



Σχεδιασμός και ανάπτυξη  
αλγορίθμου λειτουργίας  
εγκατάστασης διαφασικού ORC σε  
περιβάλλον LabVIEW

Τομέας Θερμότητας, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων

Επιβλέπων: Δρ. Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Δαμόπουλος Γεώργιος

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους οι οποίοι βοήθησαν να γίνει αυτή η εργασία πραγματικότητα.

Πρώτα απ' όλα τον καθηγητή μου κ. Καρέλλα Σωτήριο που με εμπιστεύτηκε με ένα δύσκολο και άρκως ενδιαφέρον θέμα.

Φυσικά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Βαρβαγιάννη Ευστράτιο για την υπομονή του, την βοήθειά του σε τεχνικά και μη θέματα, καθώς και για όλες τις συμβουλές του.

Και τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι υπάρχουν δίπλα μου και με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα με τον δικό τους μοναδικό τρόπο.

*Αυτή η σελίδα έμεινε σκοπίμως κενή*

## Περίληψη

Την τελευταία δεκαετία η επιστημονική κοινότητα μελετά την ηλεκτροπαραγωγή μέσω του Μερικώς Ατμοποιημένου Οργανικού Κύκλου Rankine (PE ORC), δηλαδή με το εργαζόμενο μέσω να εκτονώνεται στην διφασική περιοχή του. Ο κύκλος αυτός αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία καθώς θεωρητικά επιτρέπει μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης από ένα συμβατικό ORC ειδικά όταν η πηγή θερμότητας του κύκλου είναι χαμηλής θερμοκρασίας. Η δυσκολία στην εφαρμογή του PE ORC είναι η κατασκευή ικανοποιητικά αδιαβατικού εκτονωτή λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν τα φαινόμενα κατά την εκτόνωση ενός διφασικού μέσου, ενώ μια δεύτερη πρόκληση είναι ο αυτοματισμός μιας τέτοιας εγκατάστασης.

Η παρούσα εργασία πέρα από τον αλγόριθμο λειτουργίας μιας πειραματικής εγκατάστασης PE ORC παραθέτει και έναν τυποποιημένο τρόπο ανάπτυξης αλγορίθμων λειτουργίας τέτοιων εγκαταστάσεων.

Αρχικός στόχος ήταν η ανάπτυξη αλγορίθμου για την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Για να επιτευχθεί αυτό με ασφάλεια, ο προγραμματισμός έγινε στο περιβάλλον του LabVIEW στο οποίο έγινε προσομοίωση της εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό ο αλγόριθμος ελεγχόταν αρχικά στον υπολογιστή πριν δοκιμαστεί στην εγκατάσταση. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για οποιονδήποτε αλγόριθμο λειτουργίας, οποιασδήποτε εγκατάστασης.

Επιπλέον, δημιουργήθηκαν βασικές συναρτήσεις βιομηχανικού ελέγχου στο περιβάλλον του LabVIEW, ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν πιο περίπλοκοι αυτοματισμοί. Χρησιμοποιώντας αυτές τις συναρτήσεις σε συνδυασμό με άλλες έτοιμες από το περιβάλλον του LabVIEW δημιουργήθηκε ο αλγόριθμος λειτουργίας της εγκατάστασης, ο οποίος πέρα από ασφάλεια παρέχει, αυτοματισμούς και δυνατότητα ρύθμισης μερικών παραμέτρων από τον χρήστη.

Στη συνέχεια έγινε επιτυχής δοκιμή του αλγορίθμου της εγκατάστασης, ώστε να διαπιστωθεί ότι λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο. Τέλος, προσδιορίστηκαν οι σταθερές των PID, ώστε να υπάρχει περισσότερη ασφάλεια, και το μοντέλο απωλειών του εκτονωτή με σκοπό να δοθεί η δυνατότητα έμμεσου υπολογισμού του παραγόμενου μηχανικού έργου σε επόμενα πειράματα.

Κλείνοντας η εργασία παραθέτει τα συμπεράσματα της και προτάσεις για μελλοντική έρευνα επί του θέματος.

*Αυτή η σελίδα έμεινε σκοπίμως κενή*

## Abstract

In the last decade the scientific community has been studying electrical power generation from Partially Evaporated Organic Rankine Cycle (PE ORC), in which the working fluid expands in its dual-phase region. This cycle is a very promising technology as it theoretically allow for greater efficiency than a normal ORC especially when the heat source of the cycle is at a low temperature. The difficulty in applying such a technology is building an adequately adiabatic expander due to the restrictions from the complicated phenomena during dual-phase expansion, while another challenge is the automation of a real life application of such a technology.

This thesis apart from creating an operating algorithm for a PE ORC installation offers a standardised method of creating such algorithms for similar instalments.

The initial goal was to create an operating algorithm for the safe function of the experimental instalment in the lab. To achieve that, the coding was done in LabVIEW and an exact simulation of the instalment was made in it. That way the algorithm could be tested firstly in the PC and then to the instalment. This method can also be used for any operating algorithm and for instalment.

Furthermore, basic functions of industrial control were built in LabVIEW, in order for more complicated automations to be developed. Using these functions along with functions provided by LabVIEW the operating algorithm was developed, which apart from safety offers automation and opportunity for the user to change some variables.

Going forward, the operating algorithm was tested to ensure it works as it is supposed to. Lastly, the constants of the PIDs were defined and a model for the losses of the expander was created, as a means to indirectly calculate the produced mechanical power of the expander in future experiments.

This thesis ends by summarizing the conclusions derived from this research and providing suggestions for future research in the topic.

*Αυτή η σελίδα έμεινε σκοπίμως κενή*



## Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>11</b>
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	12
1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	13
1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	17
<b>2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b> .....	<b>19</b>
2.1 ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	19
2.1.1 Περιγραφή του κύκλου .....	19
2.1.2 Αντλία εργαζόμενο μέσου .....	21
2.1.3 Ατμοποιητής .....	23
2.1.4 Εκτονωτής .....	25
2.1.5 Γεννήτριες .....	28
2.1.6 Αναθερμαντής .....	29
2.1.7 Ελαιοδιαχωριστής .....	29
2.1.8 Αντλία λαδιού .....	30
2.1.9 Συμπυκνωτής .....	31
2.1.10 Τροφοδοτικό δοχείο .....	31
2.1.11 Εναλλάκτης υπόψυξης .....	31
2.1.12 Βαλβίδες .....	32
2.1.13 Πρεσοστάτες .....	32
2.1.14 Κύκλωμα ζεστού νερού .....	33
2.1.15 Κύκλωμα ψυχρού νερού .....	34
2.2 ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	36
2.2.1 Επεξεργαστής .....	36
2.2.2 Ρυθμιστές στροφών .....	38
2.2.3 Οθόνες ηλεκτρολογικού πίνακα .....	42
2.3 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ .....	43
2.3.1 Αισθητήρια θερμοκρασίας .....	43
2.3.2 Αισθητήρια πίεσης .....	43
2.3.3 Όργανα Coriolis .....	44
2.4 MODBUS PROTOCOL .....	46
<b>3. ΒΑΣΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ LABVIEW</b> .....	<b>50</b>
3.1 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ - ΓΕΝΙΚΑ .....	50
3.2 ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ LABVIEW .....	52
3.3 ΒΑΣΙΚΑ FUNCTIONS ΤΟΥ LABVIEW .....	54
3.3.1 <i>While Loop</i> .....	54
3.3.2 <i>Case Structure</i> .....	54
3.3.3 <i>Flat Sequence</i> .....	55
3.3.4 <i>Feedback Node</i> .....	55
3.3.5 <i>Elapsed Time</i> .....	55
3.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ LABVIEW (SUB-VIS) .....	57
3.4.1 <i>Set Reset Flip-Flop</i> .....	57
3.3.2 <i>On &amp; Off Delay</i> .....	58
3.3.3 <i>Change Value</i> .....	60

3.3.4 <i>Sample and Hold</i> .....	62
3.3.5 <i>Negative to Positive VI</i> .....	64
3.4 PID ΕΛΕΓΚΤΕΣ ΣΤΟ LABVIEW .....	66
3.5 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ LABVIEW ΜΕ COOLPROP .....	67
3.6 ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΕΣ (LIBRARIES) ΣΤΟ LABVIEW .....	69
3.7 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ VIs ΜΕΣΩ SHARED VARIABLES .....	69
<b>4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....</b>	<b>70</b>
4.1 I/O VI .....	70
4.2 REGEN ALGORITHM VI .....	74
4.2.1 Διαδικασία εκκίνησης .....	74
4.2.2 Σφάλματα λειτουργίας .....	79
4.2.3 Διαδικασίες διακοπής λειτουργίας .....	80
4.2.4 PID ελεγκτές για υπόψυξη και υπερθέρμανση .....	80
4.2.5 Λοιποί αυτοματισμοί και ρύθμιση της εγκατάστασης .....	82
4.3 SIMULATION VI .....	83
4.4 ALGORITHM VI .....	83
4.5 MODBUS VI .....	84
4.6 DATA LOGGING VI .....	87
4.7 COOLPROP_CALC VI .....	89
4.8 ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΑΓΝΩΣΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ .....	91
4.8.1 Προσδιορισμός των σταθερών των ελεγκτών PID .....	92
4.8.2 Μοντέλο μηχανικών απωλειών εκτονωτή .....	93
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>95</b>
5.1 ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ .....	95
5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....	96
<b>6. ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....</b>	<b>97</b>
<b>7. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>98</b>
<b>8. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>99</b>
<b>9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>101</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – MODBUS MAPPING .....</b>	<b>104</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΚΑΡΤΕΣ I/O .....</b>	<b>112</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ R1233ZD(E) .....</b>	<b>116</b>

## 1. Εισαγωγή

Ένα μεγάλης σημασίας πρόβλημα, το οποίο απασχολεί την κοινωνία και την επιστημονική κοινότητα, είναι η κλιματική αλλαγή. Οι επιστήμονες σε όλο τον πλανήτη προβλέπουν καταστροφικές συνέπειες για τη ζωή στη γη, εάν συνεχίσει η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Αυτή οφείλεται κυρίως στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από την ανθρώπινη δραστηριότητα μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων. Τα ορυκτά καύσιμα εδραιώθηκαν χάρη στην μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και την αξιοπιστία τους, ενώ το μεγαλύτερο μέρος των προαναφερθέντων εκπομπών προέρχεται είτε από τις μεταφορές των αγαθών και ανθρώπων είτε από την παραγωγή ενέργειας.

Για τον λόγο αυτό οι επιστήμονες έχουν στραφεί στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σε τεχνολογικές εφαρμογές οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη διαχείρισή της. Ειδικότερα, γίνονται προσπάθειες για να αναβαθμιστούν οι υπάρχουσες τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, να μεγαλώσει ο βαθμός απόδοσής τους και να μειωθεί το κόστος τους, ώστε να γίνουν πιο ελκυστικές στη διεθνή αγορά. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονται τεχνολογίες, όπως ο Organic Rankine Cycle (ORC), ώστε να γίνει εκμετάλλευση μεγαλύτερου μέρους της ενέργειας την οποία λαμβάνουμε από άλλες πηγές και κυρίως τα καύσιμα.

Η εκμετάλλευση αυτή είναι μία δύσκολη πρόκληση καθώς πρόκειται για εκμετάλλευση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας η οποία δεν επιτρέπει μεγάλους βαθμούς απόδοσης. Επιπλέον μια τέτοια εφαρμογή εξαρτάται άμεσα από την κύρια διεργασία η οποία μπορεί να αλλάζει σημείο λειτουργίας, ανάλογα με τις ανάγκες της. Ως αποτέλεσμα οι εφαρμογές οι οποίες σχεδιάζονται καλούνται να λειτουργήσουν σε διάφορες συνθήκες μειώνοντας ακόμα περισσότερο το βαθμό απόδοσής τους. Οι δύο παράγοντες αυτοί δυσκολεύουν την βιωσιμότητα τέτοιων εφαρμογών [5]. Ωστόσο, μια τέτοια εφαρμογή είναι η εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας από μηχανές οχημάτων, στα οποία συνεχώς αλλάζει το φορτίο του κινητήρα [29].

Για μεσαίες θερμοκρασίες πηγής (100°C έως 300°C) ο οργανικός κύκλος Rankine είναι μια μελετημένη και εδραιωμένη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται για Waste Heat Recovery (WHR) [5,6] και ειδικά για εγκαταστάσεις της τάξης των μερικών MW [6]. Αντίθετα για χαμηλού βαθμού εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας η βιβλιογραφία προτείνει την τεχνολογία του Trilateral Flash Cycle (TFC) ως μια υποσχόμενη, υποψήφια τεχνολογία για μετατροπή θερμότητας σε μηχανική ισχύ. Ένα ιδανικό TFC μοιάζει σημαντικά με ένα ORC, με τις βασικές διαφορές ότι το εργαζόμενο μέσο περνάει στη διφασική περιοχή κατά την εκτόνωση του και δεν υπάρχει αλλαγή φάσης κατά την προσθήκη θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο [1]. Αντίθετα, αυτό παραμένει στην καμπύλη του κορεσμένου υγρού μέχρι το κρίσιμο σημείο, από το οποίο ξεκινάει η εκτόνωση. Μια άλλη υποσχόμενη τεχνολογία είναι το Partially Evaporated ORC (PE-ORC), στο οποίο γίνεται μερική ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου πριν την εκτόνωσή του.

Παρ' όλα αυτά η διαθεσιμότητα ερευνών πάνω σε TFC είναι περιορισμένη [16], ενώ περισσότερες μελέτες πάνω στις δύο συγκεκριμένες τεχνολογίες επικεντρώνονται σε θεωρητικά μοντέλα υπολογισμών των σημείων του κύκλου και της απόδοσής του [1,16] και στη σύγκριση με συμβατικά ORC [17,22]. Μια μεγάλη πρόκληση της κατασκευής ενός TFC ή PE-ORC είναι η επιλογή κατάλληλου εκτονωτή ο οποίος θα μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά στη διφασική περιοχή του ρευστού διατηρώντας την εκτόνωση του ικανοποιητικά αδιαβατική. Για τον λόγο αυτό η πειραματική μελέτη των δύο αυτών τεχνολογιών είναι περιορισμένη και έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα έχουν γίνει πειραματικές μελέτες για διάφορα εργαζόμενα μέσα [6] και με χρήση εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας (recuperator) [29] για την προθέρμανση του υπόψυκτου υγρού.

Σε επόμενο στάδιο χρειάζεται να μελετηθεί ο έλεγχος τέτοιων πειραματικών εγκαταστάσεων, καθώς σε πολλές εφαρμογές τόσο η πηγή θερμότητας όσο και το μέσο ψύξης δεν βρίσκονται σε σταθερές συνθήκες (θερμοκρασία και παροχή), με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Κάποιες τέτοιες εφαρμογές βρίσκονται στην αυτοκινητοβιομηχανία ή σε αυτόνομες μονάδες, όπου η ευελιξία και η αξιοπιστία σε διάφορα σημεία λειτουργίας είναι θεμελιώδης, ώστε να υπάρξει σημαντική παραγωγή ενέργειας. Σε τέτοιες εφαρμογές το θερμικό φορτίο που παρέχεται στο σύστημα μπορεί να μεταβληθεί γρήγορα με ένα περιοδικό, τυχαίο ή και απρόβλεπτο τρόπο [2].

## 1.1 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία μελετά πειραματική εγκατάσταση θερμοδυναμικού κύκλου Rankine με σπειρωτό εκτονωτή η οποία λειτουργεί με οργανικό εργαζόμενο μέσο (R123zd(E)) και της οποίας ο εκτονωτής δύναται να λειτουργεί στη διφασική περιοχή του μέσου αυτού.

Σκοπός είναι η ανάπτυξη αυτοματισμών για την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης σε όλο το φάσμα λειτουργίας της και η δυνατότητα ρύθμισης της εγκατάστασης από τον χρήστη. Επιπλέον, δημιουργήθηκε σύστημα καταγραφής τιμών των μετρούμενων και υπολογιζόμενων μεγεθών και παράκαμψής των αυτοματισμών με σκοπό τον έλεγχο της λειτουργικότητας της εγκατάστασης αποκλειστικά από τον χρήστη και την μελλοντική ανάπτυξη ελέγχου για βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης.

Το σύστημα ελέγχου δομήθηκε σε περιβάλλον LabVIEW με τη χρήση βιομηχανικού ηλεκτρονικού υπολογιστή (Industrial PC), αντικαθιστώντας τον παραδοσιακό βιομηχανικό έλεγχο μέσω Programmable Logic Controller (PLC) και η επικοινωνία όλων των ηλεκτρονικών συσκευών έγινε μέσω του πρωτοκόλλου Modbus.

Συμπερασματικά, η εργασία αυτή φιλοδοξεί να προσφέρει αφενός μεγαλύτερη κατανόηση στην πραγματική λειτουργία ενός πειραματικού ORC στο οποίο κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται στη διφασική περιοχή και αφετέρου στις βέλτιστες πρακτικές για την ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου και

επεξεργασίας δεδομένων για μια τέτοια εγκατάσταση. Η λειτουργία του συστήματος αυτού αποσκοπεί στην αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας μέσω ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας από χαμηλής θερμοκρασίας πηγές (περίπου 80 - 100°C) για μεταβλητές αρχικές συνθήκες και σε πραγματικό χρόνο.

Επιμέρους στόχος της εργασίας αποτέλεσε η δημιουργία μίας «βιβλιοθήκης» εργαλείων όπως προγραμματιστικές ρουτίνες και συναρτήσεις που θα προσομοιώνουν τη λειτουργία των αντίστοιχων βιβλιοθηκών που διαθέτουν βιομηχανικά πακέτα προγραμματισμού και οι οποίες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου και σε μελλοντικές εργασίες του εργαστηρίου.

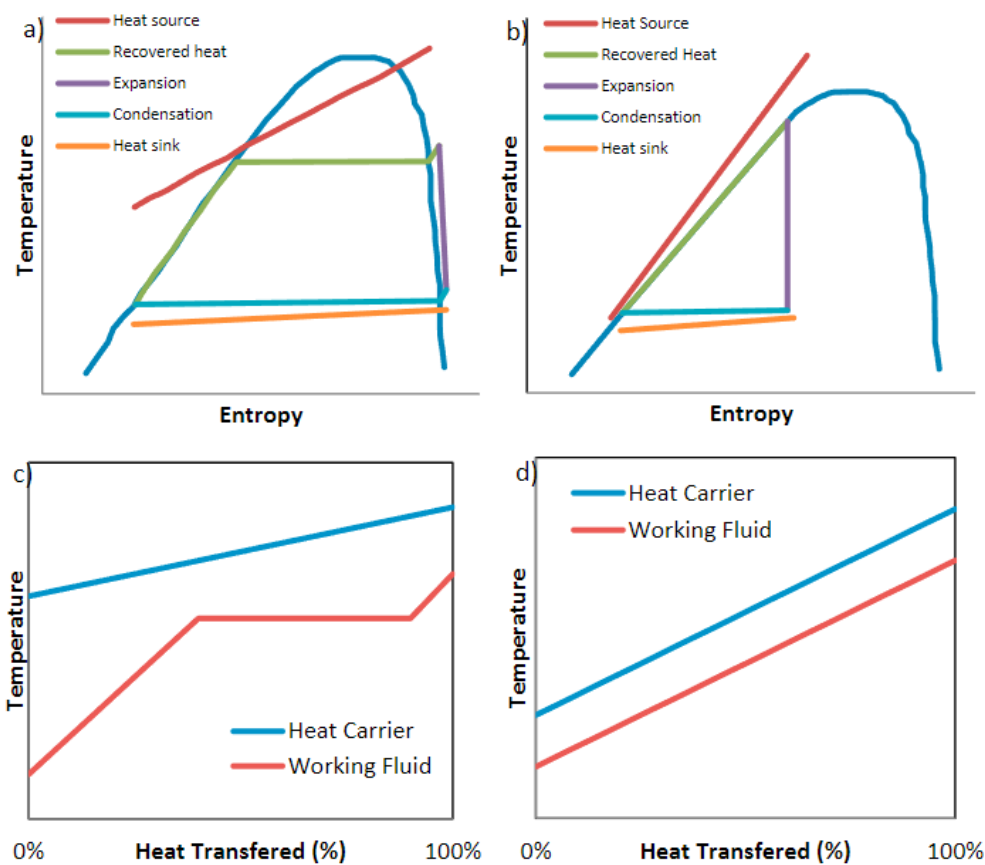
## 1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον αυτοματισμό ενός ORC με την εκτόνωση του εργαζόμενου μέσου να γίνεται στη διφασική του περιοχή (PE ORC). Η επιλογή αυτή έγινε, καθώς για θερμοκρασίες πηγής στο εύρος των 100-200°C μπορεί να παραχθεί σημαντικά περισσότερη ισχύς σε σχέση με ένα συμβατικό ORC με την προϋπόθεση ότι ο εκτονωτής μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητικά αδιαβατική εκτόνωση, δηλαδή ένα ισεντροπικό βαθμό απόδοσης άνω του 75% [3],[4] και εφόσον τόσο η πηγή θερμότητας όσο και το μέσο ψύξης παραμένουν σε σταθερή κατάσταση [4], δίνοντας τη δυνατότητα καλύτερης εκμετάλλευσης του θερμοκρασιακού εύρους του της πηγής θερμότητας. Σύμφωνα με το άρθρο [17] ακόμα καλύτερη εκμετάλλευση και μάλιστα για θερμοκρασίες πηγής κάτω των 100°C, μπορεί να επιτευχθεί με κύκλους TFC αφού είναι δυνατή η αξιοποίηση της πηγής θερμότητας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (αντίστοιχες της περιοχής υπόψυκτου υγρού του εργαζόμενου μέσου).

Ωστόσο, στην πραγματικότητα για μικρής κλίμακας TFC και ORC ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του εκτονωτή δύσκολα ξεπερνά το 70%. Ειδικότερα στη μελέτη [25] ο σπειροειδής εκτονωτής ο οποίος χρησιμοποιείται φτάνει το 57% για ένα ORC το οποίο εκμεταλλεύεται πηγή θερμότητας των 90-220 °C. Μια άλλη μελέτη για την εκμετάλλευση θερμότητας θερμοκρασίας 80-100 °C [8] έδειξε ότι τόσο ένας κοχλιωτός όσο και ένας σπειρωτός εκτονωτής είχαν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης έως 65% με τον δεύτερο να τον διατηρεί για μεγάλο εύρος λόγων εκτόνωσης. Παρά όλα αυτά σε μια πιο πρόσφατη μελέτη [26] στην οποία χρησιμοποιείται διπλοκοχλιωτός εκτονωτής (twin-screw expander) και εκμεταλλεύεται πηγή θερμότητας θερμοκρασίας 85 °C ο εκτονωτής είχε ισεντροπικό βαθμό απόδοσης έως και 74% σε ονομαστικές συνθήκες, ενώ μειωνόταν σημαντικά με την αλλαγή των στροφών του, ενθαρρύνοντας ωστόσο την περαιτέρω διερεύνηση.

Ένα πραγματικό TFC ξεκινάει από υπόψυκτο υγρό και αποτελείται από θέρμανση του εργαζόμενου μέσου μέχρι το σημείο του κορεσμένου υγρού υπό σταθερή και υψηλή πίεση, αδιαβατική εκτόνωση, συμπύκνωση υπό σταθερή πίεση μέχρι κορεσμένο υγρό και αδιαβατική συμπίεση. Ο λόγος για τον οποίο στη θεωρία έχει μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης σε σχέση με ένα συμβατικό ORC είναι, διότι πλησιάζει περισσότερο τον ιδανικό

κύκλο Carnot. Αυτό συμβαίνει καθώς τόσο η υπόψυξη, όσο και η εκτόνωση γίνονται αδιαβατικά στον ιδανικό κύκλο [3]. Αντίθετα, στο κλασικό ORC δίνεται ενέργεια στο εργαζόμενο μέσο ώστε να γίνει αλλαγή της φάσης στην οποία η θερμοκρασία παραμένει σταθερή [3],[28]. Ενώ, λοιπόν, αυξάνεται η ενθαλπία κατά την αλλαγή της φάσης, αυτή δεν εκμεταλλεύεται ως ωφέλιμο έργο, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα αρκετά μεγάλο μέρος της ενέργειας που προσφέρεται στο εργαζόμενο μέσο. Τελικά, παρ' όλο που αυξάνεται λιγότερο η ενθαλπία του εργαζόμενου μέσου σε ένα TFC, ο κύκλος επιτρέπει μεγαλύτερες παροχές μάζας με αποτέλεσμα το γινόμενο τους να είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σε ένα συμβατικό ORC με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερου ποσού ενέργειας [5].



Εικόνα 1.1 a) Τυπικό διάγραμμα T-s ORC, b) Τυπικό διάγραμμα T-s TFC, c) Διάγραμμα θερμοκρασίας εργαζόμενου μέσου και πηγής θερμότητας σε ένα ORC, d) Διάγραμμα θερμοκρασίας εργαζόμενου μέσου και πηγής θερμότητας σε ένα TFC [17].

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του TFC ενάντια στο ORC, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1, είναι ότι εκμεταλλεύεται περισσότερο την θερμική ενέργεια της πηγής, καθώς υπάρχει καλύτερη αντιστοιχία της θερμοκρασίας πηγής και του εργαζόμενου μέσου [29].

Ενώ λοιπόν, υπάρχει πληθώρα ερευνών πάνω στο ORC, μόλις τα τελευταία χρόνια μελετώνται πειραματικά τόσο τα PE ORC όσο και τα TFC για θερμοκρασίες πηγής κάτω των 100°C. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι από την ηλιακή ενέργεια [22],[27],[39], από τη

γεωθερμία [23], ή από απορριπτόμενη θερμότητα. Μάλιστα, η έρευνα έχει ξεκινήσει καθώς ένα σημαντικό κομμάτι της απορριπτόμενης θερμότητας βρίσκεται σε τέτοιες χαμηλές θερμοκρασίες [6,16], συγκεκριμένα το 12.6% σε παγκόσμια κλίμακα με βάση το άρθρο [6]. Στο ίδιο άρθρο μελετήθηκαν διάφορα οργανικά εργαζόμενα μέσα αναζητώντας το πιο αποδοτικό. Το συμπέρασμα ήταν το ότι το R1233zd(E), το οποίο είναι ακόρεστος χλωροφθοράνθρακας, και το R235fa, το οποίο είναι υδροφθοράνθρακας, είναι κατάλληλα για ένα τέτοιο κύκλο, με το τελευταίο να έχει χαμηλότερο κόστος, αλλά μεγαλύτερο δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη [6].

Όπως γίνεται αντιληπτό η μεγάλη πρόκληση ενός PE ORC ή ενός TFC είναι η επιλογή ενός κατάλληλου εκτονωτή, ο οποίος θα πετυχαίνει ικανοποιητικό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης και δεν θα κινδυνεύει από φαινόμενα σπηλαιώσης του εργαζόμενου μέσου. Σήμερα, για εργαζόμενο μέσο σε διφασική περιοχή χρησιμοποιούνται εκτονωτές θετικής μετατόπισης όπως ο εμβολοφόρος (reciprocating), ο κοχλιωτός (screw) ή ο σπειροειδής (scroll). Για ένα χαμηλής ισχύος σύστημα (<10kW) και για μικρές παροχές, όπως η εγκατάσταση προς μελέτη, προτείνεται ο σπειροειδής εκτονωτής [7], ενώ ο ίδιος προτείνεται και για χαμηλούς λόγους εκτόνωσης [8]. Είναι φανερό ότι αποφεύγονται εκτονωτές με πτερύγια, καθώς δεν μπορούν να λειτουργήσουν με διφασικό εργαζόμενο μέσο.

Ένα ακόμα αντικείμενο για το οποίο δεν υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία είναι η λίπανση του εκτονωτή σε συστήματα ORC ή και TFC και πως αυτή επηρεάζει την απόδοση του κύκλου. Οι εκτονωτές θετικής μετατόπισης είναι σημαντικό να έχουν επαρκή λίπανση των ρουλεμάν, των μηχανικών μονώσεων έναντι διαρροών και για την φραγή καναλιών διαρροής, ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικά [28].

Για τη λίπανση αυτή έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα συστήματα. Ένα από αυτά, για σύστημα ORC, είναι ένα ξεχωριστό κύκλωμα το οποίο στέλνει λιπαντικό στον εκτονωτή μέσω αντλίας το οποίο εξέρχεται του εκτονωτή με το εργαζόμενο μέσω πριν πάει σε ελαιοδιαχωριστή και μετά πάλι στην αντλία του λιπαντικού. Στην έρευνα [25] στην οποία χρησιμοποιήθηκε δεν υπήρχε κάποια μελέτη για την επίδρασή του συστήματος στον κύκλο. Μια άλλη μέθοδος, πάλι σε σύστημα ORC είναι η ανάμειξη του εργαζόμενου μέσου με λιπαντικό χωρίς την ύπαρξη ελαιοδιαχωριστή και συνεπώς ξεχωριστού κυκλώματος του λιπαντικού [28]. Η ίδια πειραματική έρευνα μελετά και ένα τρίτο σύστημα με τον ελαιοδιαχωριστή να βρίσκεται ανάμεσα στον ατμοποιητή και τον εκτονωτή. Στην περίπτωση αυτή το μείγμα εργαζόμενου μέσου και λιπαντικού εξέρχεται του εκτονωτή, συμπυκνώνεται και μέσω αντλίας αφού περάσει από τον ατμοποιητή πηγαίνει στον ελαιοδιαχωριστή. Από αυτόν εξέρχεται το εργαζόμενο μέσο το οποίο πηγαίνει σε αέρια κατάσταση στον εκτονωτή, ενώ το λιπαντικό μεταφέρεται λόγω της υψηλότερης του πίεσης από αυτή μέσα στον εκτονωτή στα σημεία που χρειάζεται. Τα τρία αυτά συστήματα μελετώνται στην ίδια έρευνα, με το καθένα να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Τέλος, στο άρθρο [1] το οποίο μελετά ένα TFC χρησιμοποιήθηκε μικρή ποσότητα polyester (POE) oil καθώς η λίπανση των ρουλεμάν

γίνεται μέσω του εργαζόμενου μέσου, ενώ για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ότι το εργαζόμενο μέσο ήταν καθαρό.

Πέρα από το θεωρητικό υπόβαθρο ενός PE ORC απαιτείται κατάλληλος αυτοματισμός της εγκατάστασης, ώστε η εφαρμογή να είναι βιώσιμη, ειδικά σε εφαρμογές με ευμετάβλητες συνθήκες. Για την επίτευξη ελέγχου σε βιομηχανικές διαδικασίες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο Programmable Logic Controllers (PLCs) [13], καθώς είναι εύκολα προγραμματίσιμοι επεξεργαστές, οι οποίοι μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα με διαφορετικό αριθμό εισόδων και εξόδων και κατασκευάζονται, ώστε να είναι ανθεκτικοί σε πιο ακραίες συνθήκες (σκόνη, θερμοκρασία, υγρασία) [14]. Σε ερευνητικό επίπεδο, υπάρχουν και εφαρμογές όπως το LabVIEW, το οποίο χρησιμοποιεί ένα γραφικό περιβάλλον αντί για γλώσσα προγραμματισμού για τον προγραμματισμό ενός επεξεργαστή όπως ένα PLC. Μέσω του γραφικού περιβάλλοντος και των ενσωματωμένων λειτουργιών στο πρόγραμμα ο προγραμματισμός γίνεται ακόμα πιο εύκολος ενώ προηγμένες λειτουργίες όπως πολύπλοκοι μαθηματικοί υπολογισμοί, γίνονται εφικτές.

Η βιβλιογραφία ασχολείται σχεδόν εξ' ολοκλήρου με τον έλεγχο της αποδοτικότητας μια πειραματικής εγκατάστασης. Παρ' όλα αυτά για τον έλεγχο ασφαλείας της εγκατάστασης η οποία μελετάται λήφθηκε υπό όψη, η εργασία [12] και οι λειτουργίες του PLC ασφαλείας, όπως περιγράφονται για ένα συμβατικό ORC, διότι η ειδοποιός διαφορά σε σχέση με ένα TFC ή ένα PE-ORC είναι η επιλογή του εκτονωτή. Συνεπώς, πολλά μέτρα ασφαλείας παραμένουν ίδια. Επιπλέον, τόσο η εργασία [12] όσο και η [24] παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες για την εκκίνηση και παύση λειτουργίας της εγκατάστασης με ασφαλή τρόπο.

Όσον αφορά τον έλεγχο λειτουργίας σε κύκλους ORC με ισχύ από μερικά kW έως περίπου 100kW υπάρχουν κομμάτια του ελέγχου που δεν έχουν μελετηθεί αρκετά. Ένα από αυτά είναι η ακριβής μοντελοποίηση του δυναμικού συστήματος για λόγους σχεδίασης και βελτιστοποίησης [2].

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις διακυμάνσεις της θερμικής πηγής και τις αλλαγές σε απαιτήσεις φορτίου ένας μη λογικός έλεγχος θα οδηγήσει αναπόφευκτα τις μεταβλητές κατάστασης μακριά από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας ή και να ξεπεράσουν τους περιορισμούς που οφείλονται στα χαρακτηριστικά ενός ORC. Συνεπώς, οι απαιτήσεις για γρήγορους και ποιοτικούς ελεγκτές είναι υψηλές. Στη βιβλιογραφία οι ελεγκτές αυτοί μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες σύμφωνα με τις μεθόδους ελέγχου που χρησιμοποιούν, τους PID και τους Advanced Predictive Control (APC) [9].

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι APC ελεγκτές προσφέρουν καλύτερη απόδοση υπό την προϋπόθεση ότι επιλύουν πιο γρήγορα το πρόβλημα βελτιστοποίησης από το χρόνο δειγματοληψίας, αλλά με αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Σε πολλές εφαρμογές δε η διαφορά στην απόδοση είναι ασύμφορη και γι' αυτό οι PID ελεγκτές είναι περισσότεροι από τους μισούς ελεγκτές στην βιομηχανία σήμερα [30].



Συγκεκριμένα, έλεγχος Model Predictive Control (MPC), η οποία είναι υποκατηγορία του APC, έχει δοκιμαστεί σε ORC τα οποία χρησιμοποιούνται για Waste Heat Recovery (WHR) από κινητήρες βαρέων φορτηγών, έχοντας καλύτερες επίδοσης τόσο με γραμμικό όσο και με μη γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης [10].

Στην κατηγορία των MPC εφαρμόζονται επίσης στρατηγικές ελέγχου οι οποίες χρησιμοποιούν ένα δυναμικό πίνακα (Dynamic Matrix) αντί για κάποιο θεωρητικό μοντέλο, γνωστές και ως Dynamic Matrix Control (DMC) για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Μία από αυτές είναι η Economic DMC, η επίλυση δηλαδή του προβλήματος ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης κόστους σε ένα χρονικό ορίζοντα. Μια εφαρμογή της είναι ο έλεγχος σε ORC για την εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας από μηχανή πλοίου στην οποία παρατηρήθηκε ότι ο έλεγχος αυτός παρείχε περισσότερη ενέργεια από έναν τυπικό έλεγχο PID της τάξης του 4%, ενώ υπήρχαν και επιπλέον περιθώρια βελτίωσης [11].

Στις πιο προηγμένες μεθόδους συναντάται η Fast DMC η οποία επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς και τους επιβάλλει μετά, ώστε να βρει τη βέλτιστη λύση. Η μέθοδος αυτή θυσιάζει την απόδοση ενός παραδοσιακού DMC για να μειώσει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος [9].

Τέλος, δεν έχουν αναπτυχθεί μοντέλα ελέγχου για TFC ή PE-ORC καθώς τα φαινόμενα στον εκτονωτή είναι πολύπλοκα. Θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης έχουν αναπτυχθεί για συγκεκριμένες εφαρμογές κοχλιωτών εκτονωτών [1], [16]. Ωστόσο, ακόμα στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικά μοντέλα, ανάλογα των εκάστοτε εφαρμογών.

### 1.3 Δομή Εργασίας

Όπως προαναφέρθηκε η συγκεκριμένη εργασία μελετά τον αυτοματισμό μιας εγκατάστασης ORC με σπειρωτό εκτονωτή. Στα επόμενα κεφάλαια λοιπόν αναπτύσσονται τα ακόλουθα θέματα:

1. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η εγκατάσταση και όλα τα στοιχεία της. Αυτά περιλαμβάνουν τις ηλεκτρονικές συσκευές, τα αισθητήρια και τα στοιχεία του κύκλου.
2. Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσονται τα προαπαιτούμενα εργαλεία τα οποία δημιουργήθηκαν στο LabVIEW για την υλοποίηση του αυτοματισμού και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε άλλη αντίστοιχη εφαρμογή.
3. Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στον αλγόριθμο αυτοματισμού της εγκατάστασης ο οποίος σχεδιάστηκε για να προσφέρει ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης, καταγραφή δεδομένων και να υπολογίζει βασικά μεγέθη του κύκλου, όπως η ενθαλπία, η ισχύς των μηχανών κ.α. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν εφαρμογές, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία της εγκατάστασης και όλων των ηλεκτρονικών

συσκευών. Επιπροσθέτως, έγιναν πειράματα για τον προσδιορισμό των απωλειών του εκτονωτή λόγω τριβών και για τον προσδιορισμό των σταθερών του PID για την υπόψυξη. Τα πειράματα αυτά έγιναν με σκοπό να είναι δυνατός ο έμμεσος υπολογισμός του παραγόμενου έργου στην άτρακτο του εκτονωτή σε μελλοντικά πειράματα.

4. Στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας τα οποία προέκυψαν τόσο από την ανάπτυξη του αλγορίθμου όσο και από την λειτουργία της εγκατάστασης και αναγράφονται προτεινόμενες επόμενες εργασίες για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

## 2. Περιγραφή της εγκατάστασης

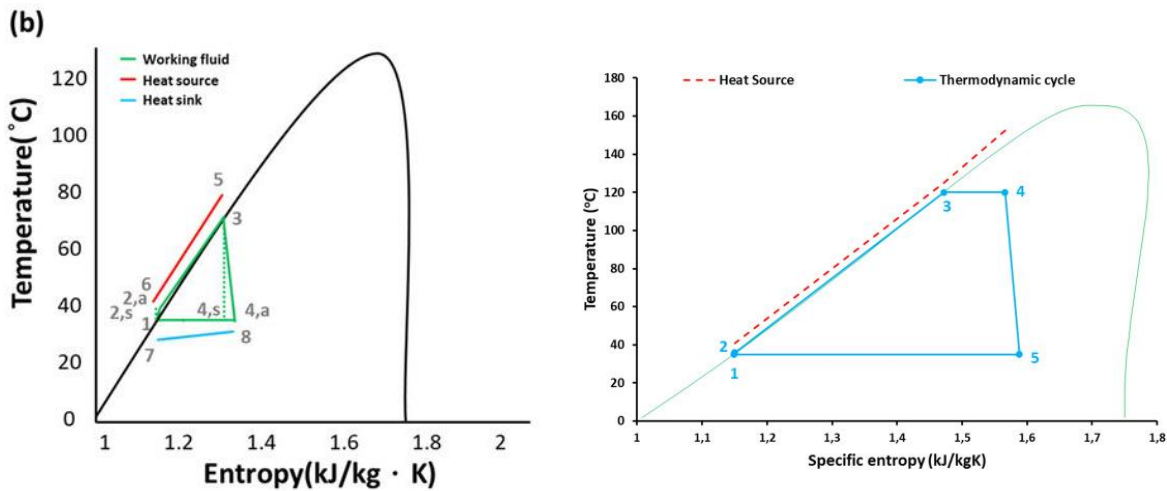
### 2.1 Μηχανολογικό μέρος

#### 2.1.1 Περιγραφή του κύκλου

Η εγκατάσταση έχει σχεδιαστεί για δοκιμές κύκλων TFC ή PE-ORC και αποτελείται από το κύριο κύκλωμα από το οποίο διέρχεται το εργαζόμενο μέσο και το δευτερεύον το οποίο είναι το κύκλωμα λαδιού. Φυσικά, αν το νερό του ατμοποιητή έχει αρκετά μεγάλη θερμοκρασία το οργανικό μέσο μπορεί να ατμοποιηθεί πλήρως και η εγκατάσταση θα λειτουργεί ως ένα συμβατικό ORC.

Ως οργανικό μέσο για την εγκατάσταση επιλέχθηκε το ψυκτικό R1233zd(E), το οποίο είναι ένας ακόρεστος υδροφθοράνθρακας (HFO) με κρίσιμο σημείο 1 atm και 18.31 °C. Γενικότερα, τέτοιοι υδροφθοράνθρακες έχουν μηδενικό δυναμικό διάλυσης όζοντος και χαμηλό GWP (Global Warming Potential). Το ψυκτικό αυτό επιλέχτηκε καθώς σύμφωνα με το άρθρο [6] είχε την καλύτερη απόδοση σε σχέση με άλλα ψυκτικά τα οποία δοκιμάστηκαν για θερμοκρασίες πηγής κάτω των 100 °C, όπως και η εγκατάσταση η οποία μελετάται. Επιπλέον στο παράρτημα Γ φαίνεται ο πίνακας της κατάστασης κορεσμού του ψυκτικού για διάφορες πιέσεις.

Η διαδικασία του κύκλου περιγράφεται ως εξής: Το οργανικό μέσο ξεκινάει από την αντλία (1) και περνάει από το πρώτο μετρητικό όργανο Coriolis, από το οποίο λαμβάνουμε την παροχή της υγρής φάσης του ρευστού. Έπειτα το εργαζόμενο μέσο συνεχίζει στον ατμοποιητή (2), περνάει από το δεύτερο μετρητικό όργανο Coriolis, μέσω του οποίου μετράμε την ποιότητα του ρευστού, πριν πάει στον εκτονωτή (3), ο οποίος συμπλέκει με την γεννήτρια μέσω ιμάντα παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Στη συνέχεια περνάει από τρίτο μετρητικό όργανο Coriolis με το οποίο ξαναμετράμε την ποιότητα του ρευστού και εισέρχεται στον αναθερμαντή (4). Ύστερα προχωράει στον ελαιοδιαχωριστή και συνεχίζει στον συμπυκνωτή (5) πριν καταλήξει στο τροφοδοτικό δοχείο (6). Κλείνοντας τον κύκλο το ρευστό περνάει από τον εναλλάκτη υπόψυξης (6), ώστε να αποτραπούν φαινόμενα σπηλαίωσης στην αντλία. Παρακάτω εικονίζεται ποιοτικά ένας θεωρητικός κύκλος TFC και PE-ORC σε διάγραμμα T-s.



Εικόνα 2.1 Ποιοτικό διάγραμμα ενός TFC και ενός PE-ORC [39]

Ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου ορίζεται ως ο λόγος του παραγόμενου έργου του εκτονωτή προς την θερμότητα που απορροφά ο ατμοποιητής:

$$\eta_{th} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (2.1)$$

Ενώ ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης λαμβάνει υπ' όψιν του την καθαρή ηλεκτρική ισχύ:

$$\eta_{el} = \frac{P_{net}}{m_{wf}(h_2 - h_1)} \quad (2.2)$$

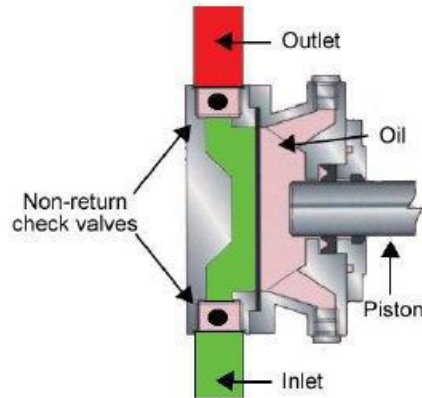
Όπως είναι φανερό από τις παραπάνω εξισώσεις δεν λαμβάνεται υπ' όψιν το λάδι το οποίο βρίσκεται μέσα στο κύκλωμα, καθώς η επίδραση θεωρήθηκε αμελητέα. Παρ' όλα αυτά δεν υπάρχουν αρκετές πειραματικές μελέτες για την επιβεβαίωση της υπόθεσης αυτής. Συνεπώς, είναι κάτι το οποίο προτείνεται για μελλοντικές διπλωματικές εργασίες.

Στόχος του κυκλώματος λαδιού είναι η λίπανση του εκτονωτή για την προστασία του από τη φθορά τόσο στα ρουλεμάν όσο και στα κινητά του μέρη. Ως μέσο λίπανσης επιλέχθηκε το POE-32 το οποίο είναι ένα συνθετικό λάδι, με βάση Polyolester, κατάλληλο για χρήση με υδροφθοράνθρακες όπως το R1233zd(e). Το λάδι ξεκινάει από τον ελαιοδιαχωριστή, ωθείτε από την αντλία λαδιού και εισέρχεται στο κύριο κύκλωμα μετά το δεύτερο μετρητικό όργανο Coriolis και πριν τον εκτονωτή. Στη συνέχεια ακολουθεί το κύριο κύκλωμα μέχρι να ξαναφτάσει στον ελαιοδιαχωριστή.

Τέλος, στο κύκλωμα πάνω υπάρχουν διάφοροι αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης, ώστε να λαμβάνονται μετρήσεις σε διάφορα σημεία του κύκλου για τον καλύτερο έλεγχο της εγκατάστασης. Οι αισθητήρες αυτοί, όπως και οι πρεσοστάτες, οι οποίοι παρέχουν ασφάλεια υποπίεσης και υπερπίεσης πριν και μετά την αντλία αντίστοιχα, οι βαλβίδες παράκαμψης και η βαλβίδα του εκτονωτή περιγράφονται παρακάτω στις αντίστοιχες υποενότητες.

### 2.1.2 Αντλία εργαζόμενου μέσου

Η αντλία που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι τύπου πολλαπλού διαφράγματος και πρόκειται για το μοντέλο **G10-X** της εταιρίας **Hydra-Cel**. Πρόκειται για μια αντλία τύπου θετικής μετατόπισης της οποίας η βασική αρχή λειτουργίας εικονίζεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση αντλίας διαφράγματος [12]

Με την περιστροφή του άξονα της αντλίας κινείται ένα έμβολο το οποίο συμπιέζει ή αποσυμπιέζει τον έναν θάλαμο γεμάτο με λάδι. Το διάφραγμα (μεμβράνη) μεταφέρει την συμπίεση/αποσυμπίεση που προκαλεί το έμβολο στον κυρίως θάλαμο της αντλίας εντός του οποίου διέρχεται το εργαζόμενο μέσο. Ο έλεγχος της εισόδου/εξόδου του ρευστού γίνεται με την βοήθεια αντεπίστροφων βαλβίδων οι οποίες αποτελούνται από ανοξειδωτα σφαιρίδια. Τα γενικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της αντλίας συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα:

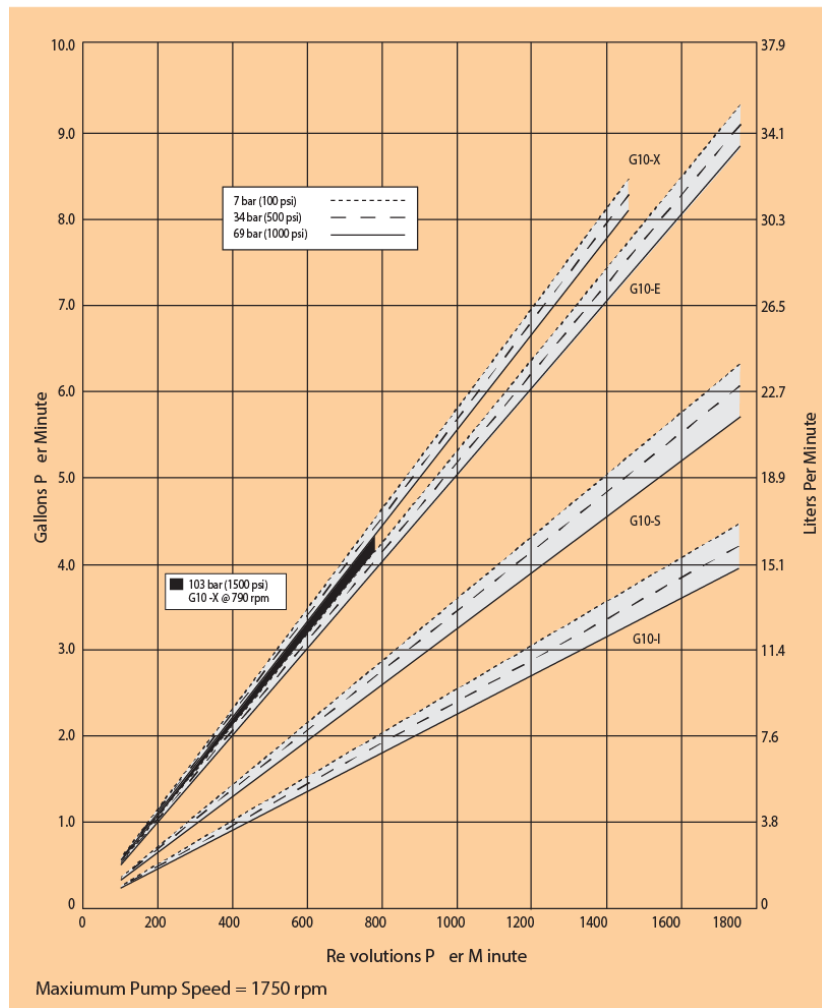
Γενικά χαρακτηριστικά	
Μέγιστη πίεση αναρρόφησης (bar)	17
Διάμετρος αναρρόφησης (in)	1
Διάμετρος κατάθλιψης (in)	3/4
Maximum Capacity	
N (RPM)	1450
Q (lpm)	30.6
Πίεση εξόδου (bar)	69

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά της αντλίας της εγκατάστασης

Ο λόγος που μια τέτοια αντλία είναι προτιμότερη για την εφαρμογή του κύκλου TFC ή PE-ORC που εξετάζουμε είναι ότι επιτρέπει τον διαχωρισμό του εργαζόμενου μέσου από τα κινούμενα μηχανικά μέρη, μειώνοντας τις πιθανότητες για διαρροή ή επαφή του μέσου με λιπαντικά. Επίσης, είναι ιδανική για εφαρμογές όπου απαιτούνται μεγάλα μανομετρικά για σχετικά μικρές παροχές, όπως στην εγκατάσταση προς μελέτη.

Όπως είναι γνωστό στις αντλίες θετικής μετατόπισης η παροχή είναι θεωρητικά ανεξάρτητη του μανομετρικού της, αν και στην πράξη τείνει να μειώνεται ελαφρά με την αύξηση του τελευταίου, κυρίως εξαιτίας των ογκομετρικών απωλειών. Έτσι η παροχή όγκου της εν λόγω αντλίας είναι ανάλογη των στροφών (με σταθερά αναλογίας τον όγκο σάρωσης), ενώ το μανομετρικό της καθορίζεται αποκλειστικά από την υδραυλική αντίσταση της γραμμής, η οποία για έναν κύκλο ORC ορίζεται κατά κύριο λόγο από τον εκτονωτή. Στο επόμενο σχήμα εικονίζεται η καμπύλη παροχής στροφών που δίνει ο κατασκευαστής της αντλίας:

Maximum Flow at Designated Pressure



Εικόνα 2.3 Διάγραμμα παροχής στροφών των αντλιών της σειράς G10 της εταιρείας Hydra-Cell

Από τις παραπάνω καμπύλες μπορεί να εξαχθεί μία γραμμική σχέση που να συνδέει την ογκομετρική παροχή με τις στροφές της αντλίας, μέσω γραμμικής προσαρμογής κάποιων από τα σημεία που βρίσκονται μεταξύ των γραμμών των 7bar και των 34bar (περιοχή λειτουργίας της αντλίας). Η σχέση αυτή είναι η ακόλουθη:

$$\dot{V}[lpm] = 0.0217 N_p [RPM] \quad (2.3)$$

Η αντλία είναι συνδεδεμένη με έναν διπολικό επαγωγικό τριφασικό κινητήρα ονομαστικής ισχύος 5.5kW της εταιρείας Valliadis (μοντέλο **K100L2-4**). Ο έλεγχος των στροφών του κινητήρα γίνεται με inverter της εταιρείας Siemens (βλ. κεφάλαιο 2.2.2). Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα της αντλίας δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

<b>Κινητήρας Αντλίας (Valliadis K100L2-4)</b>	
Αριθμός Πόλων / Σύγχρονες Στροφές	4 / 1500 RPM
Ονομαστικές Στροφές	1410 RPM
Ονομαστική Ισχύς (kW)	3
Ονομαστικός βαθμός απόδοσης (%)	81.1
Ολίσθηση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (%)	5.33

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά του κινητήρα της αντλίας

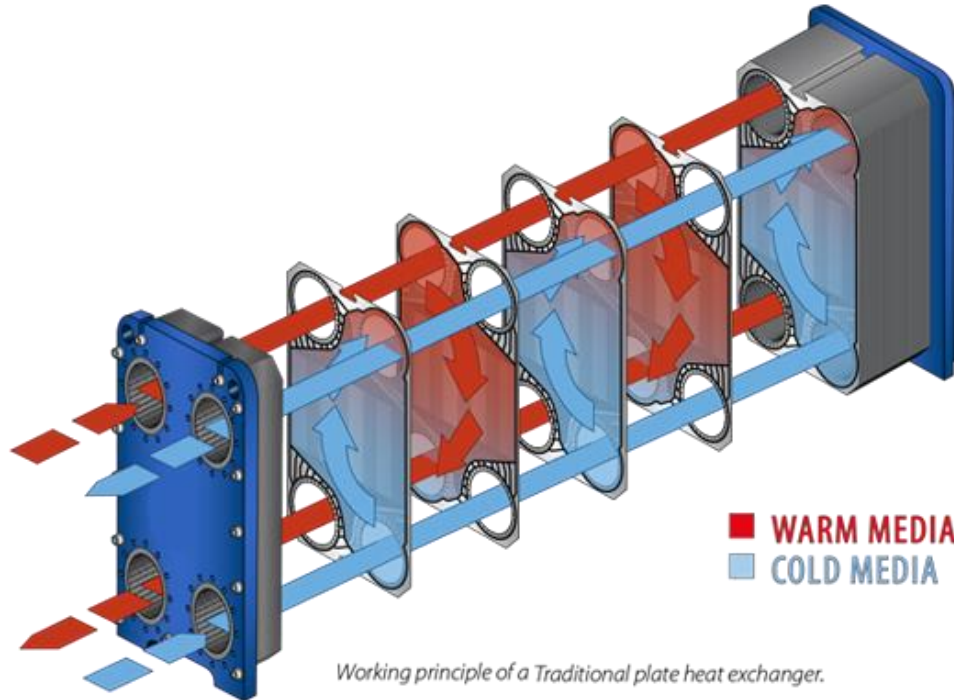
Ο κατασκευαστής δίνει επίσης και αναλυτικές μετρήσεις από δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί για τον έλεγχο της απόδοσης του κινητήρα.

### 2.1.3 Ατμοποιητής

Οι εναλλάκτες οι οποίοι επιλέχθηκαν για την εγκατάσταση είναι πλακοειδείς και ανήκουν στην εταιρεία SWEP. Συγκεκριμένα για τον ατμοποιητή επιλέχθηκε ο εναλλάκτης B120TH του οποίου η σύνδεση των πλακών έχει γίνει με μπρουτζοκόλληση.

Οι πλακοειδείς εναλλάκτες αποτελούνται από μία σειρά πολύ λεπτών πλακών οι οποίες τοποθετούνται η μία μετά την άλλη και ενώνονται μεταξύ τους είτε με σύσφιξη και την παρεμβολή ελαστικών περιεμβυσμάτων μεταξύ των πλακών για στεγάνωση (gasketed plate heat exchangers), είτε με συγκόλληση με μπρούτζο (brazed heat exchangers). Στις πλάκες είναι σχηματισμένες αυλακώσεις που ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη διάταξη (π.χ. V ή ψαροκόκαλο). Τα ρευστά διέρχονται μέσα από κανάλια που σχηματίζονται με την τοποθέτηση δύο διαδοχικών πλακών κατοπτρικά, εξαιτίας των αυλακώσεων που υπάρχουν σε κάθε πλευρά. Έτσι η μία πλευρά κάθε πλάκας διαρρέεται από το ένα ρευστό και η δεύτερη από το άλλο κατ' αντιρροή, όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 2.3. Τα ρευστά εισέρχονται στα κανάλια μέσω οπών που βρίσκονται στις γωνίες της κάθε πλάκας, οι οποίες συνδέονται με κοινούς αγωγούς ή συλλέκτες (collectors) για κάθε ένα από τα τέσσερα ρεύματα (εισαγωγή και επιστροφή). Το αποτέλεσμα είναι η επίτευξη αφενός

μεγάλης επιφάνειας συναλλαγής και αφετέρου μικρής θερμικής αντίστασης εξαιτίας του μικρού πάχους των πλακών και των έντονων μεταβολών στην κατεύθυνση της ροής μέσα σε κάθε κανάλι, που ενισχύουν την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή.



Εικόνα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση πλακοειδή εναλλάκτη

Ο συγκεκριμένος τύπος εναλλάκτη γενικά προτιμάται εξαιτίας της υψηλής απόδοσης του, η οποία επιτρέπει και την σημαντική μείωση του μεγέθους του. Επιπλέον ο όγκος ρευστού στο εσωτερικό του εναλλάκτη είναι σχετικά μικρός, επιτρέποντας ταχύτερη απόκριση του σε δυναμικές συνθήκες. Από την άλλη συνήθως εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές πτώσης πίεσης σε σύγκριση με άλλους τύπους εναλλάκτη (πχ. shell and tube), κάτι που καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διάταξη των καναλιών και τη γωνία αυλάκωσης. Τέλος έχει μικρότερη σχετικά αντοχή σε υψηλές πιέσεις, κάτι που όμως δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την εν λόγω εφαρμογή.

Τα γενικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

<b>Ατμοποιητής SWEP B120TH</b>	
Αριθμός Πλακών	30
Επιφάνεια Συναλλαγής	3.70 m <sup>2</sup>
Ονομαστική Θερμότητα Συναλλαγής	46 kW
Διαφορά Πίεσης Εργαζόμενου Μέσου	93.5 mbar

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά του ατμοποιητή

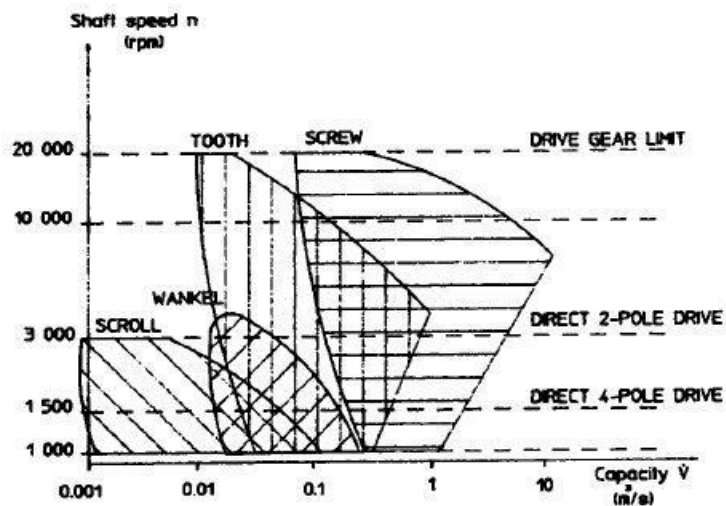


Η συνδεσμολογία των εναλλακτών έγινε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η αλλαγή φάσης και να μειωθούν οι υδραυλικές απώλειες στο εσωτερικό τους. Αυτό συνεπάγεται σύνδεση του ατμοποιητή με τρόπο ώστε η είσοδος του εργαζόμενου μέσου να είναι χαμηλά και η έξοδος ψηλά, ώστε να ευνοείται η κίνηση των φυσαλίδων αέριας φάσης με την φυσική κυκλοφορία. Από την άλλη η συνδεσμολογία του συμπυκνωτή είναι αντίστροφη, με το εργαζόμενο μέσο να εισέρχεται από ψηλά και η επιστροφή του να είναι χαμηλά, ώστε να ευνοείται η κάθοδος του συμπυκνώματος με το ίδιο του βάρος.

### 2.1.4 Εκτονωτής

Ο εκτονωτής αποτελεί το στοιχείο της εγκατάστασης το οποίο παράγει το ωφέλιμο έργο του κύκλου μέσω της εκτόνωσης του υψηλής πίεσης εργαζόμενου μέσου σε χαμηλότερη πίεση. Ο γενικός όρος εκτονωτής χρησιμοποιείται έναντι του στροβίλου, διότι σε αντίθεση με την συνήθη πρακτική στους κύκλους ατμού, όπου ο εκτονωτής είναι ατμοστρόβιλος, σε εφαρμογές PE-ORC ή TFC χρησιμοποιούνται αποκλειστικά εκτονωτές θετικής μετατόπισης, όπως ο εμβολοφόρος (reciprocating), ο κοχλιωτός (screw) ή ο σπειροειδής (scroll) καθώς μπορούν να δουλέψουν με διφασικό εργαζόμενο μέσο σε αντίθεση με τους στροβίλους.

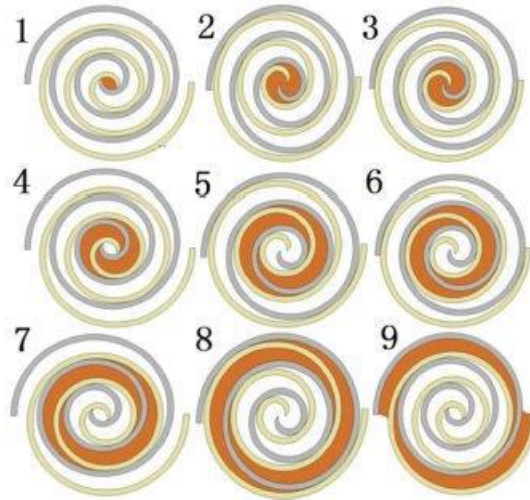
Για την εγκατάσταση επιλέχθηκε ο σπειροειδής εκτονωτής TGCE08 της εταιρείας Sanden. Επιλέχθηκε σπειροειδής εκτονωτής, διότι για συστήματα μικρής κλίμακας ισχύος και παροχής προτείνεται αυτού του είδους εκτονωτής σύμφωνα με το άρθρο και όπως συνοψίζεται στην παρακάτω εικόνα [7].



Εικόνα 2.5 Όρια αποδοτικής λειτουργίας συναρτήσει της διακινούμενης παροχής όγκου για διάφορους τύπους μηχανών θετικής μετατόπισης [7]

Το γεγονός ότι ο ελικοειδής εκτονωτής αποτελεί την ιδανική επιλογή για μικρής κλίμακας εφαρμογές οδήγησε στην ανάπτυξη της έρευνας και την κατασκευή διάφορων πρωτότυπων μοντέλων από ελικοειδείς συμπιεστές τα τελευταία χρόνια. Η μέχρι τώρα εμπειρία έχει αποδείξει ότι οι ελικοειδείς εκτονωτές αποτελούν μία οικονομική και αξιόπιστη λύση, ενώ μπορούν να έχουν αρκετά ικανοποιητικούς ισεντροπικούς βαθμούς

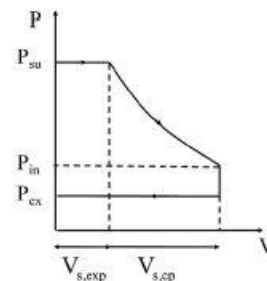
απόδοσης. Πρόσφατες πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι ο βαθμός απόδοσης μίας τέτοιας μηχανής μπορεί να φτάσει έως και 71% [31], γεγονός το οποίο αιτιολογεί την επιλογή αυτή και για συστήματα PE-ORC και TFC.



Εικόνα 2.6 Αρχή λειτουργίας ελικοειδούς εκτονωτή

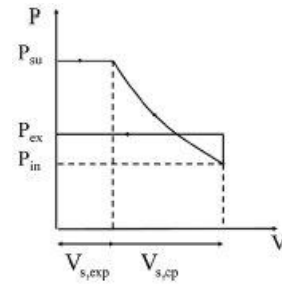
Η αρχή λειτουργίας του ελικοειδούς εκτονωτή είναι αντίστροφη αυτής του συμπιεστή. Αποτελείται από δύο έλικες, μία κινούμενη και μία ακίνητη οι οποίες είναι έκκεντρα τοποθετημένες μεταξύ τους. Το ρευστό εισέρχεται σε κατάσταση υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας στο κέντρο των δύο σπειρών και κατά την εκτόνωση του «σπρώχνει» την κινούμενη έλικα, οδηγούμενο σε σημεία που ο όγκος που περικλείεται από τις δύο σπείρες είναι μεγαλύτερος. Η εκκεντρότητα μεταξύ των δύο σπειρών έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφική κίνηση της κινούμενης έλικας ως προς ένα σταθερό σημείο. Ο λόγος πίεσης της εκτόνωσης καθορίζεται από τον λόγο των όγκων εισαγωγής-εξαγωγής, ή λόγο εκτόνωσης ( $r_v$ ).

Ο λόγος εκτόνωσης αποτελεί κατασκευαστική παράμετρο του εκτονωτή και ουσιαστικά για δεδομένη πίεση εισόδου ορίζει την πίεση στο τέλος της εκτόνωσης. Δεδομένου ότι η πίεση στην έξοδο του εκτονωτή πρακτικά καθορίζεται από την θερμοκρασία συμπύκνωσης, το ρευστό εξερχόμενο από την τελευταία έλικα (εικόνα 9 στο παραπάνω σχήμα), πραγματοποιεί μία ισόχωρη μεταβολή ούτως ώστε να φτάσει την εξωτερικά επιβαλλόμενη πίεση



Εικόνα 2.7 Απώλειες υποεκτόνωσης [12]

εξόδου. Αν η πίεση συμπίκνωσης είναι μικρότερη, τότε στο μέσο έχει πραγματοποιηθεί υποεκτόνωση και έτσι θα πρέπει να εκτονωθεί περαιτέρω υπό σταθερό όγκο στην χαμηλότερη πίεση (Εικόνα 2.7). Από την όταν η πίεση συμπίκνωσης είναι μεγαλύτερη, τότε το μέσο έχει υπερεκτονωθεί και έτσι θα οδηγηθεί στην πίεση του συμπυκνωτή με ισόχωρη συμπίεση (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8 Απώλειες υπερεκτόνωσης [12]

Οποιαδήποτε από τις παραπάνω καταστάσεις θεωρείται απώλεια για τον εκτονωτή, καθώς μειώνει τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του. Συνεπώς ο μέγιστος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται στον λόγο πίεσης αυτόν που για τις συνθήκες εισόδου-εξόδου αντιστοιχεί στον κατασκευαστικό λόγο όγκου του εκτονωτή. Από την άλλη, η περίπτωση της υποεκτόνωσης μπορεί να αυξήσει το παραγόμενο έργο εξαιτίας της περαιτέρω ισόχωρης εκτόνωσης και γι' αυτό είναι συνήθως επιθυμητή σε εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας.

Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση τοποθετήθηκε κατόπιν κατάλληλων τροποποιήσεων ένας ελικοειδής εκτονωτής ανοιχτού τύπου, δηλαδή η σύζευξη του με την γεννήτρια γίνεται εξωτερικά και συγκεκριμένα μέσω ιμάντα. Η διαστασιολόγηση επέτρεψε την λειτουργία του εκτονωτή στις 1750 rpm στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας επιτρέποντας μία σχέση μετάδοσης 1:1.7, καθώς η γεννήτρια η οποία επιλέχθηκε είναι διπολική. Προκειμένου να αποφευχθούν οι διαρροές που είναι πιθανές σε μηχανές ανοιχτού τύπου, τοποθετήθηκαν κατάλληλα στεγανωτικά περιφερειακά της σταθερής σπείρας. Πέραν αυτής, τροποποιήσεις περιλαμβάνουν και το κλείσιμο της διόδου του αέρα που χρησιμοποιείται για την ψύξη όταν η μηχανή λειτουργεί σαν συμπιεστής και πρόσθετα στεγανωτικά στις άκρες των σπειρών. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με αυτήν την διαδικασία μπορούν να βρεθούν στην διπλωματική εργασία του Β. Μούκα [32].

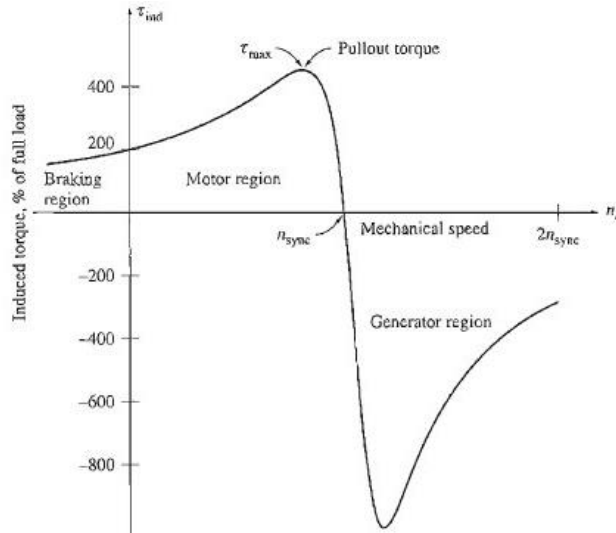
Τα χαρακτηριστικά του συμπιεστή scroll που τοποθετήθηκε στην παρούσα εγκατάσταση συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα:

Scroll Compressor Sanden TGCE08	
Όγκος σάρωσης (cm <sup>3</sup> / rev)	86.3
Λόγος εκτόνωσης $r_v$	2.3

Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικά του εκτονωτή

### 2.1.5 Γεννήτριες

Ως γεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν δύο ίδιες μοντέλου K112M-2 της εταιρείας Valliadis, το οποίο είναι ένας επαγωγικός τριφασικός κινητήρας. Όταν αυτός ξεπεράσει τις σύγχρονες στροφές, τότε με την επιβράδυνσή του λειτουργεί ως γεννήτρια, όπως φαίνεται και στη χαρακτηριστική ροπής στροφών στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.9 Χαρακτηριστική ροπής στροφών τριφασικού επαγωγικού κινητήρα [37]

Η πρώτη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με τον εκτονωτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Η δεύτερη γεννήτρια είναι παράλληλη στην πρώτη, ωστόσο δεν συνδέθηκε με κάποιον εκτονωτή κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Όπως θα περιγραφεί αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.2, ο αλγόριθμος αυτοματισμού της εγκατάστασης επιτρέπει την λειτουργία μία γεννήτριας κάθε φορά. Συνεπώς, υπάρχει ήδη η δυνατότητα εκτέλεσης πειραμάτων και με τη δεύτερη γεννήτρια, εφόσον συνδεθεί σε αυτή κάποιος εκτονωτής συμβατός με την εγκατάσταση.

Ο έλεγχος των στροφών της γεννήτριας γίνεται με inverter της εταιρείας Siemens (βλ. κεφάλαιο 2.2.2). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου της γεννήτριας.

Γεννήτρια (Valliadis K112M-2)	
Αριθμός Πόλων / Σύγχρονες Στροφές	2 / 3000 RPM
Ονομαστικές Στροφές	2880 RPM
Ονομαστική Ισχύς (kW)	4
Ονομαστικός βαθμός απόδοσης (%)	86
Ολίσθηση στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (%)	4.000

Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά της γεννήτριας

### 2.1.6 Αναθερμαντής

Για τον αναθερμαντή επιλέχθηκε ο εναλλάκτης SWEP B320LTL του οποίου η σύνδεση των πλακών έχει γίνει με μπρουτζοκόλληση.

Τα γενικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Αναθερμαντής SWEP B320LTL	
Αριθμός Πλακών	30
Επιφάνεια Συναλλαγής	3.47 m <sup>2</sup>
Ονομαστική Θερμότητα Συναλλαγής	8.6 kW
Διαφορά Πίεσης Εργαζόμενου Μέσου	102 mbar

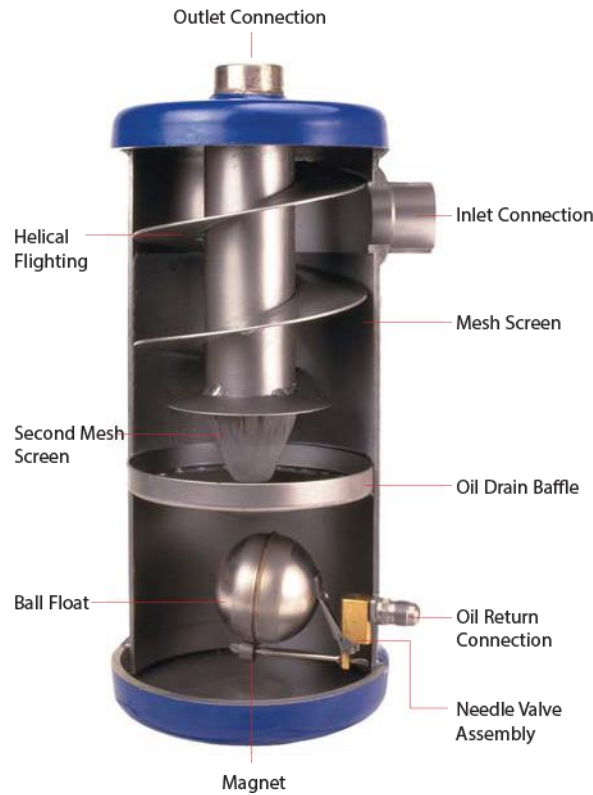
Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά του αναθερμαντή

### 2.1.7 Ελαιοδιαχωριστής

Όπως προαναφέρθηκε η επίδραση των ελαίων σε θερμοδυναμικούς κύκλους PE-ORC δεν έχει μελετηθεί εκτενώς, παρ' όλο που η λίπανση εκτονωτών θετικής μετατόπισης είναι αναγκαία στις περισσότερες περιπτώσεις [28].

Για την εγκατάσταση λοιπόν, επιλέχθηκε ο ελαιοδιαχωριστής S5423-CE της εταιρείας AC&R ο οποίος είναι ελικοειδής διαχωριστής λαδιού.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 2.8, το μείγμα εργαζόμενου μέσου και λαδιού εισέρχεται στο πάνω μέρος του διαχωριστή και οδηγείται μέσω από τη σπείρα προς τα κάτω. Λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων το λάδι οδηγείται στην άκρη από όπου και πέφτει στο κάτω μέρος του ελαιοδιαχωριστή μέσω διαφράγματος. Το διάφραγμα έχει την επιπλέον ιδιότητα να αφαιρεί την τύρβη από την ροή του λαδιού. Το αέριο εργαζόμενο μέσο στη συνέχεια διέρχεται από σωλήνα στο κέντρο του διαχωριστή ο οποίος οδηγεί στην έξοδο προς τα πάνω. Στο κάτω μέρος του ελαιοδιαχωριστή υπάρχει βαλβίδα η οποία επιτρέπει την έξοδο του λαδιού και την επιστροφή στον εκτονωτή. Τέλος, στο κάτω μέρος υπάρχει και μαγνήτης ο οποίος κατακρατεί τυχόν μεταλλικά αντικείμενα, ώστε να μην υπάρξει ζημιά στη βαλβίδα. Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία ο βαθμός απόδοσης φτάνει μέχρι και το 99% [38].



Εικόνα 2.10 Τομή ελικοειδή ελαιοδιαχωριστή

### 2.1.8 Αντλία λαδιού

Στην την παρούσα εγκατάσταση εγκαταστάθηκε αντλία λαδιού της εταιρείας PIUSI και μοντέλο Viscomat Gear 200/2 T. Η αντλία είναι στην πραγματικότητα τριφασικός επαγωγικός κινητήρας του οποίου τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Γενικά Χαρακτηριστικά	
N (RPM)	1450
$Q_{ma}$ (lpm)	9
Πίεση Εξόδου (bar)	12

Πίνακας 2.7 Χαρακτηριστικά της αντλίας λαδιού

### 2.1.9 Συμπυκνωτής

Για τον συμπυκνωτή επιλέχθηκε ο εναλλάκτης SWEP B35TH0 του οποίου η σύνδεση των πλακών έχει γίνει με μπρουτζοκόλληση.

Τα γενικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Συμπυκνωτής SWEP B35TH0	
Αριθμός Πλακών	62
Επιφάνεια Συναλλαγής	5.64 m <sup>2</sup>
Ονομαστική Θερμότητα Συναλλαγής	49.7 kW
Διαφορά Πίεσης Εργαζόμενου Μέσου	51 mbar

Πίνακας 2.8 Χαρακτηριστικά του συμπυκνωτή

### 2.1.10 Τροφοδοτικό δοχείο

Η ύπαρξη τροφοδοτικού δοχείου σε ένα κλειστό κύκλωμα διασφαλίζει την ύπαρξη απαραίτητης ποσότητας εργαζόμενου μέσου, ώστε αυτό να μπορεί να λειτουργεί σε όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας του κύκλου για τον οποίο προορίζεται. Επιπλέον σε αυτό γίνεται η πλήρωση του κυκλώματος, εφόσον αυτό κριθεί απαραίτητο.

Στην εγκατάσταση τοποθετήθηκε το τροφοδοτικό δοχείο F102H bar της εταιρείας Bitzer όγκου 10L και μέγιστης πίεσης 33. Η τοποθέτηση έγινε σε σειρά ακριβώς μετά τον συμπυκνωτή.

### 2.1.11 Εναλλάκτης υπόψυξης

Για τον εναλλάκτη υπόψυξης επιλέχθηκε ο εναλλάκτης SWEP B10TH του οποίου η σύνδεση των πλακών έχει γίνει με μπρουτζοκόλληση.

Τα γενικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Εναλλάκτης Υπόψυξης SWEP B10TH	
Αριθμός Πλακών	10
Επιφάνεια Συναλλαγής	0.25 m <sup>2</sup>
Ονομαστική Θερμότητα Συναλλαγής	1.25 kW
Διαφορά Πίεσης Εργαζόμενου Μέσου	73.6 mbar

Πίνακας 2.9 Χαρακτηριστικά του εναλλάκτη υπόψυξης

### 2.1.12 Βαλβίδες

Στο κύκλωμα εγκαταστάθηκαν τρεις βαλβίδες, μία πριν τον εκτονωτή και δύο παράλληλες με αυτόν (bypass). Οι βαλβίδες επιτρέπουν την εκκίνηση της γεννήτριας χωρίς να είναι συνδεδεμένη με το κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει πιο εύκολος στον αλγόριθμο λειτουργίας και σε ξεχωριστά κομμάτια του. Επιπλέον, επιτρέπει ένα πιο ασφαλή τρόπο λειτουργίας της εγκατάστασης.

Οι βαλβίδες ρυθμίζονται ηλεκτρονικά από τον αλγόριθμο λειτουργίας της εγκατάστασης και τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Βαλβίδες		
Μοντέλο	Ρόλος	Τύπος
ALCO 540RA16 - T9	Κύρια Bypass	Normally Open
ALCO 200RB6 - T5	Δευτερεύουσα Bypass	Normally Closed
ALCO 240RA16 - T9	Εκτονωτή	Normally Closed

Πίνακας 2.10 Χαρακτηριστικά των βαλβίδων της εγκατάστασης

### 2.1.13 Πρεσοστάτες

Για την ασφάλεια των αντλιών τοποθετήθηκαν κατάλληλοι πρεσοστάτες. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκε ένας πρεσοστάτης υψηλής πίεσης κατάντη της αντλίας του εργαζόμενου μέσου, ένας πρεσοστάτης χαμηλής πίεσης ανάντη της αντλίας του εργαζόμενου μέσου και ένας πρεσοστάτης υψηλής πίεσης κατάντη της αντλίας λαδιού.

Και οι τρεις πρεσοστάτες λειτουργούν με μηχανικό αισθητήρα πίεσης τύπου «Flare», ενώ και οι τρεις έχουν ανοιχτό κύκλωμα (NO επαφή) όταν η πίεση είναι στα επιτρεπτά όρια και κλείνει το κύκλωμα, όταν η πίεση βγει από αυτά. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πρεσοστατών.

Βασικά Χαρακτηριστικά Πρεσοστατών			
Μοντέλο	Ρόλος	Εύρος ρύθμισης πίεσης (bar)	Τύπος επαναφοράς
Danfoss KP1 060-5094	Υψηλής πίεσης στην αντλία του εργαζόμενου μέσου	-0.2 έως 7.5	Αυτόματα
Danfoss KP1 060-1103	Χαμηλής πίεσης στην αντλία του εργαζόμενου μέσου	-0.9 έως 7	Χειροκίνητα
Racno 016-H6703	Υψηλής πίεσης στην αντλία του λαδιού	-0.3 έως 7	Αυτόματα

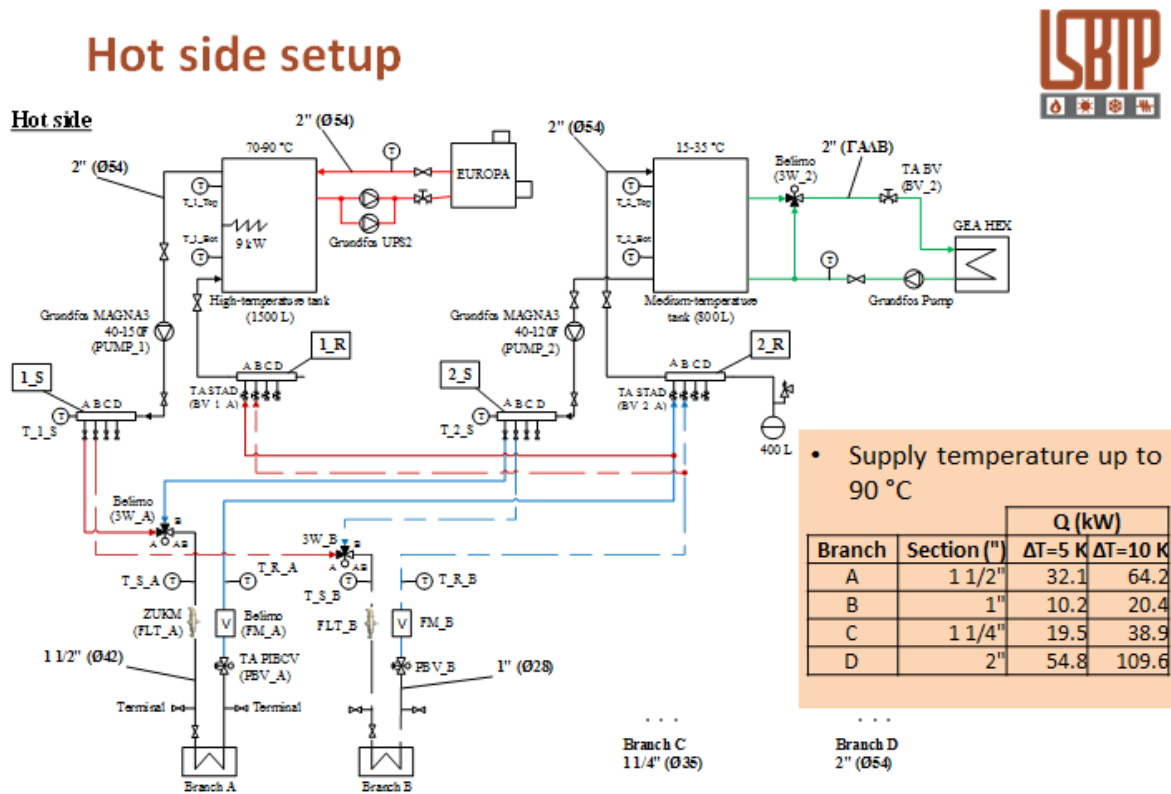


Πίνακας 2.11 Χαρακτηριστικά των πρεσοστατών της εγκατάστασης

Όπως φάνηκε στον πίνακα οι πρεσοστάτες υψηλής πίεσης επαναφέρονται αυτόματα. Για την ασφάλεια της εγκατάστασης και σε περίπτωση υπερπίεσης το σήμα τους κλειδώνει από τον αλγόριθμο λειτουργίας και χρειάζεται χειροκίνητη επαναφορά από τον ηλεκτρολογικό πίνακα της εγκατάστασης.

### 2.1.14 Κύκλωμα ζεστού νερού

Το κύκλωμα του ζεστού νερού στην εγκατάσταση του εργαστηρίου αποτελείται από δύο επιμέρους κυκλώματα, αυτό του ατμοποιητή και αυτό του αναθερμαντή. Τόσο ο ατμοποιητής όσο και ο αναθερμαντής τροφοδοτούνται από δύο δεξαμενές νερού. Η μία δεξαμενή περιέχει νερό μέσης θερμοκρασίας (20-40°C), ενώ η δεύτερη θερμαίνεται από λέβητα αερίου ισχύος 90kW<sub>th</sub>, και παρέχει νερό θερμοκρασίας (περίπου 90 °C). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το διάγραμμα του κυκλώματος.



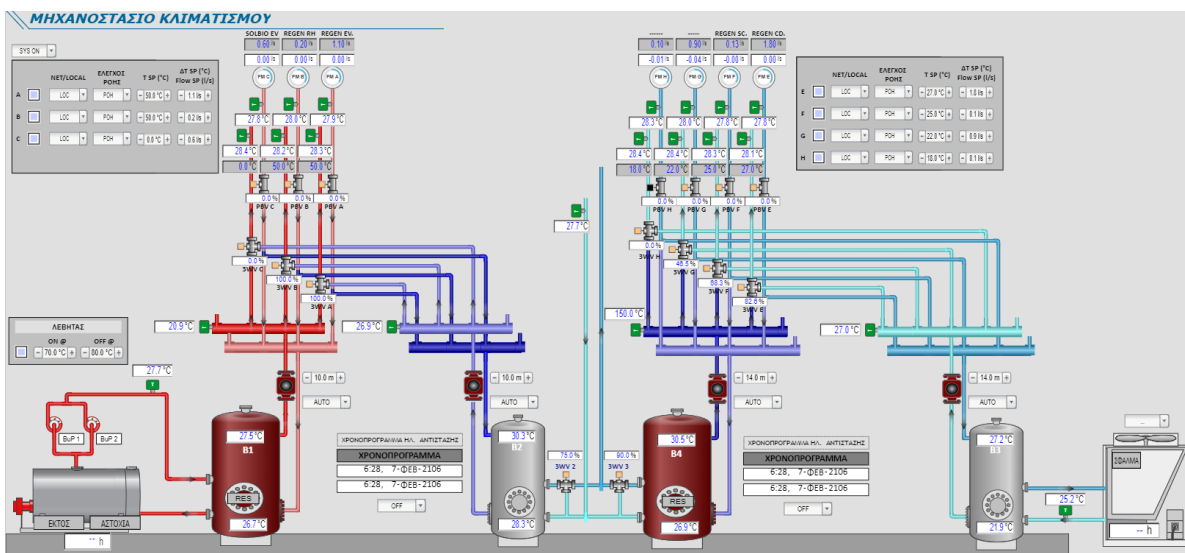
Εικόνα 2.11 Διάγραμμα του κυκλώματος ζεστού νερού

Η ζητούμενη θερμοκρασία του παρεχόμενου νερού γίνεται με μίξη νερού και από τις δύο δεξαμενές μέσω τρίοδης βαλβίδας. Η βαλβίδα αυτή αλλάζει θέση ανάλογα με την τάση με την οποία τροφοδοτείται. Έτσι για μηδενική τάση το νερό που παρέχεται στο σύστημα είναι εξ' ολοκλήρου από τη δεξαμενή μέσης θερμοκρασίας. Αντίθετα, όταν τροφοδοτείται με τη μέγιστη τάση, τότε το νερό το οποίο παρέχεται είναι εξ' ολοκλήρου από την

δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας. Η βαλβίδα αυτή ρυθμίζεται από PID ελεγκτή με δεδομένο την επιθυμητή θερμοκρασία.

Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της παροχής μέσω PID ελεγκτή ο οποίος επενεργεί σε ανεξαρτήτου πίεσης βαλβίδα ελέγχου (Pressure Independent Balancing Control Valve – PIBCV).

Οι δύο δυνατότητες αυτές υποστηρίζονται από τον κεντρικό ελεγκτή του υδραυλικού συστήματος του εργαστηρίου ο οποίος παρακολουθεί και τους εγκατεστημένους αισθητήρες θερμοκρασίας και παροχής. Ο ελεγκτής αυτός λειτουργεί ως Modbus TCP Server, το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο 2.4, και με αυτόν τον τρόπο επικοινωνεί με τον τοπικό επεξεργαστή της πειραματικής εγκατάστασης από τον οποίο λαμβάνει τα setpoints για τους PID οι οποίοι ρυθμίζουν τις δύο βαλβίδες. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος μέσω ενός κλασικού περιηγητή δικτύου (web browser), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.12 Διάγραμμα του κυκλώματος ψυχρού νερού

### 2.1.15 Κύκλωμα ψυχρού νερού

Το κύκλωμα του ψυχρού νερού στην εγκατάσταση του εργαστηρίου αποτελείται από δύο επιμέρους κυκλώματα, αυτό του συμπυκνωτή και αυτό του εναλλάκτη υπόψυξης. Τόσο ο συμπυκνωτής όσο και ο εναλλάκτης υπόψυξης τροφοδοτούνται από δύο δεξαμενές νερού. Η μία δεξαμενή περιέχει νερό μέσης θερμοκρασίας (20-40°C), διαφορετική από αυτή του κυκλώματος ζεστού νερού, ενώ η δεύτερη ψύχεται από αερόψυκτο ψύκτη, και παρέχει νερό θερμοκρασίας (5-15°C).

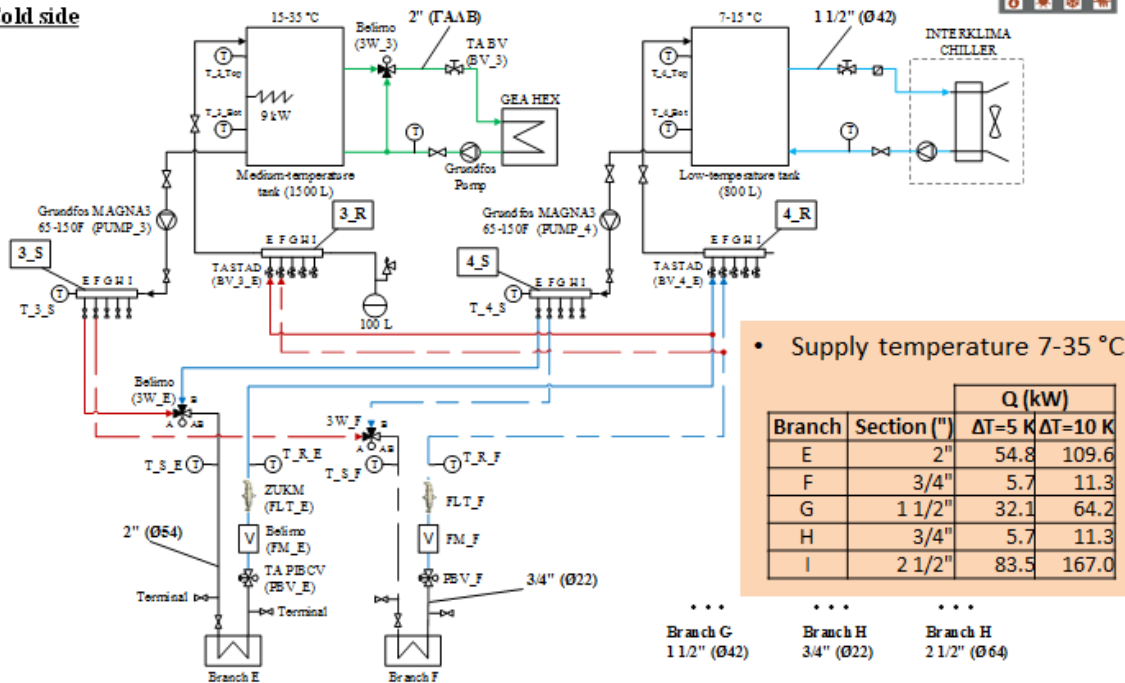
Το κύκλωμα λειτουργεί και ελέγχεται με ακριβώς τον ίδιο τρόπο όπως και το κύκλωμα του ζεστού νερού. Έτσι για μηδενική τάση στην τρίοδη βαλβίδα, παρέχεται νερό μέσης

θερμοκρασίας, ενώ για μεγιστή τάση, παρέχεται νερό αποκλειστικά από την δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας.

## Cold side setup



**Cold side**



Εικόνα 2.13 Διάγραμμα του κυκλώματος ψυχρού νερού

## 2.2 Ηλεκτρολογικό μέρος

### 2.2.1 Επεξεργαστής

Ως ελεγκτής της εγκατάστασης επιλέχθηκε ο βιομηχανικός Η/Υ (Industrial PC) AMAX-5580 Advantech, με επεξεργαστή της Intel®, στον οποίο εγκαταστάθηκε περιβάλλον Windows, ώστε να μπορεί να εκτελεί το πρόγραμμα το οποίο υλοποιήθηκε στο LABVIEW. Τα βασικά χαρακτηριστικά του επεξεργαστή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

AMAX-5580	
Διαστάσεις	139 x 100 x 80 mm
Τροφοδοσία	24 V <sub>DC</sub> ± 20%
Κατανάλωση ισχύος	15 W
Random Access Memory (RAM)	4 GB

Πίνακας 2.12 Χαρακτηριστικά του επεξεργαστή της εγκατάστασης

Ο βιομηχανικός υπολογιστής έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να υποστηρίξει κάρτες με μεγαλύτερη ανάλυση και να λειτουργεί μέσω γραφικού περιβάλλοντος Windows, δυνατότητες οι οποίες δύσκολα υποστηρίζονται από ένα τυπικό PLC.

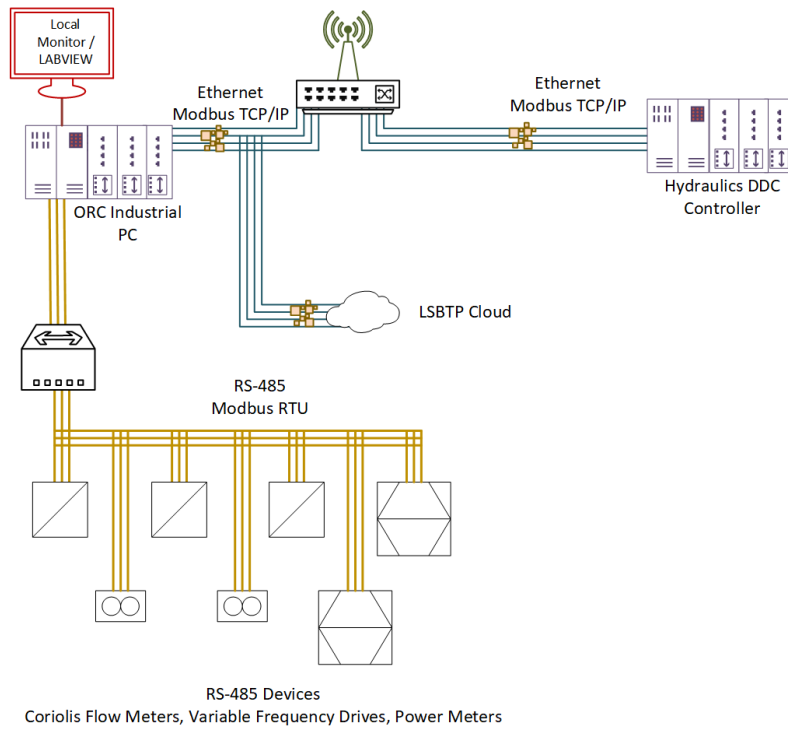
Για τον λόγο αυτό είναι πιο εύκολος ο υπολογισμός των θερμικών ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου σε πραγματικό χρόνο, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη αυτοματισμών.

Επιπλέον ένας βιομηχανικός Η/Υ είναι συμβατός με το υπόλοιπο hardware το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας και είναι κοινότυπο, όπως ο προσωπικός Η/Υ στον οποίο είναι εγκατεστημένο το LabVIEW, USB drive για την μεταφορά αρχείων, ποντίκι και πληκτρολόγιο για τυπικό προσωπικό Η/Υ.

Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης πολύπλοκων αλγορίθμων ελέγχου οι οποίοι ξεφεύγουν από τον απλό βιομηχανικό έλεγχο.

Για να πετύχει κατάλληλο έλεγχο ο επεξεργαστής απαιτείται να επικοινωνεί με όλες τις συσκευές, τους αισθητήρες και τον ελεγκτή του υδραυλικού συστήματος του εργαστηρίου. Αυτό έγινε μέσω του πρωτοκόλλου Modbus. Συγκεκριμένα, ο επεξεργαστής επικοινωνεί με Modbus TCP/IP με τον ελεγκτή του υδραυλικού συστήματος και με Modbus RTU με τους ρυθμιστές στροφών, τα μετρητικά όργανα Coriolis και τις οθόνες Ducati. Επιπλέον, στον επεξεργαστή προστέθηκαν κάρτες σημάτων εισόδων και εξόδων, ώστε να μπορεί να επικοινωνεί άμεσα και με τους αισθητήρες. Οι κάρτες επικοινωνούν με τον επεξεργαστή μέσω του πρωτοκόλλου EtherCAT για το οποίο επίσης υπάρχουν βιβλιοθήκες με εργαλεία έτοιμες στο LabVIEW. Επιπλέον, η σύνδεση με οθόνη μπορεί να

γίνει εύκολα με ένα καλώδιο HDMI. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα των διαύλων επικοινωνίας.



Εικόνα 2.14 Σχηματική αναπαράσταση των σχέσεων επικοινωνίας του επεξεργαστή με τις υπόλοιπες συσκευές

Οι κάρτες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρείας Advantech όπως και ο επεξεργαστής και στον παρακάτω πίνακα φαίνονται βασικά χαρακτηριστικά τους ενώ στο Παράρτημα Β φαίνονται οι μεταβλητές τις οποίες διαχειρίζεται η κάθε κάρτα.

Ψηφιακές Κάρτες			
Μοντέλο	Χρήση	Cycle Time (μs)	Rated Voltage (V DC)
5001	4 ψηφιακές εισοδοι	100	24
5052	16 ψηφιακές εισοδοι	100	24
5057so	16 ψηφιακές έξοδοι	100	10-30

Πίνακας 2.13 Χαρακτηριστικά ψηφιακών καρτών σημάτων εισόδων και εξόδων

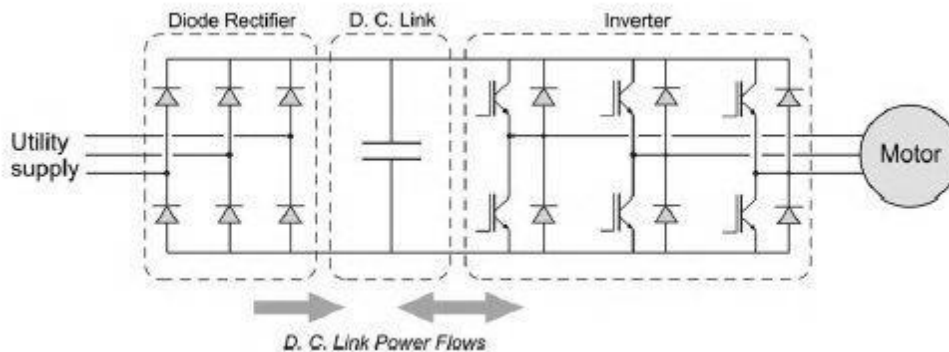
Αναλογικές Κάρτες				
Μοντέλο	Χρήση	Cycle Time (μs)	Sampling Time (S/s)	Resolution
3 x 5015	3 x 4 αναλογικές εισοδοι	100	100	16-bit
5017v	6 αναλογικές εισοδοι	100	100	16-bit
5017c	6 αναλογικές εισοδοι	100	100	16-bit
5017c	6 αναλογικές εισοδοι	100	100	16-bit
Μοντέλο	Χρήση	Cycle Time (μs)	Slew Rate (V/μs)	Resolution
5024	4 αναλογικές έξοδοι	100	Configurable	16-bit

Πίνακας 2.14 Χαρακτηριστικά αναλογικών καρτών σημάτων εισόδων και εξόδων

### 2.2.2 Ρυθμιστές στροφών

Η ρύθμιση των στροφών της αντλία του εργαζόμενου μέσου, του εκτονωτή και της αντλίας λαδιού γίνεται με κυκλομετατροπείς (Variable Frequency Drives ή VFD’s) της εταιρείας Siemens. Η ρύθμιση των στροφών τις αντλίας λαδιού γίνεται με VFD της εταιρείας Allen-Bradley.

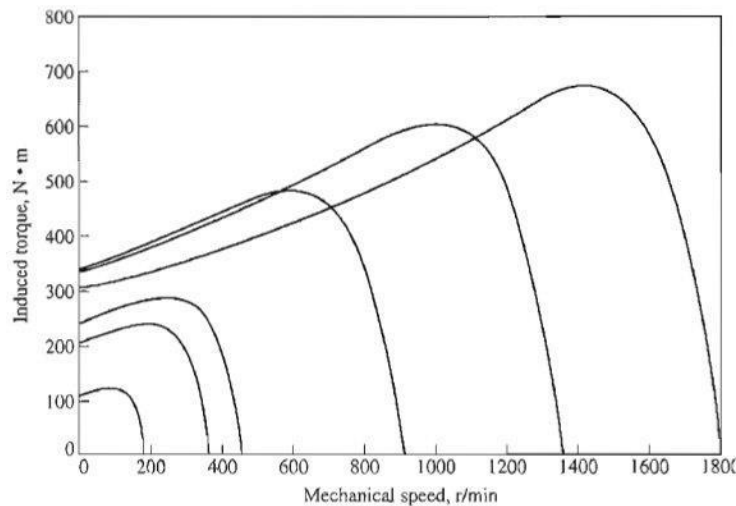
Ένας τυπικός ρυθμιστής στροφών αυτού του τύπου αποτελείται από τρεις επιμέρους ηλεκτρονικές συνιστώσες, όπως εικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Το ρεύμα του ηλεκτρικού δικτύου ανορθώνεται σε συνεχές μέσα από τη διάταξη διόδων. Ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής (D.C. Link) διασφαλίζει την αδιάλειπτη ροή ισχύος στο κύκλωμα, ενώ η μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα διαφορετικής συχνότητας και πλάτους τάσης γίνεται στη διάταξη του αντιστροφέα (inverter), πριν τελικά οδηγηθεί στον κινητήρα. Η ροή ισχύος σε σύνδεση γεννήτριας είναι ακριβώς ανάποδη, δηλαδή η διάταξη των διόδων είναι συνδεδεμένη με την γεννήτρια και ο αντιστροφές με το ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 2.15 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρονικού κυκλώματος ενός VFD

Ο συγκεκριμένος VFD ελέγχει τις στροφές της ηλεκτρικής μηχανής με την μέθοδο της διατήρησης του λόγου  $V/f$  σε μία σταθερή τιμή, όπου  $V$  είναι η τάση στα άκρα της και  $f$  η συχνότητα. Συνεπώς όταν η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σε στροφές χαμηλότερες των σύγχρονων, που σημαίνει ότι η συχνότητα που επικρατεί στα άκρα της είναι  $f < 50\text{Hz}$ , η τάση στα άκρα της μεταβάλλεται αναλογικά σε τιμή  $V < 480\text{V}$ .

Ο παραπάνω έλεγχος είναι απαραίτητος σε περιπτώσεις οδήγησης της μηχανής σε συχνότητες μικρότερης αυτής του δικτύου, καθώς μείωση των στροφών απαιτεί μείωση της συχνότητας στα άκρα της μηχανής, η οποία χωρίς ταυτόχρονη μείωση της τάσης οδηγεί σε αύξηση της μαγνητικής ροής. Η τελευταία μπορεί να προκαλέσει δραματική αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης λόγω κορεσμού του μαγνητικού πυρήνα [37]. Επιπλέον, οδηγεί σε μικρότερη παραγόμενη ισχύ, αφού η μείωση της τάσης πρέπει να ακολουθηθεί από μείωση του ρεύματος για αποφυγή υπερφόρτωσης των τυλιγμάτων. Τυπικές χαρακτηριστικές της καμπύλης ροπής στροφών για ένα επαγωγικό κινητήρα (για γεννήτρια είναι οι κατοπτρικές ως προς την αρχή των αξόνων) εικονίζονται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 2.16 Μεταβολή της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών επαγωγικού κινητήρα με τη συχνότητα με έλεγχο  $V/f$  [37]

Για τον έλεγχο των στροφών της αντλίας επιλέχθηκε ο τριφασικός ρυθμιστής στροφών Sinamics V20 της Siemens, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Siemens Sinamics v20	
Ονομαστική Ισχύς	1 kW
Ονομαστική Συχνότητα	47-63 Hz
I/O	Πρωτόκολλα επικοινωνίας Modbus RTU, USS
	4 ψηφιακές είσοδοι
	2 ψηφιακές έξοδοι
	2 αναλογικές είσοδοι
	1 αναλογική έξοδος
	Όλες παραμετροποιημένες

Πίνακας 2.15 Χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών της αντλίας

Όσον αφορά τη γεννήτρια, αναγκαστικά επιλέχθηκε ρυθμιστής αναγεννητικός στροφών (regenerative inverter) της σειράς Sinamics G120 της εταιρείας Siemens. Η διαφορά των αναγεννητικών ρυθμιστών στροφών σε σχέση με τους απλούς είναι ότι επιτρέπουν, σε κανονική λειτουργία της επαγωγικής μηχανής ως κινητήρα, την επιστροφή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται κατά την πέδηση του στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στην παρούσα εγκατάσταση η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Αρχικά επιταχύνεται στην επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής λειτουργίας ως κινητήρας με μηδενικό φορτίο. Έπειτα, στην περίπτωση του πρώτου εκτονωτή συμπλέκεται του οποίου η ροπή την επιταχύνει σε ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης. Στο σημείο αυτό η μηχανή εισέρχεται σε λειτουργία γεννήτριας. Ο inverter επιβραδύνει τη γεννήτρια, κρατώντας σταθερές τις στροφές κοντά στις σύγχρονες, οι οποίες ορίζονται από την επιθυμητή συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος. Ουσιαστικά, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς εισέρχεται στο δίκτυο ως ισχύς πέδησης της ηλεκτρικής μηχανής το οποίο δικαιολογεί την επιλογή αυτού του τύπου ρυθμιστών στροφών.



Τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

<b>Siemens Sinamics G120 Power Module 250</b>	
Ονομαστική Ισχύς	5.5 kW
Ονομαστικός Βαθμός Απόδοσης	95%
Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας	CU 240E-2
I/O	Πρωτόκολλα επικοινωνίας Modbus RTU, USS, Profibus
	6 ψηφιακές εισοδοι
	3 ψηφιακές έξοδοι
	2 αναλογικές εισοδοι
	2 αναλογικές έξοδοι
	Όλες παραμετροποιημένες

Πίνακας 2.16 Χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών της γεννήτριας

Για την ρύθμιση των στροφών της αντλίας λαδιού τοποθετήθηκε ρυθμιστής στροφών 22F-D2P5N113 της εταιρείας Allen-Bradley.

<b>Allen-Bradley 22F-D2P5N113</b>	
Ονομαστική Ισχύς	0.75 kW
Ονομαστικός Βαθμός Απόδοσης	95%
I/O	Πρωτόκολλα επικοινωνίας Modbus RTU, Profibus
	4 ψηφιακές εισοδοι
	1 ψηφιακή έξοδος
	2 αναλογικές εισοδοι
	2 αναλογικές έξοδοι
	Όλες παραμετροποιημένες

Πίνακας 2.17 Χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών της αντλίας λαδιού

### 2.2.3 Οθόνες ηλεκτρολογικού πίνακα

Στην εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκαν δύο οθόνες Duca-LCD96 της εταιρείας Ducati, μία για τον κινητήρα της αντλίας του εργαζόμενου μέσου και μία για την γεννήτρια. Όπως όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές, έτσι και αυτές επικοινωνούν με τον κύριο επεξεργαστή της εγκατάστασης μέσω του πρωτοκόλλου Modbus.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά της οθόνης:

Duca-LCD96	
Διαστάσεις Οθόνης (mm)	96 x 96
Παροχή Ισχύος	48 ÷ 240 V (AC/DC)
Δυνατότητα ένδειξης τεσσάρων τιμών ταυτόχρονα	
Απλό UI (User Interface) με πέντε κουμπιά για περιήγηση στο menu	

Πίνακας 2.18 Βασικά χαρακτηριστικά της οθόνης Duca-LCD96

Ως προκαθορισμένες ενδείξεις επιλέχθηκαν η τάση στους κινητήρες, η ένταση του ρεύματος που τους διαρρέει, οι στροφές τους και ... Τα μεγέθη αυτά επιλέχθηκαν καθώς είναι βασικά για τον σωστό έλεγχο της εγκατάστασης.

## 2.3 Μετρητικά όργανα

### 2.3.1 Αισθητήρια θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του κύκλου χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες Resistance Temperature Detector (RTD). Η αντίσταση των συγκεκριμένων αισθητήρων αλλάζει με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα με αύξηση της θερμοκρασίας του αισθητήρα αυξάνει και η αντίστασή του. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και επαναλαμβανόμενη με τον χρόνο. Παρ' όλα αυτά οι αισθητήρες RTD δεν παράγουν κάποιο σήμα από μόνοι τους. Χρειάζεται λοιπόν εξωτερική ηλεκτρονική συσκευή για να μετρήσει την αντίσταση του αισθητήρα. Αυτό γίνεται παίρνοντας ένα μικρής έντασης ρεύματος από τον αισθητήρα, ώστε να δημιουργηθεί ηλεκτρική τάση. Είναι σημαντικό αυτό το ρεύμα να είναι μικρής έντασης, ώστε να μην θερμάνει επιπλέον τον αισθητήρα και συνήθως είναι περίπου 1 mA ή λιγότερο.

Συγκεκριμένα για την εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες PT 100 τριών καλωδίων κλάσης A της εταιρείας Emerson. Υπάρχουν τρία DIN τέτοιων αισθητήρων τα οποία καθορίζουν την αλλαγή της αντίστασης του αισθητήρα με βάση τη θερμοκρασία και το περιθώριο σφάλματος. Τα τρία αυτά DIN ονομάζονται και κλάσεις και το DIN A το οποίο επιλέχθηκε έχει την μεγαλύτερη ακρίβεια. Συνήθως τέτοιοι αισθητήρες έχουν δύο καλώδια, ωστόσο η προσθήκη ενός τρίτου επιτρέπει την αφαίρεση της αντίστασης του καλωδίου από τη μέτρηση.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας τοποθετήθηκαν δέκα (10) τέτοιοι αισθητήρες και συνδέθηκαν στις τρεις κάρτες AMAX-5015. Όπως προαναφέρθηκε το μετρούμενο μέγεθος το οποίο φτάνει στην κάρτα είναι η τάση η οποία δημιουργείται. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι κάρτες AMAX-5015 οι οποίες δέχονται αναλογική είσοδο τάσης. Επιπλέον, το παράρτημα Β φαίνεται το μετρούμενο μέγεθος κάθε αισθητήρα.

### 2.3.2 Αισθητήρια πίεσης

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του κύκλου χρησιμοποιήθηκαν Pressure Transmitters. Τέτοιοι αισθητήρες λειτουργούν μηχανικά, δηλαδή ανάλογα με την πίεση δημιουργείται δύναμη στο διάφραγμα η οποία αλλάζει την αντίσταση του αισθητήρα, το οποίο μετριέται ως ηλεκτρικό σήμα.

Συγκεκριμένα για την εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα PT5-07M και PT5-18M της εταιρείας Carel. Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων φαίνονται παρακάτω.

Αισθητήρες Πίεσης		
Μοντέλο	Εύρος Πιέσεων (bar)	Εύρος έντασης ρεύματος (mA)
PT5-07M	-0.8 έως 7	4 έως 20
PT5-18M	0 έως 18	4 έως 20

Πίνακας 2.19 Βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων πίεσης

Όπως είναι φανερό η επιλογή των δύο διαφορετικών τύπων έγινε, ώστε να καλύπτεται μεγαλύτερο εύρος πιέσεων. Έτσι μετά την αντλία και πριν τον εκτονωτή όπου έχουμε την μεγαλύτερη πίεση στο κύκλωμα τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχοι αισθητήρες.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας τοποθετήθηκαν επτά (7) τέτοιοι αισθητήρες. Οι πρώτοι έξι συνδέθηκαν στην πρώτη κάρτα AMAX-5017c, ενώ ο τελευταίος στην πρώτη είσοδο της δεύτερη κάρτας AMAX-5017c. Στο παράρτημα Β φαίνεται το μετρούμενο μέγεθος κάθε αισθητήρα. Όπως προαναφέρθηκε το μετρούμενο μέγεθος το οποίο φτάνει στην κάρτα είναι η ένταση η οποία δημιουργείται. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι κάρτες AMAX-5017c οι οποίες δέχονται αναλογική είσοδο έντασης ρεύματος. Επιπλέον, στο παράρτημα Β φαίνεται το μετρούμενο μέγεθος κάθε αισθητήρα.

### 2.3.3 Όργανα Coriolis

Πέρα από τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες, ένα σημαντικό μέγεθος προς παρακολούθηση είναι η ποιότητα του εργαζόμενου μέσου πριν και μετά την εκτόνωση. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού τοποθετήθηκαν στην εγκατάσταση τρία όργανα Coriolis.

Τα όργανα Coriolis βασίζονται στην φυσική συχνότητα του ρευστού για να μετρήσουν είτε την παροχή μάζας είτε την πυκνότητα του ρευστού το οποίο τα διαρρέει. Συγκεκριμένα, όταν ένα ρευστό περνάει από τον σωλήνα, αυτός ταλαντώνεται. Στα δύο του άκρα υπάρχουν όργανα τα οποία μετράνε τη στρέψη του σωλήνα η οποία αλλάζει με τη συχνότητα της ταλάντωσης. Η συχνότητα αυτή αποτελεί τη φυσική συχνότητα του συστήματος και από αυτή προκύπτει είτε η μάζα είτε η πυκνότητα από τους παρακάτω τύπους:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2.4)$$

$$\rho = \frac{K}{4\pi^2 V f^2} - \frac{m_{tube}}{V} \quad (2.5)$$

Όπου  $f$  η συχνότητα,  $K$  η σταθερά ελατηρίου του σωλήνα,  $m$  η μετρούμενη μάζα,  $V$  ο όγκος του σωλήνα και  $m_{tube}$  η μάζα του σωλήνα.

Για τον υπολογισμό της ποιότητας του εργαζόμενου μέσου ισχύει ο κανόνας του μοχλού και συνεπώς υπολογίζεται από την εξίσωση, :

$$\rho = (1 - x)\rho_{liquid} + x\rho_{gas} \quad (2.6)$$

Στην εγκατάσταση τοποθετήθηκαν τρία μετρητικά όργανα Coriolis της εταιρείας Emerson, ένα μετά την αντλία για την μέτρηση της παροχής μάζας του κύκλου, ένα πριν και ένα μετά τον εκτονωτή για την μέτρηση της ποιότητας του εργαζόμενου μέσου.

Για την παροχή μάζας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CMF100M όπως και για την ποιότητα μετά τον εκτονωτή. Για την μέτρηση της ποιότητας πριν τον εκτονωτή χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CFM200M.

Επιπλέον, για την καταγραφή του σήματος και την μεταφορά του χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο 5700 Transmitter της εταιρείας Emerson για κάθε μετρητικό όργανο Coriolis. Οι τρεις transmitter συνδέθηκαν στην κάρτα δεύτερη κάρτα AMAX-5017c.

Τα βασικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>Όργανα Coriolis</b>			
Μοντέλο Coriolis	Μοντέλο Transmitter	Αναλογικό σήμα	Communication Protocol
CMF100M	5700	4-20 mA	Modbus RTU
CFM200M	5700	4-20 mA	Modbus RTU

*Πίνακας 2.20 Βασικά χαρακτηριστικά των μετρητικών οργάνων Coriolis*

## 2.4 Modbus Protocol

Το Modbus είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ ευφυών συσκευών το οποίο κατασκευάστηκε από τη Modicon, η οποία ονομάζεται σήμερα Schneider Electric, το 1979. Το 2004 η Schneider Electric μετέφερε τα δικαιώματα του Modbus στον Modbus Organization, ο οποίος είναι ένας ανεξάρτητος και μη κερδοσκοπικός οργανισμός. Το πρωτόκολλο αυτό ξεκίνησε για την μεταφορά δεδομένων σε σειριακό επίπεδο, ωστόσο πλέον έχει επεκταθεί και για UDP και TCP/IP εφαρμογές [42]. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σειριακή επικοινωνία (RTU) για τις περιφερειακές συσκευές και TCP/IP επικοινωνία με τον αυτόνομο ελεγκτή του υδραυλικού συστήματος που αναφέρθηκε και παραπάνω.

Ειδικότερα, είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ ενός Master (σε εφαρμογές TCP/IP μπορεί να το δούμε και Client) και ενός Slave (σε εφαρμογές TCP/IP μπορεί να το δούμε και σαν Server. Δηλαδή είναι ένα πρωτόκολλο αιτήματος απάντησης (Request – Response) το οποίο λειτουργεί πάντα με ζευγάρια. Ο Master στέλνει ένα αίτημα στον Slave είτε για να διαβάσει, είτε για να γράψει συγκεκριμένες μεταβλητές σε μια συγκεκριμένη συσκευή και αναμένει την απάντησή του [42].

Γενικότερα τα δεδομένα (data) τα οποία είναι προσβάσιμα από το Modbus αποθηκεύονται σε τεσσάρων ειδών τράπεζες δεδομένων, Coils, Discrete Inputs, Holding Registers, Input Registers οι οποίες αποτελούν μέρος της κύριας μνήμης της συσκευής. Τα ονόματα αυτά μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την βιομηχανία ή την εφαρμογή. Σημασία έχει ότι καθορίζουν τον τύπο των δεδομένων και τα δικαιώματα πρόσβασης σε αυτή. Οι Slave συσκευές έχουν πρόσβαση σε όλα τα δεδομένα και τα οποία αποθηκεύονται τοπικά σε αυτές. Αντίθετα οι Master συσκευές ζητούν δικαίωμα πρόσβασης μέσω διαφόρων συναρτήσεων κώδικα [42]. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τέσσερα είδη τραπεζών δεδομένων και οι ιδιότητές τους.

Memory Block	Data Type	Master Access	Slave Access
Coils	Boolean	Read/Write	Read/Write
Discrete Inputs	Boolean	Read-only	Read/Write
Holding Registers	Unsigned Word	Read/Write	Read/Write
Input Registers	Unsigned Word	Read-only	Read/Write

Πίνακας 2.21 Ιδιότητες τύπων τραπεζών δεδομένων τα οποία επικοινωνούνται μέσω Modbus Protocol

Η συσκευή Slave ορίζει σε ποιο κομμάτι της μνήμης θα αποθηκεύεται η κάθε πληροφορία. Συνήθως, ο Slave ορίζει χώρο αποθήκευσης των 65.536 ( $2^{16}$ ) στοιχείων. Για τον πιο εύκολο διαχωρισμό των τύπων των δεδομένων, το εκάστοτε εγχειρίδιο χρήσης αναφέρεται σε ένα δεδομένο ως 4XXXXX, όπου το 4 αντιπροσωπεύει τον τύπο «Holding Register» και το XXXXX παίρνει τιμές από 1 έως 65.536 ( $2^{16}$ ) υποδεικνύοντας την θέση

μνήμης. Ανάλογα την εφαρμογή μπορεί η συσκευή να έχει 1-indexing όπως αναφέρθηκε ή 0-indexing, δηλαδή το τα πέντε τελευταία ψηφία να παίρνουν τιμές από 0 έως 65535. Εφόσον η συσκευή Slave χρησιμοποιεί λιγότερο χώρο, τότε το εγχειρίδιο χρήσης μπορεί να γράφει αντίστοιχα 4XXXX ή 4XXX κ.ο.κ. χρησιμοποιώντας τον ίδιο κανόνα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα νούμερα τα οποία αντιπροσωπεύουν κάθε είδος τράπεζας δεδομένων [42].

Data Block	Prefix
Coils	1
Discrete Inputs	2
Input Registers	3
Holding Registers	4

Πίνακας 2.22 Αριθμοί που αντιπροσωπεύουν το είδος τράπεζας δεδομένων

Η κάθε συσκευή έχει προκαθορισμένο και μοναδικό αριθμό ταυτότητας (ID), ο οποίος χρησιμοποιείται από τον Master όταν στέλνει μία εντολή, καθώς και συγκεκριμένη χαρτογράφηση (mapping) των μεταβλητών της. Δηλαδή, κάθε μεταβλητή έχει και αυτή έναν συγκεκριμένο αριθμό (Modbus Index). Η χαρτογράφηση των συσκευών της εγκατάστασης φαίνεται στο παράρτημα Α.

Για τις συνήθεις εφαρμογές, όπου ένας δεδομένο αντιστοιχεί σε ένα solenoid, ένα relay ή μια τιμή ADC, το σύστημα αυτό είναι επαρκές. Για πιο περίπλοκα συστήματα ορίζονται καινούριοι τύποι δεδομένων, όπως π.χ. 400,001.2H, όπου το 2 αντιπροσωπεύει ένα String δύο χαρακτήρων και το H το πρώτο γράμμα του String [42].

Κάθε εντολή ενός Master είναι ορισμένη από το πρωτόκολλο του Modbus, άρα κοινή για όλους και αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό [42]. Οι εντολές χωρίζονται σε τρεις κλάσεις όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες.

Class 0 Codes	
Code	Description
3	Read Multiple Registers
16	Write Multiple Registers

Πίνακας 2.23 Συμμόρφωση κωδικών κλάσης 0

Class 1 Codes	
Code	Description
1	Read Coils
2	Read Discrete Inputs
4	Read Input Registers
5	Write Single Coil
6	Write Single Register
7	Read Exception Status (serial-only)

Πίνακας 2.24 Συμμόρφωση κωδικών κλάσης 1

Class 2 Codes	
Code	Description
15	Write Multiple Coils
20	Read File Record
21	Write File Record
22	Mask Write Register
23	Read/Write Multiple Registers
24	Read FIFO

Πίνακας 2.25 Συμμόρφωση κωδικών κλάσης 2

Οι κωδικοί κλάσης 0 είναι οι απολύτως βασικοί για οποιαδήποτε συσκευή η οποία επικοινωνεί μέσω του Modbus Protocol. Οι κωδικοί κλάσης 1 αποτελούν όλους τους απαραίτητους κωδικούς για την πρόσβαση σε όλους τους τύπους δεδομένων του μοντέλου του Modbus. Οι κωδικοί κλάσης 2 είναι πιο περίπλοκοι και χρησιμοποιούνται σπάνια.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το standard TCP/IP και η σύνδεση έγινε με καλώδια Ethernet. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η επικοινωνία λειτουργεί ως εξής. Ο Master στέλνει έναν αριθμό στον slave ο οποίος αποτελείται από πέντε μέρη, τον αριθμό της συναλλαγής (transaction number), τον αριθμό πρωτοκόλλου, τον αριθμό μήκους (Length number), τον αριθμό ταυτότητας (ID number) και τον αριθμό του Modbus PDU (Protocol Data Unit).

1. Ο αριθμός συναλλαγής ορίζει τον αριθμό της εντολής. Αυτό χρησιμεύει, καθώς ο Slave μπορεί να απαντήσει στα requests με διαφορετική σειρά και άρα πρέπει ο Master να μπορεί να αντιστοιχίσει τα responses στα αντίστοιχα requests. Κάτι



τέτοιο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε δίκτυα Ethernet στα οποία μπορούν να δοθούν ταυτόχρονα πολλές εντολές, δυνατότητα την οποία υποστηρίζει και το LabVIEW.

2. Ο αριθμός πρωτοκόλλου είναι συνήθως 0. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επέκταση του πρωτοκόλλου.
3. Ο αριθμός μήκους προσδιορίζει το μήκος των υπόλοιπων αριθμών που ακολουθούν.
4. Ο αριθμός ταυτότητας προσδιορίζει την συσκευή στην οποία θα πάει η αίτηση του Master και όπως προαναφέρθηκε είναι μοναδικός για κάθε συσκευή.
5. Ο αριθμός Modbus PDU αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο είναι ο αριθμός εντολής όπως παρουσιάστηκε νωρίτερα και το υπόλοιπο είναι δεδομένα που αφορούν τη συγκεκριμένη εντολή, όπως το ποια σημεία της μνήμης να διαβάσει κ.α.

Συμπερασματικά τα οφέλη του Modbus είναι πολλαπλά, για αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία και γι' αυτό επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ αυτά μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

1. Είναι εύκολο στη χρήση και χρειάζεται απλά ένα καλώδιο Ethernet (Modbus TCP/IP) ή ένα δίκλωνο καλώδιο (Modbus RTU) για την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και είναι και ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε.
2. Είναι ανοικτό πρωτόκολλο.
3. Είναι συμβατό με πολλές συσκευές διαφορετικών εταιρειών.
4. Δίνει την δυνατότητα Multiregister Data, δεδομένων τα οποία έχουν χωριστεί σε πολλούς registers αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του συστήματος.
5. Σε κάθε περίπτωση το πως ο Slave αποθηκεύει δεδομένα είναι καταγεγραμμένο στο αντίστοιχο εγχειρίδιο.
6. Οι κώδικες συνάρτησης είναι ορισμένοι από το πρωτόκολλο και άρα κοινοί για όλους.

Πέρα από τα πλεονεκτήματα τα οποία αναφέρθηκαν το Modbus επιλέχθηκε καθώς στο LabVIEW υπάρχει έτοιμη βιβλιοθήκη (Library) με εργαλεία (VIs) για την επικοινωνία συσκευών μέσω του πρωτοκόλλου Modbus.

## 3. Βασικά εργαλεία για ανάπτυξη εφαρμογών βιομηχανικού ελέγχου στο LabVIEW

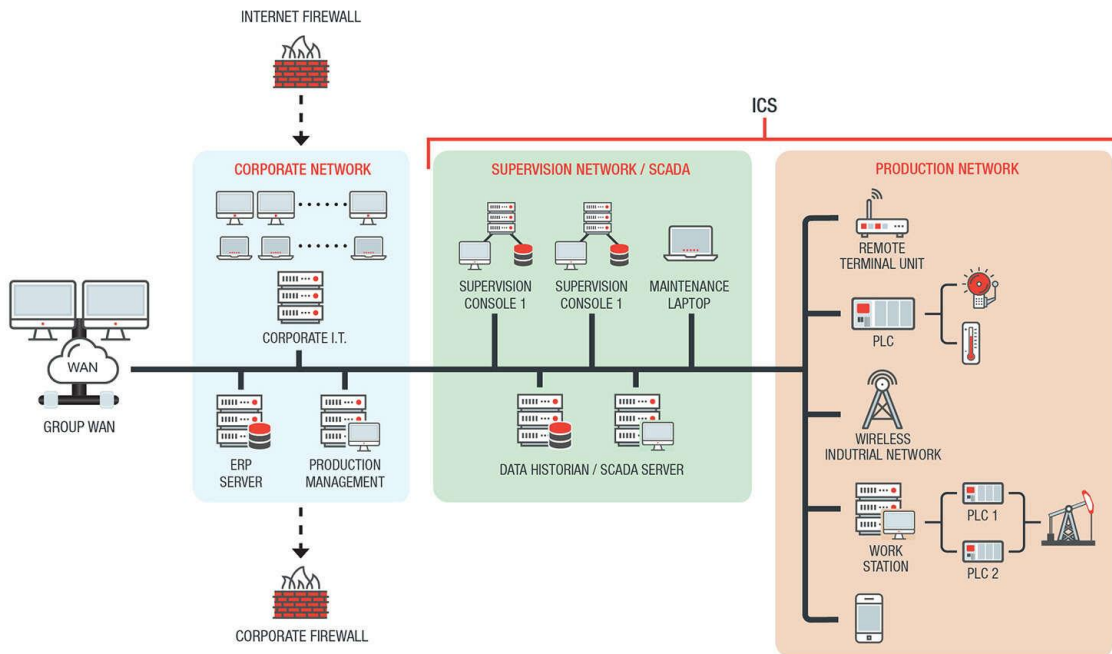
### 3.1 Βιομηχανικός έλεγχος - Γενικά

Ο βιομηχανικός έλεγχος υλοποιείται για να διαχειρίζεται ηλεκτρονικά και αποδοτικά τις εργασίες σε μια βιομηχανία [18]. Τα πλεονεκτήματα του είναι πολλά και για αυτό χρησιμοποιείται και αναπτύσσεται συνεχώς. Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

1. Αποδοτικότερη λειτουργία, καθώς ελαχιστοποιεί τις απαραίτητες ανθρώπινες ενέργειες και λειτουργεί χωρίς διακοπή.
2. Καλύτερη ποιότητα, καθώς ελαχιστοποιεί το ανθρώπινο λάθος και προσφέρει σημαντική βοήθεια στην ανάλυση των διαδικασιών και στην βελτιστοποίησή τους, καθώς μπορεί να καταγράφει και να οργανώνει όλα τα δεδομένα τα οποία μετριοούνται.
3. Τα δύο παραπάνω συνεπάγονται και μείωση του κόστους και της ενέργειας η οποία χρειάζεται [19].

Ένα σύστημα ελέγχου αποτελείται από όργανα, όπως ηλεκτρονικές συσκευές, δίκτυα, συστήματα και χειριστήρια τα οποία λειτουργούν ή και αυτοματοποιούν βιομηχανικές διαδικασίες. Πλέον τα πρωτόκολλα και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τον βιομηχανικό έλεγχο είναι διαδεδομένα σε κάθε βιομηχανικό κλάδο, όπως οι μεταφορές ανθρώπων και υλικών, η ενέργεια, οι κατασκευές, κ.α.

Τα συστήματα ελέγχου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems και τα Distributed Control Systems (DCS). Και τα δύο συστήματα αποτελούνται κυρίως από PLCs ή άλλου είδους επεξεργαστές, ενώ η κύρια διαφορά τους είναι ότι τα SCADA έχουν σκοπό τη διαχείριση συστημάτων από απόσταση, σε αντίθεση με τα DCS τα οποία χρησιμοποιούνται για τοπική χρήση. Στην πράξη γίνεται συνδυασμός των δύο συστημάτων. Στην εικόνα 3.1 φαίνεται ένα τυποποιημένο σύστημα βιομηχανικού ελέγχου.



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα ενός τυποποιημένου συστήματος βιομηχανικού ελέγχου [41]

Τα SCADA μεταδίδουν πληροφορία και είναι ενσωματωμένα σε ένα Human Machine Interface (HMI) το οποίο παρέχει κεντρική επίβλεψη και έλεγχο πολλαπλών εισόδων και εξόδων. Στον αντίποδα τα DCS χρησιμοποιούν ένα setpoint και έχουν την δυνατότητα να δίνουν εντολές, ώστε να επιτευχθεί αυτό το setpoint. Τέτοιες εντολές μπορεί να είναι το άνοιγμα ή το κλείσιμο μιας βαλβίδας, ή μια εντολή σε μια συσκευή η οποία χρειάζεται να λειτουργήσει με συγκεκριμένο τρόπο με στόχο την επίτευξη του αποτελέσματος [18].

Η επικοινωνία των συσκευών οι οποίες απαρτίζουν τέτοια συστήματα γίνεται με βιομηχανικά πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως Modbus, Profibus, Ethercat, CANbus. Τα πρωτόκολλα αυτά ακολουθούνται, ώστε να μπορεί να υπάρχει εύκολη συμβατότητα συσκευών διαφόρων κατασκευαστών καθώς και πιο σύγχρονων με πιο παλιών τεχνολογικά συσκευών. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο πρωτόκολλο Modbus καθώς προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα όπως:

1. Απλότητα στη χρήση·
2. Αξιοπιστία·
3. Συμβατότητα με τις συσκευές μας·
4. Ανοικτό·
5. Είναι αρκετά διαδεδομένο.

### 3.2 Το περιβάλλον LabVIEW

Στο περιβάλλον του LabVIEW, έκδοση 2018 64bit, έγινε ο προγραμματισμός αυτοματισμού της εγκατάστασης. Αρχικά, το LabVIEW είναι ένα γραφικό προγραμματιστικό περιβάλλον το οποίο χρησιμοποιείται από μηχανικούς για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων δοκιμών έρευνας, επικύρωσης και παραγωγής [20].

Η επιλογή του LabVIEW έγινε καθώς προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα και γι' αυτό είναι και διαδεδομένο στην επιστημονική κοινότητα. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα εξής:

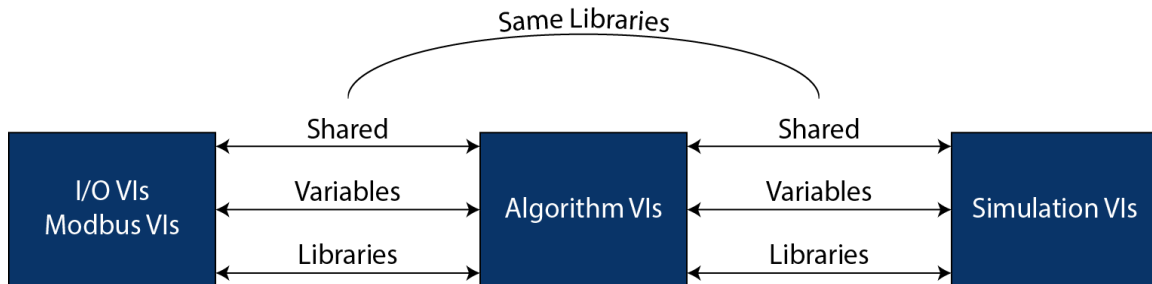
1. Δίνει τη δυνατότητα για προγραμματισμό εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο για επιτήρηση τιμών και έλεγχο.
2. Όλες οι λειτουργίες και τα εργαλεία του είναι πλήρως καταγεγραμμένα σε κατάλληλα εγχειρίδια χρήσης.
3. Έχει πληθώρα έτοιμων εργαλείων, όπως βιβλιοθήκες (Modbus, PID, κ.α.) και λογικές πύλες.
4. Είναι συμβατό με το λειτουργικό Windows και δίνει τη δυνατότητα απευθείας καταγραφής δεδομένων σε αρχείο excel.
5. Ο γραφικός προγραμματισμός είναι πιο εύκολος και συνεπώς πιο προσιτός σε άτομα χωρίς ιδιαίτερο προγραμματιστικό υπόβαθρο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα επέκτασης και αλλαγής των αλγορίθμων από άλλους χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες.
6. Δίνει τη δυνατότητα για εύκολη επιτήρηση και έλεγχο του προγράμματος μέσω απεικόνισης στο front panel.
7. Έχει τη δυνατότητα δημιουργίας εκτελέσιμου αρχείου (executable) κάνοντας εύκολη τη χρήση του ακόμα και σε υπολογιστές οι οποίοι δεν έχουν εγκατεστημένο το περιβάλλον LabVIEW.
8. Το LabVIEW τρέχει ταυτόχρονα όλες τις εντολές, εκτός αν έχει οριστεί διαφορετικά από τον προγραμματιστή και άρα ο έλεγχος γίνεται ταυτόχρονα σε όλη την εγκατάσταση.

Πέραν των πλεονεκτημάτων τα οποία αναφέρθηκαν, η εργασία παραθέτει και ένα τυποποιημένο τρόπο ανάπτυξης αλγορίθμων αυτοματισμού και ελέγχου, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές προσφέροντας ένα μεγαλύτερο επίπεδο ασφάλειας και περιγράφεται παρακάτω.

Το LabVIEW λειτουργεί με projects. Το κάθε project μεταξύ άλλων μπορεί να περιέχει Virtual Instruments (VIs) και Libraries. Τα VIs εκτελούν τον κώδικα, ενώ οι βιβλιοθήκες περιέχουν τις μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται.

Για να καταστεί δυνατός ο αυτοματισμός μέσω LabVIEW και η συγκεκριμένη λογική σχεδιασμού, ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη βασικών λειτουργιών βιομηχανικού ελέγχου στο γραφικό περιβάλλον του LabVIEW και να βρεθεί τρόπος επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών VIs. Το τελευταίο έγινε μέσω των Shared Variables, όπως θα αναλυθεί σε

επόμενη ενότητα, ενώ για επικοινωνία ανάμεσα στις συσκευές έγινε χρήση του πρωτοκόλλου Modbus.



Εικόνα 3.2 Γραφική απεικόνιση της λογικής σχεδίασης του αλγορίθμου

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα δημιουργήθηκαν τριών ειδών VIs:

1. Τα I/O VIs και Modbus VIs τα οποία αφορούν την προσομοίωση της εγκατάστασης και την επικοινωνία των συσκευών,
2. τα Algorithm VIs τα οποία είναι όλοι οι αλγόριθμοι και
3. τα Simulation VIs τα οποία είναι αντιγραφή των I/O VIs με τη διαφορά ότι οι είσοδοι ρυθμίζονται από τον προγραμματιστή αντί για το σύστημα.

Η λογική σειρά της υλοποίησης ενός αλγορίθμου ελέγχου είναι η εξής:

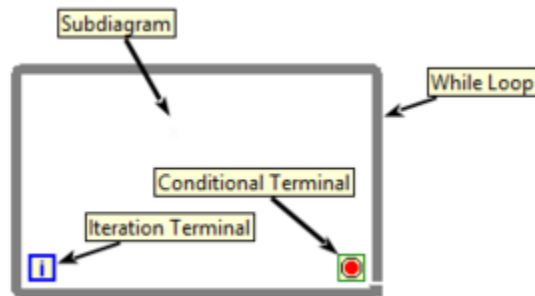
1. Ανάπτυξη του αλγορίθμου.
2. Δοκιμή στο simulation για όλες τις πιθανές περιπτώσεις.
3. Εφόσον ο αλγόριθμος λειτουργεί σωστά, ακολουθεί το βήμα 4, αλλιώς η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή.
4. Δοκιμή στην εγκατάσταση.
5. Εφόσον ο αλγόριθμος λειτουργεί σωστά τελειώνει η διαδικασία.

Μεγάλη έμφαση πρέπει να δοθεί στο βήμα δύο, ώστε να ληφθούν υπ' όψη όλες οι πιθανές περιπτώσεις και να βεβαιωθεί ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο, πριν γίνει η δοκιμή στην εγκατάσταση. Επιπροσθέτως, προτείνεται η δημιουργία πολλών και απλών Algorithm VIs με σκοπό την εύκολη ανάπτυξη περεταίρω εφαρμογών και την εύκολη εύρεση και διόρθωση λαθών στη λογική του αλγορίθμου. Τέλος, προτείνεται η δημιουργία δύο διαφορετικών projects, όπως έγινε και στα πλαίσια της διπλωματικής, ένα για την πραγματική εγκατάσταση και ένα για την προσομοίωση της, ώστε να αναπτύσσεται ο αλγόριθμος και να διατηρείται τουλάχιστον μία προηγούμενη λειτουργική έκδοση.

### 3.3 Βασικά functions του LabVIEW

#### 3.3.1 While Loop

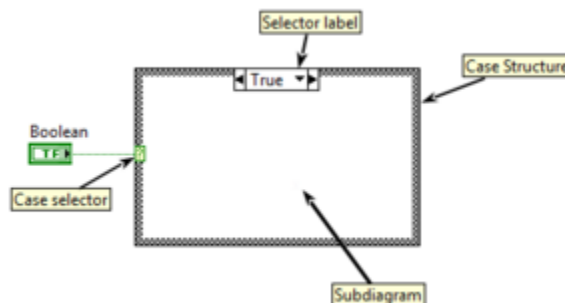
Το While Loop είναι ένα σχήμα επανάληψης. Εφόσον μια συνθήκη ισχύει, τότε ο υπολογιστής θα συνεχίζει να επαναλαμβάνει τις εντολές οι οποίες βρίσκονται μέσα σε αυτό. Ένα While Loop φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Το κόκκινο σηματάκι υποδεικνύει ότι όταν η συνθήκη ενεργοποιηθεί τότε το While Loop θα τερματίσει.



Εικόνα 1.3 Γραφική αναπαράσταση ενός While Loop στο LabVIEW

#### 3.3.2 Case Structure

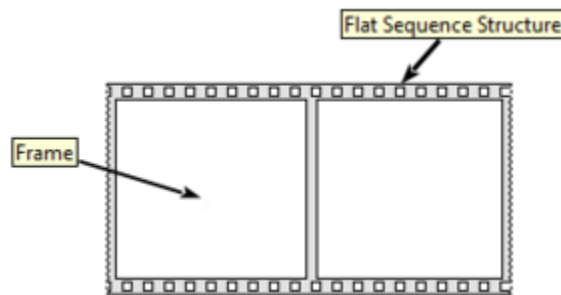
Το Case Structure λειτουργεί με βάση μια συνθήκη. Ανάλογα την τιμή αυτής της συνθήκης, τότε εκτελούνται και οι αντίστοιχες εντολές. Οι προκαθορισμένες περιπτώσεις είναι δύο, μία True και μία False, ωστόσο μπορούν να προστεθούν περισσότερες. Στην περίπτωση αυτή οι περιπτώσεις πρέπει να μετονομαστούν και να αλλάξει το είδος της μεταβλητής συνθήκης από Boolean, είτε σε String, είτε σε Integer. Συστήνεται, η κάθε περίπτωση να αντιστοιχεί σε έναν αριθμό, ενώ η προκαθορισμένη να είναι η περίπτωση «0». Στην εικόνα 3.4 φαίνεται η μορφή του Case Structure στην προκαθορισμένη μορφή του.



Εικόνα 3.2 Γραφική αναπαράσταση ενός Case Structure στο LabVIEW

### 3.3.3 Flat Sequence

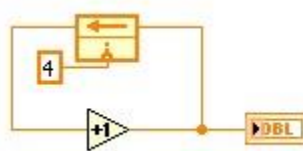
Εν γένει το LabVIEW εκτελεί τις εντολές ταυτόχρονα. Σε περίπτωση που υπάρχει ανάγκη για να εκτελεστούν εντολές στη σειρά χρησιμοποιείται το function του Flat Sequence. Το Flat Sequence εκτελεί τις εντολές ενός frame πριν εκτελέσει του επόμενου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5. Σε ένα Flat Sequence μπορούν να προστεθούν άπειρα frames.



Εικόνα 3.3 Γραφική αναπαράσταση ενός Flat Sequence στο LabVIEW

### 3.3.4 Feedback Node

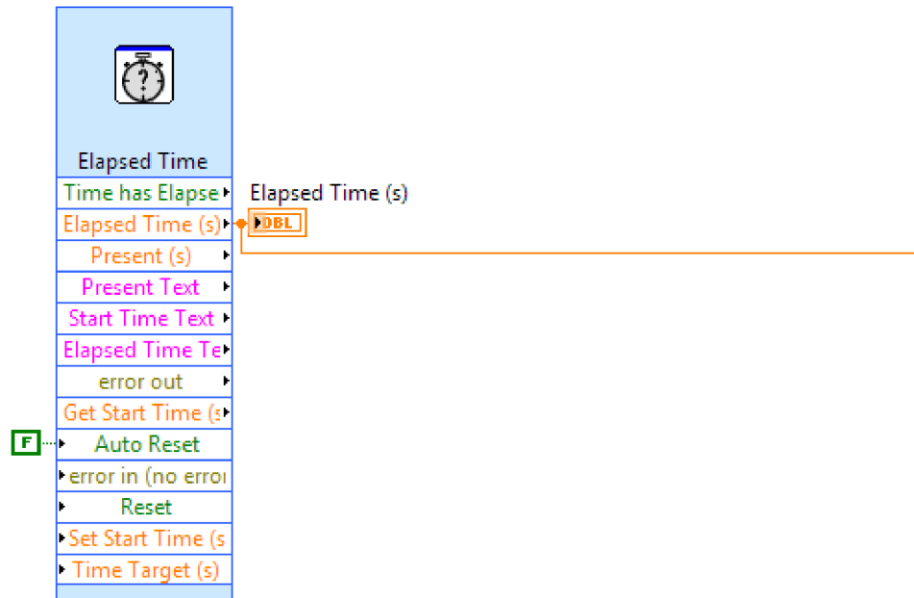
Το Feedback Node είναι ένας κύκλος ανατροφοδότησης. Η λειτουργία του είναι να επιστρέφει ένα σήμα σε κάποιο προηγούμενο σημείο του αλγορίθμου. Η προκαθορισμένη τιμή του για την πρώτη επανάληψη σε ένα κύκλο επαναλήψεων είναι False για δυαδικές τιμές και «0» για ακέραιες ή πραγματικές, ενώ το εικονίδιό του φαίνεται στην εικόνα 3.6. όπου ως αρχική τιμή έχει δοθεί η τιμή «4».



Εικόνα 3.4 Γραφική αναπαράσταση ενός Feedback Node στο LabVIEW

### 3.3.5 Elapsed Time

Το Elapsed Time λαμβάνει ως είσοδο (Time Target) έναν δεκαδικό αριθμό, ο οποίος δηλώνει τον χρόνο σε second (s) ο οποίος πρέπει να περάσει, ώστε η έξοδος (Time has elapsed) να γίνει «True». Όταν ο χρόνος αυτός περάσει η έξοδος γίνεται μόνιμα «True». Για να γίνει «Reset» το Elapsed Time χρησιμοποιεί μια ακόμα δυαδική είσοδο η οποία το κάνει «Reset» όταν γίνει «True» και τότε ο χρονομετρητής του ξεκινάει να μετράει από την αρχή και μέχρι να φτάσει τον επιθυμητό χρόνο η έξοδος του είναι «False». Το εικονίδιό του φαίνεται στην εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Γραφική αναπαράσταση ενός *Elapsed Time* στο LabVIEW



### 3.4 Ανάπτυξη βασικών συναρτήσεων βιομηχανικού ελέγχου στο LabVIEW (Sub-Vis)

Τα Vis χωρίζονται εν γένει σε δύο κατηγορίες, τα Main Vis και τα Sub-Vis. Τα πρώτα είναι τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τον αυτοματισμό, ενώ τα δεύτερα αποτελούν υπορουτίνες οι οποίες καλούνται από τα Main Vis. Τα Sub-Vis τα οποία περιγράφονται παρακάτω είναι βασικές εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου σε περιβάλλον LabVIEW οι οποίες υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής. Τα Sub-Vis αυτά κρίθηκαν απαραίτητα για την υλοποίηση του αυτοματισμού και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες εφαρμογές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι με βάση τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις, το LabVIEW διαθέτει μία θέση μνήμης για το κάθε Sub-VI, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθούν δύο φορές ταυτόχρονα. Ωστόσο, σε ποικίλες εφαρμογές αυτό είναι απαραίτητο. Για τέτοιες περιπτώσεις, το κάθε Sub-VI ρυθμίζεται, ώστε να δημιουργεί τόσες θέσεις στη μνήμη όσες και οι κλήσεις μέσα σε μία εκτέλεση του VI. Με αυτόν τον τρόπο κάθε κλήση ενός Sub-VI χρησιμοποιεί τη δική της μνήμη.

#### 3.4.1 Set Reset Flip-Flop

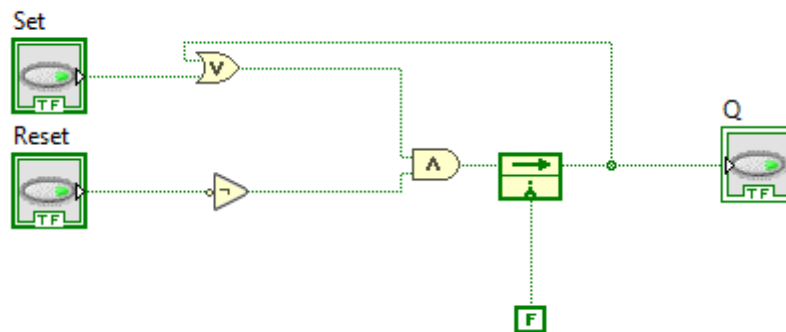
Το πρώτο Sub-VI το οποίο κατασκευάστηκε είναι το Set Reset Flip Flop (SR) και έχει την εξής λειτουργία. Όταν μια συνθήκη ενεργοποιείται (γίνεται «True») τότε το SR ενεργοποιείται και αυτό, γίνεται δηλαδή «Set» και δίνει «True» στην έξοδό του. Όταν μια άλλη συνθήκη ενεργοποιείται, αυτή κάνει «Reset» το SR με αποτέλεσμα να δίνει πλέον «False» στην έξοδό του. Για να γίνει πάλι «Set» θα πρέπει να επανενεργοποιηθεί η αντίστοιχη συνθήκη.

Είναι σημαντικό η συνθήκη η οποία ενεργοποιεί το SR να απενεργοποιείται αφού γίνει «Set» το SR. Διαφορετικά όταν ενεργοποιηθεί το «Reset» είτε δεν θα λειτουργήσει, είτε η αν είναι ενεργοποιημένα και τα δύο, η έξοδος του SR θα είναι απρόβλεπτη. Αντίστοιχα θα πρέπει και η συνθήκη η οποία κάνει «Reset» το SR να απενεργοποιείται, όταν επιθυμείτε το SR να γίνει «Set».

Το SR χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν καταστάσεις στις οποίες το σήμα συνεχώς εναλλάσσεται και να αποφευχθούν βλάβες. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν δύο συνθήκες εξαρτώνται η μία από την άλλη. Π.χ. Στην μελετώμενη εγκατάσταση αν ο πρεσοστάτης υψηλής πίεσης δείξει ότι η πίεση έχει ξεπεράσει το επιθυμητό όριο σταματάει να δουλεύει η αντλία, ώστε να μην πάθει βλάβη. Αφού σταματήσει να δουλεύει η αντλία είναι αναμενόμενο η πίεση να πέσει και άρα η ένδειξη του πρεσοστάτη να σβήσει. Χωρίς το SR η αντλία θα ξεκινούσε πάλι την λειτουργία της δημιουργώντας πάλι υψηλή πίεση κ.ο.κ. Με το SR χρειάζεται η αντλία να ενεργοποιηθεί πάλι με χειροκίνητο τρόπο.

Ο σκοπός του Flip-Flop επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια σειρά από απλές λογικές πύλες παίρνοντας δύο δυαδικές εισόδους και παράγοντας μία δυαδική έξοδο, ενώ στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το λογικό διάγραμμα του.

- Η πρώτη είσοδος η οποία κάνει «Set» το Flip-Flop περνάει από μια πύλη «Or» μαζί με την ανατροφοδότηση από την έξοδο του Flip-Flop. Η ανατροφοδότηση αυτή επιτυγχάνεται στο LabVIEW με ένα feedback node του οποίου η αρχική έξοδος είναι «False». Έτσι αρκεί ένα μόνο σήμα «True», ώστε η έξοδος του «Or» να παραμένει «True» ανεξαρτήτως της τιμής εισόδου.
- Στη συνέχεια αυτό το σήμα πάει στην πύλη «And» από την οποία προκύπτει και η έξοδος του Flip-Flop.
- Η δεύτερη είσοδος της πύλης «And» είναι η συνθήκη η οποία κάνει «Reset» το Flip-Flop και η δεύτερη είσοδος του Sub-VI. Η είσοδος αυτή περνάει πρώτα από μια πύλη NOT. Έτσι αν η συνθήκη «Reset» δεν έχει ενεργοποιηθεί τότε η πύλη «And» θα λαμβάνει τη δεύτερη είσοδο ως «True». Αντίθετα όταν ενεργοποιηθεί η συνθήκη «Reset», τότε η πύλη «And» θα δίνει ως έξοδο «False» μέχρι να επανενεργοποιηθεί η συνθήκη «Set» και εφόσον έχει απενεργοποιηθεί η συνθήκη «Reset».
- Αφού η πύλη «And» δώσει «False», τότε και η ανατροφοδότηση η οποία καταλήγει στην πύλη «Or» θα δώσει «False» με αποτέλεσμα να χρειάζεται επανενεργοποίηση της συνθήκης «Set», ώστε το SR να δώσει «True».



Εικόνα 3.8 Γραφική απεικόνιση του SR Flip-Flop Sub-VI

### 3.3.2 On & Off Delay

Το δεύτερο Sub-VI το οποίο δημιουργήθηκε είναι το On & Off Delay. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι επιθυμητό να υπάρχει ένα συνεχόμενο και με διάρκεια σήμα, ώστε να πραγματοποιηθεί μια ενέργεια και αυτή είναι και η λειτουργία του. Τέτοιες περιπτώσεις είναι τα σφάλματα. Είναι πολύ πιθανό λόγω εξωτερικών παραγόντων να ληφθεί ένας παλμός ο οποίος θα μας σταματούσε την εγκατάσταση, ο οποίος όμως δεν είναι και αληθής ή δεν επηρεάζει στον βαθμό που αποτελεί κίνδυνο για την εγκατάσταση. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να είναι κάποιο μετρητικό σφάλμα, κάποια διαρροή ρεύματος κ.τ.λ.

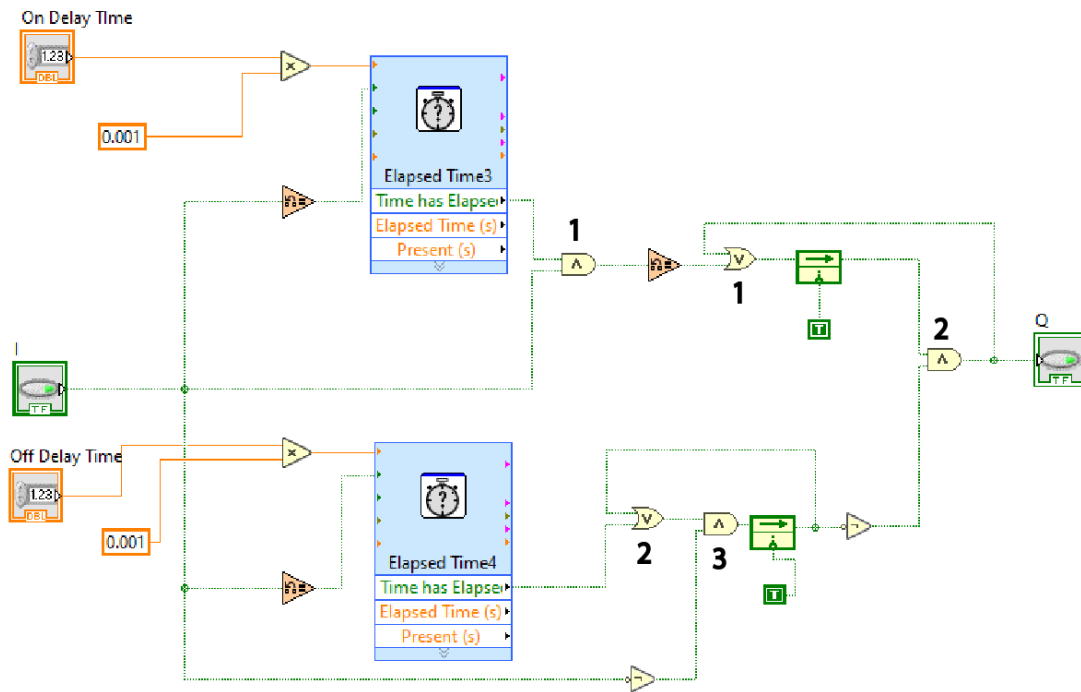
Το On & Off Delay το πετυχαίνει αυτό χρησιμοποιώντας απλές λογικές πύλες και κάποια απλά ενσωματωμένα functions του LabVIEW. Αρχικά, λαμβάνει τρεις εισόδους και δίνει μία έξοδο. Οι πρώτες δύο εισοδοί είναι ακέραιοι αριθμοί και δηλώνουν την επιθυμητή διάρκεια του σήματος πριν αυτό μεταφερθεί ως έξοδο σε millisecond (ms), δηλαδή ενός «True» σήματος στο On Delay και ενός «False» σήματος στο Off Delay αντίστοιχα. Η τρίτη είσοδος του είναι το δυαδικό σήμα το οποίο θέλουμε να περάσει και η έξοδος του είναι το αντίστοιχο σήμα. Παρακάτω φαίνεται το λογικό του διάγραμμα.

Το On & Off Delay χρησιμοποιεί δύο φορές το Elapsed Time, μία για το On Delay και μία για το Off Delay λαμβάνοντας τις αντίστοιχες εισόδους πολλαπλασιασμένες με τον συντελεστή 0.001, ώστε να μετατραπούν σε second. Και τα δύο γίνονται «Reset» από την τρίτη είσοδο του Sub-VI η οποία πρώτα περνάει από το change value function του LabVIEW του οποίου η έξοδος γίνεται «True» όταν η μεταβλητή εισόδου αλλάζει κατάσταση αλλά και ως προκαθορισμένη τιμή στην πρώτη επανάληψη.

Η έξοδος του Elapsed Time του On Delay περνάει από την πύλη «And» 1 (βλ. εικόνα 3.4) της οποίας η δεύτερη είσοδος είναι η τρίτη είσοδος του Sub-VI. Η έξοδος του «And» 1 περνάει από το change value function του LabVIEW και καταλήγει στην πύλη «Or» 1 (βλ. εικόνα 3.4) της οποίας η δεύτερη είσοδος είναι η έξοδος του Sub-VI μέσω ανατροφοδότησης. Η έξοδος της πύλης «Or» 1 είναι η μία είσοδος της πύλης «And» 2 (βλ. σχήμα) η οποία δίνει την έξοδο του Sub-VI. Το change value function μαζί με την ανατροφοδότηση και την πύλη «Or» 1 πριν την πύλη «And» 2 χρησιμοποιούνται, ώστε η τιμή στην είσοδο της πύλης «And» 2 να παραμένει «True» όταν η τρίτη μεταβλητή είσοδος γίνει «False» και μέχρι να περάσει ο χρόνος του Off Delay.

Η έξοδος του Elapsed Time του Off Delay περνάει από την πύλη «Or» 2 (βλ. σχήμα) της οποίας η δεύτερη είσοδος είναι η έξοδος της πύλης «And» 3 (βλ. σχήμα). Η έξοδος του «Or» 2 είναι η πρώτη είσοδος της πύλης «And» 3, ενώ η δεύτερη είσοδος της είναι το σήμα της τρίτης εισόδου το οποίο έχει περάσει πρώτα από μία πύλη NOT. Η έξοδος της πύλης «And» 3 περνάει από μια πύλη «Not» πριν καταλήξει στην πύλη «And» 2.

Όλες οι ανατροφοδοτήσεις γίνονται με feedback nodes των οποίων οι αρχικές τιμές είναι «True». Αυτή που έχει σημασία και πρέπει οπωσδήποτε να είναι «True» είναι η ανατροφοδότηση μετά το «And» 3 η οποία καταλήγει στο «Or» 2. Καθώς το change value function δίνει ως πρώτη έξοδο «True», αν η ανατροφοδότηση του Off Delay έδινε FALSE το οποίο περνώντας από την πύλη «Not» θα έδινε «True» στην πύλη «And» 2, και η πρώτη έξοδος του Sub-VI θα ήταν «True» κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο.



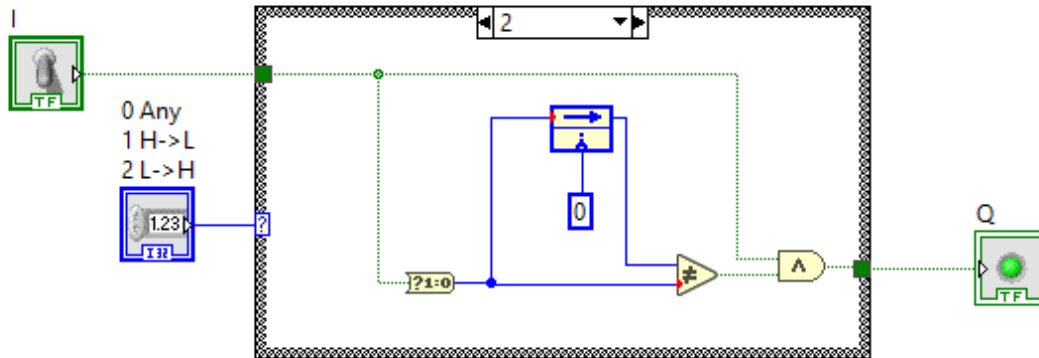
Εικόνα 3.9 Γραφική απεικόνιση του On & Off Delay Sub-VI

### 3.3.3 Change Value

Το τρίτο Sub-VI το οποίο δημιουργήθηκε είναι το Change Value. Το συγκεκριμένο Sub-VI ανιχνεύει την αλλαγή της κατάστασης μιας δυαδικής μεταβλητής για να δώσει την αντίστοιχη έξοδο. Ειδικότερα αν η μεταβλητή εισόδου αλλάξει κατάσταση, τότε το Change Value θα δώσει «True» ως έξοδο. Το συγκεκριμένο Sub-VI είναι χρήσιμο όταν θέλουμε ως σήμα την αλλαγή μιας μεταβλητής και όχι την ίδια την τιμή της μεταβλητής. Ένα τέτοιο παράδειγμα μπορεί να είναι η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση μιας συνθήκης.

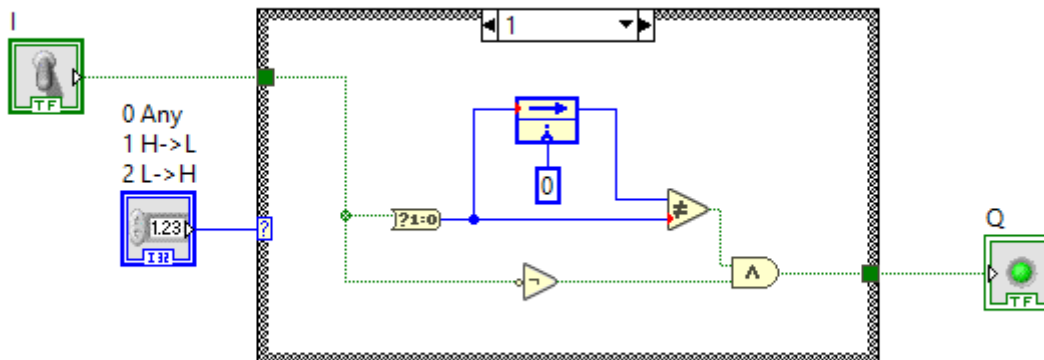
Το συγκεκριμένο Sub-VI λαμβάνει δύο εισόδους, την δυαδική βάση της οποίας δίνεται η έξοδος και μια παραμετρική. Η παραμετρική είσοδος λαμβάνει την τιμή «0», αν είναι επιθυμητή η ανίχνευση οποιασδήποτε αλλαγής, την τιμή «1» αν είναι επιθυμητή η ανίχνευση της αλλαγής από «True» σε «False» και «2» αν είναι επιθυμητή η ανίχνευση της αλλαγής από «False» σε «True» της μεταβλητής εισόδου. Ως έξοδο δίνει «True» όταν ανιχνεύεται κάποια αλλαγή ανάλογα με την παράμετρο, ενώ αλλιώς δίνει «False».

Ξεκινώντας από την τελευταία περίπτωση η δυαδική είσοδος μετατρέπεται σε integer και γίνεται είσοδος στην πύλη «Not Equal» η οποία έχει ως έξοδο «True» μόνο αν οι δύο εισοδοί της είναι διαφορετικές. Ως δεύτερη είσοδο λαμβάνει την ανατροφοδότηση της μεταβλητής, δηλαδή την τιμή της μεταβλητής της προηγούμενης επανάληψης. Η ανατροφοδότηση γίνεται με feedback node και έχει ως αρχική τιμή το «0». Η έξοδος της πύλης «Not Equal» είναι είσοδος σε πύλη «And», της οποίας η δεύτερη είσοδος είναι η τιμή της μεταβλητής ενώ η έξοδος της είναι η έξοδος του Sub-VI.



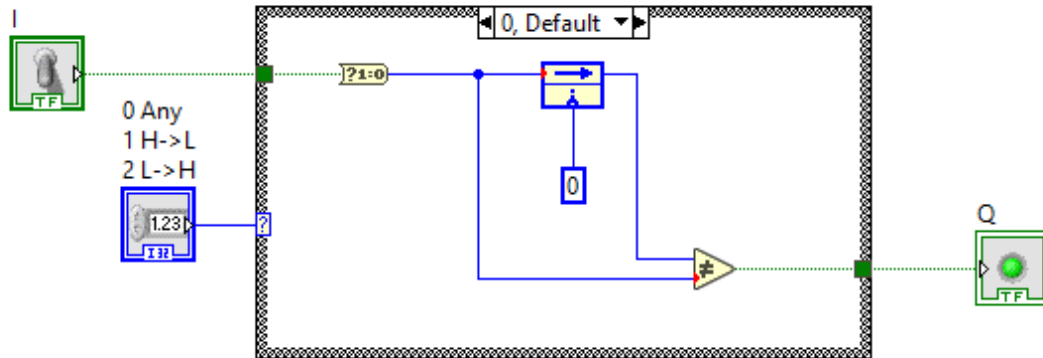
Εικόνα 3.10 Γραφική απεικόνιση του Change Value Sub-Vi περίπτωση "2"

Στην περίπτωση στην οποία η παράμετρος παίρνει την τιμή «1» ακολουθείται η ίδια λογική με την περίπτωση «2» με τη διαφορά ότι η δεύτερη είσοδος της πύλης «And» περνάει πρώτα από μια πύλη «Not».



Εικόνα 3.11 Γραφική απεικόνιση του Change Value Sub-Vi περίπτωση "1"

Στην περίπτωση στην οποία η παράμετρος παίρνει την τιμή «0» η έξοδος της πύλης «Not Equal» είναι και η έξοδος του Sub-VI, δηλαδή έχει παραληφθεί εντελώς η πύλη «And».



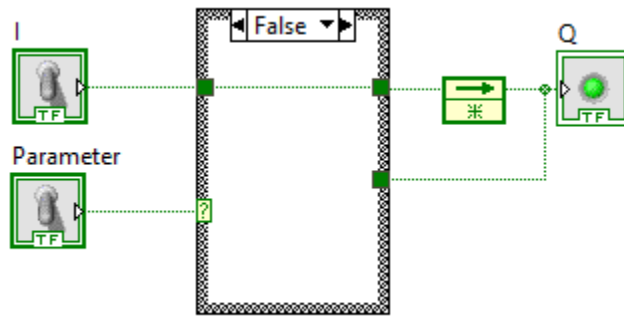
Εικόνα 3.12 Γραφική απεικόνιση του Change Value Sub-Vi περίπτωση “0”

Στο Sub-VI αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε η change value function του LabVIEW, γιατί έχει ως default έξοδο την τιμή «True», το οποίο είναι ανεπιθύμητο.

### 3.3.4 Sample and Hold

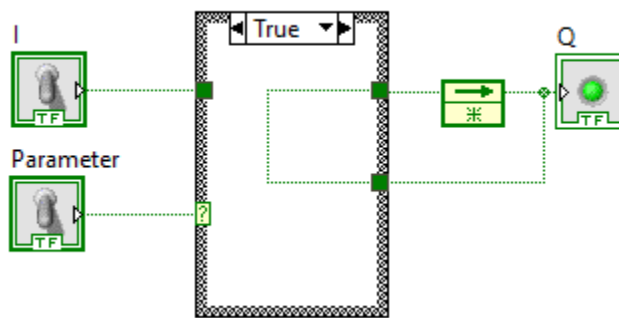
Το τέταρτο Sub-VI το οποίο κατασκευάστηκε είναι το Sample and Hold. Λειτουργεί με βάση μια δυαδική παράμετρο να διατηρεί την τιμή της μεταβλητής εισόδου που θέλουμε και να την μεταφέρει ως έξοδο. Πρακτικά δηλαδή αν η παράμετρος έχει την τιμή «True» να κρατάει την ίδια τιμή ανεξάρτητα των νέων τιμών της μεταβλητής εισόδου, ενώ αν η παράμετρος είναι «False» απλά περνάει την πραγματική τιμή της μεταβλητής στην έξοδο. Ειδικότερα, κατασκευάστηκε ένα Sub-VI για δυαδικές μεταβλητές και ένα για πραγματικούς αριθμούς.

Το Sample and Hold έχει δύο εισόδους, την δυαδική παράμετρο και την μεταβλητή εισόδου ενώ έχει μία έξοδο. Η μεταβλητή εισόδου περνάει μέσα από ένα Case Structure. Αν η παράμετρος είναι «False», τότε η έξοδος του case structure ταυτίζεται με την μεταβλητή εισόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8. Επιπλέον, όταν δεν δίνεται αρχική τιμή στο feedback node, αυτή είναι προκαθορισμένα «False».



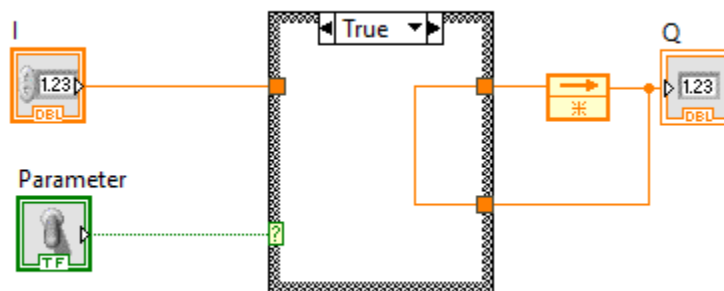
Εικόνα 3.13 Γραφική απεικόνιση του Sample and Hold Sub-VI για δυαδική μεταβλητή περίπτωση "False"

Αν η παράμετρος είναι «True», τότε η έξοδος του Case Structure είναι η ανατροφοδότηση της προηγούμενης εξόδου του Case Structure όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9.

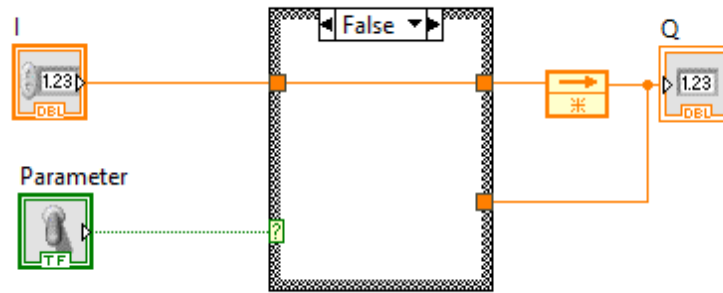


Εικόνα 3.14 Γραφική απεικόνιση του Sample and Hold Sub-VI για δυαδική μεταβλητή περίπτωση "True"

Παρακάτω στις εικόνες 3.10 και 3.11 φαίνονται οι αντίστοιχες διατάξεις του συγκεκριμένου Sub-VI για πραγματικούς αριθμούς.



Εικόνα 3.15 Γραφική απεικόνιση του Sample and Hold Sub-VI για πραγματική μεταβλητή περίπτωση "False"



Εικόνα 3.16 Γραφική απεικόνιση του Sample and Hold Sub-Vi για πραγματική μεταβλητή περίπτωση “True”

### 3.3.5 Negative to Positive VI

Το πέμπτο Sub-VI το οποίο κατασκευάστηκε είναι το Negative to Positive. Σκοπός του Sub-VI είναι να μετατρέπει τους αρνητικούς αριθμούς γραμμένους με τη μέθοδο two complement στην απόλυτή τους τιμή, ενώ το λογικό του διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 3.12.

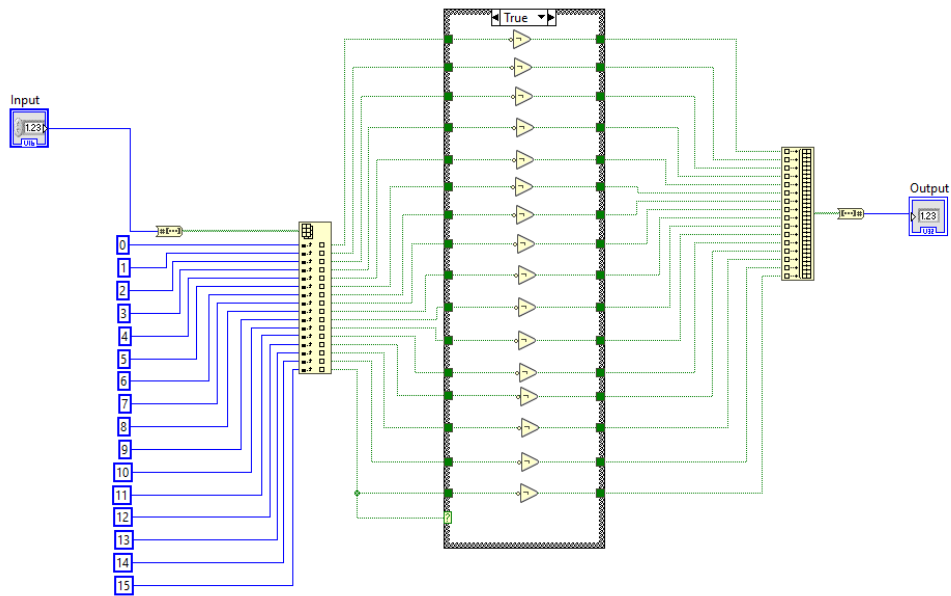
Η μέθοδος του complement χρησιμοποιεί το πρώτο ψηφίο του σήματος για να διακρίνει τους αριθμούς σε θετικούς και αρνητικούς. Έτσι διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

1. Το πρώτο ψηφίο είναι «0», οπότε ο αριθμός είναι θετικός και ο αριθμός γράφεται όπως στο δυαδικό σύστημα.
2. Το πρώτο ψηφίο είναι «1», οπότε ο αριθμός είναι αρνητικός και έχει μέτρο  $2^N$ - (αριθμό από τα υπόλοιπα ψηφία).

Για παράδειγμα το «-5» σε ένα σύστημα τεσσάρων bits θα γραφόταν «1011».

Για να πετύχει τον σκοπό του το Sub-VI δημιουργεί έναν πίνακα με το κάθε bit ξεχωριστά ελέγχει το πρώτο ψηφίο με ένα Case Structure και αν αυτό είναι αρνητικό, δηλαδή στην περίπτωση «True», τότε αντιστρέφει όλα τα ψηφία. Έπειτα τα συνθέτει για να δώσει την επιθυμητή έξοδο.





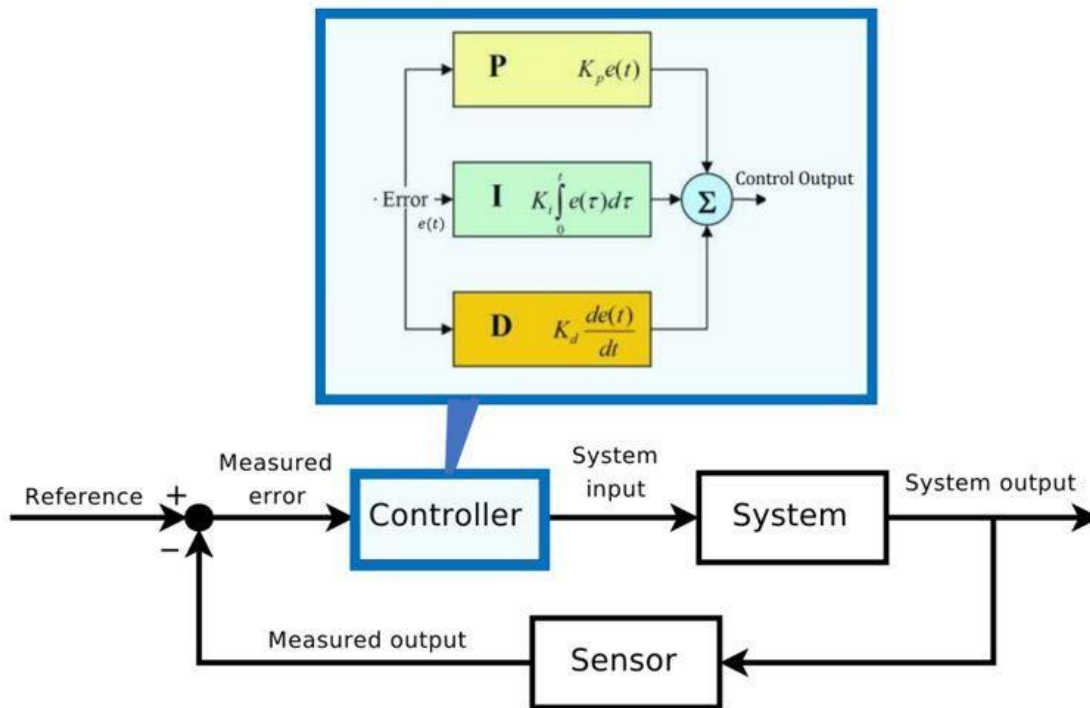
Εικόνα 3.6 Γραφική απεικόνιση του Negative to Positive Sub-Vi στην περίπτωση “True”

Αυτό χρειάστηκε καθώς οι inverter και τα Coriolis χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο για να μεταφέρουν αρνητικούς αριθμούς. Ενώ οι ποσότητες, όπως είναι η ταχύτητα περιστροφής, η παροχή μάζας κ.α. είναι αυστηρά θετικές, το αρνητικό πρόσημο δηλώνει αντίθετη φορά από αυτή η οποία βάσει σύμβασης θεωρείται θετική. Η συνάρτηση του LabVIEW η οποία διαβάζει μεταβλητές μέσω Modbus τις διαβάζει σαν να είναι στο απλό δυαδικό σύστημα. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι τιμές να διαβάζονται λανθασμένα, όταν είναι αρνητικές.

### 3.4 PID ελεγκτές στο LabVIEW

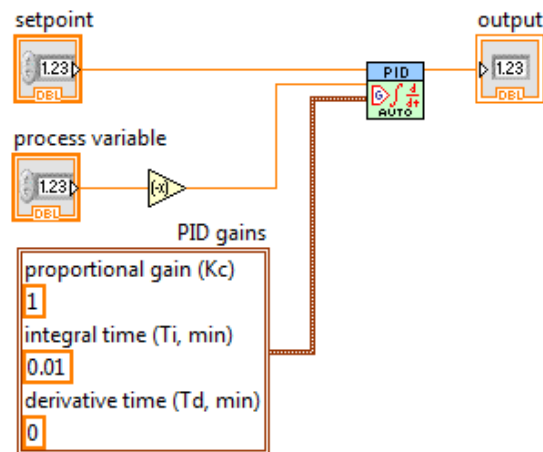
Όπως θα φανεί παρακάτω, για την υλοποίηση του ελέγχου του subcooling πριν την αντλία, αλλά και του superheating πριν τον διαχωριστή λαδιού χρησιμοποιήθηκαν ελεγκτές PID.

Οι PID ελεγκτές χρησιμοποιούν το σφάλμα του σήματος, την παράγωγο και το ολοκλήρωμα του πολλαπλασιασμένα με κάποιες σταθερές, ώστε να διορθώσουν τη μεταβλητή ελέγχου η οποία με τη σειρά της θα επηρεάσει το σήμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.18. Τελικός σκοπός είναι η μεταβλητή ελέγχου να πάρει μια επιθυμητή τιμή. Λόγω του ότι οι περισσότεροι PID ελεγκτές ρυθμίζονται επιτόπου, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι στη βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό των σταθερών αυτών [30].



Εικόνα 3.18 Λογικό διάγραμμα λειτουργίας PID ελεγκτή

Στο LabVIEW υπάρχει ο PID ελεγκτής ως έτοιμο εργαλείο και τα σήματά του φαίνονται στην εικόνα 3.19. Ως είσοδος στον PID κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται η διαφορά της μεταβλητής η οποία ελέγχεται με την επιθυμητή τιμή της.



Εικόνα 3.19 Block diagram χρήσης PID ελεγκτή στο LabVIEW

### 3.5 Διασύνδεση Labview με CoolProp

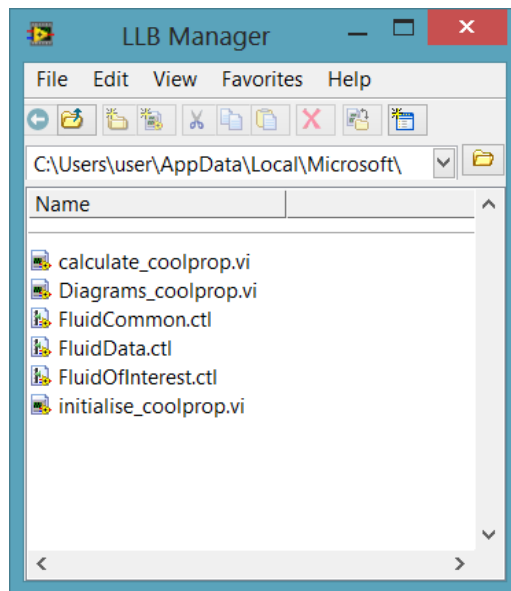
Το CoolProp είναι μια βιβλιοθήκη γραμμένη σε C++ η οποία υλοποιεί υπολογισμούς θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών μέσω εξισώσεων για καθαρά (pure) και ψευδοκαθαρά (pseudo-pure) ρευστά, για μείγματα αυτών, για ασυμπίεστα ρευστά κ.α. [21].

Το CoolProp είναι συμβατό με πρόγραμμα όπως το Excel, το Labview κ.α. Ειδικά ο συνδυασμός του CoolProp με το Labview είναι πολύ χρήσιμος για τον αυτοματισμό θερμοδυναμικών κύκλων, καθώς καθίσταται εύκολος ο υπολογισμός των σημείων και είναι εύκολη η εκμετάλλευση των δεδομένων τα οποία υπολογίζονται από το CoolProp.

Για τη χρήση του CoolProp στο Labview:

1. Αρχικά, χρειάζεται να προστεθεί η βιβλιοθήκη του CoolProp στο project στο οποίο επιθυμείται η χρήση του.
2. Για να προστεθεί κάποιο VI ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και για οποιοδήποτε Sub-VI. Τα VI του CoolProp βρίσκονται στη βιβλιοθήκη Coolprop.llb, τα στοιχεία της οποίας φαίνονται παρακάτω στην εικόνα 3.13.
3. Initialize\_coolprop.vi: Είναι απαραίτητο στην αρχή για χρήση οποιοδήποτε άλλου VI του CoolProp.
4. Calculate\_coolprop.vi: Είναι το βασικό VI και υπολογίζει τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά ενός ρευστού με βάση τις συνθήκες εισόδου, οι οποίες είναι το όνομα του ρευστού και δύο χαρακτηριστικά του, τα οποία μπορεί να είναι οποιοσδήποτε συνδυασμός θερμοκρασίας, πίεσης, πυκνότητας, ποιότητας, ενθαλπίας, εντροπίας.
5. FluidCommon.ctl: Περιέχει τη μορφή με την οποία εμφανίζονται τα δεδομένα των υπολογισμών.

6. FluidData.ctl: Περιέχει τα δεδομένα των ρευστών, βάσει των οποίων γίνονται οι υπολογισμοί.
7. FluidOfInterest.ctl: Περιέχει τα ονόματα όλων των ρευστών τα οποία είναι διαθέσιμα στο CoolProp. Παρ' όλα αυτά στην λίστα δεν εμφανίζονται όλα και χρειάζονται τα εξής βήματα σε περίπτωση που πρέπει να προστεθεί κάποιο:
  - a. Αφού βάλετε το initialize\_coolprop.vi στο VI στο οποίο δουλεύετε, ανοίγετε το Block Diagram.
  - b. Έπειτα πατάτε δεξί κλικ πάνω στο εικονίδιο του initialize\_coolprop.vi και επιλέγετε Open Front Panel, το οποίο οδηγεί στο αντίστοιχο Front Panel.
  - c. Στη συνέχεια ανοίγετε το αντίστοιχο Block Diagram και πατάτε δεξί κλικ στο FluidOfInterest και επιλέγετε Advanced>Customize.
  - d. Πατάτε δεξί κλικ πάλι στο FluidOfInterest και επιλέγετε Edit Items
  - e. Εκεί γνωρίζοντας ότι το CoolProp περιέχει δεδομένα για το ρευστό το οποίο θέλετε και δεν υπάρχει στη λίστα, μπορείτε να το προσθέσετε.
  - f. Τέλος θα πρέπει να πάτε στο Block Diagram και του initialize\_coolprop.vi και του calculate\_coolprop.vi και να αλλάξετε το όνομα του Props1 σε Props.



Εικόνα 3.20 Στοιχεία βιβλιοθήκης του CoolProp

### 3.6 Βιβλιοθήκες (Libraries) στο LabVIEW

Τα Libraries στο LabVIEW είναι βιβλιοθήκες οι οποίες μπορούν να περιέχουν μεταξύ άλλων VIs, Shared Variables και άλλες βιβλιοθήκες. Στα πλαίσια της διπλωματικής οι βιβλιοθήκες περιέχουν μόνο Shared Variables.

Οι βιβλιοθήκες είναι χρήσιμες για την οργάνωση των αρχείων με συγκεκριμένη ιεραρχία σε ένα project. Επιπλέον χρησιμεύουν:

- στον περιορισμό της πρόσβασης σε άλλους χρήστες,
- στην αποφυγή ίδιων ονομάτων σε διαφορετικά VI, Shared Variables κτλ.
- στον περιορισμό των δικαιωμάτων τροποποίησης αρχείων,
- ως παλέτα από την οποία με Drag and Drop μπορεί κάποιος να προσθέσει αρχεία στο front panel ή στο block diagram ενός VI.

### 3.7 Διασύνδεση μεταξύ διαφορετικών VIs μέσω Shared Variables

Τα Shared Variables στο LabVIEW χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων είτε σε διαφορετικά while loops, είτε μεταξύ διαφορετικών VI. Σε ένα αντίστοιχο προγραμματιστικό περιβάλλον το ρόλο αυτό θα έπαιζαν οι local και global variables αντίστοιχα.

Το πλεονέκτημα των Shared Variables για το οποίο προτιμήθηκαν από τη χρήση local και global variables είναι ότι αποθηκεύονται οργανωμένα σε βιβλιοθήκες οι οποίες μπορούν εύκολα να μεταφερθούν από υπολογιστή σε υπολογιστή και από project σε project. Το πλεονέκτημα αυτό διευκολύνει και τον τυποποιημένο τρόπο ανάπτυξης αλγορίθμων ελέγχου όπως περιγράφηκε παραπάνω, καθώς οι βιβλιοθήκες ανανεώνονται αυτόματα, όταν υπάρξει κάποια αλλαγή σε ένα από τα δύο projects. Επιπλέον, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους μεταφοράς δεδομένων όπως η User Datagram Protocol (UDP) και η Transmission Control Protocol (TCP), το LabVIEW φτιάχνει ουρά και χρησιμοποιεί τη μέθοδο First In First Out (FIFO) για τη διαχείριση των Shared Variables, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται κώδικας διαμόρφωσης (Configuration Code).

Στο LabVIEW υπάρχουν δύο ειδών Shared Variables, οι Single Process και οι Network-Published. Οι Single Process Shared Variables μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά σε ένα project, σε αντίθεση με τις Network Published οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα δίκτυο Ethernet.

## 4. Ανάπτυξη λογισμικού ελέγχου της λειτουργίας της εγκατάστασης

Για τον αυτοματισμό της εγκατάστασης δημιουργήθηκαν δύο projects και επτά Main VIs. Τα δύο projects ονομάστηκαν Regen\_project και Regen\_Simulation αντίστοιχα. Τα Main VIs είναι τα εξής:

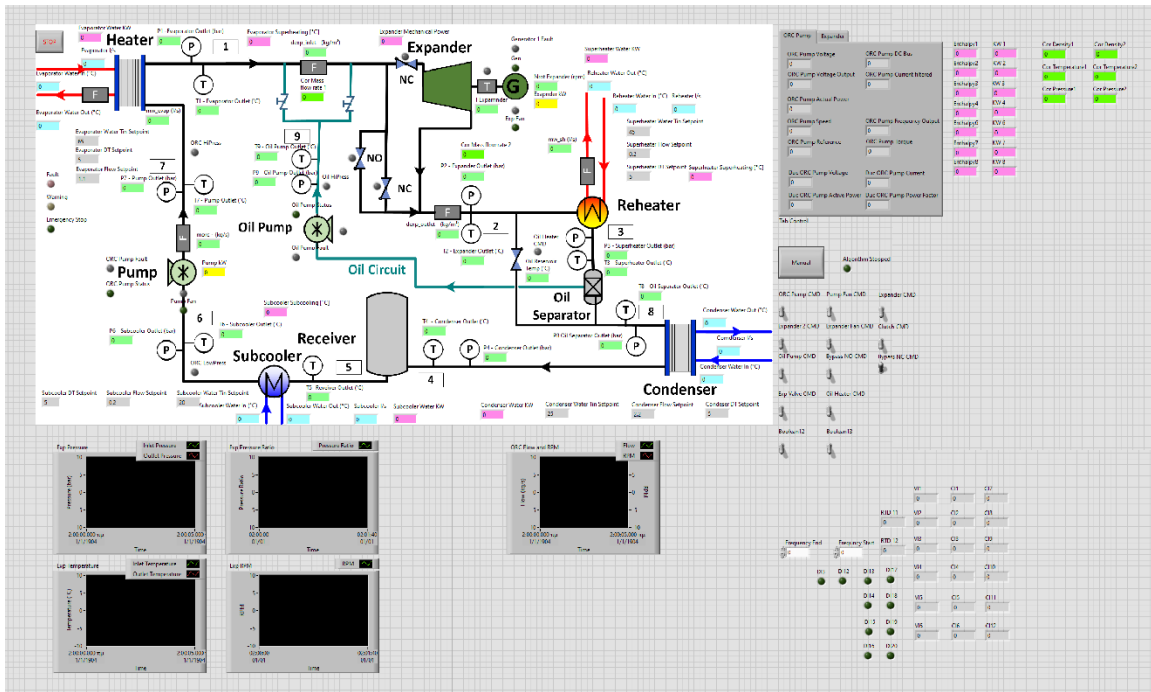
1. I/O
2. Regen Algorithm
3. Modbus
4. DataLogging
5. CoolProp\_Calc
6. Simulation
7. Algorithm

Τα πρώτα τρία ανήκουν στο πρώτο project, ενώ τα δύο τελευταία στο δεύτερο. Τα νούμερα τέσσερα (4) και πέντε (5) μοιράζονται και στα δύο project. Μάλιστα οποιαδήποτε αλλαγή μεταφέρεται αυτόματα και στο άλλο project. Τα συγκεκριμένα δύο VIs έχουν να κάνουν με την καταγραφή δεδομένων και τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του κύκλου. Συνεπώς, δεν υπήρχε λόγος να γίνει ανάπτυξη πρώτα στο Simulation, καθώς δεν αφορούν την ασφάλεια της εγκατάστασης. Επιπλέον, το Modbus VI αναπτύχθηκε κατευθείαν στο Regen\_project, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί, αν λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο.

### 4.1 I/O VI

Το I/O VI περιέχει όλες τις εισόδους και εξόδους του συστήματος. Σκοπός του είναι να δίνει πλήρη εικόνα του θερμοδυναμικού κύκλου. Επιπλέον, έχει σκοπό να παρακάμπτει τους αυτοματισμούς, όταν ο χειριστής το επιλέγει. Η τελευταία αυτή λειτουργία χρησιμεύει είτε κατά τη συντήρηση της εγκατάστασης είτε κατά τον έλεγχο λειτουργιών των inverter, των συσκευών Ducati και της καλωδίωσης.

Για την υλοποίηση του το I/O VI διαβάζει τιμές από όλα τα υπόλοιπα VIs καθώς και από τον βασικό επεξεργαστή της εγκατάστασης, ενώ παράλληλα του δίνει τις κατάλληλες εντολές. Για να μπορεί να γίνει αυτή η μεταφορά τιμών από VI σε VI χρησιμοποιήθηκαν Single-Process Shared Variables. Στο κεφάλαιο 3.3 αναγράφεται λεπτομερώς η λειτουργία τους. Στη συνέχεια το I/O VI εμφανίζει τις κατάλληλες τιμές στην οθόνη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1 παρακάτω.



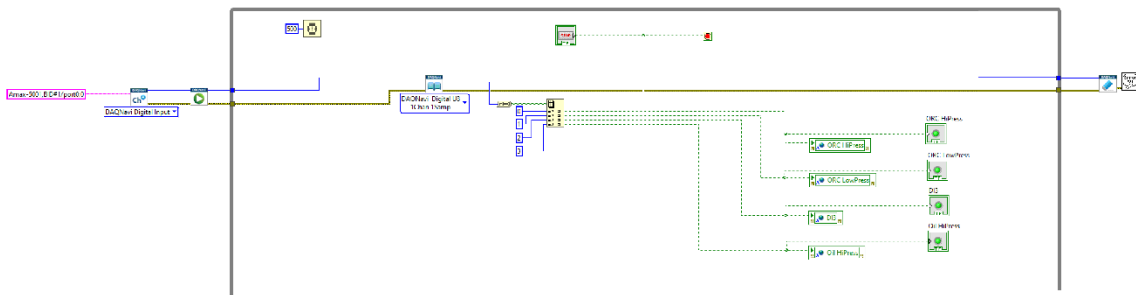
Εικόνα 4.1 IO\_VI Front Panel

Συγκεκριμένα δίπλα από κάθε σημείο του κύκλου φαίνονται οι αντίστοιχες θερμοκρασίες και πιέσεις του εργαζόμενου μέσου. Επιπροσθέτως στους εναλλάκτες φαίνονται τα setpoints τα οποία θέτει ο χρήστης και οι πραγματικές τιμές του νερού για την θερμοκρασία εισόδου, εξόδου, την παροχή και την ισχύ που χάνει το νερό. Εκτός αυτών τα στοιχεία τα οποία ελέγχουμε, δηλαδή την βασική αντλία, τον εκτονωτή, τις βαλβίδες και την αντλία λαδιού φαίνεται με λαμπάκια αν λειτουργούν. Στην βασική αντλία και στον εκτονωτή δε φαίνονται και βασικές τιμές, χαρακτηριστικές τις λειτουργίας τους, όπως οι στροφές, η ισχύς, η ροπή του εκτονωτή. Τέλος, στην εικόνα του κύκλου φαίνονται η παροχή, οι πυκνότητες πριν και μετά τον εκτονωτή, η θερμοκρασία λαδιού και αν δουλεύει η αντίσταση η οποία το θερμαίνει και βασικά σφάλματα τα οποία μπορεί να προκύψουν. Τέτοια είναι η υψηλή πίεση κατάντη της αντλίας, η χαμηλή πίεση ανάντη της αντλίας, τα σήματα των inverter για σφάλμα είτε στην αντλία είτε στον εκτονωτή και η γενική κατάσταση Fault της εγκατάστασης, η οποία περιγράφεται στο 4.2.2.

Πέρα από τη βασική εικόνα στα δεξιά βρίσκεται το Tab Control στο οποίο αποτυπώνονται όλες οι μεταβλητές, οι οποίες διαβάζονται μέσω Modbus από τους inverter. Στο πρώτο tab φαίνονται οι τιμές της αντλίας, ενώ στο δεύτερο του εκτονωτή, ενώ ακόμα πιο δεξιά φαίνονται οι τιμές από τα Coriolis και οι ενθαλπίες του εργαζόμενου μέσου σε κάθε σημείο του κύκλου. Στο κάτω μέρος φαίνονται τα διαγράμματα της πίεσης και θερμοκρασίας πριν και μετά τον εκτονωτή καθώς και ο λόγος πίεσης αυτού και οι στροφές ανά λεπτό της γεννήτριας σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Τέλος, το I/O VI διαθέτει το κουμπί Manual το οποίο φαίνεται κάτω δεξιά και παρακάμπτει τους αυτοματισμούς. Κάτω από αυτό φαίνονται και οι διακόπτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της χειροκίνητης (manual) λειτουργίας.

Αυτές τις λειτουργίες τις πετυχαίνει χρησιμοποιώντας τα DAQNavI Read και Write μέσα σε ένα while loop, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (4.2-4.4) ανάλογα με την περίπτωση. Στην εικόνα 4.2 φαίνεται η πρώτη περίπτωση στην οποία το VI διαβάζει τις μεταβλητές από τον επεξεργαστή Amax και τις μεταφέρει τόσο σε ενδείξεις στο front panel όσο και στις αντίστοιχες Shared Variables, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα Algorithm VIs. Επιπλέον, φαίνεται πάνω αριστερά και ο χρόνος ανά τον οποίο ξεκινάει ξανά το while loop.

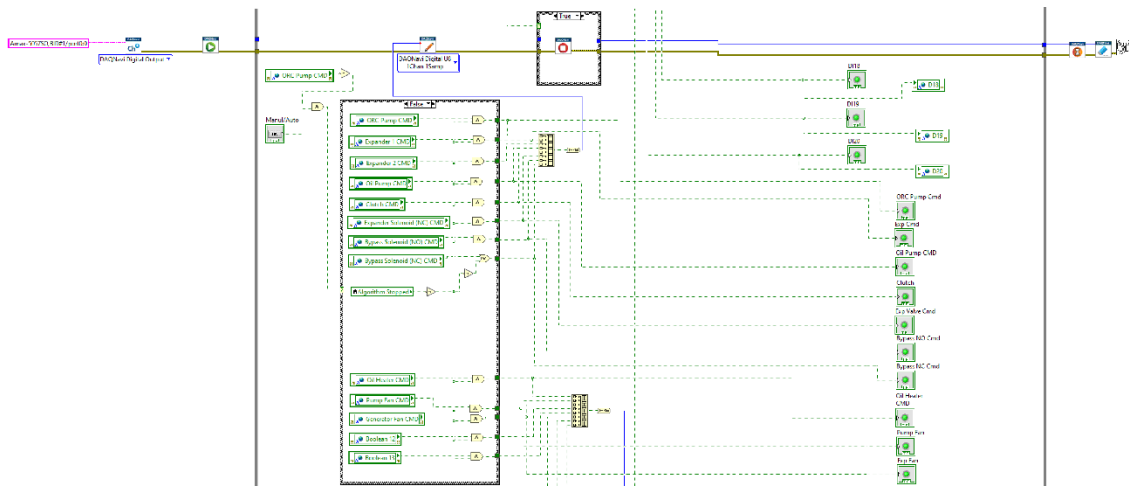


Εικόνα 4.2 Amax read function

Στην εικόνα 4.3 η περίπτωση στην οποία το VI γράφει τις μεταβλητές στον Amax. Όπως γίνεται φανερό, οι τιμές αυτές δίνονται από τα Shared Variables τα οποία παίρνουν τις τιμές τους μέσα από το Regen Algorithm VI, όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Στη συγκεκριμένη εικόνα φαίνεται και η υλοποίηση του manual χειρισμού. Σε περίπτωση που το κουμπί manual πατηθεί, το οποίο παραμένει πατημένο μέχρι να ξαναπατηθεί, και εφόσον δεν λειτουργεί η αντλία, το οποίο, όπως θα φανεί παρακάτω, σημαίνει ότι δεν λειτουργεί η εγκατάσταση, τότε οι εντολές δίνονται από τους διακόπτες οι οποίοι φαίνονται στην εικόνα 4.1.

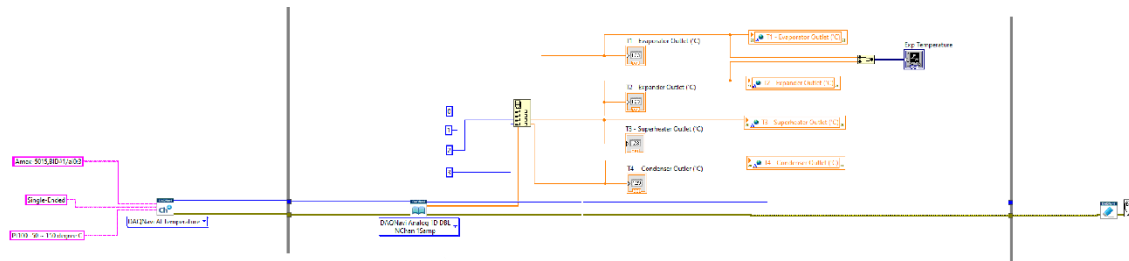
Η συνθήκη της μη λειτουργίας της αντλίας προστέθηκε, ώστε σε περίπτωση που λειτουργεί ο κύκλος αυτόματα, να μην είναι δυνατή η αλλαγή σε manual χειρισμό. Η συγκεκριμένη αλλαγή μηδένιζε όλες τις τιμές των μεταβλητών οι οποίες δίνονται με εντολή στο σύστημα με συνέπεια την απότομη διακοπή του κύκλου, το οποίο κρίθηκε μη επιθυμητό.





Εικόνα 4.3 Amaz write function

Στην εικόνα 4.4 φαίνεται η περίπτωση στην οποία το VI διαβάζει πραγματικές μεταβλητές από τον Amaz και τις μεταφέρει στις αντίστοιχες ενδείξεις και Shared Variables, ενώ παράλληλα κατασκευάζει διάγραμμα με τις θερμοκρασίες T1 και T2 σε συνάρτηση με τον χρόνο.

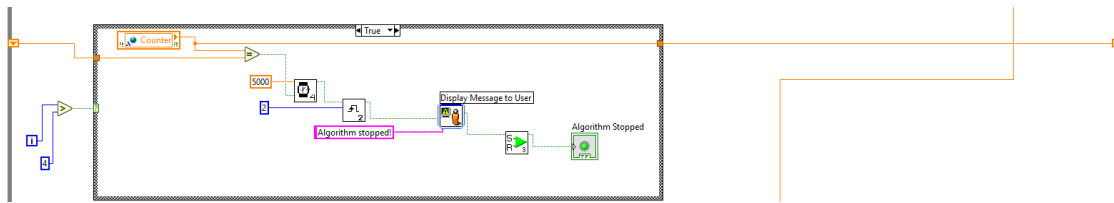


Εικόνα 4.4 Amaz read function for real value and plot to 2D graph

Στην εικόνα 4.5 φαίνεται η τελευταία λειτουργία του I/O VI, η οποία έχει να κάνει με την ασφάλειά του. Σε περίπτωση που κλείσει το Regan Algorithm VI, όπως π.χ. από λάθος του χειριστή, το I/O VI εμφανίζει μήνυμα στην οθόνη ότι σταμάτησε και τερματίζει ο κύκλος αυτόματα. Η λειτουργία αυτή υλοποιήθηκε, διότι με κλειστό το Regan Algorithm VI όλοι οι αυτοματισμοί ασφαλείας έχουν πάψει να λειτουργούν και είναι πιθανό να δημιουργηθεί βλάβη στην εγκατάσταση.

Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η Shared Variable Counter η οποία είναι ο μετρητής των κύκλων του Regan Algorithm VI. Σε περίπτωση που σταματήσει να λειτουργεί, δεν αυξάνεται ο μετρητής. Το I/O VI διαβάζει την τιμή του counter στον τωρινό και τον προηγούμενο κύκλο. Σε περίπτωση που είναι ο ίδιος αριθμός, έχει σταματήσει δηλαδή ο αλγόριθμος, τότε σταματάει ο κύκλος. Για να λειτουργήσει σωστά η διαδικασία η οποία περιγράφηκε, χρειάζεται ο χρόνος επανεκτέλεσης του while loop να είναι μικρότερος στο Regan Algorithm VI από ότι στο I/O VI και να ξεκινήσει να λειτουργεί μετά από κάποιες

λίγες επαναλήψεις. Η τελευταία συνθήκη χρειάζεται, γιατί κατά την εκκίνηση, όσο υψηλές δυνατότητες και να έχει ο επεξεργαστής δεν γίνεται να ξεκινήσουν όλα τα VI ταυτόχρονα.



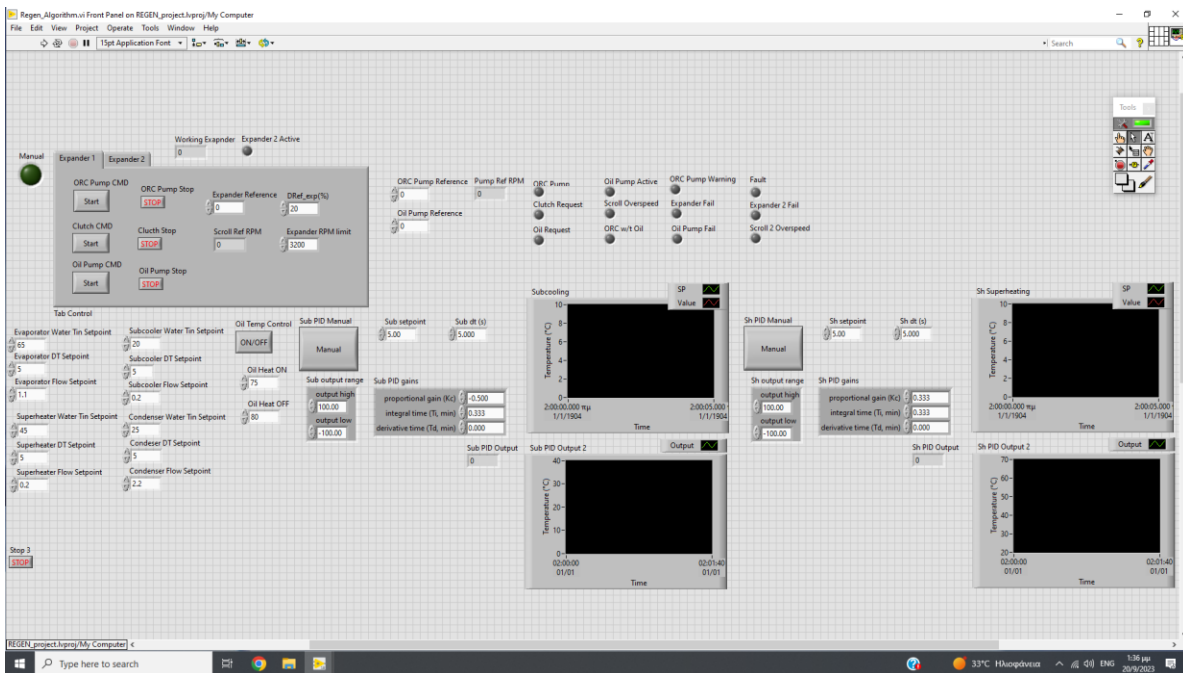
Εικόνα 4.5 Algorithm Stopped function

## 4.2 Regen Algorithm VI

Το Regen Algorithm VI αποτελεί τον αλγόριθμο λειτουργίας της εγκατάστασης. Σκοπός του είναι η ασφαλής λειτουργία αυτής και η ρύθμιση του κύκλου. Παρακάτω περιγράφονται οι αυτοματισμοί οι οποίοι υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας.

### 4.2.1 Διαδικασία εκκίνησης

Όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω ο αλγόριθμος διαθέτει τρία κουμπιά Start και τρία κουμπιά Stop, τα οποία αντιστοιχούν από πάνω προς τα κάτω στην βασική αντλία, στον συμπλέκτη μεταξύ εκτονωτή και γεννήτριας και την αντλία λαδιού αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6. Στο Tab Control ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τον εκτονωτή με τον οποίο θα λειτουργήσει η εγκατάσταση. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με απενεργοποιημένη την εγκατάσταση. Σε αντίθετη περίπτωση η αλλαγή στο tab control δεν προκαλεί κάποια ενέργεια στο σύστημα. Ο δεύτερος εκτονωτής έχει τα αντίστοιχα κουμπιά με τον πρώτο, με κάποιες διαφοροποιήσεις στην διαδικασία εκκίνησης και στις διαδικασίες διακοπής λειτουργίας οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Για να λειτουργήσουν τα κουμπιά Start θα πρέπει να μην υπάρχει ένδειξη Fault, η οποία περιγράφεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 4.2.2. Παρακάτω φαίνεται το «Front Panel» του Regen Algorithm VI.



Εικόνα 4.6 Regen Algorithm front panel

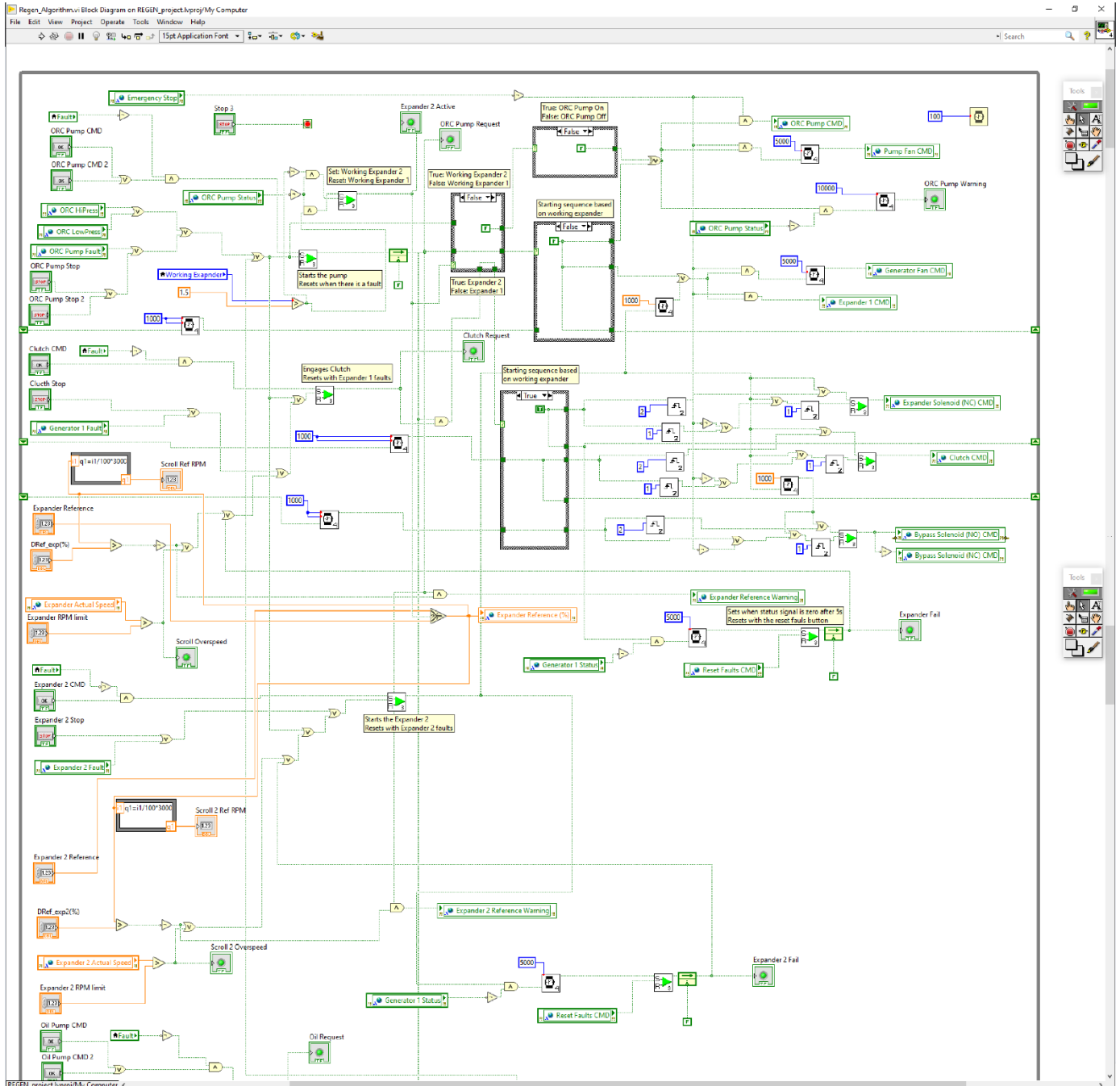
Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν δύο διαδικασίες εκκίνησης, μία για κάθε εκτονωτή. Εφόσον έχει επιλεγθεί ο πρώτος εκτονωτής, για την εκκίνηση του συστήματος απαιτείται να πατηθεί το Start της βασικής αντλίας. Σε αντίθετη περίπτωση δεν λειτουργεί ούτε το κουμπί του συμπλέκτη ούτε της αντλίας λαδιού. Όταν πατηθεί το Start της αντλίας, ο inverter παρέχει ρεύμα στην αντλία και τον ανεμιστήρα της, ενώ σε δεύτερο χρόνο στην γεννήτρια και τον ανεμιστήρα της.

Το επόμενο βήμα είναι να πατηθεί το Start του συμπλέκτη. Για να γίνει αυτό χρειάζεται επιπλέον της σωστής λειτουργίας αντλίας η γεννήτρια να έχει τουλάχιστον το 20% των ονομαστικών στροφών της. Το κουμπί αυτό ανοίγει τη βαλβίδα του εκτονωτή, σε δεύτερο χρόνο συμπλέκει τον εκτονωτή με την αντλία, ενώ σε τρίτο χρόνο κλείνει τις βαλβίδες παράκαμψης. Η διαφορά στον χρόνο εξασφαλίζει ότι το ρευστό θα έχει τρόπο διαφυγής και θα αλλάξει ομαλά την πορεία του από την παράκαμψη στον εκτονωτή. Με τον τρόπο αυτό ξεκινάει ο κύκλος.

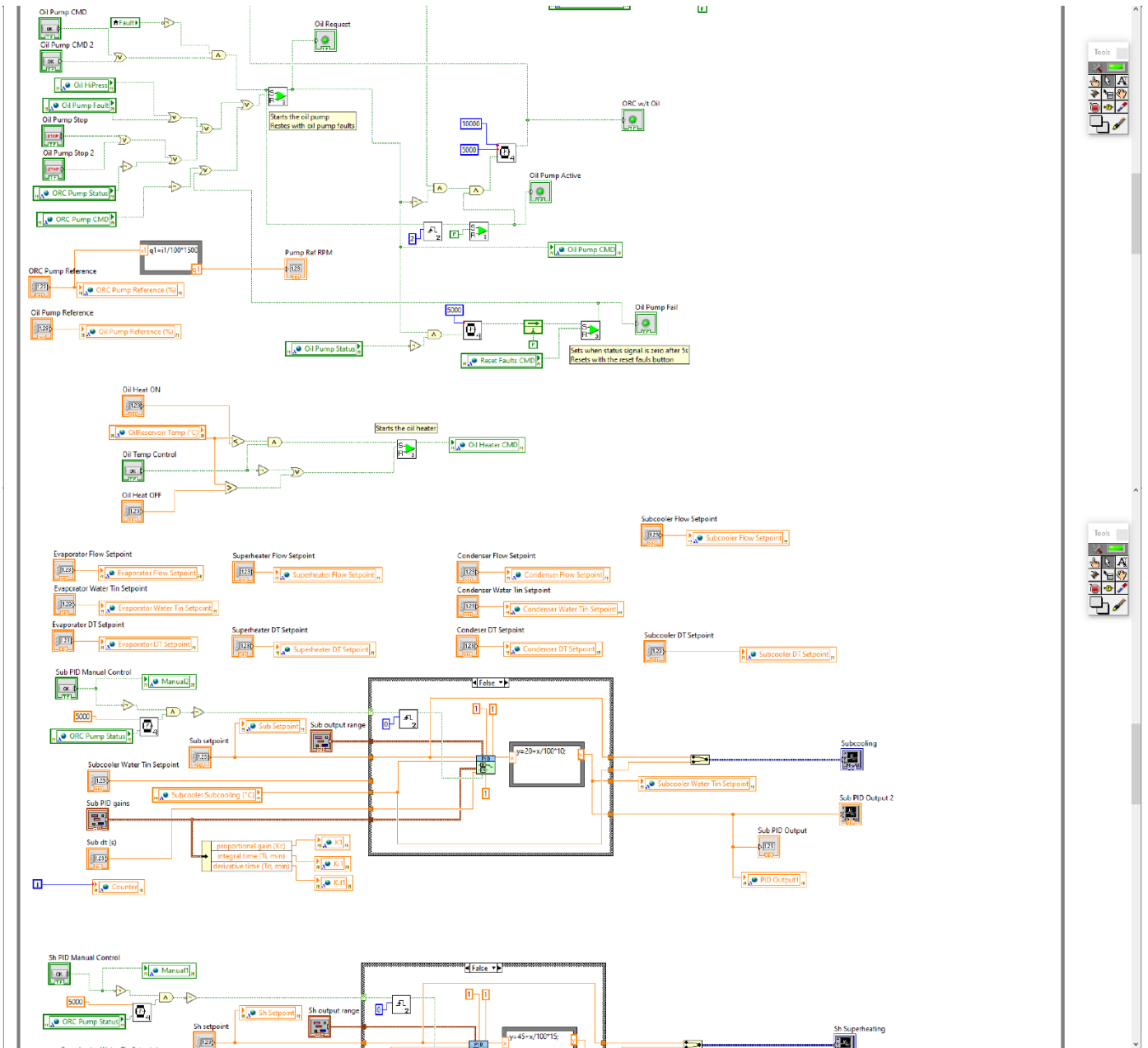
Το τελευταίο βήμα είναι να πατηθεί το Start της αντλίας λαδιού, το οποίο εκκινεί την αντλία του λαδιού, ώστε να λειτουργεί ο εκτονωτής με ασφάλεια.

Στην περίπτωση στην οποία έχει επιλεγθεί ο δεύτερος εκτονωτής το Start της αντλίας ο inverter παρέχει ρεύμα μόνο στην αντλία και στον ανεμιστήρα της. Στη συνέχεια το Start του συμπλέκτη δίνει εντολή στον inverter ο οποίος με τη σειρά του παρέχει ρεύμα στην γεννήτρια και τον ανεμιστήρα της πριν συνεχίσει τη διαδικασία όπως και στην πρώτη περίπτωση. Στο τέλος το Start της αντλίας λαδιού λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο.

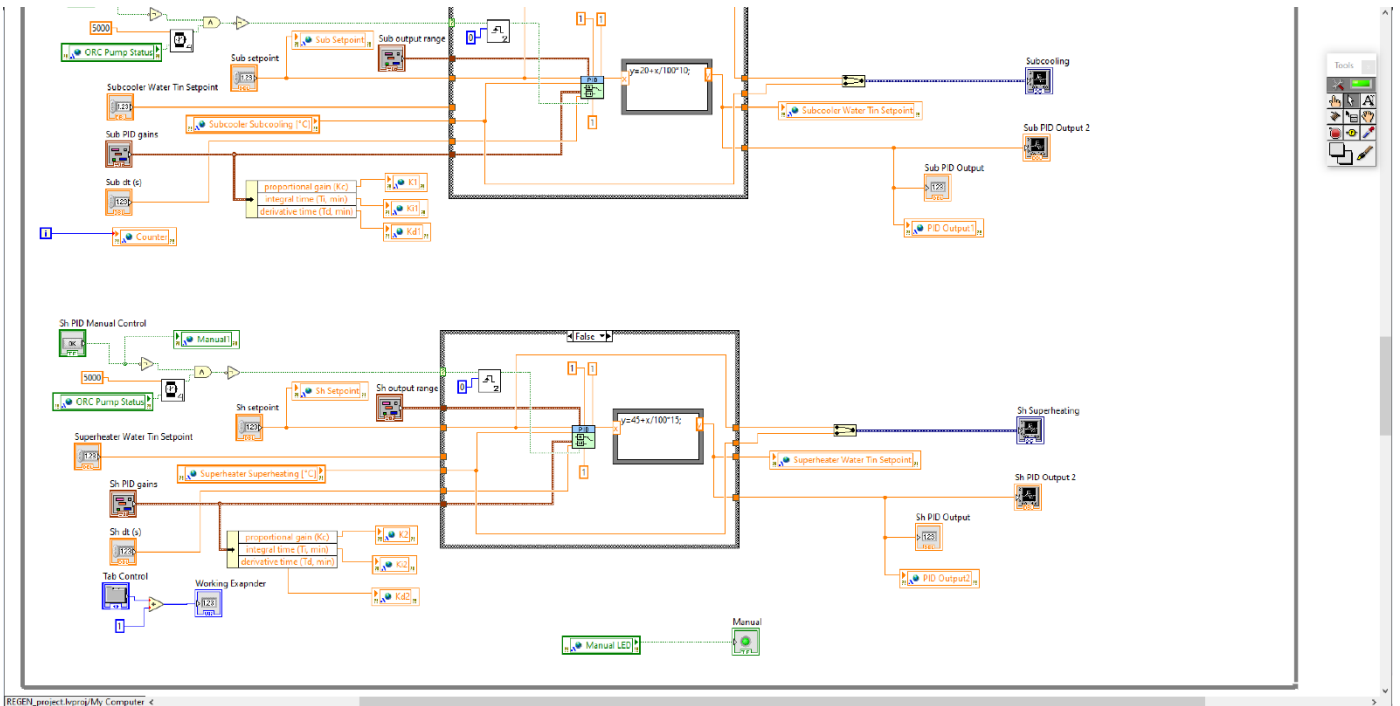
Παρακάτω στην εικόνα 4.7α, 4.7β, 4.7γ, φαίνεται το ένα από τα δύο While Loops τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στο οποίο φαίνεται η υλοποίηση όλων των αυτοματισμών και λειτουργιών της εγκατάστασης. Το δεύτερο While Loop, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 4.8, περιέχει όλα τα μηνύματα σφαλμάτων και διαχειρίζεται την Shared Variable “Reset Faults CMD”.



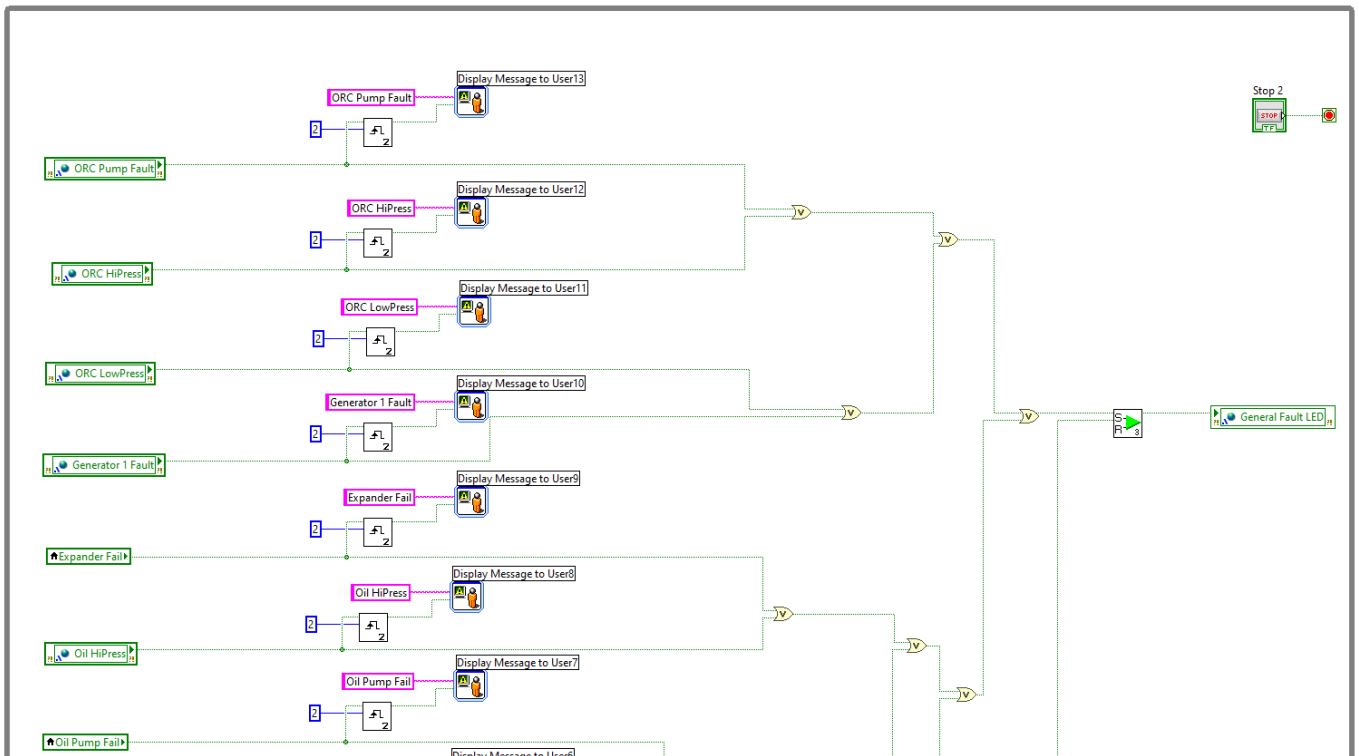
Εικόνα 4.7α Regen Algorithm VI Block Diagram While Loop 1: Αυτοματισμοί της εγκατάστασης



Εικόνα 4.78 Regen Algorithm VI Block Diagram While Loop 1: Αυτοματισμοί της εγκατάστασης



Εικόνα 4.7γ Regen Algorithm VI Block Diagram While Loop 1: Αυτοματισμοί της εγκατάστασης



Εικόνα 4.8 Regen Algorithm VI Block Diagram μέρος του While Loop 2: Μηνύματα σφαλμάτων

#### 4.2.2 Σφάλματα λειτουργίας

Κατά την λειτουργία της εγκατάστασης δύναται να παρουσιαστούν ποικίλα σφάλματα. Εφόσον υπάρξει κάποιο σφάλμα το οποίο αναγράφεται στον πίνακα 4.1, εμφανίζεται το αντίστοιχο μήνυμα στην οθόνη. Ανάλογα το σφάλμα ακολουθούνται και οι αντίστοιχες διαδικασίες, οι οποίες αναλύονται στην επόμενη ενότητα. Εφόσον προκύψει σφάλμα, το οποίο δεν έχει προβλεφθεί, υπάρχει το κουμπί «Emergency Stop» στον ηλεκτρολογικό πίνακα της εγκατάστασης, το οποίο διακόπτει απευθείας την παροχή ρεύματος σε όλη την εγκατάσταση, πέρα από τον επεξεργαστή.

Σφάλμα	Πηγή	Περιγραφή	Ακόλουθη διαδικασία
ORC Pump Fault	Inverter Αντλίας	Ένδειξη Fault του Inverter	1
ORC HiPress	Πρεσοστάτης Υψηλής πίεσης	Όταν είναι ενεργοποιημένος ο πρεσοστάτης	1
ORC LowPress	Πρεσοστάτης Χαμηλής Πίεσης	Όταν είναι ενεργοποιημένος ο πρεσοστάτης	1
ORC w/t Oil	Inverter Αντλίας Λαδιού	Αφού ενεργοποιηθεί πρώτη φορά η αντλία λαδιού και ο κύκλος λειτουργεί χωρίς αυτή για πάνω από 10 λεπτά.	1
Generator 1 Fault	Inverter Εκτονωτή	Ένδειξη Fault του Inverter	2
Expander Fail	Inverter Εκτονωτή	Μη ένδειξη Status του Inverter για πάνω από 5 δευτερόλεπτα ενώ λειτουργεί ο εκτονωτής	2
Scroll Overspeed	Inverter Εκτονωτή	Όταν ξεπεραστεί το όριο των στροφών του εκτονωτή	2
Oil HiPress	Πρεσοστάτης Υψηλής πίεσης λαδιού	Όταν είναι ενεργοποιημένος ο πρεσοστάτης	3
Oil Pump Fail	Inverter Αντλίας Λαδιού	Μη ένδειξη Status του Inverter για πάνω από 5 δευτερόλεπτα ενώ έχει δοθεί εντολή να λειτουργήσει η αντλία λαδιού	3
Oil Pump Fault	Inverter Αντλίας Λαδιού	Ένδειξη Fault του Inverter	3
ORC Pump Warning	Inverter Αντλίας	Μη ένδειξη Status του Inverter για πάνω από 5 δευτερόλεπτα ενώ λειτουργεί η αντλία	4
Expander Reference Warning	Regen Algorithm	Όταν λειτουργεί η αντλία και το Reference του εκτονωτή είναι μικρότερο του 20%	2

Πίνακας 4.1 Πίνακας προβλεπόμενων σφαλμάτων

Για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις σφαλμάτων ανάβει το κίτρινο λαμπάκι warning στο I/O VI. Αντίστοιχα όταν πάψουν να υπάρχουν, το λαμπάκι αυτό σβήνει.

Για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις ανάβει το κόκκινο λαμπάκι Fault, το οποίο παραμένει ανοιχτό μέχρι ο χειριστής να πατήσει το κουμπί στον ηλεκτρολογικό πίνακα, το οποίο το κάνει reset από τον ηλεκτρολογικό πίνακα. Σκοπός είναι ο χειριστής να αναζητήσει το σφάλμα, το οποίο προέκυψε και μπορεί να βρει στις καταγεγραμμένες τιμές στο excel των σφαλμάτων. Τα σφάλματα αυτά είναι σοβαρά και κρίθηκε ότι η εγκατάσταση δεν θα έπρεπε να λειτουργεί όταν υπάρχει κάποιο από αυτά. Το excel αυτό είναι προϊόν του Data-Logging VI το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 4.6. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται και η προστασία της εγκατάστασης από μία ηλεκτρολογική αστοχία.

#### 4.2.3 Διαδικασίες διακοπής λειτουργίας

1. Για τις περιπτώσεις σφαλμάτων κατά τις οποίες ακολουθείται η διαδικασία 1 και στην περίπτωση που πατηθεί το Stop της αντλίας γίνονται τα εξής βήματα.
  - 1.1. Στην περίπτωση του πρώτου εκτονωτή κλείνει η αντλία και η γεννήτρια, ενώ μετά από 5 δευτερόλεπτα κλείνουν και ανεμιστήρες τους. Στην περίπτωση του δεύτερου εκτονωτή κλείνει μόνο η αντλία και ο ανεμιστήρας της.
  - 1.2. Ξεκινάει ταυτόχρονα η διαδικασία 2.
2. Για τις περιπτώσεις σφαλμάτων κατά τις οποίες ακολουθείται η διαδικασία 2, στην περίπτωση που πατηθεί το Stop του εκτονωτή και στην περίπτωση που ξεκινήσει η διαδικασία 1 γίνονται τα εξής βήματα.
  - 2.1. Ανοίγουν οι βαλβίδες bypass.
  - 2.2. Σε δεύτερο χρόνο, ο οποίος ορίστηκε στα 100ms κλείνει ο εκτονωτής και η βαλβίδα του.
  - 2.3. Στην περίπτωση του δεύτερου εκτονωτή κλείνει η γεννήτρια και μετά από 5 δευτερόλεπτα και ο ανεμιστήρας της.
3. Για τις περιπτώσεις σφαλμάτων κατά τις οποίες ακολουθείται η διαδικασία 3, στην περίπτωση που πατηθεί το Stop της αντλίας λαδιού και σε περίπτωση που κλείσει η βασική αντλία κλείνει η αντλία λαδιού.
4. Στην περίπτωση στην οποία ακολουθείται η διαδικασία 4, εμφανίζεται μήνυμα στην οθόνη. Ο χρήστης θα πρέπει να διερευνήσει το αίτιο πριν συνεχίσει σε πλήρη λειτουργία της εγκατάστασης.

#### 4.2.4 PID ελεγκτές για υπόψυξη και υπερθέρμανση

Όπως περιγράφηκε και νωρίτερα χρησιμοποιήθηκε PID ελεγκτής (Εικόνα 4.9) για τον έλεγχο της υπόψυξης πριν την αντλία. Η υπόψυξη στον αυτοματισμό που υλοποιήθηκε στο LabVIEW ορίστηκε ως η διαφορά της θερμοκρασία του κορεσμένου υγρού στην πίεση η οποία μετριέται από τον αισθητήρα πίεσης μείον τη θερμοκρασία η οποία μετριέται από τον αισθητήρα θερμοκρασίας.



Στόχος του PID είναι η διατήρηση της στους 5°C το οποίο επιτυγχάνει αποφυγή σπηλαίωσης της αντλίας. Ο ελεγκτής ξεκινάει 60s μετά την εκκίνηση της αντλίας και δίνει σήμα στον PID του εργαστηρίου την επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου του νερού στον εναλλάκτη για να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα με την προϋπόθεση ότι η παροχή του κρύου νερού παραμένει σταθερή. Ύστερα ο PID του εργαστηρίου αλλάζει τη θέση της τριοδούς βαλβίδας για να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί χρησιμοποιώντας το κουμπί manual να παρακάμψει τον έλεγχο αυτό. Τα κέρδη που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής είναι:

1.  $K_p$ : -0.050
2.  $T_i$ : 4.000
3.  $T_d$ : 0.005

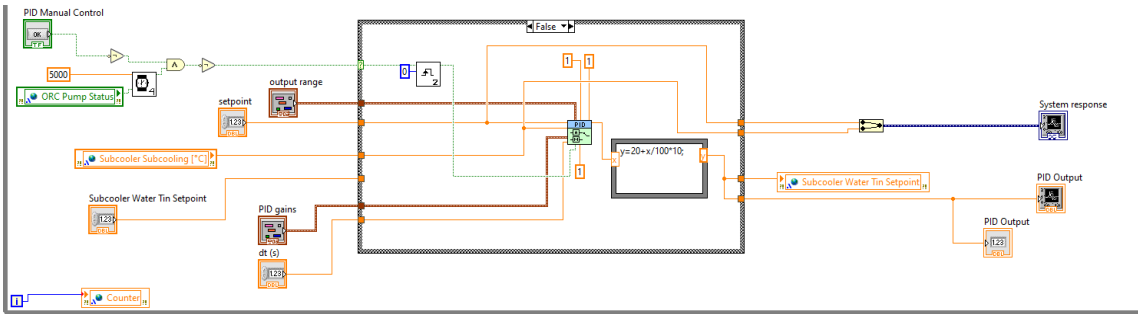
Τα κέρδη αυτά επιλέχθηκαν, ώστε να προλαβαίνει ο ελεγκτής της εγκατάστασης να ρυθμίζει την τριοδη βαλβίδα και η υπόψυξη να μην ξεφεύγει πολύ από το επιθυμητό. Φυσικά σε μια πραγματική εγκατάσταση στην οποία δεν θα υπάρχει ο περιορισμός του ελεγκτή της κεντρικής εγκατάστασης θα πρέπει οι σταθερές αυτές να ελεγχθούν και να βελτιστοποιηθούν, ανάλογα με τις συνθήκες του κύκλου. Ένας άλλος τρόπος ελέγχου της υπόψυξης είναι με την ρύθμιση της παροχής του κρύου νερού, εφόσον η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή. Επιπλέον, μπορεί να δημιουργηθεί έλεγχος και των δύο μεταβλητών, αλλά δεν συστήνεται λόγω πολυπλοκότητας του συστήματος. Άλλωστε, δεν υπάρχει υψηλή απαίτηση για τον έλεγχο της υπόψυξης.

Ο ίδιος αυτοματισμός υλοποιήθηκε και για την υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου πριν τον διαχωριστή λαδιού και μετά τον αναθερμαντή. Η υπερθέρμανση στον αυτοματισμό που υλοποιήθηκε στο LabVIEW ορίστηκε ως η διαφορά της θερμοκρασίας η οποία μετριέται από τον αισθητήρα θερμοκρασίας μείον τη θερμοκρασία του κορεσμένου αερίου στην πίεση η οποία μετριέται από τον αισθητήρα πίεσης.

Στόχος είναι η διατήρηση της υπερθέρμανσης στους 5°C, ώστε να μπορεί να γίνει πλήρως ο διαχωρισμός των δύο ρευστών. Τα κέρδη που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής είναι:

- 2.1  $K_p$ : 0.050
- 2.2  $T_i$ : 4.000
- 2.3  $T_d$ : 0.005

και επιλέχθηκαν όπως και τα κέρδη για τον έλεγχο της υπόψυξης. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται παρακάτω στο κεφάλαιο 4.8.1.



Εικόνα 4.9 Ο PID ελεγκτής στο Block Diagram

#### 4.2.5 Λοιποί αυτοματισμοί και ρύθμιση της εγκατάστασης

Πέρα από την ασφάλεια της εγκατάστασης υλοποιήθηκαν κάποιοι επιπρόσθετοι αυτοματισμοί και δόθηκαν δυνατότητες ρύθμισης κάποιων μεταβλητών στο χρήστη, ώστε να λειτουργεί ομαλά και υπό διαφορετικές συνθήκες. Οι αυτοματισμοί αυτοί είναι οι εξής:

1. Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι κατά την ηρεμία όλη η υγρή φάση του εργαζόμενου μέσου μαζευόταν στο δοχείο λαδιού κάτι το οποίο δεν επέτρεπε την εκκίνηση του κύκλου. Για τον λόγο αυτό τοποθετήθηκε αντίσταση η οποία θερμαίνει το λάδι. Αυτή ενεργοποιείται, όταν έχει πατηθεί το κουμπί ελέγχου, το οποίο παραμένει πατημένο μέχρι να ξαναπατηθεί και το λάδι έχει θερμοκρασία κάτω των 75°C. Αντίστροφα η αντίσταση σβήνει είτε όταν η θερμοκρασία του λαδιού ξεπεράσει τους 80°C, είτε όταν το κουμπί ελέγχου ξαναπατηθεί.
2. Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει τα εξής:
  - 3.1 Στροφές της αντλίας.
  - 3.2 Στροφές του εκτονωτή.
  - 3.3 Ανώτατο όριο στροφών εκτονωτή.
  - 3.4 Όριο Reference Expander για την εκκίνηση του.
  - 3.5 Στροφές της αντλίας λαδιού.
  - 3.6 Κατώτατη και ανώτατη θερμοκρασία λαδιού, για τις οποίες λειτουργεί η αντίσταση.
  - 3.7 Το setpoint, το χρόνο ανατροφοδότησης και τα κέρδη του PID.
  - 3.8 Τα setpoints όλων των εναλλακτών, τα οποία περιλαμβάνουν θερμοκρασία εισόδου, παροχή και διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του νερού. Στην πράξη θα πρέπει να γίνεται επιλογή των δύο εκ των τριών παραμέτρων για τη ρύθμιση καθώς δεν είναι όλες ανεξάρτητες μεταξύ τους.

### 4.3 Simulation VI

---

Για την επίτευξη ενός πρώτου ασφαλούς ελέγχου του Regen\_Algorithm VI κατασκευάστηκε το Simulation VI και το Algorithm VI. Το πρώτο αποτελεί προσομοίωση της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα είναι παρόμοιο με το I/O VI με τη μοναδική διαφορά ότι, όλα τα δεδομένα που διαβάζει από τις συσκευές και τα αισθητήρια έχουν μετατραπεί σε controls, δηλαδή οι τιμές τους δίνονται από τον χρήστη.

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελεγχθεί οποιαδήποτε κατάσταση προκύψει στην εγκατάσταση κατά τη λειτουργία της στο περιβάλλον του LabVIEW και να αναπτυχθεί κατάλληλος αυτοματισμός για πιο εύρυθμη λειτουργία. Επιπλέον μπορούν να αναπτυχθούν αυτοματισμοί για καταστάσεις οι οποίες μπορούν να προκύψουν από απειρικοψία του χρήστη της εγκατάστασης.

### 4.4 Algorithm VI

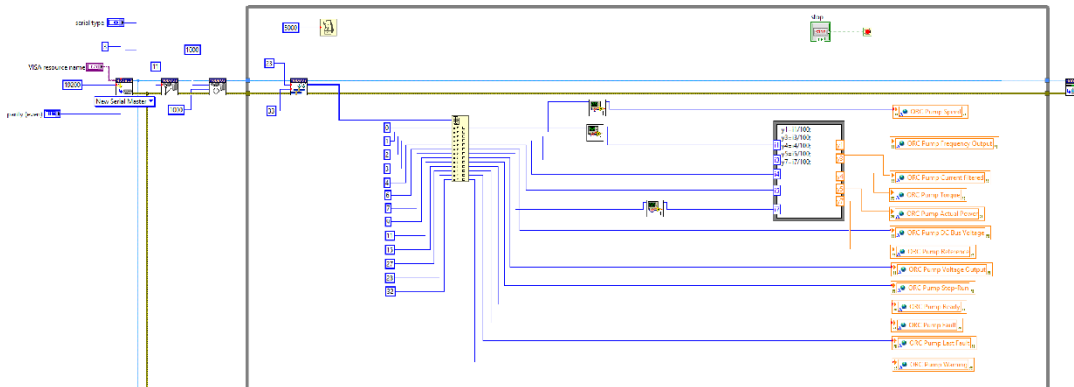
---

Όπως προαναφέρθηκε βασικό στοιχείο για να ελεγχθούν οι αυτοματισμοί του Regen\_Algorithm VI είναι το Algorithm VI. Η αρχική υλοποίηση των αυτοματισμών έγινε στο Algorithm VI, ελέγχθηκαν μέσω του Simulation και μετά αντιγράφηκαν στο Regen\_Algorithm VI, εφόσον είχαν την επιθυμητή λειτουργία.

Σκοπός είναι η ανάπτυξη αυτοματισμών να γίνεται σε ένα ξεχωριστό VI κρατώντας παράλληλα μια λειτουργική του έκδοση, ώστε παράλληλα να μπορεί να λειτουργεί η εγκατάσταση και να γίνονται πειράματα σε αυτή.

## 4.5 Modbus VI

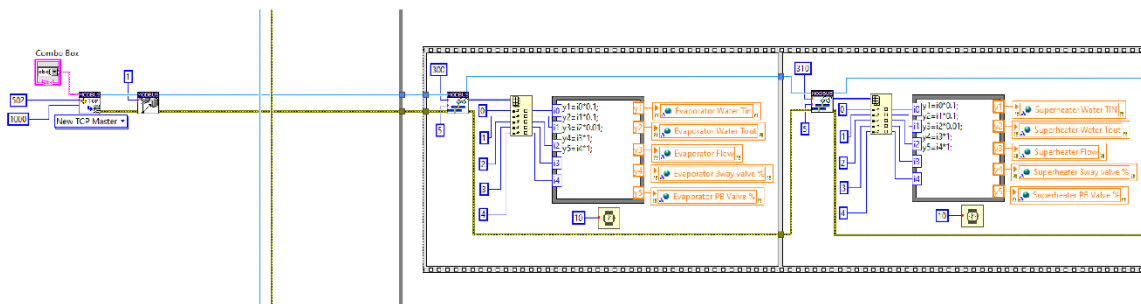
Όπως προαναφέρθηκε το LabVIEW περιέχει στις βιβλιοθήκες του VIs για την επικοινωνία μέσω Modbus. Με τη χρήση των συγκεκριμένων VI κατέστη δυνατή η επικοινωνία του κεντρικού επεξεργαστή με τους inverter και τις συσκευές Ducati, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.10.



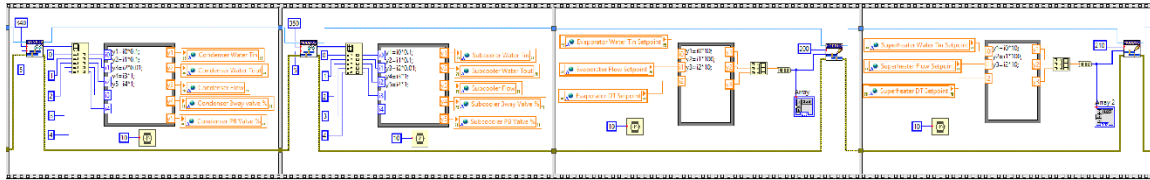
Εικόνα 4.10 Modbus VI read function in block diagram

Συγκεκριμένα στα αριστερά φαίνεται το Create Serial Master VI, το οποίο υλοποιεί τον Client, ο οποίος δίνει τις εντολές. Οι εντολές ακολουθούν την γαλάζια γραμμή. Επόμενο στάδιο είναι να οριστεί σε ποια συσκευή πρέπει να πάει η εντολή, το οποίο υλοποιείται με το Set Unit ID VI το οποίο φαίνεται αμέσως δεξιά του Client. Έπειτα χρειάζεται να διευκρινιστεί ποια είναι αυτή η εντολή. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν τα Read Holding Registers VI και Write Multiple Registers VI, τα οποία διαβάζουν και γράφουν registers αντίστοιχα. Στο τέλος η εντολή καταλήγει στο Shutdown VI το οποίο τερματίζει την επικοινωνία.

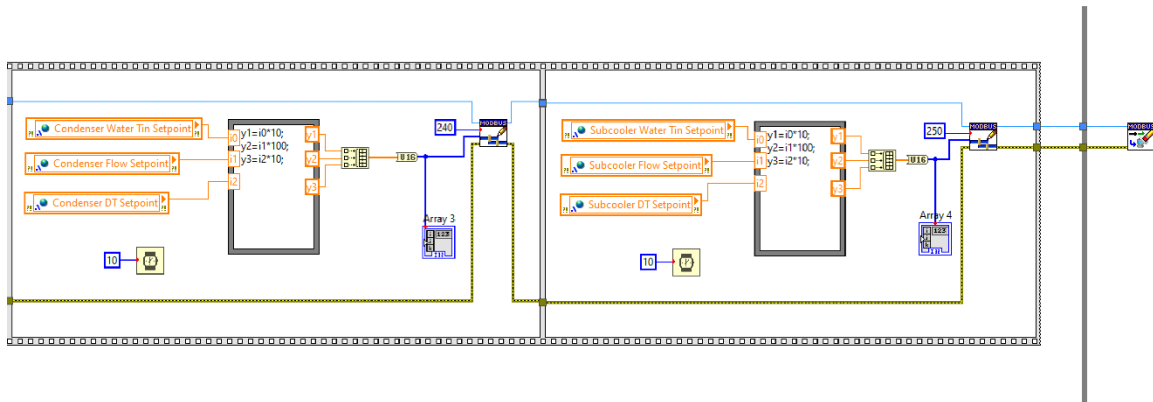
Ίδια λογική με την εικόνα 4.10 ακολουθείται και όταν χρειάζεται να γραφτούν μεταβλητές, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11γ. Συγκεκριμένα, η εντολή χρησιμοποιήθηκε για την ρύθμιση της θερμοκρασίας και της παροχής των κεντρικών παροχών νερού. Λόγω καθυστερήσεων του κεντρικού συστήματος και για να αποφευχθούν σφάλματα οι εντολές δίνονται σε σειρά. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε «Flat Sequence».



Εικόνα 4.11α Modbus VI flat sequence για την ανάγνωση τιμών από τον ατμοποιητή και τον αναθερμαντή



Εικόνα 4.11β Modbus VI flat sequence για την ανάγνωση τιμών από τον συμπιεστή, τον εναλλάκτη υπόψυξης και αποστολή τιμών για τον ατμοποιητή και των εναλλάκτη υπόψυξης.



Εικόνα 4.11γ Modbus VI flat sequence για την ανάγνωση τιμών αποστολή τιμών για τον συμπιεστή και τον εναλλάκτη υπόψυξης

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι επικοινωνίες που γίνονται κατά την λειτουργία της εγκατάστασης, ενώ στο παράρτημα Α παρατίθεται η αντιστοιχία των μεταβλητών με τον αριθμό Modbus τους.

Client Type	Unit	Unit ID	Request	Total Registers	No. of Holding Registers
Serial	Inverter Αντλίας	11	Read (03)	13	24-28, 30,31,33,35,39, 54,55,59
Serial	Inverter Εκτονωτή	12	Read (03)	17	110,340-347, 400,408
Serial	Ducati Αντλίας	21	Read (03)	8	2,3,16,17, 24,25,32,32
Serial	Ducati Εκτονωτή	22	Read (03)	8	2,3,16,17, 24,25,32,32
TCP	Δίκτυο εργαστηρίου	IP Address	Read (03)/Write (16)	20/12	Read: 300-304, 310-314, 340-344, 350-354 Write: 200-202, 210-212, 240-242, 250-252
Serial	Coriolis πριν τον εκτονωτή	33	Read (03)	6	1-7
Serial	Coriolis μετά τον εκτονωτή	32	Read (03)	6	1-7

Πίνακας 4.2 Πίνακας επικοινωνιών Modbus

## 4.6 DataLogging VI

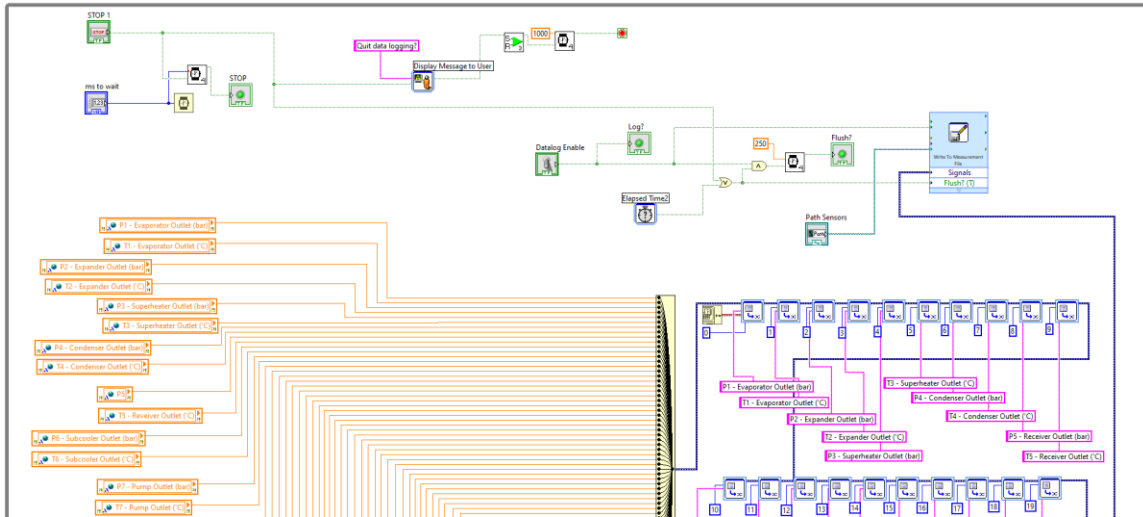
---

Το DataLogging VI καταγράφει τις τιμές όλων των μεταβλητών και με κατάλληλη εντολή δημιουργεί τέσσερα αρχεία excel στον σκληρό δίσκο του συστήματος στα οποία αποθηκεύει τις καταγεγραμμένες τιμές. Τα τέσσερα αυτά αρχεία είναι τα εξής:

1. Sensors, το οποίο περιέχει όλες τις παροχές θερμοκρασίες, πιέσεις, του εργαζόμενου μέσου και του νερού, τις ενθαλπίες σε κάθε σημείο του κύκλου, τα setpoints για το νερό, τα υπολογιζόμενα μεγέθη Subcooler Subcooling, Evaporator Superheating, Superheater Superheating και τις πραγματικές στροφές, την πραγματική ροπή, την ενεργή ισχύ, τον παράγοντα ισχύος της αντλίας και του εκτονωτή και τις τιμές των Coriolis.
2. Electrical, το οποίο περιέχει όλα τα ρεύματα, τις τάσεις και τις πραγματικές συχνότητες της βασικής αντλίας και του εκτονωτή.
3. DI-O, το οποίο περιέχει όλες τις δυαδικές μεταβλητές και τις εντολές για τα reference των αντλιών και του εκτονωτή.
4. PIDlogs, το οποίο περιέχει τα setpoints, τις σταθερές των PID, την έξοδό τους και την μεταβλητή ελέγχου

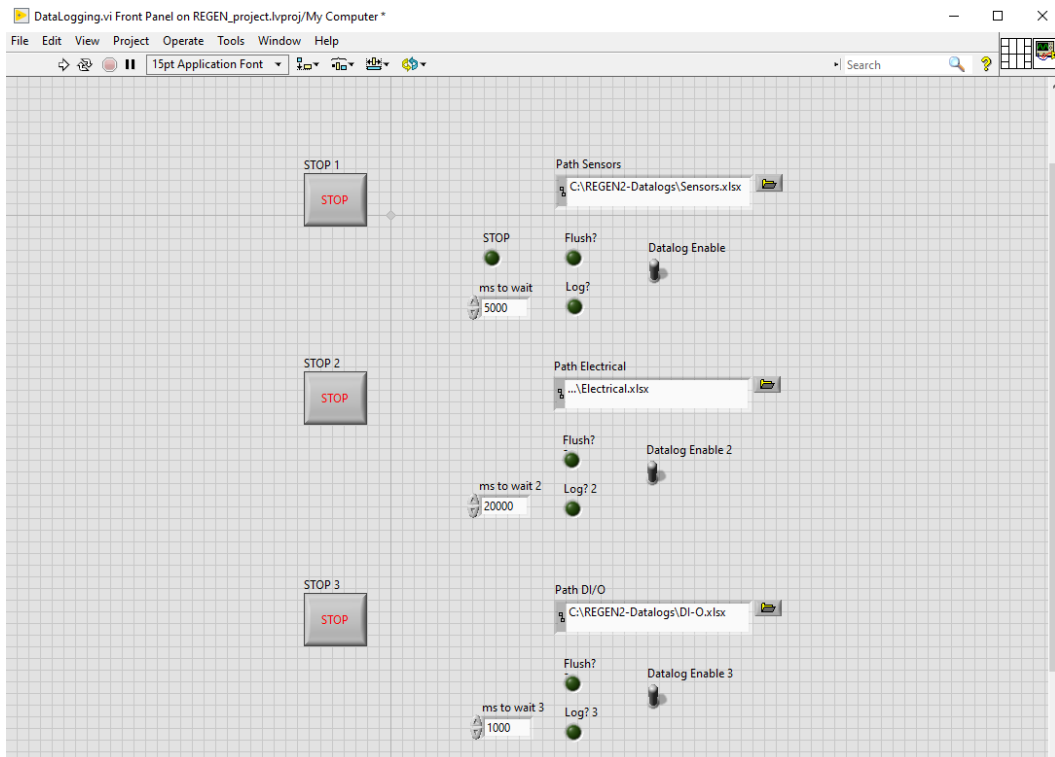
Για το πρώτο αρχείο η καταγραφή γίνεται ανά 5s, για το δεύτερο ανά 20s, ενώ για το τρίτο και το τέταρτο ανά 1s. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει αυτούς τους χρόνους.

Για την υλοποίηση του VI χρειάστηκε το Express VI “Write to Measurement File”, το οποίο καταγράφει τα δεδομένα ένα ανά στήλη, ενώ χρησιμοποιεί την πρώτη στήλη για να καταγράψει την πραγματική ημερομηνία με ακρίβεια (ms) στην οποία καταγράφηκαν οι τιμές. Επιλέχτηκε η επιλογή της καταγραφής σε excel καθώς σε μετέπειτα στάδιο τα δεδομένα αυτά θα τεθούν προς επεξεργασία και το excel ενδείκνυται για αυτό. Μάλιστα η επεξεργασία αυτή μπορεί να γίνει και μέσω κώδικα προγραμματισμού ο οποίος θα διαβάζει το αρχείο και θα παίρνει συγκεκριμένα δεδομένα. Επιπλέον μέσω του Express VI “Set Dynamic Data Attributes” δίνονται αυτόματα τίτλοι στην κάθε στήλη του αρχείου excel.



Εικόνα 4.12 DataLogging VI μέρος του block diagram

Τέλος, το DataLogging VI δημιουργεί τα αρχεία Excel έπειτα από πέντε λεπτά και μετά ανά πέντε λεπτά τα συμπληρώνει αποθηκεύοντας τις επιπλέον τιμές ή έχει τη δυνατότητα ο χρήστης πατώντας το αντίστοιχο STOP, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.13. Όταν αυτό πατηθεί εμφανίζεται το μήνυμα «Quit data logging?». Αν ο χρήστης πατήσει «Yes», τότε σταματάει το συγκεκριμένο while loop, ενώ αν πατήσει «No», το while loop συνεχίζεται μέχρι να ξαναπατηθεί το STOP, οπότε ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Μέχρι να σταματήσει το while loop οι τιμές καταγράφονται στο ίδιο αρχείο excel.



Εικόνα 4.13 DataLogging VI front panel



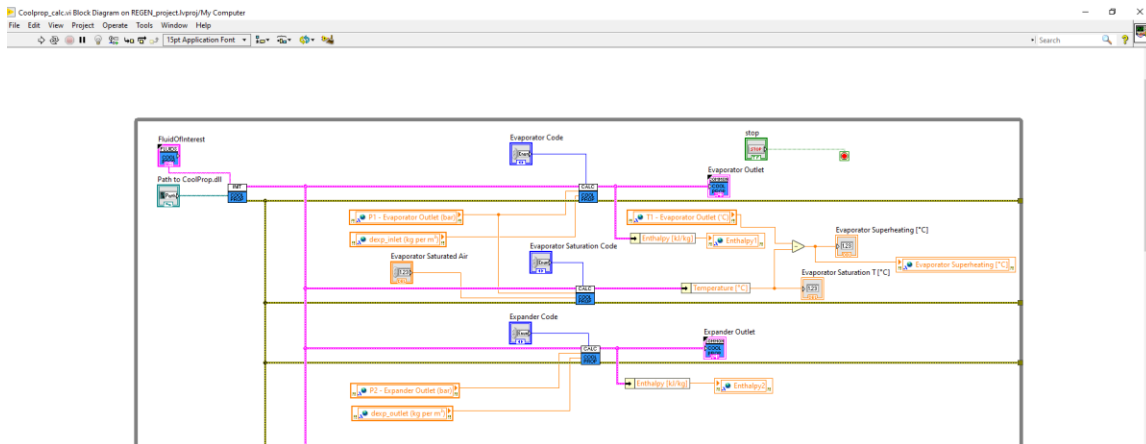
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την υλοποίηση του συγκεκριμένου VI, υπήρχε πρόβλημα καταγραφής πολλαπλών αρχείων, όταν αυτά βρίσκονταν στο ίδιο while loop. Η λύση που βρέθηκε ήταν να λειτουργούν τρία ξεχωριστά while loops, ένα για κάθε αρχείο. Η λύση αυτή έχει το πρόβλημα ότι εφόσον επιθυμείτε η καταγραφή ενός αρχείου, χρειάζεται να πατηθεί το αντίστοιχο STOP, αντί για ένα STOP για όλα όπως ήταν και ο αρχικός στόχος.

#### 4.7 CoolProp\_calc VI

Το CoolProp\_calc VI είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό όλων των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του κύκλου. Για να το πετύχει αυτό χρησιμοποιεί τα functions του CoolProp, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.6 και όπως φαίνεται στην εικόνα 4.14. Μερικά από τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

1. Ποιότητα
2. Θερμοκρασία
3. Πίεση
4. Πυκνότητα
5. Ενθαλπία
6. Εντροπία

Σε επόμενο χρόνο υπολογίζονται η υπερθέρμανση στον ατμοποιητή, στον αναθερμαντή και η υπόψυξη στον εναλλάκτη υπόψυξης. Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται με βάση την πίεση από την οποία για κορεσμένο αέριο και υγρό αντίστοιχα υπολογίζεται η θερμοκρασία κορεσμού και συγκρίνεται με την θερμοκρασία του κύκλου. Τα μεγέθη αυτά είναι πάντα θετικά και έτσι λαμβάνεται υπό όψη η απόλυτη τιμή της σύγκρισης.

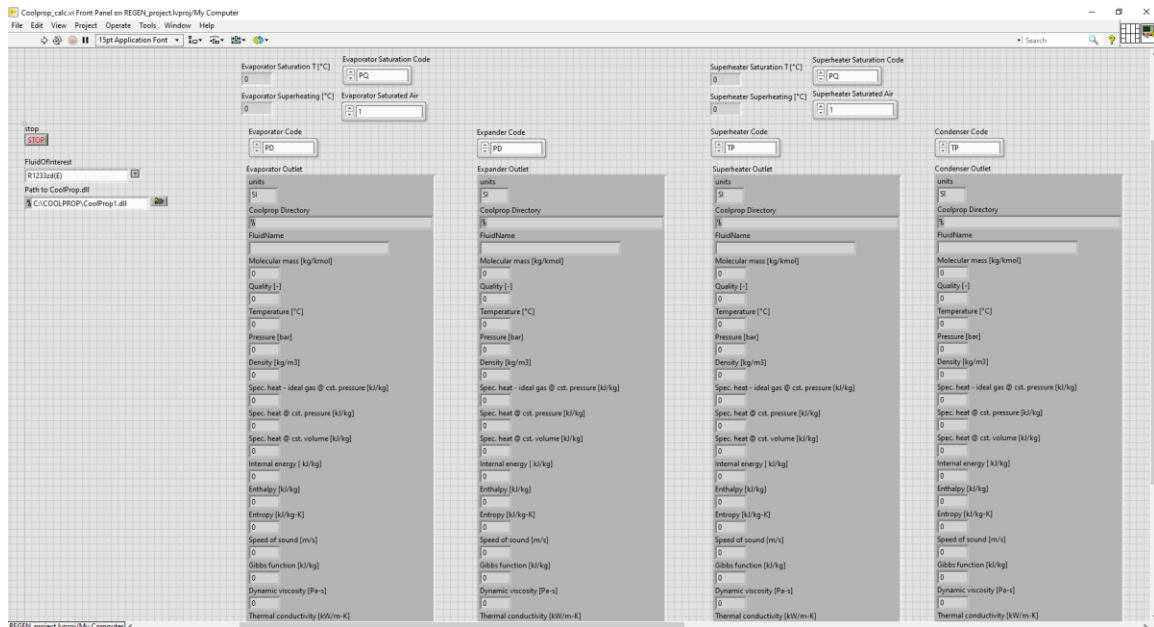


Εικόνα 4.14 CoolProp\_calc VI μέρος του Block Diagram

Συγκεκριμένα, η διαδικασία ξεκινάει χρησιμοποιώντας το Initialize\_coolprop.vi και έπειτα πηγαίνοντας στο Calculate\_coolprop.vi το οποίο με τον κατάλληλο συνδυασμό

μεταβλητών υπολογίζει τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά. Οι επιλογές έχουν προκαθοριστεί με βάση τον κύκλο, ωστόσο είναι δυνατή η αλλαγή τους από τον χρήστη.

Ένα σφάλμα το οποίο εντοπίστηκε κατά την υλοποίηση του συγκεκριμένου VI είναι το σφάλμα στον υπολογισμό της θερμοκρασίας πριν τον εκτονωτή. Αρχικά, η τιμή της θερμοκρασίας υπολογιζόταν από το CoolProp με βάση την πυκνότητα και την πίεση. Παρ' όλα αυτά στη διφασική περιοχή του ρευστού η πίεση και η θερμοκρασία είναι εξαρτώμενα μεγέθη και μικρές αλλαγές της πίεσης συνεπάγονται μεγάλες αλλαγές στη θερμοκρασία η οποία κατέληγε να είναι ασταθής και με πολύ μεγάλες διακυμάνσεις κατά την εκκίνηση του κύκλου. Συνεπώς, ο υπολογισμός της υπερθέρμανσης στο σημείο ήταν εσφαλμένος. Το σφάλμα διορθώθηκε λαμβάνοντας υπό όψη την τιμή του αισθητηρίου θερμοκρασίας.



Εικόνα 4.15 DataLogging VI μέρος του front panel

Πέρα από τη δυνατότητα υπολογισμού του κύκλου και όπως φαίνεται στην εικόνα 4.15, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το ρευστό μέσω drop down list και να αλλάξει το path στο οποίο βρίσκεται το αρχείο CoolProp.dll, το οποίο είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του CoolProp.

## 4.8 Δοκιμαστική λειτουργία της εγκατάστασης και καθορισμός άγνωστων παραμέτρων

Όπως σε κάθε ανάπτυξη αλγορίθμου έτσι και εδώ χρειάστηκε να δοκιμαστεί στην εγκατάσταση για να εξακριβωθεί η σωστή λειτουργία του. Έτσι λοιπόν ακολουθήθηκε η διαδικασία η οποία περιγράφεται στην ενότητα 3.2 για κάθε αυτοματισμό αλλά και για όλο τον αλγόριθμο.

Αρχικά, λοιπόν έγινε δοκιμή στο Simulation VI, ώστε να διαπιστωθεί ότι οι αυτοματισμοί λειτουργούν με τον τρόπο που σχεδιάστηκαν. Δηλαδή δοκιμάστηκε η κανονική του λειτουργία και έπειτα οι περιπτώσεις σφαλμάτων. Π.χ. σε περίπτωση που έκλεινε ο διακόπτης του status της αντλίας και μετά από πέντε δευτερόλεπτα, ο αλγόριθμος έπρεπε να εμφανίζει το αντίστοιχο μήνυμα και να ξεκινούσε τις διαδικασίες διακοπής λειτουργίας, όπως αυτές προβλέπονται και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.2.3.

Το επόμενο βήμα ήταν ο αλγόριθμος να δοκιμαστεί σε άλογη χρήση. Π.χ. ο χρήστης να ξεκινάει την αντλία λαδιού πριν ξεκινήσει το κύκλωμα. Το βήμα αυτό ήταν απαραίτητο, ώστε να βρεθούν όλα τα πιθανά σφάλματα και να προστατευθεί η εγκατάσταση.

Στη συνέχεια δοκιμάζονταν αλλαγές στο σύστημα οι οποίες δεν θα έπρεπε να έχουν λόγο να γίνουν. Π.χ. απότομη αύξηση των στροφών του εκτονωτή. Οι δοκιμές αυτές έγιναν για να προστατευθεί η εγκατάσταση από σφάλματα των μετρητικών οργάνων ή από σφάλματα τα οποία δεν έχουν προβλεφθεί, όπως π.χ. αστοχία του εμβόλου της αντλίας, διαρροές κ.α. Για αυτό το βήμα είναι απαραίτητο να υπάρχει κάποιος τρόπος για simulation της εγκατάστασης καθώς δεν μπορεί να γίνει δοκιμή στην πραγματική πέρα από όταν προκύψει κάποιο πρόβλημα το οποίο δεν είχε προβλεφθεί. Κάτι τέτοιο μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην εγκατάσταση και είναι ένας επιπλέον λόγος να εφαρμόζεται ο παρόν τρόπος ανάπτυξης αλγορίθμων.

Εφόσον όλα αυτά τα βήματα έγιναν επιτυχώς ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε στην εγκατάσταση. Ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα όπως και για το Simulation πέρα το τελευταίο το οποίο είναι αδύνατο στην πραγματική εγκατάσταση.

Μετά από όλες τις δοκιμές διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί όπως περιγράφεται και διασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία της εγκατάστασης με ασφάλεια. Συνεπώς, είναι δυνατή η εκκίνηση πειραμάτων στην εγκατάσταση η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως συμβατικός κύκλος ORC ή PE-ORC ή TFC, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν.

Για να γίνει πιο άμεση η διεξαγωγή πειραμάτων κρίθηκε σκόπιμος ο καθορισμός των αγνώστων παραμέτρων με στόχο τον άμεσο υπολογισμό του παραγόμενου μηχανικού έργου. Άλλωστε όπως περιγράφηκε στην εισαγωγή ο τελικός στόχος της εγκατάστασης είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτή είναι συμφέρουσα ενεργειακά και οικονομικά για χαμηλής θερμοκρασίας WHR. Συνεπώς, έγινε καθορισμός των σταθερών των PID τόσο για

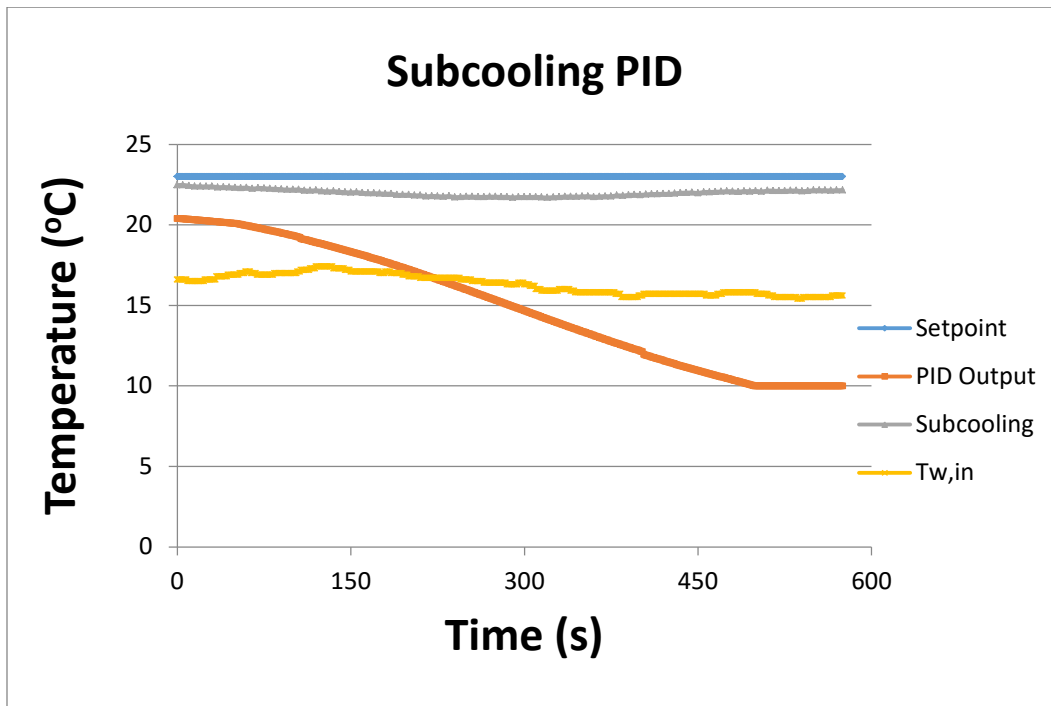
την υπόψυξη, όσο και για την υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου, ώστε η εγκατάσταση να λειτουργεί σωστά. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ένα πειραματικό μοντέλο μηχανικών απωλειών του εκτονωτή όπως περιγράφεται στο 4.8.2.

#### 4.8.1 Προσδιορισμός των σταθερών των ελεγκτών PID

Για τον προσδιορισμό των σταθερών του PID, γνωστό και ως commissioning του PID, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι στη βιβλιογραφία, ανάλογα με το αν είναι γνωστή η συμπεριφορά του συστήματος ή όχι. Στην περίπτωση ενός ORC οι σχέσεις οι οποίες συνδέουν τα μεγέθη δεν είναι γραμμικές και πολλές φορές είναι άγνωστες. Σε τέτοιες περιπτώσεις μια από τις πιο γνωστές μεθόδους είναι αυτή των Ziegler – Nichols, στην οποία γίνεται επαναληπτική διαδικασία, ώστε να προσδιοριστεί η σταθερά  $K_{zn}$  η οποία οδηγεί το σύστημα σε ευσταθή ταλαντωτική απόκριση με περίοδο  $T_{zn}$ . Έτσι για έναν PID ελεγκτή οι σταθερές θα ορίζονται ως:

1.  $K_p$ :  $0.6 K_{zn}$
2.  $T_i$ :  $0.5 T_{zn}$
3.  $T_d$ :  $0.125 T_{zn}$

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον προσδιορισμό των σταθερών των PID της εγκατάστασης. Τα μεγέθη τα οποία ελέγχουν οι PID ελεγκτές είναι η θερμοκρασία εισόδου του νερού στον αναθερμαντή και στον εναλλάκτη υπόψυξης αντίστοιχα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε αδυναμία του ελεγκτή του υδραυλικού συστήματος του εργαστηρίου να ρυθμίσει την τρίοδη βαλβίδα έγκαιρα, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας εισόδου στους εναλλάκτες, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε ελαφρώς μεγαλύτερη ολοκληρωτική σταθερά  $T_i$  και αρκετά μικρότερη διαφορική σταθερά  $T_d$ . Στη συνέχεια παρατηρήθηκε καλύτερη απόκριση του συστήματος, ωστόσο ο σαφής προσδιορισμός των σταθερών για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω. Άλλωστε ο προσδιορισμός ο οποίος έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε με σκοπό την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης και όχι της καλύτερης δυνατής απόκρισης του συστήματος. Επιπλέον, θα ήταν καλό να γίνει διερεύνηση και του ελέγχου της υπερθέρμανσης και της υπόψυξης μέσω της παροχής του νερού στους εναλλάκτες, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία.



Εικόνα 4.16 Διάγραμμα λειτουργίας PID σε πραγματικό χρόνο

#### 4.8.2 Μοντέλο μηχανικών απωλειών εκτονωτή

Για να γίνει calibration του εκτονωτή υπολογίστηκε το μοντέλο των μηχανικών απωλειών του. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό του μοντέλου μετρήθηκε η ροπή του εκτονωτή για συγκεκριμένες στροφές υπό μηδενικό φορτίο. Με τον τρόπο αυτό το έργο του εκτονωτή είναι μηδενικό και συνεπώς η ροπή η οποία μετριέται αποτελεί τη ροπή για την υπερνίκηση των μηχανικών απωλειών του εκτονωτή. Το μοντέλο των απωλειών είναι γραμμικό, όπως αναμενόταν σύμφωνα με τις έρευνες [33,34] και αποτυπώνεται από την παρακάτω εξίσωση:

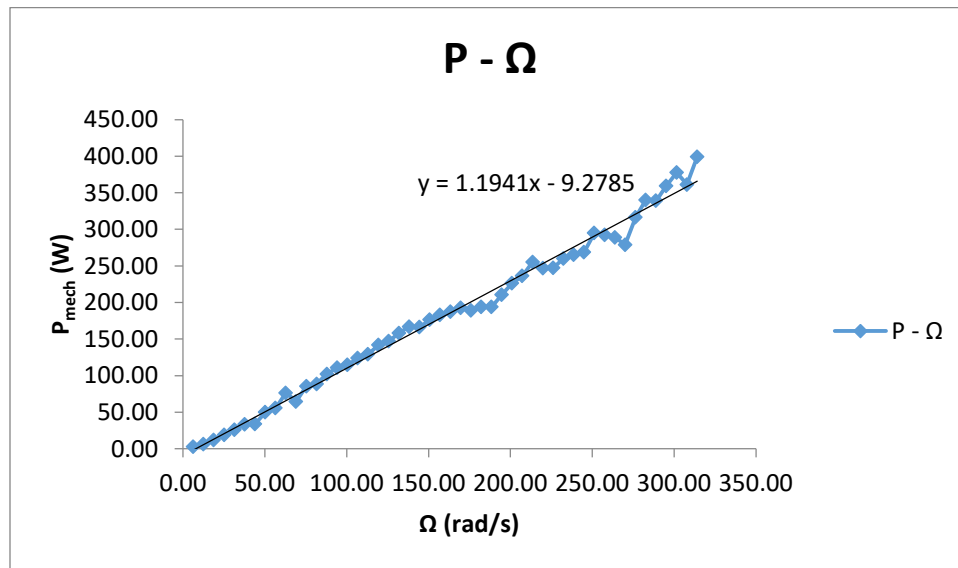
$$P_{mechanical,loss} = 1.1941\Omega - 9.2785 (W)$$

Για τον υπολογισμό της εξίσωσης του μοντέλου λήφθηκαν υπ' όψιν μετρήσεις ανά 60 RPM από τα 60 RPM έως τα 3000 RPM. Επιπλέον, για κάθε γωνιακή ταχύτητα λήφθηκαν υπ' όψιν τουλάχιστον πέντε (5) μετρήσεις και ως σημείο λήφθηκε ο μέσος όρος της μετρούμενης ροπής, για τον περιορισμό του θορύβου και του τυχαίου σφάλματος. Επιπλέον, για τον υπολογισμό της ισχύος των απωλειών χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$P_{mechanical,loss} = T \cdot \Omega$$

Είναι φανερό ότι για πολύ μικρές στροφές ή συγκεκριμένα για  $\Omega < 7.771$  η παραπάνω εξίσωση επιστρέφει αρνητικές απώλειες και συνεπώς δεν ισχύει για αυτές. Παρ' όλα αυτά

όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, η εξίσωση είναι αρκετά ικανοποιητική για όλο το εύρος των στροφών πάνω από αυτό.



Εικόνα 4.17 Διάγραμμα μηχανικών απωλειών του εκτονωτή σε συνάρτηση των στροφών του.

Γνωρίζοντας τις μηχανικές απώλειες του εκτονωτή είναι πιο εύκολο να προσδιοριστούν και οι υπόλοιπες απώλειες του κατά την λειτουργία του με φορτίο. Αυτές όμως εξαρτώνται τόσο από το εργαζόμενο μέσο, όσο και από τις συνθήκες θερμοκρασίας και λόγου πίεσης και δεν μελετώνται στην παρούσα εργασία.

Παρ' όλα αυτά για λόγους πληρότητας είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι φαινόμενα υπο-ή υπερεκτόνωσης δημιουργούν απώλειες στον εκτονωτή [35,36], συνεπώς η εγκατάσταση είναι καλό να λειτουργεί με λόγο πίεσης ίσο με τον γεωμετρικό λόγο πίεσης ο οποίος προκύπτει από τη γεωμετρία του εκτονωτή.

Είναι επιπλέον γνωστό οι μεγαλύτερες απώλειες ενός σπειροειδή εκτονωτή οφείλονται στις διαρροές του εργαζόμενου μέσου, οι οποίες εξαρτώνται αναλογικά από το κενό μεταξύ των μερών του εκτονωτή και αντιστρόφως ανάλογα της γωνιακής του ταχύτητας [36].

Είναι φανερό λοιπόν ότι πρέπει να γίνει ένας χάρτης των απωλειών αυτών, ώστε να δημιουργηθεί κατάλληλος αυτόματος έλεγχος ο οποίος θα επιτρέπει στην εγκατάσταση να λειτουργεί μόνιμα με ένα βέλτιστο τρόπο, δηλαδή με το μέγιστο δυνατό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης ή με τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

## 5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων

Στην υπ' όψιν εργασία αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος λειτουργίας μιας πειραματικής εγκατάστασης ORC η οποία δύναται να λειτουργεί με το εργαζόμενο στη διφασική περιοχή κατά την εκτόνωσή του. Ολοκληρώνοντας, λοιπόν, αυτή την εργασία γίνεται μια ομαδοποίηση όλων των συμπερασμάτων τα οποία προέκυψαν κατά τη μελέτη και στη συνέχεια αναφέρονται προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

1. Κατ' αρχάς αποδείχθηκε δυνατή η ανάπτυξη του αλγορίθμου στο περιβάλλον του LabVIEW, καθώς η εγκατάσταση λειτούργησε κανονικά και χωρίς προβλήματα.
2. Η μέθοδος ανάπτυξης η οποία προτάθηκε για την ασφαλή ανάπτυξη του αλγορίθμου είχε το επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς απέτρεψε πολλά σφάλματα κατά τον προγραμματισμό. Επιπλέον, διευκόλυνε την ανάπτυξη, αφού η δοκιμή του αλγορίθμου γινόταν απευθείας στον υπολογιστή.
3. Τα πέντε Sub-VIs τα οποία δημιουργήθηκαν μαζί με τα εργαλεία τα οποία προσφέρονται έτοιμα από το LabVIEW ήταν αρκετά για οποιονδήποτε πιο περίπλοκο αυτοματισμό ο οποίος υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.
4. Πολλές μεταβλητές οι οποίες μεταφέρονται μέσω Modbus γράφονται σε σύστημα two compliment. Χρειάστηκε να αναπτυχθεί αλγόριθμος ο οποίος να αντιστοιχεί τις μεταβλητές αυτές στο δυαδικό σύστημα, ώστε να μπορεί η αντίστοιχη συνάρτηση του LabVIEW να τις διαβάζει σωστά. Αυτό ήταν και το πέμπτο και τελευταίο Sub-VI το οποίο χρησιμοποιήθηκε.
5. Αποδείχθηκε δυνατή η επέκταση του αλγορίθμου λειτουργίας καθώς στην αρχή είχε σχεδιαστεί για να λειτουργεί η εγκατάσταση με έναν εκτονωτή. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκε δεύτερη γεννήτρια με την προοπτική να εγκατασταθεί και δεύτερος εκτονωτής συνδεδεμένος σε αυτή, για τον οποίο υλοποιήθηκε ελαφρώς διαφορετική διαδικασία εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας στο ίδιο όμως VI με τον πρώτο και με δυνατότητα του χρήστη να εναλλάσσει το με ποιον εκτονωτή θα λειτουργήσει η εγκατάσταση.
6. Παρατηρήθηκε ότι για την εκκίνηση του κύκλου απαιτείται θέρμανση του δοχείου του λαδιού, ώστε η υγρή φάση του εργαζόμενου μέσου η οποία συσσωρεύεται εκεί κατά την ηρεμία του συστήματος να εξατμιστεί και να πάει στο τροφοδοτικό δοχείο.
7. Για την βελτιστοποίηση της εγκατάστασης θα ήταν καλό να μπορεί να γίνει πιο γρήγορη ρύθμιση των τριοδών βαλβίδων οι οποίες ρυθμίζουν τη θερμοκρασία του νερού το οποίο εισέρχεται στους εναλλάκτες, ώστε να μπορεί να βελτιστοποιηθεί η ρύθμιση των ελεγκτών PID, δηλαδή ο ορισμός των σταθερών τους, χωρίς κάποιον περιορισμό.

Όπως αναλύθηκε σε μια πειραματική εγκατάσταση PE-ORC ή TFC ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της είναι ο εκτονωτής. Το κατά πόσο είναι συμφέρουσα εξαρτάται άμεσα από την αδιαβατικότητα του. Επιπλέον, η μαθηματική μοντελοποίηση των περίπλοκων φαινομένων τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά την εκτόνωση διφασικού μέσου είναι δύσκολη και γι' αυτό η επιστημονική κοινότητα έχει επικεντρωθεί στην εκτέλεση πειραματικών μελετών. Συμπερασματικά, εγκαταστάθηκε δεύτερος εκτονωτής και συνδέθηκε με δεύτερη γεννήτρια, ώστε όταν ένας από τους δύο απεγκαθησάτε για λόγους συντήρησης ή και αντικατάστασης, να μπορούν να γίνουν πειράματα με τον άλλο. Το ίδιο προτείνεται για οποιαδήποτε πειραματική εγκατάσταση η οποία έχει ως αντικείμενο μελέτης ένα PE-ORC ή ένα TFC.

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

---

Από τα συμπεράσματα της προηγούμενης ενότητας καθώς και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία έγινε στην αρχή της εργασίας είναι φανερό ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο για περαιτέρω έρευνα τόσο για τον συγκεκριμένο θερμοδυναμικό κύκλο, όσο και για τον αυτοματισμό μιας τέτοιας εγκατάστασης. Κάποιες κατευθυντήριες γραμμές θα μπορούσαν να είναι:

1. Ανάπτυξη ελέγχου για τη βέλτιστη δυνατή λειτουργία της εγκατάστασης με σταθερή τη θερμοκρασία της θερμής πηγής και του ψυκτικού μέσου.
2. Σύγκριση διαφορετικών μοντέλων ελέγχου του κύκλου (π.χ. με στρατηγικές τύπου Model Predictive Control) σε πραγματικό χρόνο.
3. Μελέτη της εγκατάστασης εκτός του ονομαστικού σημείου λειτουργίας και για μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες. Σχεδίαση χαρτών λειτουργίας.
4. Δοκιμή της εγκατάστασης σε πραγματικές εφαρμογές και σύγκριση με διαφορετικών ειδών κύκλων (π.χ. TFC ή συμβατικό ORC).
5. Τεχνοοικονομική ανάλυση μιας τέτοιας εφαρμογής.



## 6. Συντομογραφίες

ORC	→	Organic Rankine Cycle
WHR	→	Waste Heat Recovery
TFC	→	Trilateral Flash Cycle
PE-ORC	→	Partially Evaporated ORC
PLC	→	Programmable Logic Controller
APC	→	Advanced Predictive Control
MPC	→	Model Predictive Control
DMC	→	Dynamic Matrix Control
VI	→	Virtual Instrument
SCADA	→	Supervisory Control And Data Acquisition
DCS	→	Distributed Control System
HMI	→	Human Machine Interface
SR	→	Set Reset Flip Flop
UDP	→	User Datagram Protocol
TCP	→	Transmission Control Protocol
FIFO	→	First In First Out
ID	→	Αριθμός ταυτότητας
CMD	→	Command
POE	→	Polyester
GWP	→	Global Warming Potential
VFD	→	Variable Frequency Drives
PDU	→	Protocol Data Unit
PIBCVC	→	Pressure Independent Balance Control Valve
RTD	→	Resistance Temperature Detector

## 7. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά της αντλίας της εγκατάστασης.....	21
Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά του κινητήρα της αντλίας.....	23
Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά του ατμοποιητή.....	24
Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικά του εκτονωτή.....	27
Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά της γεννήτριας.....	28
Πίνακας 2.6 Χαρακτηριστικά του αναθερμαντή.....	29
Πίνακας 2.7 Χαρακτηριστικά της αντλίας λαδιού.....	30
Πίνακας 2.8 Χαρακτηριστικά του συμπυκνωτή.....	31
Πίνακας 2.9 Χαρακτηριστικά του εναλλάκτη υπόψυξης.....	31
Πίνακας 2.10 Χαρακτηριστικά των βαλβίδων της εγκατάστασης.....	32
Πίνακας 2.11 Χαρακτηριστικά των πρεσοστατών της εγκατάστασης.....	33
Πίνακας 2.12 Χαρακτηριστικά του επεξεργαστή της εγκατάστασης.....	36
Πίνακας 2.13 Χαρακτηριστικά ψηφιακών καρτών σημάτων εισόδων και εξόδων.....	37
Πίνακας 2.14 Χαρακτηριστικά αναλογικών καρτών σημάτων εισόδων και εξόδων.....	38
Πίνακας 2.15 Χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών της αντλίας.....	40
Πίνακας 2.16 Χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών της γεννήτριας.....	41
Πίνακας 2.17 Χαρακτηριστικά του ρυθμιστή στροφών της αντλίας λαδιού.....	41
Πίνακας 2.18 Βασικά χαρακτηριστικά της οθόνης <i>Duca-LCD96</i> .....	42
Πίνακας 2.19 Βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων πίεσης.....	43
Πίνακας 2.20 Βασικά χαρακτηριστικά των μετρητικών οργάνων <i>Coriolis</i> .....	45
Πίνακας 2.21 Ιδιότητες τύπων τραπεζών δεδομένων τα οποία επικοινωνούνται μέσω <i>Modbus Protocol</i> .....	46
Πίνακας 2.22 Αριθμοί που αντιπροσωπεύουν το είδος τράπεζας δεδομένων.....	47
Πίνακας 2.23 Συμμόρφωση κωδικών κλάσης 0.....	47
Πίνακας 2.24 Συμμόρφωση κωδικών κλάσης 1.....	48
Πίνακας 2.25 Συμμόρφωση κωδικών κλάσης 2.....	48
Πίνακας 4.1 Πίνακας προβλεπόμενων σφαλμάτων.....	79
Πίνακας 4.2 Πίνακας επικοινωνιών <i>Modbus</i> .....	86
Πίνακας A1 <i>Ducati Duca-LCD96 Modbus Mapping 1</i> .....	104
Πίνακας A2 <i>Ducati Duca-LCD96 Modbus Mapping 2</i> .....	105
Πίνακας A3 <i>Synamics G120 Modbus Mapping 1</i> .....	106
Πίνακας A4 <i>Synamics G120 Modbus Mapping 2</i> .....	107
Πίνακας A5 <i>V20 Modbus Mapping 1</i> .....	108
Πίνακας A6 <i>V20 Modbus Mapping 2</i> .....	109
Πίνακας A7 <i>V20 Modbus Mapping 3</i> .....	110
Πίνακας A8 <i>V20 Modbus Mapping 4</i> .....	111
Πίνακας B1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες εργαζόμενου μέσου <i>R1233zd(e)</i> ως κορεσμένο υγρό.....	117
Πίνακας B2 Θερμοδυναμικές ιδιότητες εργαζόμενου μέσου <i>R1233zd(e)</i> ως κορεσμένο αέριο.....	118

## 8. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 α) Τυπικό διάγραμμα T-s ORC, β) Τυπικό διάγραμμα T-s TFC, γ) Διάγραμμα θερμοκρασίας εργαζόμενου μέσου και πηγής θερμότητας σε ένα ORC, δ) Διάγραμμα θερμοκρασίας εργαζόμενου μέσου και πηγής θερμότητας σε ένα TFC [17].	14
Εικόνα 2.1 Ποιοτικό διάγραμμα ενός TFC και ενός PE-ORC [39]	20
Εικόνα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση αντλίας διαφράγματος [12]	21
Εικόνα 2.3 Διάγραμμα παροχής στροφών των αντλιών της σειράς G10 της εταιρείας Hydra-Cell	22
Εικόνα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση πλακοειδή εναλλάκτη	24
Εικόνα 2.5 Όρια αποδοτικής λειτουργίας συναρτήσεως της διακινούμενης παροχής όγκου για διάφορους τύπους μηχανών θετικής μετατόπισης [7]	25
Εικόνα 2.6 Αρχή λειτουργίας ελικοειδούς εκτονωτή	26
Εικόνα 2.7 Απώλειες υποεκτόνωσης [12]	26
Εικόνα 2.8 Απώλειες υπερεκτόνωσης [12]	27
Εικόνα 2.9 Χαρακτηριστική ροπής στροφών τριφασικού επαγωγικού κινητήρα [37]	28
Εικόνα 2.10 Τομή ελικοειδή ελαιοδιαχωριστή	30
Εικόνα 2.11 Διάγραμμα του κυκλώματος ζεστού νερού	33
Εικόνα 2.12 Διάγραμμα του κυκλώματος ψυχρού νερού	34
Εικόνα 2.13 Διάγραμμα του κυκλώματος ψυχρού νερού	35
Εικόνα 2.14 Σχηματική αναπαράσταση των σχέσεων επικοινωνίας του επεξεργαστή με τις υπόλοιπες συσκευές	37
Εικόνα 2.15 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρονικού κυκλώματος ενός VFD	38
Εικόνα 2.16 Μεταβολή της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών επαγωγικού κινητήρα με τη συχνότητα με έλεγχο V/f [37]	39
Εικόνα 3.1 Διάγραμμα ενός τυποποιημένου συστήματος βιομηχανικού ελέγχου [41]	51
Εικόνα 3.2 Γραφική απεικόνιση της λογικής σχεδίασης του αλγορίθμου	53
Εικόνα 3.3 Γραφική αναπαράσταση ενός While Loop στο LabVIEW	54
Εικόνα 3.22 Γραφική αναπαράσταση ενός Case Structure στο LabVIEW	54
Εικόνα 3.3 Γραφική αναπαράσταση ενός Flat Sequence στο LabVIEW	55
Εικόνα 3.4 Γραφική αναπαράσταση ενός Feedback Node στο LabVIEW	55
Εικόνα 3.5 Γραφική αναπαράσταση ενός Elapsed Time στο LabVIEW	56
Εικόνα 3.8 Γραφική απεικόνιση του SR Flip-Flop Sub-Vi	58
Εικόνα 3.9 Γραφική απεικόνιση του On & Off Delay Sub-Vi	60
Εικόνα 3.10 Γραφική απεικόνιση του Change Value Sub-Vi περίπτωση "2"	61
Εικόνα 3.11 Γραφική απεικόνιση του Change Value Sub-Vi περίπτωση "1"	61
Εικόνα 3.12 Γραφική απεικόνιση του Change Value Sub-Vi περίπτωση "0"	62
Εικόνα 3.13 Γραφική απεικόνιση του Sample and Hold Sub-Vi για δυαδική μεταβλητή περίπτωση "False"	63
Εικόνα 3.14 Γραφική απεικόνιση του Sample and Hold Sub-Vi για δυαδική μεταβλητή περίπτωση "True"	63

Εικόνα 3.15 Γραφική απεικόνιση του <i>Sample and Hold Sub-Vi</i> για πραγματική μεταβλητή περίπτωση “False” .....	63
Εικόνα 3.16 Γραφική απεικόνιση του <i>Sample and Hold Sub-Vi</i> για πραγματική μεταβλητή περίπτωση “True” .....	64
Εικόνα 3.6 Γραφική απεικόνιση του <i>Negative to Positive Sub-Vi</i> στην περίπτωση “True” ..	65
Εικόνα 3.18 Λογικό διάγραμμα λειτουργίας PID ελεγκτή.....	66
Εικόνα 3.19 <i>Block diagram</i> χρήσης PID ελεγκτή στο LabVIEW .....	67
Εικόνα 3.20 Στοιχεία βιβλιοθήκης του <i>CoolProp</i> .....	68
Εικόνα 4.1 <i>IO_VI Front Panel</i> .....	71
Εικόνα 4.2 <i>Amax read function</i> .....	72
Εικόνα 4.3 <i>Amax write function</i> .....	73
Εικόνα 4.4 <i>Amax read function for real value and plot to 2D graph</i> .....	73
Εικόνα 4.5 <i>Algorithm Stopped function</i> .....	74
Εικόνα 4.6 <i>Regen Algorithm front panel</i> .....	75
Εικόνα 4.7α <i>Regen Algorithm VI Block Diagram While Loop 1: Αυτοματισμοί της εγκατάστασης</i> .....	76
Εικόνα 4.7β <i>Regen Algorithm VI Block Diagram While Loop 1: Αυτοματισμοί της εγκατάστασης</i> .....	77
Εικόνα 4.7γ <i>Regen Algorithm VI Block Diagram While Loop 1: Αυτοματισμοί της εγκατάστασης</i> .....	78
Εικόνα 4.8 <i>Regen Algorithm VI Block Diagram μέρος του While Loop 2: Μηνύματα σφαλμάτων</i> .....	78
Εικόνα 4.9 Ο PID ελεγκτής στο <i>Block Diagram</i> .....	82
Εικόνα 4.10 <i>Modbus VI read function in block diagram</i> .....	84
Εικόνα 4.11α <i>Modbus VI flat sequence</i> για την ανάγνωση τιμών από τον ατμοποιητή και τον αναθερμαντή .....	84
Εικόνα 4.11β <i>Modbus VI flat sequence</i> για την ανάγνωση τιμών από τον συμπιεστή, τον εναλλάκτη υπόψυξης και αποστολή τιμών για τον ατμοποιητή και των εναλλάκτη υπόψυξης. ....	85
Εικόνα 4.11γ <i>Modbus VI flat sequence</i> για την ανάγνωση τιμών αποστολή τιμών για τον συμπιεστή και τον εναλλάκτη υπόψυξης .....	85
Εικόνα 4.12 <i>DataLogging VI μέρος του block diagram</i> .....	88
Εικόνα 4.13 <i>DataLogging VI front panel</i> .....	88
Εικόνα 4.14 <i>CoolProp_calc VI μέρος του Block Diagram</i> .....	89
Εικόνα 4.15 <i>DataLogging VI μέρος του front panel</i> .....	90
Εικόνα 4.16 Διάγραμμα λειτουργίας PID σε πραγματικό χρόνο.....	93
Εικόνα 4.17 Διάγραμμα μηχανικών απωλειών του εκτονωτή σε συνάρτηση των στροφών του. ....	94
Εικόνα B1 Διάγραμμα T-s του εργαζόμενου μέσου R1233zd(e).....	116

## 9. Βιβλιογραφία

- [1] Bianchi, G., Marchionni, M., Miller, J., & Tassou, S. A. (2020). Modelling and off-design performance optimisation of a trilateral flash cycle system using two-phase twin-screw expanders with variable built-in volume ratio. *Applied Thermal Engineering*, 179.
- [2] Marchionni, M., Bianchi, G., Karvountzis-Kontakiotis, A., Pesyridis, A., & Tassou, S. A. (2018). An appraisal of proportional integral control strategies for small scale waste heat to power conversion units based on Organic Rankine Cycles. *Energy*, 163, 1062–1076.
- [3] Smith, I. K. (n.d.) *Development of the trilateral flash cycle system Part 1: fundamental considerations*.
- [4] Ajimotokan, H. A., Sher, I., Biliyok, C., & Yeung, H. (2014). Trilateral Flash Cycle for Recovery of Power from a Finite Low-Grade Heat Source. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 33, pp. 1831–1836). Elsevier B.V.
- [5] White, M. T. (2021). Cycle and turbine optimization for an ORC operating with two-phase expansion. *Applied Thermal Engineering*, 192.
- [6] Bianchi, G., McGinty, R., Oliver, D., Brightman, D., Zaher, O., Tassou, S. A., Miller, J., & Jouhara, H. (2017). Development and analysis of a packaged Trilateral Flash Cycle system for low grade heat to power conversion applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 4, 113–121.
- [7] Persson, J.-G. (1990). *Performance Evaluation of Fluid Machinery During Conceptual Design*.
- [8] Ziviani, D., Suman, A., Lecompte, S., de Paepe, M., van den Broek, M., Spina, P. R., Pinelli, M., Venturini, M., & Beyene, A. (2014). Comparison of a single-screw and a scroll expander under part-load conditions for low-grade heat recovery ORC systems. *Energy Procedia*, 61, 117–120.
- [9] Shi, Y., Lin, R., Wu, X., Zhang, Z., Sun, P., Xie, L., & Su, H. (2022). Dual-mode fast DMC algorithm for the control of ORC based waste heat recovery system. *Energy*, 244.
- [10] Liu, X., Yebi, A., Anshel, P., Shutty, J., Xu, B., Hoffman, M., & Onori, S. (2017). Model Predictive Control of an Organic Rankine Cycle System. *Energy Procedia*, 129, 184–191.
- [11] Βαρβαγιάννης Ε. (2020). Ανάπτυξη ελεγκτή προβλεπτικού μοντέλου σε εγκατάσταση μORC και σύγκριση με συμβατικές τεχνικές ελέγχου.
- [12] Βαρβαγιάννης Ε. (2017). Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση για τον αυτόματο έλεγχο μονάδας ανάκτησης θερμότητας ORC.
- [13] Salkic, A., Muhovic, H., & Jokic, D. (2022). Siemens S7-1200 PLC DC Motor control capabilities. *IFAC-PapersOnLine*, 55(4), 103–108.
- [14] «Programmable Logic Controller». [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable\\_logic\\_controller](https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller)

- [15] Hernandez, A., Desideri, A., Ionescu, C., Quoilin, S., Lemort, V., & de Keyser, R. (n.d.). *Increasing the efficiency of Organic Rankine Cycle Technology by means of Multivariable Predictive Control*.
- [16] Bianchi, G., Kennedy, S., Zaher, O., Tassou, S. A., Miller, J., & Jouhara, H. (2018). Numerical modeling of a two-phase twin-screw expander for Trilateral Flash Cycle applications. *International Journal of Refrigeration*, 88, 248–259.
- [17] Iqbal, M. A., Rana, S., Ahmadi, M., Date, A., & Akbarzadeh, A. (2019). Trilateral flash cycle (TFC) a promising thermodynamic cycle for low grade heat to power generation. *Energy Procedia*, 160, 208–214.
- [18] «Industrial Control Systems». [Online]. Available: <https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/definition/industrial-control-system>
- [19] «Πλεονεκτήματα Βιομηχανικού Ελέγχου». [Online]. Available: <https://www.copadata.com/en/product/platform-editorial-content/industrial-control-systems>
- [20] «LabVIEW». [Online]. Available: <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>
- [21] «CoolProp». [Online]. Available: <http://www.coolprop.org/>
- [22] Zeynali, A., Akbari, A., & Khalilian, M. (2019). Investigation of the performance of modified organic Rankine cycles (ORCs) and modified trilateral flash cycles (TFCs) assisted by a solar pond. *Solar Energy*, 182, 361–381.
- [23] Meng, D., Liu, Q., & Ji, Z. (2020). Performance analyses of regenerative organic flash cycles for geothermal power generation. *Energy Conversion and Management*, 224.
- [24] de Paepe, M., Lecompte, S., Pillai, A., Corberán, J. M., & Pillai, A. (2019). *Detailed design of the ORC laboratory prototype ORDP Open Research Data Pilot Version Management Filename D3.4, Detailed Design Of The ORC Laboratory Prototype Author(s)*.
- [25] Zhou, N., Wang, X., Chen, Z., & Wang, Z. (2013). Experimental study on Organic Rankine Cycle for waste heat recovery from low-temperature flue gas. *Energy*, 55, 216–225.
- [26] Marchionni, M., Bianchi, G., Tassou, S. A., Zaher, O., & Miller, J. (2019). Numerical investigations of a trilateral flash cycle under system off-design operating conditions. *Energy Procedia*, 161, 464–471.
- [27] Iqbal, M. A., Ahmadi, M., Melhem, F., Rana, S., Akbarzadeh, A., & Date, A. (2017). Power Generation from Low Grade Heat Using Trilateral Flash Cycle. *Energy Procedia*, 110, 492–497.
- [28] Lei, B., Wu, Y. T., Wang, W., Wang, J. F., & Ma, C. F. (2014). A study on lubricant oil supply for positive-displacement expanders in small-scale organic Rankine cycles. *Energy*, 78, 846–853.
- [29] Ottaviano, S., Poletto, C., Ancona, M. A., & Melino, F. (2022). Experimental investigation on micro-ORC system operating with partial evaporation and two-phase expansion. *Energy Conversion and Management*, 274.

- [30] Katsuhiko Ogata, *Συστήματα αυτομάτου ελέγχου*, 5η έκδοση. Εκδόσεις Φούντας (2013).
- [31] Lemort, V., Declaye, S., & Quoilin, S. (2012). Experimental characterization of a hermeti scroll expander for use in a micro-scale Rankine cycle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 226(1), 126–
- [32] Β. Μούκας, “Θερμοδυναμική μοντελοποίηση ανάκτησης θερμότητας με ORC σε μερικό φορτίο,” Ε.Μ.Π., 2016.
- [33] Muye, J., Praveen Kumar, G., Bruno, J. C., Saravanan, R., & Coronas, A. (2019). Modelling of scroll expander for different working fluids for low capacity power generation. *Applied Thermal Engineering*, 159.
- [34] Experimental and numerical analyses of a 5 kWe oil-free open-drive scroll expander for small-scale organic Rankine cycle (ORC) applications
- [35] Du, Y., Pekris, M., & Tian, G. (2023). CFD analysis of flank clearance sizes on micro-scale transcritical CO2 scroll expander . *Applied Thermal Engineering*, 120980.
- [36] Ayachi, F., Ksayer, E. B., Neveu, P., & Zoughaib, A. (2016). Experimental investigation and modeling of a hermetic scroll expander. *Applied Energy*, 181, 256–267.
- [37] S. Chapman, *Ηλεκτρικές Μηχανές*, 4η έκδοση. Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [38] «Helical Oil Separators, AC&R». [Online]. Available: [http://www.dayan-rs.com/\\_Uploads/dbsAttachedFiles/8426.pdf](http://www.dayan-rs.com/_Uploads/dbsAttachedFiles/8426.pdf)
- [39] Bellos, E., Lykas, P., Sammoutos, C., Kitsopoulou, A., Korres, D., & Tzivanidis, C. (2023). Thermodynamic investigation of a solar-driven organic Rankine cycle with partial evaporation. *Energy Nexus*, 11.
- [40] Lai, K. Y., Lee, Y. T., Chen, M. R., & Liu, Y. H. (2019). Comparison of the trilateral flash cycle and Rankine cycle with organic fluid using the pinch point temperature. *Entropy*, 21(12).
- [41] «Industrial Control Systems». [Online]. Available: <https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/definition/industrial-control-system>
- [42] «The Modbus Protocol in depth» [Online]. Avainlable: <https://www.ni.com/en/shop/seamlessly-connect-to-third-party-devices-and-supervisory-system/the-modbus-protocol-in-depth.html>

## Παράρτημα Α – Modbus Mapping

<b>DUCATI</b>	<b>MEASUREMENT INSTRUMENTS</b>	<b>file name:</b> MODBUS_12_ENG.doc
<b>ENERGIA S.P.A.</b>	<b>DIVISION</b>	REVISION: 12 of 05/11/14
TITLE: <b>MODBUS-RTU Protocol</b> (Mach SMART / SMART Più / DUCA47(-72)-SP / DUCA-LCD / DUCA-LCD96)		Page 8 of 27

Add.	Word	Measurement description	Unit	Format
0002	2	Frequency	Tenths of Hz	Unsigned Long
0004	2	Three-phase Equivalent Voltage	V	Unsigned Long
0006	2	Line Voltage (line 1 - line 2)	V	Unsigned Long
0008	2	Line Voltage (line 2 - line 3)	V	Unsigned Long
0010	2	Line Voltage (line 3 - line 1)	V	Unsigned Long
0012	2	Voltage between Phase and Neutral line 1	V	Unsigned Long
0014	2	Voltage between Phase and Neutral line 2	V	Unsigned Long
0016	2	Voltage between Phase and Neutral line 3	V	Unsigned Long
0018	2	Three-phase Equivalent Current	Hundredths of A	Unsigned Long
0020	2	Current Line 1	Hundredths of A	Unsigned Long
0022	2	Current Line 2	Hundredths of A	Unsigned Long
0024	2	Current Line 3	Hundredths of A	Unsigned Long
0026	2	Three-phase equivalent power factor*	Hundredths	bit-Signed / Unsigned Long <sup>v</sup>
0028	2	Power factor line 1*	Hundredths	bit-Signed Long
0030	2	Power factor line 2*	Hundredths	bit-Signed Long
0032	2	Power factor line 3*	Hundredths	bit-Signed Long
0034	2	Three-phase equivalent active power	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0036	2	Average three-phase equivalent active power	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0038	2	Maximum three-phase equivalent active power	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0040	2	Active power line 1	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0042	2	Active power line 2	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0044	2	Active power line 3	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0046	2	Average active power line 1	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0048	2	Average active power line 2	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0050	2	Average active power line 3	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0052	2	Maximum active power line 1	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0054	2	Maximum active power line 2	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0056	2	Maximum active power line 3	W	bit-Signed Long <sup>vi</sup>
0058	2	Three-phase equivalent apparent power	VA	bit-Signed Long
0060	2	Average three-phase equivalent apparent power	VA	Unsigned Long
0062	2	Maximum three-phase equivalent apparent power	VA	Unsigned Long

<sup>v</sup> For SMART Più, DUCA47(-72)-SP, DUCA-LCD and DUCA-LCD96 this value is a bit-Signed Long.

<sup>vi</sup> For models DUCA-LCD and DUCA-LCD96 the values of Active Power could be negatives in Cogeneration.

Πίνακας Α1 Ducati Duca-LCD96 Modbus Mapping 1



<b>DUCATI</b> <b>ENERGIA S.P.A.</b>	<b>MEASUREMENT INSTRUMENTS</b>	<b>file name:</b> MODBUS_12_ENG.doc
	<b>DIVISION</b>	REVISION: 12 of 05/11/14
TITLE: <b>MODBUS-RTU Protocol</b> ( Mach SMART / SMART Più / DUCA47(-72)-SP / DUCA-LCD / DUCA-LCD96 )		Page 9 of 27

0064	2	Apparent power line 1	VA	Unsigned Long
0066	2	Apparent power line 2	VA	Unsigned Long
0068	2	Apparent power line 3	VA	Unsigned Long
0070	2	Average apparent power line 1	VA	Unsigned Long
0072	2	Average apparent power line 2	VA	Unsigned Long
0074	2	Average apparent power line 3	VA	Unsigned Long
0076	2	Maximum apparent power line 1	VA	Unsigned Long
0078	2	Maximum apparent power line 2	VA	Unsigned Long
0080	2	Maximum apparent power line 3	VA	Unsigned Long
0082	2	Three-phase equivalent reactive power	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0084	2	Average three-phase equivalent reactive power	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0086	2	Maximum three-phase equivalent reactive power	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0088	2	Reactive power line 1	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0090	2	Reactive power line 2	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0092	2	Reactive power line 3	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0094	2	Average reactive power line 1	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0096	2	Average reactive power line 2	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0098	2	Average reactive power line 3	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0100	2	Maximum reactive power line 1	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0102	2	Maximum reactive power line 2	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0104	2	Maximum reactive power line 3	VAr	bit-Signed Long <sup>vii</sup>
0106	2	Three-phase equivalent active energy	Tens of Wh	Unsigned Long
0108	2	Active energy line 1	Tens of Wh	Unsigned Long
0110	2	Active energy line 2	Tens of Wh	Unsigned Long
0112	2	Active energy line 3	Tens of Wh	Unsigned Long

<sup>vii</sup> For models DUCA-LCD and DUCA-LCD96 the values of Reactive Power could be negative (positive if inductive, negative if capacitive).

Table 5- 11 Assigning the Modbus register to the parameters of the Control Unit

Modbus Reg. No.	Description	Mod-bus access	Unit	Scaling factor	On/Off text or value range	Data / parameter
<b>Process data</b>						
<b>Control data</b>						
40100	Control word	R/W	--	1		Process data 1
40101	Main setpoint	R/W	--	1		Process data 2
<b>Status data</b>						
40110	Status word	R	--	1		Process data 1
40111	Main actual value	R	--	1		Process data 2
<b>Parameter data</b>						
<b>Digital outputs</b>						
40200	DO 0	R/W	--	1	HIGH LOW	p0730, r747.0, p748.0
40201	DO 1	R/W	--	1	HIGH LOW	p0731, r747.1, p748.1
40202	DO 2	R/W	--	1	HIGH LOW	p0732, r747.2, p748.2
<b>Analog outputs</b>						
40220	AO 0	R	%	100	-100.0 ... 100.0	r0774.0
40221	AO 1	R	%	100	-100.0 ... 100.0	r0774.1
<b>Digital inputs</b>						
40240	DI 0	R	--	1	HIGH LOW	r0722.0
40241	DI 1	R	--	1	HIGH LOW	r0722.1
40242	DI 2	R	--	1	HIGH LOW	r0722.2
40243	DI 3	R	--	1	HIGH LOW	r0722.3
40244	DI 4	R	--	1	HIGH LOW	r0722.4
40245	DI 5	R	--	1	HIGH LOW	r0722.5
<b>Analog inputs</b>						
40260	AI 0	R	%	100	-300.0 ... 300.0	r0755 [0]
40261	AI 1	R	%	100	-300.0 ... 300.0	r0755 [1]
40262	AI 2	R	%	100	-300.0 ... 300.0	r0755 [2]
40263	AI 3	R	%	100	-300.0 ... 300.0	r0755 [3]
<b>Converter identification</b>						
40300	Powerstack number	R	--	1	0 ... 32767	r0200
40301	Converter firmware	R	--	0.0001	0.00 ... 327.67	r0018
<b>Converter data</b>						
40320	Rated power of the power unit	R	kW	100	0 ... 327.67	r0206
40321	Current limit	R/W	%	10	10.0 ... 400.0	p0640
40322	Ramp-up time	R/W	s	100	0.00 ... 650.0	p1120
40323	Ramp-down time	R/W	s	100	0.00 ... 650.0	p1121
40324	Reference speed	R/W	RPM	1	6.000 ... 32767	p2000
<b>Converter diagnostics</b>						
40340	Speed setpoint	R	RPM	1	-16250 ... 16250	r0020
40341	Actual speed value	R	RPM	1	-16250 ... 16250	r0022

Communication via RS485

5.4 Communication using Modbus RTU

Modbus Reg. No.	Description	Mod-bus access	Unit	Scaling factor	On/Off text or value range	Data / parameter
40342	Output frequency	R	Hz	100	- 327.68 ... 327.67	r0024
40343	Output voltage	R	V	1	0 ... 32767	r0025
40344	DC-link voltage	R	V	1	0 ... 32767	r0026
40345	Actual current value	R	A	100	0 ... 163.83	r0027
40346	Actual torque value	R	Nm	100	- 325.00 ... 325.00	r0031
40347	Actual active power	R	kW	100	0 ... 327.67	r0032
40348	Energy consumption	R	kWh	1	0 ... 32767	r0039
40349	Control priority	R	--	1	HAND   AUTO	r0807
<b>Fault diagnostics</b>						
40400	Failure number, index 0	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [0]
40401	Failure number, index 1	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [1]
40402	Failure number, index 2	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [2]
40403	Failure number, index 2	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [3]
40404	Failure number, index 3	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [4]
40405	Failure number, index 4	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [5]
40406	Failure number, index 5	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [6]
40407	Failure number, index 6	R	--	1	0 ... 32767	r0947 [7]
40408	Alarm number	R	--	1	0 ... 32767	r2110 [0]
40499	PRM ERROR code	R	--	1	0 ... 99	--
<b>Technology controller</b>						
40500	Technology controller enable	R/W	--	1	0 ... 1	p2200, r2349.0
40501	Technology controller MOP	R/W	%	100	-200.0 ... 200.0	p2240
<b>Technology controller adjustment</b>						
40510	Time constant for actual-value filters of the technology controller	R/W	--	100	0.00 ... 60.0	p2265
40511	Scaling factor for actual value of the technology controller	R/W	%	100	0.00 ... 500.00	p2269
40512	Proportional amplification of the technology controller	R/W	--	1000	0.000 ... 65.000	p2280
40513	Integral time of the technology controller	R/W	s	1	0 ... 60	p2285
40514	Time constant D-component of the technology controller	R/W	--	1	0 ... 60	p2274
40515	Max. limit of technology controller	R/W	%	100	-200.0 ... 200.0	p2291
40516	Min. limit technology controller	R/W	%	100	-200.0 ... 200.0	p2292
<b>PID diagnostics</b>						
40520	Effective setpoint acc. to internal technology controller MOP ramp-function generator	R	%	100	-100.0 ... 100.0	r2250
40521	Actual value of technology controller after filter	R	%	100	-100.0 ... 100.0	r2266
40522	Output signal technology controller	R	%	100	-100.0 ... 100.0	r2294

Fieldbuses

Mapping table

The table below shows registers that the SINAMICS V20 converter supports. "R", "W", and "R/W" in the "Access" column stand for read, write, and read/write respectively. Registers with \* are available only when the optional I/O Extension Module is connected.

HSW (speed setpoint), HIW (actual speed), STW (control word), and ZSW (status word) refer to control data. For more information, see parameters r2018 and P2019 in Chapter "Parameter list (Page 201)".

Register No.		Description	Access	Unit	Scaling factor	Range or On/Off text		Read	Write
Converter	MODBUS								
0	40001	Watchdog time	R/W	ms	1	0 - 65535		-	-
1	40002	Watchdog action	R/W	-	1	-		-	-
2	40003	Frequency setpoint	R/W	%	100	0.0 0 - 100.00		HSW	HSW
3	40004	Run enable	R/W	-	1	0 - 1		STW:3	STW:3
4	40005	Forward/reverse command	R/W	-	1	0 - 1		STW:11	STW:11
5	40006	Start command	R/W	-	1	0 - 1		STW:0	STW:0
6	40007	Fault acknowledgement	R/W	-	1	0 - 1		STW:7	STW:7
7	40008	PID setpoint reference	R/W	%	100	-200.0 - 200.0		P2240	P2240
8	40009	PID enable	R/W	-	1	0 - 1		r0055.8	(BICO) P2200
9	40010	Current limit	R/W	%	10	10.0 - 400.0		P0640	P0640
10	40011	Acceleration time	R/W	s	100	0.00 - 650.0		P1120	P1120
11	40012	Deceleration time	R/W	s	100	0.00 - 650.0		P1121	P1121
12	40013	(Reserved)							
13	40014	Digital output 1	R/W	-	1	HIGH	LOW	r0747.0	(BICO) P0731
14	40015	Digital output 2	R/W	-	1	HIGH	LOW	r0747.1	(BICO) P0732
15	40016	Reference frequency	R/W	Hz	100	1.00 - 550.00		P2000	P2000
16	40017	PID upper limit	R/W	%	100	-200.0 - 200.0		P2291	P2291
17	40018	PID lower limit	R/W	%	100	-200.0 - 200.0		P2292	P2292

Πίνακας A5 V20 Modbus Mapping 1

Communicating with the PLC

7.2 MODBUS communication

Register No.		Description	Access	Unit	Scaling factor	Range or On/Off text	Read	Write
Converter	MODBUS							
18	40019	Proportional gain	R/W	-	1000	0.000 - 65.000	P2280	P2280
19	40020	Integral gain	R/W	s	1	0 - 60	P2285	P2285
20	40021	Differential gain	R/W	-	1	0 - 60	P2274	P2274
21	40022	Feedback gain	R/W	%	100	0.00 - 500.00	P2269	P2269
22	40023	Low pass	R/W	-	100	0.00 - 60.00	P2265	P2265
23	40024	Frequency output	R	Hz	100	-327.68 - 327.67	r0024	r0024
24	40025	Speed	R	RPM	1	-16250 - 16250	r0022	r0022
25	40026	Current filtered	R	A	100	0 - 163.83	r0027	r0027
26	40027	Torque	R	Nm	100	-325.00 - 325.00	r0031	r0031
27	40028	Actual power	R	kW	100	0 - 327.67	r0032	r0032
28	40029	Total kWh	R	kWh	1	0 - 32767	r0039	r0039
29	40030	DC bus voltage	R	V	1	0 - 32767	r0026	r0026
30	40031	Reference	R	Hz	100	-327.68 - 327.67	r0020	r0020
31	40032	Rated power	R	kW	100	0 - 327.67	r0206	r0206
32	40033	Voltage output	R	V	1	0 - 32767	r0025	r0025
33	40034	Forward/reverse	R	-	1	FWD REV	ZSW:14	ZSW:14
34	40035	Stop/run	R	-	1	STOP RUN	ZSW:2	ZSW:2
35	40036	Run at maximum frequency	R	-	1	MAX NO	ZSW:10	ZSW:10
36	40037	Control mode	R	-	1	SERIAL LOCAL	ZSW:9	ZSW:9
37	40038	Enabled	R	-	1	ON OFF	ZSW:0	ZSW:0
38	40039	Ready to run	R	-	1	READY OFF	ZSW:1	ZSW:1
39	40040	Analog input 1	R	%	100	-300.0 - 300.0	r0754[0]	r0754[0]
40	40041	Analog input 2	R	%	100	-300.0 - 300.0	r0754[1]	r0754[1]
41	40042	Analog output 1	R	%	100	-100.0 - 100.0	r0774[0]	r0774[0]
43	40044	Actual frequency	R	%	100	-100.0 - 100.0	HIW	HIW
44	40045	PID setpoint output	R	%	100	-100.0 - 100.0	r2250	r2250
45	40046	PID output	R	%	100	-100.0 - 100.0	r2294	r2294
46	40047	PID feedback	R	%	100	-100.0 - 100.0	r2266	r2266
47	40048	Digital input 1	R	-	1	HIGH LOW	r0722.0	r0722.0
48	40049	Digital input 2	R	-	1	HIGH LOW	r0722.1	r0722.1
49	40050	Digital input 3	R	-	1	HIGH LOW	r0722.2	r0722.2
50	40051	Digital input 4	R	-	1	HIGH LOW	r0722.3	r0722.3
53	40054	Fault	R	-	1	FAULT OFF	ZSW:3	ZSW:3
54	40055	Last fault	R	-	1	0 - 32767	r0947[0]	r0947[0]
55	40056	Fault 1	R	-	1	0 - 32767	r0947[1]	r0947[1]
56	40057	Fault 2	R	-	1	0 - 32767	r0947[2]	r0947[2]
57	40058	Fault 3	R	-	1	0 - 32767	r0947[3]	r0947[3]
58	40059	Warning	R	-	1	WARNING OK	ZSW:7	ZSW:7
59	40060	Last warning	R	-	1	0 - 32767	r2110	r2110
60	40061	Converter version	R	-	100	0.00 - 327.67	r0018	r0018
61	40062	Converter model	R	-	1	0 - 32767	r0201	r0201

Register No.		Description	Access	Unit	Scaling factor	Range or On/Off text		Read	Write
Converter	MODBUS								
99	40100	STW	R/W	-	1			PZD 1	PZD 1
100	40101	HSW	R/W	-	1			PZD 2	PZD 2
109	40110	ZSW	R	-	1			PZD 1	PZD 1
110	40111	HIW	R	-	1			PZD 2	PZD 2
199	40200	Digital output 1	R/W	-	1	HIGH	LOW	r0747.0	(BICO) P0731
200	40201	Digital output 2	R/W	-	1	HIGH	LOW	r0747.1	(BICO) P0732
201	40202	Digital output 3*	R/W	-	1	HIGH	LOW	r0747.2	(BICO) P0733
202	40203	Digital output 4*	R/W	-	1	HIGH	LOW	r0747.3	(BICO) P0734
219	40220	Analog output 1	R	%	100	-100.0	- 100.0	r0774[0]	r0774[0]
239	40240	Digital input 1	R	-	1	HIGH	LOW	r0722.0	r0722.0
240	40241	Digital input 2	R	-	1	HIGH	LOW	r0722.1	r0722.1
241	40242	Digital input 3	R	-	1	HIGH	LOW	r0722.2	r0722.2
242	40243	Digital input 4	R	-	1	HIGH	LOW	r0722.3	r0722.3
243	40244	Digital input 5*	R	-	1	HIGH	LOW	r0722.4	r0722.4
244	40245	Digital input 6*	R	-	1	HIGH	LOW	r0722.5	r0722.5
259	40260	Analog input 1	R	%	100	-300.0	- 300.0	r0754[0]	r0754[0]
260	40261	Analog input 2	R	%	100	-300.0	- 300.0	r0754[1]	r0754[1]
299	40300	Converter model	R	-	1	0 - 32767		r0201	r0201
300	40301	Converter version	R	-	100	0.00 - 327.67		r0018	r0018
319	40320	Rated power	R	kW	100	0 - 327.67		r0206	r0206
320	40321	Current limit	R/W	%	10	10.0 - 400.0		P0640	P0640
321	40322	Acceleration time	R/W	s	100	0.00 - 650.0		P1120	P1120
322	40323	Deceleration time	R/W	s	100	0.00 - 650.0		P1121	P1121
323	40324	Reference frequency	R/W	Hz	100	1.00 - 650.0		P2000	P2000
324	40325	Fixed frequency 1	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1001	P1001
325	40326	Fixed frequency 2	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1002	P1002
326	40327	Fixed frequency 3	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1003	P1003
327	40328	Fixed frequency 4	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1004	P1004
329	40330	Fixed setpoint 1	R/W	%	100	-200 - 200		P2889	P2889
330	40331	Fixed setpoint 2	R/W	%	100	-200 - 200		P2890	P2890
331	40332	Fixed frequency 5	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1005	P1005
332	40333	Fixed frequency 6	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1006	P1006
333	40334	Fixed frequency 7	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1007	P1007
334	40335	Fixed frequency 8	R/W	Hz	100	-327.68 - 327.67		P1008	P1008
339	40340	Reference	R	Hz	100	-327.68 - 327.67		r0020	r0020
340	40341	Speed	R	RPM	1	-16250 - 16250		r0022	r0022
341	40342	Frequency output	R	Hz	100	-327.68 - 327.67		r0024	r0024
342	40343	Voltage output	R	V	1	0 - 32767		r0025	r0025
343	40344	DC bus voltage	R	V	1	0 - 32767		r0026	r0026
344	40345	Current filtered	R	A	100	0 - 163.83		r0027	r0027
345	40346	Torque	R	Nm	100	-325.00 - 325.00		r0031	r0031
346	40347	Actual power	R	kW	100	0 - 327.67		r0032	r0032
347	40348	Total kWh	R	kWh	1	0 - 32767		r0039	r0039
348	40349	Hand/auto	R	-	1	HAN D	AUTO	r0807	r0807

SINAMICS V20 Converter

Operating Instructions , 03/2021 , A5E34559884 -014

197

Πίνακας A7 V20 Modbus Mapping 3

Communicating with the PLC

7.2 MODBUS communication

Register No.		Description	Access	Unit	Scaling factor	Range or On/Off text	Read	Write
Converter	MODBUS							
349	40350	Current unfiltered	R	A	100	0 - 163.83	r0068	r0068
359	40360	Continuous boost	R/W	%	10	0.0 - 250.0	P1310	P1310
360	40361	Minimum frequency	R/W	Hz	100	0.00 - 250.00	P1080	P1080
361	40362	Maximum frequency	R/W	Hz	100	0.00 - 250.00	P1082	P1082
368	40369	JOG frequency	R/W	Hz	100	0.00 - 650.00	P1058[0]	P1058[0]
369	40370	JOG frequency	R/W	Hz	100	0.00 - 650.00	P1058[1]	P1058[1]
370	40371	JOG frequency	R/W	Hz	100	0.00 - 650.00	P1058[2]	P1058[2]
371	40372	JOG frequency left	R/W	Hz	100	0.00 - 650.00	P1059[0]	P1059[0]
372	40373	JOG frequency left	R/W	Hz	100	0.00 - 650.00	P1059[1]	P1059[1]
373	40374	JOG frequency left	R/W	Hz	100	0.00 - 650.00	P1059[2]	P1059[2]
399	40400	Fault 1	R	-	1	0 - 32767	r0947[0]	r0947[0]
400	40401	Fault 2	R	-	1	0 - 32767	r0947[1]	r0947[1]
401	40402	Fault 3	R	-	1	0 - 32767	r0947[2]	r0947[2]
402	40403	Fault 4	R	-	1	0 - 32767	r0947[3]	r0947[3]
403	40404	Fault 5	R	-	1	0 - 32767	r0947[4]	r0947[4]
404	40405	Fault 6	R	-	1	0 - 32767	r0947[5]	r0947[5]
405	40406	Fault 7	R	-	1	0 - 32767	r0947[6]	r0947[6]
406	40407	Fault 8	R	-	1	0 - 32767	r0947[7]	r0947[7]
407	40408	Warning	R	-	1	0 - 32767	r2110[0]	r2110[0]
498	40499	Parameter error code	R	-	1	0 - 254	-	-
499	40500	PID enable	R/W	-	1	0 - 1	r0055.8	(BICO) P2200
500	40501	PID setpoint reference	R/W	%	100	-200.0 - 200.0	P2240	P2240
509	40510	Low pass	R/W	-	100	0.00 - 60.0	P2265	P2265
510	40511	Feedback gain	R/W	%	100	0.00 - 500.00	P2269	P2269
511	40512	Proportional gain	R/W	-	1000	0.000 - 65.000	P2280	P2280
512	40513	Integral gain	R/W	s	1	0 - 60	P2285	P2285
513	40514	Differential gain	R/W	-	1	0 - 60	P2274	P2274
514	40515	PID upper limit	R/W	%	100	-200.0 - 200.0	P2291	P2291
515	40516	PID lower limit	R/W	%	100	-200.0 - 200.0	P2292	P2292
519	40520	PID setpoint output	R	%	100	-100.0 - 100.0	r2250	r2250
520	40521	PID feedback	R	%	100	-100.0 - 100.0	r2266	r2266
521	40522	PID output	R	%	100	-100.0 - 100.0	r2294	r2294
549	40550	Parameter number	RW	-	1	0 - 65535	-	-
550	40551	Parameter index	RW	-	1	0 - 65535	-	-
551	40552	Reserved	RO	-	-	-	-	-
553	40554	Parameter upper word	RW	-	1	0 - 65535	-	-
554	40555	Parameter lower word	RW	-	1	0 - 65535	-	-
557	40558	Parameter upper word	RO	-	1	0 - 65535	-	-
558	40559	Parameter lower word	RO	-	1	0 - 65535	-	-
600	40601	DS47 control	R/W	-	-	-	-	-
601	40602	DS47 header	R/W	-	-	-	-	-
602	40603	DS47 data 1	R/W	-	-	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...
721	40722	DS47 data 120	R/W	-	-	-	-	-

## Παράρτημα Β – Κάρτες I/O

Ψηφιακές εισοδοι		
Μοντέλο Κάρτας	Αριθμός Εισόδων	Σήματα Εισόδου
5001	4	Πρεσοστάτη Υψηλής Πίεσης
		Πρεσοστάτη Χαμηλής Πίεσης
		Πρεσοστάτη Υψηλής Πίεσης Λαδιού
		DI 13 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)
5052	16	Emergency Stop
		ORC Pump Status
		ORC Pump Fault
		Generator 1 Status
		Generator 1 Fault
		Oil Pump Status
		Oil Pump Fault
		Reset Faults CMD
		Expander 2 Status
		Expander 2 Fault
		D15 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)
		D16 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)
D17 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)		
D18 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)		
D19 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)		
D20 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)		



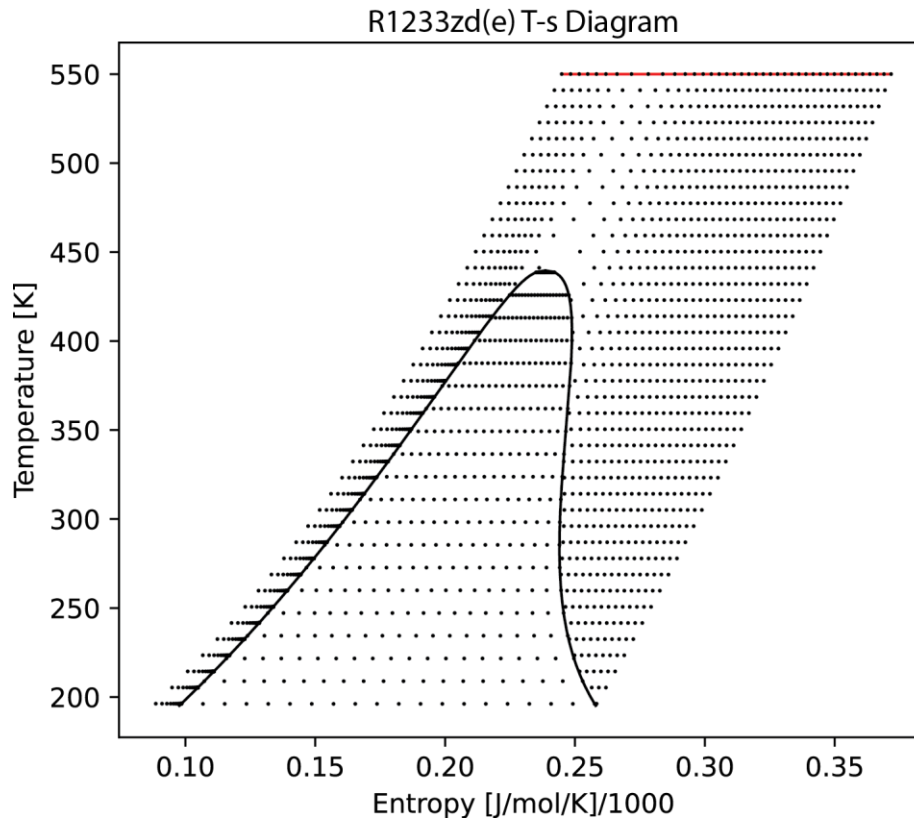
Ψηφιακές έξοδοι		
Μοντέλο Κάρτας	Αριθμός Εξόδων	Σήματα Εξόδου
5057so	16	ORC Pump CMD
		Expander 1 CMD
		Expander 2 CMD
		Oil Pump CMD
		Clutch CMD
		Expander Solenoid (NC) CMD
		Bypass Solenoid (NO) CMD
		Bypass Solenoid (NC) CMD
		Oil Heater CMD
		Pump Fan CMD
		Generator Fan CMD
		Boolean 12(Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)
		Boolean 13(Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)
		Warning LED
		Reset Faults CMD
		General Fault LED

Αναλογικές Είσοδοι		
Μοντέλο Κάρτας	Αριθμός Εξόδων	Σήματα Εισόδου
3 x 5015	3 x 4	T1 – Θερμοκρασία στην έξοδο του ατμοποιητή
		T2 – Θερμοκρασία στην έξοδο του εκτονωτή
		T3 – Θερμοκρασία στην έξοδο του αναθερμαντή
		T4 – Θερμοκρασία στην έξοδο του συμπυκνωτή
		T5 – Θερμοκρασία στην έξοδο του τροφοδοτικού δοχείου
		T6 – Θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη υπόψυξης
		T7 – Θερμοκρασία στην έξοδο της αντλίας
		T8 – Θερμοκρασία στην έξοδο του διαχωριστή λαδιού
		T9 – Θερμοκρασία στην έξοδο της αντλίας λαδιού
		Θερμοκρασία δοχείου λαδιού
		RTD 11 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)
		RTD 12 (Ελεύθερο κανάλι για μελλοντική χρήση)
5017v	6	VI1, VI2, VI3, VI4, VI5, VI6
5017c	6	P1 – Πίεση στην έξοδο του ατμοποιητή
		P2 – Πίεση στην έξοδο του εκτονωτή
		P3 – Πίεση στην έξοδο του αναθερμαντή
		P4 – Πίεση στην έξοδο του συμπυκνωτή
		P6 – Πίεση στην έξοδο του εναλλάκτη υπόψυξης
		P7 – Πίεση στην έξοδο της αντλίας
5017c	6	P8 – Πίεση στην έξοδο του διαχωριστή λαδιού
		Παροχή μάζας μετά την αντλία
		Πυκνότητα του μέσου στην είσοδο του εκτονωτή
		Πυκνότητα του μέσου στην έξοδο του εκτονωτή
		Παροχή νερού στον ατμοποιητή
Παροχή νερού στον αναθερμμαντή		

<b>Αναλογικές εξόδους</b>		
Μοντέλο Κάρτας	Αριθμός Εξόδων	Σήματα Εξόδου
5024	4	ORC Pump Reference
		Expander Reference
		Oil Reference
		Expander 2 Reference

## Παράρτημα Γ – Θερμοδυναμικές Ιδιότητες R1233zd(E)

Το παράρτημα αυτό περιέχει το διάγραμμα θερμοκρασίας εντροπίας του εργαζόμενου μέσου R1233zd(e) καθώς και τον πίνακα με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του μέσου στην καμπύλη κορεσμού.



Εικόνα Β1 Διάγραμμα T-s του εργαζόμενου μέσου R1233zd(e)

Thermodynamic properties of R-1233zd(e) Saturated state

Absolute pressure	LIQUID				
	Bubble point	Volume	Density	Enthalpy	Entropy
P	t'	v'	p'	h'	s'
(bar)	(°C)	(dm <sup>3</sup> /kg)	(kg/dm <sup>3</sup> )	(kJ/kg)	(kJ/kg.K)
0.003	-75	0.675	1.482	108.096	0.607
0.005	-70	0.679	1.472	114.290	0.638
0.008	-65	0.684	1.462	120.464	0.668
0.013	-60	0.689	1.451	126.621	0.697
0.019	-55	0.694	1.441	132.763	0.725
0.028	-50	0.699	1.430	138.893	0.753
0.040	-45	0.705	1.419	145.013	0.780
0.056	-40	0.710	1.409	151.125	0.807
0.076	-35	0.715	1.398	157.231	0.833
0.103	-30	0.721	1.387	163.334	0.858
0.138	-25	0.726	1.377	169.435	0.883
0.181	-20	0.732	1.366	175.537	0.907
0.235	-15	0.738	1.355	181.643	0.931
0.301	-10	0.744	1.344	187.754	0.954
0.382	-5	0.750	1.333	193.872	0.977
0.479	0	0.757	1.321	200.000	1.000
0.594	5	0.763	1.310	206.140	1.022
0.731	10	0.770	1.298	212.295	1.044
0.892	15	0.777	1.287	218.467	1.066
1.013	18.31	0.782	1.279	222.559	1.080
1.080	20	0.784	1.275	224.657	1.087
1.296	25	0.792	1.263	230.870	1.108
1.546	30	0.800	1.251	237.107	1.129
1.831	35	0.808	1.238	243.370	1.149
2.155	40	0.816	1.226	249.664	1.169
2.521	45	0.825	1.213	255.990	1.189
2.933	50	0.834	1.200	262.351	1.209
3.395	55	0.843	1.186	268.751	1.228
3.909	60	0.853	1.173	275.193	1.248
4.481	65	0.863	1.159	281.680	1.267
5.113	70	0.874	1.145	288.217	1.286
5.811	75	0.885	1.130	294.807	1.305
6.577	80	0.897	1.115	301.456	1.324
7.418	85	0.910	1.099	308.169	1.342
8.336	90	0.923	1.083	314.951	1.361
9.336	95	0.937	1.067	321.810	1.379
10.424	100	0.953	1.050	328.753	1.398
11.604	105	0.969	1.032	335.790	1.416
12.882	110	0.987	1.013	342.932	1.435
14.262	115	1.007	0.993	350.192	1.453
15.751	120	1.028	0.972	357.587	1.472
17.355	125	1.052	0.950	365.140	1.490
19.081	130	1.079	0.927	372.878	1.509
20.935	135	1.110	0.901	380.841	1.528
22.926	140	1.146	0.873	389.085	1.548
25.063	145	1.189	0.841	397.695	1.568
27.357	150	1.243	0.805	406.818	1.589
29.822	155	1.315	0.761	416.735	1.612
32.478	160	1.426	0.701	428.182	1.637

Πίνακας Β1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες εργαζόμενου μέσου R1233zd(e) ως κορεσμένο υγρό

Thermodynamic properties of R-1233zd(e) Saturated state

Absolute pressure P (bar)	VAPOUR					Latent heat Lv (kJ/kg)
	Dew point t" (°C)	Volume v" (m <sup>3</sup> /kg)	Density ρ" (kg/m <sup>3</sup> )	Enthalpy h" (kJ/kg)	Entropy s" (kJ/kg.K)	
0.003	-75.0	37.407	0.027	352.276	1.839	244.181
0.005	-70.0	23.877	0.042	355.636	1.826	241.346
0.008	-65.0	15.660	0.064	359.028	1.814	238.564
0.013	-60.0	10.531	0.095	362.449	1.803	235.828
0.019	-55.0	7.245	0.138	365.897	1.794	233.134
0.028	-50.0	5.092	0.196	369.370	1.786	230.476
0.040	-45.0	3.649	0.274	372.864	1.779	227.851
0.056	-40.0	2.662	0.376	376.378	1.773	225.253
0.076	-35.0	1.975	0.506	379.908	1.768	222.677
0.103	-30.0	1.488	0.672	383.452	1.763	220.119
0.138	-25.0	1.137	0.880	387.008	1.760	217.573
0.181	-20.0	0.880	1.136	390.573	1.757	215.036
0.235	-15.0	0.690	1.449	394.144	1.754	212.502
0.301	-10.0	0.547	1.828	397.719	1.752	209.966
0.382	-5.0	0.438	2.282	401.295	1.751	207.424
0.479	0.0	0.355	2.820	404.870	1.750	204.870
0.594	5.0	0.289	3.455	408.441	1.750	202.301
0.731	10.0	0.238	4.196	412.005	1.749	199.710
0.892	15.0	0.198	5.058	415.560	1.750	197.094
1.013	18.31	0.175	5.699	417.905	1.750	195.346
1.080	20.0	0.165	6.052	419.104	1.750	194.446
1.296	25.0	0.139	7.192	422.632	1.751	191.762
1.546	30.0	0.118	8.495	426.144	1.752	189.037
1.831	35.0	0.100	9.975	429.635	1.753	186.264
2.155	40.0	0.086	11.650	433.102	1.755	183.438
2.521	45.0	0.074	13.540	436.542	1.757	180.552
2.933	50.0	0.064	15.664	439.952	1.758	177.601
3.395	55.0	0.055	18.044	443.326	1.760	174.576
3.909	60.0	0.048	20.706	446.662	1.762	171.469
4.481	65.0	0.042	23.676	449.953	1.765	168.274
5.113	70.0	0.037	26.983	453.196	1.767	164.979
5.811	75.0	0.033	30.663	456.383	1.769	161.575
6.577	80.0	0.029	34.752	459.507	1.771	158.051
7.418	85.0	0.025	39.294	462.562	1.773	154.393
8.336	90.0	0.023	44.340	465.539	1.776	150.588
9.336	95.0	0.020	49.947	468.427	1.778	146.617
10.424	100.0	0.018	56.184	471.214	1.780	142.461
11.604	105.0	0.016	63.135	473.887	1.781	138.097
12.882	110.0	0.014	70.898	476.428	1.783	133.497
14.262	115.0	0.013	79.599	478.817	1.785	128.625
15.751	120.0	0.011	89.393	481.027	1.786	123.439
17.355	125.0	0.010	100.485	483.024	1.786	117.884
19.081	130.0	0.009	113.145	484.764	1.787	111.886
20.935	135.0	0.008	127.751	486.186	1.786	105.346
22.926	140.0	0.007	144.852	487.204	1.785	98.120
25.063	145.0	0.006	165.299	487.685	1.783	89.989
27.357	150.0	0.005	190.539	487.406	1.779	80.589
29.822	155.0	0.004	223.414	485.944	1.773	69.209
32.478	160.0	0.004	271.280	482.225	1.762	54.042

Πίνακας Β2 Θερμοδυναμικές ιδιότητες εργαζόμενου μέσου R1233zd(e) ως κορεσμένο αέριο