (PLC-HMI-SCADA) επιτυγχάνεται κοινοποιώντας δεδομένα μέσω πρωτοκόλλου MQTT[4]. Παραλήπτης είναι ο MQTT broker (κόμβος κοινοποίησης μηνυμάτων), που για τις ανάγκες της επίδειξης βρίσκεται εγκατεστημένος σε φορητό υπολογιστή (laptop) στο ίδιο δίκτυο LAN με τον αυτοματισμό. Σε αυτόν μπορούν να ανατρέξουν συστήματα που αφορούν άλλα τμήματα ενός εργοστασίου, όπως τα τμήματα συντήρησης, αποθήκης, οικονομικές υπηρεσίες, διοίκηση. Ενδεικτικά, σκιαγραφούνται στο διάγραμμα της επόμενης σελίδας. Ο λόγος που επιλέχθηκε το MQTT ως πρωτόκολλο επικοινωνίας αναλύεται στο κεφάλαιο 5.

Τα MQTT topics (που αποτελούν τον τρόπο οργάνωσης των διακινούμενων δεδομένων στο πρωτόκολλο MQTT) σχηματίστηκαν από τις πρωτογενείς ροές δεδομένων της διάταξης, όπου αυτό ήταν εφικτό. Περιλαμβάνουν τις μετρήσεις των αισθητηρίων και τις καταστάσεις των εξόδων, αλλά και τον τρόπο λειτουργίας του μηχανήματος όπως αυτό επιλέγεται από το χειριστή και επιτηρείται από το PLC. Η ονοματολογία και ιεράρχηση των topics ακολουθεί τις οδηγίες του προτύπου ISA 95[5].

Μαζί με την παραδοτέα διάταξη, σκιαγραφείται μια αρχιτεκτονική διασύνδεσης, σύμφωνη με τις τάσεις του Industry 4.0, όπως εξειδικεύονται μερικώς στο πρότυπο RAMI 4.0[6]. Σε αυτή, περιγράφεται η συνεργασία ανεξάρτητων οντοτήτων που σχηματίζουν μια αλυσίδα και διυλίζουν τα δεδομένα που παράγει η διάταξη, ως ένα ενδεικτικό πλαίσιο όπου μπορεί να αξιοποιηθεί η υλοποίηση της παρούσας εργασίας Το πλαίσιο αυτό δεν είναι αυθαίρετη επιλογή του γράφοντος, αλλά ακολουθεί τρέχοντα πρότυπα από τη βιβλιογραφία.

[4] Message Queuing Telemetry Transport
[5] ANSI/ISA-95, Enterprise-Control System Integration
[6] Reference Architectural Model Industrie 4.0




Σχέδιο της διάταξης προς υλοποίηση και της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής (στάδιο στοχοθεσίας)

# 2. Πνευματικά - υδραυλικά

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μηχανολογικού τμήματος της κατασκευής. Η παρουσίαση είναι σε βαθμό επισκόπησης, όχι εξαντλητική, και γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης των εννοιών από ηλεκτρολογική σκοπιά.

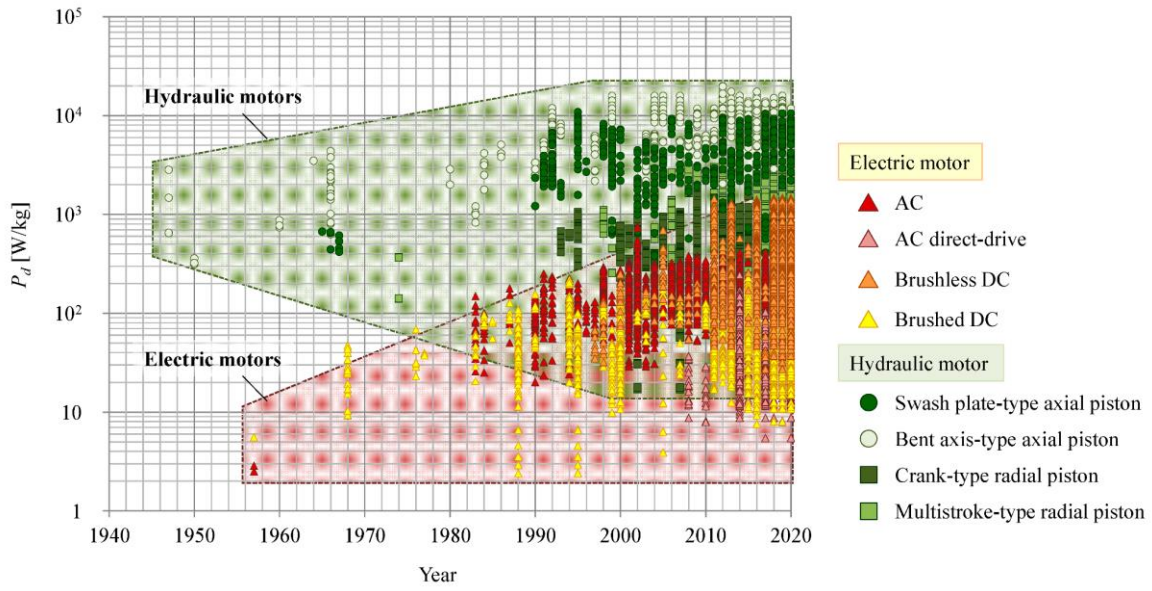
## 2.1. Ο αέρας ως ισχύς

Στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις η τελική πηγή ισχύος δεν είναι πάντα ο ηλεκτρισμός (ηλεκτρικά συστήματα), αλλά πολύ συχνά και ο συμπιεσμένος αέρας (πνευματικά συστήματα) και τα υγρά υπό πίεση (υδραυλικά συστήματα). Οι αεροσυμπιεστές (κομπρεσέρ) βέβαια κινούνται από ηλεκτροκινητήρες, αλλά υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που προτιμάται τα εξαρτήματα των μηχανημάτων ή τα εργαλεία χειρός να μην λειτουργούν απευθείας με ηλεκτρικό ρεύμα. Μια επιγραμματική, αν και κυρίως εμπειρική, σύγκριση των ηλεκτρικών, πνευματικών και υδραυλικών συστημάτων παρατίθεται στον πίνακα:

| | **Πνευματικά** | **Υδραυλικά** | **Ηλεκτρικά** |
|---|---|---|---|
| **Συνθετότητα** | Απλά | Μέτρια | Μέτρια/υψηλή |
| **Ισχύς** | Υψηλή | Πολύ υψηλή | Υψηλή |
| **Όγκος(1)** | Μικρός | Πολύ μικρός | Μέτριος |
| **Έλεγχος** | Απλές βαλβίδες | Απλές βαλβίδες | Ηλεκτρονικά |
| **Ακρίβεια θέσης** | Καλή | Καλή | Καλύτερη |
| **Ταχύτητα** | Γρήγορα | Αργά | Γρήγορα |
| **Κόστος αγοράς** | Χαμηλό | Υψηλό | Υψηλό |
| **Κόστος λειτουργίας** | Μέτριο | Υψηλό | Χαμηλό |
| **Κόστος συντήρησης** | Χαμηλό | Υψηλό | Χαμηλό |
| **Πηγή** | Απαιτεί κομπρεσέρ | Απαιτεί κομπρεσέρ | Άμεσα από το δίκτυο |
| **Αποδοτικότητα** | Χαμηλή | Χαμηλή | Υψηλή |
| **Αξιοπιστία** | Εξαιρετική | Καλή | Καλή |
| **Συντήρηση** | Χαμηλή | Μέτρια | Μέτρια |

Πίνακας 1.1 Σύγκριση πνευματικών, υδραυλικών και ηλεκτρικών συστημάτων
Πηγή: https://library.automationdirect.com/pneumatics-for-mechanical-motion/

Ενδεικτικά, ως προς τον όγκο των κινητήρων, στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 1.1) φαίνεται ότι παρά τις εξελίξεις οι ηλεκτρικοί κινητήρες παραμένουν *τάξεις μεγέθους* μεγαλύτερα από τα υδραυλικά, για ίδια ισχύ. Η εικόνα είναι συγκρίσιμη και μεταξύ πνευματικών και ηλεκτρικών συστημάτων.




Εικόνα 2.1 Σύγκριση ισχύος/βάρους των ηλεκτρικών και των υδραυλικών κινητήρων
Πηγή: Sakama, S.; Tanaka, Y.; Kamimura, A. Characteristics of Hydraulic and Electric Servo Motors. *Actuators* **2022**, *11*, 11. https://doi.org/10.3390/act11010011

Παρά το πολύ υψηλό κόστος λειτουργίας των ενεργοβόρων πνευματικών συστημάτων, αυτά παραμένουν ιδιαίτερα δημοφιλή στη βιομηχανία σε τομείς όπως η άντληση και η μεταφορά ρευστών λόγω της απλότητας σχεδιασμού, ευκολίας στη χρήση και καταλληλόλητας για ATEX[7] περιοχές (χώροι με δυνητικά εκρηκτικές ατμόσφαιρες).

Άλλα πλεονεκτήματά τους είναι η ευκολία στη συντήρηση χωρίς να χρειάζεται αδειούχος ηλεκτρολόγος, ότι δεν υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας από κακή χρήση, ότι δεν υπάρχει κίνδυνος φωτιάς σε διαρροή όπως στα υδραυλικά και ότι καταπονούνται λιγότερο ελλείψει κρουστικών χάρη στη συμπιεστότητα του αέρα.

Από την άλλη, σημαντικός παράγοντας που σήμερα συρρικνώνει το περιθώριο χρήσης των πνευματικών κινητήρων (πέραν των εργαλείων χειρός) είναι το ενεργειακό κόστος, καθώς ένα πνευματικό δίκτυο έχει μη αμελητέες διαρροές αέρα.

## 2.2. Αντλίες

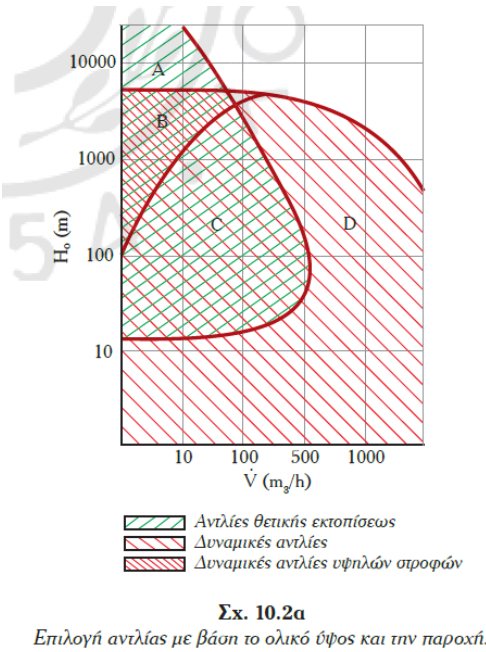
Δύο είναι τα είδη αντλιών βάσει αρχής λειτουργίας: οι θετικής εκτόπισης και οι δυναμικές.

Στις πρώτες, το ρευστό από την αναρρόφηση (είσοδος) παγιδεύεται σε έναν οριοθετημένο χώρο και απελευθερώνεται στην κατάθλιψη (έξοδος). Το απλούστερο παράδειγμα είναι ο κοχλίας του Αρχιμήδη, όπου το νερό παγιδεύεται στην περιφέρεια του κοχλία σε όγκο που ορίζεται από την κλίση του κοχλία και τις διαστάσεις του. Αν μάλιστα, ο χώρος παγίδευσης συστέλλεται, τότε επιτυγχάνεται αύξηση πίεσης.

[7] ATmosphère EXplosive, ευρωπαϊκές οδηγίες για την αντιεκρηκτική προστασία

Κυκλωματικά, οι αντλίες θετικής εκτόπισης είναι το μηχανικό ανάλογο της πηγής ρεύματος επειδή προκαλούν ορισμένη ροή ανεξαρτήτως πίεσης. Συνάγεται ότι αν εμποδιστεί η κατάθλιψη, θα προκύψει αιχμή πίεσης μέχρις είτε τα όρια αντοχής του κινητήρα της αντλίας είτε τη διάτρηση εξαρτήματος. Ομοίως αν ανοιχτοκυκλώναμε πηγή ρεύματος, λογίζοντας μια χωρητικότητα στην έξοδό της, θα προέκυπτε αιχμή τάσης.

Στις δυναμικές αντλίες, το ρευστό από την αναρρόφηση επιταχύνεται προς την κατάθλιψη. Το πλέον διαδεδομένο παράδειγμα είναι οι φυγοκεντρικές αντλίες, όπου η αναρρόφηση γίνεται στο κέντρο μιας πτερωτής που εξαναγκάζει το υγρό σε όλο και μεγαλύτερη ακτίνα περιστροφής μέχρι να εκτονωθεί στην κατάθλιψη. Εδώ το υγρό δεν δεσμεύεται, υπάρχει πάντα ελεύθερη διαδρομή μεταξύ αναρρόφησης και κατάθλιψης, και η πίεση προκύπτει υδροδυναμικά.



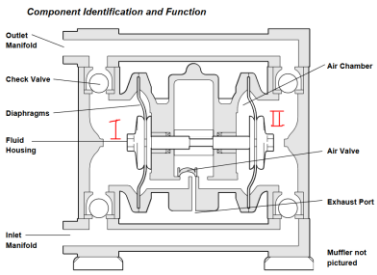

Εικόνα 2.2 Σύγκριση τύπων αντλίας[1]

### 2.2.1. Διαφραγματική αντλία

Οι διαφραγματικές αντλίες είναι θετικής εκτόπισης με βασικό στοιχείο τους το ελαστικό διάφραγμα απ' όπου παίρνουν το όνομά τους.

Σε αυτές, οριοθετείται θάλαμος εν μέρει από σταθερά άκαμπτα τοιχώματα και εν μέρει από ελαστικό υλικό, που είναι το διάφραγμα. Ο θάλαμος συνδέεται με την αναρρόφηση μέσω αντεπίστροφου που επιτρέπει μόνο εισροή και με την κατάθλιψη μέσω ανεπίστροφου που επιτρέπει μόνο εκροή. Το αντεπίστροφο είναι το υδραυλικό ανάλογο της διόδου στα ηλεκτρονικά.

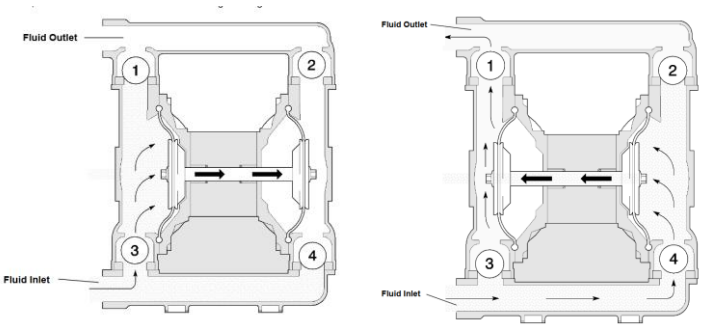
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα όρια του ελαστικού θαλάμου σε πλήρη διαστολή (I) και σε πλήρη συστολή (II).




Εικόνα 2.3 Τομή διαφραγματικής αντλίας [2]

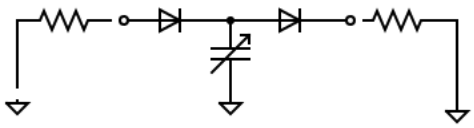
Χάρη σε ένα μηχανισμό παλινδρόμησης, συνδεδεμένο με το διάφραγμα, αυτό πάλλεται και αντίστοιχα ο θάλαμος συστέλλεται και διαστέλλεται εναλλάξ. Ορίζονται λοιπόν δύο φάσεις: διαστολής λόγω απομάκρυνσης του άξονα παλινδρόμησης και συστολής λόγω προσέγγισής του. Λόγω αντεπίστροφων, στη διαστολή εισρέει υγρό και στην συστολή εκρέει. Συνεπώς επιτυγχάνεται άντληση ορισμένης ποσότητας ανά παλινδρόμηση.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι δύο φάσεις της αντλίας.




Εικόνα 2.4 Φάσεις λειτουργίας διαφραγματικής αντλίας [2]

Μια κυκλωματική αναλογία του μηχανισμού άντλησης είναι η εξής:

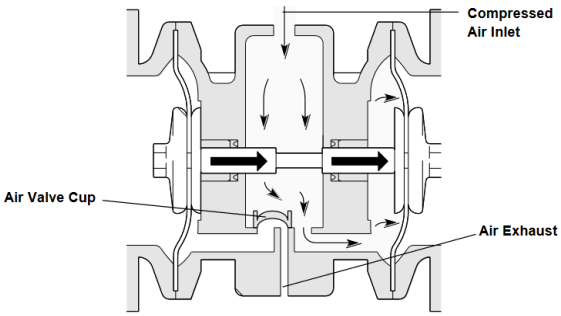


Εικόνα 2.5 Κυκλωματικό ανάλογο διαφραγματικής αντλίας

Οι αντιστάσεις αναπαριστούν τις σωληνώσεις αναρρόφησης και κατάθλιψης, ενώ η συστολή και διαστολή του θαλάμου αναπαρίσταται από έναν μεταβαλλόμενο πυκνωτή. Στη φάση διαστολής, η χωρητικότητα αυξάνεται, άρα τείνει να μειωθεί η τάση του κάτω από το δυναμικό αναφοράς (στο θάλαμο τείνει να δημιουργηθεί κενό), άρα άγει η αριστερή δίοδος και το φορτίο του πυκνωτή αυξάνεται. Όταν σταματήσει η αύξηση χωρητικότητας, το δυναμικό είναι σταθερό στο αναφοράς. Στη φάση συστολής, μειώνεται η χωρητικότητα, άρα τείνει να αυξηθεί η τάση, άρα άγει η δεξιά δίοδος και το φορτίο του πυκνωτή μειώνεται. Στο κύκλωμα η πηγή ενέργειας είναι κρυμμένη στη μεταβολή της χωρητικότητας, όπως και στην παραπάνω παρουσίαση του μηχανισμού άντλησης αποσιωπάται ο μηχανισμός παλινδρόμησης.

Ως προς τον κινητήρα, που κινεί τον άξονα, στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πνευματικός. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται σε έναν μηχανισμό μεταγωγής, που επιτρέπει ανά πάσα στιγμή μόνο ένα από τα δύο διαφράγματα να είναι υπό πίεση δικτύου. Ο μηχανισμός αυτός κάνει μεταγωγή του αέρα μόλις ένα διάφραγμα τερματίσει και ο θάλαμός του είναι σε πλήρη διαστολή. Μετά την αλλαγή, ένα διάφραγμα είναι υπό πίεση δικτύου και το άλλο υπό ατμοσφαιρική (ανάλογο της γείωσης, δυναμικό αναφοράς), άρα κινείται ο άξονας λόγω διαφοράς πίεσης.

Τα κανάλια του αέρα που ορίζουν τον πνευματικό κινητήρα φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Παραλείπεται ο μηχανισμός που εναλλάσσει θέση στην εικονιζόμενη αεροβαλβίδα (air valve cup) χάριν απλότητας.




Εικόνα 2.6 Ροή αέρα εντός του πνευματικού κινητήρα [2]

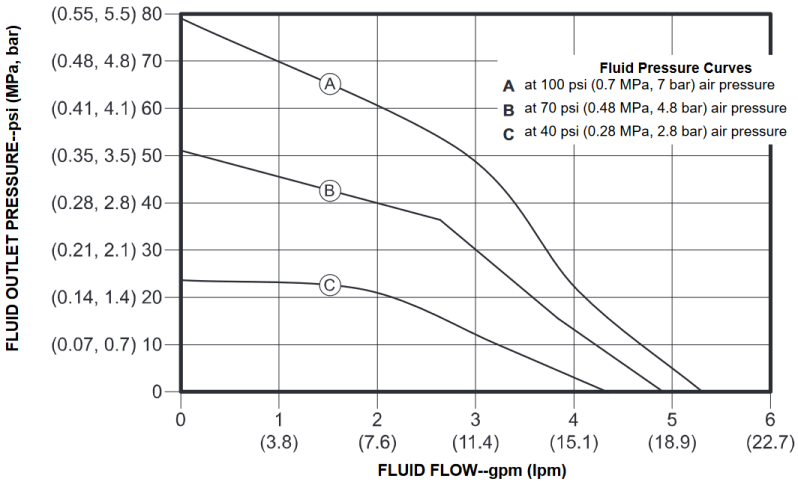
#### 2.2.1.1. Η αντλία της διάταξης

Στη διάταξη χρησιμοποιείται η πνευματική διαφραγματική αντλία Husky 205 κατασκευής Graco. Δεδομένου ότι το δοχείο το οποίο θα γεμίζει είναι ενός λίτρου, η παροχή της κρίνεται υπεραρκετή και θα περιοριστεί από το ρυθμιστή πίεσης και από ρυθμιζόμενη αντίσταση στη ροή του υγρού.

| | |
|---|---|
| Μέγιστη πίεση στην κατάθλιψη | 7 bar |
| Εύρος πίεσης δικτύου | 1,4-7 bar |
| Μέγιστη παροχή | 18.9 λίτρα ανά λεπτό |
| Συνδέσεις αέρα | 1/4 ίντσας |
| Συνδέσεις υγρού | 1/4 ίντσας |
| Υλικό σώματος | Πολυπροπυλένιο |
| Υλικό διαφραγμάτων | Τεφλόν (PTFE) |
| Βάρος | 900 γραμμάρια |
| Στάθμη θορύβου | 75.5dB στα 7bar |

Πίνακας 1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας της διάταξης

Το δε διάγραμμα επιδόσεων της αντλίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Για να επιτευχθεί σημείο λειτουργίας με χαμηλή ροή κυκλώματος, θα χρησιμοποιηθεί η καμπύλη C του διαγράμματος από το ρυθμιστή πίεσης και αυξηθεί η ρυθμιζόμενη αντίσταση της ροής στην κατάθλιψη για να αυξηθεί η πίεση εξόδου και να έχουμε ροή κάτω από 1gpm/3.8lpm.




Εικόνα 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη αντλίας της διάταξης

## 2.3. Ροόμετρα

Μια γενική κατάταξη των ροομέτρων ως προς την αρχή μέτρησης έχει ως εξής:

- Διαφορικής πίεσης

Αποτελείται από στένωση και μέτρηση της διαφοράς πίεσης στα άκρα της. Είναι το ανάλογο μέτρησης τάσης στα άκρα δοκιμαστικής αντίστασης για τον υπολογισμό του ρεύματος.

Παραλλαγές αυτού του τύπου είναι οι μετρητές στομίου εκροής, οι Venturi, τα ακροφυσίου και τα κυρτού σωλήνα. Οι διαφορές τους είναι στη μορφή της αντίστασης που εισάγεται, είτε ως οπή σαν κλείστρο φωτογραφικής, είτε ως προοδευτική στένωση-διεύρυνση, είτε ως εμβόλιμο ακροφύσιο ή ως απλή κύρτωση του σωλήνα.

- Θερμιδικό

Αποτελείται από 2 αισθητήρες θερμοκρασίας τοποθετημένους κάθετα στη ροή, μέσα στο σωλήνα.

Είναι ροόμετρο που κατ' αρχήν βασίζεται στη μέτρηση (ροής) μάζας. Αν είναι άγνωστες οι διαστάσεις του σωλήνα, δε μπορεί να διακριθεί αν η ροή και συνακόλουθα η προσφερόμενη ψύξη οφείλεται σε γρήγορη κίνηση μικρής διατομής ή σε αργή κίνηση μεγάλης διατομής.

- Περιδίνησης

Όπως το θερμιδικό, ένα εμπόδιο είναι βυθισμένο μέσα στη ροή του υγρού. Όμως το εμπόδιο έχει τέτοιο σχήμα, κακό υδροδυναμικά, που γεννά δίνες πίσω του που μπορούν να ανιχνευθούν από πιεζοηλεκτρικό στοιχείο εμβαπτισμένο στη ροή. Η συχνότητα των δινών στον ανιχνευτή από τις διαδοχικές ριπές περιδινήσεων είναι το μετρούμενο μέγεθος. Ακριβέστερα, οι δίνες σε ορισμένη ταχύτητα της φλέβας του υγρού ισαπέχουν, άρα το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μετρά διαταραχές σταθερής συχνότητας. Όσο αυξάνεται η ροή, οι δίνες είναι πυκνότερες άρα η μετρούμενη συχνότητα αυξάνεται.

Είναι κατ' αρχήν μέτρησης ταχύτητας. Η ταχύτητα πρόσκρουσης της φλέβας υγρού στο στόχο ορίζει τη συχνότητα δινών.

- Μαγνητικό

Εφαρμόζεται σε αγώγιμα υγρά και λειτουργεί βάσει του φαινομένου Hall. Γεννάται ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετο στη ροή και τα ελεύθερα ιόντα του υγρού διαχωρίζονται υπό δύναμη Lorentz οπότε προκύπτει τάση κάθετη στη ροή και στο μαγνητικό πεδίο, η οποία μετράται με ηλεκτρόδια.

Για παράδειγμα, το νερό αν περιέχει κάποιο αλάτι (πχ NaCl -> Na+ + Cl-) ή οξύ ή βάση (πχ NH3 + H2O -> OH- + NH4+) αποκτά ελεύθερα φορτία. Ακόμα και στο απεσταγμένο νερό, μια ελάχιστη τιμή αγωγιμότητας της τάξης των 0.1μS/cm αρκεί για να ανιχνευθεί τάση.

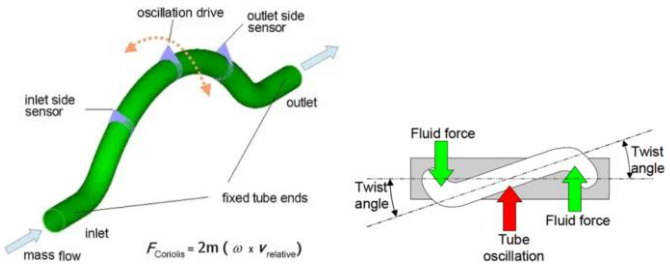
- Υπερήχων

Ένας πομπός υπερήχων σε γνωστή γωνία πρόσπτωσης στο σωλήνα παράγει κύμα που εισέρχεται στο υγρό, επιταχύνεται από αυτό και λαμβάνεται από τον δέκτη. Δηλαδή ενώ στο ακίνητο υγρό ταξιδεύει με c, στο υγρό που ρέει με ταχύτητα u υπό γωνία a ταξιδεύει με c+u×cosa. Άρα με την τυπική διαδικασία που χρονομετράται η διάρκεια της μετάδοσης, μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα του υγρού, δεδομένων του τύπου υγρού και της απόστασης πομπού-δέκτη.

- Coriolis

Αρχή του είναι ότι σε έναν κυρτό σωλήνα περιστρεφόμενο με ταχύτητα ω, εισρέει το υγρό με ταχύτητα u. Τότε με αναφορά το σωλήνα, ασκείται δύναμη Coriolis m×2×ω×u και ο σωλήνας από (υποτιθέμενο) ημικύκλιο με όλα του τα σημεία συνεπίπεδα, αποκτά σχήμα με στροφή εκτός του επιπέδου του (βλ. παρακάτω εικόνα 1.8).

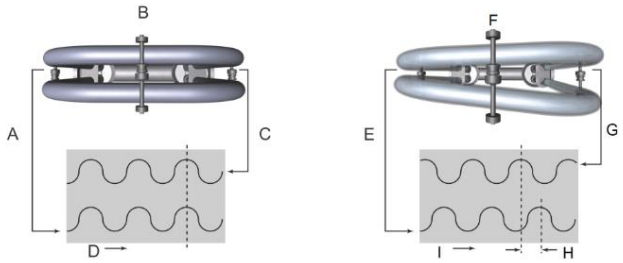
Στο σημείο στην κορφή της κυρτότητας δεν ασκείται δύναμη στρέψης επειδή η διεύθυνση της ροής και ο άξονας περιστροφής του σωλήνα ταυτίζονται. Τα σημεία πριν την κορυφή και αυτά μετά από αυτή έχουν διαφορετικό πρόσημο δύναμης Coriolis. Επίσης η διάταξη είναι συμμετρική. Άρα αν η ροή προκαλέσει υστέρηση κατά dx σε σημείο πριν την κορυφή, τότε προκαλεί προπορεία κατά dx στο συμμετρικό μετά την κορυφή. Με αναγωγή στην ω, τα dx αντιστοιχούν σε ορισμένη διαφορά φάσης.




Εικόνα 2.8 Στιγμιότυπο ροομέτρου Coriolis, σε τομή

Πηγή: https://instrumentationtools.com/coriolis-mass-flow-meter-working-principle/

Αν ειδικότερα η περιστροφή του σωλήνα είναι μια ταλάντωση, δηλαδή ω ~ sin2πft, και υπάρχουν 2 σωλήνες αντί για 1 σωλήνα με αντίθετη διέγερση ταλάντωσης για να μπορεί να μετρηθεί το dx με ακρίβεια, η διάταξη παράγει τις ακόλουθες κυματομορφές και η όλη μέτρηση ανάγεται σε μέτρηση διαφοράς φάσης.




Εικόνα 2.9 Στιγμιότυπα κυματομορφών από διάταξη Coriolis
Πηγή: Micro Motion™ ELITE™ Coriolis Flow and Density Meters, PS-00374, Rev AN March 2023, Emerson

- Τουρμπίνας (δυναμικό)
- Θετικής εκτόπισης

Και οι δύο αυτοί τύποι είναι το αντίστροφο των αντίστοιχων τύπων αντλιών. Αντί δηλαδή ο μηχανισμός άντλησης να εξαναγκάζεται σε κίνηση ώστε να κινηθεί το υγρό, το υγρό κινείται και εξαναγκάζει τον μηχανισμό άντλησης σε κίνηση που ανιχνεύεται από απλό μαγνητικό διακόπτη, στην απλούστερη περίπτωση.

- Μηχανικού πτερυγίου

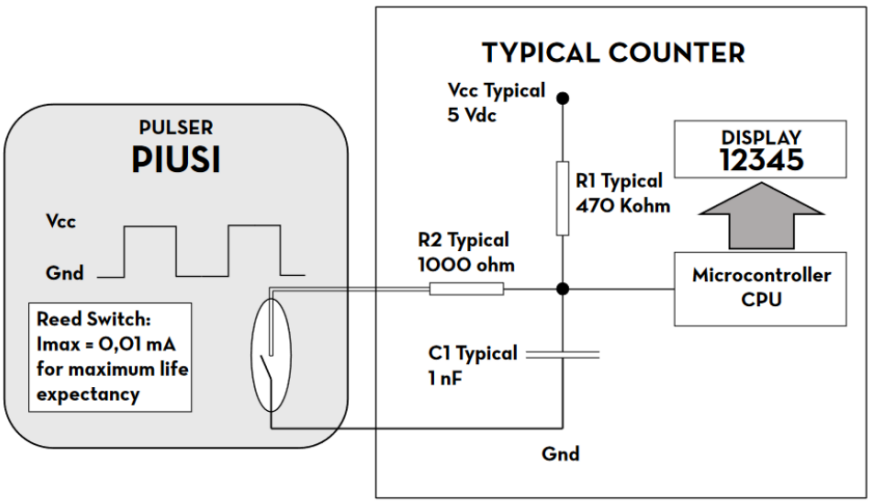
Ένα ελαφρύ πτερύγιο φράζει τη ροή. Όταν το υγρό ρέει, το ωθεί σε ανοιχτή θέση και η μεταβολή ανιχνεύεται από διακόπτη προσαρτημένο στο πτερύγιο.

- Πλωτήρα

Είναι τα απλούστερα ροόμετρα, συναντώνται πχ στην παροχή οξυγόνου σε νοσοκομεία. Είναι κατακόρυφα και η ροή ωθεί τον πλωτήρα σε υψηλότερη θέση μέσα στον κωνικό σωλήνα.

### 2.3.1. Ροόμετρο της διάταξης

Το ροόμετρο της διάταξης είναι τύπου θετικής εκτόπισης, της σειράς K200 της Piusi. Παρεμβάλει στη ροή 2 συμπλεκόμενα ελλειπτικά γρανάζια με ενσωματωμένο μαγνήτη. Αυτός ανοιγοκλείνει διακόπτη (reed switch) ανά μια περιστροφή των γραναζιών. Ο διακόπτης αυτός είναι συνδεδεμένος στην είσοδο του PLC και δίνει παλμοσειρά συχνότητας ανάλογη της ροής. Η μέγιστη συχνότητα είναι 65Hz, σε ροή 2,8 λίτρα ανά λεπτό. Η τάση είναι μέχρι 28V, το ρεύμα μέχρι 100mA (ακατάλληλο για ισχύ, μόνο σηματοδοσία) και η πίεση υψηλή, μέχρι 550bar ( κατάλληλο για εφαρμογές υδραυλικών λαδιών).



Duty Cycle: THigh / (THigh + TLow) %

| MODEL | FLOW RATE FIELD | | PULSER | | Frequency Signal Max | Square Wave Duty Cycle |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | l / min. | g / min | Pulse / liter (approxima-tely) | Pulse / Gal (approxima-tely) | | |
| K200 | 0,1 - 2,8 | 0,03 - 0,6 | 1400 | 5306 | 65 Hz | 20 - 80% |

The calibration of the instrument is made by means of the external receiver. The PULSER version must be connected by cables and respecting the following characteristics:
**Vmax: 28 V - Ac / Dc - Imax: 100 mA**

Σχήμα 2.10 Διάγραμμα λειτουργίας και κυματομορφή ροομέτρου διάταξης

## 2.4. Βαλβίδες

Η βαλβίδα είναι στοιχείο του υδραυλικού ή πνευματικού δικτύου που επενεργεί στη ροή χωρίς να είναι πηγή ισχύος. Ως προς τη λειτουργία τους, διακρίνονται μεταξύ άλλων σε ελέγχου πίεσης, ρύθμισης ροής, ελέγχου κατεύθυνσης και σε αντεπιστροφής.

Η πλέον απαραίτητη είναι η ανακουφιστική. Είναι βαλβίδα ελέγχου πίεσης, αποτελεί στοιχείο ασφαλείας του δικτύου και ορίζει τη μέγιστη πίεση πριν ανοίξει και εκτονώσει το δίκτυο προς κάποιο δοχείο ή προς το περιβάλλον. Διασφαλίζει ότι δε θα σπάσει εξάρτημα του δικτύου, πχ σωλήνας. Λειτουργεί ισορροπώντας την πίεση δικτύου με ρυθμιζόμενο κατά την εγκατάσταση ελατήριο. Όταν η πίεση του δικτύου υπερνικήσει το ελατήριο, τότε ανοίγει.

Άλλη βαλβίδα, τύπου ελέγχου πίεσης, είναι ο ρυθμιστής πίεσης. Ορίζει την πίεση στην οποία λειτουργεί μια διακλάδωση του δικτύου μετά τον αεροσυμπιεστή. Παρεμβάλλεται στη ροή της διακλάδωσης και χρησιμοποιεί αρνητική ανάδραση της πίεσης εξόδου ώστε να την κρατάει σταθερή.

Οι ανεπίστροφες βαλβίδες, όπως έχει προαναφερθεί, είναι το ανάλογο της διόδου στα ηλεκτρονικά.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους αυτοματισμούς παρουσιάζουν οι βαλβίδες διεύθυνσης. Επιτρέπουν την σύνδεση ή αποκοπή κλάδων του δικτύου. Στην ορολογία χρησιμοποιείται ένα κλάσμα για να χαρακτηριστεί μια βαλβίδα διεύθυνσης με τον αριθμητή να δείχνει πλήθος θυρών και τον παρονομαστή πλήθος καταστάσεων. Για παράδειγμα, μια βαλβίδα 4/2 είναι μια βαλβίδα δύο θέσεων που πάνω της συνδέονται 4 σωλήνες.

Είναι το αντίστοιχο μιας μήτρας μεταγωγής, όπως πχ στα ηλεκτρομηχανικά τηλεφωνικά κέντρα που λειτουργούσαν με ρελέ.

Ως προς την πηγή που διεγείρει μια βαλβίδα, αυτή μπορεί να είναι χειροκίνητη, υδραυλική, πνευματική ή ηλεκτρική. Ειδικότερα στην ηλεκτρική μπορεί να είτε ένα σωληνοειδές πηνίο που κινεί μαγνητικά ένα εμπόδιο που ανοιγοκλείνει την ροή, ή μπορεί να είναι ένας κανονικός κινητήρας.

Όταν η παροχή του ρευστού ή η πίεσή του είναι υψηλή, και άρα χρειάζεται σημαντική ισχύς για να φραγεί η ροή του από μια βαλβίδα, τότε μπορεί η πηγή διέγερσης να είναι ανεπαρκής. Για παράδειγμα, μια τυπική ηλεκτροβαλβίδα που το πηνίο της είναι μερικών W ή VA, αντιστοίχως αν είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, μπορεί να μην ασκεί αρκετή δύναμη ώστε να υπερνικηθεί η πίεση του ρευστού πάνω στο κινούμενο εμπόδιο. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιούνται βαλβίδες με πιλότο. Είναι μηχανισμοί δύο σταδίων, όπου η διέγερση παραμένει μικρής ισχύος και είναι το πρώτο στάδιο. Αυτό με τη σειρά του κατευθύνει μέρος της πίεσης του ρευστού στο δεύτερο στάδιο, που είναι αυτό που φράζει τη ροή. Οι βαλβίδες πιλότου δηλαδή χρησιμοποιούν την ισχύ του ίδιου του μέσου για να ενισχύσουν το σήμα διέγερσης.

Κατά την επιλογή μια βαλβίδας δύο είναι οι βασικές παράμετροι ως προς το μέσο. Πρώτον, αν ταιριάζει με τα επίπεδα της ροής που διέρχεται από το σημείο τοποθέτησής της. Αυτό ελέγχεται με τον παράγοντα Kv που είναι στο φύλλο προδιαγραφών κάθε βαλβίδας, και αναγράφει σε πόση ροή αναπτύσσεται πτώση πίεσης 1bar στα άκρα της. Αυτό σχετίζεται με το αναγραφόμενο (σε mm) άνοιγμα όταν η βαλβίδα είναι σε ανοιχτή θέση. Δεύτερον, αν είναι χημικά συμβατή με το μέσο. Αυτό ελέγχεται με το υλικό των στεγανωτικών της που επίσης αναγράφονται στο φύλλο προδιαγραφών και αντιπαραβάλλονται με το υλικό του υγρού σε πίνακες χημικής συμβατότητας. Αν είναι ασύμβατα, μπορεί το υλικό να διαβρώσει τη στεγάνωση και η βαλβίδα να μη φράσσει πλέον.

Ως προς τον τρόπο σύνδεσης του πηνίου των (σωληνοειδών) ηλεκτροβαλβίδων, χρησιμοποιείται ειδικό βύσμα που ορίζεται στο DIN EN 175301-803. Απαντώνται συνολικά 5 βύσματα: φόρμας A, φόρμας B 11 ή 10mm και φόρμας C των 8 ή 9,4mm.

Τέλος, υπάρχουν ηλεκτροβαλβίδες τόσο συνεχούς όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος. Όπως σε κάθε ηλεκτρομαγνήτη που κινεί μέταλλα, είναι αδιάφορος ο προσανατολισμός του μαγνητικού πεδίου. Το μέταλλο προσανατολίζει το μαγνητισμό του ώστε να ταιριάζει στο εξωτερικά επιβαλλόμενο. Άρα ο μαγνήτης λειτουργεί και με εναλλασσόμενο. Η διαφορά είναι ότι δεδομένο πηνίο έχει μικρότερη ισχύ σε AC (εναλλασσόμενη) τάση, καθώς η ενεργός τιμή του ρεύματος είναι μικρότερο λόγω σύνθετης αντίστασης του πηνίου.

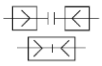
## 2.5. Υδραυλικά διαγράμματα

Τα λειτουργικά στοιχεία μιας διάταξης κυκλοφορίας ρευστών απεικονίζονται στα υδραυλικά και πνευματικά διαγράμματα. Σε αυτά δεν φαίνονται κατασκευαστικές λεπτομέρειες, όπως στα ισομετρικά σωληνώσεων, ούτε διατμηματική επισκόπηση μιας διεργασίας, όπως στα P&ID[8].

Τα στοιχεία απεικονίζουν λειτουργίες και μπορεί σε ένα εξάρτημα της διάταξης να αντιστοιχούν πολλά σύμβολα. Για παράδειγμα σε μια αντλία που λειτουργεί με αέρα και έχει ενσωματωμένο μανόμετρο και ανακουφιστική βαλβίδα θα αντιστοιχούν 4 σύμβολα.

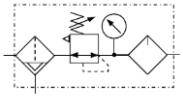
Τα σύμβολα ορίζονται στον κανονισμό ISO 1219. Μεγάλο μέρος των υδραυλικών σχεδίων αφορά την αναπαράσταση όλων των τύπων βαλβίδων.

Παρατίθενται συνοπτικά μόνο τα σύμβολα που χρειάζονται για την διάταξη της κατασκευής:



Ταχυσύνδεσμος: Είναι το αντίστοιχο του βύσματος. Διευκολύνει τόσο την εγκατάσταση όσο και τη χειροκίνητη σύνδεση-αποσύνδεση.

Εύκαμπτος σωλήνας: Όπου δεν υπάρχει το σύμβολο του εύκαμπτου σωλήνα, υπονοείται άκαμπτη όδευση.

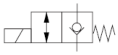


Προετοιμαστής αέρα(FRL[9]): Τυπική αλυσίδα 3 στοιχείων, του φίλτρου, του ρυθμιστή και του λιπαντή. Το φίλτρο αφαιρεί νερό και σκόνη από τον αέρα για να προστατέψει τα εξαρτήματα της εγκατάστασης. Ο ρυθμιστής πίεσης με μηχανισμό ανάδρασης περιορίζει την πίεση εισόδου στο επιθυμητό σημείο. Ο λιπαντήρας απελευθερώνει σταγόνες λαδιού στην παροχή του αέρα για μείωση φθοράς του εξοπλισμού.

Κινητήρας: Δεδομένης παροχής αέρα, θέτει το μηχανισμό άντλησης σε κίνηση. Όπως και τα ρελέ στα ηλεκτρολογικά σχέδια μπορούν να έχουν αλλού στο σχέδιο το πηνίο και αλλού τις επαφές τους, έτσι και στο εικονιζόμενο είναι αλλού ο κινητήρας και αλλού η αντλία (ο κινούμενος μηχανισμός).

Αντλία: Θέτει σε κίνηση το υγρό.

Ρυθμιζόμενη στένωση: Είναι μια ρυθμιζόμενη αντίσταση.



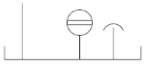
Ηλεκτροβαλβίδα normally closed. Είναι ένας διακόπτης on-off. Η θέση ηρεμίας της είναι το ελατήριο να φράσσει τη δίοδο του υγρό, ενώ

[8] Piping and Instrumentation Diagram (διαγράμματα ροής)
[9] Filter-regulator-lubricator

όταν διεγείρεται ένας ηλεκτρομαγνήτης που υπερνικά τη δύναμη του ελατηρίου απελευθερώνει τη ροή του υγρού.

Ροόμετρο

Μανόμετρο (μέτρηση πίεσης)



Δοχείο με παροχή εισόδου, ενδείκτη στάθμης (εν προκειμένω laser) και επαφή με την ατμόσφαιρα (όχι αεροστεγές).

## 2.6. Σχέδιο της διάταξης

Στο κάτω μέρος του σχεδίου απεικονίζεται το υδραυλικό κύκλωμα ενώ στο πάνω το δίκτυο του αέρα.

Για να προσομοιάζει η διάταξη μια διαδικασία δοσομέτρησης, υπάρχει ένα μεγάλο (TNK1) και ένα μικρό δοχείο (TNK2). Η αντλία (PMP1) μεταφέρει υγρό από το TNK1 στο TNK2 και η μεταφορά επιτηρείται μέσω του ροομέτρου (BD3) και του αισθητήρα στάθμης που είναι στην κορυφή του μικρού δοχείου (BA1). Μόλις η επιθυμητή ποσότητα έχει μεταφερθεί, η αντλία απενεργοποιείται κλείνοντας την παροχή του αέρα μέσω της βαλβίδας Y1. Ταυτόχρονα, για άμεση απόκριση εμποδίζεται περαιτέρω ροή υγρού κλείνοντας τη βαλβίδα Y2. Η Y1 από μόνη της δεν προσφέρει άμεση απόκριση, καθώς από τη στιγμή που θα διακοπεί η παροχή του πεπιεσμένου αέρα ο όγκος μεταξύ Y1 και κινητήρα θα εκτονωθεί σε ατμοσφαιρική πίεση μέσω του κινητήρα και θα κινείται, έστω επιβραδυνόμενος, ο μηχανισμός άντλησης σε αυτό το διάστημα.

Για τους σκοπούς της επίδειξης και για να μπορεί να επαναλαμβάνεται η διαδικασία, υπάρχει η βαλβίδα αποστράγγισης Y3. Όταν ενεργοποιηθεί, επιστρέφει με ελεύθερη ροή το υγρό από το υψομετρικά άνω τοποθετημένο TNK2 πίσω χαμηλά στο TNK1.

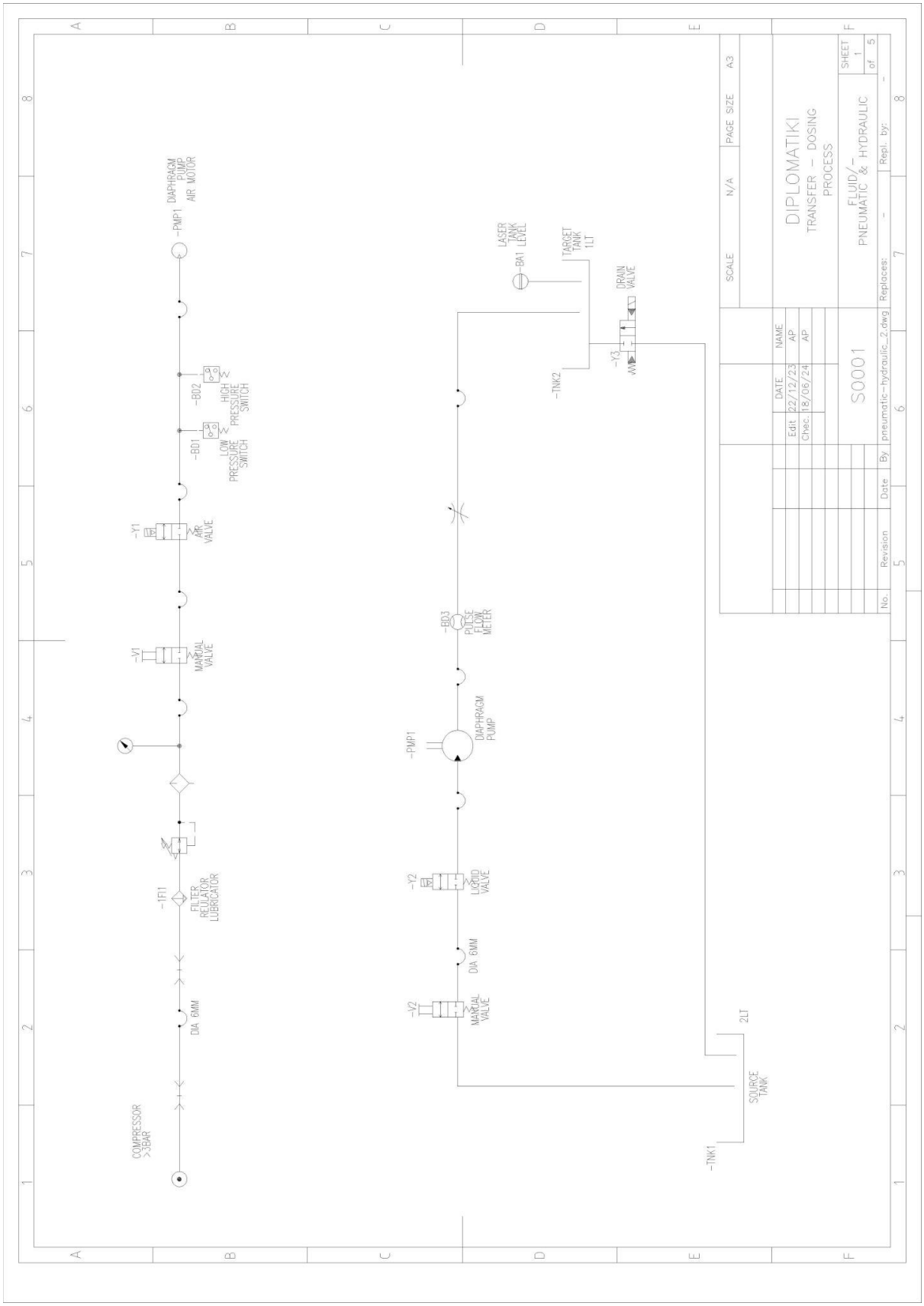
Για να μπορεί να εμποδιστεί χειροκίνητα η ροή σε περίπτωση ανάγκης, αλλά και για να μπορεί να αδειάσει το υδραυλικό κύκλωμα εάν χρειαστεί για συντήρηση, υπάρχει η χειροκίνητη βάνα V2. Αυτή είναι στο ύψος του πάτου του TNK1 που είναι και το χαμηλότερο σημείο της διάταξης, και έτσι επιτυγχάνεται η εκκένωση του κυκλώματος αν απαιτηθεί συντήρηση.

Μετά την έξοδο της αντλίας υπάρχει μια ρυθμιζόμενη αντίσταση. Αυτή ρυθμίζεται άπαξ, κατά την εγκατάσταση της διάταξης. Σκοπός της είναι να στραγγαλίσει τη μέγιστη επιτρεπτή ροή της αντλίας σε σημείο που δεν υπερβαίνει την ελεύθερη ροή του σωλήνα υπερχείλισης (δε φαίνεται στο σχέδιο), εάν αυτό συμβεί. Ο λόγος είναι ότι αντλία που ήταν διαθέσιμη και εγκαταστάθηκε στη διάταξη είναι υπερδιαστασιολογημένη για τη διάμετρο των σωληνώσεων. Σε συνθήκη σφάλματος, πχ σε αστοχία των αισθητήρων, των ηλεκτρονικών και των βαλβίδων, το υγρό που συνεχίζει να αντλεί η PMP1 πρέπει να επιστρέφει από το σωλήνα υπερχείλισης της TNK2 πίσω στο TNK1 αντί να χυθεί εκτός κυκλώματος.

Για την κίνηση την αντλίας υπάρχει η γραμμή του αέρα στο πάνω μέρος του σχεδίου. Ξεκινάει από την παροχή από το κομπρεσέρ (δεν απεικονίζεται) που για να είναι ανεξάρτητο

από τη φορητή διάταξη συνδέεται σε αυτή με ταχυσύνδεσμο. Αφού περάσει μέσα από έναν τυπικό προετοιμαστή αέρα που εξασφαλίζει καθαρό, ελαφρώς λιπασμένο αέρα σταθερής πίεσης, συναντά μια χειροκίνητη βάνα (V1) για λόγους ευχρηστίας κατά την εγκατάσταση και τη συντήρηση. Κατόπιν υπάρχει η ηλεκτροβαλβίδα (Y1) που ανοιγοκλείνει τον κινητήρα της αντλίας (PMP1). Επίσης υπάρχουν 2 πρεσσοστάτες, ένας που ενεργοποιείται όταν η πίεση είναι χαμηλή (ο BD1) και ένας όταν η πίεση είναι υψηλή (BD2) ώστε να κλείνει η αντλία εάν τυχόν έχει ρυθμιστεί η πίεση από το κομπρεσέρ ή από τον προετοιμαστή σε ακατάλληλη τιμή. Σε μια τιμή κάτω των περίπου 1,5bar η αντλία δεν μπορεί να κινηθεί, ενώ σε πάνω των 8bar μπορεί να σπάσει.

Παντού έχει χρησιμοποιηθεί σωλήνας εύκαμπτος για ευκολία στην εγκατάσταση.




Υδραυλικό και πνευματικό διάγραμμα της διάταξης (στάδιο μηχανολογικών)

# 3. Ηλεκτρολογικά

## 3.1. Ρελέ

Στην απλούστερη περίπτωση, ένα ρελέ ή αλλιώς ηλεκτρονόμος είναι ένα δίθυρο κυκλωματικό στοιχείο, που η τάση στη μία θύρα (πηνίο) ανοιχτοκυκλώνει ή βραχυκυκλώνει την άλλη θύρα (επαφή). Πρόκειται για διακόπτη που η κίνησή του γίνεται με ηλεκτρομαγνήτη αντί με το χέρι. Συνεπώς, οι θύρες πηνίου και επαφής είναι γαλβανικά *απομονωμένες* μεταξύ τους, η αλληλεπίδραση είναι αμιγώς μαγνητική. Επίσης η δράση είναι *μονόπλευρη*, το πηνίο επηρεάζει την επαφή και όχι αντίστροφα, δηλαδή ορίζεται είσοδος και έξοδος.

Στη γενική περίπτωση, η έξοδος μπορεί να αποτελείται από περισσότερες από μία θύρες. Επίσης οι θύρες εξόδου μπορεί να μην είναι μεταξύ τους απομονωμένες, δηλαδή να υπάρχει κοινός ακροδέκτης. Ο κοινός παρονομαστής είναι ότι οι επαφές εξόδου είναι μηχανικά συζευγμένες μεταξύ τους, πχ κινούνται από κοινό άξονα.

Τα ρελέ που απαντώνται στα ασθενή ρεύματα των κυκλωμάτων αυτοματισμού και δεν έχουν κάποια ειδική λειτουργία, όπως τα χρονικά ρελέ, ονομάζονται ρελέ αυτοματισμού. Μερικές από τις χρήσεις τους περιλαμβάνουν τον πολλαπλασιασμό ενός σήματος ώστε να οδηγεί πολλά γαλβανικά απομονωμένα μεταξύ τους κυκλώματα, την αλλαγή επιπέδου τάσης ενός σήματος, την απομόνωση ηλεκτρικού θορύβου, ως στοιχεία μνήμης σε συνδεσμολογία αυτοσυγκράτησης, αλλά και ως διεπαφή μεταξύ τρανζίστορ εξόδου σε PLC και των φορτίων τους για την αύξηση του χρόνου ζωής των πρώτων.

Οι επαφές των ρελέ φέρουν τη σήμανση NO (ή αλλιώς form A) ή NC (ή αλλιώς form B), η οποία δηλώνει εάν ανοιχτοκυκλώνει (normally open) ή βραχυκυκλώνει (normally closed) όταν το ρελέ βρίσκεται στην κατάσταση ηρεμίας, χωρίς διέγερση. Υπάρχουν επίσης και οι επαφές μεταγωγής (ή form C), που αποτελούνται από τρεις ακροδέκτες, ονόματι C,NO και NC. Σε αυτές η επαφή που συνδέεται στον C έχει δύο επιτρεπτές θέσεις, είτε σε επαφή με τον NO ακροδέκτη είτε με τον NC ακροδέκτη. Ακόμα υπάρχουν οι πιο σπάνιες μορφές όπως η form D, που είναι σαν τη form C αλλά χωρίς μεταβατικό χρονικό παράθυρο όπου καμία επαφή δεν άγει, η form K που είναι τρισταθής με την έξτρα κατάσταση να είναι OFF-OFF, και η form X που είναι δύο διακόπτες σε σειρά για ισχυρά ρεύματα όπως στα ρελέ ισχύος.

Βάσει EN 50005 ονομάζονται A1 και A2 οι ακροδέκτες του πηνίου, 11 ο κοινός ακροδέκτης επαφής, 12 ο ακροδέκτης NC (άρα η NC επαφή ορίζεται μεταξύ των ακροδεκτών 11,12) και 14 ο ακροδέκτης NO (άρα η NO επαφή ορίζεται μεταξύ των ακροδεκτών 11, 14).

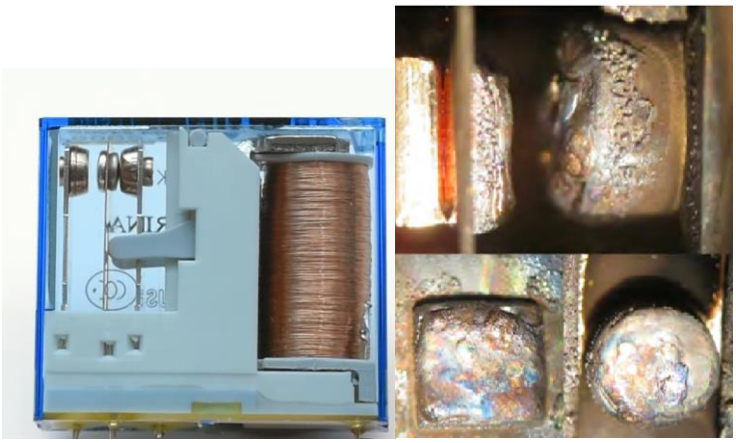
Επίσης το ρελέ μπορούν να είναι μονοπολικά, διπολικά ή περισσότερων πόλων βάλει το πλήθος των επαφών που υπάρχουν. Ως SPST (single pole single throw) ονομάζονται τα ρελέ με μία NO ή μια NC επαφή, ως SPDT (single pole double throw) αυτά που η επαφή είναι μεταγωγής, ως DPST (double pole single throw) αυτά που αποτελούνται από 2 ανεξάρτητες ηλεκτρικά αλλά συζευγμένες μηχανικά επαφές NO ή NC, και ως DPDT ονομάζονται αυτά που αποτελούνται από 2 ανεξάρτητες ηλεκτρικά αλλά συζευγμένες μηχανικά επαφές μεταγωγής. Οι ακροδέκτες των επιπλέον πόλων ονομάζονται 21,22,24, 31,32,34 κοκ κατ' αντιστοιχία με των μονοπολικών.

Λόγω της μη αμελητέας επαγωγής του πηνίου τους, χρησιμοποιούνται διατάξεις αποφόρτισής του για να προστατευτεί το υπόλοιπο κύκλωμα από την κρουστική τάση που εμφανίζεται όταν απενεργοποιείται το ρελέ. Ο απλούστερος τρόπος σε DC κυκλώματα είναι

μια δίοδος συνδεδεμένη παράλληλα στο πηνίο και με φορά αγωγής αντίθετα από αυτή του ονομαστικού ρεύματος, ενώ σε AC ένα ζεύγος RC παράλληλα στο πηνίο.

Στην εικόνα 3.1 φαίνεται η επίπτωση των αιχμών τάσης ενός επαγωγικού φορτίου στις επαφές του ρελέ της γραμμής του. Οι αιχμές τείνουν να αναπτύξουν τόξο, με αποτέλεσμα την παρατηρούμενη μορφή και τη μείωση του χρόνου ζωής των επαφών.

Το φαινόμενο της γήρανσης των επαφών είναι σημαντικό όταν ο εξοπλισμός είναι ακριβός ή αντικαθίσταται δύσκολα. Αυτή είναι η περίπτωση ενός PLC. Για το λόγο αυτό, όταν οι έξοδοι ενός PLC ελέγχουν κάποιο ρελέ, βαλβίδα ή άλλο επαγωγικό φορτίο, χρησιμοποιούνται διατάξεις απόσβεσης των αιχμών τάσης.



Εικόνα 3.1 Γήρανση επαφών ρελέ σε γραμμή επαγωγικού φορτίου λόγω αιχμών τάσης
Πηγή: Contact Life, Unsuppressed vs. Suppressed Arcing, Lab Note #105 — rev A, 2013, Arc Suppression Technologies, LLC

## 3.2. Ασφάλειες - μικροαυτόματοι

Τα στοιχεία μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης που είναι υπεύθυνα για την προστασία της είναι οι ασφάλειας και οι αυτόματοι/μικροαυτόματοι διακόπτες. Προστατεύουν τα καλώδια, υπό προϋποθέσεις και τις τροφοδοτούμενες συσκευές, από υπερθέρμανση και την επακόλουθη καταστροφή τους ή την πρόκληση φωτιάς. Στοχεύουν σε δύο κλίμακες χρόνου, αφενός στη αργά εκτυλισσόμενη υπερθέρμανση λόγω υπερέντασης, αφετέρου στην ταχεία υπερθέρμανση λόγω βραχυκυκλώματος.

Για τα καλώδια μόνωσης με PVC, που είναι τα πλέον συνήθη, στόχος είναι η θερμοκρασία να μείνει κάτω των 70°C. Το θερμοδυναμικό πρόβλημα ορίζεται από την ανά μέτρο πηγή θερμότητας λόγω διέλευσης ορισμένου ρεύματος σε ορισμένη αντίσταση αγωγού. Η ανά μέτρο θερμική αντίσταση της μόνωσης και του τρόπου εγκατάστασης είναι το δεύτερο μέρος. Τέλος, η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι το τρίτο μέρος του προβλήματος. Με αυτά ως δεδομένα, προκύπτουν οι πίνακες των κανονισμών εγκαταστάσεων με το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα ανά διατομή καλωδίου PVC και ανά συνθήκη εγκατάστασης.

Η λειτουργία των ασφαλειών τήξης επιτυγχάνεται μέσω της τήξης μετάλλου, ενώ στους μικροαυτόματος μέσω θερμικής και μαγνητικής δράσης. Η θερμική αποτελείται από διμεταλλική επαφή που λόγω διαφορά συντελεστή διαστολής κάμπτεται και ανοίγει το κύκλωμα. Η μαγνητική βασίζεται στη διέγερση πηνίου που ανοίγει το κύκλωμα.

Και τα δύο είδη προστασίας χαρακτηρίζονται από (α) την τάση λειτουργίας ώστε να μη δημιουργηθεί τόξο που θα καταστρατηγήσει το ανοιχτοκύκλωμα, (β) το ονομαστικό ρεύμα ώστε να μην ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός ανοιχτοκύκλωσης σε μη επιθυμητή τιμή, (γ) το ρεύμα βραχυκυκλώματος, ώστε να μπορεί να διακοπεί το σφάλμα, (δ) την καμπύλη του χρόνου απόκρισης και (ε) το πλήθος των πόλων.

Η διαστασιολόγηση γίνεται ορίζοντας το μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας της γραμμής και το επιτρεπτό ρεύμα του καλωδίου. Η ασφάλεια επιλέγεται ως η μικρότερη διαθέσιμη ενδιάμεση τιμή. Η δε επιλογή καμπύλης βασίζεται στο αναμενόμενο είδος φορτίου, κατά πόσο είναι ωμικό ή όχι.

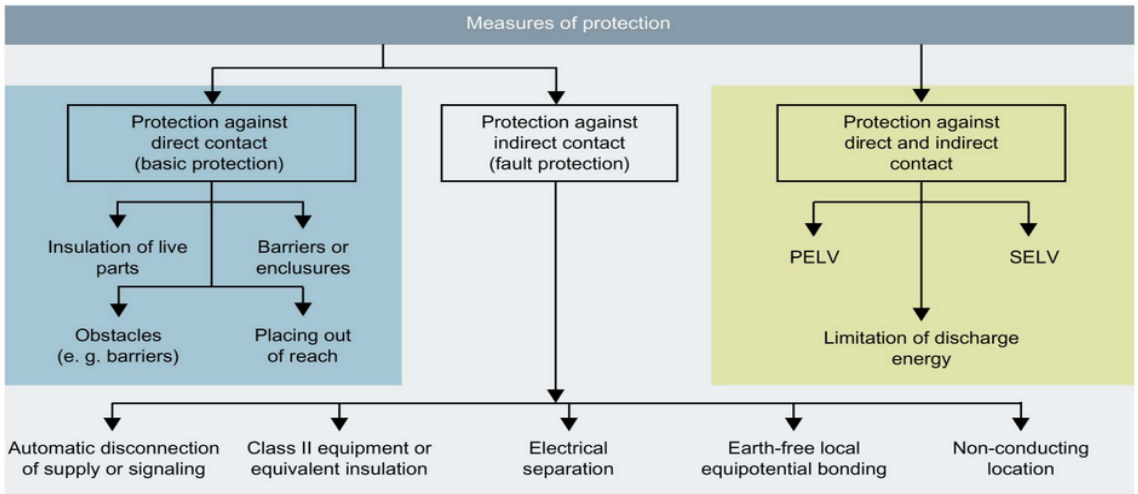
Ειδική μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται κατά την επιλογή ασφάλειας ή μικροαυτόματου σε γραμμές που ξεκινούν από τροφοδοτικό και όχι από το δίκτυο. Για παράδειγμα, ένας μικροαυτόματος 1A καμπύλης C που προστατεύει γραμμή από τροφοδοτικό 5A, το οποίο διαθέτει μια τυπική λειτουργία boost (σύντομη αύξηση ρεύματος) μέχρι 6A για 10”, δεν προστατεύει από βραχυκύκλωμα. Ο λόγος είναι ότι βάσει καμπύλης C χρειάζεται 10 φορές το ονομαστικό ρεύμα για να ενεργοποιηθεί ακαριαία (<100ms) η μαγνητική λειτουργία, δηλαδή στα 10A. Όμως όταν κατά το βραχυκύκλωμα το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται, όταν ξεπεράσει τα 6A το τροφοδοτικό απενεργοποιείται αυτόματα για αυτοπροστασία. Συνεπώς όλα τα φορτία του τροφοδοτικού σβήνουν χωρίς να απομονώνεται η προβληματική γραμμή και ο μικροαυτόματος δεν έχει λειτουργήσει.

Μια άλλη προβληματική περίπτωση εφαρμογής μικροαυτόματων είναι η ίδια η χαμηλή τάση της γραμμής του τροφοδοτικού σε συνδυασμό με το μήκος αυτής. Συνεχίζοντας το προηγούμενο παράδειγμα, αν είχαμε τροφοδοτικό των 10A/24V με boost έως 12A για 10”, εάν η γραμμή ήταν χάλκινο διπολικό καλώδιο 1mm² (18mΩ/m), τότε αν το μήκος της ήταν 50m δε θα λειτουργούσε η μαγνητική προστασία σε βραχυκύκλωμα. Επειδή τα 24V σε αντίσταση 18mΩ×2×50=1,8Ω δίνουν 13,3A ως ρεύμα βραχυκυκλώματος, άρα και σε αυτή την περίπτωση το τροφοδοτικό θα απενεργοποιηθεί και ο μικροαυτόματος δε θα λειτουργήσει.

Και στα δύο παραπάνω παραδείγματα γίνεται φανερό ότι εάν είναι επιθυμητή η προστασία μεμονωμένων γραμμών τροφοδοτικού με ασφάλεια ή μικροαυτόματο για απομόνωση των σφαλμάτων, πρέπει αυτό να υπερδιαστασιολογείται ώστε να υπάρχει επαρκές περιθώριο ρεύματος για την περίπτωση σφάλματος.

## 3.3. Προστασία

Τα μέσα προστασίας των ανθρώπων έναντι ηλεκτροπληξίας συνοψίζονται στον πίνακα 3.2. Υπάρχουν τα μέσα που εμποδίζουν την επαφή με αγώγιμα μέρη, είτε με το μονωτικό περίβλημα των αγωγών είτε με την εισαγωγή φυσικών εμποδίων όπως τα κανάλια όδευσης. Υπάρχουν επίσης τα μέσα έμμεσης επαφής, σε περίπτωση σφάλματος. Αυτά περιλαμβάνουν τον ορισμό ισοδυναμικής σύνδεσης όλων των εκτεθειμένων μεταλλικών στοιχείων με το σύστημα γείωσης της εγκατάστασης, την εφαρμογή ηλεκτρικού διαχωρισμού μέσω μετασχηματιστή ασφαλείας, τη μόνωση της ηλεκτρικής συσκευής κατά κλάση II, κα. Σε εγκαταστάσεις μηχανημάτων, η ισοδυναμική σύνδεση ορίζεται από τις κλέμμες γείωσης, τους αγωγούς γείωσης, το μεταλλικό ερμάριο του ηλεκτρικού πίνακα και τα εκτεθειμένα μεταλλικά εξαρτήματα του εξοπλισμού.

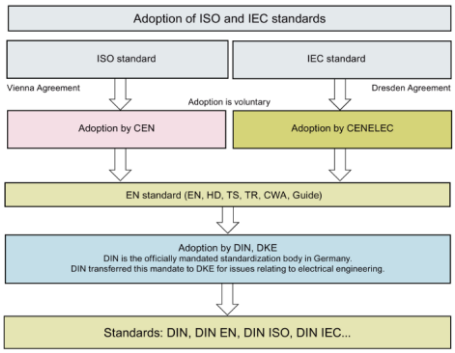



Εικόνα 3.2 Διάκριση των μέσων προστασίας από ηλεκτροπληξία [11]

Πέρα από τη γείωση και φυσικά πέρα από τα εμπόδια πρόσβασης (κανάλια, σπιράλ, ερμάρια κλπ.), ένας ακόμη τρόπος προστασίας από ηλεκτροπληξία είναι μέσω χρήσης πολύ χαμηλής τάσης. Αυτός ο τρόπος προστατεύει έναντι ηλεκτροπληξίας τόσο κατά την άμεση επαφή με αγωγούς όσο και κατά την έμμεση. Ως εξαιρετικά χαμηλή τάση ο ΕΛΟΤ HD384 ορίζει είτε τα 50VAC είτε τα 120VDC (παράγραφος 411.1.1). Όταν αυτή πηγάζει από μετασχηματιστή απομόνωσης ασφαλείας και συντρέχουν ορισμένες προϋποθέσεις στην εγκατάσταση, αυτή ορίζεται ως ασφαλείας ή προστασίας (SELV ή PELV αντίστοιχα) και είναι μέσο αποτροπής της ηλεκτροπληξίας. Πολλά τροφοδοτικά DC, είναι πηγή PELV ή SELV.

## 3.4. Κανονισμοί

Για τη σχεδίαση πινάκων αυτοματισμού, εφαρμόζεται μια σειρά κανονισμών οι οποίοι πηγάζουν από τη διεθνή ηλεκτροτεχνική επιτροπή (IEC) ή το διεθνή οργανισμό τυποποίησης (ISO), υιοθετούνται από τις ευρωπαϊκές επιτροπές CENELEC και CEN αντίστοιχα, οι οποίες εκδίδουν τα εναρμονισμένα πρότυπα EN που με τη σειρά τους υιοθετούνται από τις εθνικές αρχές τυποποίησης και εκδίδουν τα εγχώρια πρότυπα.



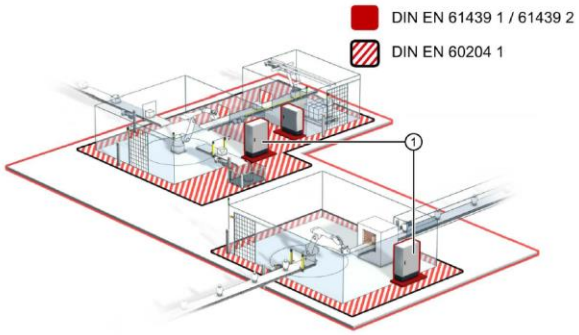

Εικόνα 3.3 Συσχέτιση των κανονιστικών προτύπων μεταξύ των φορέων τυποποίησης [11]

Τα εναρμονισμένα πρότυπα με εφαρμογή τους πίνακες αυτοματισμού συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα. Εξ' αυτών τα 60204, 61439 και 60364 άπτονται αμιγώς ηλεκτρολογικών θεμάτων.

| European standard | German standard | International standard | Title |
|---|---|---|---|
| EN 60204-1 | DIN EN 60204-1 | IEC 60204-1 | Safety of machinery – Electrical equipment of machines |
| EN 61439-1 | DIN EN 61439-1 | IEC 61439-1 | Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – General rules |
| EN 61439-2 | DIN EN 61439-2 | IEC 61439-2 | Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Power switchgear and controlgear assemblies |
| HD 60364 | DIN VDE 0100 | IEC 60364 | Low-voltage electrical installations – Parts 1 to 8 |
| EN ISO 12100 | DIN EN ISO 12100 | ISO 12100 | Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction |
| EN ISO 13849 | DIN EN ISO 13849 | ISO 13849 | Safety of machinery – Safety-related parts of control systems |

Πίνακας 3.1 Τα πρότυπα με εφαρμογή στη σχεδίαση ενός πίνακα αυτοματισμού [11]

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το πεδίο εφαρμογής των 61349 και 60204 σε μια βιομηχανική εγκατάσταση. Το 60204 αφορά τους πίνακες των μηχανημάτων.




Εικόνα 3.4 Όρια πεδίου εφαρμογής των κανονισμών πινάκων χαμηλής τάσης (EN 61439) και πινάκων ως μέρος μηχανημάτων (EN 60204) [11]

## 3.5. Σχέδιο της διάταξης

Στον πίνακα χρησιμοποιείται χαμηλή τάση DC τόσο για τη λειτουργία των ηλεκτρονικών όσο και ως μέσο ασφάλειας έναντι ηλεκτροπληξίας στις οδεύσεις. Τα τροφοδοτικά είναι 2, ένα 24VDC (G1) και ένα 12VDC(G2). Το πρώτο τροφοδοτεί όλο τον εξοπλισμό, πλην το δεύτερο μόνο το ροόμετρο. Το ροόμετρο είναι σε διαφορετική τάση επειδή κατά την υλοποίηση του πίνακα χρησιμοποιήθηκε αρχικά άλλο μοντέλο που επέτρεπε τάσεις μέχρι 12V.

Το G1 τροφοδοτεί τις καταναλώσεις του PLC (A1, 120mA), του HMI (A2, 400mA), του gateway rs485-ethernet (A3, 100mA) του ethernet switch (A4, 600mA), τις 3 βαλβίδες Y1 έως Y3 (580mA εκάστη) και τον αισθητήρα στάθμης (BA1, 40mA). Άρα το μέγιστο ρεύμα είναι 3A, ενώ κατά τη λειτουργία δε λειτουργούν όλες οι βαλβίδες ταυτόχρονα, άρα το μέγιστο αναμενόμενο είναι <2,5A. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι καταναλώσεις περιλαμβάνουν οι καθεμία το περιθώριο ασφαλείας της, ένα τροφοδοτικό των 2,5A με λειτουργία power boost 120% μέχρι 3A κρίνεται ως επαρκές.

Στην πλευρά του δικτύου υπάρχει μόνο ένας μικροαυτόματος (F1) των 4A και καμπύλης C ως στοιχείο προστασίας και ένα διακόπτης φορτίου (Q1) ως στοιχείο απομόνωσης αλλά και διακοπής έκτακτης ανάγκης. Για το σκοπό αυτό είναι προσβάσιμος από το χειριστή χωρίς άνοιγμα του πίνακα.

Για να μπορούν να μετατραπούν τα 12V του ροομέτρου σε 24V που είναι η είσοδος του PLC, παρεμβάλλεται ένα ρελέ, το KI1. Είναι μάλιστα ρελέ ημιαγωγού, ώστε να μπορεί να λειτουργεί στη συχνότητα των παλμών του ροομέτρου.

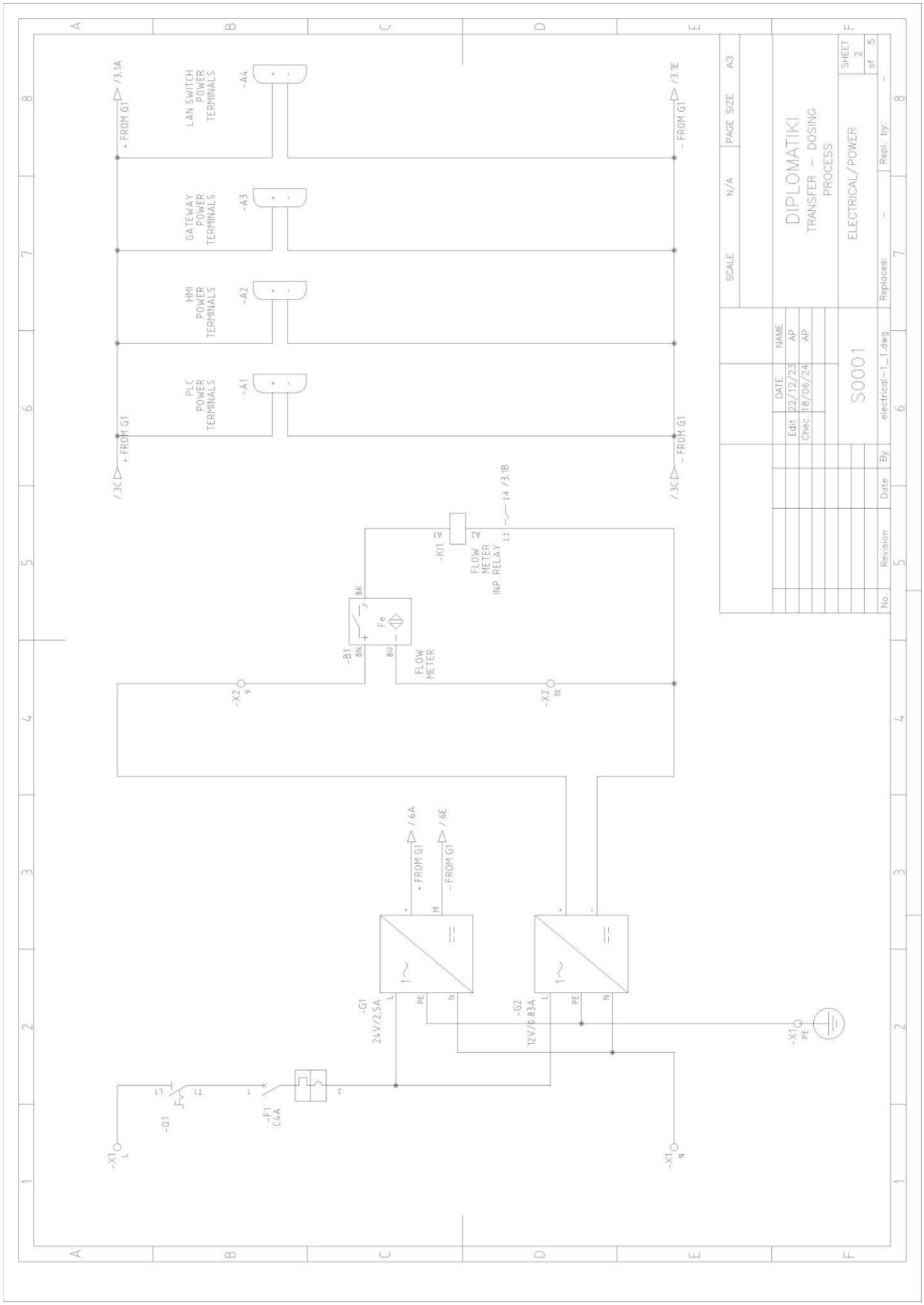
Μεταξύ των εξόδων του PLC και των βαλβίδων παρεμβάλλονται ρελέ, τα K2,K3 και K4, για να αυξάνουν το χρόνο ζωής του. Οι βαλβίδες προκαλούν κρουστικές τάσεις κατά τη διακοπή του, οι οποίες καταπονούν και μειώνουν το χρόνο ζωής του διακόπτη τους. Η μεταφορά του σημείου αστοχίας εκτός του PLC, που είναι ακριβό και χρειάζεται επαναπρογραμματισμό σε περίπτωση αντικατάστασης, στα ρελέ, που είναι φθηνά, αποτελεί καλή πρακτική. Εναλλακτικά, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν δίοδοι στις κλέμμες, που όμως είναι δυσεύρετες σε συμπαγή μορφή.

Οι καλωδιώσεις εντός πίνακα είναι με H05V-K (παλιό NYAF) του $1mm^2$. Η ρευματοφόρος ικανότητά του είναι στα 10,3A όταν είναι εγκατεστημένο εντός καναλιού σε θερμοκρασία μέχρι 40°C (κατά EN60204 καθώς δεν καλύπτεται από τον HD384), η οποία είναι υπεραρκετή για τροφοδοτικό μέγιστου ρεύματος 2,5A. Η δε πτώση τάσης είναι αμελητέα. Συγκεκριμένα, η μακρύτερη γραμμή με το μεγαλύτερο φορτίο είναι μιας βαλβίδας, με <2m και <1A αντίστοιχα. Άρα η πτώση τάσης σε χαλκό του $1mm^2$ είναι μικρότερη από $1{,}7\Omega\times m\times 10^{-8}\times(2\times 2m)\times 1A/1mm^2 = 68mV$.

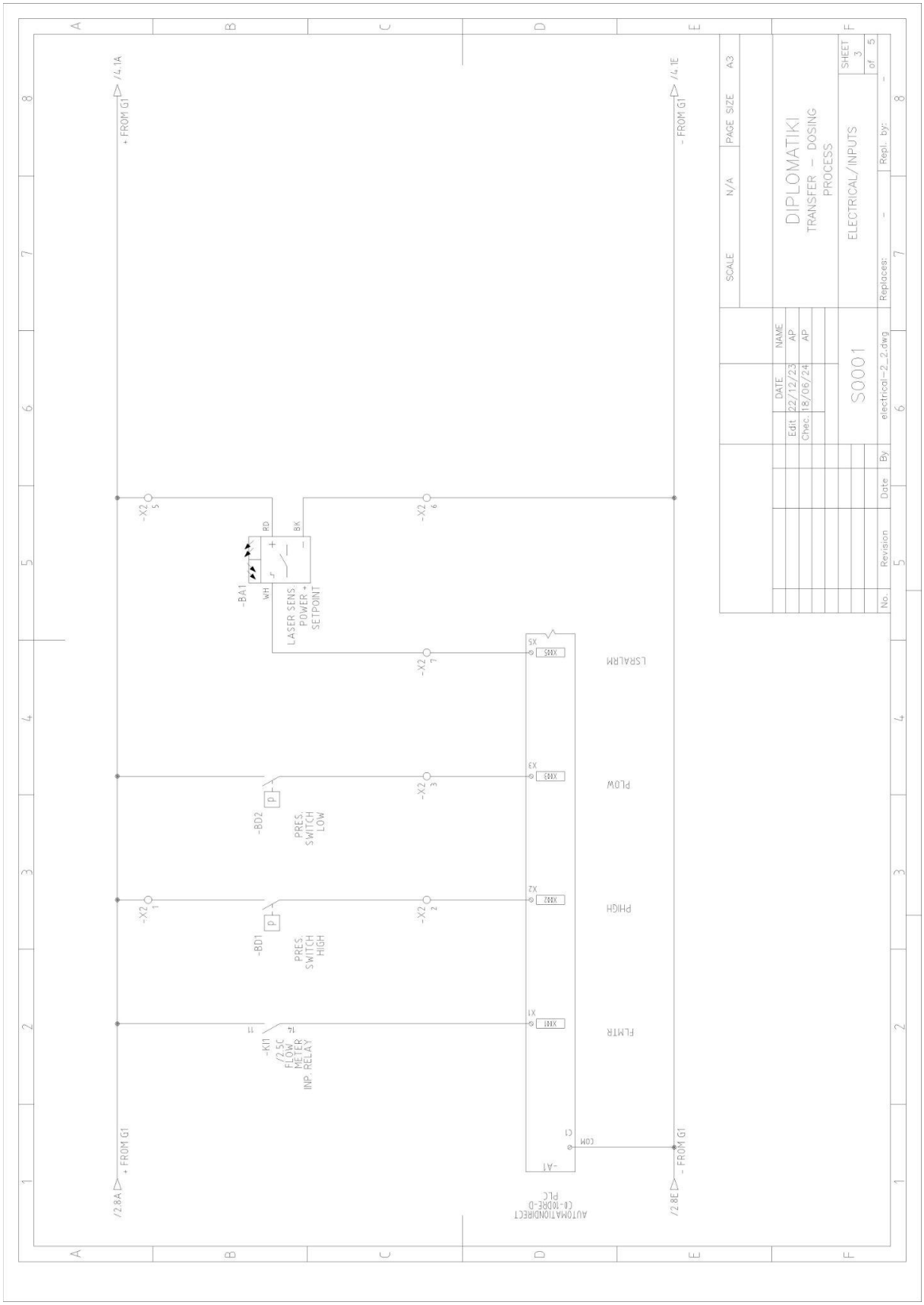
Τα χρώματα των αγωγών είναι σκούρο μπλε και ριγέ σκούρο μπλε για τα κυκλώματα των 24VDC, μπλε και λευκό και τα 12VDC, μοβ για τις σειριακές επικοινωνίες και καφέ, ανοιχτό μπλε και κιτρινοπράσινο για την παροχή του δικτύου.

Οι κλεμμοσειρές είναι δύο, χωρισμένες κατά επίπεδο τάσης. Η X1 είναι τα 230V και η X2 οι χαμηλές τάσεις DC. Οι κλέμμες γείωσης είναι ειδικές, μεταλλικές που αγκιστρώνουν πάνω στη ράγα όπου τοποθετούνται. Μέσω αυτών συνδέεται η ράγα και η μεταλλική πλάτη του πίνακα με τη γείωση της παροχής. Επίσης, η πλάτη (μεταλλικό φύλλο) ολόκληρης της διάταξης συνδέεται με καλώδιο των $2{,}5mm^2$ στη γειωμένη ράγα.

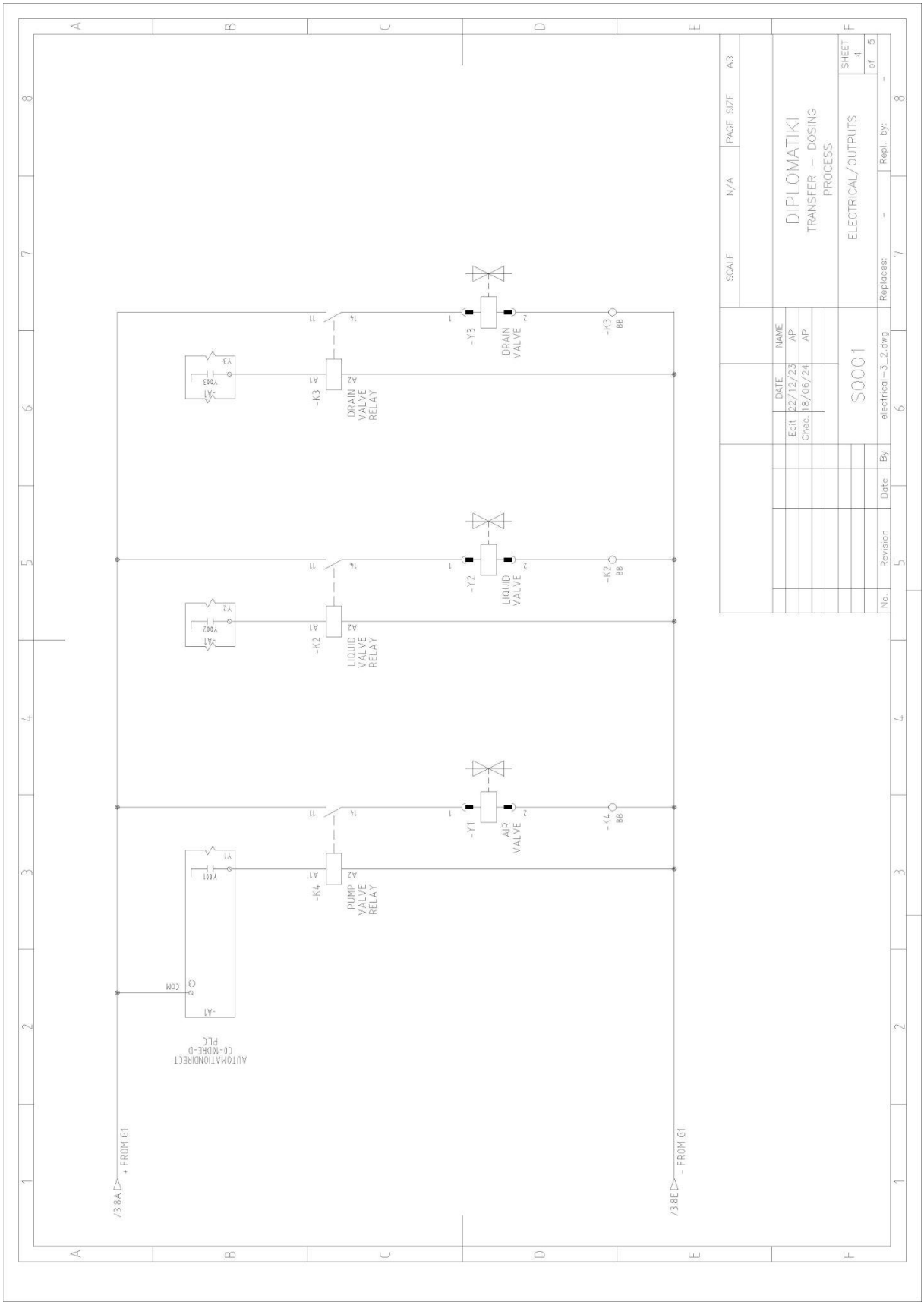
Το σχέδιο έχει δημιουργηθεί με το πρόγραμμα Autocad Electrical και σε αυτό οι αναφορές σε άλλες σελίδες είναι της μορφής /<σελίδα>.<θέση>. Για παράδειγμα, ως /3.1A συμβολίζεται η παραπομπή στη σελίδα 3, στη θέση με τετμημένη 1 και τεταγμένη A. Επίσης, όταν είναι στην ίδια σελίδα η παραπομπή, παραλείπεται ο αριθμός σελίδας.




Ηλεκτρολογικό σχέδιο της διάταξης, σελίδα 1/3 (στάδιο ηλεκτρολογικών)




Ηλεκτρολογικό σχέδιο της διάταξης, σελίδα 2/3 (στάδιο ηλεκτρολογικών)




Ηλεκτρολογικό σχέδιο της διάταξης, σελίδα 3/3 (στάδιο ηλεκτρολογικών)

# 4. Αυτοματισμοί

## 4.1. PLC

### 4.1.1. Ορισμός

Ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC) είναι ένας ψηφιακός υπολογιστής (υπό την ευρεία έννοια) βιομηχανικών προδιαγραφών για λειτουργίες εποπτείας και αυτομάτου ελέγχου. Δημιουργήθηκαν για να αντικαταστήσουν κυκλώματα κλασικού αυτοματισμού με ρελέ, τα οποία είναι δύσκολα σε τροποποιήσεις όταν αυτές απαιτηθούν.

Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι :

- η ανθεκτικότητα

Ένα PLC μπορεί και λειτουργεί σε περιβάλλον με ηλεκτρικό θόρυβο, δονήσεις και ακραίες θερμοκρασίες, σε σχέση με υπολογιστές γενικής χρήσης.

- η απόκριση πραγματικού χρόνου

Είναι υπολογιστικά συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου υπάρχουν σφιχτές απαιτήσεις στο χρόνο απόκρισης σε μια είσοδο, με αξιοπιστία.

- οι διεπαφές για σήματα εισόδου-εξόδου

Μπορούν να συνδεθούν με αισθητήρια και επενεργητές που βρίσκονται σε μια βιομηχανική εγκατάσταση, είτε είναι ψηφιακά σήματα 12 και 24VDC είτε αναλογικά σήματα μορφής 4-20mA για παράδειγμα. Επίσης το πλήθος των σημάτων που διαχειρίζεται μια συσκευή μπορεί να ποικίλει από μερικές δεκάδες έως χιλιάδες.

- ο προγραμματισμός που προσομοιάζει ηλεκτρολογικό σχέδιο

Υπάρχουν 5 προσδιορισμένες γλώσσες προγραμματισμού και μία εξ αυτών και η πλέον δημοφιλής είναι γραφική και μοιάζει με το ηλεκτρολογικό σχέδιο κλασικού αυτοματισμού. Ακριβώς επειδή δημιουργήθηκαν για να αντικαταστήσουν αυτά και όχι για να εκτελούν προγράμματα γενικού σκοπού. Ακόμα και στα πρώτα PLC που δεν υπήρχε η δυνατότητα γραφικού προγραμματισμού, η γλώσσα προσπαθούσε να μείνει κοντά σε μορφή λογικών εκφράσεων Boole.

### 4.1.2. Συγκρίσιμες τεχνολογίες

Από τα παραπάνω γίνονται εμφανείς οι διαφορές σε σχέση με υπολογιστές γενικού σκοπού (PC).

Υπάρχει όμως μια κατηγορία PC, τα βιομηχανικά PC ή IPC, που το πεδίο εφαρμογής τους μπορεί να έχει κοινό τόπο με εκείνο των PLC. Αυτά είναι φτιαγμένα με περίβλημα και κάποιες επιπλέον προστασίες που τα καθιστούν ανθεκτικά σε δονήσεις, ηλεκτρικό θόρυβο και διευρυμένο θερμοκρασιακό εύρος για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον. Προσφέρουν την ευελιξία των διαδεδομένων λειτουργικών συστημάτων όπως τα Windows ή τα Linux, και διαθέτουν επεξεργαστική ισχύ και μνήμη συγκρίσιμη μόνο με τα πολύ υψηλών επιδόσεων PLC. Ωστόσο, για να επιτύχουν τις απαιτήσεις που καλύπτουν τα PLC πέραν της ανθεκτικότητας, είναι απαραίτητες σημαντικές προσαρμογές που μειώνουν την προσιτότητά τους.

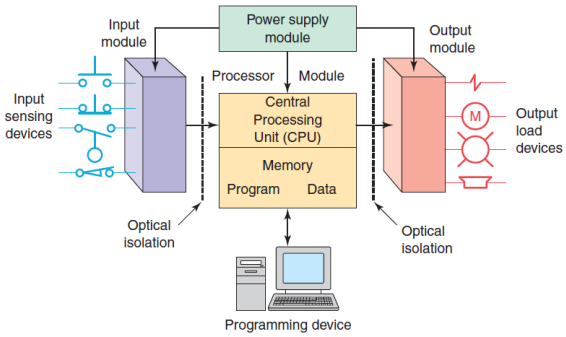
Μια ενδιάμεση λύση, ανάμεσα στα PLC και τα IPC, είναι τα PAC (programmable automation controller). Αυτά διατηρούν τη μορφή και τις λειτουργίες ενός PLC αλλά προσθέτουν δυνατότητες και χαρακτηριστικά που απαντώνται σε ένα PC.

Μια άλλη κατηγορία υπολογιστικών συστημάτων με την οποία μπορούν να συγκριθούν τα PLC είναι τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded). Δηλαδή αυτά που είναι βασισμένα σε κάποιον μικροελεγκτή και βρίσκονται παντού, από πλυντήρια μέχρι το ABS των αυτοκινήτων. Ωστόσο, ούτε αυτά μπορούν να καλύψουν το πεδίο εφαρμογής των PLC. Διότι ενέχουν το κόστος σχεδίασης, δοκιμών και πιστοποίησης του ίδιου του hardware του ελεγκτή, ενώ ένα PLC είναι συσκευή έτοιμη για προγραμματισμό και όχι σκέτο τσιπ μικροελεγκτή. Επίσης, προφανώς ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι κατασκευασμένο μόνο για τη διεργασία που ελέγχει και δεν μπορεί να επαναπρογραμματιστεί για άλλη εφαρμογή, πχ δε νοείται ο ελεγκτής ενός πλυντηρίου να τοποθετηθεί σε ένα ψυγείο ως έχει.

Από την άλλη υπάρχει μια σειρά αιτιών που οδήγησαν στην ψηφιοποίηση των βιομηχανικών αυτοματισμών που αρχικά λειτουργούσαν με ρελέ. Όταν χρειάζεται τροποποίηση του αυτοματισμού χωρίς PLC πρέπει να αλλάξει η καλωδίωση. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται ακόμα και αντικατάσταση ολόκληρου του ηλεκτρολογικού πίνακα αυτοματισμού, ενώ με ένα PLC μπορεί να αρκεί αλλαγή μόνο του προγράμματος. Πέρα από την ευελιξία και την οικονομία σε υλικά, είναι πιο εύκολος ο εντοπισμός σφαλμάτων, χάρη στα ενσωματωμένα διαγνωστικά, σε σχέση με την αναζήτηση στο ηλεκτρολογικό σχέδιο και τη χρήση πολυμέτρου. Τα ρελέ ως λογικά bit ενός αυτοματισμού χρησιμοποιούνται ακόμα μόνο σε απλές εφαρμογές όπου αρκούν 1 ή 2 ρελέ, ενδεικτικά.

### 4.1.3. Δομή

Η μορφή ενός PLC είναι αρθρωτή και κατάλληλη για τοποθέτηση σε ράγα ηλεκτρολογικού πίνακα. Διαρθρώνονται σε στοιχεία ξεκινώντας από τη μονάδα επεξεργασίας (CPU) και προσθέτοντας μονάδες εισόδων και εξόδων (I/O) και μονάδες επικοινωνίας για διάφορα πρωτόκολλα. Προαιρετικά μπορεί να υπάρχει και μονάδα τροφοδοσίας 230VAC σε 24VDC αντί για ανεξάρτητο τροφοδοτικό εντός του πίνακα. Επίσης διακρίνονται αφενός σε PLC που η CPU έχει ενσωματωμένα I/O και δικτυακές θύρες αλλά με μικρή ευελιξία στην επιλογή στοιβαζόμενων μονάδων για μικρότερες εγκαταστάσεις και αφετέρου σε PLC με βάση (backplane) όπου κουμπώνουν και συνδέονται η CPU, τα I/O και οι μονάδες επικοινωνίας, με μεγαλύτερη ελευθερία επιλογών.



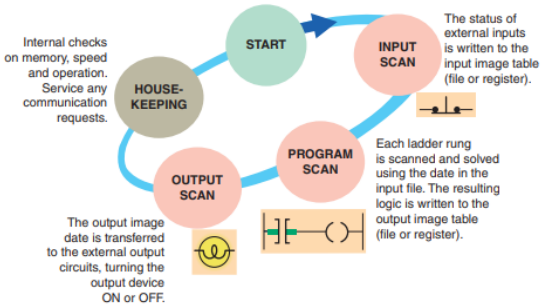

Εικόνα 4.1 Διάρθρωση ενός PLC [15]

#### 4.1.3.1. CPU

Η εσωτερική υλοποίηση μιας CPU είναι κλειστή και αδιαφανής στον προγραμματιστή. Σε αδρές γραμμές, το hardware αποτελείται από έναν μικροελεγκτή, μνήμη RAM για την εκτέλεση και ROM για την αποθήκευση του προγράμματος και δεδομένων, ένα δίαυλο

συστήματος για την επικοινωνία μικροελεγκτή, μνημών και περιφερειακών μονάδων I/O. Επίσης ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου (RTOS) είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία του συστήματος και την εκτέλεση του προγράμματος που έχει αναπτυχθεί και φορτωθεί μέσω του λογισμικού του κατασκευαστή του PLC.

Το προγραμματιστικό μοντέλο βασίζεται στον κύκλο σάρωσης (scan cycle) 3 βημάτων. Πρώτα διαβάζονται από το PLC τα σήματα εισόδων και ενημερώνεται η αντίστοιχη περιοχή μνήμης. Κατόπιν εκτελείται η λογική που έχει φορτώσει ο προγραμματιστής και γράφονται τα αποτελέσματα στην περιοχή μνήμης των εξόδων. Τέλος, οδηγούνται τα κυκλώματα εξόδου σύμφωνα με την ανάγνωση της μνήμης εξόδων. Τυπικά ένας κύκλος έχει διάρκεια της τάξης των λίγων ms.



Εικόνα 4.2 Κύκλος σάρωσης [15]

Ο προγραμματισμός ενός PLC εξαρτάται από το μοντέλο και τον κατασκευαστή του και γενικά δε μπορεί να μεταφερθεί αυτούσιο πρόγραμμα από ένα PLC σε ένα άλλου τύπου. Ωστόσο έχουν τυποποιηθεί 5 γλώσσες προγραμματισμού στο πρότυπο IEC 61131 και κάθε κατασκευαστής υποστηρίζει στα PLC του τουλάχιστον μία εξ αυτών με μικρές παραλλαγές. Η πλέον διαδεδομένη είναι η γλώσσα ladder (LAD) που είναι γραφική και προσομοιάζει τα κυκλώματα κλασικού αυτοματισμού. Επίσης υπάρχει η γλώσσα function block diagram (FBD) που είναι επίσης γραφική και μοιάζει με ψηφιακό σχέδιο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Γραφική είναι και η sequential flow control (SFC) που είναι σαν διάγραμμα ροής (flowchart). Γλώσσες κειμένου είναι η instruction list(IL) που θυμίζει assembly και η structured text language (STL) που ακολουθεί τα πρότυπα γλωσσών όπως η Pascal και η C.

Ο χάρτης μνήμης του προγραμματιστικού μοντέλου είναι δύο τύπων. Ο πιο απλός που απαντάται σε απλούστερα PLC έχει τη μνήμη του χωρισμένη σε προκαθορισμένα, αριθμημένα μπλοκ και ο προγραμματιστής προσαρμόζεται σε αυτά. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχουν διαθέσιμες 1000 μεταβλητές τύπου bit, 100 μεταβλητές τύπου χρονομέτρου, 100 μεταβλητές τύπου μετρητή, 1000 μεταβλητές τύπου 16bit unsigned integer κοκ. Εάν, για παράδειγμα, εξαντληθεί το μπλοκ των μετρητών, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση μετρητή ελεύθερη μνήμη μεταβλητών 16bit unsigned. Η άλλη διάρθρωση της μνήμης ονομάζεται tag based και επιτρέπει στον προγραμματιστή να ορίζει το όνομα και τον τύπο δεδομένων για κάθε μεταβλητή. Το λογισμικό προγραμματισμού αναλαμβάνει την αυτόματη αντιστοίχιση μεταβλητής και θέσης μνήμης.

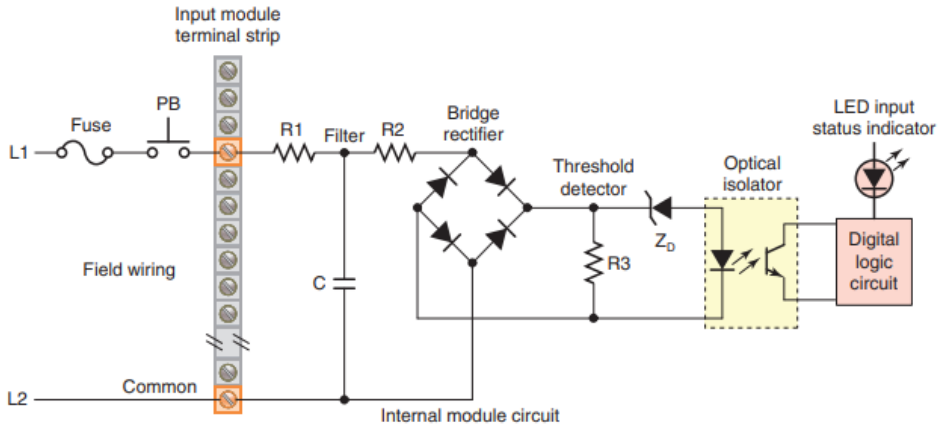
#### 4.1.3.2. I/O - Ψηφιακά

Τα στοιχεία σημάτων εισόδων και εξόδων διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τα ψηφιακά και τα αναλογικά.

Τα πιο απλά σήματα που συνδέονται σε ένα PLC είναι ψηφιακής μορφής, ακριβέστερα δυαδικά σήματα on/off. Πηγάζουν από επιλογικούς διακόπτες, μπουτόν χειριστηρίων και τερματικούς διακόπτες αισθητηρίων ή οδηγούν λυχνίες, ρελέ διεπαφής και βαλβίδες. Στο πρόγραμμα αναπαρίστανται ως bit και επειδή ακριβώς είναι η πιο κοινή μορφή σήματος, εξηγείται γιατί η γλώσσα ladder που ουσιαστικά είναι εκφράσεις Boole είναι η πλέον διαδεδομένη.

Τα επίπεδα τάσης αυτών ποικίλλουν ανά περίπτωση. Τα 230VAC βολεύουν επειδή τροφοδοτούνται άμεσα από το δίκτυο χωρίς τροφοδοτικό και επιπλέον επιτρέπουν μακρύτερες οδεύσεις. Τα 24V, εναλλασσόμενης (AC) ή συνεχούς (DC) τάσης, είναι de facto στάνταρ σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ως ένα ζύγισμα μεταξύ αποδεκτής πτώσης τάσης και ασφάλειας του προσωπικού. Τα 12VDC είναι στάνταρ στις μπαταρίες και για αυτό απαντώνται σε φορητές εγκαταστάσεις, πχ χωματουργικά. Άλλη τυπική τιμή είναι τα 48V. Τα 5V είναι πιο σπάνια και είναι περισσότερο γνώριμα σε επίπεδο πλακέτας.

Στο παρακάτω σχήμα (4.3) απεικονίζεται μια ενδεικτική μορφή κυκλώματος για ένα σήμα εισόδου μορφής εναλλασσόμενης τάσης (AC) (βλ. διακόπτης PB). Σε σειρά με την τροφοδοσία απαιτείται η τοποθέτηση ασφάλειας. Δεξιά της κλέμμας φαίνεται ότι εσωτερικά το πρώτο στάδιο στην κάρτα εισόδου είναι ένα φίλτρο (εδώ ένα RC των R1,C,R2) για απόρριψη του υψίσυχνου θορύβου από το σπινθηρισμό (bounce) όταν κλείνει ο διακόπτης/σήμα PB. κατόπιν το σήμα ανορθώνεται μέσω της γέφυρας και αν η τιμή του είναι σωστή σταθεροποιείται μέσω της Zener και οδηγεί τον οπτοζεύκτη και καταλήγει σε μορφή που μπορούν να χειριστούν τα ηλεκτρονικά της CPU. Ο οπτοζεύκτης επιτυγχάνει απομόνωση των τσιπ από την τάση δικτύου αλλά και βοηθά στην απόρριψη θορύβου. Τέλος, φαίνεται ότι στις κάρτες εισόδου για οικονομία χώρου ομαδοποιούνται πολλές είσοδοι με τον κοινό ακροδέκτη.




Εικόνα 4.3 Απλοποιημένο κύκλωμα εισόδου
AC δυαδικού σήματος [15]

Εάν πρόκειται για εισόδους DC, υπάρχει συνήθως η δέσμευση εάν η κάρτα εισόδου έχει τρανζίστορ pnp ή npn, οπότε υπάρχει η αντίστοιχη δέσμευση στην επιτρεπτή φορά ρεύματος. Απαιτείται άρα συμβατότητα κάρτας εισόδου, αισθητηρίου και συνδεσμολογίας.

Ένα κύκλωμα ψηφιακής εξόδου είναι πιο απλό από το προαναφερθέν. Αντί για στάδια φίλτρου, ανόρθωσης και σταθεροποίησης, υπάρχει είτε ένα τρανζίστορ (για DC εξόδους), είτε μια triac (για AC εξόδους) είτε ένα μικρορελέ. Το τελευταίο είναι πιο αργό από τα 2 πρώτα, αλλά μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερο ρεύμα φορτίου.

Μια ειδική κατηγορία ψηφιακών εισόδων είναι οι ταχείες παλμοσειρές, όπως για παράδειγμα αυτές που πηγάζουν από ταχόμετρα ή κωδικοποιητές (rotary encoder). Όταν απαιτείται η ανίχνευση παλμών διάρκειας μικρότερης από τον κύκλο σάρωσης, χρειάζονται ειδικές κάρτες εισόδου. Αυτές μετράνε ανεξάρτητα από την CPU τους παλμούς εισόδου και όταν έρθει η ώρα το PLC να διαβάσει τις εισόδους μπορεί και το ενημερώνει. Χωρίς αυτές, το PLC θα έχανε σωρηδόν παλμούς μέτρησης.

#### 4.1.3.3. IO - Αναλογικά

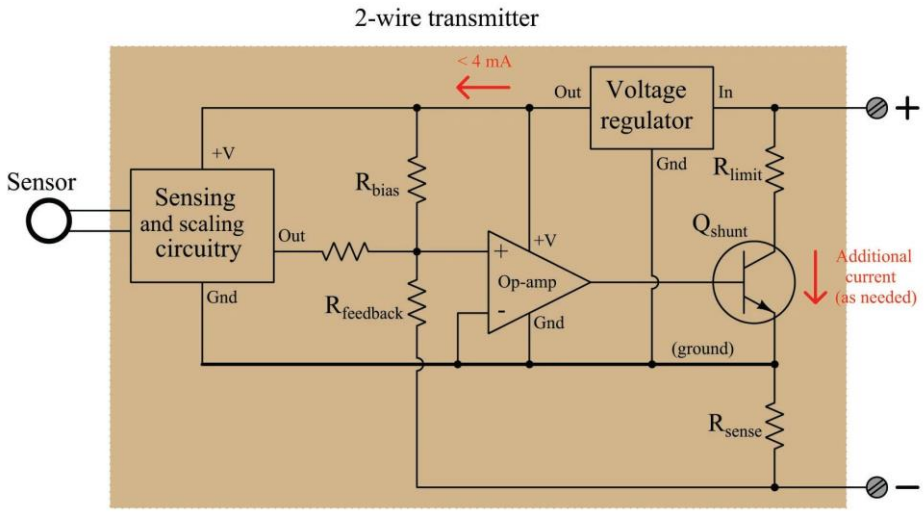
Όταν χρειάζεται να μετρηθεί ή να ελεγχθεί από το PLC κάποια μεταβλητή της διεργασίας, η πλέον διαδεδομένη λύση παραμένουν τα αναλογικά σήματα. Στη μέτρηση πχ, ένας αισθητήρας αναλαμβάνει να μετατρέψει το ζητούμενο φυσικό μέγεθος σε ηλεκτρικό (τάση ή ρεύμα), αυτό μεταδίδεται μέσω των αγωγών και τελικά ανιχνεύεται από το PLC.

Η αναλογική μετάδοση δεν είναι ο μόνος τρόπος χειρισμού αναλογικών μεγεθών. Μια εναλλακτική είναι το αισθητήριο να γεννά μια παλμοσειρά και το μετρούμενο μέγεθος να διαμορφώνει τη συχνότητα αυτής, όπως στα ταχόμετρα. Αντίστροφα, όταν το PLC μεταδίδει μια μεταβλητή ελέγχου, μπορεί να γεννά μια παλμοσειρά σταθερής συχνότητας και να διαμορφώνει το πλάτος αυτής (PWM). Εννοιολογικά πρόκειται για μετάδοση αναλογικού σήματος μέσω ψηφιακής διαμόρφωσης. Άλλος τρόπος είναι η μέτρηση να μεταδίδεται ψηφιακά βάσει κάποιου πρωτοκόλλου επικοινωνίας, πχ Modbus, HART, IO Link κλπ. Όμως εκτός και αν ένας αισθητήρας εκ κατασκευής γεννά μηχανικά παλμοσειρές, τόσο η PWM όσο και η επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου αυξάνουν το κόστος του αισθητηρίου ή της κάρτας IO/δικτύου του PLC.

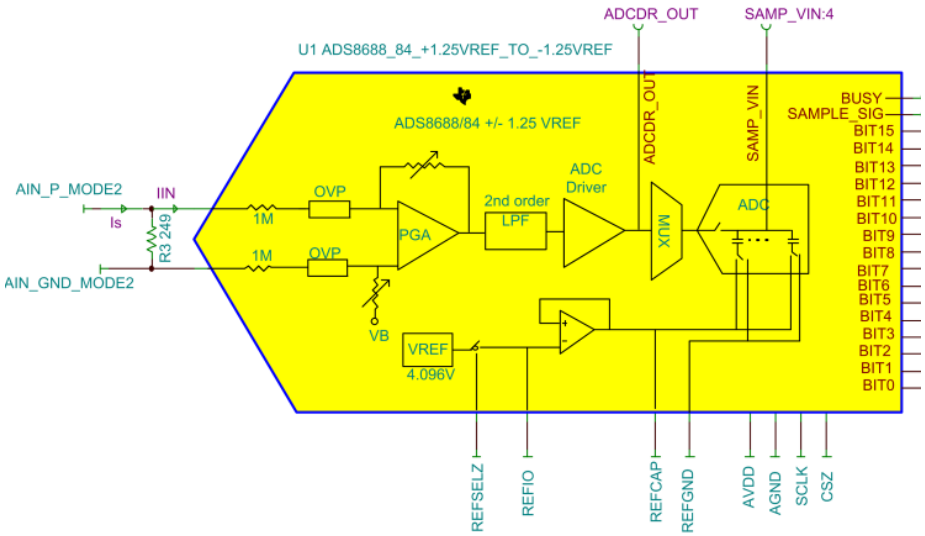
Η μορφή του αναλογικού σήματος που μεταδίδεται είναι είτε ρεύματος, τυπικά σε εύρος 0-20mA ή 4-20mA, είτε τάσης, τυπικά σε εύρος 0-10V. Αν πρόκειται για σήμα εισόδου, εφαρμόζεται σε μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) της κάρτας εισόδου του PLC. Εκεί, αφού δειγματοληφθεί με ορισμένη συχνότητα, κβαντίζεται σε ορισμένη στάθμη βάσει των bit ανάλυσης αυτής και αποθηκεύεται στη μνήμη του μικροελεγκτή ως λέξη ορισμένου μήκους. Η συχνότητα δειγματοληψίας και η ευκρίνεια κβάντισης (σε bit) επιλέγονται κατά την αγορά της κάρτας εισόδου και οι άλλες παράμετροι ως προς την παρουσίαση στο πρόγραμμα του PLC ρυθμίζονται κατά τον προγραμματισμό. Η αντίστροφη διαδικασία ισχύει για τις εξόδους.

Ένα αναλογικό σήμα εισόδου πηγάζει από κάποιον αισθητήρα και συγκεκριμένα από το στάδιο εξόδου του. Ο αισθητήρας δηλαδή δέχεται μια τάση τροφοδοσίας, λειτουργεί εσωτερικά μια αλυσίδα ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, που μπορεί να περιλαμβάνουν και μικροελεγκτή, μέχρι να καταλήξει στο στάδιο εξόδου που εκπέμπει το σήμα που θα λάβει το PLC.

Για τη δημοφιλή περίπτωση αναλογικής εισόδου 4-20mA δισύρματου βρόχου, το κύκλωμα που σχηματίζεται μεταξύ αισθητήρα και εισόδου PLC έχει ως εξής:




Εικόνα 4.4 Πλευρά μεταδότη 4-20mA αισθητήρα [16]



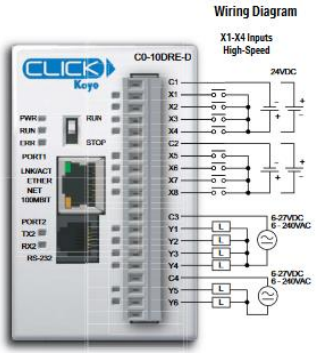

Εικόνα 4.5 Πλευρά εισόδου 4-20mA PLC [17]

Ο βρόχος σχηματίζεται από το στάδιο εξόδου του αισθητήρα (Qshunt), το τροφοδοτικό (δε φαίνεται) και το στάδιο εισόδου του PLC (R3 παράλληλα με το PGA) σε σειρά. Διαρρέεται από ρεύμα που ορίζεται από την πλευρά μεταδότη του αισθητήρας ως εξής: ένα ρεύμα έως 4mA θα διέλθει από το στάδιο εσωτερικής τροφοδοσίας του αισθητήρα (Voltage regulator) για να λειτουργήσει ο ίδιος, ενώ το τρανζίστορ Qshunt θα επιτρέπει τόσο ρεύμα μεταξύ 0 έως 16mA όσο του υπαγορεύει ο εσωτερικός OpAmp (τελεστικός ενισχυτής) που το οδηγεί ώστε το μετρούμενο μέγεθος να αντιστοιχεί ένα προς ένα με το εύρος 4-20mA. Έστω ότι το τροφοδοτικό το βρόχου είναι 24VDC. Τότε ο αισθητήρας λειτουργεί με την ισχύ που παρέχει το ρεύμα έως 4mA για τα εσωτερικά του ηλεκτρονικά και η τάση στους ακροδέκτες του που είναι 24V μείον την πτώση τάσης του αγωγού από το τροφοδοτικό έως τους ακροδέκτες του αισθητήρα.

Στην πλευρά του PLC, το ρεύμα βρόχου διαρρέει την R3 και η πτώση τάσης στα άκρα της είναι η είσοδος ενός ενισχυτή με ρυθμιζόμενο κέρδος (PGA), που αφού φιλτραριστεί (το σήμα είναι πάντα βαθυπερατό) οδηγεί μέσω ενός πολυπλέκτη (για οικονομία υλικού, πολλές είσοδοι χρησιμοποιούν έναν και μοναδικό ADC) τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) και προκύπτει μια λέξη που σε αυτό παράδειγμα είναι 16bit.

Αντίστοιχη είναι η εικόνα και στην αντίστροφη περίπτωση, δηλαδή το PLC να οδηγεί έναν αναλογικό επενεργητή. Διαφοροποιήσεις μπορεί να προκύπτουν ως προς το σκέλος της εσωτερικής υλοποίησης του επενεργητή, για παράδειγμα σε μια αναλογική βαλβίδα αρκεί η ενίσχυση του σήματος και δε χρειάζεται ψηφιοποίηση με ADC.

### 4.1.4. Μοντέλο της διάταξης




Στη διάταξη χρησιμοποιείται η σειρά Click μάρκας Automation Direct. Το μοντέλο είναι το Ethernet Basic PLC, που στην ίδια συσκευή περιλαμβάνονται CPU, 8 ψηφιακές είσοδοι, εκ των οποίων 4 επιτρέπουν γρήγορα σήματα, 6 ψηφιακές έξοδοι τύπου ρελέ καθώς και 2 θύρες επικοινωνίας, μια RJ45 για Ethernet και μια RJ12 για RS232. Υποστηρίζει μέχρι 8 επεκτάσεις που συνδέονται από το πλάι.

Τα υποστηριζόμενα πρωτόκολλα είναι τα Modbus TCP/IP και Ethernet/IP για τη θύρα 1 και τα Modbus RTU και ASCII για τη θύρα 2.

Οι ψηφιακές είσοδοι 1 έως 4 υποστηρίζουν παλμοσειρές συχνότητας μέχρι και 100kHz, με κατάλληλη ρύθμιση στο πρόγραμμα, ενώ οι υπόλοιπες ανιχνεύουν μέχρι τάξης Hz. Η τάση λειτουργίας είναι στα 24VDC.

Προγραμματίζεται σε γλώσσα ladder που διαθέτει 21 εντολές που περιλαμβάνουν υπορουτίνες (βάθους 1), βρόχους for/next (βάθους 1), διακοπές (interrupts), βρόχους ελέγχου PID και αριθμητική κινητής υποδιαστολής. Το λογισμικό προγραμματισμού είναι το λιτό Click programming software. Ο κύκλος σάρωσης μπορεί να είναι κάτω από 1ms, με ταχύτητα μιας απλής εντολής σε 0.2μs. Η μνήμη προγράμματος είναι τύπου Flash ROM μεγέθους 8000 ladder steps, και η μνήμη δεδομένων είναι τύπου SRAM μεγέθους 8000 λέξεων των 16 bit, υποστηριζόμενη από μπαταρία για να κρατάει δεδομένα έως κάποια χρόνια.

Η μνήμη που είναι προσβάσιμη στον προγραμματισμό είναι διαρθρωμένη σε προκαθορισμένη διάταξη μπλοκ όπως παρατίθενται στον πίνακα 4.1 της επόμενης σελίδας.

Πέρα από άμεσες προσβάσεις μνήμης, επιτρέπεται και η έμμεση με τη χρήση δεικτών. Επιτρέπεται μόνο στην εντολή Copy, ο δείκτης πρέπει να είναι μεταβλητή τύπου DS και μπορεί να προσπελάσει όλες τις περιοχές καταχωρητών και δεδομένων πλην των καταχωρητών συστήματος SD. Το σχήμα αυτό χρησιμοποιείται για τη χρήση ενός εύρους θέσεων μνήμης ως πίνακα.

Η αρίθμηση των προκαθορισμένων θέσεων μνήμης είναι σε δεκαδική και όχι σε δεκαεξαδική μορφή. Ειδικά αρίθμηση των ψηφιακών εισόδων εξόδων δεν είναι ένα συνεχές εύρος αλλά χρησιμοποιεί την εξής κωδικοποίηση: (X ή Y) (μονάδα I/O) (σημείο). Για παράδειγμα, η μεταβλητή bit X216 είναι η 16 είσοδος της 2ης μονάδας επέκτασης. Ως μονάδα 0 λογίζεται το βασικό module της CPU με τα ενσωματωμένα I/O.

| | Όνομα περιοχής μνήμης | Σύμβολο | Τύπος Δεδομέ-νων | Εύρος θέσεων μνήμης | Περιγραφή |
|---|---|---|---|---|---|
| **Bit/flags** | Εισόδων | X | bit | X001-X816 | Ψηφιακές είσοδοι |
| | Εξόδων | Y | | Y001-Y816 | Ψηφιακές έξοδοι |
| | Βοηθητικά | C | | C1-C2000 | Εσωτερικά, βοηθητικά bit |
| | Χρονικών | T | | T1-T500 | Γίνεται “1” όταν η τιμή του χρονικού ισούται με τον στόχο |
| | Μετρητών | C | | CT1-CT250 | Γίνεται “1” όταν η τιμή του μετρητή ισούται με τον στόχο |
| | Συστήματος | SC | | SC1-SC1000 | Status bits λειτουργιών συστήματος |
| **Καταχωρητές** | Εισόδων | XD | hex 16bit | XD0-XD8 | Όλα τα bit της αντίστοιχης επέκτασης εισόδου |
| | Εξόδων | YD | hex 16bit | YD0-YD8 | Όλα τα bittης αντίστοιχης επέκτασης εξόδου |
| | Χρονικών | TD | signed int 16bit | TD1-TD500 | Η τρέχουσα τιμή κάθε χρονικού |
| | Μετρητών | CTD | signed int 32bit | CTD1-CTD250 | Η τρέχουσα τιμή κάθε μετρητή |
| | Συστήματος | SD | signed int 16bit | SD1-SD1000 | Τιμές παραμέτρων συστήματος |
| **Δεδομένα** | Ακεραίων | DS | signed int 16bit | DS1-DS4500 | Είναι μεταβλητές γενικών δεδομένων σε διάφορες μορφές |
| | Logn ακεραίων | DD | signed int 32bit | DD1-DD1000 | |
| | Δεκαεξαδικού | DH | hex 16bit | DH1-DH500 | |
| | Κινητής υποδιαστολής | DF | float 32bit | DF1-DF500 | |
| | Χαρακτήρα | TXT | char | TXT1-1000 | |

Πίνακας 4.1 Προκαθορισμένη διάρθρωση περιοχών μνήμης του CLICK

### 4.1.5. Μεταβλητές (tags) PLC της διάταξης

Παρατίθενται συγκεντρωτικά ο χάρτης μνήμης με τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα του PLC όπως εξήχθησαν από το CLICK Programming Software. Αναγράφονται η διεύθυνση της εκάστοτε θέσης μνήμης, ο τύπος της μεταβλητής, το όνομά της, η αρχική της τιμή και μια περιγραφή.

| **Διευθ.** | **Τύπος** | **Όνομα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|---|
| X001 | BIT | FLMTR | Flow meter, high speed (min 4,5ms, nominal 18ms) |
| X002 | BIT | PHIGH | Pressure switch, high |
| X003 | BIT | PLOW | Pressure switch, low |
| X004 | BIT | ESTOP | Emergency stop |
| Y001 | BIT | MOT | Air motor's valve |
| Y002 | BIT | PMP | Pump's flow valve |
| C1 | BIT | SSTART | Software start (HMI) |
| C2 | BIT | SSTOP | Software stop (HMI) |
| C3 | BIT | RUN | RUN/(STOP)' status |
| C4 | BIT | SSTART_ | Software start/(stop)', NO. |
| C6 | BIT | TNK1FULL | Tank 1 is full. |
| C7 | BIT | M1_CANRUN | Pump is allowed to run. |
| C8 | BIT | M1_AIROK | Air pressure within bounds. |
| C9 | BIT | M1_RUN | Pumps is running. |
| C12 | BIT | M2_FLAG | Set from HMI, equivalent of SSTART_DEADM |
| C13 | BIT | M2_CANRUN | Pump is allowed to run. |
| C14 | BIT | M2_AIROK | Air pressure within bounds. |
| C15 | BIT | M2_RUN | Pumps is running. |
| C16 | BIT | M2_UNEXPECTED | For monitoring, pump is shut but still flowing. Expected for a few seconds. |
| C19 | BIT | SMODE_M1 | Software selector switch for mode 1. |
| C20 | BIT | SMODE_M2 | Software selector switch for mode 2. |
| C21 | BIT | SMODE_M3 | Software selector switch for mode 3. |
| C24 | BIT | Interval_rst | High speed timer reset. |
| C25 | BIT | TRUE | Constant. |
| C26 | BIT | FALSE | Constant. |

Πίνακας 4.2 Χάρτης μνήμης προγράμματος PLC της διάταξης

| Διευθ. | Τύπος | Όνομα | Περιγραφή |
|---|---|---|---|
| C27 | BIT | LVL_COMM_SUC | Level sensor reading successful. |
| C28 | BIT | LVL_COMM_ERR | Level sensor reading failed. |
| C29 | BIT | LVL_COMM_REC | Level sensor reading in progress. |
| C30 | BIT | LVL_INSTLD | [HMI] Is the lvl sensor installed? |
| C31 | BIT | LVL_UNEXPTD | Unexpected measurement from level sensor. |
| C35 | BIT | M3_AIROK | |
| C36 | BIT | M3_DRY | |
| C37 | BIT | M3_CANRUN | |
| C38 | BIT | M3_FLAG | |
| C39 | BIT | M3_RUN | |
| T1 | BIT | M1_DRY | Dry run, aka no flow for some time. |
| T2 | BIT | M2_DRY | Dry run, aka no flow for some time. |
| T3 | BIT | PC_OVER | Pulses' cycle stopwatch. |
| T4 | BIT | LVL_RD | Read level sensor per defined sampling rate. |
| T5 | BIT | LVL_WATCHOG | True when laser's comm is lost. |
| CT1 | BIT | M2_DOSCOMPLT | Dosing in complete. |
| CT2 | BIT | PC_OVRFL | Pulses' measurement cycle complete. |
| DS1 | INT | DRY_SP | Dry run if that much time w/o flow. |
| DS2 | INT | ZERO | Constant. |
| DS3 | INT | M2_DOSPULS | [HMI set] Pulses to reach before shutting down. |
| DS4 | INT | PPC | [const] Pulses per flowmeter measurement cycle. |
| DS5 | INT | FLMTR_BUF_INDX | Index of flowmeter readings' buffers. |
| DS6 | INT | LVL_MM | Level measurement in mm. |
| DS7 | INT | LVL_OVRFL_SP | [HMI] Depth @ overflow. |
| DS8 | INT | LVL_BUF_INDX | Index of level readings' buffers. |
| DS9 | INT | LVL_MAVG | Level measurement moving average. |
| DS10 | INT | LVL_RD_RAW | Sample read from sensor. |
| DS11 | INT | LVL_MM_PREV | Compare to check slew rate. |

Πίνακας 4.2 Χάρτης μνήμης προγράμματος PLC της διάταξης (συνέχεια)

| **Διευθ.** | **Τύπος** | **Όνομα** | **Περιγραφή** |
|---|---|---|---|
| DS12 | INT | LVL_MM_MAXEXPECT | Max expected distance 1" after LVL_MM_PREV was read. |
| DS101 | INT | LVL_BUFF_START | |
| DS110 | INT | LVL_BUFF_STOP | |
| DD1 | INT2 | Interval1_Time | Distance between last 2 recorded flowmeter pulses. |
| DF1 | FLOAT | LPM | Measured liters per minute. |
| DF101 | FLOAT | FLMTR_BUF_0 | |

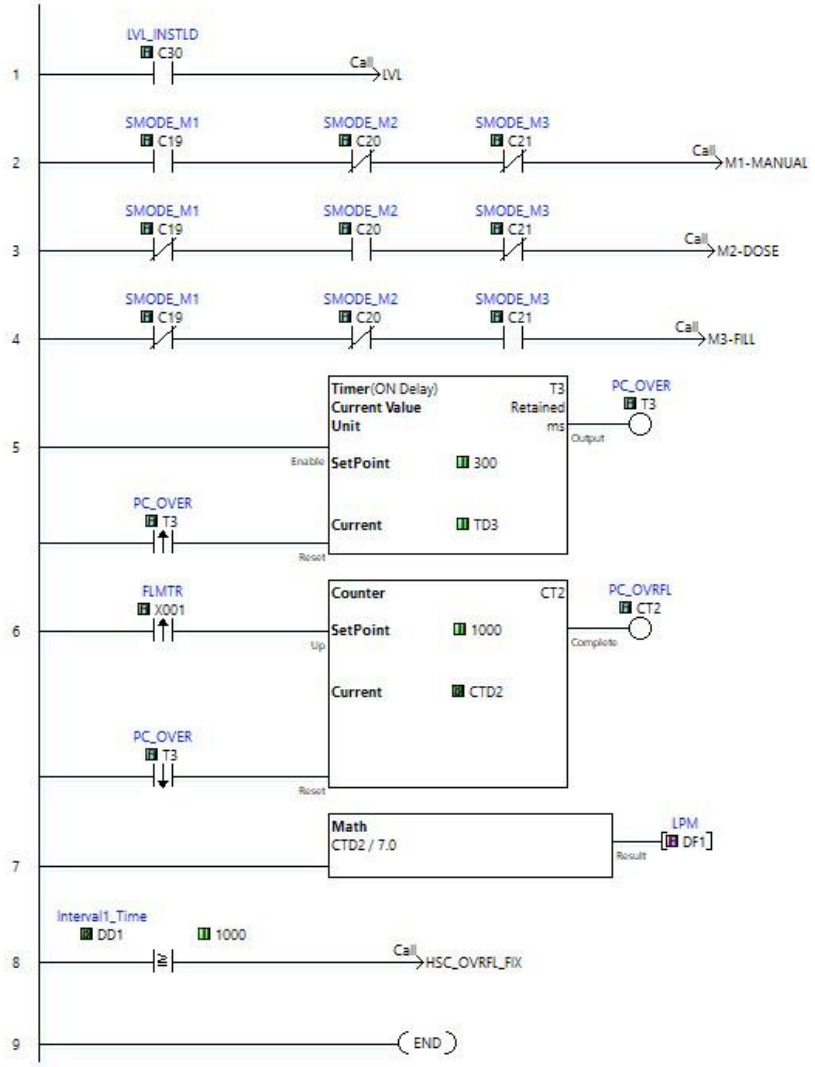
Πίνακας 4.2 Χάρτης μνήμης προγράμματος PLC της διάταξης (συνέχεια)

### 4.1.6. Πρόγραμμα PLC

Στις ακόλουθες σελίδες παρουσιάζεται ο κώδικας του προγράμματος PLC με την επεξήγησή του.

#### 4.1.6.1. Main

Παρακάτω φαίνεται το κυρίως πρόγραμμα με όλες τις κλήσεις σε υπορουτίνες. Προτιμήθηκε η διάσπαση του προγράμματος σε υπορουτίνες έναντι ενός μεγάλου και αδιαίρετου για να είναι πιο ευανάγνωστο, διαιρεμένο σε συνεκτικά τμήματα.




Αρχικά, εάν στην οθόνη (HMI) έχει δηλωθεί ότι εγκαταστάθηκε αισθητήρας στάθμης, γίνονται οι έλεγχοι ώστε να υπολογιστεί εάν επιτρέπεται να αντληθεί υγρό στο δοχείο ή εάν υπάρχει πρόβλημα. Το πρόβλημα μπορεί να είναι είτε ότι έχει γεμίσει, είτε ότι χάθηκε η επικοινωνία με τον αισθητήρα άρα το PLC "τυφλώθηκε" είτε ότι υπάρχει ανωμαλία άρα αναξιοπιστία στη μέτρηση. Και οι 3 περιπτώσεις συμπυκνώνονται στο σήμα TNK1FULL.

Έπειτα με βάση την τριάδα σημάτων SMODE που συμπληρώνει η οθόνη, εκτελούνται οι εργασίες του επιλεγμένου τρόπου λειτουργίας.

Στις επόμενες 3 γραμμές υπολογίζεται η τρέχουσα ροή σε λίτρα ανά λεπτό (lpm) ως εξής: 1400 παλμοί ροομέτρου αντιστοιχούν σε 1 λίτρο, άρα 7 παλμοί ανά 300ms αντιστοιχούν σε 1 lpm, με αναγωγές τέτοιες ώστε να διατηρούμε ακεραίους για ακρίβεια. Άρα τα μετρημένα lpm είναι οι παλμοί που μετρήθηκαν σε 300ms διά του 7. Πρόκειται για μ.ό. σε παράθυρο 300ms.

Η μέτρηση αυτή χρησιμοποιείται για την περίπου real-time απεικόνισης στην οθόνη (σε ένα μιμικό ροομέτρου στα γραφικά), άρα υστέρηση έως και 1" δεν κρίνεται απαγορευτική ή ενοχλητική. Όμως, προσφέρει ακατάλληλη ευκρίνεια σε γραφική παράσταση. Γι' αυτό το λόγο, σε άλλη ρουτίνα εκτελείται 2ος τρόπος υπολογισμού της ροής, που προσφέρει τη μέγιστη ευκρίνεια στη γραφική παράσταση.

Γενικά, παρότι δεν είναι πρόβλημα εν προκειμένω, το βάθος ενός ψηφιακού φίλτρου, όπως είναι αυτό του μ.ό., γεννά καθυστέρηση στο χρόνο απόκρισης. Επίσης, ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίζει και καθυστέρηση χρόνου απόκρισης και ευκρίνεια κυματομορφής ενός μεγέθους.

#### 4.1.6.2. LVL

Στην υπορουτίνα αυτή υπολογίζεται το bit TNK1FULL που ελέγχουν οι υπόλοιπες υπορουτίνες ως συνθήκη σφάλματος.

Αρχικά γίνεται δειγματοληψία απόστασης πάνω άκρου- στάθμης, ανά 100ms. Η μέτρηση λαμβάνεται στέλνοντας μήνυμα Modbus μέσω TCP/IP στον αισθητήρα laser. Ο ρυθμός δειγματοληψίας (άρα και αιτημάτων) επιλέχθηκε με το εξής σκεπτικό:

Όταν λειτουργεί η αντλία σε κανονικές συνθήκες, μετρήθηκε ρυθμός ανόδου στάθμης στα 1cm/ 2,5". Τότε χωρίς επεξεργασία της μέτρησης:

- άνω όριο: στο δεδομένο ρυθμό ανόδου, η στάθμη της προβλεπόμενης υπερχείλισης από την διαρροή από το καπάκι στο άνω άκρο απέχουν ~5". Για παν ενδεχόμενο, επιλέγεται αυθαίρετα ένα πιο σφιχτό όριο στο 1" (και όχι το οριακό 5"). Δηλαδή έστω ότι επιτρέπεται να μείνει τυφλό το PLC από μέτρηση στάθμης για έως και 1", αλλά όχι παραπάνω, από φόβο μη σε περίπτωση που η στάθμη κινείται στα όρια της υπερχείλισης βρεθεί στο διάστημα αυτό στο όριο της διαρροής. Τότε θα αρκούσε ρυθμός δειγματοληψίας ανά 1". Στο δε γράφημα θα είχαμε ευκρίνεια 4mm που είναι αποδεκτό.
- κάτω όριο: με το πρόγραμμα Wireshark μετρήθηκε ο χρόνος απόκρισης του αισθητήρα σε μηνύματα Modbus στα 45+-7ms (μ.ό. +- τυπ. αποκλ.). Άρα υποθέτοντας κανονική κατανομή, έχουμε 99.7% πιθανότητα επιτυχούς λήψης σε ρυθμό 1 μήνυμα ανά 45+3*7=66ms.

  Αν προστεθεί φίλτρο κινητού μ.ό. βάθους 10 δειγμάτων
- Εάν η ροή είναι σταθερή, τότε το φίλτρο γεννά καθυστέρηση 5 δειγμάτων στην ανάγνωση της στάθμης..
- Εάν η στάθμη , με εξωτερική παρέμβαση, μεταβληθεί ακαριαία, το φίλτρο γεννά καθυστέρηση 10 δειγμάτων στην ανάγνωση της στάθμης.
- Στην πρώτη περίπτωση, ο επιθυμητός χρόνος απόκρισης του μέχρι 1" καλύπτεται και με ρυθμό δειγματοληψίας 200ms, στη δεύτερη και χειρότερη περίπτωση καλύπτεται με 100ms.

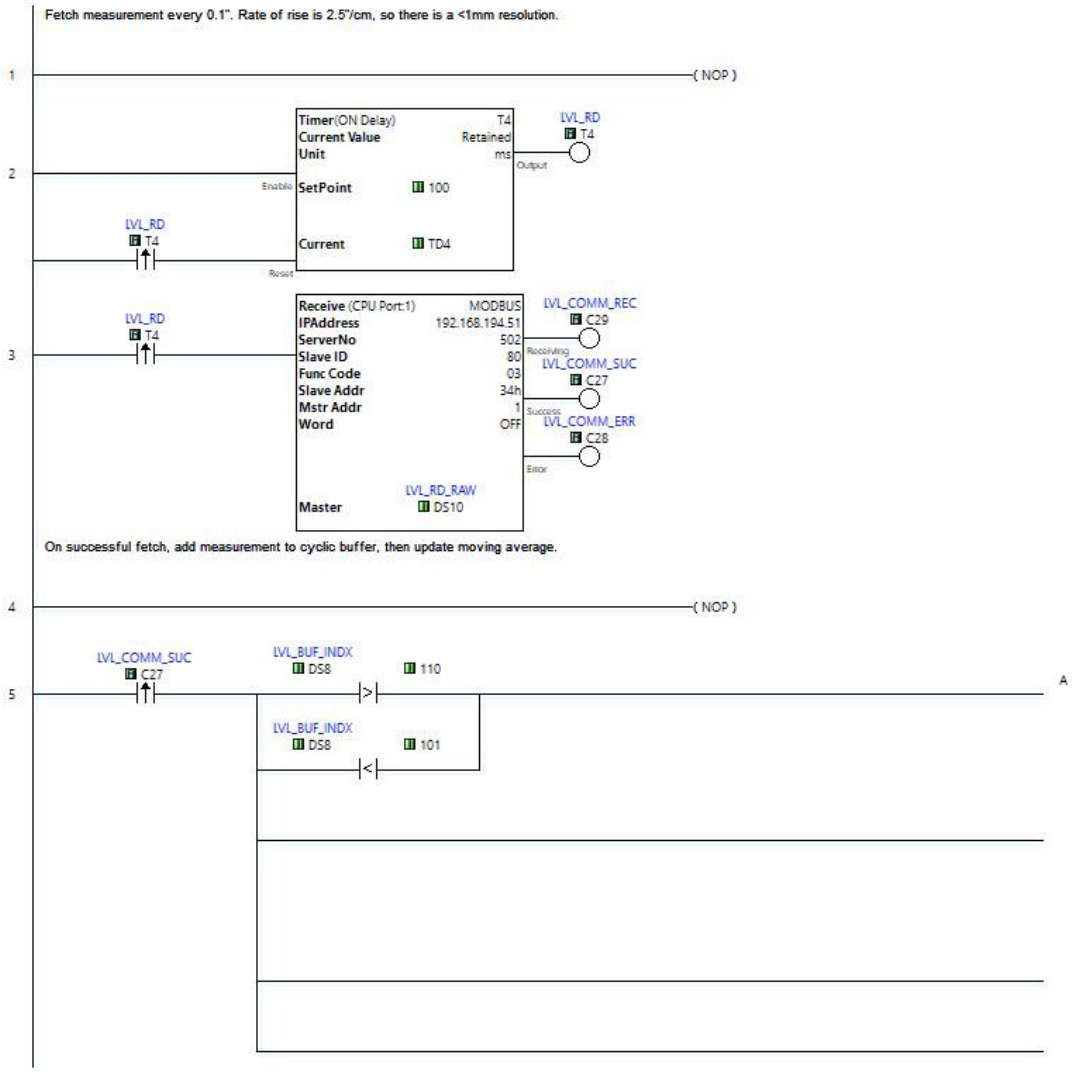
Συνεπώς τα 100ms για δειγματοληψία του laser δίνουν στη χειρότερη περίπτωση 1” καθυστέρηση μέτρησης στάθμης, που κρίνεται επιτρεπτό, αλλά είναι και κοντά στο όριο του χρόνου διεκπεραίωσης ενός Modbus αιτήματος.

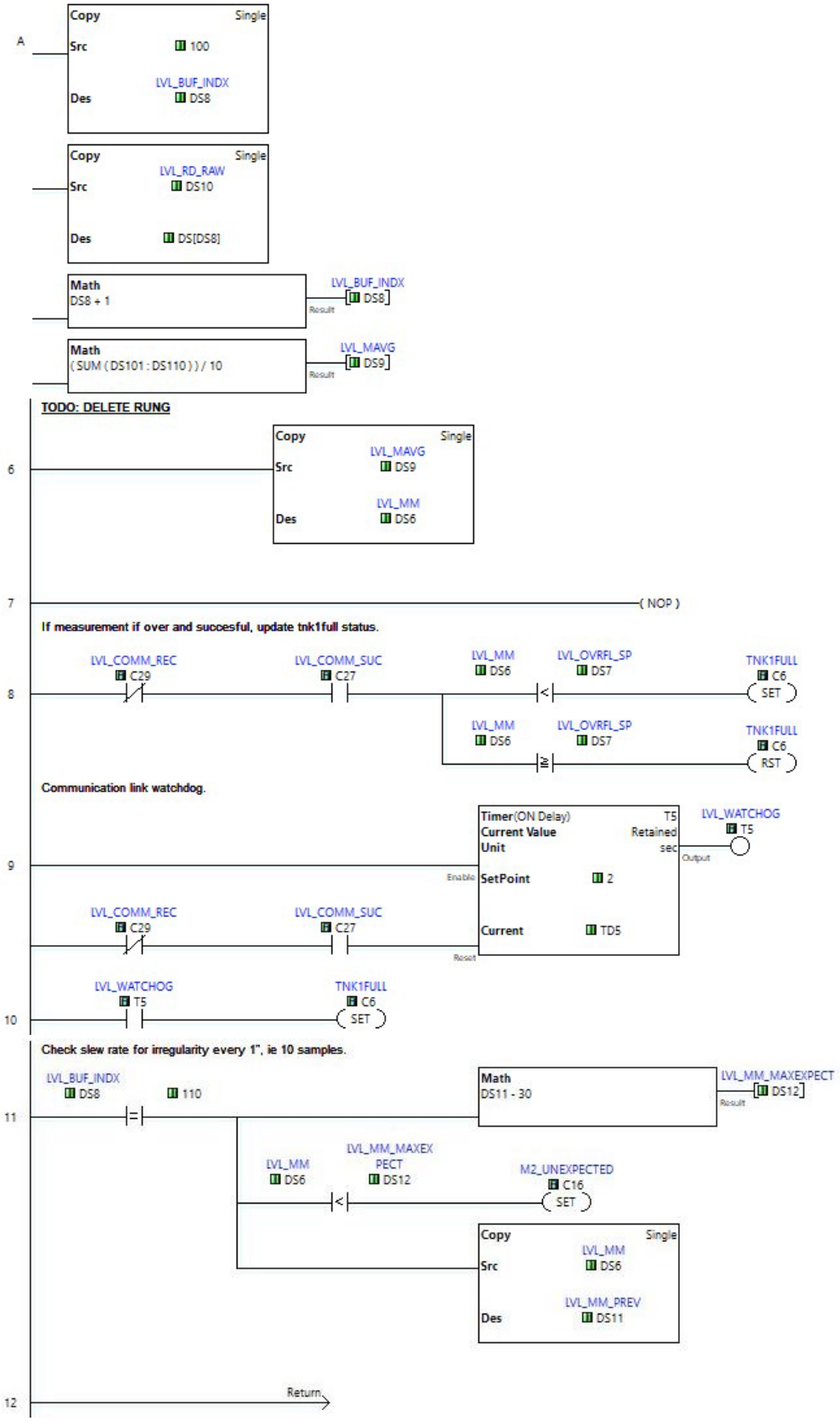
Στη γραμμή 5 υλοποιείται το φιλτράρισμα της μέτρησης με τον κινούμενο μέσο όρο. Κρίθηκε απαραίτητο επειδή η μέτρηση είναι ασταθής κατά κάποια χιλιοστά, ακόμα και με την εισαγωγή πλωτήρα στο δοχείο έναντι άμεσης παρατήρησης του υγρού. Παρατηρήθηκε ότι χωρίς τον πλωτήρα το laser μπορεί να δυσκολευτεί να διακρίνει την επιφάνεια από τον πυθμένα του υγρού.

Όταν υπάρξει επιτυχής λήψη δείγματος, τότε αποθηκεύεται εντός του μπλοκ μνήμης DS100-DS110 με δείκτη της επόμενης θέσης τον LVL_BUF_INDX. Το buffer είναι κυκλικό και υλοποιείται εκτελώντας την πράξης LVL_BUF_INDX = 100 + (LVL_BUF_INDEX + 1)mod10.

Για να αποκλειστεί το ενδεχόμενο να έχει χαθεί η επικοινωνία με το laser και η αντλία να υπερχειλίσει το δοχείο από το καπάκι του, υπάρχει ένα χρονόμετρο σε ρόλο watchdog στα 2”.

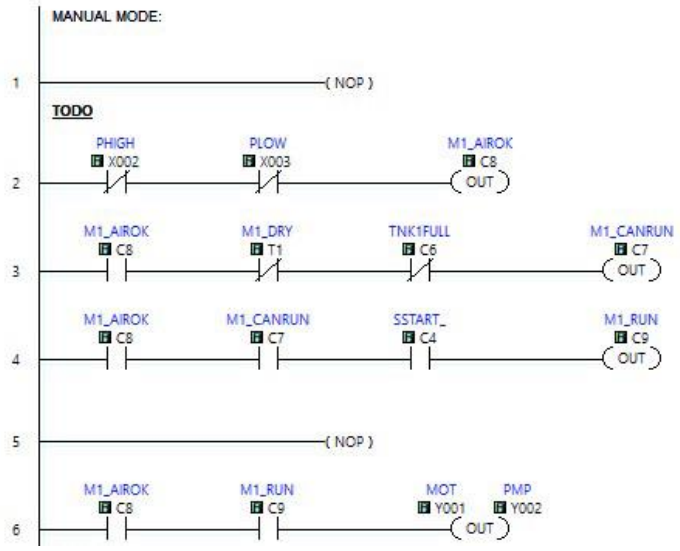
Επίσης εάν ο ρυθμός ανόδου είναι 30mm/sec που είναι πολύ μεγαλύτερος από τον μετρημένο 4mm/sec, τότε μανδαλώνει το bit M2_UNEXPECTED. Επαναφορά του γίνεται από την οθόνη, μέσω ενέργειας του χειριστή.




A
Copy
Single
Src
100
LVL_BUF_INDX
Des
DS8
Copy
Single
LVL_RD_RAW
Src
DS10
Des
DS[DS8]
Math
DS8 + 1
LVL_BUF_INDX
DS8
Result
Math
( SUM ( DS101 : DS110 ) ) / 10
LVL_MAVG
DS9
Result
TODO: DELETE RUNG
6
Copy
Single
LVL_MAVG
Src
DS9
LVL_MM
Des
DS6
7
( NOP )
If measurement if over and succesful, update tnk1full status.
8
LVL_COMM_REC
C29
LVL_COMM_SUC
C27
LVL_MM
DS6
LVL_OVRFL_SP
DS7
TNK1FULL
C6
SET
LVL_MM
DS6
LVL_OVRFL_SP
DS7
TNK1FULL
C6
RST
Communication link watchdog.
9
Timer(ON Delay)
T5
Current Value
Retained
Unit
sec
Enable
SetPoint
2
Current
TD5
Reset
LVL_WATCHOG
T5
Output
LVL_COMM_REC
C29
LVL_COMM_SUC
C27
10
LVL_WATCHOG
T5
TNK1FULL
C6
SET
Check slew rate for irregularity every 1", ie 10 samples.
11
LVL_BUF_INDX
DS8
110
Math
DS11 - 30
LVL_MM_MAXEXPECT
DS12
Result
LVL_MM
DS6
LVL_MM_MAXEXPECT
DS12
M2_UNEXPECTED
C16
SET
Copy
Single
LVL_MM
Src
DS6
LVL_MM_PREV
Des
DS11
12
Return

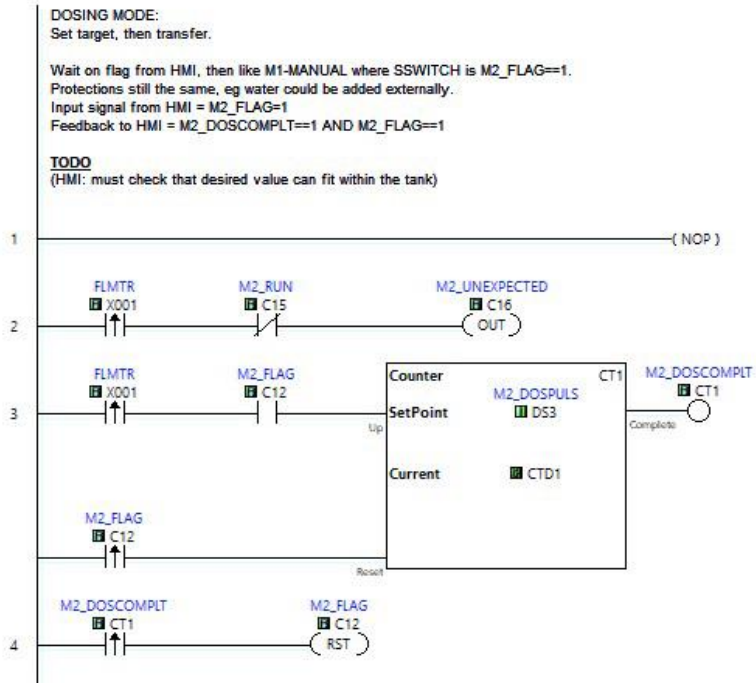
### 4.1.6.3. M1-MANUAL

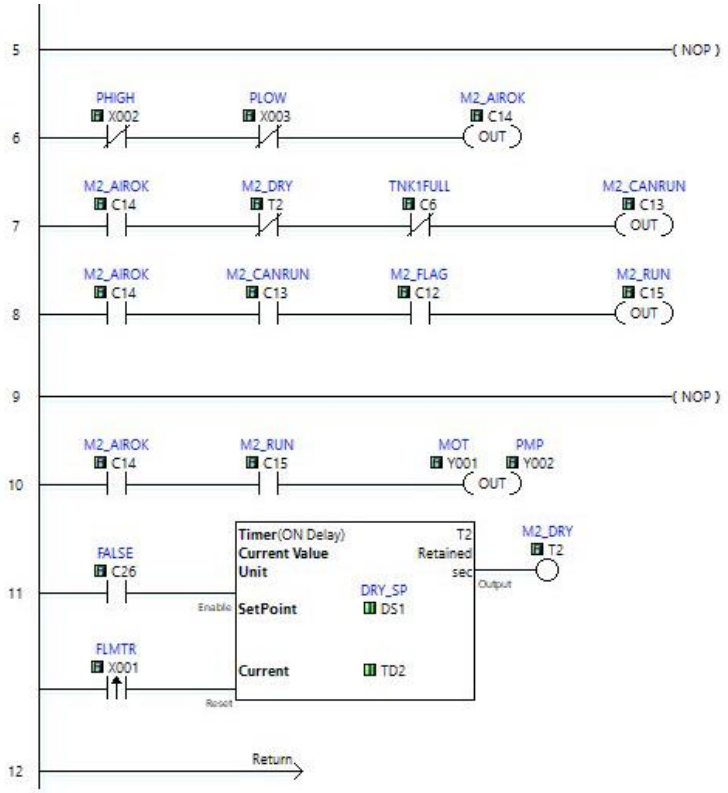
Σε αυτή τη λειτουργία το PLC δέχεται ένα σήμα on/off από το χειριστή, εν είδη υποβοηθούμενης χειροκίνητης λειτουργίας. Δηλαδή θα ενεργοποιηθούν οι 2 βαλβίδες για την άντληση, αλλά θα ελεγχθεί πρώτα ότι η πίεση του αέρα είναι εντός ορίων μέσω των 2 πρεσσοστατών και ότι με βάση τη μέτρηση στάθμης υπάρχει περιθώριο άντλησης.




### 4.1.6.4. M2-DOSE

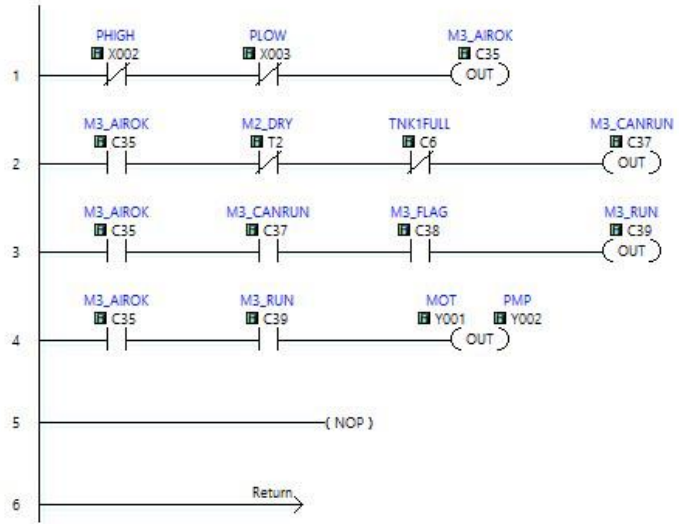
Σε αυτή τη λειτουργία το PLC δοσομετρά ορισμένη ποσότητα υγρού μέχρι να σταματήσει η άντληση. Πάλι ελέγχει ότι η πίεση του αέρα είναι εντός ορίων μέσω των 2 πρεσσοστατών, ότι με βάση τη μέτρηση στάθμης μπορεί να αντλήσει και ότι έχει λάβει σήμα χειριστή από την οθόνη. Αυτή τη φορά προστίθεται ένας μετρητής, με το στόχο του M2_DOSPULS να γράφεται από την οθόνη, που όταν ολοκληρωθεί γράφει στο bit M2_FLAG που διαβάζει η οθόνη για feedback και σβήνει την αντλία.






### 4.1.6.5. M3-FILL

Χρησιμοποιείται για τη λειτουργία γεμιστικής μηχανής.




### 4.1.6.6. FLMTR_BUFFER

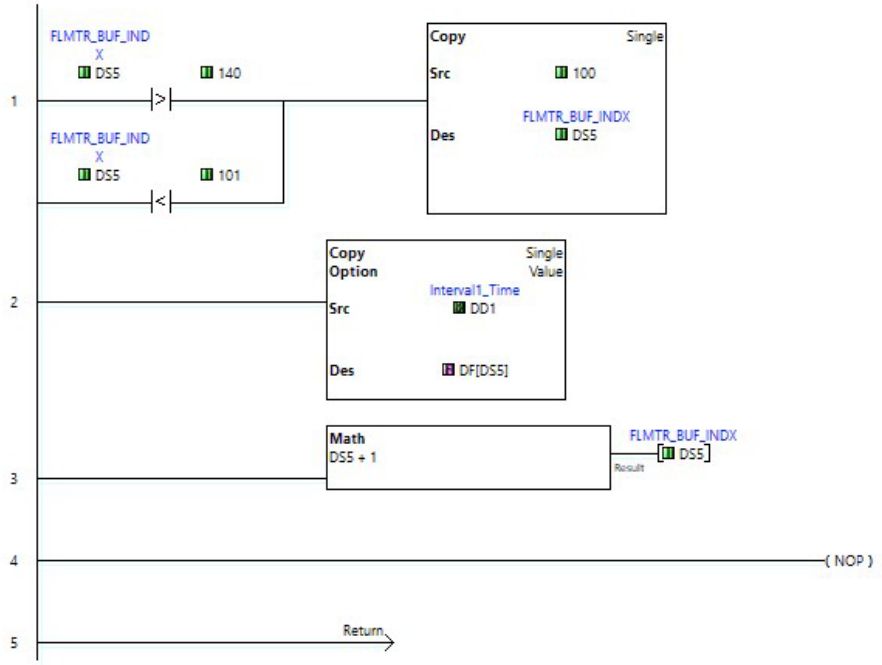
Παρότι στη ρουτίνα main υπολογίζεται η μέση ροή ανά 300ms, για μεγαλύτερη ευκρίνεια στη γραφική αναπαράσταση στην οθόνη χρησιμοποιείται παράλληλα δεύτερος υπολογισμός βάσει στιγμιαίας ροής.

Για να μπορεί να υπολογίζεται με μέγιστη ακρίβεια η ροή, έχει ρυθμιστεί η είσοδος του ροομέτρου ως ταχύρρυθμη. Μέσω ενσωματωμένων ρυθμίσεων του PLC, έχει οριστεί ότι σε

κάθε παλμό που δέχεται, τρέχει χρονόμετρο που μετρά τα ms που παρήλθαν από τον προηγούμενο παλμό και εκτελείται ως διακοπή η υπορουτίνα FLMTR_BUFFER. Η τιμή του χρονομέτρου βρίσκεται στη θέση DD1.

Στην υπορουτίνα αυτή αποθηκεύεται η απόσταση μεταξύ παλμών σε κυκλικό buffer 40 θέσεων. Το buffer αυτό θα χρησιμοποιηθεί κατόπιν στην πλευρά της οθόνης για την απεικόνιση της ροής με τη μέγιστη ευκρίνεια.

Η αναγκαιότητα του buffer για το σκοπό αυτό έγκειται στην ταχύτητα της παλμοσειράς από το ροόμετρο σε σχέση με την επικοινωνία μέσω Modbus TCP/IP. Για τη μέτρηση στάθμης από το laser χρησιμοποιείται ενσωματωμένη λειτουργία της οθόνης χωρίς κώδικα που δειγματοληπτεί κάθε κάποιες εκατοντάδες ms μέσω Modbus και απεικονίζει ικανοποιητικά τη μέτρηση σε γράφημα. Όμως το κάτω όριο που θέτει το software προγραμματισμού της είναι τα 100ms. Αλλά ακόμα και εκτός οθόνης, μετρήθηκε μέσω Wireshark[10] ότι οι απαντήσεις του PLC σε Modbus μηνύματα της οθόνης είναι της τάξης κάποιων ms, με αυτά τα 2 να συνδέονται σχεδόν άμεσα με μόνο ένα switch να μεσολαβεί. Από την άλλη, οι παλμοί του ροόμετρο, αν λειτουργούσε η διάταξη χωρίς στραγγαλιστή ροής στο υδραυλικό σκέλος, μπορούν να φτάσουν περίπου τα 100Hz. Συνεπώς η πιο συνετή προσέγγιση είναι το PLC που εκτελεί εργασίες με γρήγορες οντότητες όπως το ροόμετρο να συσσωρεύει σε πακέτα τα δεδομένα που σε μεγαλύτερο όγκο αλλά με μικρότερο ρυθμό διαβάζουν πιο αργές οντότητες όπως η οθόνη.




[10] Λογισμικό καταγραφής και ανάλυσης δικτυακής κίνησης

## 4.2. HMI

### 4.2.1. Γενικά

Στους βιομηχανικούς αυτοματισμούς, η αλληλεπίδραση ανθρώπου μηχανής ή HMI (human machine interface) είναι οντότητα με σκοπό την εποπτεία και τον έλεγχο μιας διεργασίας από το χειριστή της. Απαντώνται συνήθως σε 2 μορφές, είτε ως λογισμικό που εκτελείται σε PC ή ως συμπαγής συσκευή βιομηχανικού PC και οθόνης αφής που τοποθετείται σε πρόσοψη πάνελ. Όπως τα PLC δημιουργήθηκαν για να αντικαταστήσουν τα κυκλώματα με ρελέ, τα HMI αντικαθιστούν τους διακόπτες, τα μπουτόν, τις λυχνίες και τους μετρητές στα ερμάρια ή εν γένει τα πάνελ

Τα σενάρια χρήσης στα οποία ανταποκρίνονται περιλαμβάνουν τη γραφική επισκόπηση μιας διεργασίας, την ανάγνωση και εγγραφή παραμέτρων του PLC, προβολή συναγερμών, καταγραφή ιστορικού συμβάντων, παρουσίαση γραφημάτων μεγεθών της διεργασίας, εκτέλεση διαγνωστικών ελέγχων καθώς και παράκαμψη του αυτοματισμού για χειροκίνητο έλεγχο.

Πέρα από την επικοινωνία προς τα κάτω με PLC ή δικτυωμένα I/O της διεργασίας μέσω κάποιου fieldbus (Modbus, Profibus, Ethernet/IP κλπ.), μπορούν να επικοινωνούν προς τα πάνω με συστήματα SCADA ή historians (βλ. 5.2.1) μεταξύ άλλων, μέσω πρωτοκόλλων όπως το OPC ή το MQTT.

Για να λογίζεται μια συσκευή ή ένα software ως HMI και όχι κάποιο γραφικό γενικής χρήσης, πρέπει να συνοδεύεται από λογισμικό προγραμματισμού που παρέχει έτοιμες στον αυτοματιστή μια σειρά λειτουργιών. Αρχικά να μπορεί να συνδεθεί σε PLC ή SCADA, να έχει δηλαδή drivers για Modbus, OPC κλπ. Επίσης να μπορεί να χειρίζεται, ιδανικά σε μορφή βάσης δεδομένων, τα tags/μεταβλητές του PLC με το οποίο συνδέεται. Ως προς τη σχεδίαση, πρέπει να παρέχει κάποιο τρόπο ορισμού προβολών και διάταξης γραφικών αντικειμένων εντός αυτής. Και σε κάθε αντικείμενο να αντιστοιχιστεί μια ενέργεια παρασκηνίου, όπως η εγγραφή ορισμένης τιμής στο PLC που ελέγχει.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές PLC διαθέτουν και HMI τα οποία συνδέονται μεταξύ τους, σαν το HMI να είναι μια προέκταση του προγραμματισμού PLC, σε μια ενιαία πλατφόρμα προγραμματισμού. Υπάρχουν ωστόσο και άλλοι που κατασκευάζουν αμιγώς HMI, που διαθέτουν όσο περισσότερους drivers γίνεται για να υποστηρίζουν τα περισσότερα PLC της αγοράς.

### 4.2.2. Μοντέλο της διάταξης

Στην παραδοτέα κατασκευή χρησιμοποιείται το μοντέλο MT8050iE μάρκας Weintek. Είναι συσκευή που τοποθετείται στην πρόσοψη ηλεκτρολογικού ερμαρίου και διαθέτει οθόνη αφής 4.3”. Στηρίζεται σε 32bit επεξεργαστή Cortex A8 στα 600MHz και μνήμες flash και RAM των 128MB εκάστη, σε πλακέτα με επίστρωση για καλύτερη αντοχή σε υγρασία, σκόνη και διάβρωση. Η στεγανότητά της είναι βαθμού IP65.

Διαθέτει 2 θύρες επικοινωνίας, μία σειριακή για RS232 και RS485 μέσω βύσματος DB9 με οπτική απομόνωση για προστασία και μια για Ethernet

(100BaseT) με RJ45, καθώς και μια θύρα USB για σύνδεση περιφερειακών. Υποστηρίζει 300 τύπους συσκευών PLC μέσω κατάλληλου driver και αρχείου ρύθμισης, και ο κατάλληλος συνδυασμός φορτώνεται στο HMI μέσω του λογισμικού προγραμματισμού. Επίσης υποστηρίζει τα πρωτόκολλα OPC UA και MQTT.

Το λογισμικό προγραμματισμού είναι το EasyBuilder Pro. Σε αυτό ορίζονται οθόνες/ προβολές και σε αυτές τοποθετούνται στατικά και δυναμικά γραφικά στοιχεία. Τα στατικά περιλαμβάνουν χρώμα υποβάθρου, κείμενο, γεωμετρικά σχήματα και εικόνες. Στα δυναμικά, το EasyBuilder Pro παρέχει ένα εκτεταμένο ρεπερτόριο, με κοινό παρονομαστή ότι το γραφικό που θα προβληθεί εξαρτάται από κάποια μεταβλητή/tag που διαβάζεται από το PLC ή υπολογίζεται εντός του HMI. Στα δυναμικά περιλαμβάνονται δισταθή αντικείμενα ανάγνωσης όπως οι λάμπες ή εγγραφής όπως οι διακόπτες, αριθμητικά πεδία που διαβάζουν και γράφουν σε καταχωρητές και μεταβλητές, γραφήματα που απεικονίζουν ζεύγος πινάκων μεταβλητών ως X και Y, μετρητές για απεικόνιση μεταβλητών εν είδη κοντέρ, κα.

Επίσης υπάρχουν και άλλες λειτουργίες πιο σύνθετες. Μπορεί να ρυθμιστεί καταγραφή μεγεθών για ιστορικό. Υποστηρίζεται η έννοια διαφορετικών χρηστών, με τον καθένα να έχει διαφορετική πρόσβαση σε προβολές και στοιχεία εντός αυτών. Μια λειτουργία που δίνει ευελιξία στον προγραμματισμό είναι ο ορισμός scripts σε μια ψευδογλώσσα που μοιάζει με C και για την οποία παρέχεται βιβλιοθήκη συναρτήσεων.

Μια σημαντική λειτουργία του EasyBuilder Pro είναι η εισαγωγή tags/μεταβλητών από το PLC. Με αυτό τον τρόπο, για παράδειγμα, ένα γραφικό λαμπάκι συνδέεται στο bit PLC_INPUTS_OVERFLOW, αντί για τη διεύθυνση Modbus 100003.

Μια τυπική ροή εργασίας ξεκινά από την επιλογή του μοντέλου του PLC και των άλλων συσκευών, ώστε να φορτωθεί ο κατάλληλος driver αφενός και να εμφανίζονται, αν υποστηρίζεται, ευανάγνωστα οι μεταβλητές αντί διευθύνσεων Modbus. Έπειτα ορίζεται μια ή κάποιες λίγες προβολές ως πρότυπο και υπόβαθρο για όλες τις προβολές, με τα κοινά στοιχεία για αποφυγή επαναλήψεων. Στη συνέχεια ορίζονται οι προβολές, προστίθενται σε αυτές τα γραφικά στοιχεία, στατικά και δυναμικά. Η σχεδίαση γίνεται συμβουλευόμενοι πάντα τον πίνακα με τα tags του PLC, αλλά και όσα χρειάζεται να οριστούν τοπικά εντός του HMI. Όπου τα έτοιμα αντικείμενα δεν επαρκούν, αναπτύσσεται κάποιο script. Επίσης προστίθενται κουμπιά στις προβολές ώστε να επιτυγχάνονται οι μεταβάσεις από τη μια στην άλλη. Τέλος, το πρόγραμμα μεταγλωττίζεται και μαζί με τα αρχεία εικόνων και τους drivers φορτώνεται στο HMI.

### 4.2.3. Μεταβλητές (tags) HMI της διάταξης

Στην απλούστερη περίπτωση, μια οθόνη (HMI) απλά προβάλει άμεσα δεδομένα που διαβάζει από το PLC. Μπορεί επίσης να γράφει άμεσα δεδομένα που ορίζει ο χειριστής σε προκαθορισμένες θέσεις μνήμης του PLC. Όμως υπάρχουν περιπτώσεις που απαιτείται κάποια επεξεργασία επί της οθόνης, για το σκοπό της απεικόνισης. Αυτή εκτελείται είτε μέσω του προκαθορισμένου ρεπερτορίου που παρέχει το λογισμικό προγραμματισμού της είτε μέσω script/μακροεντολών του προγραμματιστή . Για αυτές τις περιπτώσεις απαιτούνται μεταβλητές τοπικές στην οθόνη και μόνο.

Το μοντέλο της διάταξης επιτρέπει τον ορισμό τοπικών μεταβλητών χειροκίνητα, σε προκαθορισμένες θέσεις, σε μορφή παραπλήσια με χάρτη μνήμης Modbus. Οι θέσεις LW και RW είναι μήκους byte ενώ οι LB μήκους bit. Το πόσες θέσεις θα χρειαστούν για κάθε μεταβλητή που ορίζεται εξαρτάται από τον τύπο αυτής και θέλει ιδιαίτερη προσοχή. Πχ χρειάζεται μια μεταβλητή που θα αποθηκεύει την τρέχουσα παροχή σε λίτρα ανά λεπτό, ονόματι lpm. Αυτή θα είναι 32bit κινητής υποδιαστολής, και έστω ότι επιλέγεται η θέση LW3. Τότε χρειάζεται προσοχή οι θέσεις LW3,4,5,6 να μην χρησιμοποιηθούν από άλλη μεταβλητή για να μην υπάρχει λάθος επικάλυψης μνήμης.

Παρατίθενται συγκεντρωτικά οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν:

| **Όνομα** | **Θέση** | | **Περιγραφή** | **Τύπος** |
|---|---|---|---|---|
| lastPuls | LW | 7 | | 32-bit Signed |
| lpm | LW | 3 | Current flow in liters per minute | 32-bit Float |
| mlPerPuls | RW | 11 | ml per pulse | 32-bit Float |
| FCHART_CTRL | LW | 5 | Plot commands, XY flow chart. | 16-bit Unsigned |
| FCHART_XHEAD | LW | 204 | Start of x range table for the flow's chart. | 32-bit Float |
| FCHART_YHEAD | LW | 304 | Start of y range table for the flow's chart. | 32-bit Float |
| FCHART_DATAPTS | LW | 6 | Number of data points to be plotted. | 16-bit Unsigned |
| FCHART_XLOW | LW | 200 | | 32-bit Float |
| FCHART_XHIGH | LW | 202 | | 32-bit Float |
| FCHART_YLOW | LW | 300 | | 32-bit Float |
| FCHART_YHIGH | LW | 302 | | 32-bit Float |
| FCHART_LPM_MAX | LW | 20 | | 32-bit Float |

Πίνακας 4.3 Χάρτης μνήμης προγράμματος HMI της διάταξης

| Όνομα | Θέση | | Περιγραφή | Τύπος |
|---|---|---|---|---|
| FCHART_LPM_AVG | LW | 22 | | 32-bit Float |
| MODE | LW | 30 | Mode of operation, aka dosage, manual etc | Undesignated |
| MODE_TRIG | LB | 1 | New mode has been selected. | Undesignated |
| DOSE_QTY | LW | 14 | Requested ml to be transferred. | 32-bit Unsigned |
| DOS_BAR_CUR | LW | 40 | Current progress of dosing | 16-bit Unsigned |
| DOS_BAR_TRG | LB | 2 | Trigger dosing progress sampling. | Undesignated |
| DOS_BAR_PAUSED | LB | 3 | Dosing has been paused | Undesignated |
| LVL_MSRMNT | LW | 50 | Distance from surface, in mm. | 16-bit Unsigned |

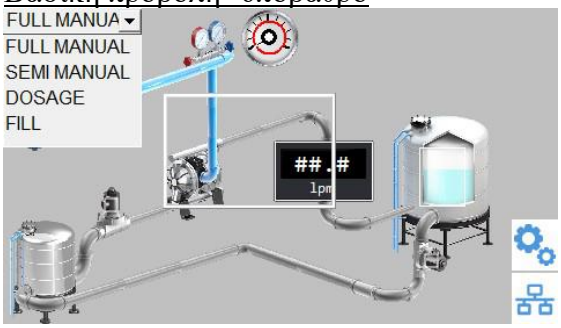
Πίνακας 4.3 Χάρτης μνήμης προγράμματος HMI της διάταξης (συνέχεια)

### 4.2.4. Προβολές και μακροεντολές διάταξης

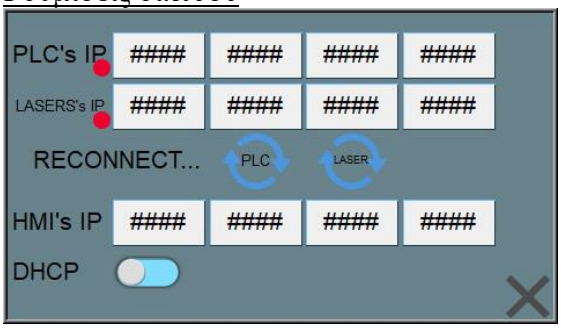
Η οθόνη επικοινωνεί με το PLC και με το laser μέσω 2 drivers της, τον KOYO CLICK V3 και τον MODBUS TCP/IP αντίστοιχα. Και οι δύο καταλήγουν σε εντολές του πρωτοκόλλου Modbus, με τη διαφορά να είναι πώς αντιλαμβάνεται η οθόνη τα δεδομένα που ανταλλάσσει. Στην πρώτη περίπτωση στο λογισμικό EasyBuilder οι θέσεις μνήμης του PLC αναγράφονται πχ ως X1, Y1, C1 κλπ., δηλαδή όπως στο χάρτη μνήμης του Click PLC. Στη δεύτερη απλά αναγράφονται διευθύνσεις Modbus, πχ 4x52.

Στην επόμενη σελίδα παρατίθενται όλες οι προβολές που δημιουργήθηκαν στην οθόνη. Κατόπιν αναπτύσσεται αναλυτικά καθεμία μαζί με τις μακροεντολές που εκτελούνται στην αντίστοιχη προβολή.

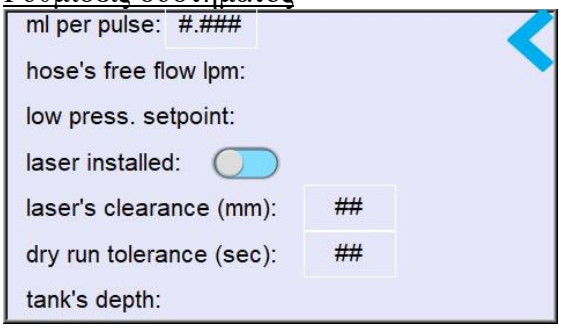
Βασική προβολή- υπόβαθρο



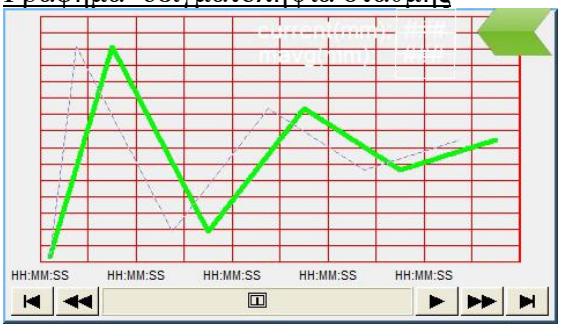

Ρυθμίσεις δικτύου



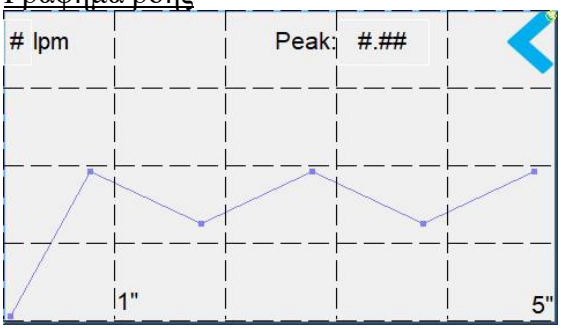

Ρυθμίσεις συστήματος



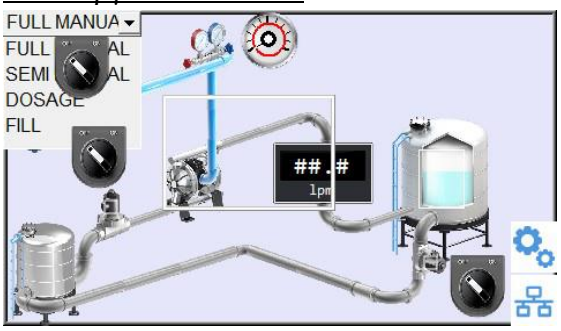

Γράφημα -δειγματοληψία στάθμης



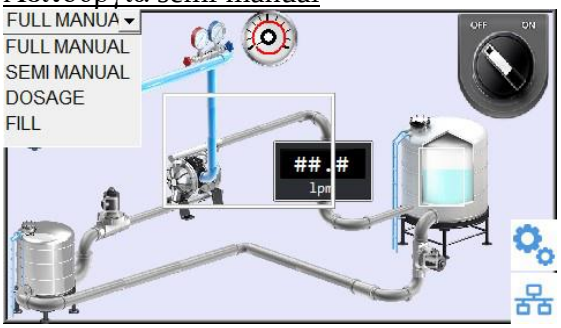

Γράφημα ροής



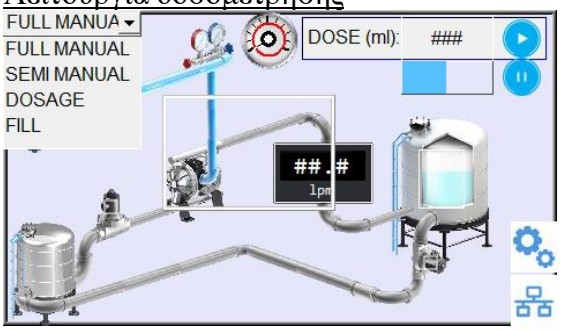

Λειτουργία full manual



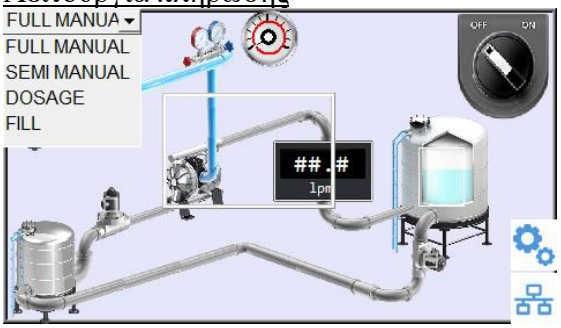

Λειτουργία semi manual



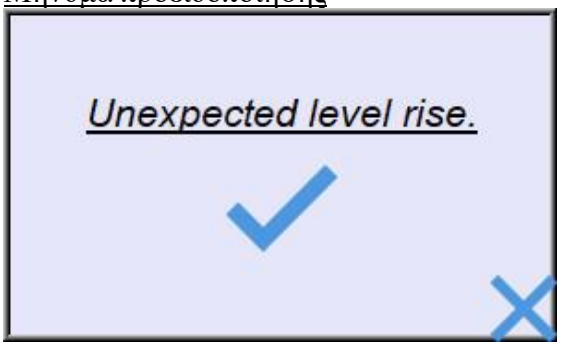

Λειτουργία δοσομέτρησης




Λειτουργία πλήρωσης



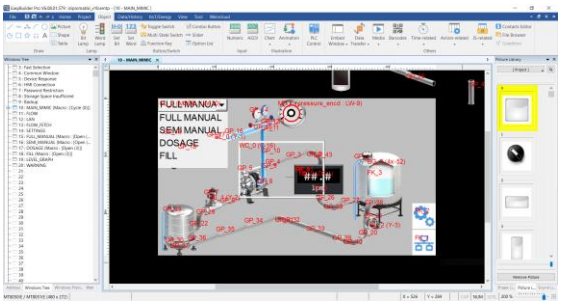

Μήνυμα προειδοποίησης

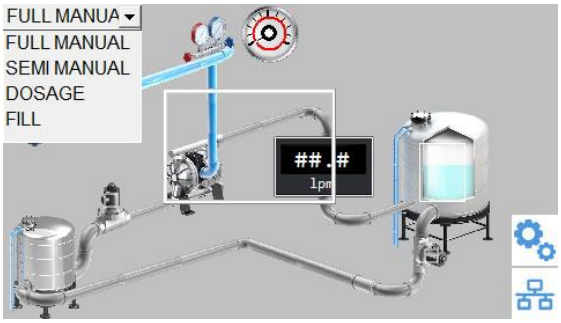


#### 4.2.4.1. Βασική προβολή- υπόβαθρο

Στην προβολή αυτή

- είναι στημένο το βασικό εικαστικό που αναπαριστά τη διάταξη, αποτελούμενο από
  - στατικά γραφικά για τις σωληνώσεις, την αντλία και τα υπόλοιπα πνευματικά/υδραυλικά στοιχεία
  - 3 λάμπες, που διαβάζουν και απεικονίζουν την τιμή κάθε εξόδου του PLC αντίστοιχα, για κάθε βαλβίδα
  - 1 γράφημα-μπάρα σε υπέρθεση με το γραφικό της δεξαμενής που διαβάζει τη στάθμη από το PLC. Μαζί της ένα κρυφό πλήκτρο, και αυτό σε υπέρθεση, που ανοίγει το γράφημα στάθμης όταν πατηθεί η δεξαμενή από τον χειριστή.
  - 1 αριθμητική τιμή που διαβάζει την ροή όπως την υπολογίζει το PLC. Μαζί της άλλο ένα κρυφό πλήκτρο σε υπέρθεση, που ανοίγει το γράφημα της ροής συναρτήσει χρόνου.
  - 1 γράφημα-κυκλική μπάρα σε μορφή κοντέρ, που διαβάζει την πίεση από την οθόνη. Το PLC έχει δύο εισόδους από πρεσσοστάτες, μια για χαμηλή και μια για υψηλή πίεση, και η οθόνη μέσω μακροεντολής τα δύο αυτά σήματα τα αντιστοιχεί σε ακέραιο αριθμό 1-3.
  - 1 λίστα με τους τρόπους λειτουργίας του συστήματος, που ανοίγει την αντίστοιχη προβολή και ενημερώνει την τοπική μεταβλητή MODE
  - 2 πλήκτρα που ανοίγουν την προβολή παραμέτρων και την προβολή δικτύου αντίστοιχα.
- τρέχει περιοδικά η προαναφερθείσα μακροεντολή pressure_encode




Εικόνα 4.6 Βασική προβολή - υπόβαθρο της διάταξης

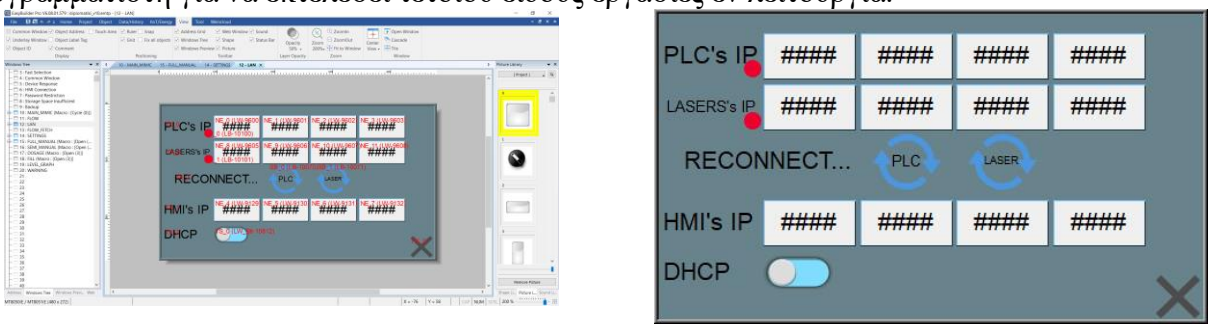
Ο κώδικας της μακροεντολής:

```
//pressure_encode

macro_command main()

bool isLow=0, isHigh=0
int pressure=0

GetData(isLow, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", X, 2, 1)
GetData(isHigh, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", X, 3, 1)

if isLow then
   pressure = 1
else if isHigh then
   pressure = 3
else
   pressure = 2
end if

SetData(pressure, "Local HMI", "pressure_encd", 1)

end macro_command
```

#### 4.2.4.2. Ρυθμίσεις δικτύου

Στην προβολή αυτή εισάγονται από το χειριστή οι IP διευθύνσεις του PLC και του αισθητήρα στάθμης με laser ώστε να μπορεί να συνδεθεί η οθόνη σε αυτά. Μόλις εισαχθεί νέα IP, υπάρχει το αντίστοιχο πλήκτρο εντολής επανασύνδεσης. Δίπλα στις λέξεις PLC και laser υπάρχει από ένα λαμπάκι που δείχνει αν η οθόνη έχει συνδεθεί στην αντίστοιχη συσκευή. Επίσης ρυθμίζεται η επιθυμητή διεύθυνση της ίδιας της οθόνης ή εάν θα διευθυνσιοδοτηθεί αυτόματα (DHCP). Τέλος υπάρχει ένα πλήκτρο με X που κλείνει την τρέχουσα προβολή και επιστρέφει σε προηγούμενη.

Όλα τα στοιχεία αριθμών (IP), λάμπας (κατάσταση σύνδεσης) και πλήκτρα (επανασύνδεσης) γράφουν και διαβάζουν προκαθορισμένες θέσεις μνήμης συστήματος της οθόνης. Αυτή η περιοχή μνήμης συστήματος είναι το μέσο που παρέχει η οθόνη στον προγραμματιστή για να εκτελέσει τέτοιου είδους εργασίες εν λειτουργία.

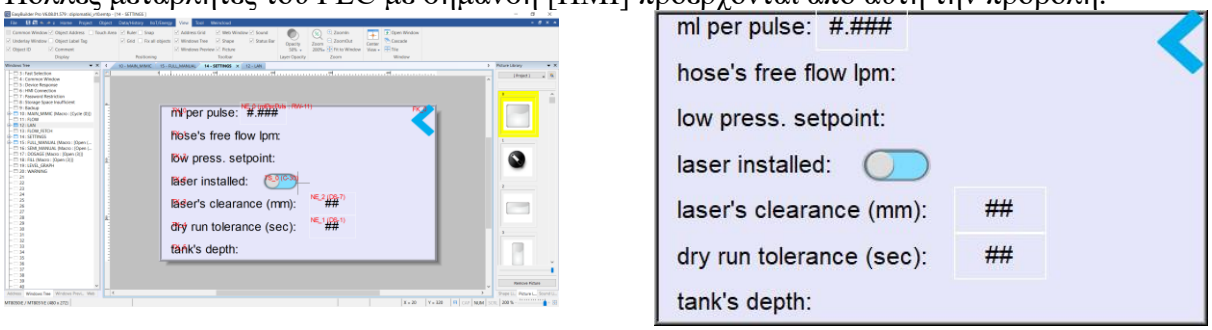



Εικόνα 4.7 Προβολή ρυθμίσεων δικτύου της διάταξης

#### 4.2.4.3. Ρυθμίσεις συστήματος

Στην προβολή αυτή εισάγονται από το χειριστή στοιχεία που αφορούν τη διάταξη, γνωστά είτε από κατασκευαστικές προδιαγραφές είτε από πραγματικές μετρήσεις. Οι τιμές που εισάγονται εδώ είτε αποθηκεύονται στο PLC είτε σε τοπική μεταβλητής της οθόνης, ανάλογα ποιον αφορούν. Οι τιμές που εισάγονται λειτουργούν ως τιμές αναφοράς για σφάλμα και παύση του συστήματος, για παράδειγμα.

Πολλές μεταβλητές του PLC με σήμανση [HMI] προέρχονται από αυτή την προβολή.




Εικόνα 4.8 Προβολή παραμέτρων συστήματος της διάταξης

#### 4.2.4.4. Γράφημα -δειγματοληψία στάθμης

Η προβολή αυτή αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από ένα στοιχείο, το γράφημα στάθμης. Αυτό υλοποιείται μέσω ενσωματωμένης λειτουργίας της οθόνης, χωρίς κώδικα.

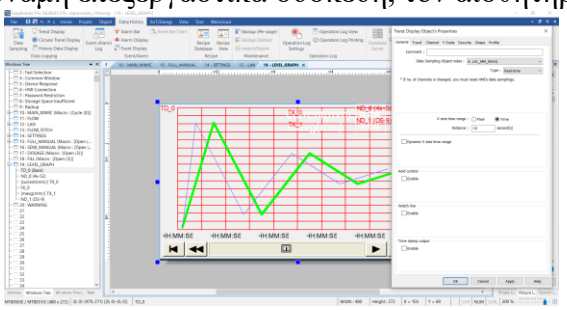
Ορίζεται ότι δειγματοληπτούνται κάθε 100ms 2 μεταβλητές του PLC:

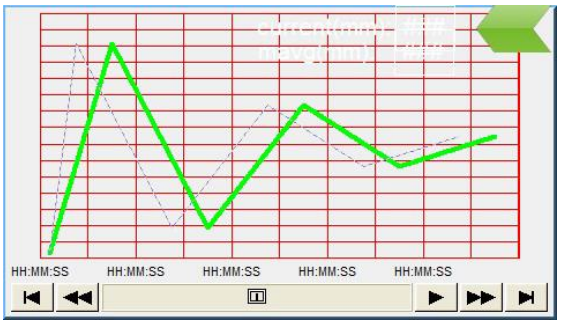
- η τρέχουσα απόσταση από το άνω άκρο του δοχείου, όπως τη διάβασε με τη σειρά του το PLC από τον αισθητήρα laser
- και ο κινούμενος μέσος όρος στάθμης, εν είδη φιλτραρίσματος της προαναφερθείσας, όπως τον υπολόγισε το ίδιο το PLC.

Αυτές οι μεταβλητές απεικονίζονται συναρτήσει χρόνου, μαζί με ενσωματωμένα χειριστήρια χρονικής ολίσθησης κλπ.

Η προβολή συμπληρώνεται από 2 αριθμητικά στοιχεία με τις τρέχουσες τιμές δειγμάτων και με ένα πλήκτρο που επιστρέφει στην προηγούμενη προβολή.

Ο λόγος που η τρέχουσα, αφιλτράριστη, απόσταση άνω άκρου δοχείου- στάθμης υγρού διαβάζεται από το PLC αντί του αισθητήρα είναι ότι μετρήθηκε ο χρόνος απόκρισής του και το ποσοστό σφαλμάτων επικοινωνίας και κρίθηκε ότι θα προκαλείτο άσκοπη συμφόρηση σε αδύναμη επεξεργαστικά συσκευή, τον αισθητήρα.





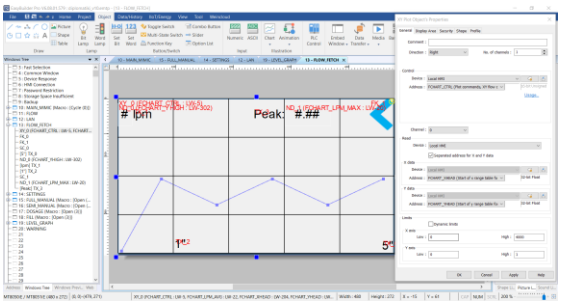

Εικόνα 4.9 Προβολή γραφήματος στάθμης της διάταξης

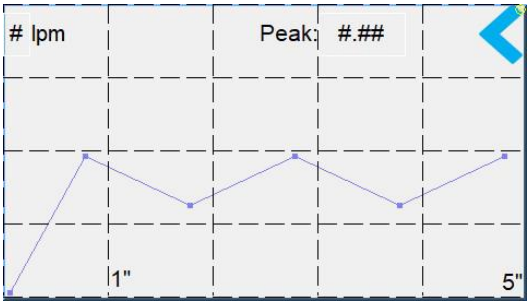
#### 4.2.4.5. Γράφημα ροής

Για να υλοποιηθεί το γράφημα αυτής της προβολής δε μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ενσωματωμένη λειτουργία δειγματοληψίας της οθόνης. Αντ' αυτού χρησιμοποιείται

- στοιχείο γραφήματος XY της οθόνης, που απεικονίζει ένα σύνολο ζευγών (χρόνος, ροή) που διαβάζει από τη μνήμη της οθόνης. Συγκεκριμένα διαβάζει
  - τις ελάχιστες (FCHART_XLOW, FCHART_YLOW) και μέγιστες (FCHART_XHIGH, FCHART_YHIGH) τιμές x και y αντίστοιχα για να οριοθετήσει τους ημιάξονες
  - το πλήθος σημείων (FCHART_DATAPTS)
  - τα ίδια τα σημεία από 2 μπλοκ μνήμης με αφετηρία τις θέσεις FCHART_XHEAD και FCHART_YHEAD
  - εντολές εκτύπωσης από την FCHART_CTRL. Οι εντολές κωδικοποιούνται σε έναν απλό αριθμό από το 1 έως το 3 και είναι "εκτύπωσε", "καθάρισε", και "καθάρισε και εκτύπωσε"
- script-μακροεντολή που διαβάζει μετρήσεις από το PLC και υπολογίζει τις παραπάνω μεταβλητές. Το script εκτελείται κάθε 1". Συγκεκριμένα διαβάζει μετρήσει χρονομέτρου μεταξύ παλμών ροομέτρου, αποθηκευμένες σε κυκλικό buffer, από το PLC και γνωρίζοντας την αντιστοιχία παλμού σε ml υπολογίζει τη μέση ροή μεταξύ δύο παλμών.
- κυκλικό buffer 40 θέσεων όπου καταγράφονται οι χρονικές αποστάσεις από παλμό σε παλμό του ροομέτρου στο PLC.

Ακολουθούν η δομή της προβολής και η μακροεντολή:



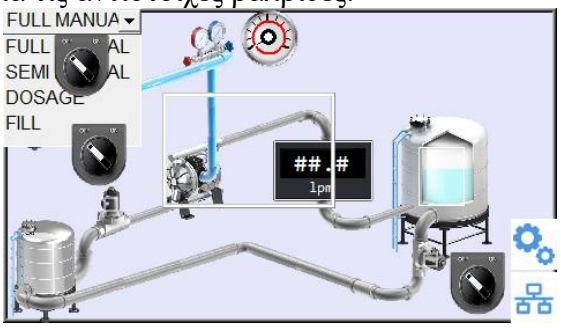

Εικόνα 4.10 Προβολή γραφήματος ροής της διάταξης

```
//lpm_plot

// Buffers' size, including DF100 range in PLC, equals 40
// time in milliseconds
macro_command main()

float lpm[40], dt_plc_buff[40], dt[40], t[41]
float max_lpm, avg_lpm, max_t, temp
short plc_buff_index, i, j


// dt_plc_buff is a cyclic one, is transfomed into a simple one in dt
// dt[0] is the oldest one, dt[39] the most recent one

GetData(plc_buff_index, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", DS, 5, 1)
GetData(dt_plc_buff[0], "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", DF, 101, 40)

i = 0
j = plc_buff_index-101    // transform indexes from PLC:101-140 to HMI:0-39
while i<40
   dt[i] = dt_plc_buff[j]
//    TRACE("dt #%d = %.2f", i, dt[i])
//    TRACE("dt_plc_buff #%d = %.2f", j, dt_plc_buff[j])
   i = i+1
   if j==39 then
      j = 0
   else
      j = j+1
   end if
wend

// transform time steps into absolute time samples
t[0] = 0
i = 1
j = 0
while i<41
   t[i] = t[j] + dt[j]
//    TRACE("t #%d = %.2f", i, t[i])
   i = i+1
   j = j+1
```

```
wend
SetData(t[1], "Local HMI", "FCHART_XHEAD", 40)

MAX(t[1], max_t, 40)
if max_t>5000 then
   TRACE("Data sample exceeds 5\".")
   return
end if

// calculate lpm
i = 0
while i<40
   if dt[i]>=1000 then
      lpm[i] = 0.0
   else
      lpm[i] = 60.0*0.714/dt[i]
   end if
   TRACE("lpm #%d = %.2f", i, lpm[i])
   i = i+1
wend
SetData(lpm[0], "Local HMI", "FCHART_YHEAD", 40)

// store screen info
MAX(lpm[0], max_lpm, 40)
SetData(max_lpm , "Local HMI", "FCHART_LPM_MAX", 1)
AVERAGE(lpm[0], avg_lpm, 40)
SetData(avg_lpm, "Local HMI", "FCHART_LPM_AVG", 1)

// chart's dynamic limits
temp = 0.0
SetData(temp, "Local HMI", "FCHART_YLOW", 1)
SetData(temp, "Local HMI", "FCHART_XLOW", 1)
temp = CEIL(max_lpm)
SetData(temp, "Local HMI", "FCHART_YHIGH", 1)
temp = 5000
SetData(temp, "Local HMI", "FCHART_XHIGH", 1)

// clear+plot 40 points
i = 40
SetData(i, "Local HMI", "FCHART_DATAPTS", 1)
i = 3
SetData(i, "Local HMI", "FCHART_CTRL", 1)

end macro_command
```

### 4.2.4.6. Λειτουργία full manual

Στην προβολή αυτή, που υπερτίθεται στην βασική προβολή, ο χειριστής ελέγχει άμεσα χωρίς κανέναν έλεγχο από το PLC τις 3 εξόδους του για τις αντίστοιχες βαλβίδες.




Εικόνα 4.11 Προβολή full manual της διάταξης

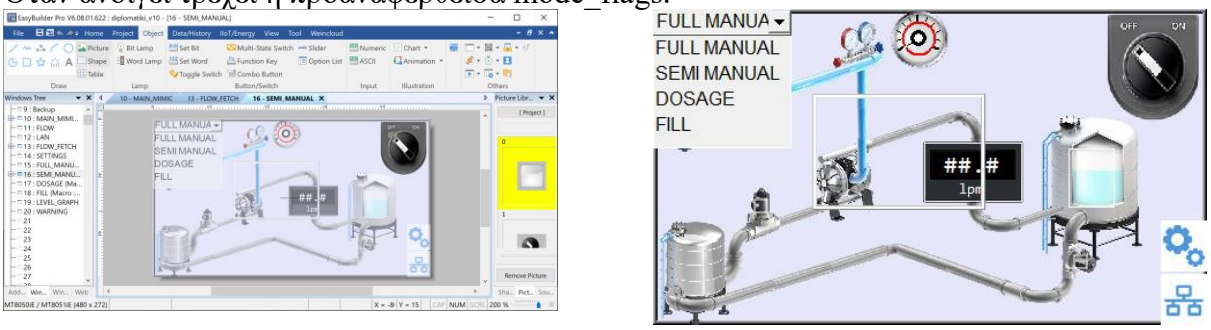
Όταν ανοίγει η προβολή εκτελείται μακροεντολή που διαβάζει την μεταβλητή MODE (βλ. βασική προβολή) και ενημερώνει το PLC για τον κώδικα που πρέπει να τρέξει μέσω των bit του C19,C20,C21.

```
//mode_flags

macro_command main()

int window=0
bool truee=1, falsee=0
GetData(window, "Local HMI", "MODE", 1)

select case window
   case 0
      TRACE("Window change read error.")
   case 16
      SetData(truee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 19, 1)
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 20, 1)
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 21, 1)
      break
   case 17
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 19, 1)
      SetData(truee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 20, 1)
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 21, 1)
      break
   case 18
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 19, 1)
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 20, 1)
      SetData(truee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 21, 1)
      break
   case else
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 19, 1)
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 20, 1)
      SetData(falsee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 21, 1)
end select

end macro_command
```

#### 4.2.4.7. Λειτουργία semi manual

Στην προβολή αυτή, που υπερτίθεται στην βασική προβολή, ο χειριστής ξεκινάει η σταματάει την αντλία από έναν διακόπτη. Η οθόνη δίνει το σήμα στο PLC γράφοντας στο bit C4 αυτού. Το PLC εκτελεί ελέγχου και εάν υπάρχει σφάλμα αναιρεί την εντολή του χειριστή.

Όταν ανοίγει τρέχει η προαναφερθείσα mode_flags.




Εικόνα 4.12 Προβολή semi manual της διάταξης

#### 4.2.4.8. Λειτουργία δοσομέτρησης

Στην προβολή αυτή, που υπερτίθεται στην βασική προβολή, ο χειριστής επιλέγει την επιθυμητή ποσότητα και αυτή μεταγγίζεται από τη μεγάλη στη μικρή δεξαμενή.

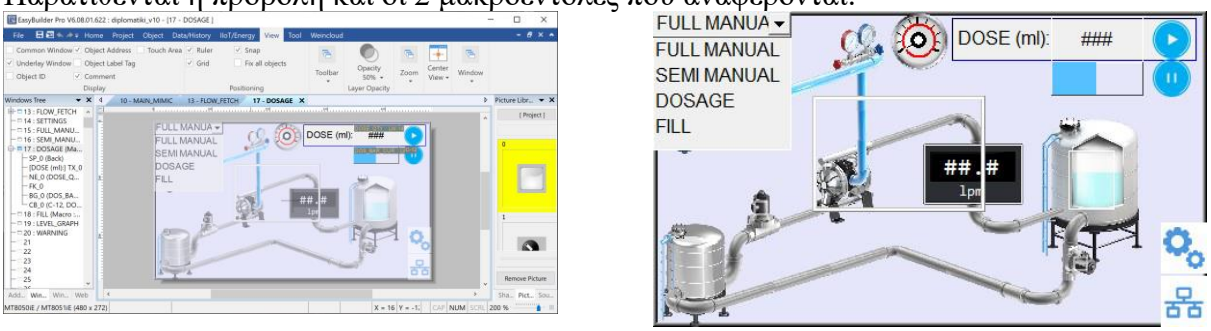
Όταν ανοίγει τρέχει η προαναφερθείσα mode_flags.

Η ποσότητα που εισάγεται είναι αριθμητικό αντικείμενο που γράφει στην τοπική μεταβλητή DOSE_QTY. Μόλις ο χειριστής πατήσει το πλήκτρο σε σχήμα “play” εκτελείται η μακροεντολή dose που μετατρέπει τα ζητούμενα ml σε παλμούς ροομέτρου, αποθηκεύει αυτό το στόχο σε μετρητή στο PLC και δίνει σήμα σκανδαλισμού στο PLC γράφοντας στο αντίστοιχο bit.

Η πρόοδος της δοσομέτρησης απεικονίζεται σε γραφικό-μπάρα σε συνεργασία με τη μακροεντολή dose_sample. Αυτή εκτελείται κάθε 1” και δειγματοληπτεί την τρέχουσα τιμή του μετρητή παλμών στο PLC και το αποθηκεύει σε τοπική μεταβλητή ως ποσοστό.

Υπάρχει η δυνατότητα προσωρινής παύσης της δοσομέτρησης με το αντίστοιχο πλήκτρο. Αυτό απενεργοποιεί τον σκανδαλισμό στο PLC, σβήνει το γραφικό-μπάρα προόδου και αφήνει σήμα για όταν θα επανεκτελεστεί η μακροεντολή dose για να μην υπολογίσει εκ νέου τους απαιτούμενους παλμούς ροομέτρου.

Παρατίθενται η προβολή και οι 2 μακροεντολές που αναφέρονται:



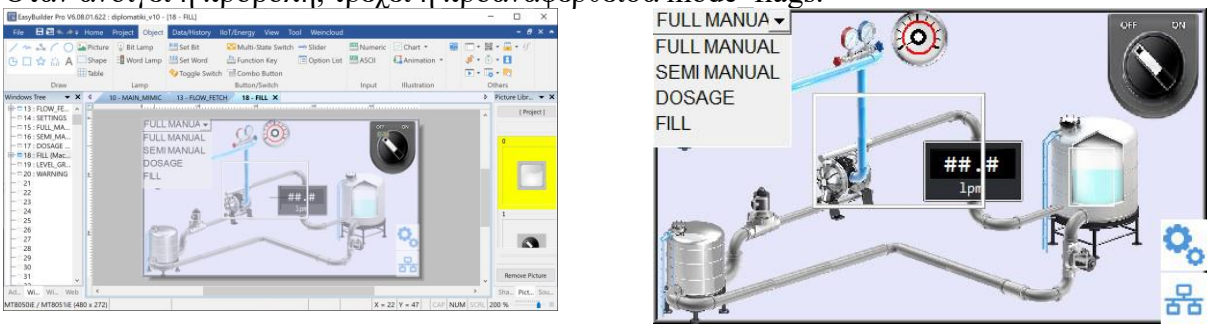

Εικόνα 4.13 Προβολή δοσομέτρησης της διάταξης

```
//dose

macro_command main()
   int ml, curPuls
   float mlPerPuls
   short puls, targPuls
   bool truee=1, falsee=0, paused

   GetData(ml, "Local HMI", "DOSE_QTY", 1)
   GetData(mlPerPuls, "Local HMI", "mlPerPuls", 1)
   GetData(paused, "Local HMI", "DOS_BAR_PAUSED", 1)
   TRACE("Requested:%d ml, pulse is:%f ml, previously paused =%d", ml, mlPerPuls,paused)
   if paused then
      // fetches are necessary, PLC resets the counter when flag rises
      GetData(curPuls, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", CTD, 1, 1)
      GetData(targPuls, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", DS, 3, 1)
      SetData(truee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 12, 1)     // mustn't move, timing!
      SetData(targPuls, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", DS, 3, 1)
      SetData(curPuls, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", CTD, 1, 1)
      SetData(falsee, "Local HMI", "DOS_BAR_PAUSED", 1)
   else
      puls = (1.0*ml)/mlPerPuls
      SetData(puls, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", DS, 3, 1)
      SetData(truee, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", C, 12, 1)
   end if

   SetData(truee, "Local HMI", "DOS_BAR_TRG", 1)

end macro_command



//dose_sample

macro_command main()

int sample, temp
short percent, target
GetData(sample, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", CTD, 1, 1)
GetData(target, "KOYO CLICK V3 MODBUS TCP/IP", DS, 3, 1)
temp = 100*sample
percent = temp/target
TRACE("Percent=%d, temp=%d, sample=%d, target=%d", percent, temp, sample, target)
SetData(percent, "Local HMI", "DOS_BAR_CUR", 1)

end macro_command
```

#### 4.2.4.9. Λειτουργία πλήρωσης

Στην προβολή αυτή ενεργοποιείται από το χειριστή η λειτουργία πλήρωσης του δοχείου. Η οθόνη στέλνει σήμα στο PLC για σκανδαλισμό της αντίστοιχης λειτουργία γράφοντας στο bit C38 αυτού. Προϋπόθεση λειτουργίας είναι ο χειριστής να έχει συμπληρώσει στην οθόνη ρυθμίσεων ότι έχει εγκατασταθεί το laser και η απόσταση laser-επιφάνειας υγρού που θεωρείται πλήρες το δοχείο. Το on/off εγκατεστημένου laser ενεργοποιεί ή όχι την υπορουτίνα πλήρωσης στο PLC και η απόσταση γράφεται άμεσα στην τιμή αναφοράς στον αντίστοιχο συγκριτή στο PLC.

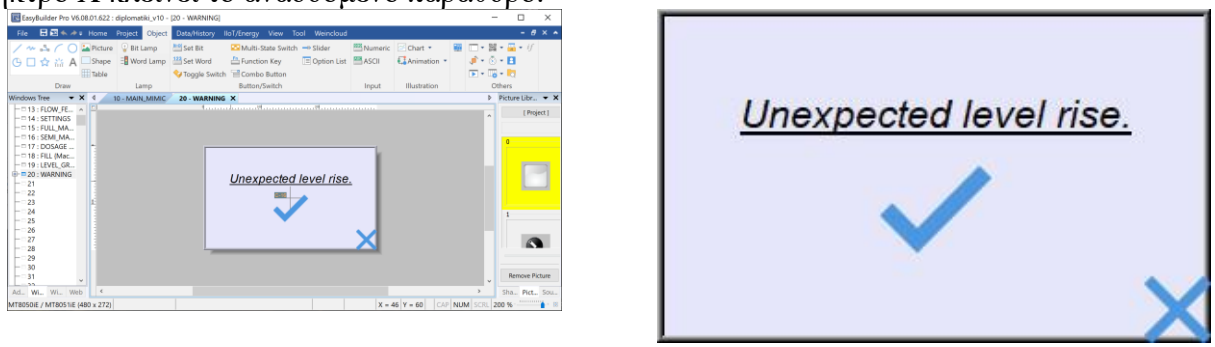
Όταν ανοίγει η προβολή, τρέχει η προαναφερθείσα mode_flags.




Εικόνα 4.14 Προβολή πλήρωσης της διάταξης

#### 4.2.4.10. Μήνυμα προειδοποίησης

Στην προβολή αυτή εμφανίζεται αναδυόμενο μήνυμα προειδοποίησης. Όταν ο χειριστής πατήσει το τσεκ τότε γράφεται στο bit C16 του PLC το reset της προειδοποίησης. Με το πλήκτρο X κλείνει το αναδυόμενο παράθυρο.




Εικόνα 4.15 Προβολή σφάλματος της διάταξης

# 5. Επικοινωνίες

## 5.1. Πρωτόκολλα

Στα δίκτυα βιομηχανικού ελέγχου χρησιμοποιείται πληθώρα πρωτοκόλλων, τα οποία θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ως προς το πεδίο εφαρμογής τους εντός της δικτυακής αρχιτεκτονικής: πρωτόκολλα πεδίου ή fieldbus και πρωτόκολλα υποβάθρου ή backend. Τα πρώτα είναι που χρησιμοποιούνται κυρίως για τις συνδέσεις PLC μεταξύ τους και με συσκευές μέτρησης και ελέγχου, όπως τα Modbus, DNP3, CIP, Profibus, HART κα. Τα δεύτερα βρίσκουν χρήση κυρίως σε εφαρμογές επιπέδου SCADA, για παράδειγμα το OPC και το ICCP/IEC 60870-6.

Ιστορικά, πριν τη χρήση πρωτοκόλλων χρησιμοποιούνταν αναλογικοί βρόχοι για τη μετάδοση πληροφορίας, κατά τη λογική του παλιού τηλεφωνικού δικτύου. Δηλαδή για κάθε μέγεθος που μετράται ή ελέγχεται στη διεργασία υπήρχε και ένα ζεύγος αγωγών στο οποίο διέρρεε το ρεύμα από το μορφοτροπέα αισθητηρίου ή προς το μορφοτροπέα επενεργητή. Σε μεγάλες αποστάσεις ενδεχομένως να ήταν αναγκαία η μίσθωση τηλεφωνικών γραμμών. Καθώς αναπτύχθηκαν τα δίκτυα υπολογιστών, ως δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιήθηκαν σειριακοί δίαυλοι RS232 και RS485 για πρωτόκολλα που αναπτύχθηκαν με τη λογική των PLC κατά νου, όπως το Modbus. Και κατόπιν με την επικράτηση του Ethernet και της στοίβας TCP/IP ως το καθιερωμένο σύστημα δικτύωσης, τα βιομηχανικά πρωτόκολλα προσαρμόστηκαν για να είναι συμβατά με αυτή.

Παρότι έχουν υπάρξει προσπάθειες για δημιουργία καθολικά αποδεκτών πρωτοκόλλων ή έστω την ευθυγράμμιση των κατασκευαστών πίσω από μικρό πλήθος πρωτοκόλλων, όπως με το πρότυπο IEC 61784 για τα fieldbus, ο κατακερματισμός των τεχνολογιών σε κλειστές λύσεις γύρω από έναν κατασκευαστή αποτελεί τον κανόνα. Τα διάφορα fieldbus που σχεδιάστηκαν κατά καιρούς έχουν κατά νου να συνδέουν PLC και εξοπλισμό ορισμένων κατασκευαστών και είναι ασύμβατα μεταξύ τους. Η ετερογένεια σε επίπεδο fieldbus αντιμετωπίζεται μερικώς με gateway πρωτοκόλλων ή πληρέστερα σε επίπεδο SCADA. Παράδειγμα πρωτοκόλλου backend που γεννήθηκε από αυτή την ανάγκη είναι το OPC.

Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά σε πρωτόκολλα και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα βιομηχανικού ελέγχου.

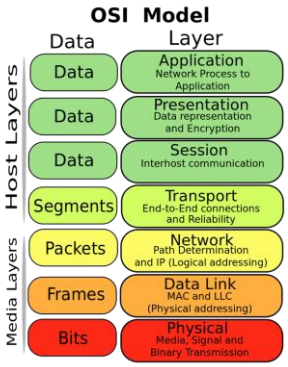
### 5.1.1. RS232 και RS485

Τα πρότυπα RS232 και RS485 ορίζουν μηχανικές και ηλεκτρικές προδιαγραφές για τη σύνδεση εξοπλισμού αλλά δεν αποτελούν πρωτόκολλο επικοινωνίας. Με αναφορά στο μοντέλο του OSI, είναι στο επίπεδο 1 του φυσικού στρώματος. Είναι παλιές αλλά αξιόπιστες τεχνολογίες, που απαντώνται ακόμα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις λόγω του μεγάλου κύκλου ζωής του εξοπλισμού που εγκαθίσταται σε αυτές.

Το RS232 ορίστηκε πρώτη φορά το 1969 για τη σύνδεση δύο συσκευών (point to point) που θα ανταλλάξουν σειριακά μια ροή bit. Χρησιμοποιείται για συνδέσεις απόστασης μερικών μέτρων, για παράδειγμα ενός ρυθμιστή στροφών με το PLC εντός ηλεκτρικού πίνακα. Πέρα από ότι είναι για σύνδεση δύο και μόνο συσκευών, οι άλλοι περιορισμοί του είναι το μέγιστο επιτρεπτό μήκος, ενδεικτικά στα 15m, και ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης, μέχρι 20kbps. Αυτό οφείλεται στη χωρητικότητα ανά μέτρο του καλωδίου και ότι η γραμμή είναι μη ισοσταθμισμένη, άρα είναι ευαίσθητη σε παραμόρφωση από θόρυβο.

Το RS485 θεραπεύει τις προηγούμενες αδυναμίες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση στον ίδιο δισύρματο δίαυλο μέχρι και 32 συσκευών. Επίσης η μέγιστη απόσταση είναι μέχρι 1200m και η ταχύτητα μετάδοση μέχρι 10Mbps. Ο φυσικός περιορισμός της οδήγησης της τάσης γραμμής από ένα και μόνο πομπό είναι θέμα του πρωτοκόλλου επικοινωνίας που εφαρμόζεται στο σειριακό δίαυλο.

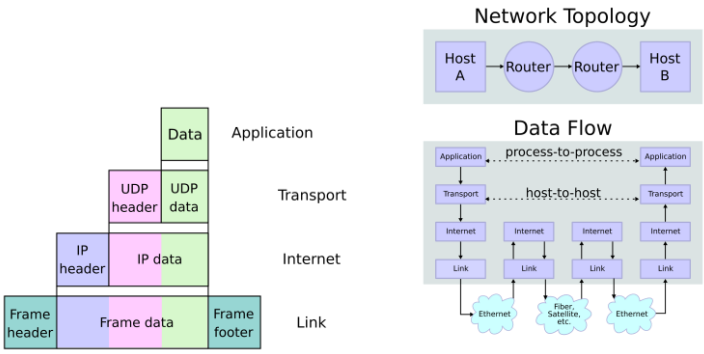
### 5.1.2. Στοίβα TCP/IP




Η στοίβα TCP/IP αποτελεί τη διάρθρωση σε διαδοχικά επίπεδα αφαίρεσης των πρωτοκόλλων που δομούν το Internet, του παγκόσμιου δικτύου μεταγωγής πακέτου. Το υπόδειγμα θεωρητικής προσέγγισης του ρόλου του κάθε επιπέδου είναι το μοντέλο του OSI, το οποίο οριοθετεί διαδοχικά λειτουργίες από τη φυσική μετάδοση των σημάτων μέχρι την εφαρμογή του χρήστη που χρησιμοποιεί το δίκτυο επικοινωνίας. Η διάρθρωση σε επίπεδα αποτυπώνεται στη διαδοχική ενθυλάκωση της πληροφορίας ανώτερου επιπέδου στο κατώτερο ώστε να σχηματιστεί το πακέτο που θα μεταδοθεί.

Περιορίζοντας την επισκόπηση στα δίκτυα ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, ιεραρχικά τα πρωτόκολλα είναι το Ethernet, το IP και τα TCP και UDP. Η καθολικότητα αυτών των πρωτοκόλλων βασίζεται αφενός στον τυποποιημένο δικτυακό εξοπλισμό υποδομής, αφετέρου στο ότι είναι εγκατεστημένα σε όλα τα λειτουργικά συστήματα.

Επιγραμματικά, το Ethernet ορίζει την επικοινωνία συσκευών ενσύρματα, μέσω καλωδίου UTP για παράδειγμα, που συνδέονται μέσω ενός switch. Είναι το στρώμα στο οποίο ορίζεται ένα δίκτυο τοπικής περιοχής (LAN) και η μονάδα πληροφορίας είναι το πλαίσιο (frame). Στο πλαίσιο ενθυλακώνεται η μονάδα πληροφορίας του ανώτερου πρωτοκόλλου, του IP, που είναι το πακέτο. Το IP ορίζει την ανταλλαγή πακέτων μεταξύ διαφορετικών δικτύων και είναι το στρώμα που αποτελεί τον πυρήνα του Internet. Σε αυτό περιλαμβάνονται πληροφορίες διευθύνσεων και δρομολόγησης για να εκτελεστεί η προώθηση από τα routers. Με τη σειρά του το πακέτο ενθυλακώνει τη μονάδα πληροφορίας του επιπέδου μεταφοράς, το τμήμα ή δεδομενόγραμμα. Η βασική λειτουργία αυτού του επιπέδου είναι η πολυπλεξία, κοινώς η επικοινωνία πολλών διεργασιών ενός λειτουργικού με μία και μοναδική IP διεύθυνση μέσω ορισμού πολλών θυρών (sockets). Σε αυτή τη λειτουργία περιορίζεται το UPD. Μια δεύτερη λειτουργία αυτού το επιπέδου παρέχεται μέσω του TCP, το οποίο ορίζει αυτό που χάθηκε με τη μεταγωγή πακέτου IP, δηλαδή την αξιόπιστη σύνδεση από συσκευή σε συσκευή. Τέλος, στο τμήμα του UPD ή του TCP ενθυλακώνεται το μήνυμα του επιπέδου εφαρμογής.




Εικόνα 5.1 Η έννοια της ενθυλάκωσης και η ροή πληροφορίας στη στοίβα TCP/IP
Πηγή: en.wikipedia.org/wiki/Internet_protocol_suite

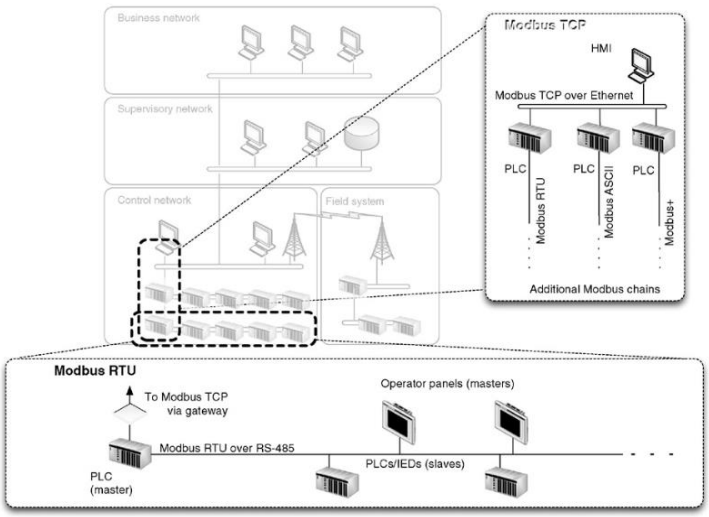
### 5.1.3. Modbus

Το Modbus είναι από τα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα τύπου fieldbus. Ένας από τους λόγους της δημοφιλίας του είναι η απλότητά του, η οποία επιτρέπει σε ανίσχυρες υπολογιστικά συσκευές. όπως ένας αισθητήρας με ενσωματωμένο μικροελεγκτή. να το ακολουθήσει. Επίσης το πρότυπο είναι ελεύθερα διαθέσιμο.

Οι αρχικές εκδόσεις του, οι Modbus RTU και Modbus ASCII, βασίζονται είτε σε ζεύξεις RS232 δύο συσκευών είτε σε δίαυλο RS485 έως και 32 συσκευών. Για την επικοινωνία μέσω διαύλου το πρωτόκολλο ορίζει διευθύνσεις συσκευών και ανά πάσα στιγμή μόνο μία συσκευή εκπέμπει στο δίαυλο.

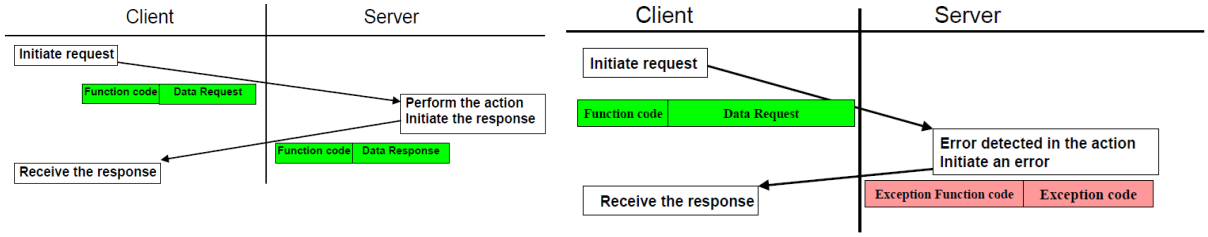
Με την έλευση του Internet και την επικράτηση της στοίβας TCP/IP, το Modbus προσαρμόστηκε ως επίπεδο εφαρμογής κατά OSI με μικρές αλλαγές και ονομάζεται Modbus TCP/IP. Αναλυτικότερα, στο Modbus TCP/IP αφαιρείται ο έλεγχος ακεραιότητας της μετάδοσης (CRC) καθώς εκτελείται ήδη στο επίπεδο του ethernet. Ταυτόχρονα προστίθενται πεδία για το μήκος του μηνύματος και το αναγνωριστικό της εντολής, καθώς σε αντίθεση με το σειριακό δίαυλο, στα δίκτυα TCP/IP ένα μήνυμα μπορεί να τεμαχιστεί σε πολλά πακέτα.

Το πεδίο εφαρμογής του, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 5.2, είναι εντός του δικτύου ελέγχου, στην επικοινωνία HMI και PLC ανώτερου επιπέδου με PLC και άλλες συσκευές στο πεδίο, κατά το μοντέλο master-slave. Στο σχήμα απεικονίζεται η συνύπαρξη σειριακών και ethernet δικτύων Modbus, που ενώνονται με gateway για τη μετάφραση των δύο παραλλαγών του πρωτοκόλλου.




Εικόνα 5.2 Πεδίο εφαρμογής των Modbus RTU και TCP σε μια βιομηχανική εγκατάσταση [19]

Η επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών Modbus είναι μοντέλου master-slave, σε ορολογία σειριακών συνδέσεων, ή client-server, σε ορολογία στοίβας TCP/IP. Ο client/master στέλνει το μήνυμα της εντολής στον server/slave και αυτός απαντάει είτε με τα δεδομένα που απαιτήθηκαν είτε με μήνυμα σφάλματος σε περίπτωση άκυρης απαίτησης.

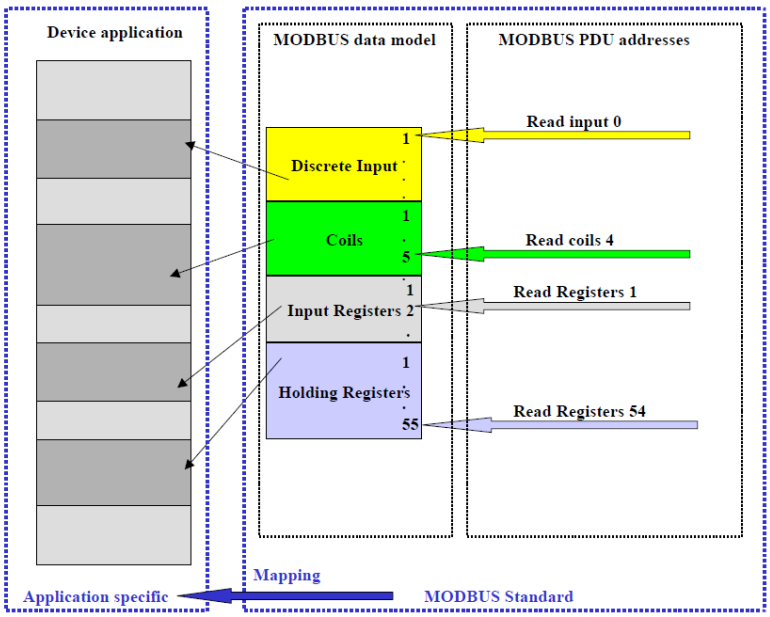



Εικόνα 5.3 Ανταλλαγή μηνυμάτων Modbus, επιτυχής και ανεπιτυχής [20]

Τα μηνύματα του πρωτοκόλλου είναι δομημένα σε πλαίσια Modbus. Σε όλες τις υλοποιήσεις του υπάρχει ένας πυρήνας στο πλαίσιο που ονομάζεται application data unit (ADU) και αποτελείται από το function code, δηλαδή το είδος της εντολής, και τα δεδομένα ενδιαφέροντος. Αυτός ο σταθερής δομής πυρήνας είναι μέρος του protocol data unit (PDU), που αποτελεί το συνολικό μήνυμα Modbus και διαφέρει ανάλογα την υλοποίηση σε Modbus RTU, ASCII ή TCP/IP. Στα πρώτα δύο περιλαμβάνει πληροφορίες διεύθυνσης και ελέγχου ακεραιότητας μετάδοσης, ενώ στο τελευταίο περιλαμβάνει τις αλλαγές που αναφέρθηκαν παραπάνω, με το όνομα MODBUS Application Protocol header.

Τα function codes θεωρητικά είναι 127, αλλά οι πλέον χρήσιμες λειτουργίες που προβλέπονται είναι μετρημένες και αφορούν την ανάγνωση bits εισόδου (discrete inputs), την ανάγνωση ή εγγραφή, μεμονωμένα ή συνολικά, bits κατάστασης και εξόδου (coils), την ανάγνωση καταχωρητών εισόδου 16bit (input registers) και την ανάγνωση και εγγραφή καταχωρητών κατάστασης 16bit (holding registers).

Με λίγα λόγια, όλες οι συναλλαγές του πρωτοκόλλου αφορούν αυτούς τους 4 τύπους δεδομένων. Άρα το πρωτόκολλο ορίζει έναν ιδεατό χάρτη μνήμης αποτελούμενο από αυτές τις περιοχές. Το εύρος αυτών των 4 περιοχών και το πώς σχετίζονται με την πραγματική διάρθρωση της μνήμης στη RAM είναι απόφαση της συσκευής. Αυτός ο χάρτης είναι μια προγραμματιστική διεπαφή σχεδιασμένη γύρω από τα 16bit PLC. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο σχήμα 5.4.



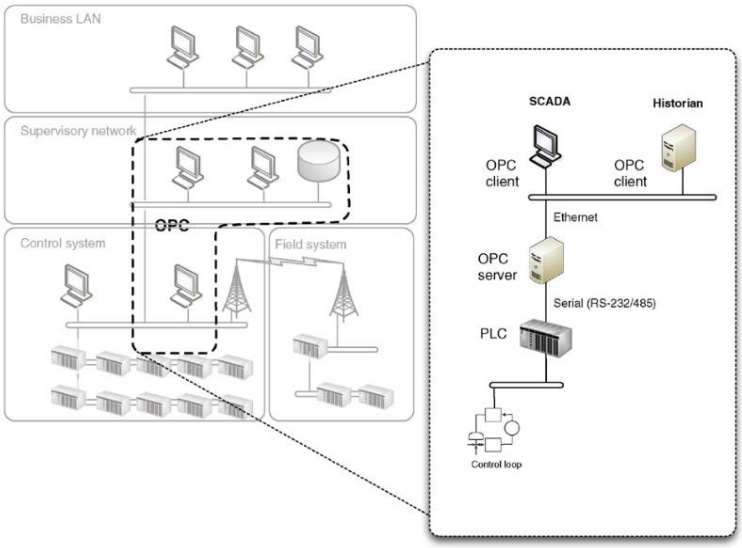

Εικόνα 5.4 Συσχέτιση χάρτη μνήμης πρωτοκόλλου με τη μνήμη της συσκευής [20]

Το Modbus έχει μια σειρά περιορισμών επειδή ακριβώς είναι σχεδιασμένο με γνώμονα την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ PLC σε σειριακά δίκτυα. Με αυτό το σκεπτικό, αναφέρεται σε τύπου δεδομένων bit (coil) και καταχωρητών (16bit),μηνύματα ανάγνωσης και εγγραφής αυτών, ενώ δεν ασχολείται με μεταφορά μεγαλύτερων ή συνθετότερων τύπων δεδομένων, όπως ένα αρχείο. Επίσης, επειδή τα σειριακά δίκτυα είναι περιορισμένης έκτασης και είναι για χρήση master-slave, δεν ασχολείται με θέματα περιορισμού πρόσβασης και ασφάλειας, οι συσκευές slave απαντούν σε όποια εντολή δεχθούν από όπου και αν έχει εκπεμφθεί. Ομοίως, το μέγιστο όριο των 247 συσκευών ανά δίκτυο πηγάζει από την περιορισμένη έκταση των σειριακών. Τέλος, λόγω της απλότητάς του και με εφαρμογές μικρής κλίμακας κατά νου, δε διαθέτει λειτουργίες όπως τι αναπαριστούν τα δεδομένα που μεταδίδονται ή να ειδοποιεί ο slave τον master μόνο όταν υπάρξει κάποια μεταβολή.

### 5.1.4. OPC

Το OPC είναι σειρά προδιαγραφών, που μεταξύ άλλων ορίζουν και πρωτόκολλα, για την επικοινωνία σε επίπεδο backend στα βιομηχανικά δίκτυα. Ορισμένες από αυτές τις σειρές είναι τα OPC DA (data access), OPC HDA (historical data access), OPA AE (alarm & events) και OPC UA (unified architecture). Σκοπός όλων, από διαφορετικές σκοπιές, είναι να γίνει εφικτή σε επίπεδο εποπτείας η συλλογή δεδομένων από τις συσκευές επί του πεδίου και η διασύνδεση των επιμέρους οντοτήτων εποπτείας, ανεξαρτήτως κατασκευαστή.

Στην εικόνα 5.5 αποτυπώνεται ο ρόλος του OPC εντός του βιομηχανικού δικτύου.



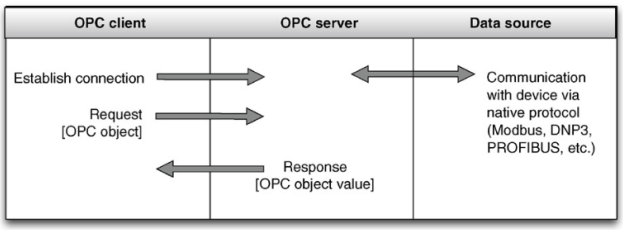

Εικόνα 5.5 Πεδίο εφαρμογή του OPC σε μια βιομηχανική εγκατάσταση [19]

Ξεκίνησε το 1996 με το OPC DA ως τεχνολογία για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ λειτουργικών συστημάτων Windows για χρήση στην εποπτεία βιομηχανικών διεργασιών. Στηρίζεται σε τεχνολογίες που υπάρχουν αποκλειστικά στα Windows, όπως το OLE, COM, DCOM και κατόπιν το .NET, άρα απέκλειε την εγκατάστασή του από PLC, HMI και άλλες συσκευές επί του πεδίου. Επεκτάθηκε ακολουθώντας το μοντέλο διάρθρωσης ενός SCADA συστήματος, προσθέτοντας τις προδιαγραφές HDA (ιστορικό), AE (συναγερμοί) και Commands (εντολές).

Η απεξάρτηση από τα Windows και η προσαρμογή σε διαφορετικές αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα έγινε το 2006 με το OPC UA. Το UA, που είναι η νεότερη σειρά προδιαγραφών,

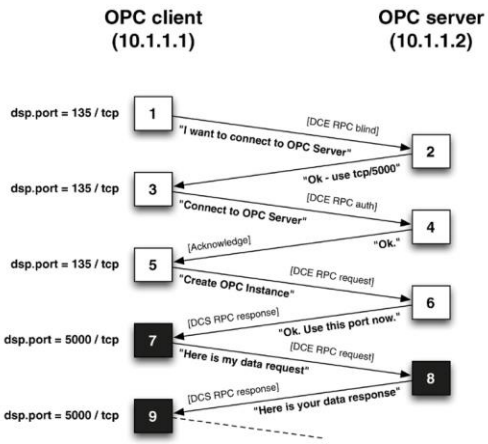
αποτελείται από 24 μέρη, συν μια σειρά συμπληρωματικών προδιαγραφών (companion specifications) που εξειδικεύουν τους ορισμούς σε επιμέρους εφαρμογές πχ OPC 40562-2: Mining - LoadingEquipment - Hydraulic Excavator. Ο πυρήνας του αποτελείται από 5 προδιαγραφές, που ορίζουν τύπους δεδομένων, διεπαφές και υπηρεσίες πρόσβασης σε αυτές, μεταξύ άλλων.

Στην εικόνα 5.6 αναπαρίσταται το σχήμα επικοινωνίας του OPC DA. Για να αποκτήσει δεδομένα από τη διεργασία ο OPC client, συνδέεται με έναν OPC server που με τη σειρά του μέσω του κατάλληλου πρωτοκόλλου τύπου fieldbus έχει συνδεθεί με την τελική συσκευή επί του πεδίου.




Εικόνα 5.6 Σχήμα επικοινωνίας OPC DA [19]

Στην εικόνα 5.7 φαίνεται με λεπτομέρεια η αλληλουχία μηνυμάτων μεταξύ client και server για την ανάγνωση δεδομένων μέσω OPC DA. Σε κάθε μήνυμα φαίνεται η χρήση του DCE/RPC (τεχνολογία απομακρυσμένης εκτέλεσης διεργασιών μεταξύ υπολογιστών) ως υπόβαθρο της επικοινωνίας.




Εικόνα 5.7 Ανταλλαγή μηνυμάτων OPC DA [19]

Στα πλεονεκτήματα του OPC περιλαμβάνεται ότι είναι τεχνολογία που έχει εδραιωθεί και είναι δομημένη με λεπτομέρεια και πληρότητα, περιλαμβάνοντας όχι μόνο το πρωτόκολλο επικοινωνίας αλλά συνολικά όλες τις πτυχές της αρχιτεκτονικής που ορίζει. Από την άλλη είναι ένα σύνθετο σετ προδιαγραφών που δύσκολα υλοποιούνται στην πλήρη τους έκταση. Επιπλέον, το μοντέλο client server με την απαίτηση ο client να στέλνει διαρκώς αιτήματα ενημέρωσης στον server για να επιτηρεί μια παράμετρο, πχ, ακόμα και όταν αυτή μένει αμετάβλητη αποτελεί πρόκληση για την κλιμάκωση ενός συστήματος. Στην αδυναμία αυτή

του OPC βασίζεται η εμφάνιση του πρωτοκόλλου MQTT σε εφαρμογές τηλεμετρίας στα βιομηχανικά περιβάλλοντα.

### 5.1.5. MQTT

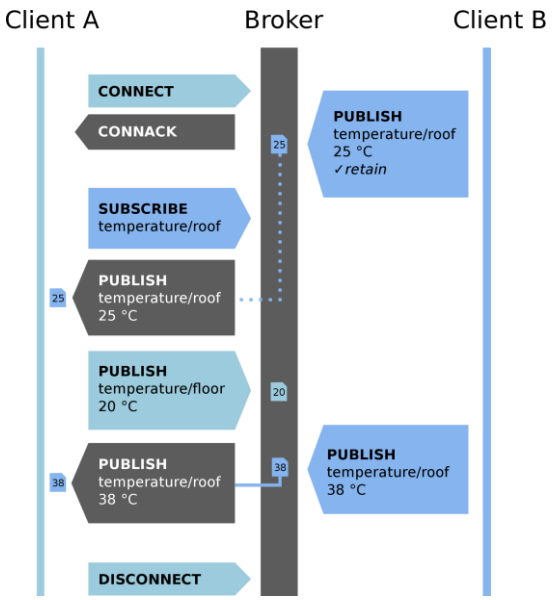
Το MQTT είναι πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής για την ανταλλαγή μηνυμάτων σε σχήμα publish/subscribe με βασικό χαρακτηριστικό του την απλότητά του. Βασίζεται στη στοίβα TCP/IP για τη δημιουργία αξιόπιστων συνδέσεων διαμέσου διαφορετικών δικτύων και πάνω της ορίζει έναν μηχανισμό μετάδοσης μηνυμάτων όπου ο αποστολέας απεμπλέκεται από τον παραλήπτη με την εισαγωγή ενός μεσάζοντα.

Η αρχική του σχεδίαση το 1999 στόχευε στην τηλεμετρία αγωγών πετρελαίου μέσω δορυφορικών ζεύξεων για τη σύνδεση με σύστημα SCADA. Έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως, για παράδειγμα στην ανταλλαγή μηνυμάτων του Facebook Messenger. Επίσης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές Internet of Things, όπως για παράδειγμα με την πλατφόρμα AWS IoT.

Στο μοντέλο επικοινωνίας publish/subscribe που χρησιμοποιεί το MQTT, ένας αποστολέας που είναι η πηγή δεδομένων (publisher) στέλνει μήνυμα μόνο στο μεσάζοντα (broker) και αυτό αναλαμβάνει να τα παραδώσει στους παραλήπτες. Οι παραλήπτες (subscribers) δηλώνουν όταν συνδέονται στον broker ποια δεδομένα τους ενδιαφέρουν, με τη μορφή των topics, και μπορεί να αγνοούν ποια είναι η πηγή των δεδομένων που ζητούν. Επίσης οι publishers και subscribers δε χρειάζεται να είναι συγχρονισμένοι. Ένας publisher μπορεί να στείλει τα δεδομένα στον broker και να αποσυνδεθεί. Κατόπιν μπορεί μόλις συνδεθεί ένας subscriber να παραλάβει αυτά τα δεδομένα. Τέλος, οι ρόλοι publisher και subscriber αφορούν ένα topic και μόνο. Για παράδειγμα, μπορεί μια συσκευή να είναι publisher σε ορισμένα topics και subscriber σε άλλα.

Τα δεδομένα που μεταφέρονται είναι διαρθρωμένα σε topics με τη χρήση της καθέτου (/) να ορίζει την ιεραρχική δομή αυτών. Παράδειγμα έγκυρης σύνταξης topic είναι το “plc/inputs/temperature”. Ένα επίπεδο στην ιεραρχία των topics συνοψίζεται με το σύμβολο +. Για παράδειγμα, η σύνταξη “plc/inputs/+” αντιστοιχεί σε όλα τα topics βάθους 3 (δηλαδή 2 κάθετοι) που ξεκινούν με plc/inputs. Ολόκληρη η ιεραρχία των topics κάτω από ένα επίπεδο συμβολίζεται με τη δίεση #. Για παράδειγμα, η σύνταξη “plc/inputs/# αντιστοιχεί σε όλα τα topics ανεξαρτήτως βάθους που ξεκινούν με plc/inputs. Η δομή των topics είναι ελεύθερη επιλογή κατά την υλοποίηση και δε ρυθμίζεται από το πρωτόκολλο.

Η επικοινωνία ξεκινάει όταν ένας client ανοίγει σύνδεση με τον broker και δηλώνει ότι εγγράφεται (subscribe) σε ένα φίλτρο θέματος (topic filter). Μέχρι να αποσυνδεθεί, ο broker του κοινοποιεί οποιοδήποτε μήνυμα λάβει από την πηγή των δεδομένων. Η αλληλουχία των μηνυμάτων φαίνεται στην εικόνα 5.8.



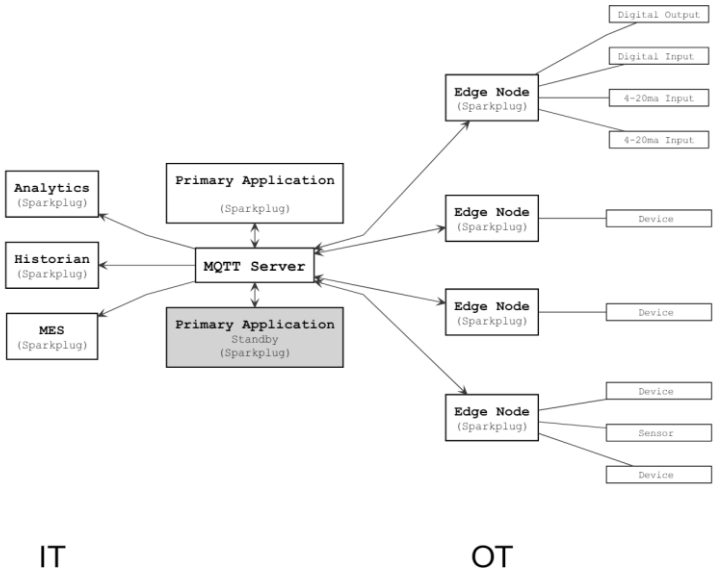
Εικόνα 5.8 Παράδειγμα ανταλλαγής μηνυμάτων MQTT [23]

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του MQTT είναι ότι μέσω μηχανισμού Quality of Service (QoS) μπορεί ο publisher να λάβει επαλήθευση ότι ο broker διένειμε το μήνυμα σε όλους τους subscribers.

Στα πλεονεκτήματα του MQTT συγκαταλέγονται η ευκολία υλοποίησής του από απλές υπολογιστικά συσκευές χάρη στην απλότητά του, ο περιορισμός του φόρτου ζεύξης του publisher μεταφέροντας το φόρτο στον broker, η πρόβλεψη ασύγχρονης επικοινωνίας publisher-subscriber με την αποθήκευση στο broker και συνολικά η δυνατότητα κλιμάκωσής του.

Παρότι είναι ένα πρωτόκολλο με μεγάλη διάδοση στον κόσμο του IT και του IoT που ξεκίνησε από εφαρμογές SCADA, έχει απομακρυνθεί από αυτές και ως έχει δε μπορεί να υποκαταστήσει το ρόλο του OPC για παράδειγμα. Στερείται εξειδικεύσεων για εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου, για παράδειγμα σχετικά με την κανονικοποίηση της ιεραρχίας των topics αλλά και των δεδομένων που αποστέλλονται. Οι αδυναμίες για την ανάπτυξη του MQTT σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις προσπαθούν να θεραπευτούν με την πρόσθετη προδιαγραφή Sparkplug επί του MQTT. Η προδιαγραφή αυτή συντάσσεται από εταιρείες του χώρου και ορίζει κανόνες για την ονοματοδοσία των MQTT topics, για τη δομή και την κωδικοποίηση των δεδομένων που ανταλλάσσονται αλλά και ένα μηχανισμό για την επιτήρηση των συνδέσεων με το broker.

Στην εικόνα 5.9 φαίνεται πώς οραματίζεται η προδιαγραφή Sparkplug τη χρήση του MQTT ως υπόβαθρο επικοινωνίας για να δημιουργηθεί μια αρχιτεκτονική SCADA. Ένας MQTT broker είναι στην καρδιά μιας τοπολογίας άστρου (hub & spoke), στην οποία συνδέονται τερματικές συσκευές ή gateways αυτών με συστήματα ανώτερου επιπέδου όπως το MES ή τα big data analytics, καθώς και με ένα κεντρικό σύστημα που επιτηρεί και ρυθμίζει τις τερματικές συσκευές (Primary Host).




Εικόνα 5.9 Υποδομή MQTT Sparkplug για τη διάρθρωση SCADA [24]

### 5.1.6 Δίκτυο της διάταξης

Ο αυτοματισμός της διάταξης διαθέτει δύο δίκτυα, ένα Ethernet για τα μηνύματα Modbus TCP/IP και ένα RS485 για Modbus RTU, με ένα gateway να τα συνδέει.

Το LAN της διάταξης είναι το 192.168.194.0/24, με το PLC στη διεύθυνση .50, το gateway στην .51 και το HMI στην .52. Οι 2 πρώτες διευθύνσεις είναι στατικές και ρυθμισμένες με τη φόρτωση του προγράμματος του PLC και από το webserver του gateway αντίστοιχα. Στη συνέχεια, πρέπει να καταχωρηθούν και στην προβολή ρύθμιση δικτύου του HMI. Η διεύθυνση του HMI είναι η μόνη που θα μπορούσε να δυναμική, αλλά για λόγους συνέπειας επιλέχθηκε να είναι και αυτή στατική.

Ο λόγος που οι διευθύνσεις είναι στατικές παρότι και οι 3 συσκευές υποστηρίζουν DHCP είναι ότι το PLC και το HMI δεν υποστηρίζουν DNS στις εντολές επικοινωνίας στον προγραμματισμό τους. Μαζί με ένα DNS server στο LAN, αυτός θα ήταν ο μόνο τρόπος για να έχει χρησιμότητα η δυναμική διευθυνσιοδότηση.

Η σύνδεση επιτυγχάνεται μέσω 5θυρου ethernet switch, το οποίο τοποθετείται στη ράγα του ερμαρίου και λειτουργεί με τάση 24VDC του τροφοδοτικού. Οι άλλες δύο θύρες είναι για σύνδεση laptop ή σύνδεση της διάταξης με κάποιο άλλο LAN.

Οι δοκιμές των συνδέσεων έγιναν με τα εργαλεία Wireshark και ModbusTool.[11]

Το δίκτυο RS485 περιλαμβάνει μόνο τον αισθητήρα laser και το gateway. Η σύνδεση είναι μέσω 2 αγωγών NYAF, που δεν αποτελεί πρόβλημα λόγω της μικρής απόστασης. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι σε 115200 baud rate.

[11] https://github.com/ClassicDIY/ModbusTool

#### 5.1.6.1 Gateway

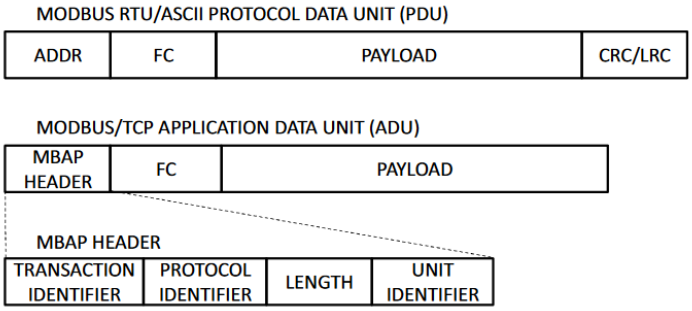
Το gateway είναι της Waveshare και επιτρέπει την επικοινωνία συσκευών σε RS232 ή RS485 σύνδεση με αυτές του Ethernet, χωρίς οι ίδιες οι συσκευές να γνωρίζουν ότι εκτελείται μετατροπή πρωτοκόλλων. Τα δεδομένα που δέχεται από τη σειριακή σύνδεση τα ενθυλακώνει, χωρίς κάποια αλλοίωση, σε UDP datagrams, TCP segment ή HTTP αίτημα, ανάλογα τη ρύθμισή του. Αντίστοιχα, τα δεδομένα που περιέχονται σε λήψεις UDP, TCP ή HTTP τα εκπέμπει στο σειριακό δίκτυο.

Η ρύθμισή του κατά την εγκατάσταση γίνεται με ενσωματωμένο webserver. Στην πλευρά του σειριακού, υποστηρίζει RFC2217, για συνδέσεις μεταβαλλόμενης ταχύτητας, και αποστολή heartbeat για διαρκή έλεγχο της σύνδεσης. Στην πλευρά του ethernet, υποστηρίζει DHCP για αυτόματη διευθυνσιοδότηση από το δίκτυο καθώς και DNS.

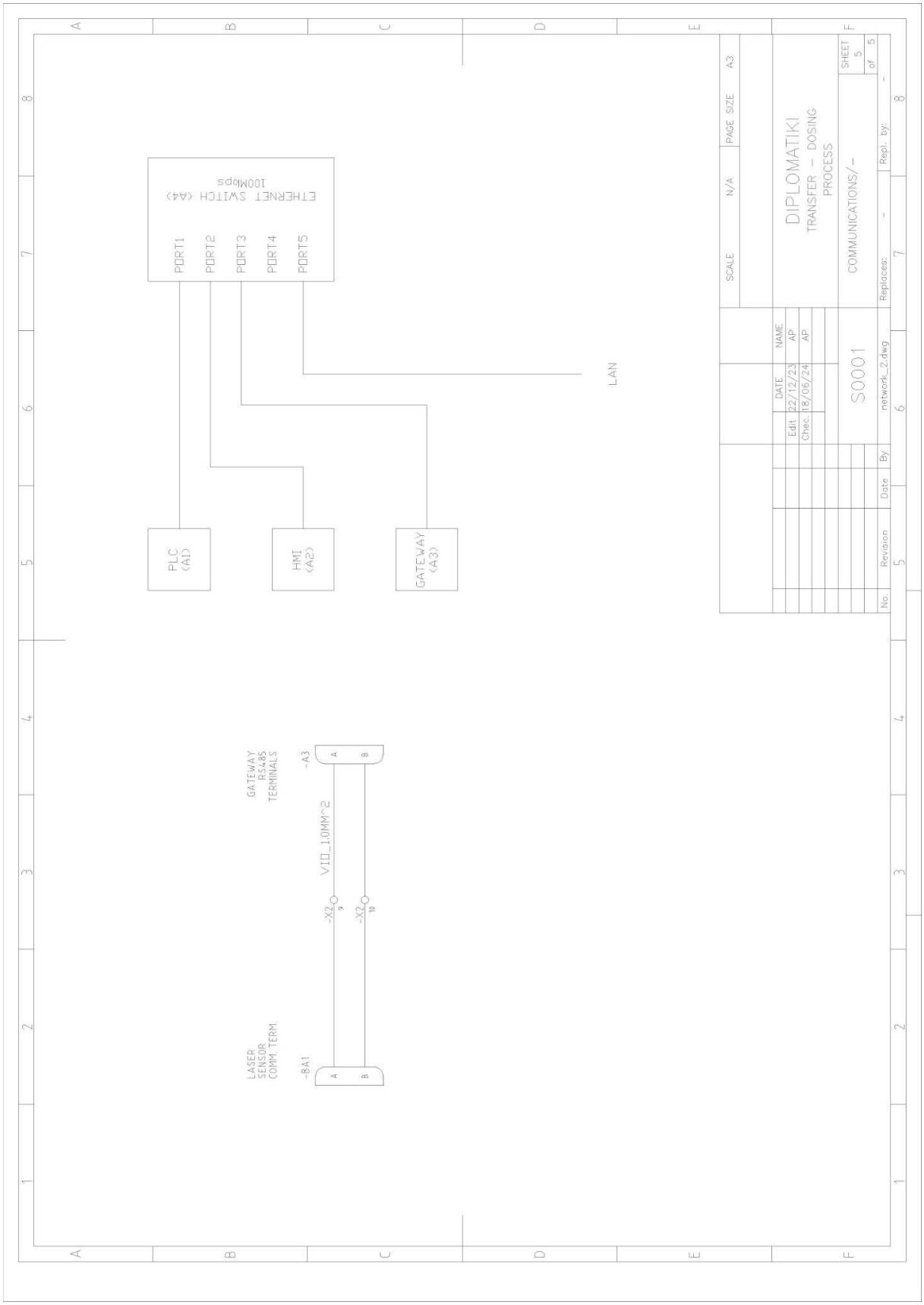
Η τοποθέτησή του είναι βιδωτή, λειτουργεί σε εύρος θερμοκρασίας -40 έως +85 βαθμούς και εύρος τάσης τροφοδοσίας από 5 έως 36V. Συνεπώς είναι κατάλληλο για χρήση εντός του ερμαρίου.

Ο λόγος που επιλέχθηκε είναι επειδή διαθέτει λειτουργία Modbus gateway. Χωρίς αυτή θα ήταν αδύνατη η επικοινωνία των PLC και HMI με το laser, καθώς στη μεν μετατροπή από σειριακό σε TCP θα έλλειπε η κεφαλίδα MBAP και θα περίσσευε το CRC, με αποτέλεσμα να μην αναγνωρίζονται τα μηνύματα. Στη δε μετατροπή από TCP σε σειριακό θα υπήρχε το αντίστροφο πρόβλημα και το laser θα απέρριπτε τις μεταδόσεις. Συνεπώς, παρότι το Modbus TCP/IP με το Modbus RTU είναι παραπλήσια, χωρίς αυτή την απλή μετατροπή σε επίπεδο μηνύματος η επικοινωνία είναι αδύνατη.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται τα δεδομένα που εκπέμπονται σε μια σειριακή ζεύξη για το Modbus RTU και από κάτω η δομή του μηνύματος Modbus TCP/IP που ενθυλακώνεται σε μια μετάδοση TCP. Το CRC πρέπει να αφαιρεθεί και να προστεθεί η κεφαλίδα MBAP από το gateway στη ροή σειριακό->LAN και το αντίστροφο στην LAN->σειριακό.




Εικόνα 5.10 Μετατροπή Modbus RTU σε Modbus TCP/IP στο gateway
Πηγή: T. Morris, R. Vaughn, and Y. Dandass, *A Retrofit Network Intrusion Detection System for MODBUS RTU and ASCII Industrial Control Systems*. 2012. doi: 10.1109/hicss.2012.78




Συνδέσεις καλωδίων επικοινωνιών της διάταξης (στάδιο επικοινωνιών)

## 5.2. Διασυνδεσιμότητα

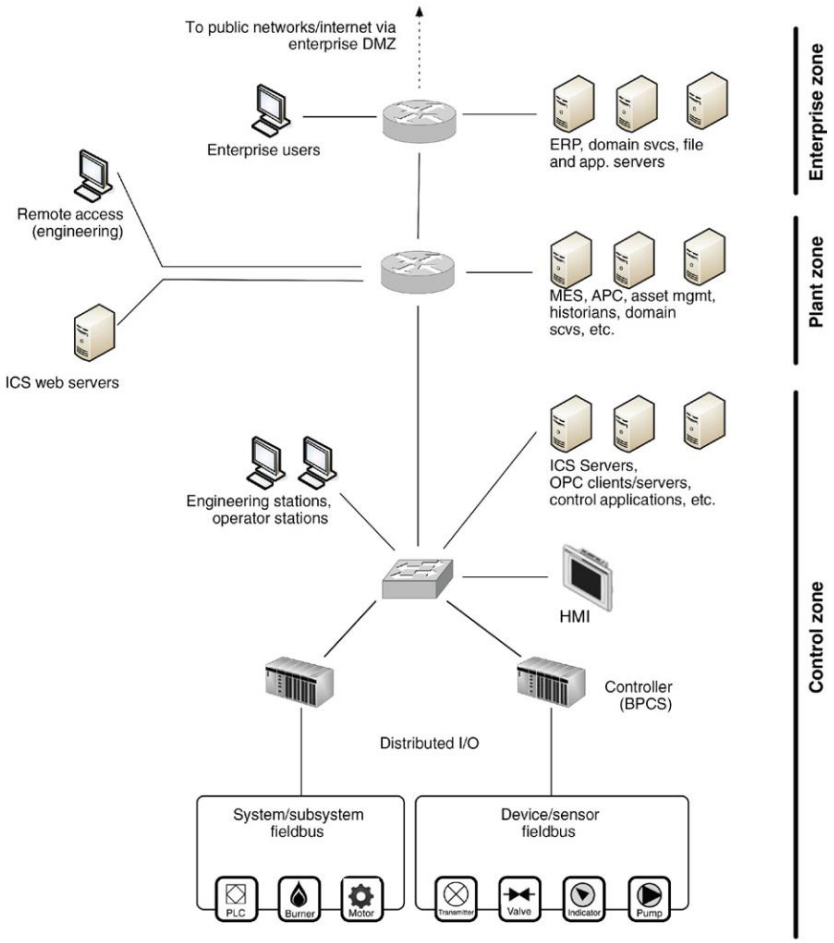
### 5.2.1. Καθιερωμένο: SCADA

Με τον όρο SCADA ονομάζονται συστήματα που προσφέρουν κεντρική εποπτεία και έλεγχο μιας βιομηχανικής εγκατάστασης μέσω της επικοινωνίας με τερματικές μονάδες που βρίσκονται διάσπαρτες σε αυτή. Οι τερματικές μονάδες είτε προσφέρουν δεδομένα τηλεμετρίας ή δέχονται εντολές χειρισμού από το κέντρο εποπτείας. Όταν υπάρχουν βρόχοι ελέγχου, στους οποίους οι χρόνοι απόκρισης είναι σφιχτοί, πχ τάξης ms, η τερματική μονάδα εκτελεί τον έλεγχο, πχ PID, και το κέντρο ορίζει τις τιμές αναφοράς (setpoints).

Ως τερματικές μονάδες (remote terminal unit - RTU) λογίζονται εξειδικευμένες συσκευές συχνά με ενσωματωμένη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας και περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ που σκοπός τους είναι να λειτουργούν ως απόληξη τηλεμετρίας και ελέγχου ενός κεντρικού συστήματος. Ο όρος σχετίζεται με τη χρήση του σε εγκαταστάσεις όπως οι αγωγοί φυσικού αερίου ή το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ως προς τις δυνατότητες, το πεδίο εφαρμογής αυτών των συσκευών συχνά επικαλύπτεται με αυτό του PLC καθιστώντας το μεταξύ τους όριο δυσδιάκριτο. Σε κάθε περίπτωση, ο όρος RTU υποδηλώνει την ύπαρξη ενός συστήματος SCADA, ενώ ένα PLC μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητο χωρίς ποτέ να συνδεθεί στο δίκτυο κάποιας εγκατάστασης.

Βασικές απαιτήσεις ενός λογισμικού SCADA που εκτελείται σε κεντρικό υπολογιστή (MTU - master terminal unit ο αντίστοιχος όρος) περιλαμβάνουν τη γραφική αναπαράσταση της διεργασίας, τους συναγερμούς, τα διαγράμματα τάσεων, τη διεπαφή με τα RTU/PLC, μια βάση δεδομένων, τις δυνατότητες επικοινωνίας με το δίκτυο της εμπορικής λειτουργίας/διοίκησης και την ανοχή σε αστοχία λειτουργίας μέσω εφεδρικού εξοπλισμού.

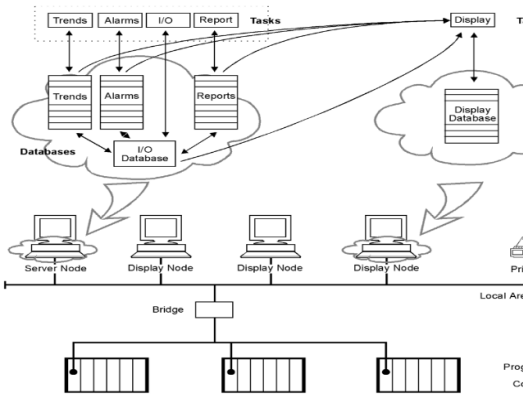
Η δομή ενός συστήματος SCADA φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (τμήμα “Control zone”). Τα αισθητήρια και οι επενεργητές συνδέονται σε κάποιο controller (RTU, PLC) είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω πρωτοκόλλων τύπου fieldbus, όπως το Modbus, το Profibus ή το HART, και μέσω ζεύξεων που μπορεί να είναι είτε ενσύρματες είτε ασύρματες. Οι controller συνδέονται σε ένα LAN στο οποίο βρίσκονται οι υπολογιστές που εκτελούν το λογισμικό SCADA (ICS Servers στην εικόνα), HMIs και υπολογιστές χειριστών.



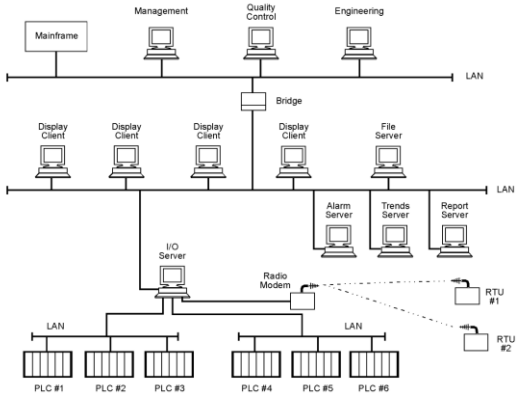

Εικόνα 5.11 Δομή βιομηχανικού δικτύου, χωρισμένο σε 3 ζώνες [19]

Η διάρθρωση του λογισμικού SCADA αποτελείται από modules τα οποία μπορεί να εκτελούνται σε ένα μηχάνημα/server ή σε διαφορετικούς servers, ανάλογα το πλήθος των τερματικών. Τα κύρια modules του λογισμικού με τις αντίστοιχες βάσεις δεδομένων τους είναι (α) το σχετικό με το I/O, δηλαδή την επικοινωνία με τα RTU και την τήρηση των τρεχουσών εισόδων/εξόδων, (β) το σχετικό με τους συναγερμούς, (γ) αυτό των τάσεων, δηλαδή την αποθήκευση επιλεγμένων I/O ως χρονοσειρών, (δ) αυτό των αναφορών προς άλλα συστήματα ή τμήματα του εργοστασίου και (ε) αυτό της προβολής, δηλαδή αυτό που συλλέγει πληροφορίες από τα υπόλοιπα modules και επικοινωνεί με HMIs ή με υπολογιστές των χειριστών.

Στις ακόλουθες δύο εικόνες φαίνονται 2 δίκτυα SCADA, το ένα με συγκεντρωμένες όλες τις λειτουργίες σε ένα μηχάνημα και το δεύτερο με καταμερισμό των modules.

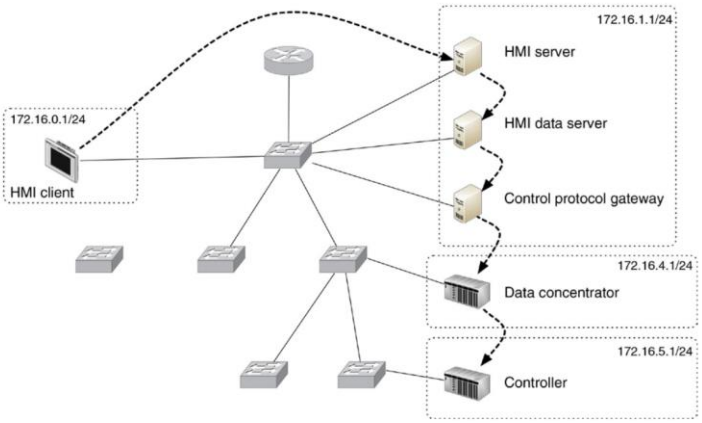



Εικόνα 5.12 Άποψη του δικτύου ελέγχου ως προς τις SCADA λειτουργίες, μοναδικός server [21]




Εικόνα 5.13 Άποψη του δικτύου ελέγχου ως προς τις SCADA λειτουργίες, καταμερισμός των server [21]

Στο ακόλουθο παράδειγμα φαίνεται η ροή πληροφορίας όταν ένα HMI ζητάει δεδομένα από ένα SCADA σύστημα καταμερισμένο σε πολλά ξεχωριστά μηχανήματα. Παράλληλα απεικονίζεται η διάρθρωση του LAN δικτύου. Σε αυτό το παράδειγμα καταδεικνύεται η ιεράρχηση των υποσυστημάτων και η συγκέντρωση όλων των αιτημάτων προσπέλασης δεδομένων αισθητήρων και επενεργητών στα modules του SCADA. Δηλαδή, πρώτον, τα δεδομένα από το πεδίο είναι προσβάσιμα έμμεσα μέσω του SCADA και όχι άμεσα. Και, δεύτερον, το σύστημα είναι διαρθρωμένο σε επίπεδα μέσω των οποίων, διαδοχικά, ρέουν τα δεδομένα.

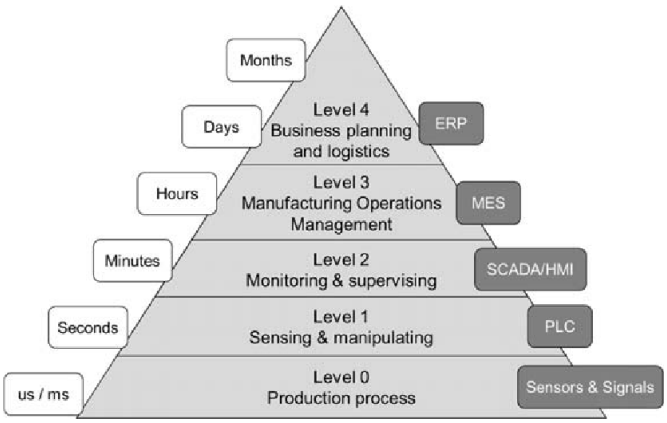



Εικόνα 5.14 Συνδέσεις οντοτήτων εντός SCADA για την εκτέλεση αιτήματος προβολής από HMI [19]

#### 5.2.1.1. Πυραμίδα αυτοματισμού

Η ιεράρχηση που φαίνεται στο προηγούμενο παράδειγμα επεκτείνεται σε όλα τα συστήματα του εργοστασίου που εμπλέκουν τον αυτοματισμό, όπως περιγράφεται στο πρότυπο ISA 95/ IEC 62264, και σχηματικά αυτή η αρχιτεκτονική απεικονίζεται με μια πυραμίδα. Η επιλογή του σχήματος της πυραμίδας υπονοεί ότι στη βάση, στο πεδίο, βρίσκεται το μεγαλύτερο πλήθος συσκευών αλλά και ότι στο πεδίο υπάρχουν επιμέρους δεδομένα ενώ στην κορυφή υπάρχει η γενική εικόνα.

Στη βάση της πυραμίδας βρίσκονται οι αισθητήρες και οι επενεργητές, διάσπαρτοι στην εγκατάσταση. Αυτοί συνδέονται με το επόμενο επίπεδο, αυτό του ελέγχου, που περιλαμβάνει PLC, RTU, ρυθμιστές στροφών, ρομποτικούς ελεγκτές κα. Με τη σειρά τους αυτά συνδέονται με το επίπεδο της εποπτείας, που περιλαμβάνει το SCADA και την προβολή σε HMI και υπολογιστές χειριστών. Πιο πάνω βρίσκεται το επίπεδο της παραγωγής και το σχετικό λογισμικό ονομάζεται MES (manufacturing execution system). Εδώ οι πληροφορίες ενδιαφέροντος περιλαμβάνουν δείκτες απόδοσης της γραμμής παραγωγής, όπως ο χρόνος διαθεσιμότητας της, η ταχύτητα παραγωγής προϊόντος και το ποσοστό προϊόντων που περνούν τον έλεγχο ποιότητας. Αυτές οι πληροφορίες υπολογίζονται βάσει των αναφορών που παρέχει το SCADA. Τέλος, στο ανώτερο επίπεδο βρίσκεται σύστημα επιχειρησιακού σχεδιασμού ή ERP, εκδίδει εντολές παραγωγής προς και συλλέγει αναφορές εκτέλεσης από το MES για να υπολογίσει οικονομικές πληροφορίες σχετικά με τις παραγγελίες από πελάτες και προς προμηθευτές, το απόθεμα, το λογιστήριο και εν γένει τη διοίκηση.




Εικόνα 5.15 Η πυραμίδα του αυτοματισμού
Πηγή: M. Åkerman, "Implementing shop floor IT for industry 4.0," *ResearchGate*, Jun. 2018.

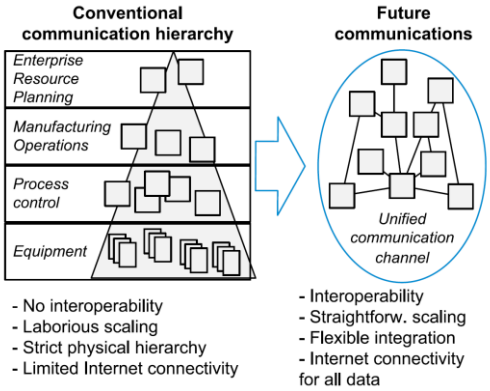
Η παραπάνω ιεράρχηση δεν είναι δεσμευτική αλλά είναι το πλέον διαδεδομένο μοντέλο στο οποίο βασίζονται οι διασυνδέσεις μιας βιομηχανίας. Επίσης μπορεί να υπάρχουν αποκλίσεις χωρίς να καταργείται το μοντέλο. Για παράδειγμα, μπορεί ένα HMI να επικοινωνεί άμεσα με έναν αισθητήρα, παρακάμπτοντας το PLC ή το SCADA. Μπορεί επίσης το HMI επί του εξοπλισμού να λογιστεί ως επίπεδο ανάμεσα στο SCADA και τα PLC. Ακόμα, οι λειτουργίες παραγωγής, αποθήκης και οικονομικών μπορεί να είναι ξεχωριστά πακέτα λογισμικού (MES, warehouse management system - WMS, ERP αντίστοιχα) ή ενοποιημένα ως modules εντός ενός και μοναδικού πακέτου λογισμικού.

Μια πρώτη πρόκληση που αντιμετωπίζει αυτή η αρχιτεκτονική είναι η τάση του industrial internet of things (IIoT) για άμεση σύνδεση αισθητήρων στο cloud, με μια δεύτερη σύνδεση που παρακάμπτει το SCADA. Επιπλέον, υπάρχει η τάση του Industry 4.0 για αποκέντρωση και ελεύθερη διακίνηση της πληροφορίας. Για παράδειγμα, τα MES και ERP να έχουν πρόσβαση σε πρωτογενή πληροφορία από το πεδίο χωρίς αυτή να φιλτράρεται και να συνοψίζεται από το SCADA.

### 5.2.2. Τάση: Industry 4.0 και IIoT

Ο όρος Industry 4.0 χρησιμοποιείται σε επίπεδο πολιτικής και εμφανίστηκε γύρω στο 2015 από οργανισμό υπεύθυνο για χάραξη βιομηχανικής πολιτικής της γερμανικής κυβέρνησης. Εξειδικεύεται σε ένα βαθμό με το RAMI (Reference Architecture for Industry 4.0), που είναι ένα μοντέλο αναφοράς από το ZVEI (γερμανική ένωση κατασκευαστών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού) για να δώσει κατευθυντήριες στην ανάπτυξη τεχνολογιών που να εκπληρώνουν το όραμα της 4ης βιομηχανικής επανάστασης. Κυρίως αποτελεί μια χαρτογράφηση των απαιτήσεων και των κενών στην έκδοση κανονιστικών κειμένων και απευθύνεται σε κανονιστικούς φορείς, όπως η IEC. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιεύσεις που προσπαθούν να εφαρμόσουν στην πράξη το RAMI για να οργανώσουν και να περιγράψουν εταιρικές διαδικασίες, για παράδειγμα, αλλά είναι μικρής αξίας για τη σχεδίαση αρχιτεκτονικών βιομηχανικών δικτύων, που είναι το ζητούμενο.

Παρά την ασάφεια του Industry 4.0, ένα από τα λίγα απτά σημεία του είναι η εστίαση στην έννοια της διασυνδεσιμότητας, ακριβέστερα στην ευκολότερη διακίνηση δεδομένων, μαζικά και χωρίς εμπόδια μεταξύ παραγωγού και καταναλωτή πληροφορίας. Αυτή είναι η λαβή για πρόταση νέων μοντέλων αρχιτεκτονικής, έναντι της πυραμίδας αυτοματισμού.

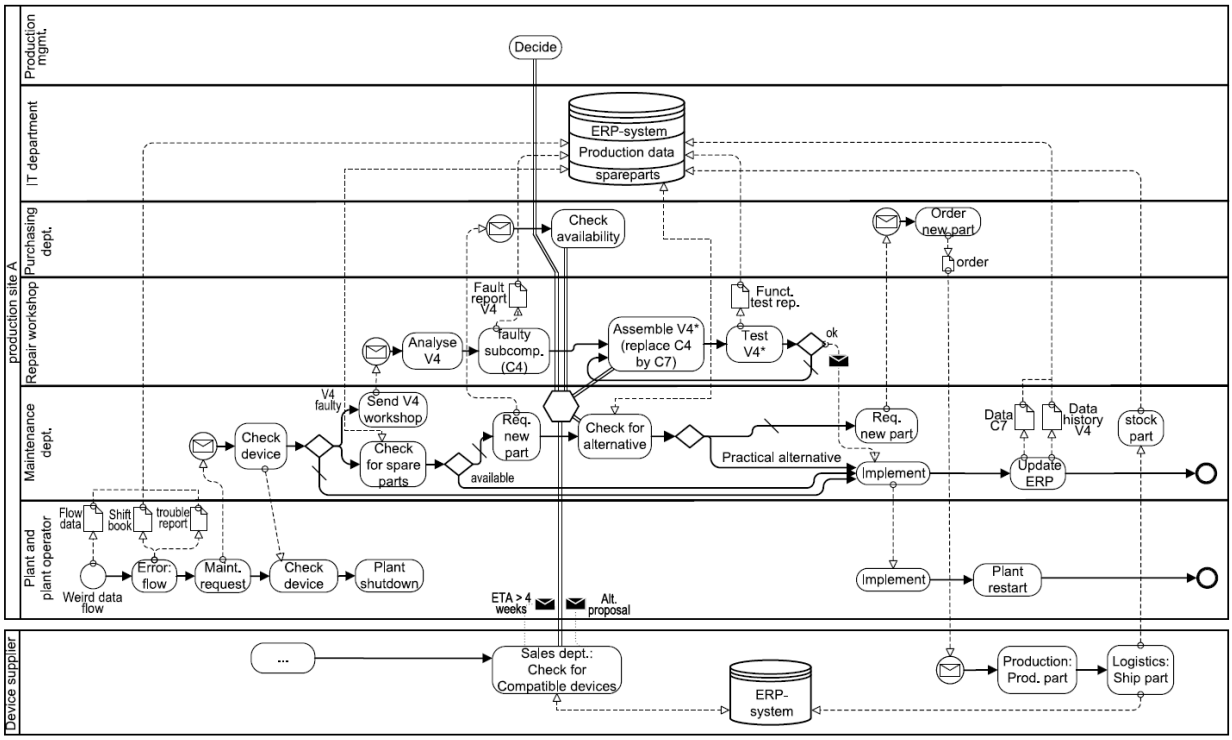



Εικόνα 5.16 Μετάβαση από την πυραμίδα αυτοματισμού σε αδιαμεσολάβητη επικοινωνία [28]

Η ανάγκη αλλαγής αρχιτεκτονικής διασύνδεσης γίνεται εμφανής λαμβάνοντας υπόψη μια δεύτερη επικρατούσα τάση, το Industrial Internet of Things (IIoT). Πρόκειται για την τάση εγκατάστασης αισθητήρων κυρίως, αλλά και επενεργητών, με δυνατότητα δικτύωσης και σύνδεσης με cloud υπηρεσίες. Παράδειγμα τέτοιας υπηρεσίας είναι το AWS IoT Core. Η δικτύωση απλών αισθητήρων είναι απόρροια της μείωσης του κόστους των ηλεκτρονικών με την πάροδο του χρόνου και την εδραίωση των τεχνολογιών γύρω από το Internet. Αυτές οι υπηρεσίες συχνά συνδυάζονται με υπηρεσίες analytics μέσω μηχανικής μάθησης.

Η πηγή του προβλήματος της πυραμίδας του αυτοματισμού στη μαζική διακίνηση δεδομένων όπως υποδεικνύουν οι παραπάνω τάσεις είναι ο, κατά κανόνα, περιορισμός της διακίνησης πληροφορίας μεταξύ διαδοχικών επιπέδων της. Παρότι αυτό ο κανόνας επιβάλλει τάξη στο σύστημα, εξαναγκάζει σε ad hoc λύσεις όταν οντότητες μη γειτονικών επιπέδων πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους. Πρακτικά, αυτές οι ad hoc συνδέσεις σκοπεύουν στην παράκαμψη του SCADA, για παράδειγμα όταν υπάρχει η απαίτηση ο πίνακας ενός μηχανήματος να συνδεθεί με το λογισμικό του τμήματος μηχανολογικής συντήρησης για αυτοματοποίηση των ειδοποιήσεων για επισκευή. Που με τη σειρά τους έχουν το κόστος της αντίστοιχης εργασίας και το πρόβλημα της συντήρησης των συνδέσεων, για παράδειγμα μεταξύ αναβαθμίσεων λογισμικού.

Τα δυνητικά οφέλη της άμεσης αποστολή δεδομένων από το πεδίο σε συστήματα εκτός SCADA για την αυτοματοποίηση εργασιών του προσωπικού φαίνονται στο παράδειγμα της εικόνας 5.17. Σε αυτό αποτυπώνεται το πλήθος των δεδομένων που διακινούνται μεταξύ διαφορετικών τμημάτων ενός εργοστασίου για την αντικατάσταση μιας προβληματικής βαλβίδας. Το σημείο εκκίνησης της όλης διαδικασίας είναι η μέτρηση ανώμαλης ροής. Οι οντότητες που εμπλέκονται στη διαδικασία είναι το ERP, το MES (production data) και το λογισμικό της συντήρησης.




Εικόνα 5.17 Ροή πληροφορίας και ενεργειών για μια απλή αντικατάσταση βαλβίδας
Πηγή: B. Wally, C. Huemer, and B. Vogel-Heuser, “Modelling the Top Floor: Internal and External Data Integration and Exchange,” Springer eBooks, pp. 281–307, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-65004-2_12.

Γενικότερα, η συντήρηση είναι ένας από τους τομείς που δυνητικά θα μπορούσε να επωφεληθεί από τη μαζική συλλογή δεδομένων πεδίου, για παράδειγμα από αισθητήρες δονήσεων, για τη μετάβαση από την προληπτική, βάσει προγράμματος σέρβις, στην προβλεπτική συντήρηση, βάσει on-line διάγνωσης της κατάστασης του εξοπλισμού.

Επί του παρόντος, δύο διαδεδομένες προσεγγίσεις στη συλλογή δεδομένων εκτός SCADA είναι είτε η ανεξάρτητη σύνδεση αισθητήρων σε cloud υπηρεσίες, όπως προαναφέρθηκε, είτε το software που θέλει δεδομένα πεδίου να τα ζητήσει από έναν OPC server.

### 5.2.3. Πρόταση: Data hub

Ένα αρχιτεκτονικό υπόδειγμα που θα επέτρεπε τη σύνδεση πεδίου (επίπεδο ελέγχου) με τα IT στρώματα (ERP, MES, κλπ.), χωρίς να αποκλείει το SCADA, που θα μπορούσε να κλιμακωθεί ενώ είναι αρθρωτό είναι μια τοπολογία άστρου (hub-spoke) στηριζόμενη σε πρωτόκολλο ασύγχρονης επικοινωνίας που υποστηρίζει το μοντέλο push έναντι poll.

Αναλυτικότερα, να υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος (hub ή ομφαλός), στον οποίο συνδέονται όλες οι ενδιαφερόμενες οντότητες. Οι οντότητες αυτές (PLC, SCADA, MES, ERP, κλπ.) είναι ανεξάρτητες και δεν είναι υλοποιημένα ως κομμάτια ενός σφιχτού συστήματος όπως είναι τα στοιχεία ενός SCADA. Αυτές κοινοποιούν (push) μόνες τους νέα δεδομένα στον κόμβο χωρίς να χρειάζεται αυτός να τις ελέγχει περιοδικά (poll) και χωρίς να χρειάζεται να περιμένουν επαλήθευση από αυτόν. Ο κόμβος αναλαμβάνει να προωθήσει τα δεδομένα στους ενδιαφερόμενους και τα αποθηκεύει εάν απαιτηθεί μέχρι οι ενδιαφερόμενοι να συνδεθούν.

Με το παραπάνω σχήμα ελαχιστοποιείται ο φόρτος στο δίκτυο αλλά και των συσκευών που στέλνουν δεδομένα καθώς ο κόμβος αναλαμβάνει την προώθηση σε πολλαπλούς παραλήπτες, άρα το σχήμα μπορεί να κλιμακωθεί. Επίσης, με τη χρήση ενός ανοιχτού πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται και στον κόσμο του IT, μπορούν να αναπτυχθούν εφαρμογές που συνδέονται με τις συσκευές επί του πεδίου χωρίς να εμπλέκεται το SCADA.

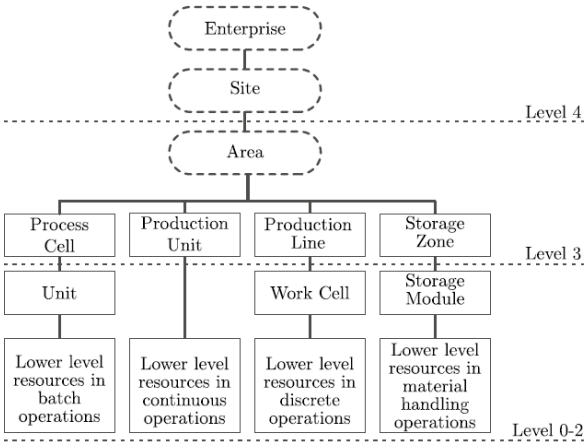
Η προσέγγιση αυτή ακολουθείται ήδη από παραδείγματα στη βιβλιογραφία (στην [28] προτείνεται ένα κοινός δίαυλος μηνυμάτων, στην [27] προτείνεται γενικότερα ένα κοινό στρώμα κάτω από το SCADA, ERP κλπ.) , το πρότυπο Sparkplug [24] αλλά εφαρμόζεται και από εμπορικά διαθέσιμες υλοποιήσεις όπως του HiveMQ.

Ως προς την επιλογής πρωτοκόλλου, το MQTT έχει δημιουργηθεί γύρω από το σχήμα publish-subscribe και είναι ευρέως διαδεδομένο στον κόσμο του IT ώστε να διευκολύνει την ανάπτυξη εφαρμογών. Το OPC UA, που είναι διαδομένο και συχνά αναφέρεται ως το σύστημα επικοινωνίας που ταιριάζει με το RAMI, τυπικά είναι τύπου poll άρα και ακατάλληλο για , αλλά υπάρχει η προδιαγραφή Pub/Sub που μπορεί να μεταφερθεί το OPC UA πάνα από το MQTT. Σε κάθε περίπτωση, το MQTT είναι μια ταιριαστή επιλογή για την παραπάνω αρχιτεκτονική.

Πέρα από το πρωτόκολλο επικοινωνίας, ένα σημαντικό στοιχείο για να υλοποιηθεί η παραπάνω αρχιτεκτονική είναι η σημασιολογία των δεδομένων που αποστέλλονται. Ένα καθιερωμένο πρότυπο για τη μοντελοποίηση των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ MES και ERP είναι το ISA 95. Για παράδειγμα, σε αυτό ορίζεται ότι για την ταυτοποίηση του εξοπλισμού στη βιομηχανική εγκατάσταση χρησιμοποιείται ένα ιεραρχικό σχήμα ονοματοδοσίας όπως φαίνεται στην εικόνα 5.18. Η προδιαγραφή ISA 95 έχει εξειδικευτεί σε XML κωδικοποίηση με την υλοποίηση ονόματι B2MML. Για παράδειγμα, στη σελίδα του project του B2MML η αποτυπωμένη σε χαρτί διαδικασία παραγωγής σιροπιού αντιστοιχίζεται σε μορφοποίηση XML[12]. Με τη σειρά του, το OPC ακολουθεί την υλοποίηση του B2MML

[12] https://github.com/MESAInternational/B2MML-BatchML/tree/master/Examples

για να ορίσει μοντέλα δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την επικοινωνία μέσω OPC και η αντιστοίχιση αυτή περιγράφεται στο OPC companion specification 10030.




Εικόνα 5.18 Ιεραρχικό μοντέλο ISA95 για την περιγραφή του εξοπλισμού [30]

Ο κεντρικός κόμβος της αρχιτεκτονικής αυτής αναφέρεται για λόγους συντομίας ως Data hub. Στην παρούσα εργασία ταυτίζεται με έναν MQTT broker, αλλά θα μπορούσε κάλλιστα να είναι ένας MQTT broker συνδυασμένος με μια βάση δεδομένων, ή να χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο πρωτόκολλο όπως το AMQP (βλ. [28]).

#### 5.2.3.1. MQTT topics της διάταξης

Στη διάταξη της εργασίας το HMI υποστηρίζει το πρωτόκολλο MQTT για την κοινοποίηση μεταβλητών (tags) του ίδιου του HMI, του PLC και του αισθητήρα laser. Αναλαμβάνει δηλαδή το ρόλο του gateway της διάταξης για το MQTT. Για την υλοποίηση του συλλογισμού της προηγούμενης ενότητας, έστω ότι η διάταξη της εργασίας τοποθετείται στην εξής βιομηχανία: η εταιρεία ονομάζεται Οίνοι ΑΕ, με ένα οινοποιείο στην Κοζάνη που παράγει και ερυθρούς οίνους και διαθέτει μια γραμμή παραγωγής για κρασί merlot. Στο τέλος αυτής της γραμμής υποτίθεται ότι βρίσκεται η διάταξη, η οποία αντλεί κρασί από μια δεξαμενή και γεμίζει βαρέλια προς πώληση χύδην. Με δυο λόγια είναι μια γεμιστική χύδην.

Τότε ακολουθώντας το σχήμα Enterprise>Site>Area>Production Line>Work Cell του ISA 95, το HMI της διάταξης που υποστηρίζει την αποστολή MQTT μηνυμάτων δημοσιεύει στον broker τα εξής 7 topics, με την εξής ιεραρχία:

```
Oinoi/Kozani/Reds/Merlot/BulkTransfer
    /Machinery
            /Inputs
                /valve1
                    /valve2
                    /valve3
            /Outputs
                    /flow
                    /level
```

/mode
/status

Δηλαδή ορίζεται ένα topics με όνομα τη θέση της διεργασίας (Oinoi/Kozani/Reds/ Merlot/BulkTransfer) και κάτω από αυτή δημιουργείται το /Machinery, όπου υπάρχουν τα σήματα εισόδου, εξόδου και 2 εσωτερικής κατάστασης.

Το HMI είναι ρυθμισμένο να κοινοποιεί σε κάποιο topics μόνο όταν μεταβάλλεται η τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής, υλοποιώντας έτσι τον κανόνα report by exception. Επίσης το περιεχόμενο κάθε topic είναι κωδικοποιημένο κατά JSON και περιέχει 2 πεδία, την τιμή της κοινοποιούμενης μεταβλητής και ένα timestamp με την ώρα που έγινε η αποστολή.

Οι μεταβλητές που κοινοποιούνται στα 3 topics των βαλβίδων είναι οι καταστάσεις εξόδου του PLC (Y1,Y2,Y3), στο topic της ροής κοινοποιείται ο καταχωρητή DF1 του PLC που είναι ο ίδιος που προβάλλεται στο γραφικό του ροομέτρου στην οθόνη, στο topic της στάθμης κοινοποιείται η εξομαλυμένη μέτρηση στάθμης όπως την υπολογίζει το PLC (DS9), στο status είναι το bit C3 του PLC που σηματοδοτεί εάν το πρόγραμμα είναι σε φάση run ή stop, και στο mode κοινοποιείται ο καταχωρητής LW30 της οθόνης που κωδικοποιεί τον τρόπο λειτουργίας που έχει επιλέξει ο χειριστής.

Το HMI δεν είναι ρυθμισμένο ως subscriber στα topics που κοινοποιεί, άρα εάν κάποιος άλλος MQTT client κοινοποιήσει δεδομένα σε αυτά τα topics το HMI δε θα τα διαβάσει. Δηλαδή το HMI είναι ρυθμισμένο αμιγώς για τηλεμετρία και τα δικαιώματα πρόσβασης πρέπει να ρυθμιστούν στον broker για να αποτραπεί λάθος χρήσης.

Ένα SCADA σύστημα που υποστηρίζει MQTT θα μπορούσε να αντλήσει τα δεδομένα τηλεμετρίας της διάταξης εγγραφόμενο στο topic:

Oinoi/Kozani/Reds/Merlot/BulkTransfer/Machinery/#

#### 5.2.3.2. Προτεινόμενη αρχιτεκτονική

Τα topic με τα οποία η διάταξη κοινοποιεί πρωτογενή δεδομένα θα μπορούσαν να πλαισιωθούν από topics άλλων οντοτήτων της αρχιτεκτονικής για δύο σκοπούς: αφενός να υπάρχει σε ένα σημείο όπου κοινοποιείται όλη η πληροφορία που αφορά την (υποτιθέμενη) γεμιστική χύδην, αφετέρου για να προκύψουν συνέργειες που διυλίζουν διαδοχικά τα δεδομένα σε πληροφορία.

Αναλυτικότερα, έστω ότι υπάρχουν τα τμήματα παραγωγής, οικονομικού, αποθήκης και συντήρησης, με το αντίστοιχο λογισμικό να ονομάζεται MES (manufacturing execution system), ERP (enterprise resource planning), WMS (warehouse management system) και CMMS (computerized maintenance management system), και ότι όλα υποστηρίζουν το πρωτόκολλο MQTT.

Το MES της παραγωγής, το απασχολούν παράμετροι όπως το ποσοστό παραγόμενου κρασιού που περνάει τον ποιοτικό έλεγχο (Quality), η ταχύτητα παραγωγής βαρελιών κρασιού σε σχέση με την ονομαστική της γραμμής (Performance), ο χρόνος επί του προγραμματισμένου όπου η γραμμή ήταν διαθέσιμη για παραγωγή και δεν ήταν σε συντήρηση (Availability), η απόδοση της γραμμής παραγωγής (OEE και TEEP), η μέση διάρκεια επισκευής (MTTR) και η μέση διάρκεια μεταξύ βλαβών (MTBF). Επίσης ασχολείται με το αποτέλεσμα του ποιοτικού ελέγχου επί του προϊόντος.

Το ERP ενδιαφέρεται με πληροφορίες της παραγγελίας όπως ποια παραγγελία εκτελείται, πόση ποσότητα παραγγέλθηκε και πόση παρήχθη, πότε προγραμματίστηκε η παραγωγή και τελικά πότε εκτελέστηκε.

Το WMS, το οποίο μπορεί και να είναι κομμάτι του ERP, ενδιαφέρεται για το πόσα βαρέλια υπάρχουν σε στοκ και πόσα πρέπει να μεταφερθούν από τη γεμιστική στην αποθήκη για το συγκεκριμένο κωδικό κρασιού.

Το CMMS της αποθήκης ενδιαφέρεται για την κατάσταση της γεμιστικής, πότε αλλάχτηκαν οι βαλβίδες και η αντλία και πότε είναι προγραμματισμένη η επόμενη εργασία συντήρησής της.

Για να αποτυπωθούν τα παραπάνω, τα topics της διάταξης θα πλαισιωνόντουσαν από τα ακόλουθα topics, με πηγή τα ERP, WMS, MES και CMMS αντίστοιχα. Τα topics αυτά κατ' ελάχιστο περιέχουν την αντίστοιχη μεταβλητή ενδιαφέροντος. Η αποτύπωση είναι ενδεικτική για να φανεί πώς μπορεί να εφαρμοστεί η προσέγγιση ενός Data hub όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα στην διάταξη της εργασίας:

```
Oinoi/Kozani/Reds/Merlot/BulkTransfer
/ERP
    /Order
            /OrderNumber
            /OrderStatus
            /ScheduledStart
            /ScheduledEnd
            /ActualStart
            /ActualEnd
            /OrderedQuantity
            /ProducedQuantity
            /RemainingQuantity
/WMS
    /ItemCode
    /ItemDescription
    /AvailableQuantity
    /BarrelstoPick
    /WarehouseID

/MES
    /KPI
            /Availability
            /Quality
            /Performance
            /OEE
            /TEEP
            /MTTR
            /MTBF
            /Quality
```

/Result
/RejectedQty
/AcceptedQty
/CMMS
/MachineID
/MaintenaceStatus
/Components
/Valve1ReplacedDate
/Valve2ReplacedDate
/Valve3ReplacedDate
/PumpReplacedDate
/NextMaintenanceDate

Με τα ανωτέρω (ενδεικτικά) topics επιτυγχάνεται η δημιουργία ενιαίας, διατμηματικής εικόνας όλης της πληροφορίας της γεμιστικής χύδην, αλλά αποκαλύπτονται και σημεία για συνεργασίες.

Για παράδειγμα, το WMS θα μπορούσε να μετράει πόσες φορές η στάθμη όπως τη στέλνει το PLC φτάνει στο άνω όριο για να μετρήσει πόσα βαρέλια είναι έτοιμα για μεταφορά στην αποθήκη (BarrelstoPick), να δοθεί εντολή παραλαβής στο χειριστή του παλετοφόρου και να εκτυπωθεί ετικέτα με τον αριθμό παραγγελίας με την οποία σχετίζεται, διαβάζοντας το OrderNumber που δημοσιεύει το ERP

Ένα δεύτερο παράδειγμα συνεργασίας είναι το CMMS να διαβάζει την κατάσταση μιας βαλβίδας, να μετράει πόσες φορές αυτή ανοιγοκλείνει και να συγκρίνει με τους κύκλους λειτουργίας που αναγράφεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή ώστε να υπολογίσει βάσει χρήσης πότε θα γίνει η επόμενη αντικατάσταση (NextMaintenanceDate). Επίσης, το ERP μπορεί να μετράει τις αλλαγές του Valve1ReplacedDate για να υπολογίσει πόσο κοστίζει η συντήρηση της γεμιστικής.

Επίσης, η κοινοποίηση αυτών των δεδομένων μέσω ενός κόμβου επιτρέπει τη σύνδεση υπηρεσιών cloud μηχανικής μάθησης για την εξαγωγή συσχετισμών. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να προκύψει ότι πριν την αλλαγή της αντλίας (PumpReplacedDate), παρατηρείται συστηματικά περίεργη ροή και κατόπιν αυξημένο ποσοστό απόρριψης παρτίδων κρασιού (Quality/RejectedQty).

# 6. Συμπεράσματα και προτάσεις

## 6.1 Συμπεράσματα

Σε κάθε φάση ανάπτυξης της διάταξης απαιτούνταν δοκιμές και διόρθωση προβλημάτων που αρχικά δεν είχαν εκτιμηθεί. Για παράδειγμα, η μέτρηση στάθμης με laser έδινε λάθη όταν η στάθμη του δοχείου ήταν χαμηλή. Η αιτία ήταν ότι γινόταν δυσδιάκριτος ο χρόνος ανίχνευσης από τον αισθητήρα laser της πρώτης από τη δεύτερη ανάκλαση όταν η επιφάνεια του υγρού πλησίαζε τον πυθμένα του δοχείου. Η λύση που δόθηκε ήταν η τοποθέτηση πλωτήρα (κομμάτι φελλός) ώστε να συναντά μόνο ένα στόχο η δέσμη laser.

Ένα άλλο πρόβλημα που προέκυψε αφορούσε τους παλμούς του ροομέτρου. Η αντιστοιχία παλμών σε ml δεν ήταν η αναγραφόμενη στο φύλλο προδιαγραφών του και χρειαζόταν εκτέλεση μετρήσεων και σε διάφορες συνθήκες ώστε να εξακριβωθεί ότι δουλεύει σωστά και είναι σταθερή. Επίσης δεν είχε εκτιμηθεί αρχικά ότι η απαιτούμενη ταχύτητα ανάγνωσης, όταν η ροή είναι μεγάλη, ξεπερνούσε τον κύκλο σάρωσης του PLC και ότι τότε είναι απαραίτητη η χρήση των ειδικών εισόδων υψηλής ταχύτητας αυτού. Ακόμα χρειάστηκε αλλαγή τύπου ροομέτρου, με τις απαραίτητες επεμβάσεις στο υδραυλικό κύκλωμα αλλά και αλλαγές υλικού και σχεδίου στον πίνακα λόγω ασυμβατότητας τάσης και αλλαγής συνδεσμολογίας.

Προκλήσεις που επίσης δεν είχαν ληφθεί υπόψη κατά την αρχική σχεδίαση αφορούσαν και τα μηχανολογικά. Χρειάστηκε να βρεθεί η λύση του περιοριστή ροής με τη μεταβλητή αντίσταση, επειδή ο περιορισμός της αντλίας μόνο μέσω της πίεσης δεν αρκούσε, Επίσης εξομάλυνε μερικώς και την παλμικότητα της ροής της αντλίας που προκαλούσε ανατροπές του πλωτήρα και ακύρωνε τη μέτρηση στάθμης. Άλλο θέμα που προέκυψε ήταν ότι ο τύπος αυτός του ροομέτρου δεν μπορεί να διακρίνει τη ροή υγρού από τη ροή αέρα λόγω άδειου TNK1 χωρίς σημαντική πολυπλοκότητα κώδικα στο PLC, οπότε εγκαταλείφθηκε η αρχική σκέψη για ανίχνευση σφάλματος dry run.

Ως προς την οθόνη-HMI, προέκυψαν ζητήματα σχετικά με το γράφημα ροής και με το MQTT. Ενώ στις προβλεπόμενες λειτουργίες της οθόνης είναι η δειγματοληψία και η γραφική αναπαράσταση μιας μεταβλητής, λόγω περιορισμού στον ελάχιστο χρόνο δειγματοληψίας που εισάγει το λογισμικό προγραμματισμού της, απαιτήθηκε η λύση που περιγράφεται στην ενότητα “Γράφημα ροής”. Δηλαδή ορισμού κυκλικού buffer με τα δείγματα στο PLC, μεταφορά στην οθόνη και εκτέλεση script που τα απεικονίζει σε καρτεσιανό διάγραμμα. Σχετικά με το MQTT, προέκυψαν δεσμεύσεις ως προς τη δομή των topics. Επειδή η οθόνη δεν επιτρέπει την διαμόρφωση των topics κατά το δοκούν, αυτά περιορίστηκαν σε αποστολή μετρήσεων χωρίς metadata, περιορίζοντας την αξία του παρουσιαζόμενου υποδείγματος Data hub.

Συνολικά, ήταν απαραίτητη η εκτέλεση μετρήσεων για τον ορισμό παραμέτρων στα προγράμματα του PLC και του HMI. Χρειάστηκε να μετρηθούν ο χρόνος απόκρισης σε εντολές Modbus του laser, η παλμοσειρά που παράγει το ροόμετρο, ο ρυθμός ανόδου της στάθμης και τα όρια ασφαλείας από την υπερχείλιση, μεταξύ άλλων.

Όλα τα παραπάνω, ενδεικτικά μόνο, προβλήματα καταδεικνύουν την αξία της υλοποίησης της κατασκευής. Τα παραπάνω είναι σε μικρή κλίμακα ζητήματα που ανακύπτουν σε πραγματικές εγκαταστάσεις. Επίσης γίνεται φανερή η αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών πτυχών της διεργασίας. Δηλαδή ότι τα μηχανολογικά, για παράδειγμα, δεν μπορούν να σχεδιαστούν πλήρως ανεξάρτητα από τα ηλεκτρολογικά, και το αντίστροφο.

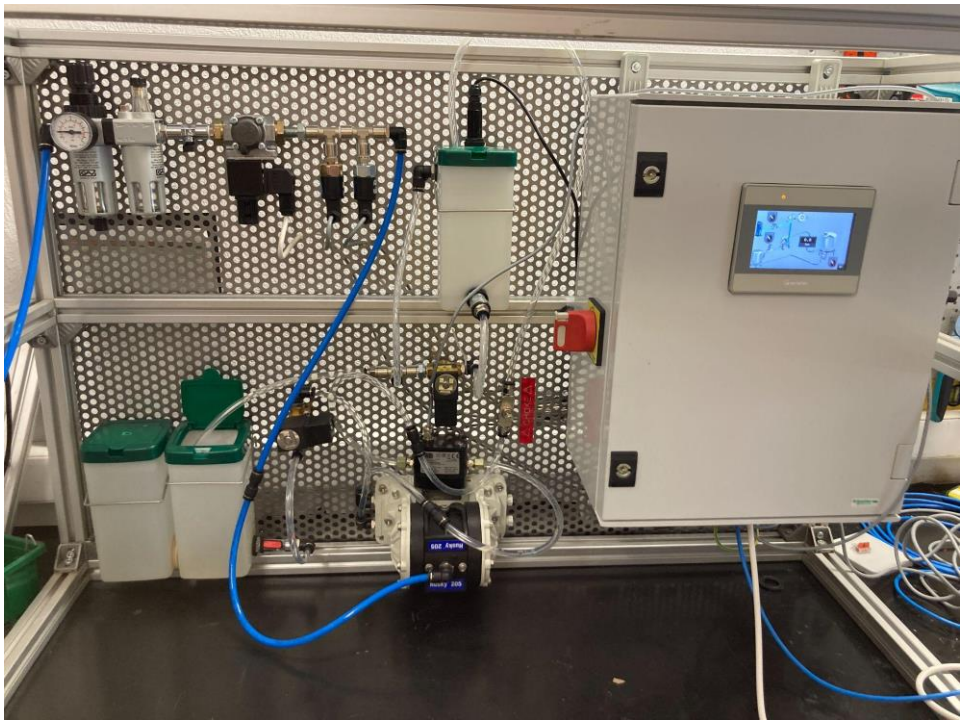
Τέλος γίνεται φανερό ότι τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του ο αυτοματισμός έχουν αξία και για άλλα τμήματα του εργοστασίου, από τα οποία μπορούν να προκύψουν πολύτιμες πληροφορίες που χωρίς την κατάλληλη αρχιτεκτονική διασύνδεσης δε μπορούν να αξιοποιηθούν. Η υλοποίηση της διασύνδεσης από σκοπιάς αυτοματισμού μπορεί να αρκείται στην απλή κοινοποίηση παραμέτρων της διεργασίας, για παράδειγμα με τη μεταφορά ενός χάρτη μνήμης Modbus σε MQTT topics. Το ζήτημα ανάγεται στην αρχιτεκτονική που θα υλοποιήσει κάθε βιομηχανία για τη συλλογή αυτών των δεδομένων.

Στο πλαίσιο του MQTT που επιλέχθηκε ως πρωτόκολλο μεταφοράς, τίθεται το ζήτημα ορισμού προδιαγραφών σε επίπεδο εργοστασίου σχετικά με τα μοντέλα δεδομένων που συλλέγονται και τη διάρθρωση των topics, μεταξύ άλλων. Χωρίς αυτά, η ευελιξία που παρέχει η απλότητα του MQTT μπορεί να προκαλέσει νέα προβλήματα, με μια κατάσταση χαοτική όπου ο κάθε προγραμματιστής που αναπτύσσει κάποια εφαρμογή δημιουργεί ad hoc κανόνες ονοματοδοσίας ή αφήνει τα δεδομένα που περιέχονται στα MQTT μηνύματα χωρίς metadata που τα περιγράφουν. Για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και δεδομένου των περιορισμών της οθόνης στην σύνταξη MQTT μηνυμάτων, αυτά τα ζητήματα δεν μελετήθηκαν σε βάθος.

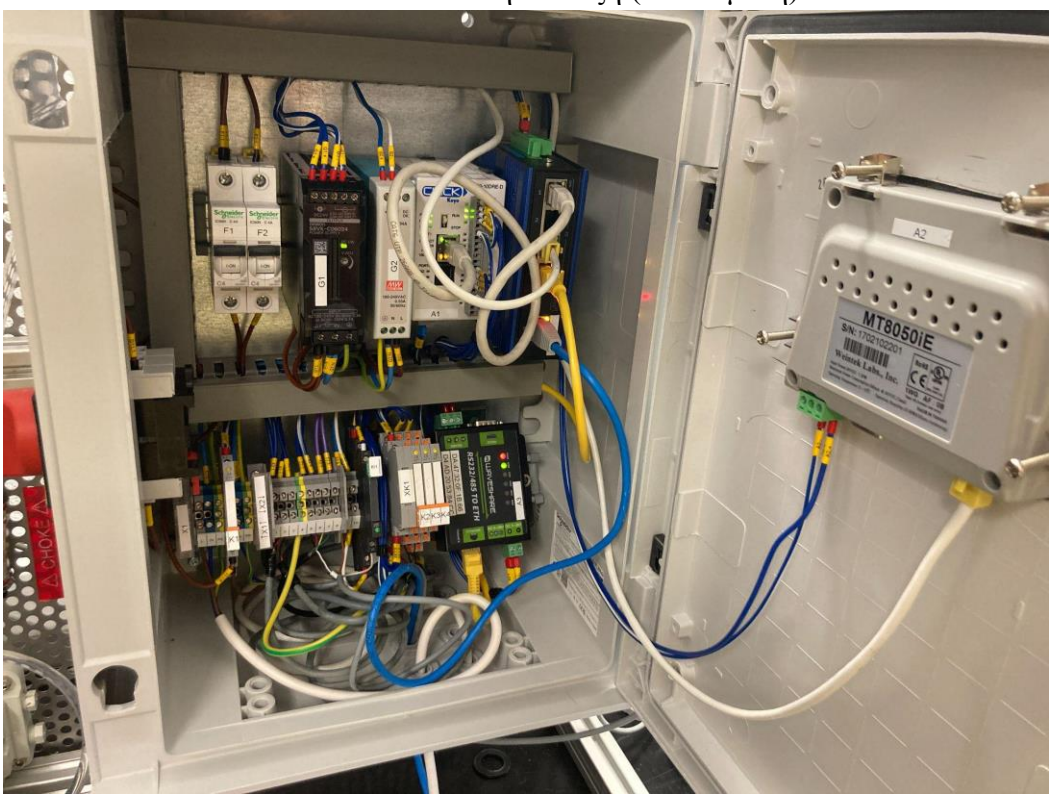
Επίσης συμπεραίνεται ότι το MQTT είναι πιο εύκολη στη χρήση από το OPC UA, αλλά η πληρότητα του τελευταίου ίσως το καθιστούσε καταλληλότερη επιλογή πρωτοκόλλου, χωρίς τα προαναφερθέντα ζητήματα.

Συνολικά, η μελέτη της αρχιτεκτονικής και η υλοποίησή της είναι ένα ζήτημα ευρύτερο, που ξεφεύγει από τα όρια του αυτοματισμού και αφορά θέματα πληροφορικής.

Εικόνα 6.1 Η τελική διάταξη



Εικόνα 6.2 Η τελική διάταξη (εστιασμένη)




Εικόνα 6.3 Ο πίνακας αυτοματισμού της διάταξης

### 6.2 Προτάσεις

Ως προς της διάταξη, μια από τις αλλαγές που θα μπορούσαν να γίνουν είναι η αντικατάσταση της βαλβίδας του αέρα (Y1) ή καλύτερα της παροχής υγρού (Y2) με αναλογική και η εκτέλεση βρόχου PID για την ομαλή πλήρωση του δοχείου. Στην πρώτη περίπτωση, θα

μπορούσε να μελετηθεί η δυνατότητα ελέγχου μιας διαφραγματικής αντλίας μέσω της παροχής του αέρα με ικανοποιητική ακρίβεια.

Οι περισσότερες προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση αφορούν την προτεινόμενη αρχιτεκτονική που παρουσιάστηκε. Αρχικά, τα περισσότερα ERP της αγοράς δεν υποστηρίζουν MQTT και η επιλογή ενός ERP είναι δεσμευτική για μια επιχείρηση, οπότε θα μπορούσε να μελετηθεί η δυνατότητα δημιουργίας κάποιας γέφυρας για αυτό το σκοπό.

Ένα ακόμα θέμα μελέτης είναι η αντικατάσταση του HMI της διάταξης με ένα που υποστηρίζει και την προδιαγραφή Sparkplug και OPC UA για εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων

Επίσης ένα ενεργό θέμα μελέτης στην κατεύθυνση του Sparkplug είναι η μεταφορά μέσω MQTT της εργασίας που έχει επιτελέσει το OPC με το companion specifications για την εφαρμογή του ISA 95.

# Βιβλιογραφία


[1] Ι. Κ. Δαγκίνης, Α. Ι. Γλύκας, *Αντλίες*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενιδίου, 2016.

[2] *Double Diaphragm Pumps Concept and Theory*, Rev 3. Graco Inc., Minneapolis, USA, 1996. [Online]. Διαθέσιμο: http://wwwd.graco.com/training/concept_and_theory/Double%20Dia.%20Pumps%20v3.pdf.

[3] Κ. Καλοβρέκτης, Ν. Κατέβας, *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου*, 2η έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.

[4] *Transactions in Measurement and Control - Flow & Level Measurement*. OMEGA Engineering Inc., 2001. [Online] Διαθέσιμο: https://www.omega.co.uk/about/transactions/Transactions_Vol_IV.pdf

[5] Χ. Χατζηδημητρίου, *Έλεγχος και Εφαρμογές Σερβοϋδραυλικών Συστημάτων*, Διπλ. εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.

[6] G. Prede, D. Scholz, Electropneumatics: Basic Level. Festo Didactic GmbH & Co., 2002.

[7] *Fluid power systems and components - Graphic symbols and circuit diagrams*, ISO 1219-1:2006, 2006.

[8] *Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements*, EN 60204-1, 2006.

[9] *Απαιτήσεις για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις*. ΕΛΟΤ HD 384, 2004.

[10] Π. Κεμίδης, Δ. Μπαργιωτάς, και Χ. Σκανδαλίδης, *Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις - Υποσταθμοί*, Α' τεύχος. Αθήνα: ΟΕΔΒ, 2001

[11] M. Berger, W. Christ, G. Flierl, R. Neumann, M. Schultz. *Control Panels compliant with IEC Standards and European Directives*, Siemens, 2017.

[12] *Transient Suppression Guidelines for AutomationDirect PLCs*, Rev. A. AutomationdDirect, 5/24/16.

[13] *Topics in Circuit Protection for Power Supplies*, Rockwell Automation, USA, October 2012.

[14] *Comparison of tripping characteristics for miniature circuit-breakers.* ABB, Helderlber, Germany, 2013.

[15] F. D. Petruzella, *Programmable Logic Controllers*. McGraw-Hill Education, 2010.

[16] T. R. Kuphaldt, "2-wire ('loop-powered') Transmitter Current Loops," *Understanding Analog Instrumentation | Textbook*, Dec. 02, 2019. [Online]. Διαθέσιμο: https://control.com/textbook/analog-electronic-instrumentation/2-wire-loop-powered-transmitter-current-loops/

[17] Lokesh Ghulyani, "Single-Supply Analog Input Module Reference Design with 16-Bit, 8-Channel 1 Submit Documentation Feedback ADC for PLC", Texas Instruments, TIDU291A, 2015.

[18] *CLICK PLC User Manual*, 6th ed. rev. M, AutomationDirect, April 2023. [Online]. Διαθέσιμο: https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/c0userm/c0userm.pdf

[19] E. D. Knapp and Joel Thomas Langill, *Industrial network security : securing critical infrastructure networks for smart grid, SCADA, and other industrial control systems*. Waltham, Ma: Syngress, 2015.

[20] *MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3*. Modbus Organization, 2012. [Online]. Διαθέσιμο: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf

[21] D. Bailey and E. Wright, *Practical SCADA for industry*. Newnes, 2003.

[22] *MQTT Essentials Ebook*, 2nd ed. HiveMQ. [Online]. Διαθέσιμο: https://www.hivemq.com/static/ebooks/hivemq-ebook-mqtt-essentials.pdf

[23] "MQTT", Wikipedia, [Online]. Διαθέσιμο: https://en.wikipedia.org/wiki/MQTT

[24] *Sparkplug 3.0.0 - Sparkplug Specification*, Sparkplug Specification Project Team, 2022. [Online]. Διαθέσιμο: https://www.eclipse.org/tahu/spec/sparkplug_spec.pdf

[25] *Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)*, DIN SPEC 91345, 2016.

[26] F. J. Folgado, D. Calderón, I. González, and A. J. Calderón, "Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends," *Electronics*, vol. 13, no. 4, p. 782, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.3390/electronics13040782.

[27] O. Givehchi, K. Landsdorf, P. Simoens, and A. W. Colombo, "Interoperability for Industrial Cyber-Physical Systems: An Approach for Legacy Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3370–3378, Dec. 2017, doi: https://doi.org/10.1109/tii.2017.2740434.

[28] P. Kannisto, D. Hästbacka, T. Gutiérrez, O. Suominen, M. Vilkko, and P. Craamer, "Plant-wide interoperability and decoupled, data-driven process control with message bus communication," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 26, p. 100253, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100253.

[29] F. Pethig, "Leveraging the Potential of MQTT in Industrie 4.0". To be published. 2023. [Online]. Διαθέσιμο: https://www.researchgate.net/publication/380094987_Leveraging_the_Potential_of_MQTT_in_Industrie_40

[30] P. Denzler and W. Kastner, "Reference architectures for closing the IT/OT gap," in Digital Transformation, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023, pp. 95–123.

[31] A. Nipper, "SCADA is not a middleware," *Control Engineering*, Apr. 02, 2021. [Online]. Διαθέσιμο: https://www.controleng.com/articles/scada-is-not-a-middleware/