



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ: ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΜΜ. ΡΟΓΔΑΚΗΣ

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ STIRLING ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ SOLO 161V
ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ Ε.Μ.Π. -
ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

-

(INSTALLATION OF A THERMAL SOLO 161V STIRLING ENGINE
CORPORATION MODULE
AT THE LABORATORY OF APPLIED THERMODYNAMICS OF N.T.U.A -
THEORETICAL & MEASURED RESULTS COMPARISON)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΙΔΩΝ Γ. ΠΑΠΑΒΛΑΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Εγκατάσταση θερμοκινητήρα Stirling SOLO 161V στο εργαστήριο εφαρμοσμένης θερμοδυναμικής του Ε.Μ.Π., συσχετισμός των πρώτων πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων», έχει σαν στόχο την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη λήψη πειραματικών μετρήσεων της μονάδας συμπαραγωγής Solo 161V Stirling Engine.

Η συγκεκριμένη μονάδα συμπαραγωγής καταναλώνει φυσικό αέριο και παρέχει ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Μελετήθηκαν, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν όλα τα απαιτούμενα συστήματα, για την σωστή και ασφαλής λειτουργία της.

Μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, έγινε λήψη πειραματικών μετρήσεων και παράχθηκαν τα πρώτα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση της μονάδας.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου κύριο Ρογδάκη Εμμανουήλ για την βοήθεια και την κατανόηση του.

Στους γονείς μου χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ, για την υποστήριξη και την διακριτική υπομονή τους στην προσπάθεια μου, να πετύχω τα γαλουχήματα μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον Μηχανολόγο Μηχανικό Γεώργιο Αντωνάκο, για τη βοήθεια του, που ήταν μεγάλη, πολύτιμη, μα κυρίως συνεχής

Και μια ευχή..... στο εργαστήριο «Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής» και στην πειραματική διάταξη του κινητήρα Stirling, μια μέρα να πάρουν μετρήσεις τα κορίτσια μου, η Ευθυμία και η Χριστιάνα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	
Ιστορία 1816 –σήμερα.....	6
Βιβλιογραφία 1 ^{ου} κεφαλαίου	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	
Θερμοδυναμικός κύκλος Stirling	19
Παραγόμενο έργο.....	24
Ικανότητα απόδοσης της μηχανής Stirling.....	25
Καύσιμο - οικολογική θεώρηση	25
Απόδοση.....	27
Έλεγχος ισχύος.....	28
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μηχανής	29
Βιβλιογραφία 2 ^{ου} κεφαλαίου	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	
Βασική τεχνολογική θεώρηση	33
Σχεδιαστικές διαφοροποιήσεις	39
Τύποι μηχανών Stirling	41
Διαστάσεις.....	44
Υλικά	45
Έξοδος ενέργειας.....	46

Χρήσεις των μηχανών Stirling	46
Ικανότητα καυσίμου και παραγόμενη ισχύς.....	49
Συγκρίνοντας τα είδη μηχανών	49
Η μηχανή Stirling και ο ανταγωνισμός.....	50
Βιβλιογραφία 3 ^{ου} κεφαλαίου	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Συστήματα συμπαραγωγής με χρήση μηχανών Stirling.....	54
Οικονομική & οικολογική συμπεριφορά των εγκαταστάσεων συμπαραγωγής μηχανών Stirling.....	55
Σημαντικές υποθέσεις κατά το σχεδιασμό εγκαταστάσεων συμπαραγωγής Stirling	57
Βιβλιογραφία 4 ^{ου} κεφαλαίου	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Σχεδιαστικές αρχές της SOLO STIRLING 161 microCPH-Module.....	59
Αρχές λειτουργίας της SOLO STIRLING V161 microCPH-Module.....	61
Το σύστημα του He	64
Κύκλωμα καυσίμου & καυσαερίων	66
Έλεγχος των ηλεκτρονικών συστημάτων ασφαλείας	70
Λειτουργικός έλεγχος	74
Η ηλεκτρική γεννήτρια & η σύνδεσή της με το δίκτυο.....	75
Σύστημα ψύξης	78

Ο εναλλάκτης θερμότητας των καυσαερίων	81
Πλαίσιο διάταξης	82
Βιβλιογραφία 5 ^{ου} κεφαλαίου	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Εγκατάσταση.....	84
Συνδέσεις αερίου.....	86
Σύνδεση του εξωτερικού κυκλώματος ψύξης	89
Ηλεκτρική σύνδεση	94
Απαγωγή καυσαερίων.....	96
Τρόποι λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής	
Solo V161 Stirling Engine	99
Βιβλιογραφία 6 ^{ου} κεφαλαίου	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

Διαδικασία έναρξης, λειτουργίας και παύσης μονάδας.....	101
Μενού επιλογών.....	102
Κύριο μενού	103
<i>Μενού “Engine measures”</i>	104
<i>Μενού “General”</i>	105
<i>Μενού «Water Temperature»</i>	106
Μενού «Meters».....	106
<i>Μενού «Settings»</i>	107
Κατάσταση λειτουργίας 0 (Configuration 0).....	108
Κατάσταση λειτουργίας 1 (Configuration 1).....	109

Μενού «Internal Values»	110
-------------------------------	-----

Βιβλιογραφία 7 ^{ου} κεφαλαίου	111
--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

Θερμικός ισολογισμός μονάδας συμπαραγωγής

Solo V161 Stirling Engine	112
---------------------------------	-----

Διαδικασία μετρήσεων.....	114
---------------------------	-----

Ενεργειακός ισολογισμός	115
-------------------------------	-----

Διάγραμμα Sankey	122
------------------------	-----

Συμπεράσματα από το θερμικό ισοζύγιο.....	123
---	-----

Βιβλιογραφία 8 ^{ου} κεφαλαίου	127
--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

Υπολογιστικό μοντέλο	128
----------------------------	-----

Αδιαβατική ανάλυση μηχανής Solo 161V.....	128
---	-----

Κώδικας	130
---------------	-----

Παρατηρήσεις	134
--------------------	-----

Διαγράμματα	135
-------------------	-----

Αποτελέσματα	147
--------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1^ο

Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μονάδας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2^ο

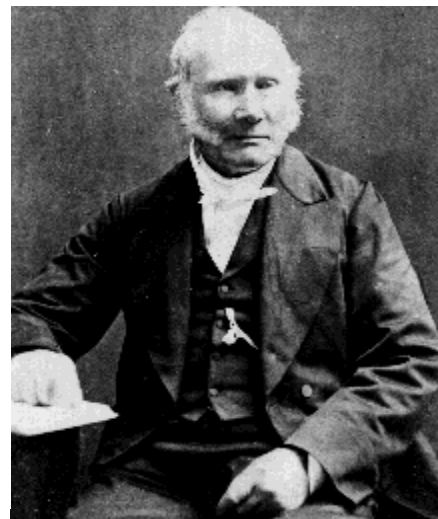
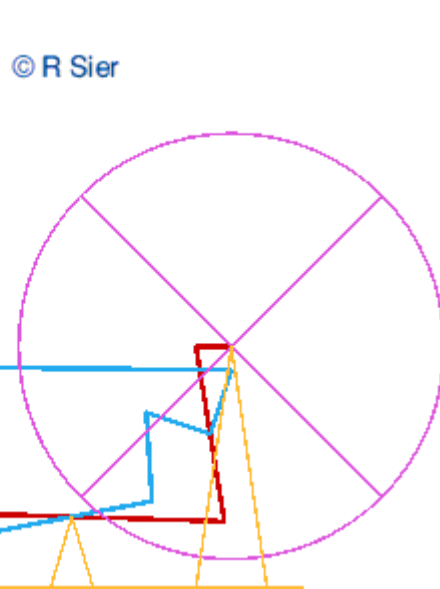
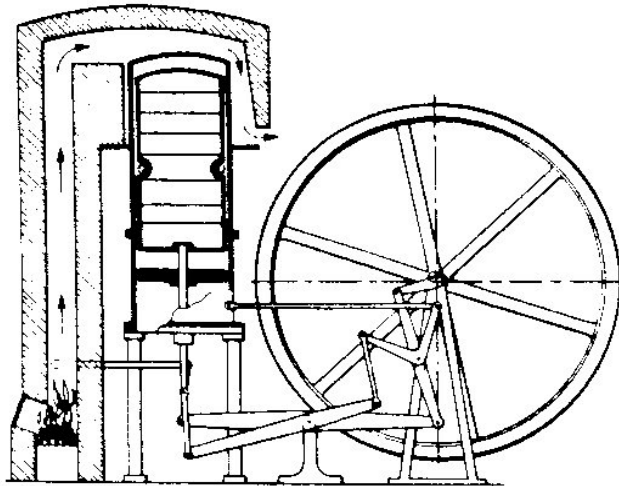
Κατανομή τερματικών στον πίνακα ελέγχου της μονάδας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3^ο

Πίνακας κωδικών σφαλμάτων μονάδας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΙΣΤΟΡΙΑ 1816 – ΣΗΜΕΡΑ



Rev Dr Robert Stirling (1790-1878)

Η μηχανή «αέρος» Stirling είναι μια διάταξη κλειστού αναγεννητικού θερμοδυναμικού κύκλου με περιοδική συμπίεση και εκτόνωση του εργαζόμενου αερίου (αέρας) σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα. Η ροή του εργαζόμενου μέσου ελέγχεται από αλλαγές στους όγκους στο ζεστό και κρύο χώρο χωρίς χρήση βαλβίδων. Έτσι υπάρχει μια καθαρή παραγωγή ή απορρόφηση θερμότητας, αφού ο κύκλος είναι και αντιστρέψιμος.

Ο Rev. Stirling άρχισε να εργάζεται με την πρώτη του εφαρμογή πάνω σε αυτή την μηχανή και το οικονομητήρα το 1816, λίγους μήνες αφότου έγινε πάστορας της εκκλησίας της Σκωτίας σε ηλικία 25 χρονών. Άλλοι, όπως ο Sir George Caley είχαν κατασκευάσει μηχανή αέρος από πριν (1806) και άλλες μηχανές με την επωνυμία «μηχανές αέρος» έχουν αναφερθεί από το 1699.

Ο «οικονομητήρας» ή «αναγεννητής» έχει αναγνωρισθεί ως το πιο σημαντικό μέρος της πατέντας του Rev. Stirling. Αυτή η καινοτομία έκανε την κατασκευή πολύ πιο ελαφριά σε σχέση με τα δεδομένα της εποχής .

Πολλοί ιστορικοί θεωρούν ότι η ενασχόληση του Rev. Stirling με αυτές τις μηχανές ήταν το αποτέλεσμα του ενδιαφέροντός του για τους εργαζόμενους της ενορίας του, καθώς οι ατμομηχανές που είχαν ευρεία εφαρμογή εκείνη την εποχή παρουσίαζαν προβλήματα. Το σημαντικότερο πρόβλημα με τις ατμομηχανές ήταν το γεγονός ότι το μέταλλο που χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή του boiler δεν είχε την απαιτούμενη αντοχή (το ασάλι ή ο χάλυβας Bessemer δεν είχαν ακόμα ανακαλυφθεί) και έτσι οι εκρήξεις των boiler και οι θάνατοι ήταν πολύ συχνοί. Η μηχανή Stirling δεν μπορούσε να εκραγεί γιατί οι πιέσεις ήταν πολύ χαμηλές. Η μηχανές απλώς σταματούσαν όταν για κάποιο λόγο ανέβαινε η θερμοκρασία και η πίεση του εργαζόμενου αερίου.

Η πρώτη καταγεγραμμένη προσπάθεια υλοποίησης αυτού του εγχειρήματος από εταιρεία ήταν από την Dundee Foundry Company στην οποία εργαζόταν ο αδελφός του Robert, James Stirling. Ο James ήταν πολύ καλός μηχανικός και ένθερμος υποστηρικτής του εγχειρήματος του αδελφού του. Μια πολύ μεγάλη σε διαστάσεις μηχανή με διπλά ενεργά έμβολα με πολλές σχεδιαστικές και κατασκευαστικές καινοτομίες κατασκευάστηκε στο εργοστάσιο που δούλευε με την δική του επίβλεψη. Η μηχανή αυτή δούλευε για πολλά χρόνια στο εργοστάσιο, αλλά λόγω αστοχιών των μετάλλων αντικαταστάθηκε πάλι από μια ατμομηχανή.

Το 1908 η μηχανή Stirling είχε ήδη αναπτυχθεί αρκετά, αφού τόσο ο αναγεννητής όσο και η μηχανή διπλών εμβόλων ήταν αρκετά γνωστά και στις δύο ακτές του Ατλαντικού. Συζητήσεις για την χρησιμότητα και τις πιθανές μελλοντικές εφαρμογές της, γίνονταν από το Institution of Mechanical Engineers της μεγάλης Βρετανίας. Ήταν γεγονός ότι από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα μέχρι την έναρξη του 1^{ου} παγκόσμιου πολέμου, τόσο μηχανές ανοικτού κύκλου λειτουργίας όσο και μηχανές κλειστού κύκλου λειτουργίας είχαν μελετηθεί, αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε διάφορες περιπτώσεις, από την τοποθέτησή τους σε πλοία μέχρι και την χρήση τους σε εκκλησιαστικά όργανα για την άντληση του απαραίτητου αέρα για τη λειτουργία τους. Είναι εκπληκτικό το γεγονός ότι πολλές από εκείνες τις μηχανές λειτουργούν ακόμα και μάλιστα ικανοποιητικά.

Παρόλο ότι η μηχανή Stirling ήταν μια πολύ καλή εναλλακτική λύση των απρόβλεπτων εκείνη την εποχή ατμομηχανών, η έλλειψη την εποχή εκείνη κατάλληλων υλικών για τους κυλίνδρους και για τις κεφαλές τους, είχαν σαν αποτέλεσμα να μην πρεσάρονται όσο θα έπρεπε οι κύλινδροι, με αποτέλεσμα να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα η παραγόμενη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης, περίπου 1 kW ανά τόνο και 1% αντίστοιχα. Παρόλα αυτά η μηχανή είχε πολύ καλή απόδοση και ευρεία εφαρμογή σε περιπτώσεις άντλησης υδάτων. Το 1908 εμφανίσθηκε για πρώτη φορά η μηχανή Stirling που έπαιρνε ενέργεια από τον ήλιο.

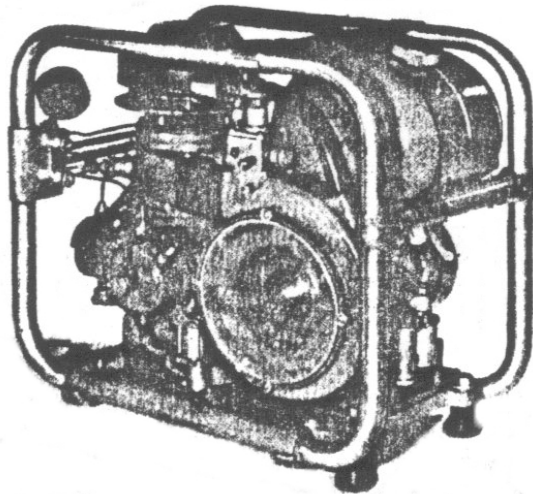
Η επιτυχία της μηχανής του Stirling αναγνωρίστηκε από τα διάφορα ερευνητικά κέντρα και από το ενδιαφέρον που έδειξαν γι' αυτήν ισχυρές προσωπικότητες της εποχής όπως ο βασιλιάς Εδουάρδος VII, ο Σουλτάνος της Τουρκίας, ο Andrew Carnegie κ.α. Παρά την επιτυχία της, μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '20 η μηχανή Stirling κόντευε να «πεθάνει». Η κατάσταση αυτή επιδεινώθηκε από την ραγδαία ανάπτυξη και χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης την εποχή του 2^{ου} παγκόσμιου πολέμου. Η ανάπτυξη της μηχανής Otto και του ηλεκτροκινητήρα συνετέλεσαν στο μαρασμό της Stirling σε μια εποχή που κατά ειρωνικό τρόπο όλοι περίμεναν το αντίθετο αφού είχε αναπτυχθεί τόσο πολύ η τεχνολογία των υλικών, και όλοι πίστευαν στην μεγάλη εξέλιξη της Stirling αφού θα βελτιωνόταν σημαντικά ο βαθμός απόδοσής της. Την δεκαετία του '20 ο Beale της Sunpower Inc. κατασκεύασε μια μηχανή βασισμένη στον θερμοδυναμικό κύκλο Stirling που όμως λάμβανε

θερμότητα από τις ηλιακές ακτίνες. Λόγω των βελτιωμένων υλικών και της καλύτερης σχεδίασης, η μηχανή αυτή είχε πολύ βελτιωμένο βαθμό απόδοσης και παρήγαγε πολύ μεγαλύτερη ισχύ. Η Ολλανδική εταιρία Philips είδε τα αποτελέσματα αυτά και άρχισε να ασχολείται και εκείνη με την Stirling για άλλους λόγους. Ήθελε να κατασκευάσει γεννήτριες ρεύματος ώστε να φτάσει σε όλα τα μέρη του κόσμου η νέα ανακάλυψη, το ραδιόφωνο, που όμως χρειαζόνταν ηλεκτρικό ρεύμα για να λειτουργήσει.

Τη δεκαετία το '30 η μηχανή Stirling έχει πλέον πέσει σε ολοκληρωτική απαξίωση. Λίγες μόνο πολύ μικρές μονάδες βρίσκονται σε λειτουργία και αυτές σε τροπικά μέρη, όπου χρησιμοποιούνται για να κινούν κάποια πρωτόγονα συστήματα κλιματισμού. Καμιά από τις καινοτομίες της μηχανής Stirling δεν χρησιμοποιούνταν πλέον και καμιά περαιτέρω εξέλιξη δεν είχε επιτευχθεί από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Ο βαθμός απόδοσης της μηχανής ήταν μόλις 1% ενώ ο βαθμός απόδοσης κατά Carnot ξεπερνούσε το 50% .

Η Philips όμως συνειδητοποίησε την δυναμική εξέλιξης και ανάπτυξης των μηχανών Stirling και την υπεροχή της σε σχέση με την ατμομηχανή. Καθώς η απειλή ενός νέου παγκόσμιου πόλεμου πλανιόταν πάνω από την Ευρώπη, ξεκίνησε η Ολλανδική εταιρεία να δουλεύει πάνω στη μηχανή αυτή, ξεκινώντας από το αρχικό σχέδιο του 1816. Η έρευνα συνεχίστηκε την περίοδο 1936-45 και το 1946 η ομάδα της Philips είχε ήδη δημοσιεύσει αρκετές μελέτες στις οποίες υπήρχαν οι πρώτες μετά από πολλά χρόνια νέες πληροφορίες για τη μηχανή Stirling. Μέσα σε διάστημα μικρότερο από 10 χρόνια, σε μια περίοδο μάλιστα πολύ δύσκολη για την ανθρωπότητα, η Philips είχε πάρει μια σχεδόν ξεχασμένη μηχανή, αύξησε την παραγόμενη ισχύ ανά χιλιόγραμμο μάζας της κατά 50 φορές, μείωσε το μέγεθος της ανά μονάδα ισχύος με ένα συντελεστή της τάξης του 125 και βελτίωσε το βαθμό απόδοσής της κατά περίπου 15 φορές. Η μηχανή Stirling είχε πλέον περάσει σε άλλη εποχή εξέλιξης.

Η πρώτη μηχανή που κατασκευάστηκε από την Philips είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης αναθερμαντών με πτερύγια ως επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας και όχι σωλήνων όπως εφαρμόστηκε αργότερα. Η συγκεκριμένη αυτή μηχανή παρήγαγε 0.7 kW ισχύος και κινούσε γεννήτρια 200W . (Σχήμα 1.1)



Σχήμα 1.1 : Η πρώτη μηχανή Stirling που κατασκευάστηκε από τη Philips.

Παρόλα αυτά, οι εξελίξεις την εποχή εκείνη στις μπαταρίες και την ηλεκτρονική παραγκώνισαν για άλλη μια φορά τη μηχανή Stirling ως γεννήτρια. Μεγαλύτερες μηχανές που θα μπορούσαν να σταθούν καλά και εμπορικά δεν εμφανίστηκαν μέχρι το 1948. Τότε ο Henry Ford II κατασκεύασε στα εργαστήρια του στο Αϊντχόβεν μια μηχανή απόδοσης 11kW. Η General Motors ακολούθησε τη Philips στην έρευνά της πάνω στη μηχανή Stirling. Η Philips δεν πτοήθηκε από το γεγονός αυτό, πήρε το ρίσκο και με την προσθήκη και άλλων ερευνητών στην υπάρχουσα ομάδα, εξέλιξε τη μηχανή όχι μόνο ως κινητήρια και θερμική, αλλά και ως ψυκτική και ως κρυογεννητική. Με το πρόγραμμα αυτό η Philips πέτυχε και εμπορική επιτυχία. Μια μονοβάθμια τέτοια μηχανή κατάφερε να φτάσει σε θερμοκρασία 12K. Ήταν μια πολύ σημαντική ανακάλυψη που επιτεύχθηκε με την ανάστροφη λειτουργία της μηχανής. Η μετέπειτα χρήση του ηλίου ή του υδρογόνου ανακαλύφθηκε ότι μείωνε τις απώλειες του εργαζόμενου μέσου στο περιβάλλον και βελτίωνε σημαντικά το βαθμό απόδοσης της μηχανής. Η επιτυχία της ψυκτικής μηχανής Stirling και η ταυτόχρονη γιγάντωση των Otto και Diesel οδήγησαν σε εξαφάνιση από την αγορά της θερμικής κινητήριας μηχανής, γεγονός που μπορούσε να σημάνει το τέλος της θερμικής Stirling. Όμως ο ενθουσιασμός και η καθοδήγηση ενός από τους μηχανικούς της Philips, του Meijer, κράτησε ζωντανή την έρευνα πάνω στην θερμική Stirling

με την ανακάλυψη του ρομβικού μηχανισμού κίνησης των εμβόλων (1953) που έδωσε νέα ώθηση και μέλλον στη μηχανή αυτή.

Η χρήση του ρομβικού μηχανισμού οδήγησης των εμβόλων, οι σωληνωτοί εναλλάκτες θερμότητας και εργαζόμενων αερίων με πολύ μικρά μοριακά βάρη είχαν σαν αποτέλεσμα μέχρι τα τέλη του '50 να κατασκευάσει η Philips μηχανές με βαθμούς απόδοσης πλέον του 30% και παραγόμενη ισχύ μερικές δεκάδες kW. Το γεγονός αυτό έκανε την Philips να εμπορεύεται πλέον την τεχνολογία της. Από τότε όλοι οι μεγάλοι ερευνητές των μηχανών Stirling με στροφαλοφόρο άξονα βασίστηκαν πάνω στις ανακαλύψεις της Philips και χρειάζονταν την άδειά της για να προχωρήσουν.

Όλα τα παραπάνω σε μια χρονολογική σειρά δίνονται ως εξής:

1937 – 1938

Ο N.V. Philips (ιδιοκτήτης του Ολλανδικού κολοσσού Philips) ενδιαφέρεται για την κλειστού κύκλου μηχανή θερμού αέρα για μικρές γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος.

1938 – 1947

Έχουν είδη κατασκευαστεί αρκετά πρωτότυπα μηχανών βασισμένα στην αρχικό μοντέλο του 1816, με πολύ βελτιωμένη όμως απόδοση.

1948 – 1953

Αρχίζει η έρευνα στις ψυκτικές μηχανές Stirling. Από την αρχή εμφανίζουν πολύ καλύτερη απόδοση από τις αντίστοιχες θερμικές, χρησιμοποιώντας για εργαζόμενο μέσο αέρια με πολύ μικρό μοριακό βάρος. Ταυτοχρόνως και οι κινητήριες μηχανές ερευνώνται και αναπτύσσονται από την Ford (USA) και την General Motors. Το 1953 πραγματοποιήθηκε μια μεγάλη τεχνολογική ανακάλυψη. Η δημιουργία και εξέλιξη του ρομβικού μηχανισμού κίνησης των εμβόλων από τον Meijer. Με το μηχανισμό αυτό μπορούσαμε πλέον να λειτουργούμε τη μηχανή και σε πολύ μεγαλύτερες πιέσεις. Οι ομάδες που ασχολιόντουσαν με τις θερμικές και τις ψυκτικές μηχανές διαχωρίζουν πλέον τις δραστηριότητες τους.

1954 – 1958

Την περίοδο αυτή κατασκευάζονται και δοκιμάζονται πολλές μηχανές ρομβικού μηχανισμού οδήγησης των εμβόλων, σε συνθήκες πίεσης μέχρι τα 14 MPa και εργαζόμενο αέριο το υδρογόνο, όπως στη μηχανή 1-365. Η χρήση υψηλών πιέσεων επιβάρυνε το πρόβλημα στεγανότητας. Ελατήρια

στεγανότητας από χυτοσίδηρο ήταν μια καλή λύση αλλά όχι η κατάλληλη λόγω των απωλειών λιπαντικού . Το κάλυμμα με τσιμούχες στεγανότητας για τον στροφαλοφόρο ήταν επίσης μια λύση που εγκαταλείφθηκε γρήγορα. Τέλος ανακαλύφθηκε το κέλυφος των κυλίνδρων που άφηνε κάποιο κενό μεταξύ της οροφής του εμβόλου και του καπακιού του κυλίνδρου (close clearance piston engine). Το έμβολο ήταν κατασκευασμένο από Sn – Pb – MoS₂ και επέτρεπε στο δαχτυλίδι να δέσει γύρω του και να συσφιχθεί θερμικά. Η General Motors ενδιαφέρθηκε για τη μηχανή, πλησίασε την Philips το 1957 και υπέγραψαν μια συμφωνία για 10ετή χρήση της μηχανής, το Νοέμβριο του 1958, που κόστισε στην GM 1,2 εκατομμύρια δολάρια Αμερικής (τότε!!).

1958 – 1962

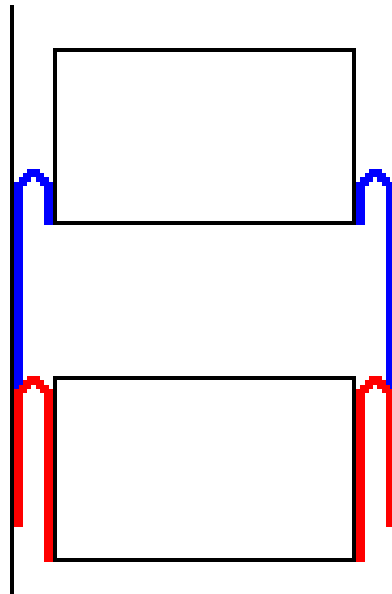
Η Philips συνέχισε της έρευνά της πάνω στον ρομβικό μηχανισμό κίνησης των εμβόλων με τη μηχανή 1-98 της οποίας κατασκευάστηκαν πάνω από τριάντα μοντέλα, που χρησιμοποιήθηκαν ως κινητήριες μηχανές γεννητριών ρεύματος των 4kW. Κατά την έρευνα η μηχανή δούλευε με μια μέση πίεση 22 MPa ενώ σε μια μακροχρόνια δοκιμή των 10.000 ωρών δούλεψε σε πίεση 11 MPa. Η μηχανή 1-365 τοποθετήθηκε σε σκάφος αναψυχής, το «Johan de Wit» και σε δοκιμή έφτασε τα 42kW ισχύς και βαθμό απόδοσης το 38% με μέση πίεση 16,5 MPa σε σύγκριση με την 1-98 μηχανή που απέδωσε 19 kW με βαθμό απόδοσης 33% και μέση πίεση 21MPa.

Η General Motors είχε ασχοληθεί με τρεις εφαρμογές της μηχανής Stirling:

Ως έσω-εξωλέμβια μηχανή, ως μηχανή για διαστημικούς τεχνητούς δορυφόρους που θα ελάμβανε ενέργεια από τις ηλιακές ακτίνες και τέλος ως μικρή γεννήτρια για επίγειες χρήσεις που θα την χρησιμοποιούσε κυρίως ο Αμερικάνικος στρατός (την ground power unit – GPU). Άλλες πιθανές εφαρμογές θα μπορούσαν να ήταν η πρόωση μικρών σκαφών για ποτάμια ή την ακτοπλοΐα, η κίνηση υποβρυχίων καθώς και μηχανών τρένων. Η πρώτη μηχανή που δοκιμάστηκε από την General Motors ήταν μια μονοκύλινδρη, μηχανή «close clearance» και απέδιδε 23 kW.

Η χρήση ελατηρίων στεγανότητας από Teflon ελάττωσε το πρόβλημα των διαρροών. Όμως δεν θα μπορούσε να εξελιχθεί περαιτέρω η μηχανή αν το 1960 δεν είχε ανακαλυφθεί ένα ειδικό είδος κελύφους, το rollsock seal. Αυτό βοήθησε στο να κατασκευαστούν μεγαλύτερες σε μέγεθος μηχανές και

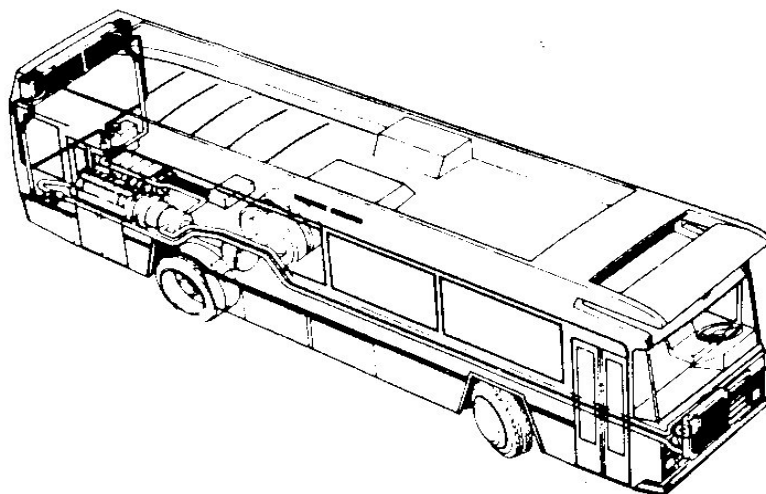
με καλύτερο βαθμό απόδοσης κυρίως λόγω της εξέλιξης στους εναλλάκτες που μπορεί να είναι πλέον και σωληνοειδείς και με πτερύγια, αλλά περισσότερο στην ανάπτυξη του αναγεννητή. Η GM χρησιμοποίησε την μηχανή 1-98 σε δορυφόρους και στα μοντέλα GPU. Το «close clearance seal» εγκαταλείφθηκε και ξεκίνησε νέα έρευνα για την εύρεση στεγανωτικών τόσο για τα έμβολα όσο και για τους διωστήρες. Τότε ανακαλύφθηκε το πρώτο κυλιόμενο κέλυφος (Sliding seal) (σχήμα 1.2). Η πιο σπουδαία απόφαση όμως που πάρθηκε την περίοδο εκείνη ήταν από την GM και αφορούσε την χρήση μηχανών Stirling σε αυτοκίνητα., χρησιμοποιώντας στερεό καύσιμο ως αποθηκευμένη πηγή θερμότητας.



Σχήμα1.2: Τα κυλιόμενα κελύφη που εξασφαλίζουν τη στεγανότητα των εμβόλων.

1963 – 1968

Οι επινοήσεις του ρομβικού συστήματος οδήγησης των εμβόλων, του κελύφους rollsock σε συνδυασμό με την απόδοση της καύσης, την εξέλιξη στους εναλλάκτες θερμότητας και τα συστήματα ελέγχου, μας έδωσαν τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε πολύ μεγαλύτερες μηχανές. Η GPU είχε εξελιχθεί και απέδιδε



Σχήμα 1.3 : Μηχανή Stirling σε λεωφορείο.

9kW, αλλά υπήρχαν ήδη μονάδες τόσο της Philips όσο και της GM που απέδιδαν ακόμα και 200kW για ναυτικές κυρίως εφαρμογές. Παρόλα αυτά το αμερικάνικο ναυτικό δοκίμασε για πρώτη φορά την μηχανή αυτή της Philips σε ένα λεωφορείο (σχήμα 1.3).

Στα μέσα της δεκαετίας του '60 η μηχανή Stirling είχε γίνει ανταγωνιστική της Diesel αλλά όχι και της Otto. Ήταν το 1964 που η Philips αποφάσισε να ασχοληθεί με τις μηχανές Stirling διπλών εμβόλων, όμως παρόλο που αυτή πήρε πρώτη την απόφαση, ήταν η GM που αναπτύχθηκε περισσότερο στον τομέα αυτό και το 1968 κατασκεύασε μια μηχανή αυτοκινήτου 186kW ισχύος και μια μηχανή για τορπίλη 375 kW.

Οι ελπιδοφόρες προσπάθειες των δύο αυτών κατασκευαστών, τράβηξαν την προσοχή και άλλων και το 1968 η Philips υπέγραψε άλλες δύο συμφωνίες με κοινοπραξίες. Μία Σουηδική την KB United Stirling και μια Δυτικογερμανική την Maschinenfabrik Augsburg – Nurnberg συνεργαζόμενη

με τη Motorenwerke Mannheim (MAN – MWM). Και οι δύο αυτές κοινοπραξίες ειδικεύονταν στις μηχανές Diesel.

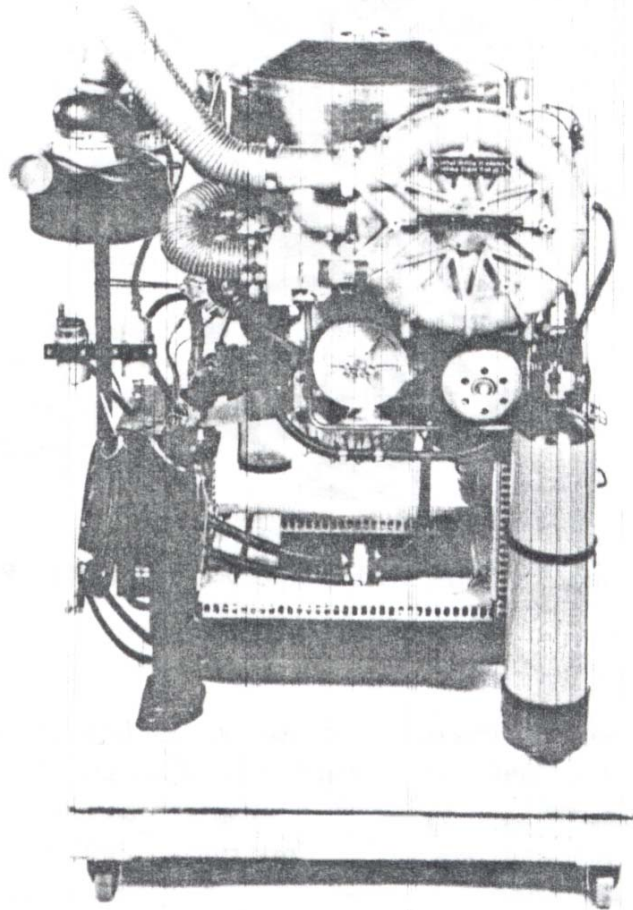
Την περίοδο αυτή η εταιρεία Harwell και η ομάδα του William Beale ξεκίνησαν έρευνα πάνω στη μηχανή Stirling ελευθέρου εμβόλου (free piston) και ρευστού εμβόλου (liquid piston).

1968 – 1978

Ήταν μια περίοδος έντονων ερευνών αλλά ξαφνικά η GM, προφανώς στο στάδιο ολοκλήρωσης των ερευνών, αποφάσισε να τερματίσει όλες τις έρευνες της πάνω στη Stirling. Δυστυχώς τα τεράστια έξοδα των ερευνών δεν είχαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα και περισσότερα από 300 σχέδια ήταν αδύνατον να εκτελεστούν. Παρόλα αυτά η εργασία πάνω στην αυτοκίνηση δεν εγκαταλείφθηκε, αλλά συνεχίστηκε από την FORD και την Philips με μια συμφωνία το 1972. Η Σουηδική εταιρεία United Stirling επίσης ασχολιόνταν με μεταφορικές μηχανές μεγάλων αποστάσεων για φορτηγά και λεωφορεία. Την εποχή αυτή ο Walker και ο Martini δημοσίευσαν εργασίες για μηχανές Stirling που προορίζονταν για ναυτική χρήση. Το 1968 ξεκίνησαν οι εργασίες των συνεργασιών της Philips με την Σουηδική United Stirling πάνω στην ρομβική μηχανή 1 – 98 και την 4 – 615 .

Από την άλλη μεριά η MAN – MWM εγκατέλειψε τη μελέτη της ρομβικής μηχανής και ασχολήθηκε με μηχανές με άτρακτο. Η περίοδος των ρομβικών μηχανών έφτασε στο τέλος της στα τέλη του 1971.

Μέχρι το τέλος της περιόδου αυτής έγιναν πολλές έρευνες πάνω σε μηχανές τόσο με υγρό όσο και στερεό καύσιμο με σκοπό την εφαρμογή τους σε αυτοκίνητα. Η United Stirling ανέπτυξε τα sliding seal τα οποία αν και δεν έλυσαν το πρόβλημα στεγανότητας των κελυφών των διωστήρων, παρόλα αυτά βελτίωσαν την λειτουργία της μηχανής. Η επιτυχία που είχαν οι έρευνες της Ford είχαν σαν συνέπεια την υπογραφή συμβολαίου με το USA Energy Research and Development Administration (ERDA) το 1975 και το Department of Energy (D of E) το 1977.



Σχήμα 1.4: Η μηχανή Stirling P-40 από την United Stirling.

Η επιτυχής λειτουργία της P σειράς της United Stirling που χρησιμοποιούσε τον στρόφαλο Ricardo U-crank οδήγησε στο ενδιαφέρον πολλών ευρωπαϊκών και αμερικανικών εταιρειών. Αυτοί ενδιαφέρθηκαν για εφαρμογές εκτός της αυτοκίνησης, όπως ηλεκτρικές γεννήτριες από ηλιακή ενέργεια, μηχανές υποβρυχίων και τηλεκατευθυνόμενοι ηλεκτροκινητήρες με στερεό καύσιμο. Στην πραγματικότητα τόσες πολλές εταιρείες και οργανισμοί ασχολήθηκαν που ήταν πλέον αδύνατον να καταγράψει κάποιος όλα τα επιτεύγματα. Συμφωνίες με εταιρείες και πανεπιστήμια υπογράφηκαν στην Μεγάλη Βρετανία και την Ιαπωνία και μέχρι το τέλος του 1978 πάνω από 100 ομάδες ήταν γνωστό ότι μελετούσαν τη μηχανή Stirling.

Οι μηχανές ελευθέρου εμβόλου άρχισαν να αναπτύσσονται εκείνη την εποχή και τόσο η εφαρμογή του Harwell όσο και αυτή του Beale βρήκαν εμπορική απήχηση.

1978 – σήμερα

Η έρευνα των Ford – Philips και του Department of Energy τερματίστηκε το 1978 αφού οι συνθήκες δεν ήταν ιδανικές για τις μηχανές Stirling και το κυρίως πρόγραμμα της αυτοκίνησης απασχολούσε ήδη μεγάλες εταιρείες όπως η Mechanical Technologies, η United Stirling και η GM. Ο οργανισμός έρευνας πάνω στην μηχανή Stirling αυξήθηκε τρομερά αλλά η εξέλιξη πραγματοποιείται με τον συνδυασμό των τεχνολογιών και όχι με τη διαφορά και την συνεχή καινοτομία. Δεν μπορούμε να πούμε ότι δεν έγιναν σημαντικές ανακαλύψεις το διάστημα αυτό, το αντίθετο. Η εξέλιξη σε όλα τα μέτωπα θα γίνει πιο παραγωγική από τη στιγμή που σε όλα τα προγράμματα καθοριστεί μια και σαφής εφαρμογή.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Urieli, I., and Berchowitz, D.M. Stirling Cycle Engine Analysis. Bristol, England: Adam Hilger, 1984

Walker, G. Stirling Cycle Machines. Oxford, England: Oxford University Press, 1973

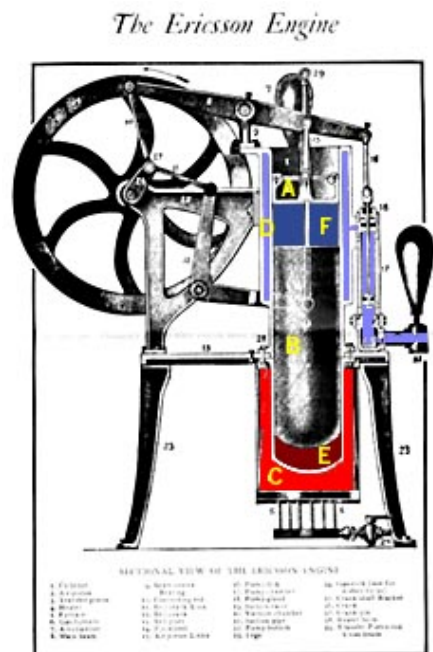
Walker, G. Stirling Cycle Machines. Oxford, England: Oxford University Press, 1980

Αντωνάκος Γεώργιος, Θερμοδυναμική ανάλυση μηχανών ισχύος Stirling, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2001

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

Ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ STIRLING

Όπως είπαμε, η πρώτη μηχανή Stirling κατασκευάστηκε από τον σκωτσέζο ιερέα Robert Stirling το 1816. Ένα τμήμα του αρχικού σχεδίου όπως το παρουσίασε το 1917 στο επιστημονικό περιοδικό της εποχής “*The Engineer*” ο *Finkelstein* φαίνεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Η μηχανή Stirling όπως εμφανίστηκε σε επιστημονικό περιοδικό της εποχής (“*The Engineer*” 1907)

Για τους λόγους που έχουμε είδη αναφέρει, ήταν μια από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις μέχρι τότε σε αυτόν τον τομέα της επιστήμης και τεχνολογίας. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι ο *Sadi Carnot* παρουσίασε την θεωρία του *Reflection on the Motive Power of Fire* το 1824, ενώ ο *Joule* καθόρισε το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας και έτσι έθεσε τις βάσεις για την διατύπωση του 1^{ου} θερμοδυναμικού νόμου μόλις το 1849.

Η καινούργια μηχανή Stirling παρουσίαζε πολλές καινοτομίες με αντίστοιχα μηχανικά επιτεύγματα της εποχής. Όπως:

- i. Δεν χρησιμοποιούσε βαλβίδες ή θυρίδες για την εισαγωγή και εξαγωγή του εργαζόμενου μέσου.
- ii. Λειτουργούσε σε έναν κλειστό κύκλο, δηλαδή το εργαζόμενο μέρος μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ξανά και ξανά. Αυτό επέτρεπε την ελάχιστη πίεση του κύκλου λειτουργίας να είναι λίγο μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, με αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του παραγομένου έργου. Ο Stirling κατάφερε να υλοποιήσει αυτά τα σχέδιά του στην πιο πετυχημένη μηχανή που κατασκεύασε, το 1846.
- iii. Το έμβολο ισχύος βρισκόταν απομονωμένο στο κρύο άκρο της μηχανής.
- iv. Εισήγαγε έναν «οικονομητήρα» (τώρα είναι γνωστός ως «αναγεννητής») για την αποθήκευση θερμότητας κατά τη διάρκεια μιας φάσης του κύκλου λειτουργίας και ξαναχρησιμοποίησης της κατά την διάρκεια του υπόλοιπου μέρους του κύκλου. Αυτό το συγκεκριμένο γεγονός ήταν η μεγαλύτερη συνεισφορά της ανακάλυψης αυτής. Τα επόμενα 100 χρόνια πολλές «ανακαλύψεις» είδαν το φως της δημοσιότητας χωρίς να αναγνωρίζουν την σημαντική αξία του αναγεννητή, του οποίου την χρησιμότητα είχε αμέσως αναγνωρίσει ο Stirling. Ο αναγεννητής βοήθουσε στην βελτίωση της απόδοσης του κύκλου λειτουργίας.

Ο Stirling οραματίστηκε μια μηχανή που να λειτουργεί συνεχώς, και όλη η προσδιδόμενη θερμότητα να μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο. Αυτό μπορούσε μόνο θεωρητικά να συμβεί, αφού το αρχικό σχέδιο δεν περιελάμβανε ψύκτη αλλά μόνο αναθερμαντή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.

Η θεωρία του Carnot αναφέρει ότι οι μηχανές που λειτουργούν στις ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες θα έχουν και τον ίδιο βαθμό απόδοσης, ο οποίος θα είναι βέβαια πάντα μικρότερος από τον ιδανικό βαθμό απόδοσης Carnot (Carnot 1824).

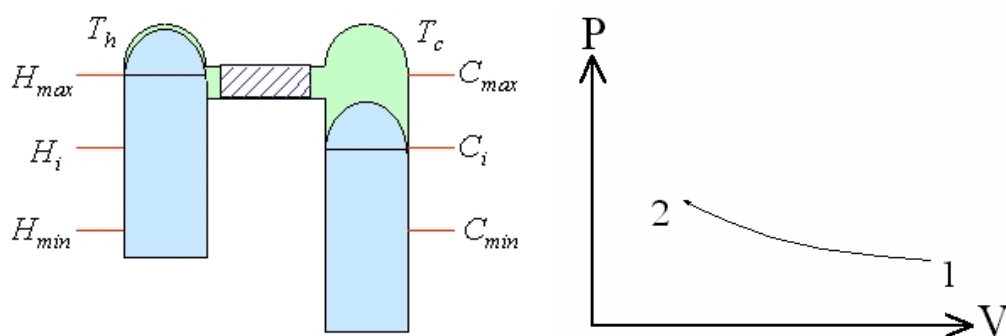
Αυτό το αξίωμα αποδείχθηκε από τους *Clasius* και *Kelvin* και ήταν η βάση για τον 2^ο θερμοδυναμικό νόμο. Η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας θεωρείται ως ισοθερμοκρασιακή. Έτσι οι δύο θερμοκρασίες που αναφέρονται

από τον Carnot είναι η υψηλή θερμοκρασία στην οποία η θερμότητα προστίθεται αντιστρεπτά και η χαμηλή θερμοκρασία στην οποία η θερμοκρασία απορρίπτεται αντιστρεπτά επίσης. Η διαδικασία που συνδέει την προσαγωγή με την απόρριψη της θερμότητας, πρέπει να είναι αδιαβατική .

Ο ιδανικός κύκλος Stirling επίσης ικανοποιεί τις απαιτήσεις αντιστρεπτής λειτουργίας του Carnot και περιγράφεται στα σχήματα 2.2 έως 2.5.

1. Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση

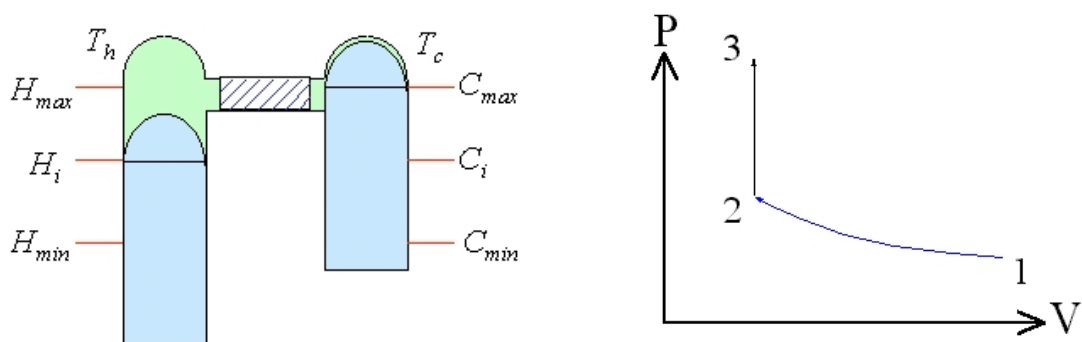
Το «κρύο» έμβολο κινείται προς τα πάνω σε μια τυχαία θέση (C_i) συμπιέζοντας το αέριο, το οποίο ταυτοχρόνως κινείται προς τον αναγεννητή με σταθερή χαμηλή θερμοκρασία T_c (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση

2. Ισόογκη θέρμανση

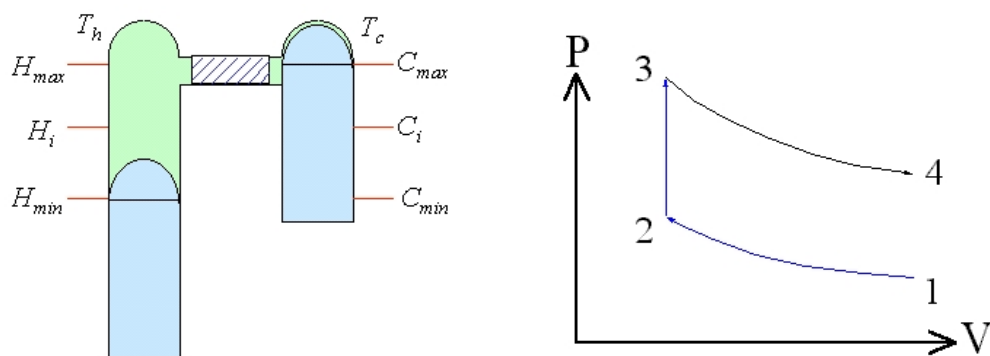
Το «κρύο» έμβολο εξακολουθεί και κινείται προς την ίδια κατεύθυνση μέχρι το άνω νεκρό σημείο (Α.Ν.Σ.), σημείο (C_{max}). Το «θερμό» έμβολο, ταυτοχρόνως κινείται προς τα κάτω (δηλαδή στην αντίθετη κατεύθυνση ώστε να διατηρείται ο όγκος σταθερός) και βρίσκεται σε μια τυχαία θέση (H_i). Έτσι το εργαζόμενο μέσο διέρχεται μέσα από τον αναγεννητή. Από τον προηγούμενο κύκλο λειτουργίας είχε αποθηκευτεί στον αναγεννητή θερμότητα και καθώς το εργαζόμενο μέσω διέρχεται από αυτόν αυξάνεται η θερμοκρασία του. Καθώς ο όγκος παραμένει σταθερός, η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου προκαλεί και αύξηση της πίεσης του (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Ισόογκη θέρμανση

3. Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση

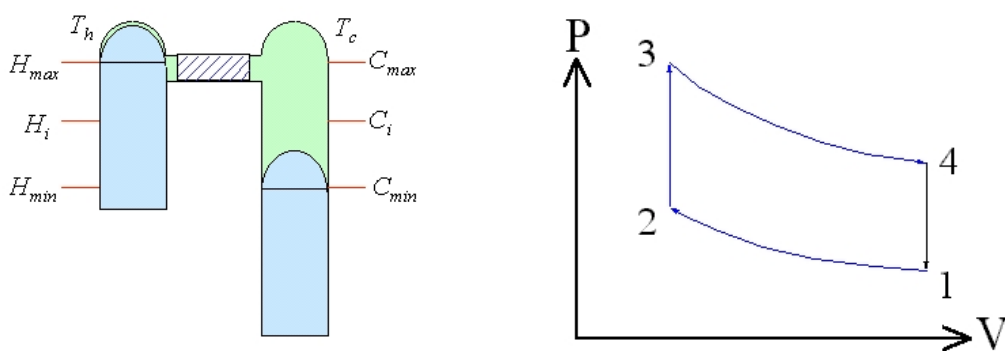
Το αέριο βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία (T_h) και εκτονώνεται. Στην εκτόνωση το «θερμό» έμβολο ωθείται προς τα κάτω, στο κάτω νεκρό σημείο (Κ.Ν.Σ.), το (H_{min}).



Σχήμα 2.4: Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση

4. Ισόογκη ψύξη

Το «θερμό» έμβολο κινείται τώρα προς την υψηλότερη θέση του (Α.Ν.Σ.) και το «κρύο» έμβολο συγχρόνως κινείται προς το Κ.Ν.Σ. διατηρώντας τον όγκο σταθερό. Το εργαζόμενο μέσο αποδίδει θερμότητα στο πλέγμα του αναγεννητή καθώς διέρχεται από αυτόν. Άρα καθώς ο όγκος μένει σταθερός, η πίεση του μειώνεται. Η θερμότητα αυτή αποθηκεύεται στον αναγεννητή ώστε να αποδοθεί ξανά στο εργαζόμενο μέσο καθώς αυτό θα ξαναπεράσει από εκεί στον επόμενο κύκλο και στη φάση της ισοθερμοκρασιακής συμπίεσης.



Σχήμα 2.5: Ισόογκη ψύξη

Παραγόμενο έργο

Το παραγόμενο έργο σε κάθε κύκλο λειτουργίας της μηχανής είναι το εμβαδόν που περικλείεται από τη κλειστή μεταβολή στο P-V διάγραμμα του σχήματος 2.5. Εδώ σημειώνεται ότι στο διάγραμμα αυτό το συνολικά παραγόμενο έργο μπορεί να θεωρηθεί ως η διαφορά του παραγόμενου κατά την εκτόνωση έργου μείον το απαιτούμενο κατά την συμπίεση έργο. Το παραγόμενο κατά την εκτόνωση έργο ισούται με το εμβαδόν του χωρίου που καθορίζεται από τις μεταβολές 2-3, 3-4 και 4-1, αν οι γραμμές 2-3 και 4-1 προεκταθούν μέχρι να «κόψουν» τον άξονα του όγκου V. Το απαιτούμενο έργο συμπίεσης ισούται με το εμβαδόν του χωρίου που βρίσκεται κάτω από την μεταβολή 1-2 και μέχρι τον άξονα του όγκου V. Το αποτέλεσμα είναι φυσικά η επιφάνεια που περικλείεται από τις μεταβολές 1-2, 2-3, 3-4, 4-1. Έτσι όσο πιο πολλούς κύκλους στον χρόνο πραγματοποιεί η μηχανή τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η παραγόμενη ισχύς της.

Παρ' όλα αυτά είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσεγγίσουμε την ισοθερμοκρασιακή μεταβολή του εργαζόμενου μέσου με χρήση συμβατών εναλλακτών θερμότητας. Οι αναγεννητές από την άλλη μεριά παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης της τάξης του 98%. Γι' αυτό προτείνεται η χρήση ξεχωριστών εναλλακτών (ψύκτες και αναθερμαντές). Είναι εύκολο λοιπόν να φανταστούμε ότι ο ιδανικός κύκλος Stirling να αποτελείται από δύο ισοθερμοκρασιακές μεταβολές, μία για κάθε εναλλάκτη θερμότητας και δύο ισόογκες μεταβολές, μία σε κάθε εργαζόμενο χώρο.

Ικανότητα απόδοσης της μηχανής Stirling

Καύσιμο - οικολογική θεώρηση

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η μηχανή Stirling, μπορεί να χρησιμοποιήσει θερμότητα με οποιαδήποτε, μορφή από κάποια εξωτερική πηγή. Παραδείγματα τέτοιων πιθανών πηγών είναι:

1. Θερμότητα από καύση αερίου ή υγρού καυσίμου, κάρβουνου, βιομάζας από οργανικά σώματα σε αποσύνθεση.
2. Ηλιακή θερμότητα όταν συνδυάζεται από ηλιακούς συλλέκτες.
3. Αποθηκευμένη ενέργεια, π.χ. θερμικές μπαταρίες λίθου φθορίου.
4. Θερμότητα από πυρηνική ενέργεια, είτε από ραδιοϊσότοπο είτε από φυσικό πυρηνικό καύσιμο.

Αν χρησιμοποιείται καύση από φυσικό καύσιμο, η διαδικασία λαμβάνει χώρα έξω από τη μηχανή και σε ατμοσφαιρική πίεση σε ένα θάλαμο με θερμά τοιχώματα. Μια διαδικασία συνεχούς καύσης (όπως την εστία ενός ατμοπαραγωγού ή στο θάλαμο καύσης μιας στροβιλομηχανής) είναι ευκολότερο να ελεγχθεί από μια μη συνεχή καύση (διαδικασία καύσης σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης). Έτσι μπορούμε να πετύχουμε επίσης και καλύτερη ποιότητα καύσης. Παρόλα αυτά οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται όταν εφαρμόζεται συνεχής καύση (1800 – 2000 βαθμούς °C) οδηγούν σε μεγάλα ποσοστά παραγόμενων NO_x. Τα οξειδία του αζώτου (NO_x) είναι από τους κυριότερους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές και η προσπάθεια για μείωσή τους είναι ένα από τα κυριότερα πεδία μελέτης των ερευνητών πάνω στη μηχανή Stirling.

Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι μείωσης των παραγόμενων NO_x από την καύση υδρογονανθράκων:

- a) Μείωση της θερμοκρασίας καύσης
- b) Μείωση του χρόνου παραμονής του καυσίμου μίγματος στον θάλαμο καύσης.

Η πρώτη περίπτωση είναι από πρακτικής άποψης η πλέον εύκολα εφαρμόσιμη. Μια μέθοδο μείωσης της θερμοκρασίας της καύσης (άρα και των

επιπέδων παραγόμενων NO_x) αναπτύχθηκε από την Kockum στις αρχές της δεκαετίας του '80 και βασίστηκε σε μέθοδο ανακυκλοφορίας των καυσαερίων. Αυτή η μέθοδος ονομάστηκε «Καύση Ανακυκλοφορούντος Αερίου» (*Combustion*

Gas Recirculation - - (CGR)) και εφαρμόστηκε στις μηχανές Stirling χωρίς μεταβολή της απόδοσης τους.

Η πραγματική αντιμετώπιση του προβλήματος των NO_x , σε συνδυασμό με τα εξαισία χαρακτηριστικά της συνεχόμενης καύσης δείχνει ότι η μηχανή Stirling με χρήση φυσικού καύσιμου είναι ένας κινητήρας αρκετά οικολογικός. Παρόλα αυτά διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) εξακολουθεί και υπάρχει στα καυσαέρια και συμβάλλει δραστικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Απόδοση

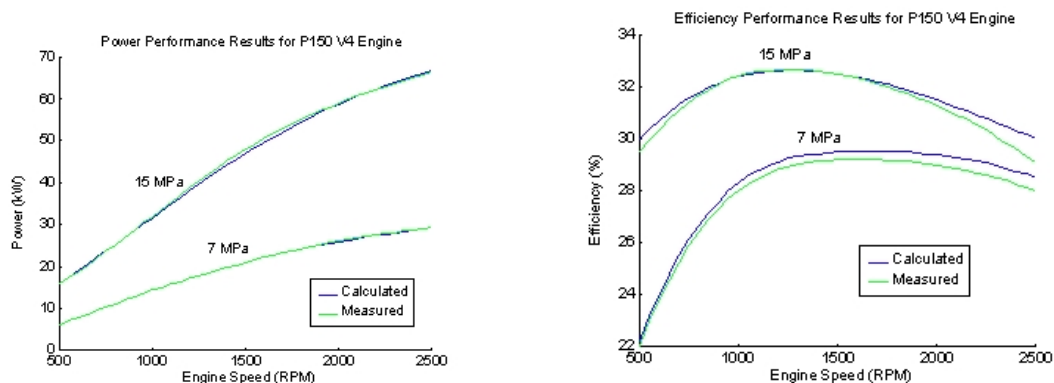
Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης σε όλες μηχανές που λειτουργούν βάσει αντιστρέψιμου θερμοδυναμικού κύκλου, είναι ο ίδιος και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (βαθμός απόδοσης Carnot).

$$\eta = 1 - \frac{T_{\psi}}{T_{\theta}}$$

όπου T_{θ} και T_{ψ} είναι οι θερμοκρασίες της θερμής και της ψυχρής πηγής αντίστοιχα.

Ο βαθμός απόδοσης μια πραγματικής μηχανής είναι πάντα μικρότερος από την παραπάνω ποσότητα, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρητικά πάντα εξαρτάται από την διαφορά μεταξύ των T_{ψ} και T_{θ} .

Η United Stirling δημοσίευσε για την μηχανή P150 V4 engine2 αποτελέσματα για την παραγόμενη ισχύς και του βαθμού απόδοσης για δύο διαφορετικά επίπεδα πίεσης (σχήμα 2.6). Σημειώνεται ότι οι μετρήσιμες και οι αναμενόμενες τιμές πλησιάζουν αρκετά. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι 32% με 70° C ψυχρής πηγής T_{ψ} , που πετυχαίνεται με κάποιο ψυκτικό υγρό.



Σχήμα 2.6: Παραγόμενη ισχύς και βαθμός

απόδοσης για τη μηχανή P150 V4 για δύο διαφορετικά επίπεδα πίεσης.

Έλεγχος ισχύος

Η παραγόμενη ισχύς από μια μηχανή Stirling μπορεί να αλλάξει μεταβάλλοντας την θερμοκρασία, την πίεση, το μήκος σάρωσης των εμβόλων, τη διαφορά φάσης, τον επιζήμιο όγκο, την ταχύτητα και το φορτίο. Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Η United Stirling επέλεξε να ελέγξει την παραγόμενη ισχύ της μηχανής της αλλάζοντας την πίεση του εργαζόμενου μέσου μέσα στην μηχανή. Από την εξίσωση:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

όπου: R = η παγκόσμια σταθερά των αερίων

n = ο αριθμός των mole του εργαζόμενου αερίου

P = η πίεση

T = η θερμοκρασία

V = ο όγκος

Φαίνεται ότι όταν αυξάνουμε την πίεση του αερίου και αν αυξηθεί και το n, τότε και οι λόγοι P/T και V/T αυξάνονται επίσης. Μεγαλύτερες τιμές αυτών των λόγων οδηγούν σε διάγραμμα P-V με μεγαλύτερη επιφάνεια που σχηματίζεται από τη μεταβολή της κατάστασης του εργαζόμενου αερίου και έτσι παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα έργου.

Αντίστοιχα το παραγόμενο έργο μειώνεται μειώνοντας την πίεση του εργαζόμενου μέσου.

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μηχανής

Πλεονεκτήματα:

- i. Δυνατότητα επιλογής και χρήσης πολλών ειδών καυσίμου: μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε καύσιμο σαν εξωτερική πηγή θερμότητας.
- ii. Πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου: οι μηχανές Stirling δεν έχουν βαλβίδες εισαγωγής εξαγωγής ούτε περιοδική έκρηξη και γι' αυτό δεν παράγεται πολύ θόρυβος.
- iii. Μικρές απαιτήσεις σε μόνωση και λίπανση: τα προϊόντα της καύσης δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τα κινούμενα εξαρτήματα της μηχανής. Γι' αυτό δεν μολύνεται το λιπαντικό όπως συμβαίνει με τις μηχανές Diesel και Otto. Το μεγαλύτερο πρόβλημα λίπανσης στις μηχανές εσωτερικής καύσης είναι η λίπανση της περιοχής του ελατηρίου συμπίεσης του πιστονιού που απομονώνει τον χώρο καύση από τον στροφαλοθάλαμο. Το σοβαρό αυτό πρόβλημα δεν υπάρχει στις μηχανές Stirling. Τα ελατήρια του εμβόλου βρίσκονται γειτονικά σε τοιχώματα που ψύχονται και λειτουργούν σε θερμοκρασίες κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος . Έχουν σκοπό να απομονώσουν το αέριο ώστε να μην μολύνεται από λάδι το οποίο είναι επίσης κοντά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αν απαιτείται ελαφριά λίπανση μπορεί να γίνει με χρήση νερού ως λιπαντικό, αντί για το καθιερωμένο λάδι. Αυτό μπορεί να επιφέρει επανάσταση σε μερικά από τα προβλήματα στεγανότητας που εμφανίζονται μερικές φορές. Παρόλα αυτά χρειάζονται περαιτέρω μελέτη και έρευνα. Μερικές αρχικές προσπάθειες πάντως έχουν πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα.
- iv. Χαρακτηριστικά σταθερής φόρτισης: όπως και οι μηχανές Diesel ο βαθμός απόδοσης των μηχανών Stirling μένει λίγο ή πολύ σταθερός για μεγάλες μεταβολές του φορτίου. Μάλιστα ο βαθμός απόδοσης της Stirling αυξάνεται με μείωση της

ταχύτητας, με τη μέγιστη τιμή να παρουσιάζεται στο $1/3$ της ταχύτητας που αντιστοιχεί στην μέγιστη παραγόμενη ισχύ.

- v. Μεγάλη ποικιλία μορφών: τα θεμελιώδη στοιχεία της μηχανής Stirling είναι δύο χώροι, ένας θερμός χώρος εκτόνωσης και ένας ψυχρός χώρος συμπίεσης, οι οποίοι συνδυάζονται με τρεις εναλλάκτες θερμότητας : τον αναθερμαντή, τον αναγεννητή, τον ψύκτη. Αυτά τα ξεχωριστά απλά στοιχεία μπορούν να πάρουν διάφορες μορφές ανάλογα με τη χρήση και την εφαρμογή της μηχανής.

Μειονεκτήματα:

- i. Κόστος: είναι αναμφίβολα το κυριότερο μειονέκτημα. Φαίνεται πως είναι δύσκολο να κατασκευάσουμε μηχανή Stirling που να στοιχίζει το λιγότερο διπλάσιο από μία Diesel με την ίδια παραγόμενη ισχύ. Το μεγάλο αυτό κόστος προσδιορίζεται στην κατασκευή των εναλλακτών θερμότητας. Η θερμική απόδοση της μηχανής είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου λειτουργίας. Γι' αυτό για να διατηρήσουμε τον βαθμό απόδοσης σε μια ικανοποιητική τιμή (30%) θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ακριβά υλικά για τα θερμά μέρη (όπως ανοξείδωτος χάλυβας ή κράματα υψηλών θερμοκρασιών). Παρόλα αυτά οι μηχανές Stirling δεν έχουν τόσο μεγάλο βαθμό απόδοσης. Η καλύτερη μηχανή Stirling μόλις που φτάνει το βαθμό απόδοσης μιας μέσης μηχανής Diesel (35%). Ένας άλλος παράγοντας που αυξάνει το κόστος παραγωγής της μηχανής Stirling είναι το γεγονός ότι το σύστημα ψύξης που χρησιμοποιεί απαιτείται να έχει διπλάσια θερμοχωρητικότητα από μια αντίστοιχης ισχύος μηχανής εσωτερικής καύσης. Επίσης, ενώ στις μηχανές Diesel ο βαθμός απόδοσης τους αυξάνει καθώς αυξάνει η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού, στις μηχανές Stirling αντίστοιχα μειώνεται η απόδοση.

- ii. Στεγανωτικά (seals): Οι μηχανές Stirling χρειάζονται στεγανωτικά για να μη διαρρεύσει το εργαζόμενο μέσο και να αποφευχθεί η είσοδος του λιπαντικού στον κύλινδρο. Η χρήση ελαφρών αερίων (Υδρογόνο) σε υψηλές ταχύτητες και πιέσεις (20 bar) επιβαρύνει τα προβλήματα διαρροής του εργαζόμενου μέσου. Από τα στεγανωτικά απαιτούνται τα εξής:
- a) Να αποδίδουν ικανοποιητικά όταν χρησιμοποιούνται αέρια με μικρό μοριακό βάρος σε υψηλές πιέσεις.
 - b) Να μη χρειάζονται λίπανση
 - c) Να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής
 - d) Να μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα από μη ειδικευμένο προσωπικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Urieli, I., and Berchowitz, D.M. Stirling Cycle Engine Analysis. Bristol, England: Adam Hilger, 1984

Walker, G. Stirling Cycle Machines. Oxford, England: Oxford University Press, 1973

Walker, G. Stirling Cycle Machines. Oxford, England: Oxford University Press, 1980

Αντωνάκος Γεώργιος, Θερμοδυναμική ανάλυση μηχανών ισχύος Stirling, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2001

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING

Βασική τεχνολογική θεώρηση

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε στον θερμοδυναμικό κύκλο πάνω στον οποίο στηρίζεται η λειτουργία των μηχανών Stirling και στην απόδοσή του. Επίσης αναφερθήκαμε και στις μηχανικές διαφοροποιήσεις που αναπτύχθηκαν από τους ερευνητές στο πέρασμα των χρόνων. Στο κεφάλαιο αυτό θα μιλήσουμε για το πως μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αυτόν το θερμοδυναμικό κύκλο, καθώς και να περιγράψουμε περιληπτικά τα κυριότερα αντιπροσωπευτικά δείγματα κατασκευαστικών ιδιοτεροτήτων και εφαρμογών των μηχανών αυτών.

Η βασική ιδέα είναι η εξής: όταν ένα αέριο είναι κλεισμένο σε έναν κύλινδρο και μετακινείται στο θερμό μέρος του κυλίνδρου, διαστέλλεται, αυξάνεται η πίεσή του και μπορεί να παράγει έργο. Αντίθετα, όταν το αέριο πηγαίνει στο κρύο μέρος του κυλίνδρου, ψύχεται και συστέλλεται μέχρι να φτάσει στον αρχικό του όγκο. Το αέριο παράγει περισσότερο έργο κατά την εκτόνωσή του από αυτό που χρειάζεται για την συμπίεσή του. Έτσι η διαφορά των δύο αυτών έργων κατά την διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας είναι το καθαρό παραγόμενο έργο.

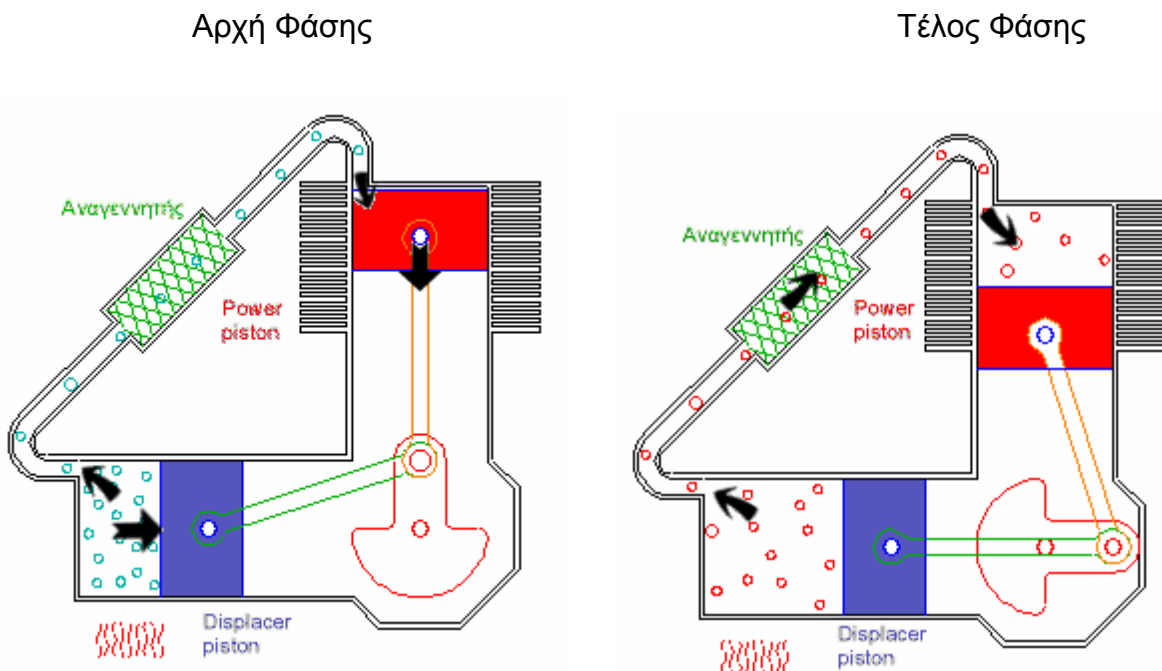
Ο κύκλος λειτουργίας που ακολουθεί μια μηχανή Stirling έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην πράξη μπορούμε να πούμε ότι ένας θερμοδυναμικός κύκλος Stirling περιλαμβάνει τέσσερις φάσεις:

1. Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση (expansion)
2. Ισόογκη ψύξη (transfer)
3. Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (contraction)
4. Ισόογκη θέρμανση (transfer)

1. Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση (expansion)

Στο σημείο αυτό το μεγαλύτερο μέρος του εργαζόμενου αερίου μέσα στο κλειστό σύστημα έχει οδηγηθεί μέσα στο θερμό κύλινδρο. Το αέριο θερμαίνεται και εκτονώνεται οδηγώντας και τα δύο έμβολα προς τα μέσα (στο σχήμα μας το έμβολο του θερμού κυλίνδρου προς τα δεξιά ενώ του ψυχρού κυλίνδρου προς τα κάτω).

Η γωνιακή εκτροπή του στρόφαλου μετρούμενη από την κατακόρυφη και με δεξιόστροφη φορά διαγραφής στην αρχή της φάσης είναι μηδέν. Στο τέλος της φάσης ο στρόφαλος στις 90° .



Σχήμα 3.1 : Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση

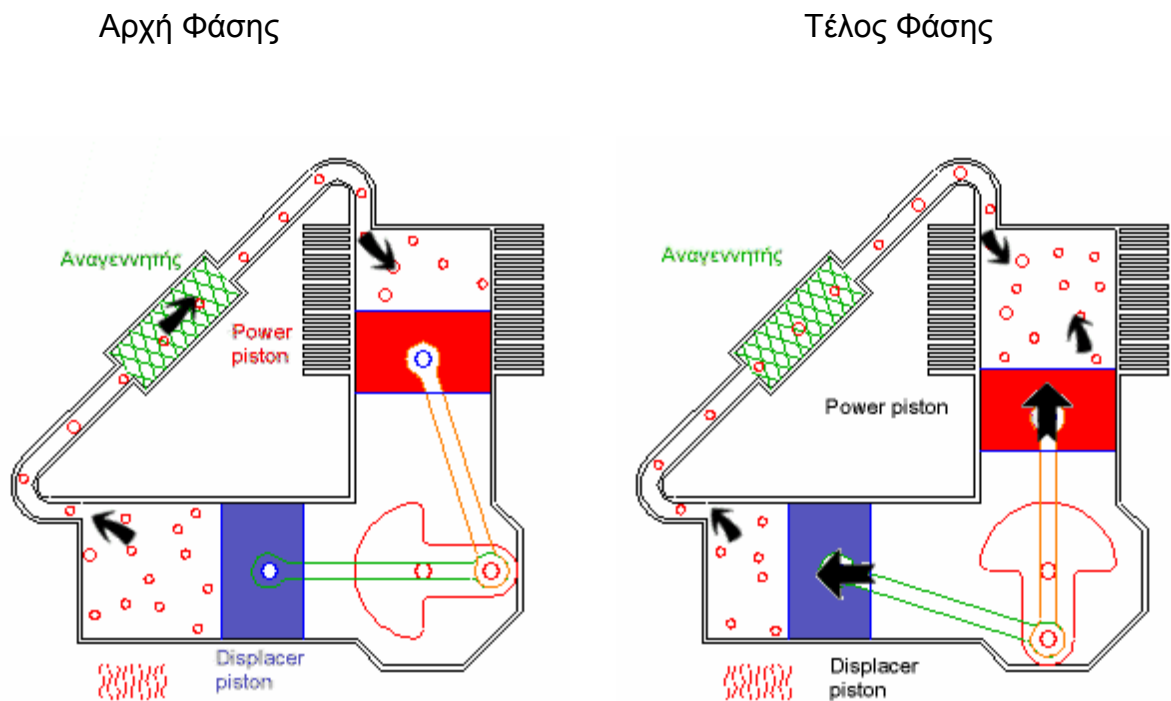
2. Ισόογκη ψύξη - μεταφορά θερμής μάζας (transfer)

Στο σημείο αυτό, το αέριο έχει εκτονωθεί (στο σχήμα μας περίπου τρεις φορές σε σχέση με τον αρχικό του όγκο). Το περισσότερο αέριο (περίπου τα 2/3 του) βρίσκονται ακόμα στο θερμό κύλινδρο και το ένα τρίτο στον κρύο κύλινδρο.

Ο όγκος στο θερμό κύλινδρο είναι μέγιστος.

Καθώς μεταφέρεται θερμός όγκος αερίου από το θερμό στον κρύο κύλινδρο, αποθηκεύεται ποσό θερμότητας στον αναγεννητή (regenerator).

Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος στις 90° ενώ στο τέλος στις 180°.



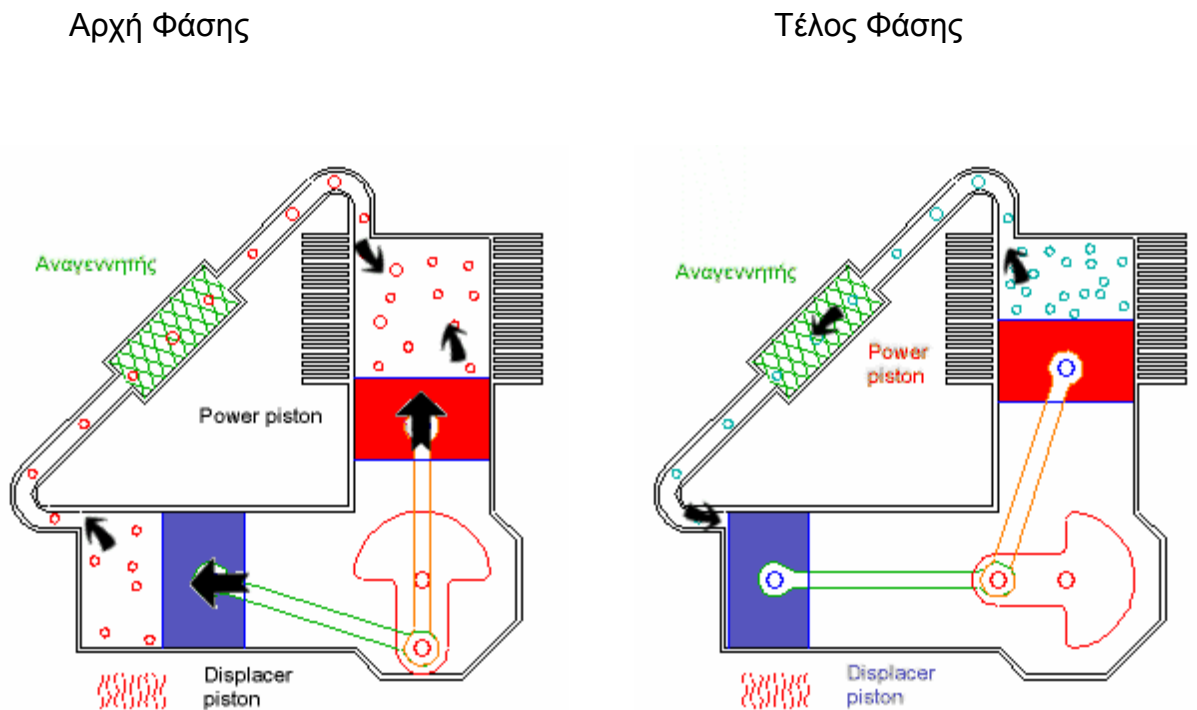
Σχήμα 3.2 : Ισόογκη ψύξη

3. Συστολή - Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση (contraction)

Τώρα το μεγαλύτερο μέρος του εργαζόμενου θερμού αερίου, που έχει εκτονωθεί, έχει μεταφερθεί στον κρύο κύλινδρο. Το αέριο ψύχεται και συστέλλεται, μαζεύοντας και τα δύο έμβολα προς το εσωτερικό των κυλίνδρων τους (στον κάτω αριστερό κύλινδρο προς τα αριστερά ενώ στον πάνω κύλινδρο προς τα πάνω).

Ο αναγεννητής συνεχίζει να απορροφά θερμότητα από το εργαζόμενο αέριο καθώς αυτό περνά από το θερμό προς το ψυχρό κύλινδρο.

Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος στις 180° ενώ στο τέλος στις 270° .



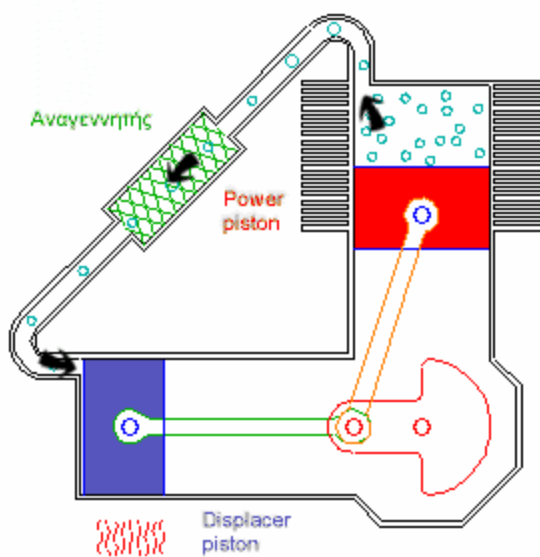
Σχήμα 3.3 : Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση

4. Ισόογκη θέρμανση - μεταφορά ψυχρής μάζας (transfer)

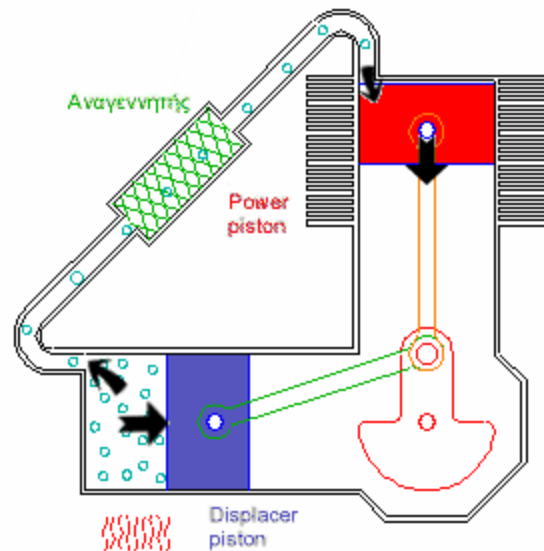
Τώρα το αέριο που έχει ήδη συσταλεί βρίσκεται κυρίως στον κρύο κύλινδρο. Ο στρόφαλος στρέφεται ακόμη κατά 90° αναγκάζοντας το αέριο να επιστρέψει στον θερμό κύλινδρο και να συμπληρωθεί ο κύκλος.

Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος στις 270° ενώ στο τέλος στις 360° .

Αρχή Φάσης



Τέλος Φάσης



Σχήμα 3.4 : Ισόογκη θέρμανση

Έτσι η αρχική ιδέα θερμοδυναμικής παραγωγής έργου έχει πραγματοποιηθεί και κατά τη χρονική διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας έχει παραχθεί μια καθαρή ποσότητα έργου.

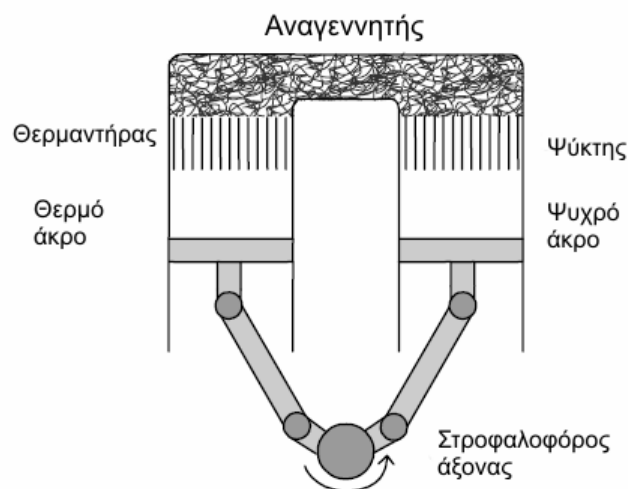
Για αυτές τις τέσσερις διαδοχικές φάσεις λειτουργίας, πρέπει να προστίθεται συνεχώς θερμότητα στο θερμό εναλλάκτη από κάποια εξωτερική πηγή, όπως καύση ή κάποιο ηλιακό συλλέκτη και ο ψυχρός εναλλάκτης θα πρέπει να ψύχεται συνεχώς από κάποιο ρεύμα αέρα ή νερού.

Τώρα θα πρέπει να αναρωτηθούμε πώς οι κινήσεις του εμβόλου ισχύος και του displacer συνεργάζονται αφού είναι σίγουρο ότι δεν μπορούν να κινηθούν από μόνα τους. Η απάντηση είναι ότι υπάρχουν τουλάχιστον δύο τρόποι με τους οποίους πετυχαίνουμε την επιθυμητή κίνηση των εμβόλων. *Πρώτον:* μπορούμε να τα συνδέσουμε με κάποιο στρόφαλο μέσω διωστήρων, όπως γίνεται στις μηχανές των αυτοκινήτων και *Δεύτερον:* μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις πιέσεις από το αέριο σε ένα σύστημα πολύ καλά και προσεχτικά σχεδιασμένο, το οποίο είναι εφοδιασμένο με ελατήρια συμπίεσης, με το displacer να προπορεύεται πάντα από το έμβολο ισχύος στην παλινδρόμηση τους. Δηλαδή υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ του εκτοπιστή (displacer) και του εμβόλου ισχύος (power piston). Από τις δύο αυτές μεθόδους, αυτή με τον στρόφαλο ονομάζεται “crank- drive” ή “kinematic Stirling” και είναι η πιο κατανοητή. Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιεί την παλινδρόμηση των εμβόλων με τη βοήθεια ελατηρίων, ονομάζεται “free-piston Stirling”. Η crank-drive Stirling είναι πιο δύσκολη στην κατασκευή αλλά πιο εύκολη στην κατανόηση, ενώ η “free piston Stirling” το αντίθετο.

Σχεδιαστικές διαφοροποιήσεις

Τύπος Άλφα (A)

Αποτελείται από δύο ή περισσότερα έμβολα, συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο να παλινδρομούν με συγκεκριμένη διαφορά φάσης. Το εργαζόμενο αέριο διέρχεται από τον ψύκτη, τον αναγεννητή και τον θερμαντήρα καθώς παλινδρομεί μέσα στους κυλίνδρους. Κάθε έμβολο έχει τον δικό του κύλινδρο. Όλες οι μηχανές τύπου A είναι κινηματικές.

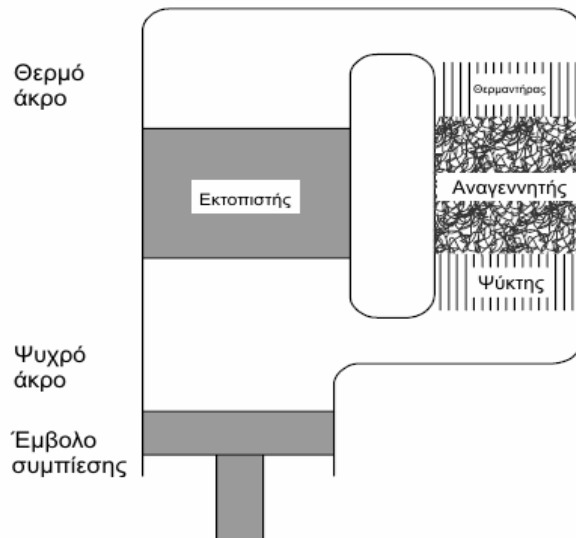


Σχήμα 3.5: Διάταξη A-τύπου

Τύπος Βήτα (B)

Εδώ τόσο το έμβολο συμπίεσης και το έμβολο εκτόνωσης βρίσκονται στον ίδιο κύλινδρο. Το έμβολο εκτόνωσης κινεί το εργαζόμενο αέριο από το θερμό στο ψυχρό άκρο της μηχανής και αντίστροφα. Το θερμό άκρο είναι ο χώρος εκτόνωσης και το ψυχρό άκρο είναι ο χώρος συμπίεσης. Καθώς το εργαζόμενο μέσο παλινδρομεί, περνά μέσα από τον ψύκτη, τον αναγεννητή και τον θερμαντήρα.

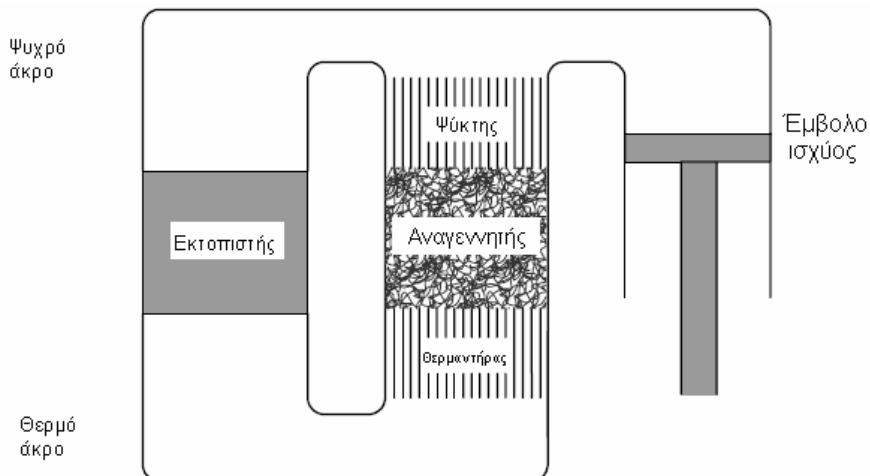
Οι μηχανές τύπου B μπορεί να είναι κινηματικές καθώς και ελευθέρου εμβόλου.



Σχήμα 3.6: Διάταξη Β-τύπου

Τύπος Βήτα (Γ)

Σε αυτόν τον τύπο, το έμβολο εκτόνωσης και το έμβολο συμπίεσης βρίσκονται σε διαφορετικούς κυλίνδρους. Το έμβολο εκτόνωσης ωθεί το εργαζόμενο αέριο να παλινδρομεί μεταξύ του θερμού και του κρύου άκρου της μηχανής. Με τον τρόπο αυτό το εργαζόμενο αέριο περνά μέσα από τους εναλλάκτες. Οι μηχανές Stirling Γ τύπου μπορεί να είναι είτε με κινηματικό μηχανισμό κίνησης των εμβόλων ή ελευθέρου εμβόλου.



Σχήμα 3.7: Διάταξη Γ-τύπου

Τύποι μηχανών Stirling

Crank – drive Stirling Engine

Μια σχηματική αναπαράσταση μιας τέτοιας μηχανής φαίνεται στα προηγούμενα σχήματα . Παρά το γεγονός ότι η μηχανή είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την παραγόμενη ισχύς, είναι πολύ εύκολη στην κατασκευή της και στην λειτουργία της. Δεν χρειάζεται λάδι στον στροφαλοφόρο (είναι πολύ σημαντικό το ότι δεν έχουμε λάδι στο θερμό μέρος της μηχανής γιατί η τυχόν παρουσία του θα μπορούσε να εμποδίσει την ροή του αερίου μέσα από τους εναλλάκτες και πιθανόν θα οδηγούσε σε έκρηξη).

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω τρία είδη τριβέων (ρουλεμάν): κυλινδρικά ρουλεμάν, σφαιρικά ρουλεμάν, τριβέας χωρίς λίπανση από πλαστικό όπως Teflon.

Αν η μηχανή δουλεύει σε μικρή υπερπίεση, της τάξης των λίγων ατμοσφαιρών, χρησιμοποιείται απλός στροφαλοθάλαμος για να διατηρείται ο αέρας στο εσωτερικό με μια μικρή αντλία αέρα για να διατηρηθεί σταθερή η πίεση από τυχόν απώλειες από το περίβλημα του στροφάλου. Η αντλία αέρα, όπως και όλα τα άλλα εξαρτήματα που χρειάζονται ενέργεια, παίρνουν κίνηση απ' ευθείας από τον στρόφαλο.

Τα άλλα εξαρτήματα που χρειάζονται ενέργεια από τον στροφαλοφόρο είναι: το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου, ο ανεμιστήρας αέρα καύσης, η αντλία ψυκτικού νερού και ο ανεμιστήρας του ψύκτη.

Simple Free- Piston Engine

Στο σχήμα 2.12 φαίνεται μια free- piston engine χαμηλής συχνότητας. Αυτή η μηχανή είναι η πιο απλή Stirling. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης δεν είναι μόνο το γεγονός ότι ξεκινάει εύκολα μόνη της (χρειάζεται μόνο μια ικανοποιητική διαφορά πίεσης μεταξύ της θερμής και ψυχρής πλευράς του κυλίνδρου), και ανταποκρίνεται σε οποιαδήποτε φορτίο. Έτσι η μηχανή είναι αξιόπιστη και εύκολη στη λειτουργία της. Το μεγάλο της μειονέκτημα είναι το πολύ μεγάλο μέγεθος της σε σχέση με την παραγόμενη ισχύς. Αυτό συμβαίνει επειδή χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα ως εργαζόμενο μέσο και λειτουργεί σε πολύ χαμηλές συχνότητες. Αντιστάθμισμα αυτού του μειονεκτήματος είναι ο πολύ καλός βαθμός απόδοσής της.

Free – piston engine

Αυτός ο τύπος διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα της μηχανής με στροφαλοφόρο και επιπλέον είναι πολύ πιο απλή στην κατασκευή του. Επίσης επειδή δεν έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον δεν μπορεί να πάθει κάποια ζημιά από αυτό. Η free – piston engine δεν είναι παρά μια παλινδρομική μηχανή, γι' αυτό πρέπει να έχει έναν μηχανισμό μετατροπής της παλινδρομικής κίνησης σε περιστροφική, όπως κάποιο οδοντωτό τροχό ή κάποιο ολοκληρωμένο σύστημα κιβωτίου ταχυτήτων. Υπάρχουν περιπτώσεις που είναι αναγκαία η παλινδρομική κίνηση, όπως στην περίπτωση άντλησης νερού. Σε τέτοιες εφαρμογές οι free – piston είναι η καλύτερη επιλογή.

Η ισχύς λαμβάνεται από έναν έμβολο που παλινδρομεί, που κινείται σε αντίδραση της κίνησης του βαρέως εμβόλου. Το displacer κινείται λόγω της διαφοράς πίεσης στην διεύθυνση που του καθορίζει ο διωστήρας του, που είναι συνδεδεμένος με το έμβολο.

Η free – piston μηχανή όπως και όλοι οι τύποι Stirling, μπορούν να λειτουργούν με οποιαδήποτε πηγή θερμότητας. Χρησιμοποιώντας σύστημα οδοντωτών τροχών μπορεί να λειτουργήσει με οποιοδήποτε φορτίο.

Η free – piston μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν παλινδρομητής και λειτουργήσει σαν αντλία υγρών αλλά και σαν συμπιεστής αερίων. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως αντλία ψύξης για τρόφιμα, σαν ψυκτική μηχανή κ.λ.π.

Το ξεκίνημα μιας τέτοιας μηχανής μπορεί να γίνει αυτόματα, αν η μηχανή είναι τοποθετημένη κατακόρυφα, διαφορετικά μία μίζα είναι αναγκαία για να δοθεί η εκκίνηση. Στη συνέχεια η κίνηση θα διατηρείται όσο θα διατηρείται η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμού και του ψυχρού μέρους του κυλίνδρου. Η απαιτούμενη θερμοκρασία είναι από 400 °C έως 700 °C στο θερμό μέρος και περίπου 100 °C στο ψυχρό μέρος.

Καθώς υπάρχουν μόνο δύο κινούμενα μέρη μέσα στον κύλινδρο, η free – piston μηχανή είναι πολύ πιο εύκολα να περιγραφεί στο χαρτί από την αντίστοιχη με στρόφαλο. Επίσης καθώς η free – piston είναι ερμητικά κλειστή, μπορούμε να ανεβάσουμε την πίεση λειτουργίας της, ας πούμε στις 15 atm, κάνοντάς την πολύ συμπαγή και φτηνή για την παραγόμενη ισχύ.

Διπλή μηχανή Stirling

Η διπλή μηχανή Stirling είναι μία ψυκτική μηχανή. Δηλαδή, παραλαμβάνει θερμότητα και παράγει ψύξη χωρίς να δημιουργεί κανένα άλλο εξωτερικό αποτέλεσμα. Είναι πολύ απλή, σχεδόν τόσο απλή όσο και η free – piston μηχανή για άντληση νερού και είναι οικονομική σε καύσιμο, βέβαια με σωστό σχεδιασμό.

Η βασική ιδέα της διπλής μηχανής Stirling είναι όταν λειτουργεί να λειτουργεί ταυτόχρονα και αντλία θερμότητας. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με τρία κινούμενα μέρη: το θερμό displacer, το έμβολο ισχύος που λειτουργεί ως έμβολο ισχύος τόσο για την μηχανή Stirling όσο και για την αντλία θερμότητας και το ψυχρό displacer.

Αυτός ο συνδυασμός των στοιχείων δημιουργεί μια πολύ απλή και αποδοτική αντλία θερμότητας, που μπορεί να σχεδιαστεί για κάθε μέγεθος και θερμοκρασιακό εύρος, από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες για την υγροποίηση αερίων όσο και για πιο ήπιες θερμοκρασίες όπως για κλιματισμό διαφόρων χώρων.

Η διπλή μηχανή Stirling τα επόμενα χρόνια μπορεί να προωθηθεί στην αγορά, πιθανότατα ως φορητή συσκευή για την ψύξη και κατάψυξη φαγητών σε μικρές βέβαια διαστάσεις.

Free piston alternator engine

Τελευταίες εξελίξεις στην έρευνα και βελτίωση των free piston μηχανών μας οδήγησαν στις free piston alternator engines που έχουν παρουσιάσει αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Η μοναδική αρκετά εξελιγμένη μηχανή αυτή τη στιγμή είναι μία 1kW ισχύος, που παρουσιάζει εξαιρετική εκμετάλλευση καυσίμου, ικανοποιητική διάρκεια ζωής και είναι πολύ συμπαγής. Αυτή η μηχανή δεν είναι απλή και απαιτεί συστηματική επιμέλεια τόσο στην μελέτη όσο και στην επιλογή και επεξεργασία των υλικών. Από την άλλη πλευρά, λόγω του ερμητικά κλεισμένου κελύφους της δεν μπορεί να πάθει κάποια ζημιά από άσχημο χειρισμό, παρόλα αυτά το σύστημα ελέγχου και τα άλλα βοηθητικά εξαρτήματα είναι απαραίτητα.

Οι free piston alternator engine είναι ιδανική επιλογή για την παραγωγή ηλεκτρισμού με χρήση ηλιακής ενέργειας, ειδικά όταν συνδυαστεί με τον χαμηλού κόστους πλαστικό συλλέκτη που τώρα βγαίνει στην αγορά. Τέτοιου τύπου μηχανές σε λίγο θα φτάσουν σε μέγεθος τα 10 kW ισχύ και θα γίνουν ακόμα μεγαλύτερες τα επόμενα χρόνια.

Διαστάσεις

Οι διάμετροι του εμβόλου ισχύος και του displacer μπορούν να είναι ίδιες. Ο displacer μπορεί να έχει μήκος όση είναι και η διάμετρος του, με μια μέγιστη τιμή του μήκους τέσσερις φορές τη διάμετρό του και το τελικό καπάκι που κλείνει το χώρο εκτόνωσης πρέπει να έχει τη μορφή τρούλου ώστε να αντέχει περισσότερο στις καταπονήσεις από την παλινδρόμηση του εμβόλου. Η δίοδος (κενό – gap) μεταξύ του displacer και του κυλίνδρου πρέπει να είναι 1/100 ή 2/100 της διαμέτρου του κυλίνδρου, με μια προτίμηση στην μικρότερη δίοδο. Με σκοπό να διατηρούμε τον displacer κεντραρισμένο, διαμορφώνουμε μια προεξοχή στην περιφέρεια του displacer ώστε να μειωθεί αυτή η δίοδος και να στεγανοποιήσει τον κύλινδρο στο ψυχρό του μέρος.

Το μήκος του αναθερμαντή είναι περίπου το 1/4 της διαμέτρου του displacer και του ψύκτη περίπου ίση με αυτήν. Αυτό αφήνει το 1/2 του displacer να λειτουργεί ως αναγεννητής. Δηλαδή να συγκρατεί τη θερμότητα από το αέριο καθώς έρχεται από τον αναθερμαντή προς τον ψύκτη και να την προσδίδει ξανά στο αέριο καθώς επιστρέφει από τον ψύκτη προς τον αναθερμαντή. Αυτή η λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται πιο αποδοτική η επίδραση του καυσίμου στη μηχανή.

Το μήκος της κίνησης του displacer είναι περίπου το 1/3 του μήκους του.

Ο διωστήρας τέλος του displacer πρέπει να καλύπτει περίπου το 15 % της επιφάνειας του κυλίνδρου.

Υλικά

Το καλύτερο υλικό για το θερμό άκρο του displacer είναι ο ανοξειδωτος χάλυβας της σειράς St-300, όπως οι 304, 316 ή 321. Αυτοί ονομάζονται και ανοξειδωτοι τύπου 18-8 κυρίως στα είδη μαγειρικής. Το θερμό άκρο του κυλίνδρου του displacer πρέπει να κατασκευάζεται επίσης από ανοξειδωτο χάλυβα ή και από κεραμικό αν είναι αναγκαίο να κατασκευαστεί αεροστεγώς. Φυσικά αν δεν γίνεται αλλιώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο displacer και στον θερμαντή, απλός χάλυβας.

Ο displacer πρέπει να είναι αρκετά λεπτός. Μια βαλβίδα αντεπιστροφής είναι τοποθετημένη στο ψυχρό του μέρος ώστε το εσωτερικό του να φτάνει τη μέγιστη πίεση του κύκλου και να παραμείνει σε αυτήν. Διαφορετικά ο displacer θα παλινδρομούσε υπό πίεση. Είναι αναγκαίο να κατασκευάσουμε το κέλυφος του displacer αρκετά ανθεκτικό ώστε να μπορεί να παλινδρομεί αυτός κάτω από την εξωτερική πίεση. Θα πρέπει να φροντίζουμε να κατασκευάζουμε τον displacer όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ. Διαφορετικά θα ανταποκρίνεται πολύ αργά στις πιέσεις του εργαζόμενου αερίου και δεν θα καταφέρει να διατηρήσει την προπορεία σε σχέση με το έμβολο ισχύος, όπως απαιτεί η θεωρία αυτού του τύπου των μηχανών.

Τα άλλα μέρη της μηχανής μπορούν να κατασκευαστούν από σίδηρο, χάλυβα, αλουμίνιο, ή ό,τι είναι διαθέσιμο αρκεί να μην εκτίθεται σε θερμότητα.

Έξοδος ενέργειας

Μια απλή μηχανή Stirling ελευθέρων εμβόλων και με διάμετρο displacer 60 mm με συχνότητα 60 Hz, μπορεί να παράγει 500W ισχύος. Φυσικά η πραγματική τιμή είναι πολύ πιο χαμηλή.

Χρήσεις των μηχανών Stirling

- **Άρδευση με βιομάζα**

Τόσο η μηχανή Stirling με άτρακτο όσο και η ελευθέρου εμβόλου μπορούν να εφαρμοστούν για άρδευση με καύση βιομάζας. Περιγράφεται ότι η βιομάζα από μήλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο τόσο φτηνό όσο και οι εργάτες που θα απαιτούσαμε για να τροφοδοτούν με καύσιμο τη μηχανή ώστε να διατηρηθεί η λειτουργία της. Η μηχανή με στρόφαλο παράγει πρακτικά ισχύ 500 W για κάθε 10 kW προσφερόμενης ενέργειας, αλλά για παραγόμενη ισχύ πάνω από 3kW το κόστος επιβαρύνεται από την ανάγκη χρήσης κάποιου μηχανισμού μεταφοράς της προς καύση βιομάζας. Η μηχανή ελευθέρου εμβόλου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο βιομάζα μπορεί να αποτελέσει μια πολύ καλή αντλία θερμότητας μέχρι τα 500 W ισχύ.

- **Ηλεκτρικές γεννήτριες – Μικρά μεγέθη – Στερεό καύσιμο**

Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν και η μηχανή με στρόφαλο και η free piston alternator engine. Η τελευταία έχει το πλεονέκτημα της χαμηλής στάθμης θορύβου και της μεγάλης διάρκειας ζωής, αλλά είναι πολύ δύσκολη η επισκευή τους ειδικά εκτός εργαστηρίου. Η μηχανή με στρόφαλο είναι απλή, εύκολη στην επισκευή και φθηνότερη και μπορεί να επισκευαστεί πολύ εύκολα, παρόλα αυτά δεν είναι τόσο οικονομική στην κατανάλωση καυσίμου.

- *Ηλεκτρικές γεννήτριες – Ισχύς χωριού – Στερεό καύσιμο*

Και εδώ τα προαναφερθέντα δύο πρώτα είδη μηχανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια παραγόμενη ισχύ έως τα 100 kW. Για μεγαλύτερες παραγόμενες ισχύς οι μηχανές Stirling δεν έχουν ακόμα και για τα επόμενα χρόνια σημαντική απόδοση, αλλά μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους πολλές μικρού μεγέθους μηχανές για να συγκροτήσουν μία μεγάλη.

Για αυτή την εφαρμογή όμως χρειάζεται μια σταθερή ομάδα υποστήριξης για τον έλεγχο της σωστής τροφοδοσίας με καύσιμο και έλεγχο των υπολοίπων βοηθητικών διατάξεων.

Σημαντικά είναι και τα υποπροϊόντα όπως το ζεστό νερό από το σύστημα ψύξης της μηχανής και η στάχτη από τον καυστήρα.

- *Χρήση σπόρων για καύσιμο*

Αποτελεί ιδανική επιλογή εξαιτίας της μεγάλης διαθεσιμότητας της βιομάζας που θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμα για την μηχανή.

- *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια*

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η μηχανή Stirling είναι μία μηχανή υψηλών θερμοκρασιών. Δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά με ένα απλό επίπεδο συλλέκτη ηλιακής ενέργειας. Χρειάζεται έναν ενισχυμένο συλλέκτη που να ακολουθεί τη θέση του ήλιου. Αυτή η διάταξη επιβαρύνει σημαντικά το κόστος αλλά συντηρεί πολλά από τα εξαρτήματα της εγκατάστασης. Όμως αυτό το εξάρτημα χρειάζεται απευθείας πρόσπτωση της ηλιακής ακτίνας σ' αυτόν. Άρα όταν η ηλιοφάνεια δεν είναι αρκετή δεν λειτουργεί ικανοποιητικά. Γι'αυτό χρειάζεται καθαρός ουρανός ώστε να αναπτυχθεί η υψηλή θερμοκρασία που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της μηχανής Stirling. Για τους παραπάνω λόγους οι μηχανές με τη συγκεκριμένη διάταξη, είναι πολύ πιο ακριβές και χρειάζονται πολύ μεγαλύτερη προσοχή κατά την λειτουργία τους, σε σχέση με τις άλλες που χρησιμοποιούν κάποιο καύσιμο για πηγή θερμότητας.

Έτσι καταλαβαίνουμε ότι οι μηχανές αυτές είναι η τελευταία μας επιλογή, εκτός από τις περιπτώσεις που δεν έχουμε βιομάζα να καταναλώσουμε ή ο ήλιος είναι η μοναδική πηγή θερμότητας που διαθέτουμε (έρημος, μικρό γεωγραφικό πλάτος, διάστημα). Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι η χρήση μηχανής Stirling ελευθέρου εμβόλου με ηλιακό συλλέκτη είναι πολύ πιο οικονομική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την χρήση για τον ίδιο λόγο φωτοβολταϊκού συστήματος της ίδιας τάξης παραγόμενης ισχύος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε το γεγονός ότι παρ' όλο που οι μηχανές Stirling αυτού του τύπου υπάρχουν στην αγορά, οι συγκεκριμένοι απαιτούμενοι συλλέκτες χρειάζονται κάποια χρόνια ακόμα εξέλιξης. Γι' αυτό συμφέρουν οικονομικά μόνο σε περιπτώσεις που είναι η μόνη επιλογή (έρημος).

Όμως συχνά, τα συστήματα συλλογής ηλιακής ενέργειας είναι λιγότερο πρακτικά από τη χρήση βιομάζας, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την μηχανική άντληση νερού. Αυτό δείχνει ότι μια έκταση η οποία δεν θα μπορούσε να παράγει τίποτα, μπορεί τώρα να καλλιεργηθεί και να παράγει και τροφή και καύσιμο για την μηχανή που αντλεί το νερό. Επίσης η βιομάζα, σε αντίθεση με τον ήλιο, δεν κρύβεται πίσω από σύννεφα και δεν εξαφανίζεται τις νύχτες.

Ικανότητα καυσίμου και παραγόμενη ισχύς

Η μηχανή Stirling χρειάζεται να κάψει 10 κιλά (kg) ανά κιλοβατώρα (kWh) όταν χρησιμοποιεί βιομάζα ως καύσιμο και 6 kg/kWh όταν χρησιμοποιεί στερεό καύσιμο. Αυτή η κατανάλωση είναι πολύ μικρή σε σχέση με τους αντίστοιχους ατμοπαραγωγούς. Ανάλογα με το πως χρησιμοποιούμε τη μηχανή, η παραπάνω κατανάλωση μεταβάλλεται κατά 20% περίπου. Ενώ όταν έχουμε καλά σχεδιασμένη και σωστά χρησιμοποιημένη μηχανή, τότε η κατανάλωση πέφτει ακόμα και στο μισό από την προαναφερόμενη.

Η παραγόμενη ισχύς ανά μονάδα μάζας, ποικίλει ανάλογα με την σχεδίαση. Γενικά κυμαίνεται από 0.04 kW/Kg για ένα απλό μοντέλο με στρόφαλο και περίπου 0.07 kW/Kg για μια εμπορεύσιμη υψηλής τεχνολογίας ελευθέρου εμβόλου.

Συγκρίνοντας τα είδη μηχανών

Οι μηχανές Stirling έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να λαμβάνουν θερμότητα από οποιοσδήποτε πηγές θερμότητας της τάξης πάνω από 400 °C και να μετατρέπει μέρος αυτής της θερμότητας σε ωφέλιμο έργο. Το γεγονός αυτό τις κάνει εφαρμόσιμες σε πολλές περιπτώσεις. Ποιες όμως από αυτές είναι πρακτικά ικανές να συγκριθούν με άλλες συμβατικές πηγές μηχανικής ενέργειας;

Αν τα συμβατικά καύσιμα και οι μηχανές είναι διαθέσιμες και η λειτουργία τους είναι ικανοποιητική, τότε δεν μπορούμε να διανοηθούμε ότι θα αντικαταστήσουμε τη μηχανή αυτή με μια Stirling. Μόνο όταν το πετρέλαιο ή το diesel ή τα καθαρά αέρια καύσιμα είναι περιορισμένα ή ακριβά ή το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται να λειτουργήσει η μηχανή δεν μπορεί να δεχτεί τα καυσαέρια τους τότε η γνωστή μας μηχανή εσωτερικής καύσης και η μηχανή Diesel δεν είναι βιώσιμες και μπορούμε να σκεφτούμε την αντικατάστασή τους με μια μηχανή Stirling.

H μηχανή Stirling και ο ανταγωνισμός

Ο ανταγωνισμός με τη μηχανή εσωτερικής καύσης και τη Diesel.

Ο ανταγωνισμός για την μηχανή Stirling προσδιορίζεται στην μηχανή εσωτερικής καύσης (δηλαδή τις μηχανές με ανάφλεξη με τη βοήθεια αναφλεκτήρων, μηχανών Diesel, φυσικού αερίου κ.τ.λ.). Επίσης οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας και οι ατμοπαραγωγοί μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν και αυτοί στην κατηγορία των ανταγωνιστών της.

Η μηχανή Stirling θεωρείται ως η πλέον ενδεδειγμένη για απαιτούμενη ισχύ της τάξης των 100 έως 200 kW και ταυτοχρόνως είναι διαθέσιμες μεγάλες ποσότητες κάρβουνου ή βιομάζας ως καύσιμο. Όταν χρειάζεται να καταναλώσουμε υγρά ή αέρια καύσιμα τότε η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι πιο φθηνή για βραχύχρονη χρήση, ενώ για μακροχρόνια χρήση η μηχανή Stirling συμφέρει οικονομικά λόγω της φθηνής της συντήρησης και της μικρής κατανάλωσης καυσίμου.

Επειδή η μηχανή Stirling έχει βγει ξανά στο προσκύνιο τα τελευταία χρόνια, είναι δύσκολο να γίνει μια ολοκληρωμένη καταγραφή του κόστους για τα διάφορα είδη της μηχανής αυτής ξεχωριστά. *Φαίνεται όμως ότι η μηχανή Stirling είναι πιο ακριβή συγκρινόμενη με μια αντίστοιχης ποιότητας μηχανή εσωτερικής καύσης με μπουζί, όσο και με μια Diesel. Αλλά αντίθετα είναι πιο οικονομική στη συστήρησή τους και είναι πολύ πιο απλή.*

Η γεννήτρια παραγωγός αερίου ως ανταγωνιστής της Stirling.

Η «γεννήτρια παραγωγός αερίου» είναι διάταξη μηχανής που χρησιμοποιεί βιομάζα και την μετατρέπει σε καύσιμο αέριο. Οι μηχανές που χρησιμοποιούν παραγωγό αερίου, μπορούν να αντικαταστήσουν μια μηχανή εσωτερικής καύσης που καίει βενζίνη ή diesel ώστε να λειτουργεί μόνο με την καύση του αερίου που παράγεται από την διάταξη αυτή, αλλά χρειάζεται και μια μικρή ποσότητα του συμβατικού καυσίμου για την ανάφλεξη και την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος. Καθώς ο συνδυασμός αυτός στην πράξη κάνει την ίδια δουλειά με μια μηχανή Stirling (δηλαδή παράγει μηχανική ισχύ καίγοντας ξύλο ή άλλη βιομάζα), θα αναρωτηθεί κάποιος «καλά, η

μηχανή Stirling παρουσιάζει κάποιο πλεονέκτημα απέναντι σε αυτό τον συνδυασμό γεννήτριας παραγωγού αερίου και μηχανής εσωτερικής καύσης.

Η απάντηση είναι **ναι**.

Η μηχανή Stirling παρουσιάζει τρία πλεονεκτήματα:

a) Μπορεί να κάψει καύσιμα ακόμα και με πολύ υψηλά ποσοστά τέφρας, όπως οι φλούδες ρυζιού, τα οποία δεν μπορεί να κάψει η γεννήτρια παραγωγός αερίου.

b) Από τη στιγμή που τα προϊόντα της καύσης δεν εισέρχονται μέσα στη μηχανή Stirling, δεν χρειάζεται καθαρισμό και συχνή συντήρηση (σταμάτημα της λειτουργίας της) σε αντίθεση με την παραγωγό αερίου μηχανή εσωτερικής καύσης.

c) Η μηχανή Stirling σε συνδυασμό με κάποιον απλό μικρό καυστήρα, είναι ένα πολύ πιο απλό και σταθερό ανεξάρτητο σύστημα παραγωγής έργου από τον συνδυασμό γεννήτριας παραγωγού αερίου – συστήματος καθαρισμού – μηχανής εσωτερικής καύσης.

Η μηχανή Stirling λοιπόν υπερισχύει της γεννήτριας παραγωγού αερίου αν το καύσιμο που χρησιμοποιείται δεν είναι υψηλής ποιότητας, όπως οι φλούδες ρυζιού, και αν το κόστος για το σύστημα ανάφλεξης, το σύστημα λίπανσης, και των άλλων απαραίτητων συστημάτων για μια μηχανή εσωτερικής καύσης είναι πολύ υψηλό καθώς και όταν η παραγωγός αερίου γεννήτρια παρουσιάζει προβλήματα, όπως συνήθως συμβαίνει.

Σύγκριση ατμομηχανής και μηχανής Stirling

Είναι λογικό να σκεφτούμε την μηχανή ατμού σαν φυσικό ανταγωνιστή της μηχανής Stirling αφού έτσι ήταν την εποχή που ο αιδασημότατος Stirling ανακάλυψε την μηχανή του. Εκείνη την εποχή η ατμομηχανή ήταν η κυρίαρχη μηχανή παραγωγής ισχύος και παράλληλα αν και η νέα μηχανή ήταν πιο οικονομική, ήταν το ίδιο πιθανό να εκραγεί όσο και η ατμομηχανή. Ωστόσο εκείνη την εποχή το μεγάλο μειονέκτημα της μηχανής Stirling ήταν η μικρή αντίσταση στην θερμότητα που παρουσίαζε το μέταλλο (σίδηρος) της κεφαλής της.

Σήμερα η κατάσταση έχει διαφοροποιηθεί. Η ατμομηχανή έχει τεθεί σε παροπλισμό και η μηχανή Stirling έχει εξελιχθεί σε απόδοση, διάρκεια ζωής και διάθεση στην αγορά. Χρησιμοποιώντας ανοξειδωτο χάλυβα κατηγορίας St-300, ένα πολύ κοινό υλικό, εξαλείφεται και ο κίνδυνος αστοχίας της κεφαλής του αναθερμαντή, τουλάχιστον μέχρι τους 700 °C, που φτάνει η μηχανή όταν χρησιμοποιεί ένα κοινό στερεό καύσιμο. Είναι επίσης κατορθωτό να κατασκευάσουμε την κεφαλή του αναθερμαντή από κεραμικό υλικό, ειδικά για μηχανές με χαμηλές πιέσεις λειτουργίας καθώς και σε απλές μηχανές ελευθέρου εμβόλου.

Τέλος για εφαρμογές λίγων δεκάδων kW, η μηχανή Stirling είναι πολύ πιο οικονομική και απλή στη λειτουργία, πολύ πιο απλή άρα και πιο φτηνή στην κατασκευή της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Urieli, I., and Berchowitz, D.M. Stirling Cycle Engine Analysis. Bristol, England: Adam Hilger, 1984

Walker, G. Stirling Cycle Machines. Oxford, England: Oxford University Press, 1973

Walker, G. Stirling Cycle Machines. Oxford, England: Oxford University Press, 1980

Αντωνάκος Γεώργιος, Θερμοδυναμική ανάλυση μηχανών ισχύος Stirling, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2001

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Συστήματα συμπαραγωγής με χρήση μηχανών Stirling

Τα αποκεντρωμένα συστήματα συμπαραγωγής έχουν αναγνωριστεί διεθνώς σαν μία αποδοτική μέθοδος μείωσης των εκπομπών CO₂. Η πολιτική επιλογή μείωσης κατά 25% των εκπομπών CO₂ μέχρι το 2025 σύμφωνα με τις σημερινές συνθήκες, απαιτεί τον διπλασιασμό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από συστήματα συμπαραγωγής (CHP). Μεγάλη τάση χρήσης συστημάτων συμπαραγωγής υπάρχει για συστήματα μικρής ισχύος 5 – 10 kW_{el}, τα οποία σχεδιάζονται για αντίστοιχα θερμικά φορτία.

Η μηχανή Stirling, όπως ανακαλύφθηκε περίπου 2 αιώνες πριν, παρουσιάζει μερικά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά αποκέντρωσης της παραγωγής ισχύος. Για το λόγω αυτό η ιδέα χρήσης μηχανών Stirling έχει επανέλθει τόσο σαν θέμα συζήτησης όσο και ως αντικείμενο έρευνας. Οι σύγχρονες μηχανές Stirling είναι συνήθως εγκαταστάσεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια μιας ηλεκτρογεννήτριας.

Σε αντίθεση με τις μηχανές Otto και Diesel, οι μηχανές Stirling, έχουν ερμητικά κλειστούς κυλίνδρους με κάποια εξωτερική πηγή θερμότητας. Είναι ανεξάρτητες από τη μορφή της πηγής θερμότητας καθώς και από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιήσουν πετρέλαιο, βενζίνη ακόμα και ανανεώσιμα καύσιμα όπως βιομάζα ή ηλιακή θερμότητα.

Τα κατάλοιπα της καύσης δεν εισέρχονται μέσα στη μηχανή. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη φθορά και τελικά σε μεγάλα διαστήματα συντήρησης.

Οι μηχανές Stirling που εφαρμόζονται σε μικρές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής παρουσιάζουν τα παρακάτω σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής:

- Τα διαστήματα συντήρησης κυμαίνονται από 5000 μέχρι τις 10000 ώρες λειτουργίας, πολύ μεγαλύτερα από τις μηχανές Otto. Το γεγονός αυτό μειώνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας.
- Οι εκπομπές αερίων των καυστήρων που χρησιμοποιούνται σήμερα στις μηχανές Stirling, είναι τουλάχιστον 10 φορές μικρότερες από

κινητήρες Otto αερίου με καταλυτικό μετατροπέα. Οι τιμές των ρύπων συγκρίνονται μόνο με την τεχνολογία των σύγχρονων καυστήρων αερίου.

Οι μηχανές Stirling παρουσιάζουν μια ευκαιρία για συνεχή οικολογική και οικονομική εξέλιξη των συστημάτων συμπαραγωγής, ειδικά για μικρές μονάδες με καθαρή τάση ανάπτυξης. Η φιλική ως προς το περιβάλλον εικόνα των συστημάτων συμπαραγωγής ταιριάζει με τη λειτουργία των μηχανών Stirling.

Οικονομική & οικολογική συμπεριφορά των εγκαταστάσεων συμπαραγωγής μηχανών Stirling

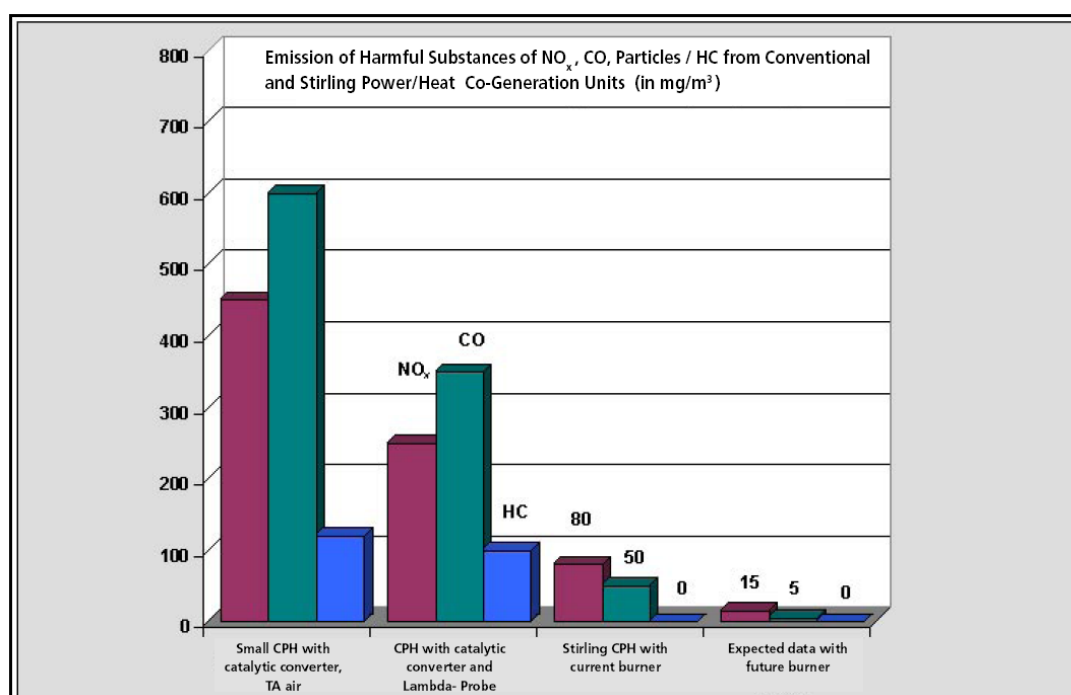
Οι εγκαταστάσεις συμπαραγωγής είναι χαρακτηρίζονται από μεγάλη απόδοση, εξοικονομούν σημαντική ποσότητα ενέργειας και παρουσιάζουν μειωμένους ρύπους CO₂. Με το σωστό σχεδιασμό της διάταξης, η λειτουργία της είναι πολύ οικονομική. Συστήματα με ικανότητα μέχρι το 50 kW_{el} με χρήση κινητήρων Diesel, Otto και αερίου χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές παγκοσμίως. Παρόλα αυτά η τάση είναι στην παραγωγή αντίστοιχης ισχύος από αποκεντρωμένες μονάδες. Οι μονάδες αυτές θα πρέπει να έχουν ικανότητα μερικών kW_{el}. Είναι σχεδιασμένες για συγκεκριμένο θερμικό φορτίο και για μεγάλες περιόδους λειτουργίας. Με τις συμβατικές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής, το αρχικό υψηλό κόστος κτίσης πρέπει να αποσβεσθεί σε μερικά χρόνια. Αυτό απαιτεί συνεχή και αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που να ξεπερνά τις 5000 ώρες ετησίως.

Τα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να εφαρμοστούν σε:

- Οικιακές εφαρμογές, όπως η κεντρική θέρμανση.
- Πισίνες.
- Μικρές βιομηχανίες και βιοτεχνίες.
- Ξενοδοχεία.

Βάση της μέχρι σήμερα εμπειρίας, το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για εγκαταστάσεις διαφορετικών ικανοτήτων παραγωγής ισχύος και περιόδων λειτουργίας σε σχέση με το κόστος του αερίου, έχοντας αφαιρέσει την επιστροφή φόρου του Γερμανικού Κράτους για τη χρήση συστημάτων συμπαραγωγής.

Στη μηχανή Solo Stirling CPH 161, χρησιμοποιείται καυστήρας FLOX (Flameless Oxidation - άφλογη οξειδωση). Ο αέρας προθερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες για καλής ποιότητας καύση. Γι' αυτό το λόγο οι εκπομπές ρύπων είναι πολύ χαμηλές. Με τη βοήθεια ενός εναλλακτικού συστήματος ανακυκλοφορίας των καυσαερίων, ο προθερμασμένος αέρας καύσης και το καύσιμο αναφλέγονται ξανά, ώστε να περιοριστεί η μέγιστη θερμοκρασία οξειδωσης σε τιμή μικρότερη των 1400°C. Η διαδικασία αυτή μειώνει δραστικά τη δημιουργία οξειδίων του αζώτου. Η συνεχής καύση είναι στην πραγματικότητα πιο καθαρή σε σχέση με την περιοδική καύση που πραγματοποιείται στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, κατ' επέκταση οι εκπομπές ρύπων είναι σημαντικά χαμηλότερες συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες συμβατικών εγκαταστάσεων συμπαραγωγής με Μ.Ε.Κ..



Σχήμα 4.1: Σύγκριση εκπομπών ρύπων διαφόρων συστημάτων συμπαραγωγής CHP

Λόγω του υψηλού επιπέδου προθέρμανσης του αέρα καύσεως, το επίπεδο των ρύπων είναι πολύ χαμηλό μόλις λίγα χιλιογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο .

Σημαντικές υποθέσεις κατά το σχεδιασμό εγκαταστάσεων συμπαγωγής Stirling

Για το σχεδιασμό εγκαταστάσεων Stirling CHP, δύο ειδικά χαρακτηριστικά των μηχανών αυτών πρέπει να ληφθούν υπόψη:

Ο θερμικός κύκλος Stirling λειτουργεί μεταξύ δύο θερμοκρασιακών επιπέδων. Η παραγόμενη ισχύς καθώς και ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από το επίπεδο της θερμότητας με την οποία τροφοδοτούμε τη μηχανή καθώς επίσης και από το ποσό της θερμότητας που αποβάλλεται. Η θερμοκρασία του θερμαντήρα πρέπει να είναι όσο πιο υψηλή μπορεί, στη συγκεκριμένη περίπτωση η θερμοκρασία αυτή είναι περίπου 700 βαθμοί Κελσίου. Η θερμοκρασία του ψύκτη κατά τον κύκλο Stirling πρέπει να είναι όσο πιο χαμηλή γίνεται. Αυτή καθορίζεται από τη θερμοκρασία του νερού το οποίο θα θερμάνει. Μια θερμοκρασιακή διαφορά μόνο δέκα βαθμών 10C μας οδηγεί σε βελτίωση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης κατά 1% και παραγωγή επιπλέον ισχύος περίπου 350W. Ο ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης βελτιώνεται λόγω της βελτιωμένης συμπίκνωσης των καυσαερίων στον αντίστοιχο εναλλάκτη θερμότητας. Για την ψύξη της μηχανής μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό δικτύου με θερμοκρασία ακόμα και 15C. Η θερμοκρασία του ψυκτικού νερού είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την διαδικασία της συμπίκνωσης μέσα στον εναλλάκτη καυσαερίων.

Κατά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης μεγάλη μάζα μετάλλου και αερίου είναι απαραίτητο να θερμανθεί τόσο στον θάλαμο καύσης όσο και στον θερμαντήρα και στον αναγεννητή. Αυτό καθιστά τη διαδικασία της θέρμανσης και την επίτευξη της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας να διαρκεί αρκετά λεπτά της ώρας. Κατά το κλείσιμο της εγκατάστασης ένα μόνο μέρος ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για αυτό είναι προτιμότερο τέτοιου είδους εγκαταστάσεις να σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν χωρίς διακοπή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Installation and operation instructions Stirling 161 micro CHP module”: Solo Stirling GmbH, version 4.2, March 2005.

«Θερμοδυναμική ανάλυση μηχανών ισχύος Stirling» Αντωνάκος Γεώργιος, , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2001

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

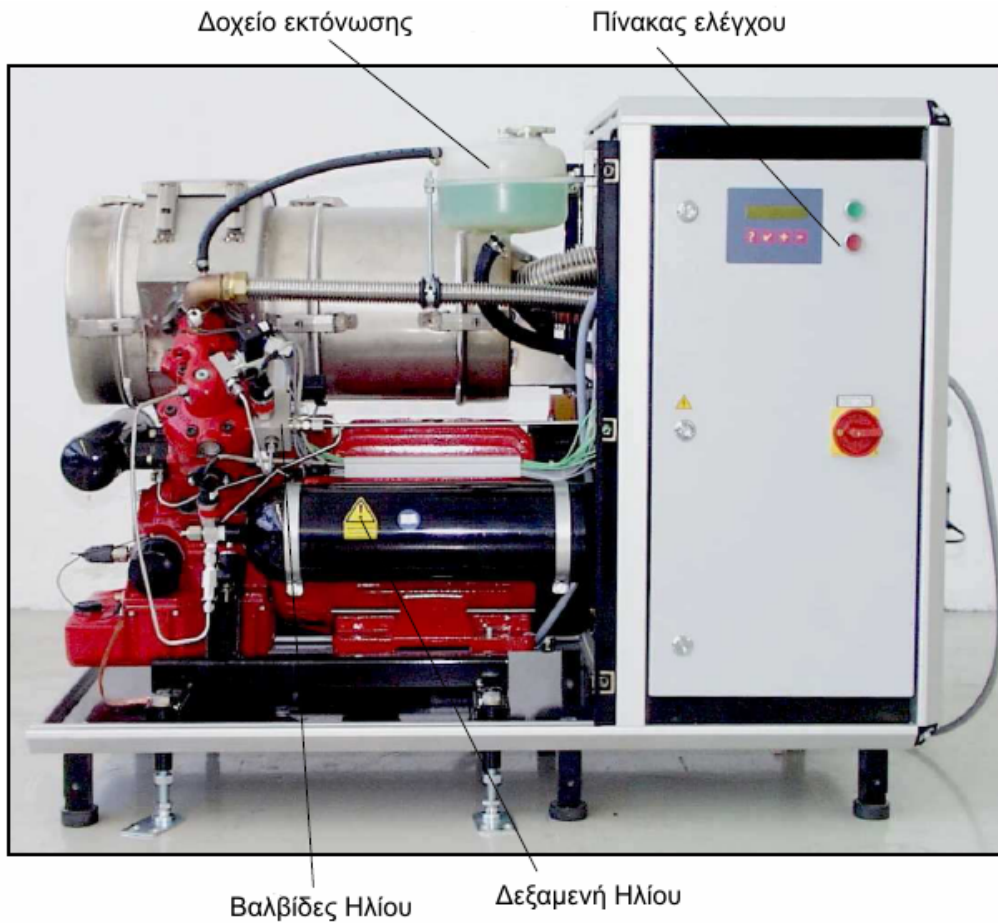
Σχεδιαστικές αρχές της SOLO STIRLING 161 - microCPH-Module

Η εγκατάσταση συμπαραγωγής SOLO STIRLING V161 - microCPH-Module αποτελείται από τις ακόλουθες κύριες και δευτερεύουσες διατάξεις:

- Όλο το πλαίσιο της ομάδας λειτουργεί ως θερμικός και ηχητικός μονωτής. Επίσης αποτρέπει οποιαδήποτε επαφή με τα καυτά μέρη της μηχανής και βοηθάει στη συλλογή οποιουδήποτε είδους διαρροής υγρού ή λαδιού.
- Η μηχανή είναι εγκατεστημένη στο μπροστινό μέρος του πλαισίου με την ηλεκτρική γεννήτρια να συνδέεται άμεσα με αυτήν. Η φιάλη αποθήκευσης του He είναι επίσης συνδεδεμένη με τη μηχανή σε αυτή την περιοχή.



Σχήμα 5.1: Εγκατάσταση συμπαραγωγής Stirling Solo CHP V161.



Σχήμα 5.2: Εγκατάσταση συμπαραγωγής Solo CHP Stirling

- Ο θάλαμος καύσης και ο καυστήρας είναι τοποθετημένα ακριβώς επάνω στην μηχανή και στην ηλεκτρική γεννήτρια. Το πίσω μέρος του πλαισίου περιλαμβάνει τους διακόπτες του ηλεκτρικού συστήματος. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει επίσης το ηλεκτρονικό σύστημα και το σύστημα συλλογής δεδομένων και μετρήσεων.
- Δίπλα σε αυτό, βρίσκεται ο εναλλάκτης θερμότητας των καυσαερίων, ο οποίος στο σχήμα 5.1 και 5.2 δεν είναι ορατός.
- Κάτω από τον εναλλάκτη θερμότητας των καυσαερίων βρίσκεται ένας πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας και μια αντλία κυκλοφορίας του ψυκτικού νερού για το εσωτερικό σύστημα ψύξης της μηχανής.

Η γραμμή τροφοδοσίας του φυσικού αερίου είναι εγκατεστημένη στον πίσω τοίχωμα. Όλες οι συνδέσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε αυτή την πλευρά.

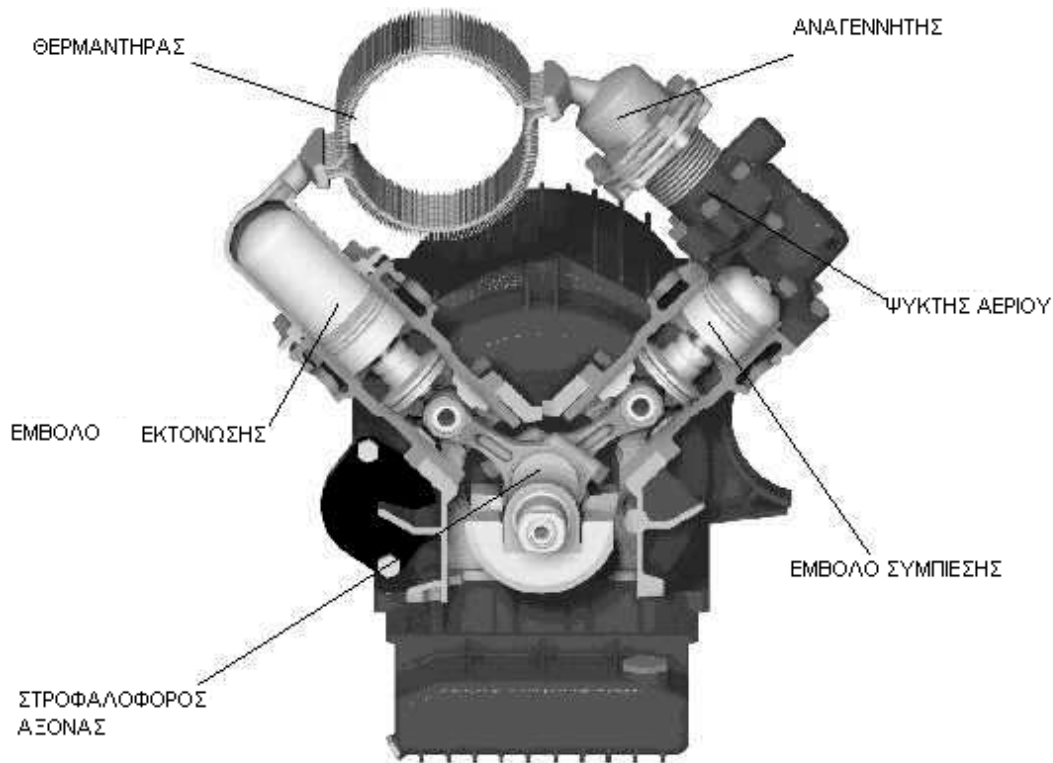
Αρχές λειτουργίας της SOLO STIRLING V161 microCPH-Module

Η αρχή λειτουργίας της μηχανής Stirling είναι γνωστή, εδώ και πολύ καιρό. Το χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της μηχανής είναι ότι το εργαζόμενο αέριο ωθείται παλινδρομικά μεταξύ δύο κυλίνδρων χωρίς να εγκαταλείπει τη μηχανή. Η θερμική ενέργεια, που μετατρέπεται τελικά σε κινητική στο στροφαλοφόρο άξονα, τροφοδοτείται στο εργαζόμενο αέριο μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος εφεξής θα καλείται θερμαντήρας.

Η θερμότητα παράγεται από την καύση του φυσικού αερίου.

Η μηχανή SOLO V161 STIRLING, είναι μονής ενέργειας μηχανή που αποτελείται από δύο (2) κυλίνδρους σε διάταξη V υπό γωνία 90° και χαρακτηρίζεται ως τύπου A.

Ο θερμαντήρας, ο αναγεννητής και ο ψύκτης αερίου είναι τοποθετημένοι μεταξύ των 2 κυλίνδρων. Η υπόδειξη 161 αναφέρεται στην χωρητικότητα του κυλίνδρου.



Σχήμα 5.3: Διάταξη Solo CHP Stirling

Όπως μια συμβατική παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσεως έτσι και η Stirling V161 έχει έμβολα. Το εργαζόμενο αέριο (στην προκειμένη περίπτωση He) συμπιέζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες και εκτονώνεται κατά την θέρμανση, με συνέπεια να ωθεί τα έμβολα που είναι τοποθετημένα το καθένα και σε διαφορετικό κύλινδρο. Επομένως ο ένας κύλινδρος καλείται κύλινδρος εκτόνωσης, ενώ ο άλλος κύλινδρος συμπίεσης. Τα αντίστοιχα έμβολα ονομάζονται έμβολο συμπίεσης ή ισχύος και έμβολο εκτόνωσης ή εκτοπισμού.

Ένας V2 στροφαλοφόρος άξονας ο οποίος στηρίζεται με ρουλεμάν τριβής και λιπαίνεται με μια αντλία, οδηγεί τα έμβολα. Οι διωστήρες συνδέονται με ζύγωμα και βάκτρο, που υποστηρίζουν τις πλευρικές δυνάμεις στους κυλίνδρους. Τα έμβολα συνδέονται με το ζύγωμα και με το βάκτρο με μια ράβδο.

Τα ελατήρια που είναι τοποθετημένα στα έμβολα αποτρέπουν:

- α) το εργαζόμενο αέριο να διεισδύσει στο χ'ωρο του στροφαλοφόρου και
- β) το λιπαντικό να διεισδύσει μέσα στους ενεργούς όγκους των κυλίνδρων.

Τα ελατήρια δεν παρουσιάζονται στην ανωτέρω εικόνα.

Καθώς το εργαζόμενο μέσο παραμένει μέσα στη μηχανή, είναι δυνατόν να βρεθεί κάτω από μεγαλύτερη πίεση γεγονός που βελτιώνει την λειτουργία της. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα μεταβάλλοντας την πίεση να μεταβάλλουμε τις επιδόσεις της μηχανής, (βλέπε επόμενη ενότητα).

Η επιλογή του He ως εργαζόμενου μέσου προσφέρει καλύτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά από τον αέρα λόγω του μικρότερου μοριακού του βάρους άρα και των μειωμένων αδρανειών που καλείται η μηχανή να υπερνικήσει..

Ο θερμαντήρας αποτελείται από μικρούς σωλήνες, οι οποίοι σχηματίζουν δακτυλίους γύρω από το θάλαμο καύσης και θερμαίνεται από αυτό σε θερμοκρασία περίπου 740°C .

Ο ψύκτης του εργαζόμενου αερίου αποτελείται από ένα πακέτο μικρών σωλήνων, μέσα από τους οποίους κυκλοφορεί το νερό ψύξης.

Ο αναγεννητής, που συμβάλλει στη δραστική βελτίωση του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου, αποτελείται από ένα μεταλλικό συρμάτινο πλέγμα.

Ο θερμαντήρας είναι τοποθετημένος μέσα σε ένα κυλινδρικά διαμορφωμένο θάλαμο καύσης, στον οποίο έχουμε συνεχή καύση. Ο επεξεργαστής ελέγχει συνεχώς τη θερμοκρασία του θερμαντήρα μέσω θερμοζευγών.

Το σύστημα του He

Στο εργαζόμενο αέριο, βρίσκεται:

- Μεταξύ των ανώτερων ορίων των δύο εμβόλων, στο θερμαντήρα, τον αναγεννητή και στον ψύκτη αερίου. Εδώ είναι όπου πραγματοποιείται η κυκλική διαδικασία του κύκλου, με τις συνεχείς αλλαγές της πίεσης και της θερμοκρασίας.
- Στις κοιλότητες κάτω από τα έμβολα και στις ενδιάμεσες περιοχές μεταξύ των κυλίνδρων (χώρος buffer). Εδώ συνήθως επικρατεί, η μέση πίεση λειτουργίας με μικρές διακυμάνσεις.
- Μέσα στο δοχείο τροφοδοσίας δίπλα στη μηχανή (δοχείο He), η πίεση είναι πάντα μεγαλύτερη από τη μέση πίεση του κύκλου λειτουργίας. Το He είτε θα ρέει μέσα στη μηχανή είτε θα οδηγείται πίσω στο δοχείο.

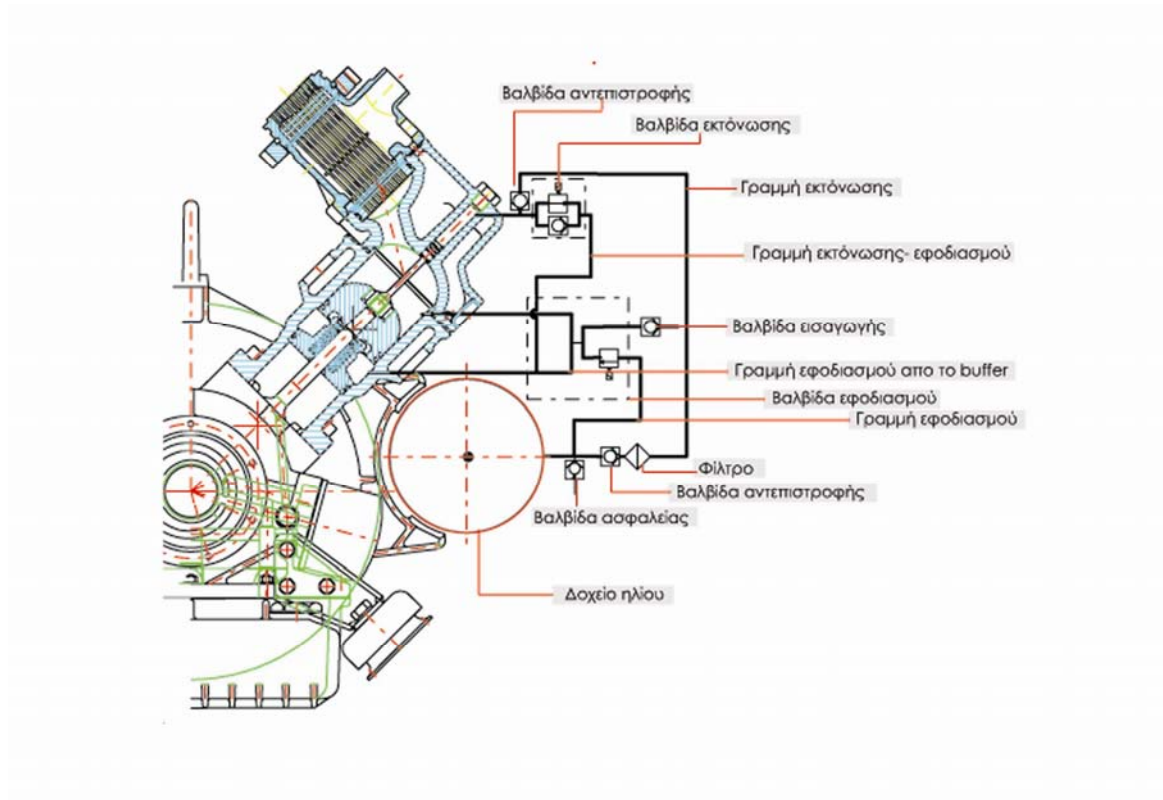
Οι περιοχές που πραγματοποιείται ο κύκλος και οι ενδιάμεσοι χώροι συνδέονται με έναν λεπτό αγωγό έτσι ώστε να υπάρχει εξομοίωση της πίεσης σε αυτές τις περιοχές.

Το He εισέρχεται από το δοχείο τροφοδοσίας μέσω μιας σωληνοειδούς βαλβίδας (βαλβίδα ανεφοδιασμού) και διανέμεται ομοιόμορφα: α) στις περιοχές που πραγματοποιείται ο κύκλος και β) στους ενδιάμεσους χώρους μέσω δύο ακροφυσίων. Το He αντλείται από τη μηχανή και ωθείται μέσα στο δοχείο από μια εμβολοφόρο αντλία η οποία είναι τοποθετημένη πάνω από το έμβολο συμπίεσης. Συνήθως η αντλία αυτή είναι εκτός λειτουργίας αλλά μπορεί να ενεργοποιηθεί από ένα σωληνοειδές (βαλβίδα αποφόρτισης). Έπειτα εξάγει το He από τη μηχανή και το οδηγεί μέσω μιας σωληνογραμμής μέσα στο δοχείο το οποίο είναι εφοδιασμένο με μια βαλβίδα αντεπιστροφής.

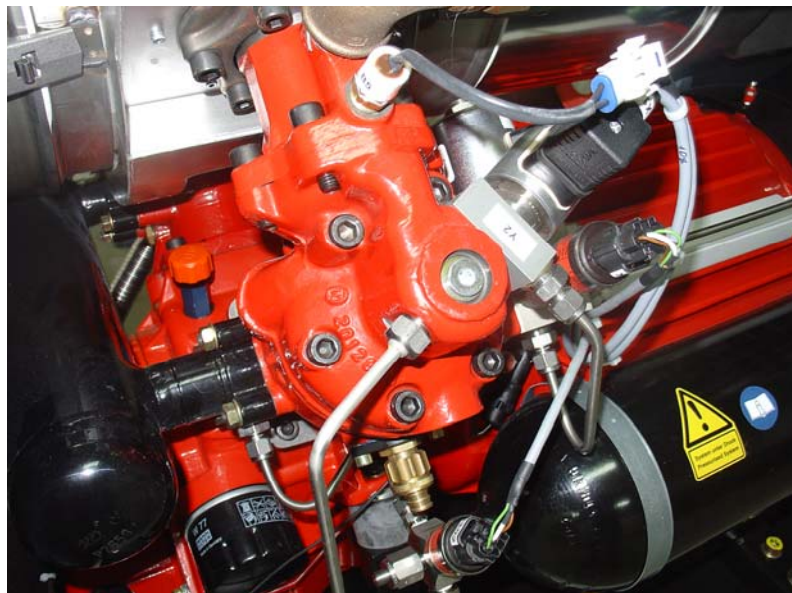
Δύο αισθητήρες πίεσης μετράνε την μέση πίεση του κύκλου και την πίεση του δοχείου. Οι τιμές αναγράφονται πάνω στην οθόνη.

Το απαιτούμενο φορτίο καθορίζεται μέσω του επεξεργαστή, π.χ. χειροκίνητη προεπιλογή. Ο επεξεργαστής, στέλνοντας ψηφιακό σήμα στις σωληνοειδής βαλβίδες

ρυθμίζει τη μέση πίεση του κύκλου (πίεση μηχανής), μέχρι την επιθυμητή πίεση.



Σχήμα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ελέγχου πίεσης He



Σχήμα 5.5: Σύστημα ελέγχου πίεσης He

Η μέγιστη πίεση του He μέσα στη μηχανή είναι 150 bar, η ελάχιστη πίεση λειτουργίας είναι περίπου 35 bar. Όταν σταματήσει η λειτουργία της μηχανής, η πίεση μειώνεται μέχρι να πέσει κάτω από τα 32 bar. Το δοχείο τότε φτάνει σε πίεση περίπου 200-220 bar. Η πίεση του δοχείου είναι χαμηλότερη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αλλά είναι πάντα, κατ'ελάχιστον 10 bar υψηλότερα από την μέση πίεση του κύκλου. Η μέγιστη πίεση του δοχείου περιορίζεται στα 250-280 bar από ένα δίσκο ασφαλείας που βρίσκεται μπροστά από την κεφαλή του δοχείου. Το δοχείο αντισταθμίζει τις μικρές απώλειες He που υφίστανται κατά τη διάρκεια του κύκλου.

Το δοχείο δεν πρέπει ποτέ να αποφορτιστεί τελείως. Η μηχανή μπορεί για αυτό το λόγο να παραλάβει He από μια εξωτερική μπουκάλα 10lt, εάν χρειαστεί. Για να επιτευχθεί αυτό ο ηλεκτρονικός επεξεργαστής της μονάδας, ελαττώνει την πίεση και επιτρέπει στο He να εισέλθει μέσα στην περιοχή λειτουργίας, μέσω μιας ηλεκτροβαλβίδας, η οποία το αντλεί στο δοχείο δίπλα στη μηχανή. Αυτή η διαδικασία διαρκεί 1-2 λεπτά και εκτελείται, 30 λεπτά μετά την εκκίνηση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται κάθε 24 ώρες.

Η εξωτερική μπουκάλα αντικαθίσταται κατά τη διάρκεια της συντήρησης, εάν είναι αναγκαίο.

Κύκλωμα καυσίμου & καυσαερίων

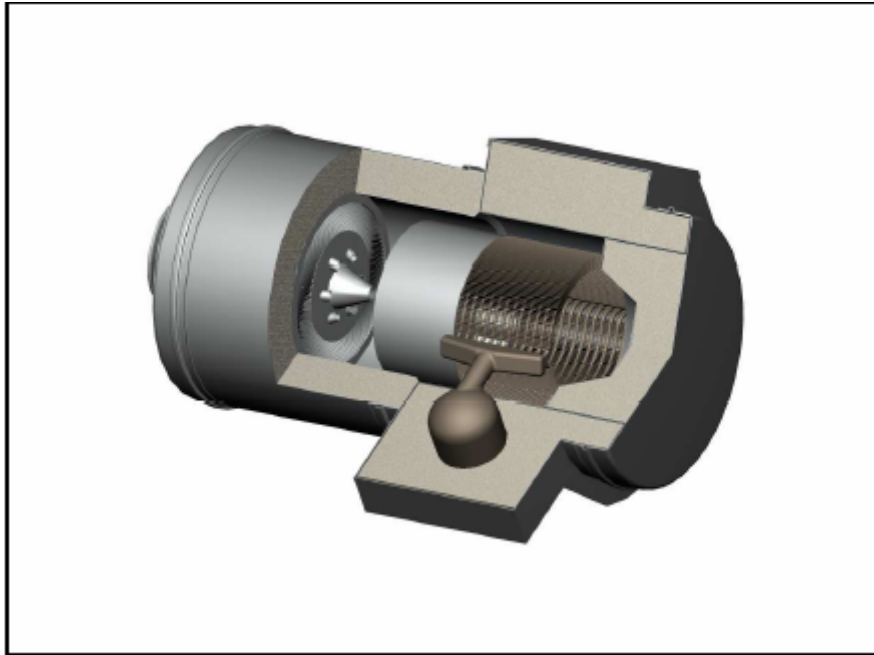
Ο καυστήρας είναι ενσωματωμένος μέσα στο θάλαμο καύσης. Αντίθετα με τους συνήθεις καυστήρες, εδώ υπάρχει ένας προθερμαντήρας αέρα. Αυτός είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας αντιρροής κατασκευασμένος από λεπτά μεταλλικά φύλλα. Η λειτουργία του έχει ως εξής: τα καυσαέρια μόλις φύγουν από τον θερμοαντήρα εισέρχονται στον προθερμαντήρα ευρισκόμενα σε αρκετά υψηλό θερμικό ενεργειακό επίπεδο. Το ενεργειακό αυτό πλεόνασμα μεταφέρεται στο νέο αέρα καύσης. Τα καυσαέρια που αρχικά βρίσκονταν σε θερμοκρασία περίπου 850-950⁰C τελικά ψύχονται σε θερμοκρασία 200-300⁰C. Ο εισερχόμενος φρέσκος αέρας, αντίθετα προθερμαίνεται στους 600-700⁰C.



Σχήμα 5.6: Προθερμαντήρας αέρα (κόκκινος σωλήνας παροχής αέρα καύσης, μεταλικός αγωγός απαγωγής καυσαερίων και δύο μικρής διαμέτρου μεταλικοί αγωγοί παροχής καύσιμου).

Ο προθερμαντήρας αέρα καύσης είναι πολύ σημαντική παράμετρο για να πετύχει η μηχανή υψηλό βαθμό απόδοσης. Μέσα στο θάλαμο καύσης, ο προθερμασμένος αέρας αναμειγνύεται με το καύσιμο.

Για να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων, μια μεγάλη ποσότητα καυσαερίων επανακυκλοφορεί στο θάλαμο καύσης. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως «άφλογη» οξείδωση (FLAMELESS OXIDATION-FLOX) και μπορεί να επιτευχθεί αξιόπιστα όταν ο θάλαμος καύσης φτάσει σε θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας. Αρχικά, το καύσιμο αναμειγνύεται με τον αέρα σε έναν προθάλαμο καύσης για να παραχθεί μια συμβατική φλόγα (φλόγα λειτουργίας), η οποία είναι όμοια με αυτήν των κινητήρων jet.



Σχήμα 5.7: Τομή συγκροτήματος καυστήρα όπου διακρίνεται ο προθερμαντήρας και το κύριο τμήμα για την αφλογη καύση.

Το τμήμα καυσίμου περιλαμβάνει δύο συμπαγείς μονάδες, μια για την έναρξη και μια για τη συνεχή άφλογη λειτουργία. Κάθε μονάδα αποτελείται από τα εξής 3 μέρη:

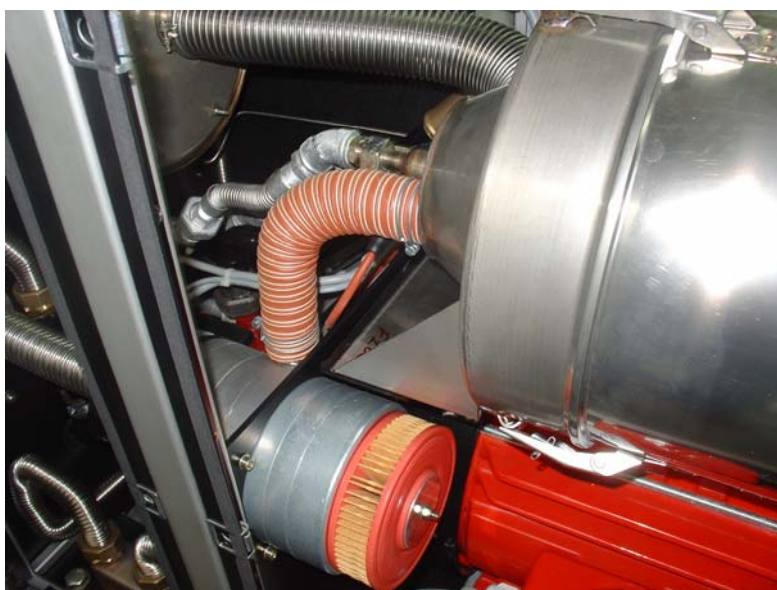
- α) μια διπλή σωληνοειδή βαλβίδα,
- β) έναν ρυθμιστή πίεσης
- γ) μια βαλβίδα πεταλούδα.



Σχήμα 5.8: Ρυθμιστικές διατάξεις τροφοδοσίας καυσίμου, μία για κάθε κατάσταση λειτουργίας.

Η μονάδα εκκίνησης ελέγχεται από την πίεση του ανεμιστήρα. Ο έλεγχος της άφλογης λειτουργίας γίνεται διαμέσου της πίεσης του θαλάμου καύσης, η οποία μετράται μέσω του μπεκ εκκίνησης (**the starter gas hose**) το οποίο βρίσκεται στον προθάλαμο καύσης. Η σύνδεση με τον καυστήρα γίνεται με εύκαμπτους ανοξειδωτους σωλήνες που ενώνονται με τον καυστήρα με συνδέσεις συμπίεσης. Η πίεση του αερίου τροφοδοσίας είναι μεταξύ 45-65 mbar, ενώ αν η πίεση είναι μεταξύ 22 - 45 mbar, το φορτίο θα μειωθεί. Εάν χρησιμοποιείται ένας καταγραφέας δεδομένων, πρέπει να τοποθετηθεί και ένας ψηφιακός μετρητής M- Bus, ο οποίος θα καταγράφει την παροχή του καυσίμου (**1 Imp. / 10 l**).

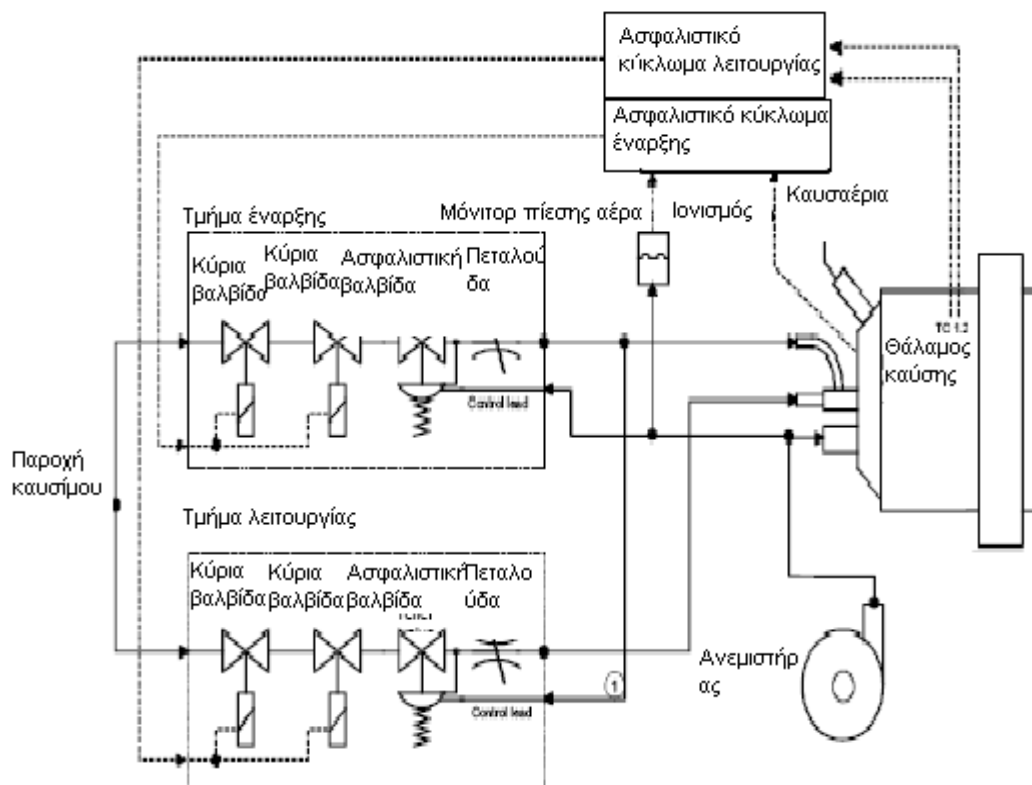
Μετά το απόπλυση του θαλάμου, η μονάδα ελέγχου του καυστήρα ,που βρίσκεται στη πάνω αριστερή μεριά του πίνακα ελέγχου, αναφλέγει το αρχικό μείγμα καυσίμου και αέρα και καταγράφει τον ιονισμό τις φλόγας. Ένα όργανο ελέγχου πίεσης ελέγχει την πίεση του ανεμιστήρα. Εάν, μετά από 5 λεπτά, η θερμοκρασία των καυσαερίων που κατευθύνονται προς τον θερμαντήρα δεν έχουν φτάσει την θερμοκρασία των 720⁰C που απαιτείται για την άφλογη αντίδραση, το πρόγραμμα ελέγχου καταλαβαίνει σφάλμα καύσης, και δρα ως εξής: α) πρώτα κλείνει τις βαλβίδες καυσίμου και β) σβήνει τη μηχανή.



Σχήμα 5.9: Ανεμιστήρας παροχής άερα καύση και αισθητηρας ελέγχου της πίεσης (κόκκινο καλώδιο).

Εάν η απαιτούμενη πίεση επιτευχθεί μέσα στον προκαθορισμένο χρόνο, ο επεξεργαστής αλλάζει την λειτουργία των βαλβίδων καυσίμου. Τώρα ο προθερμασμένος αέρας καύσης αναμειγνύεται με τα θερμά καυσαέρια και με το αέριο καύσιμο στην είσοδο του καυστήρα και του θαλάμου καύσης και αντιδρά με τα εκπεμπόμενα οξειδία του αζώτου. Η αντίδραση σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας καταγράφεται από δύο θερμοηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία μετράνε την θερμοκρασία των καυσαερίων κατά την έξοδό τους από τον θερμαντήρα (θερμοκρασία FLOX). Οι βαλβίδες καυσίμου κλείνουν εάν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 720°C.

Εάν η θερμοκρασία υπερβεί τους 950°C, το σύστημα πάλι θα σταματήσει. Και στις δύο περιπτώσεις εκπέμπεται ένα σήμα σφάλματος



Σχήμα 5.10: Σχηματική περιγραφή του συστήματος δημιουργίας μίγματος

Το φορτίο του καυστήρα είναι συνεχώς σε αναλογία με την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα έτσι ώστε η θερμοκρασία στο θερμαντήρα να διατηρείται σε μια σταθερή τιμή. Η θερμοκρασία αυτή καταγράφεται από ένα θερμοστοιχείο και ελέγχεται από τον ηλεκτρονικό επεξεργαστή της μονάδας. Ο καυστήρας σβήνει εάν η θερμοκρασία υπερβεί τις μέγιστες τιμές που έχουμε αρχικά ορίσει. Το θερμοστοιχείο στον θερμαντήρα παρακολουθείται και αυτό για τυχόν δικές του βλάβες.

Έλεγχος των ηλεκτρονικών συστημάτων ασφαλείας

Η μηχανή είναι εφοδιασμένη με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου το οποίο πραγματοποιεί τις παρακάτω λειτουργίες:

- Διαδικασία έναρξης: αυτοέλεγχος, έναυση καυστήρα, αύξηση θερμοκρασίας, εναλλαγή σε άφλογη οξειδωση, σταθεροποίηση, επίτευξη πίεσης λειτουργίας.
- Ρύθμιση: α) της πίεσης λειτουργίας μέσω ηλεκτροβαλβίδων και β) της θερμοκρασίας λειτουργίας μέσω ρύθμισης της πίεσης του ανεμιστήρα.
- Διαδικασία τερματισμού της μηχανής μετά από εντολή σταματήματος ή ανίχνευσης σφάλματος από τον επεξεργαστή με: α) άμεση διακοπή της παροχής του καυσίμου και στους δύο τρόπους λειτουργίας (με φλόγα και άφλογη), β) εκτονώνοντας το He μέχρι η πίεση να πέσει κάτω από τα 32 bar και γ) ψύχοντας και «πλένοντας» τον θάλαμο καύσης με αέρα.



Εξωτερική τροφοδοσία

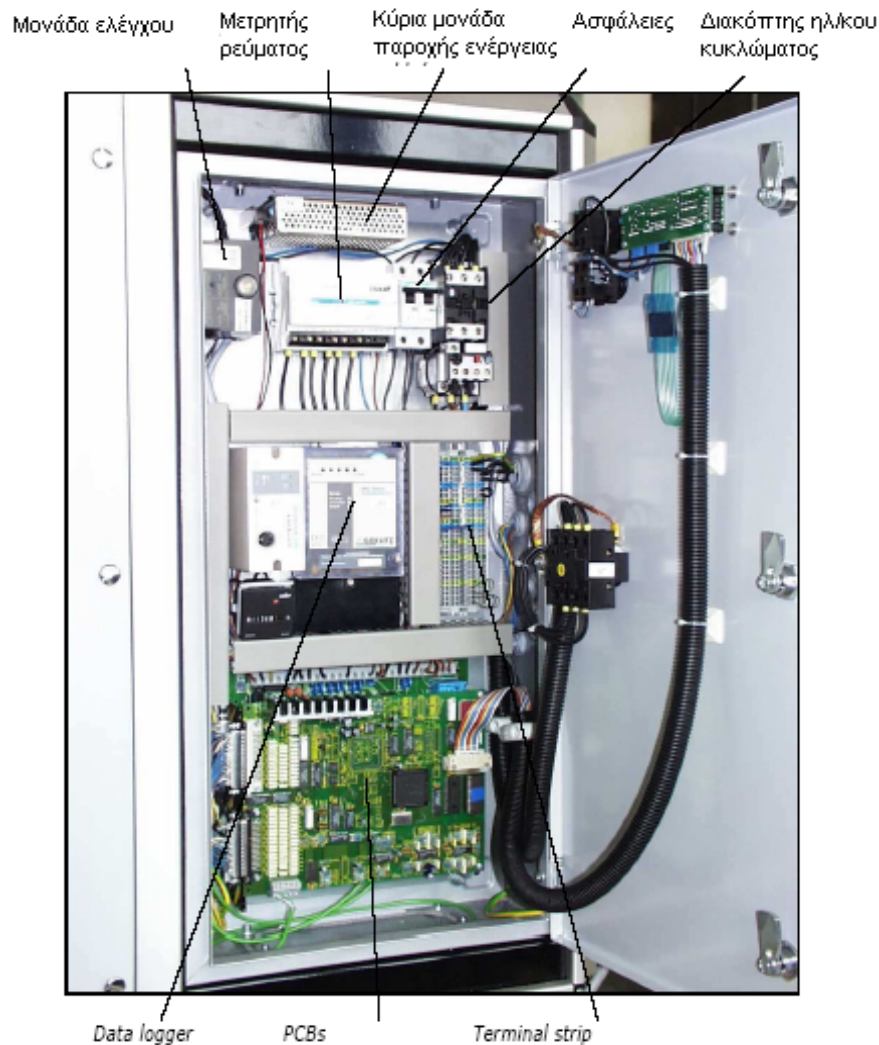
Σχήμα 5.11: Εγκατεστημένο ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της λειτουργίας της Solo V161 Stirling.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, το πρόγραμμα παρακολουθεί την πίεση του λαδιού, την θερμοκρασία του νερού ψύξης, την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής, την θερμοκρασία του θερμαντήρα, την τάση και την συχνότητα του δικτύου διανομής. Το σύστημα παρακολούθησης τοποθετείται μέσα στο πίνακα ελέγχου της μονάδας και περιλαμβάνει ένα πίνακα δικτύου διανομής με επεξεργαστή EPROM και 2 ψηφιακές οθόνες οι οποίες δείχνουν τα διάφορα σφάλματα. Οι ηλεκτροβαλβίδες (12V) ελέγχονται απευθείας από τον πίνακα του δικτύου διανομής. Ένα συγκρότημα με διακόπτες, το οποίο τροφοδοτεί συσκευές των 230V (σύμφωνα πάντα με εντολές του πίνακα του δικτύου διανομής), στο επάνω μέρος του χώρου των ηλεκτρονικών συστημάτων. Εδώ επίσης είναι τοποθετημένα και τα συστήματα ελέγχου της άφλογης καύσης.

Το πρόγραμμα που αποθηκεύεται σε έναν EPROM ελέγχεται από ένα κύκλωμα 'watchdog'. Το πρόγραμμα μεταδίδει μηνύματα σφάλματος ή την ένδειξη '88' για την κανονική λειτουργία.

Το θερμοστοιχείο το οποίο ελέγχει την θερμοκρασία του θερμαντήρα έχει έναν εσωτερικό ενισχυτή, ο οποίος ελέγχει το θερμοστοιχείο για τυχόν σφάλμα λειτουργίας.

Τα PCB's τροφοδοτούνται από ένα μετασχηματιστή ή έναν εναλλάκτη ισχύος τροφοδοσίας ο οποίος τροφοδοτείται από μια μονοφασική ή τριφασική σύνδεση



Σχήμα 5.12: Γενική απεικόνιση του εγκατεστημένου ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου της λειτουργίας της Solo V161 Stirling.

Λειτουργικός έλεγχος

Μία μικρή οθόνη υγρών κρυστάλλων (μόνιτορ) που είναι εγκατεστημένη στον πίνακα ελέγχου, δείχνει εκτός των άλλων την πίεση λειτουργίας της μηχανής, την πίεση του δοχείου He και τη μετρούμενη θερμοκρασία του θερμαντήρα. Αυτές οι τιμές μπορούν επίσης να παραχθούν ως σήματα της τάξης των 0-10V.

Ο διακόπτης του δικτύου διανομής είναι τοποθετημένος στην πόρτα του πίνακα ελέγχου.

Η μηχανή ξεκινάει με το πάτημα του πράσινου κομβίου, το οποίο τροφοδοτείται από τον πίνακα του δικτύου διανομής. Μπορεί επίσης να ξεκινήσει από τον διακόπτη του δικτύου διανομής. Ένα κόκκινο κομβίο ενεργοποιεί το πρόγραμμα τερματισμού, το οποίο σβήνει τον καυστήρα και αναγκάζει το He να εξέλθει από την μηχανή προς τη δεξαμενή αποθήκευσης, μέχρις ότου η πίεση να πέσει κάτω από τα 32 bar. Εάν η θερμοκρασία του θερμαντήρα έχει πέσει κάτω από ένα καθορισμένο όριο και η μηχανή έχει σταματήσει να κινείται, ο πίνακας του δικτύου διανομής κλείνει αυτόματα.

Οι λειτουργίες έναρξης και τερματισμού μπορούν να ενεργοποιηθούν και από άλλες συσκευές.



Σχήμα 5.13: Οθόνη ενδείξεων υγρών κρυστάλλων, κομβία εκκίνησης (πράσινο) και τερματισμού (κόκκινο), κεντρικός διακόπτης.

Η ηλεκτρική γεννήτρια & η σύνδεσή της με το δίκτυο

Η μηχανή κινεί μια δίπολη, ασύγχρονη, αερόψυκτη ηλεκτρική γεννήτρια συχνότητας 50 Hz μέσω ενός κόπλερ με ταχύτητα περιστροφής 1500 rpm περίπου. Η ηλεκτρική γεννήτρια χρησιμοποιείται σαν κινητήρας (μίζα) κατά την έναρξη, αφού είναι συνδεδεμένη με την κύρια τροφοδοσία μέσω ενός κλειστού διακόπτη. Ο διακόπτης ενεργοποιείται στα 230V από το κύριο κύκλωμα μέσω ενός ρελέ από τον πίνακα των ρελέ. Επιπλέον υπάρχει μια ασφάλεια του κυκλώματος της μηχανής και είναι ρυθμισμένη στα 18 A. Ένας μετρητής ρεύματος με ψηφιακή έξοδο, που χρησιμεύει για τον καταγραφέα δεδομένων, είναι τοποθετημένος στο πίνακα ελέγχου. Η όλη εγκατάσταση προστατεύεται από 3 ασφάλειες των 25 A (αργές) που βρίσκονται στη γραμμή τροφοδοσίας.

Η μονάδα CHP περιλαμβάνει όλα τα VDEW-απαραίτητα ασφαλιστικά μηχανήματα. Τα ασφαλιστικά ηλεκτρονικά του δικτύου διανομής είναι ενσωματωμένα πάνω στα ηλεκτρονικά ελέγχου και περιλαμβάνουν τριφασική τάση ,προστασία από πτώση τάσης και υπερπήδηση της τάσης και ένα μόνιτορ συχνοτήτων.

- **Βραχυκύκλωμα τροφοδοσίας**

Τρεις ασφάλειες των 25 A (αργές)

- **Διακόπτης ηλεκτρικών κυκλωμάτων**

Διακόπτης με ικανότητα διακοπής της ενέργειας του κυκλώματος, τριπολικός, χρησιμοποιούμενος ως διακόπτης εκτάκτου σταματήματος.

Κατασκευαστής: Klöckner-Moeller

Τύπος:DIL-M; 22.5A 11 kW; coil voltage 230V

Συμβατή με συσκευές:..... IEC 947, VDE 0660

- **Προστασία υπερφόρτωσης**

Διακόπτης υπερφόρτωσης: DIL-M

Κατασκευαστής: Klöckner-Moeller

Τύπος:..... Μέγεθος 1; 22.5A 11kW;

(για μέγιστο μηχανικό φορτίο εύρος 16-24 A)

Συμβατή με συσκευές:..... IEC 947, VDE 0660

- **Έλεγχος τάσεως και συχνοτήτων**

Ο έλεγχος της τάσης και των συχνοτήτων γίνεται από τα ηλεκτρονικά του CHP ελεγκτή. Το λογισμικό παρακολουθεί το κατά πόσο οι τιμές είναι σύμφωνες με τις προκαθορισμένες.

- **Εισαγόμενες τιμές**

Όριο διακοπής κυκλώματος λόγω πτώσεως τάσεως: ρυθμίζεται στα 0.8 UN

Όριο διακοπής κυκλώματος λόγω υπερπήδησης τάσεως: ρυθμίζεται στα 1.1 UN

Όριο διακοπής κυκλώματος λόγω πτώσεως συχνότητας: ρυθμίζεται στα 49 Hz

Όριο διακοπής κυκλώματος λόγω υπερπήδησης συχνοτήτων: ρυθμίζεται στα 51 Hz

- **Χρόνοι απόκρισης**

Χρόνος απόκρισης βολτόμετρου 100 ms

Χρόνος απόκρισης μετρητή συχνοτήτων 120ms

- **Λειτουργική ασφάλεια των κυρίως μόνιτορ**

Ο σχεδιασμός του λογισμικού γίνεται σε 2 επίπεδα. Όλα τα δομικά στοιχεία των παρακολούθηση της τάσεως και της συχνότητας, έχουν σαν λειτουργία να τοποθετούν μία «σημαία» (λογική μεταβλητή) κάθε φορά που καταγράφεται μια πραγματική μεταβλητή. Το κυρίως πρόγραμμα ελέγχου των ηλεκτρονικών συνήθως ζητά αυτές τις «σημαίες» κάθε 50 msec και μετά τις σβήνει. Εάν μια «σημαία» δεν τοποθετηθεί, ξεκινάει αμέσως η διαδικασία σβησίματος. Αυτό βοηθάει στην αποφυγή των σφαλμάτων της παρακολούθησης και των σφαλμάτων των υπόπρογραμμάτων. Τυχόν προβληματικά ηλεκτρονικά πάνω στον πίνακα είναι πιθανό να δώσουν λανθασμένες πραγματικές μεταβλητές, με συνέπεια το λογισμικό να ξεκινήσει τη διαδικασία σβησίματος.

Το κυρίως πρόγραμμα και το λογισμικό παρακολουθούνται επίσης. Αυτό επιτελείται από έναν «Watchdog-timer». Αυτό αναγκάζει το σύστημα να επαναρυθμιστεί μετά από 60 msec, εάν δεν έχει ήδη επαναρυθμιστεί από το κυρίως πρόγραμμα μετά από 50 ms. Σε αυτήν την περίπτωση, το ρελέ ελέγχου ανοίγει τον διακόπτη του ηλεκτρικού κυκλώματος και η CHP τότε αποσυνδέεται από το δίκτυο διανομής.

Σύστημα ψύξης

Η θερμότητα εξάγεται από τη μηχανή κυρίως από τον ψύκτη του αερίου, ενώ σχετικά μικρή ροή θερμότητας έχουμε μέσω του λιπαντικού και των τοιχωμάτων των κυλίνδρων. Ο εναλλάκτης θερμότητας των καυσαερίων μπορεί να συναλλάσει σημαντική ποσότητα θερμότητας ειδικά όταν η θερμοκρασία του νερού είναι χαμηλή.



Σχήμα 5.14: Εναλλάκτης καυσαερίων.

Η εγκατάσταση είναι εφοδιασμένη με ένα εσωτερικό σύστημα ψύξης με αντλία, ένα δοχείο διαστολής και έναν πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας. Έτσι αποφεύγεται η είσοδος ακαθαρσιών μέσα στη μηχανή. Το εσωτερικό κύκλωμα νερού περιέχει αντιψυκτικό κι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ελέγχει η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού.



Σχήμα 5.15: Πλακοειδής εναλλάκτης συναλλαγής θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού κυκλώματος νερού. Διακρίνεται και η αντλία του ψυκτικού υγρού του εσωτερικού κυκλώματος ψύξης της μηχανής.

Η παροχή όγκου του εξωτερικού κυκλώματος (σύστημα θέρμανσης) πρέπει να είναι μεταξύ $0.5 - 2 \text{ m}^3/\text{hr}$ και η θερμοκρασία μεταβάλλεται από 40°C μέχρι 10°C στο μέγιστο φορτίο. Για την επίτευξη μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας, η παροχή όγκου πρέπει να υποστηρίζεται από μια αντλία, προβλέποντας η θερμοκρασία εξόδου του νερού να μην υπερβαίνουν τους 65°C για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.16: Απεικόνιση της καπνοδόχου και του εξωτερικού κυκλώματος νερού, όπου διακρίνονται η εξωτερική αντλία και το παροχόμετρο. Επίσης φαίνεται και ο διαφανής αγωγός απορροής των συμπυκνωμάτων από τον εναλλάκτη των καυσαερίων. (Εικόνα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης της Solo Stirling V161 στο χώρο του εργαστηρίου Εφηρμοσμένης Θερμοδυναμικής του Ε.Μ.Π.)

Ο εναλλάκτης θερμότητας των καυσαερίων

Το καυσαέριο φεύγει από τον προθερμαντήρα αέρα στον καυστήρα με μια θερμοκρασία 200-300 βαθμών Κελσίου και εισέρχεται στον ανοξείδωτο εναλλάκτη θερμότητας των καυσαερίων. Ο εναλλάκτης μειώνει τη θερμοκρασία των καυσαερίων κατά τριάντα περίπου βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού νερού. Ανάλογα με τη θερμοκρασία εισόδου του νερού και την αντίστοιχη συμπύκνωση, μπορούμε να εξοικονομήσουμε δύο μέχρι τέσσερα kW θερμικής ισχύος. Πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα σιφόνι 0.6m για το συμπύκνωμα. Ο εναλλάκτης των καυσαερίων είναι συνεχώς συνδεδεμένος με το εισερχόμενο ρεύμα του εξωτερικού συστήματος ψύξης λόγω της χαμηλής του θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.17: Εναλλάκτης θερμότητας των καυσαερίων.



Σχήμα 5.18: Ο εναλλάκτης θερμότητας των καυσαερίων όπως φαίνεται όταν αφαιρέσουμε το πλαινό κάλυμα του πλαισίου. (Εικόνα κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης της Solo Stirling V161 στο χώρο του εργαστηρίου Εφηρμοσμένης Θερμοδυναμικής του Ε.Μ.Π.)

Πλαίσιο διάταξης

Όλα τα κύρια εξαρτήματα της σε εγκαταστάσεις είναι καλυμμένα από ένα πλαίσιο το οποίο μειώνει το θόρυβο και την εκπομπή θερμότητας. Η μηχανή η γεννήτρια είναι τοποθετημένες στο πλαίσιο με ελαστικές βάσεις. Η γραμμή τροφοδοσίας του αερίου είναι τοποθετημένη στο πίσω τοίχωμα του πλαισίου. Στο πίσω τοίχωμα του πλαισίου είναι επίσης συνδεδεμένα τα σημεία εισόδου και εξόδου του νερού, τα σημεία σύνδεσης με την ηλεκτρική ενέργεια και η εξαγωγή των καυσαερίων και του συμπυκνώματος. Το πάτωμα του πλαισίου έχει τέτοια κλίση ώστε να συλλέγονται λάδια ή νερά τα οποία προκύπτουν από διαρροή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Installation and operation instructions Stirling 161 micro CHP module”: Solo Stirling GmbH, version 4.2, March 2005.

«Θερμοδυναμική ανάλυση μηχανών ισχύος Stirling» Αντωνάκος Γεώργιος, , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2001

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Εγκατάσταση

Παρά το γεγονός ότι οι εφαρμογές των μηχανών Stirling είναι ποικιλόμορφες και το ενδιαφέρον για αυτές παγκοσμίως αυξάνεται ραγδαία, οι εγκαταστάσεις συμπαραγωγής Stirling είναι λίγες και μάλιστα για ερευνητική αξιοποίηση και όχι για εμπορική.

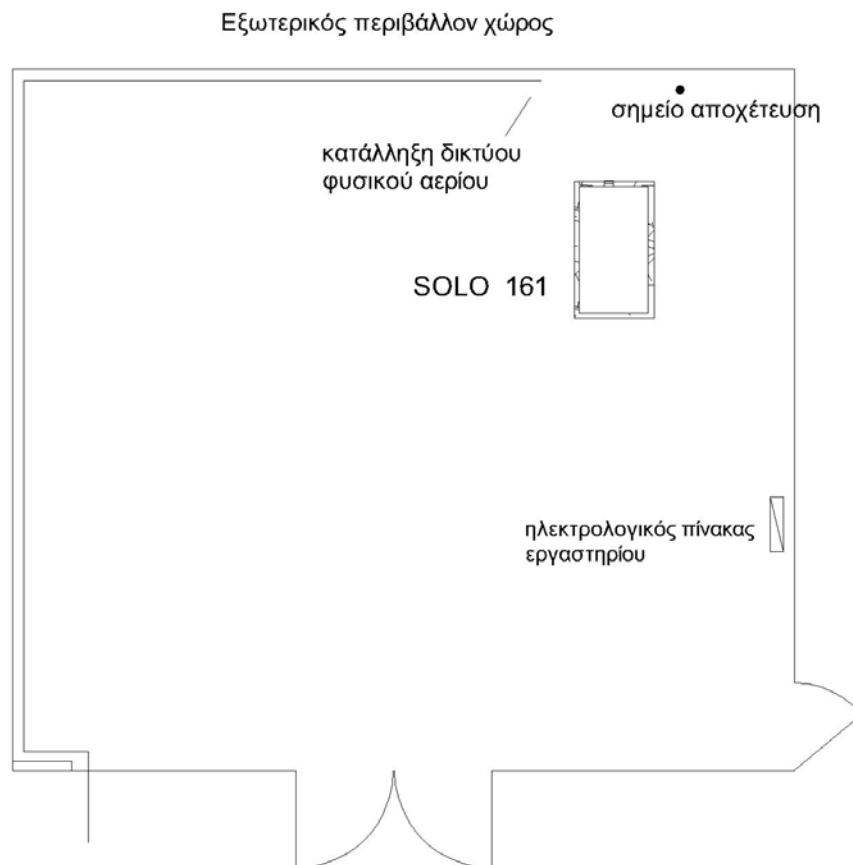
Για το λόγο αυτό η εγκατάσταση της Solo V161 Stirling Engine microCPH-Module, στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου **Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής** του Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., ήταν μια πρωτόγνωρη διαδικασία με τους αντιστοιχούν κινδύνους. Το γεγονός ότι σε όλο τον κόσμο υπήρχαν το πολύ 20 τέτοιες εγκαταστάσεις, μας ανάγκασαν να κινηθούμε πολύ προσεκτικά τόσο σχεδιαστικά όσο και κατασκευαστικά. Δεν υπήρχαν περιθώρια ούτε για πειραματισμούς σε αυτό το στάδιο, ούτε για λάθη. Κυρίως γιατί η μηχανή είναι εφοδιασμένη με φιάλη αποθήκευση He με πίεση περίπου 200bar αλλά και γιατί δεν υπήρχε η δυνατότητα αντικατάστασης οποιουδήποτε εξαρτήματος το οποίο θα αστοχούσε.

Ο χώρος που επιλέχθηκε ήταν κατάλληλος για την εγκατάσταση της μονάδας και αρκετά μεγάλος για να καλύψει της ανάγκες αερισμού του καυστήρα 40kW της μηχανής .

Επίσης οι ανάγκες για τοποθέτηση και άλλων εργαστηριακών μονάδων, επέβαλε η μηχανή Stirling να τοποθετηθεί σε συγκεκριμένο γωνιακό χώρο. Το σημείο που επιλέχθηκε να τοποθετηθεί η μηχανή πληρούσε το σύνολο των απαιτήσεων μας, οι οποίες ήταν:

- Να υπάρχει ικανός ελεύθερος χώρος γύρω από την μηχανή, όπως απαιτούσαν οι προδιαγραφές της κατασκευάστριας εταιρίας. Συγκεκριμένα για εύκολη πρόσβαση του χειριστή και των συντηρητών καθώς και σωστό αερισμό της μονάδας να υπάρχει ελάχιστο κενό 0,8m περιμετρικά και 1m στο πάνω μέρος αυτής.
- Η μηχανή να βρίσκεται κοντά στον ηλεκτρολογικό πίνακα του εργαστηρίου.

- Να έχει άμεση πρόσβαση στο εξωτερικό περιβάλλον για την τοποθέτηση της καπνοδόχου.
- Να είναι κοντά σε γραμμή τροφοδοσίας φυσικού αερίου.
- Να υπάρχει κοντά σημείο αποχέτευσης για την αποβολή των συμπυκνωμάτων από την καύση του φυσικού αερίου.
- Να αφήνει ελεύθερο χώρο για εγκατάσταση επιπλέον ερευνητικού εξοπλισμού.



Σχήμα 6.1: Κάτοψη του χώρου εγκατάστασης της μονάδας συμπαραγωγής Solo V161 Stirling Engine στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σύνδεσης καθενός από τα κρίσιμα συστήματα της μονάδας συμπαραγωγής Solo V161 Stirling Engine.

Συνδέσεις αερίου

Για την τροφοδοσία της μηχανής μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο φυσικό αέριο (Natural Gas) όσο και υγραέριο (Petroleum Gas). Η σύνδεση της γραμμής τροφοδοσίας του αερίου γίνεται στο πίσω τοίχωμα της μονάδας με χρήση εύκαμπτων σωλήνων διαμέτρου R1/2". Η πίεση τροφοδοσίας πρέπει να είναι μεταξύ τους ανά 45 – 65 mbar. Εάν η πίεση είναι μεταξύ 22 – 45 mbar, η μηχανή δεν θα φτάσει τη μέγιστη απόδοση. Εάν η πίεση είναι της τάξης 22 mbar πρέπει να χρησιμοποιηθεί ειδικός ρύθμισης πίεσης. Η διαστασιολόγηση της γραμμής τροφοδοσίας πρέπει να γίνει σύμφωνα με τη χρήση και ο υπολογισμός της για απόδοση περίπου 40kW. Δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται η ίδια παροχή αερίου και για άλλες καταναλώσεις. Για τη συλλογή επιπλέον δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψηφιακός μετρητής αερίου.

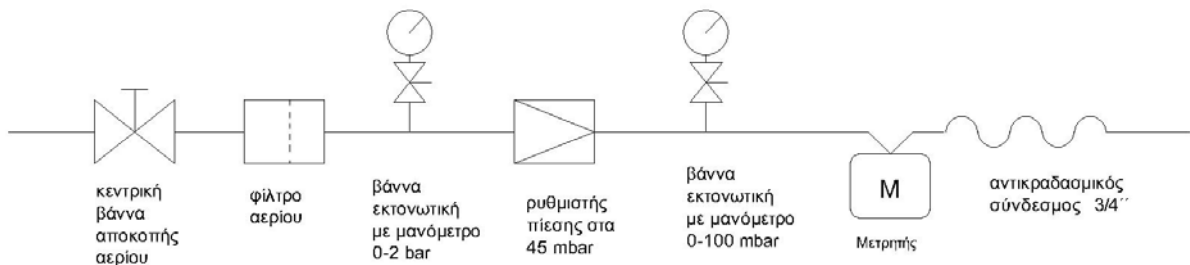
Το υφιστάμενο δίκτυο φυσικού αερίου στο χώρο του εργαστηρίου, προέβλεπε την εγκατάσταση του κινητήρα Stirling και είχε υπολογιστεί για την κάλυψη των αναγκών του. Συγκεκριμένα το δίκτυο είναι πίεσης 300 mbar από γαλβανιζέ χαλυβδοσωλήνα $\frac{3}{4}$ ".

Με δεδομένο ότι η πτώση πίεσης στο τελευταίο αυτό τμήμα, θα πρέπει να είναι μικρή, αποφασίστηκε το συγκρότημα οργάνων πριν τον καυστήρα (gas train) να γίνει με εξαρτήματα ονομαστικής διαμέτρου 1". Η αύξηση της διατομής θα έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της πτώσης πίεσης .

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στην κατάληξη του αγωγού πριν τον καυστήρα, είναι αυτά που επιβάλλει ο κανονισμός εσωτερικών εγκαταστάσεων της Εταιρίας Παροχής Αερίου Αττικής:

- Γενική βάνα αποκοπής του φυσικού αερίου.
- Φίλτρο.
- Ρυθμιστής - Μειωτής για την μείωση της πίεσης από τα 300 mbar του δικτύου στην πίεση λειτουργίας του καυστήρα που είναι 45 mbar.

- Μιλλιμανόμετρο υψηλής πίεσης πριν το ρυθμιστή με κλιμάκωση από 0 έως 600 mbar, συνδυαζόμενο με μπουτόν ανακούφισης.
- Μιλλιμανόμετρο χαμηλής πίεσης μετά το ρυθμιστή πίεσης με κλιμάκωση 0 έως 60 mbar, συνδυαζόμενο με μπουτόν ανακούφισης.
- Τμήμα χαλύβδινου γαλβανιζέ σωλήνα μήκους περίπου 60 cm, για την δυνατότητα μελλοντικά εγκατάστασης επιπλέον εργαστηριακού οργάνου (π.χ. ροομετρητής) .



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα εξαρτημάτων στη γραμμή τροφοδοσίας.

Στο σχήμα 6.3 διακρίνεται η γραμμή τροφοδοσίας φυσικού αερίου κατά την κατασκευή της. Από αριστερά προς τα δεξιά παρατηρούμε τη χειροκίνητη βάννα διακοπής της τροφοδοσίας, το φίλτρο αερίου, το μανόμετρο υψηλής πίεσης, το ρυθμιστή πίεσης, το μανόμετρο χαμηλής πίεσης, τον μετρητή αερίου και τις ηλεκτροβαλβίδες έναυσης και άφλογης λειτουργίας.



Σχήμα 6.3: Εργασίες για τη σύνδεση γραμμής τροφοδοσίας φυσικού αερίου.
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)



Σχήμα 6.4: Γραμμή τροφοδοσίας φυσικού αερίου μετά την ολοκλήρωση των εργασιών.
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)

Σύνδεση του εξωτερικού κυκλώματος ψύξης

Η σύνδεση γίνεται μέσω ενός σωλήνα 1". Η παροχή όγκου του ψυκτικού νερού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ $0,5 - 2 \frac{m^3}{hr}$. Αυξημένη παροχή όγκου μειώνει τη διαφορά θερμοκρασίας του νερού. Το εξωτερικό κύκλωμα εφοδιάζεται ξεχωριστή αντλία νερού που είναι τοποθετημένη στην επιστροφή του νερού προς τη μηχανή. Τα θερμικά φορτία απάγονται στο περιβάλλον με τη βοήθεια ψύκτη αέρα που είναι τοποθετημένος στον εξωτερικό χώρο του εργαστηρίου. Για το εξωτερικό ψυκτικό κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό μαζί με αντιπαγωτικό. Αυτή η λύση επιλέχθηκε γιατί η σύσταση του νερού του δικτύου στο εργαστήριο δεν κάλυπτε τις προδιαγραφές ασφαλούς μακροχρόνιας χρήσης.

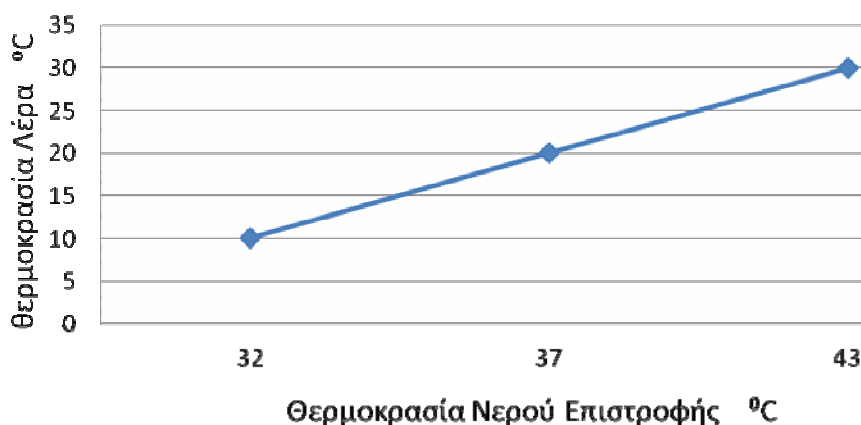


Σχήμα 6.5: Σύνδεση εξωτερικού κυκλώματος ψύξης.
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ψύκτη αέρα είναι:

- Πίεση λειτουργίας < 15 bar.
- Φέρει δύο ανεμιστήρες Φ400 mm με απαιτούμενη ισχύ 300 Watt.
- Πτώση πίεσης σε τοπικές τριβές 1,2 m.
- Διαστάσεις : 1,35 x 0,60 x 0,70 m .

Τέλος η απόδοση της μονάδας σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος για είσοδο νερού 60⁰C και παροχή 2 m³/hr φαίνεται στο σχήμα 6.4:



Σχήμα 6.6: Απόδοση ψύκτη αέρα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασίαεπίστροφέ του νερού

Η μονάδα ψύξης τοποθετήθηκε σε παρακείμενο του εργαστηρίου υπερυψωμένο χώρο έξω, με την ανοιγμένη απόσταση από την μηχανή SOLO είναι 11,4m όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7.

Τοποθετήθηκε ένα ανοικτό δοχείο διαστολής με δείκτη στάθμης σε ύψος περίπου 6 m από την μονάδα ψύξης, η πλήρωση του δοχείου έγινε, όπως προαναφέρθηκε, με απιονισμένο νερό. Ο όγκος του νερού που χρειάστηκε για το γέμισμα της εγκατάστασης με νερό ήταν 39 lit στα οποία προστέθηκαν και 5 lit αντιπαγωτικό για προστασία σε περίπτωση παγετού.



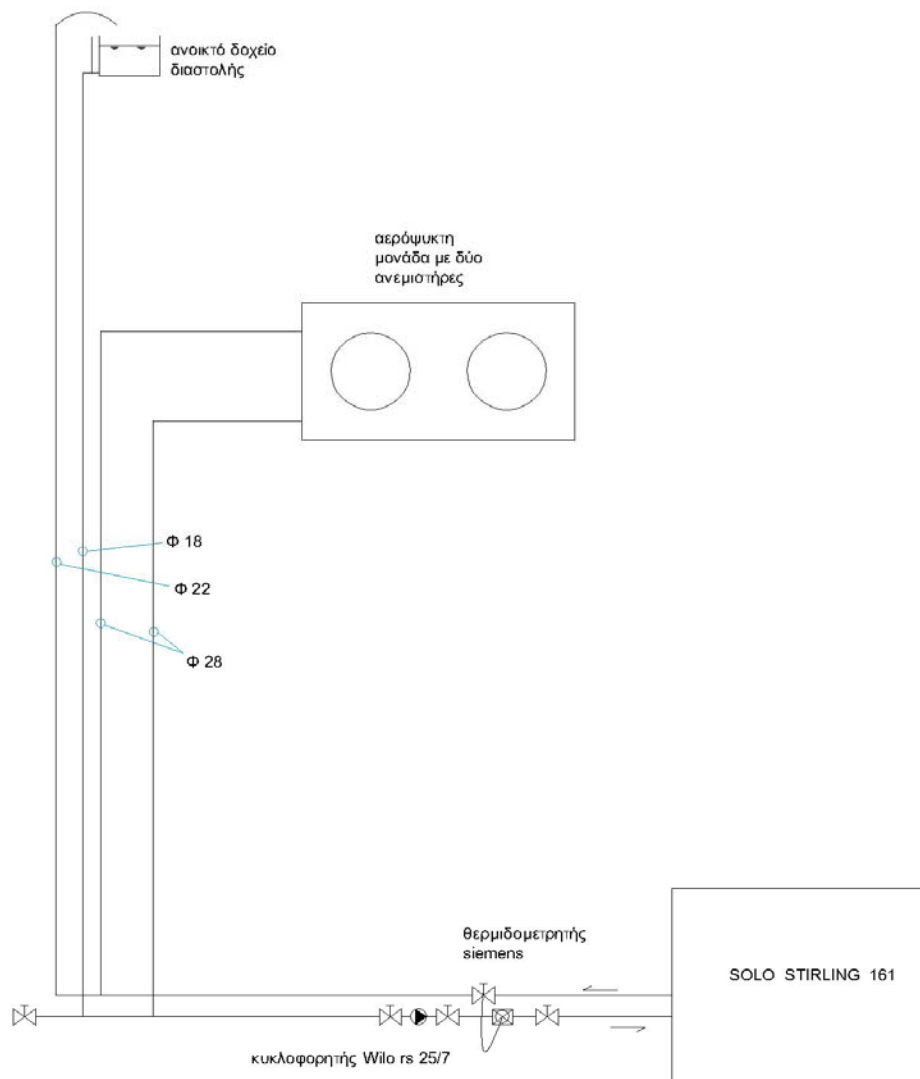
Σχήμα 6.7: Ψύκτης αέρα και ανοικτό δοχείο διαστολής
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)

Τοποθετήθηκε ένα ανοικτό δοχείο διαστολής με δείκτη στάθμης σε ύψος περίπου 6 m από την μονάδα ψύξης, η πλήρωση του δοχείου έγινε, όπως προαναφέρθηκε, με απιονισμένο νερό. Ο όγκος του νερού που χρειάστηκε για το γέμισμα της εγκατάστασης με νερό ήταν 39 lit στα οποία προστέθηκαν και 5 lit αντιπαγωτικό για προστασία σε περίπτωση παγετού.



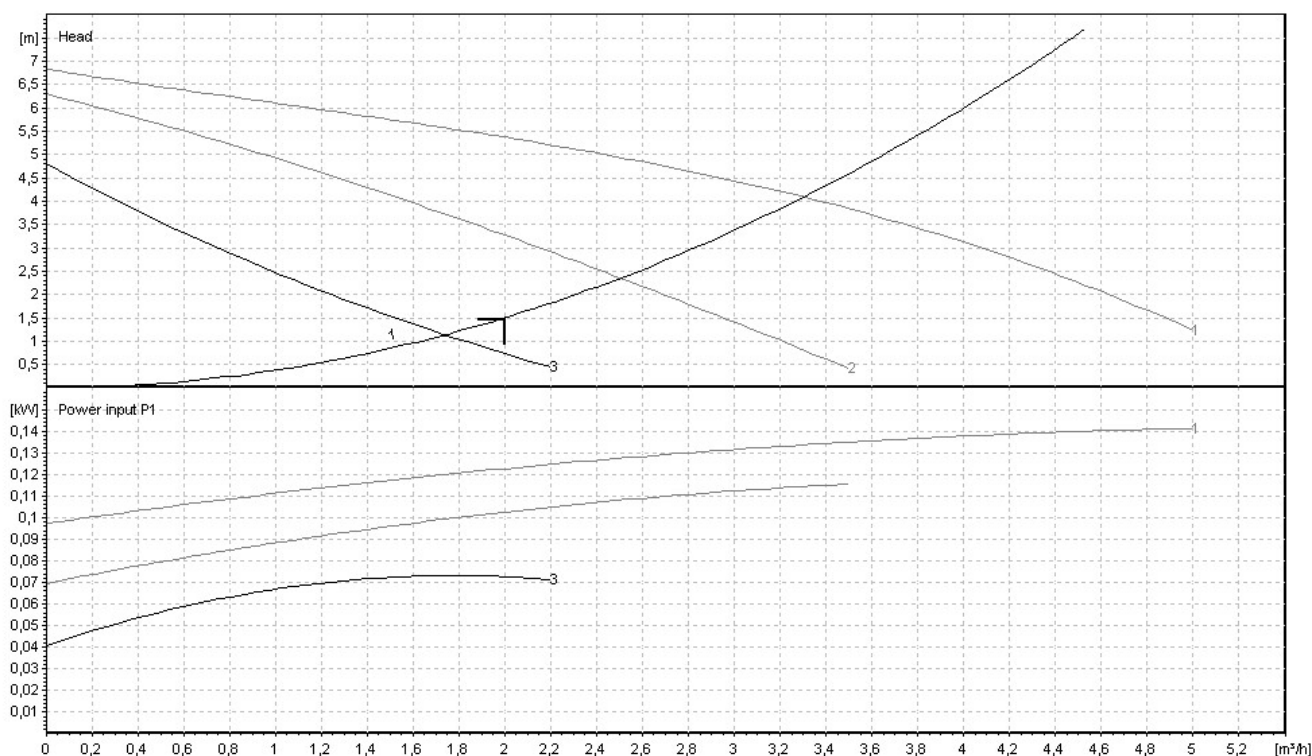
Σχήμα 6.8: Δίκτυο σωληνώσεων εξωτερικού κυκλώματος ψύξης
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)

Το δίκτυο των σωλήνων (σχήμα 6.8) κατασκευάστηκε από ευθύγραμμο χαλκό Φ 28 χωρίς μόνωση για μεγαλύτερη αποβολή της θερμότητας, ενώ όλες οι συνδέσεις του δικτύου έγιναν με εξαρτήματα μηχανικής σύσφιξης του οίκου VIEGA.



Σχήμα 6.7: Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης του εξωτερικού ανοικτού κυκλώματος για το νερό ψύξης

Οι συνολικές απώλειες πίεσης στο δίκτυο είναι περίπου 1,5m ενώ η μέγιστη παροχή νερού από τις προδιαγραφές της μηχανής Stirling είναι m^3/hr . Με αυτά τα δεδομένα έγινε η επιλογή του κυκλοφορητή από τους καταλόγους της εταιρείας WILLO. Ο κυκλοφορητής που επιλέχθηκε είναι ο RS25/7 με ρακόρ σύνδεση 1'' και δυνατότητα τριών ταχυτήτων .



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα λειτουργίας του κυκλοφορητή και καμπύλη λειτουργίας της εγκατάστασης

Για την ασφάλεια λειτουργία της μηχανής, ο έλεγχος του κυκλοφορητή προβλέπεται να γίνεται από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου της μονάδας SOLO. Η μονάδα ψύξεως, που θα πρέπει πάντα να λειτουργεί παράλληλα με την μηχανή, εκκινεί από 16^A ασφάλεια στο υποπίνακα.

Για τον έλεγχο της θερμικής απόδοσης της εγκατάστασης, τοποθετήθηκε στο κύκλωμα ψύξεως θερμοδομετρητής του οίκου Siemens. Έτσι γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της παροχής, της θερμοκρασίας εξόδου, της θερμοκρασίας εισόδου και της θερμικής ισχύος.

Για την ολοκλήρωση της εγκατάστασης τοποθετήθηκαν, γενικές βάνες διακοπής και απομόνωσης στο χώρο του εργαστηρίου, βάνες απομόνωσης με ρακόρ στην αερόψυκτη μονάδα και τέλος, βάνα εκκένωσης της εγκατάστασης στο χαμηλότερο σημείο του δικτύου

Ηλεκτρική σύνδεση

Η μονάδα συμπαραγωγής Stirling συνδέεται με το οικιακό δίκτυο, μετά το μετρητή του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας. Το καλώδιο σύνδεσης είναι $5 \times 4 \text{ mm}^2$ και προστατεύεται από μια αργή ασφάλεια 25A.

Για την απόδοση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος πίσω στο δίκτυο, συνήθως τοποθετείται ένας επιπλέον μετρητής. Παρόλα αυτά στη μηχανή υπάρχει εγκατεστημένος ήδη μετρητής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση είναι εφοδιασμένη με έναν κεντρικό διακόπτη ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει και ως διακόπτης ασφαλείας. Εάν απαιτείται ένας επιπλέον διακόπτης ασφαλείας τότε μπορεί να συνδεθεί στις εξόδους X2 1-3.

Η μονάδα είναι εφοδιασμένη με ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις που αντιλαμβάνονται τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και το συνημίτονο της. Έτσι χωρίς οποιαδήποτε επέμβαση από τον χρήστη γίνεται η τροφοδοσία και η επιστροφή της ηλεκτρικής ενέργειας και η γεννήτρια λειτουργεί είτε ως ηλεκτροκινητήρας είτε ως ηλεκτρογεννήτρια τριφασικού ρεύματος αντίστοιχα. Ο συγχρονισμός των φάσεων γίνεται αυτόματα, χωρίς επιπλέον διατάξεις. Αυτό επιτυγχάνεται από τη στιγμή που η ηλεκτρική ισχύς είναι μικρή (μικρότερη των 50 kW).

Οι καλωδιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση της μονάδας με τον υποπίνακα είναι $5 \times 6 \text{ mm}$ ενώ στον πίνακα της μηχανής Stirling τοποθετήθηκαν γενικοί διακόπτες ασφαλείας 3×25^A , όπως ορίζει ο κατασκευαστής.

Στον υποπίνακα τοποθετήθηκε και ο 10^A ασφαλοδιακόπτης για τον ψύκτη αέρα.

Αυτοί οι δύο διακόπτες, ο γενικός των 40^A και των 10^A είναι οι μόνοι που έχουν άμεση σχέση με την μηχανή. Οι υπόλοιποι διακόπτες είναι για τους ρευματοδότες που βρίσκονται κάτω από τον πίνακα. Ένας τριφασικός των 10^A και 4 μονοφασικοί των 10^A .

Η στήριξη των καλωδίων από τον πίνακα προς την μηχανή, έγινε με μεταλλική σχάρα 12 cm πλάτους.



Σχήμα 6.9: Εγκατάσταση τροφοδοσίας και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)

Απαγωγή καυσαερίων

Η γραμμή αποβολής του καυσαερίων πρέπει να έχει μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση από το συμπύκνωμα να είναι συμπαγής και να εγκατασταθεί με μέγιστη κλίση της τάξης του 2%.

Για την ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια, τοποθετείται εναλλάκτης καυσαερίων. Στο κάτω μέρος του εναλλάκτη συνδέεται ελαστικός σωλήνας για την αποβολή των συμπυκνωμάτων. Ο ελαστικός αυτός σωλήνας θα πρέπει να σχηματίζει σιφόνι ύψους εξήντα εκατοστών. Η άνωση του αερίου στο οριζόντιο τμήμα της καμινάδας και η αντίσταση στη ροή του σε όλους τους σωλήνες θα πρέπει να είναι ισορροπημένη, τόσο στο μερικό όσο και στο ολικό φορτίο, καθώς και για όλες τις πιθανές θερμοκρασίες καυσαερίου και αέρα περιβάλλοντος. Έτσι η πίεση σε αυτό το κομμάτι της μηχανής δεν θα πρέπει να είναι πάνω από 2 mbar.

Το μήκος του καπναγωγού δεν ξεπερνά τα 3 μέτρα. Έτσι η διάμετρος της καμινάδας υπολογίζεται για το φορτίο της εγκατάστασης στα 80mm (σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.10: Εσωτερικό μέρος καπναγωγού, σιφόνι συμπυκνωμάτων και εξωτερική φιάλη αποθήκευσης He
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)

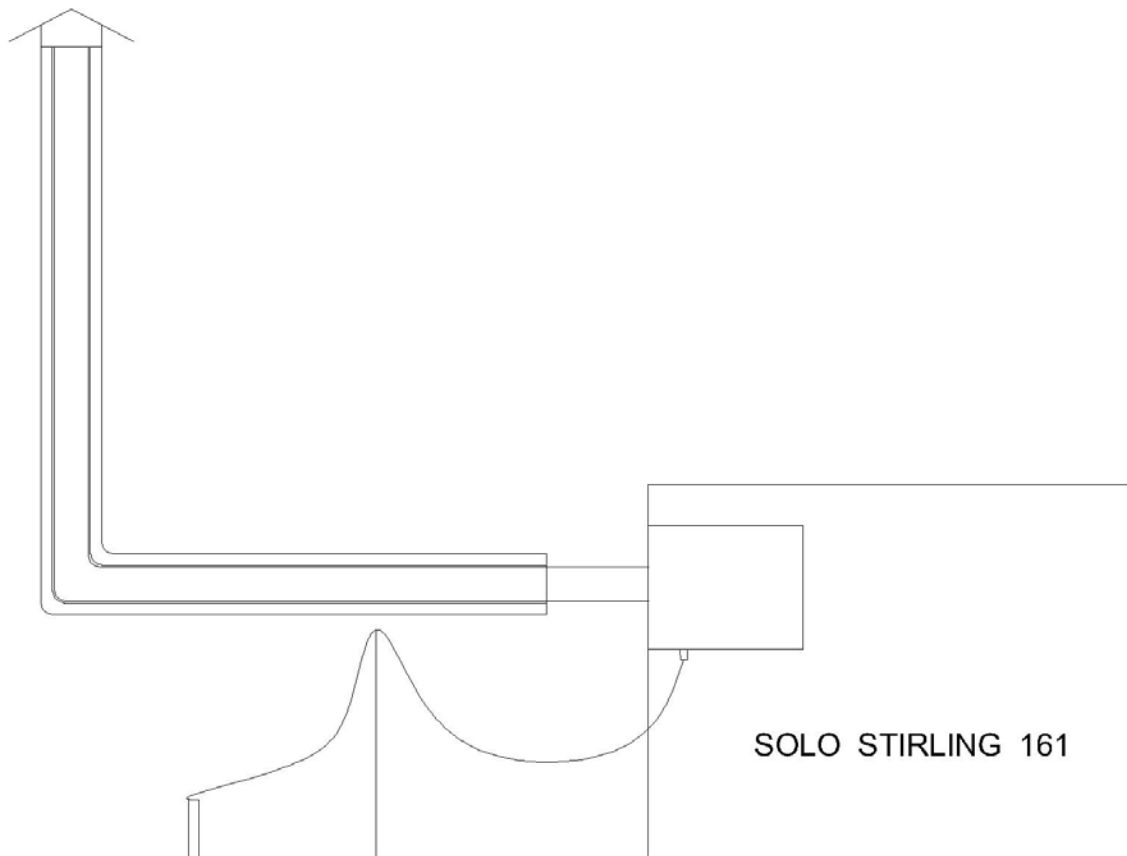
Τοποθετήθηκε καπναγωγός κυκλικής διατομής από φύλλο ανοξειδωτού χάλυβα διπλών τοιχωμάτων με μόνωση από κεραμικές ίνες πάχους 4 mm και εσωτερική διατομή Φ80. Επιλέχθηκε η καπνοδόχος να έχει μόνωση τόσο για την αποφυγή ατυχήματος στο χώρο του εργαστηρίου όσο και για την μείωση των υγραποποιήσεων των υδρατμών που παράγονται από την καύση του φυσικού αερίου. Στο πάνω μέρος του καπναγωγού και αμέσως μετά τη σύνδεσή του με τη μονάδα, έγινε μια οπή 5mm για την δυνατότητα τοποθέτησης καυσαναλυτή. Στο τέλος της καπνοδόχου τοποθετήθηκε καπέλο τύπου «κινέζικο».

Για την αποβολή των συμπυκνωμάτων των υδρατμών που παράγονταν στο εναλλάκτη των καυσαερίων, χρησιμοποιήθηκε εύκαμπτος διάφανος αγωγός $\frac{1}{2}$ "', συνολικού μήκους 1,4m.

Κατά μήκος της διαδρομής του ο αγωγός, από τον εναλλάκτη καυσαερίων έως και την οπή απόρριψης, ανυψώνεται σε ύψος 60 cm (σχήμα 6.10) με σκοπό την αποφυγή της διαρροής καυσαερίων στο κάτω μέρος του εναλλάκτη, ενέργεια που αναφέρεται στις οδηγίες εγκατάστασης του κατασκευαστή.



Σχήμα 6.11: Σύστημα σιφονισμού
(Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής)



Σχήμα 6.12: Σχηματική περιγραφή της εγκατάστασης του καπναγωγού και του αγωγού συμπυκνωμάτων (σιφόνι)

Τρόποι λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής Solo V161 Stirling Engine

Η ρύθμιση της απαιτούμενης ισχύος της μηχανής μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

- Από ευθείας από το χρήστη, εισάγοντας την επιθυμητή τιμή της μέσης πίεση μέσα από το menu ελέγχου της μονάδας (**configuration 0**).
- Από έναν εξωτερικό αισθητήρα θερμότητας που είναι τοποθετημένος σε μια δεξαμενή θερμότητας ή στην είσοδο του ψυκτικού νερού, κρατώντας έτσι η θερμοκρασία του σε ένα μικρό εύρος. Το σήμα του αισθητήρα εισάγεται στον επεξεργαστή της μονάδας, οπότε ρυθμίζεται η λειτουργία της αυτόματα (**configuration 1**).
- Από ένα εξωτερικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να εκκινήσει, να διακόψει και να ελέγξει την απόδοση της μονάδας. Η λειτουργία της μηχανής καθορίζεται από τα ηλεκτρικά σήματα που στέλνει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (**configuration 2**).
- Μέσω ενός χρονοδιακόπτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Installation and operation instructions Stirling 161 micro CHP module”: Solo Stirling GmbH, version 4.2, March 2005.

«Θερμοδυναμική ανάλυση μηχανών ισχύος Stirling» Αντωνάκος Γεώργιος, , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2001

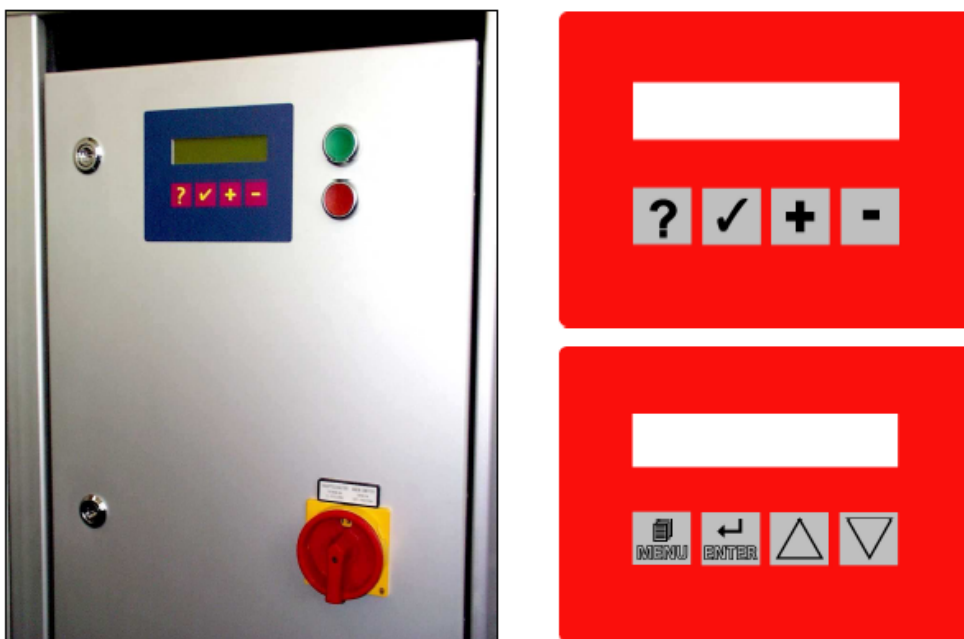
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

Διαδικασία έναρξης, λειτουργίας και παύσης μονάδας

Ο κεντρικός διακόπτης του δικτύου διανομής και τα δύο κομβία (πράσινο και κόκκινο), για την έναρξη και τη παύση αντίστοιχα της μονάδας, βρίσκονται στην πόρτα του πάνελ ελέγχου. Η πράσινη φωτεινή ένδειξη αναφέρεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας ενώ η κόκκινη φωτεινή ένδειξη αναφέρεται σε ανίχνευση σφάλματος. Στην οθόνη με τις τέσσερις επιλογές, παρουσιάζονται οι διάφορες ενδείξεις λειτουργίας της μονάδας και χρησιμοποιείται επίσης για την εισαγωγή των επιθυμητών ρυθμίσεων.

Πιέζοντας το κομβίο MENU(?) εισερχόμαστε στα βασικά υπομενού. Το κομβίο αυτό χρησιμοποιείται επίσης για τη μετάβαση από οποιοδήποτε σημείο ελέγχου στην αρχή του αντίστοιχου υπομενού.

- Πιέζοντας το κομβίο ENTER εισερχόμαστε μέσα στα δευτερεύοντα μενού.
- Πιέζοντας τα κομβία ▲ και ▼ πραγματοποιείται η πλοήγηση μέσα σε κάθε δευτερεύοντα μενού.



Σχήμα 7.1: Πάνελ ελέγχου με την οθόνη και τα κομβία χρήσης της μονάδας Solo V161 Stirling Engine

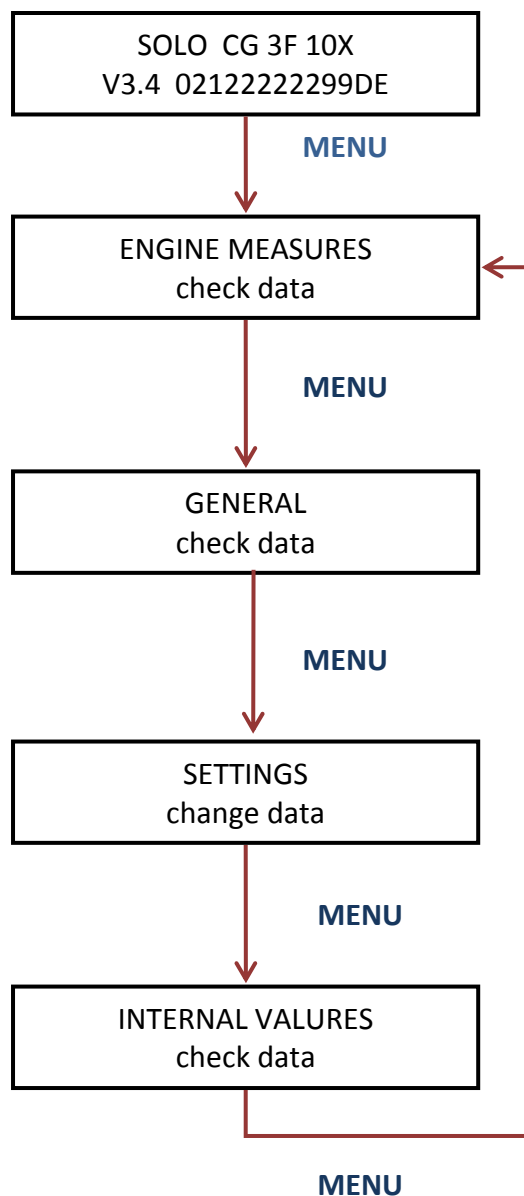
Μενού επιλογών

Η παρουσίαση του προγράμματος ελέγχου και χρήσης της μονάδας Solo V161 Stirling Engine, γίνεται με την περιγραφή των μενού, όπως αυτά εμφανίζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων.

Πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι δεν είναι απαραίτητο να εκκινήσουμε τη μονάδα για την περιήγησή μας στο πρόγραμμα της μηχανής. Αρκεί να πιέσουμε το πράσινο κομβίο και αμέσως να πιέσουμε σύντομα το κόκκινο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ολοκληρωμένο το μενού ελέγχου της μονάδας Solo V161 Stirling Engine.

Κύριο μενού



Μόλις εκκινήσει η μονάδα, εμφανίζονται ο τύπος της μηχανής, η έκδοση του λογισμικού και ο σειριακός αριθμός

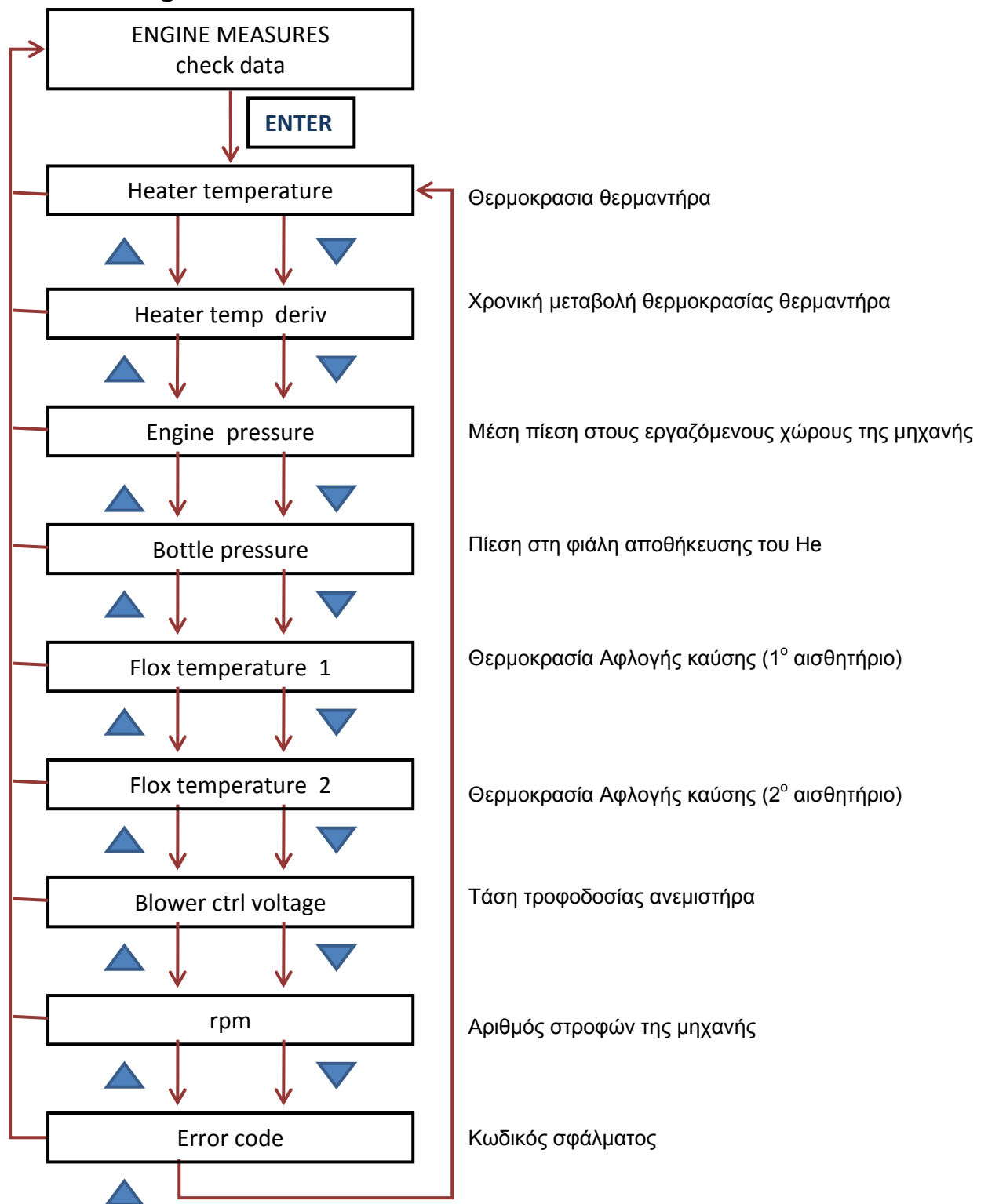
Στο μενού "ENGINES MEASURES" εμφανίζονται όλες οι τιμές των παραμέτρων που σχετίζονται με την τρέχουσα κατάσταση (configuration) λειτουργίας.

Στο μενού "GRID MEASURES" εμφανίζονται οι τιμές των παραμέτρων λειτουργίας που σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια.

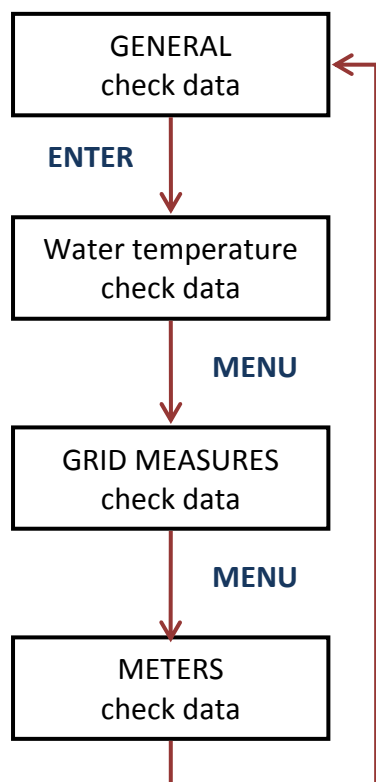
Στο μενού "SETTINGS" μπορούμε να προχωρήσουμε στις απαραίτητες ενέργειες για αλλαγή των αρχικών συνθηκών λειτουργίας της μονάδας.

Στο μενού "INTERNAL VALUES" εμφανίζονται οι εσωτερικοί παράμετροι λειτουργίας της μονάδας.

Μενού “Engine measures”



Μενού “General”



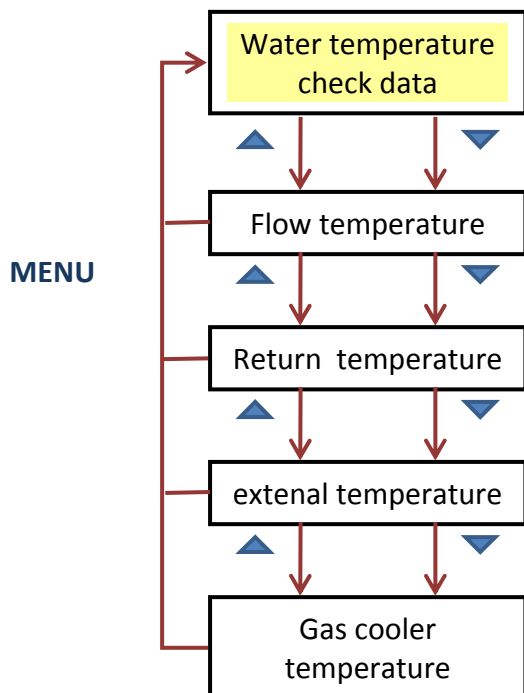
Θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού στο εσωτερικό κύκλωμα ψύξης της μηχανής

Εμφανίζονται οι τιμές των παραμέτρων λειτουργίας που σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια.

Εμφανίζονται οι τιμές των παραμέτρων λειτουργίας που έχουμε εισάγει ως απαιτήσεις λειτουργίας της μηχανής.

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε το καθένα από τα παραπάνω κεντρικά μενού του συστήματος ελέγχου της Solo V161 Stirling Engine.

Μενού «Water Temperature»



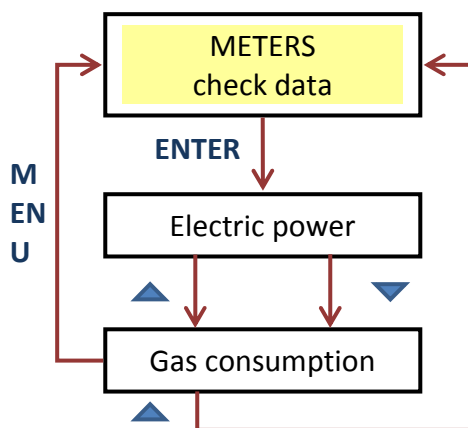
Θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού που εξέρχεται στο εξωτερικό κύκλωμα

Θερμοκρασίες επιστροφής του ψυκτικού υγρού του εξωτερικού κυκλώματος

Θερμοκρασία περιβάλλοντος εξωτερικού κυκλώματος

Θερμοκρασία ψυκτικού υγρού του εσωτερικού κυκλώματος στη θέση του ψύκτη

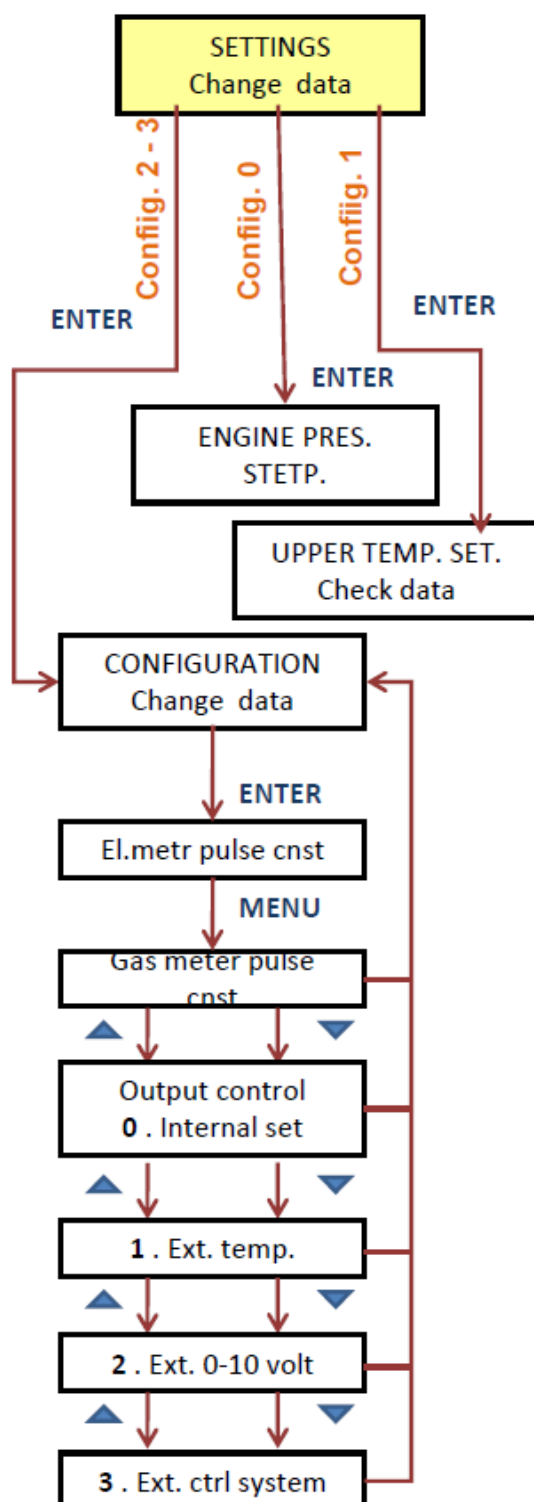
Μενού «Meters»



Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

Κατανάλωση καύσιμου (φυσικό αέριο)

Μενού «Settings»



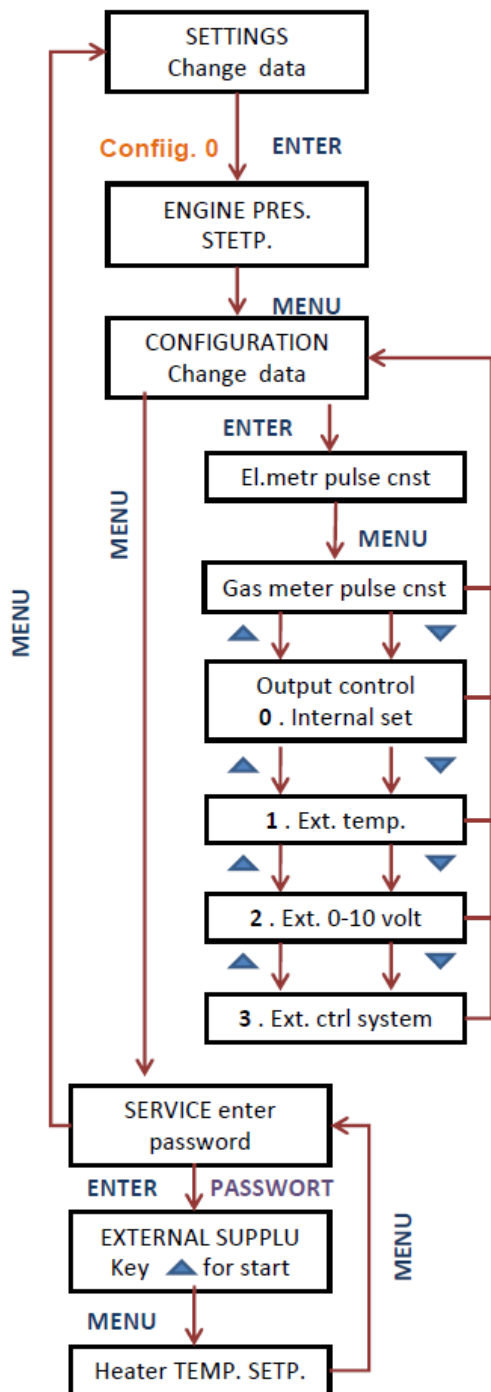
Καθορίζεται ο τρόπος (configuration) λειτουργίας της μηχανής:

Config. 0: Από τον χρήστη ορίζεται η επιθυμητή μέση πίεση της μηχανής.

Config. 1: Η λειτουργία της μηχανής καθορίζεται από την ένδειξη ενός θερμοζεύγος που είναι τοποθετημένο σε οποιοδήποτε χώρο επιθυμούμε

Config. 2-3: Η λειτουργία της μηχανής καθορίζεται από τις ενδείξεις ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας

Κατάσταση λειτουργίας 0 (Configuration 0 ορίζεται από τον χρήστη η επιθυμητή μέση πίεση της μηχανής.)



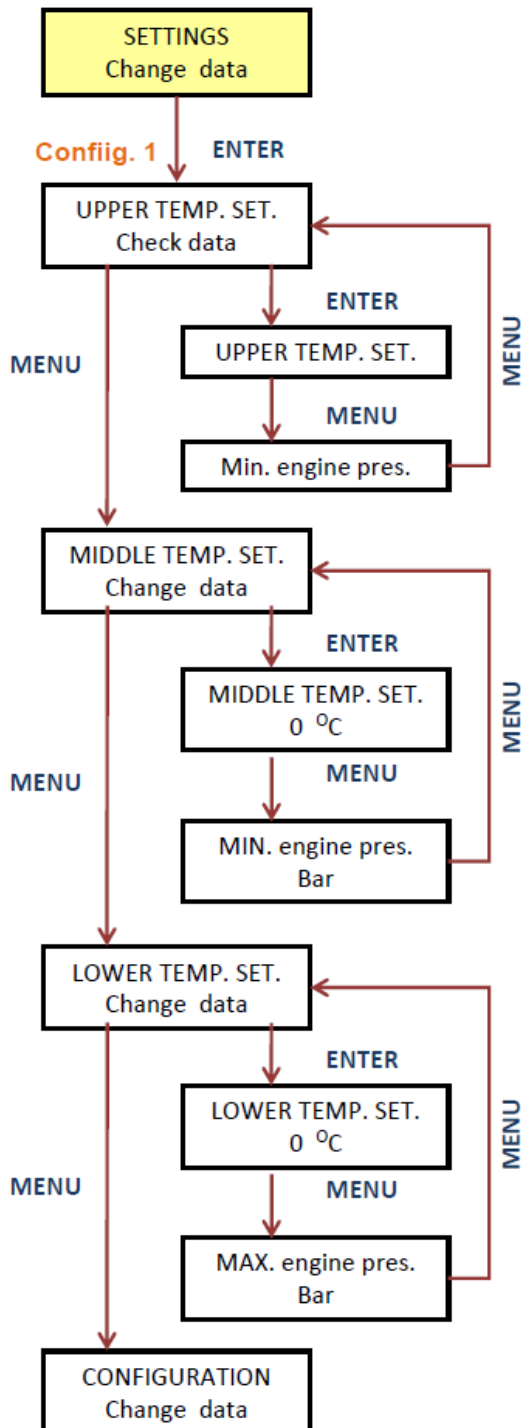
Πιέζοντας το ENTER εισερχόμαστε στο πεδίο ρύθμισης της μέσης πίεσης του εργαζόμενου μέσου της μηχανής.

Πιέζοντας στη συνέχεια το MENU μπορούμε να αλλάξουμε την κατάσταση λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πιέζοντας για δεύτερη φορά το MENU και εισάγοντας τον κωδικό πρόσβασης μπορεί ο εξουσιοδοτημένος τεχνικός να επισκευάσει οποιοδήποτε πρόβλημα του ηλεκτρονικού συστήματος

Πιέζοντας για άλλη μια φορά το MENU μας επαναφέρει το SETTINGS

Κατάσταση λειτουργίας 1 (Configuration 1 ορίζεται από ένα εξωτερικό θερμοζεύγος η επιθυμητή θερμοκρασία ενός χώρου.)



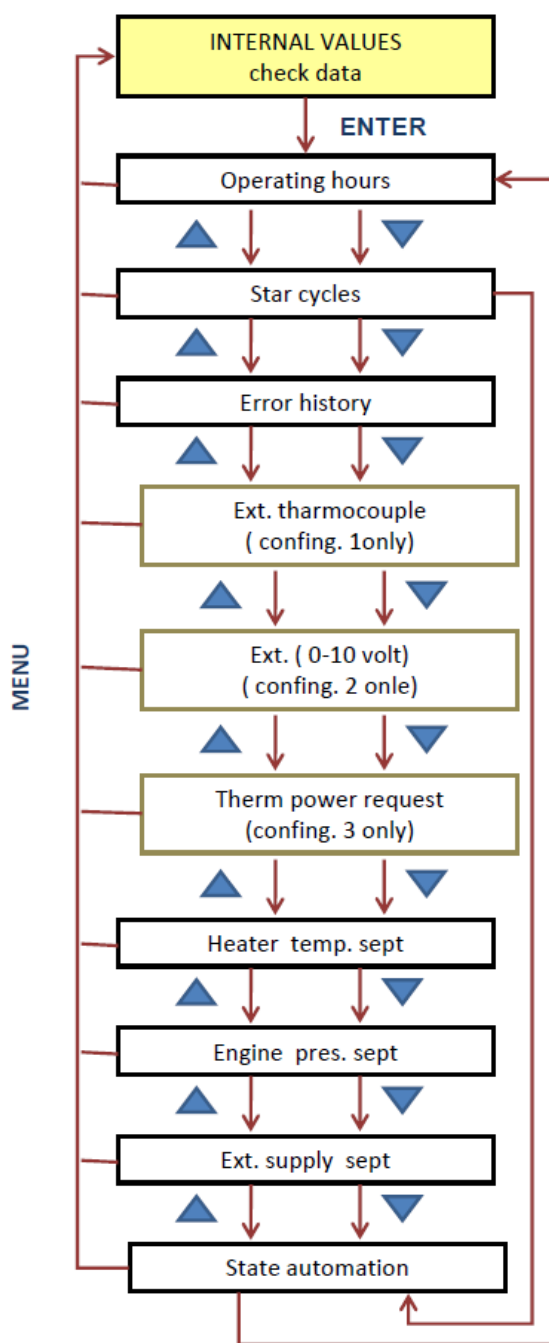
Έχοντας αλλάξει την κατάσταση λειτουργίας σε 1, μπορούμε να πλοηγηθούμε στο διπλανό μενού.

Αρχικά ορίζουμε τη μέγιστη επιθυμητή θερμοκρασία του χώρου ή του σημείου που έχουμε επιλέξει σε συνδιασμό με τη μέγιστη τιμή της μέσης πίεσης της μηχανής.

Στη συνέχεια ορίζεται αντίστοιχα η μέση θερμοκρασία του χώρου ή του σημείου

Τέλος ορίζεται ελάχιστη θερμοκρασία του χώρου ή του σημείου

Μενού «Internal Values»



Οι συνολικές ώρες λειτουργίας της μονάδας

Το σύνολο των εκκινήσεων της μονάδας

Το ιστορικό σφαλμάτων που κατέγραψε ο ηλεκτρονικός εγκέφαλος της μονάδας

Στοιχεία από το εξωτερικό θερμοζεύγος (κατάσταση λειτουργίας 1)

Στοιχεία από την εξωτερική μονάδα διαχείρισης ενέργειας (κατάσταση λειτουργίας 2)

Απαιτήσεις θερμικής ισχύος (κατάσταση λειτουργίας 3)

Ρύθμιση θερμοκρασίας θερμαντήρα

Ρύθμιση μέσης πίεσης μηχανής

Ρύθμιση εξωτερικής μονάδας τροφοδοσίας με He

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Installation and operation instructions Stirling 161 micro CHP module”: Solo Stirling GmbH, version 4.2, March 2005.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

Θερμικός ισολογισμός μονάδας συμπαραγωγής

Solo V161V Stirling Engine

Για τον υπολογισμό του θερμικού ισολογισμού της μηχανής Solo 161 στο χώρο του εργαστηρίου, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής ενδεικτικά και καταγραφικά όργανα:

- Θερμιδομετρητής Siemens WFZ.E110-I.
- Αναλογικός μετρητής φυσικού αερίου.
- Ψηφιακός αναλυτής καυσαερίων.
- Ψηφιακός μέτρησης ταχύτητας αέρα TESTO 425.

Επιπλέον γίνεται χρήση και των μετρήσεων που αναγράφονται στην ενσωματωμένη οθόνη της μονάδας.

Τα μεγέθη, που λαμβάνουμε από τη χρήση των παραπάνω οργάνων είναι:

Από το μετρητή παροχής αερίου.

- Παροχή φυσικού αερίου \dot{V} σε m^3/h

Από τον πίνακα ενδείξεων της μηχανής SOLO:

- Η μέση πίεση της μηχανής..... P_m σε bar
- Η ηλεκτρική ισχύς W_{el} σε kW

Από τον αναλυτή καυσαερίων:

- Ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαερίων..... CO_2 σε %
- Βαθμός απόδοσης της καύσεως..... η_{comb} σε %
- Θερμοκρασιακή διαφορά καπναερίων– αέρα..... ΔT_{NET} σε $^{\circ}C$
- Θερμοκρασία καυσαερίων $FLUE(T_F)$ σε $^{\circ}C$
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος (εσωτ.) $INLET$ σε $^{\circ}C$

Με τον αναλυτή καυσαερίων πραγματοποιείται ταυτόχρονα και η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα που βγαίνει από την οπή εξαερισμού του πλαισίου της μηχανής

- Θερμοκρασία αέρα T_A σε $^{\circ}C$

Από το όργανο μέτρησης της ταχύτητας του αέρα και των καυσαερίων έχουμε:

- Ταχύτητα καυσαερίων u_f σε m/sec
- Ταχύτητα αέρα στην οπή του πλαισίου του κινητήρα..... u_a σε m/sec

Από τον θερμιδομετρητή στο σύστημα απόδοσης της θερμότητας, έχουμε:

- Θερμική ισχύς Q_q σε kW

Διαδικασία μετρήσεων

Η μονάδα συμπαραγωγής Solo V161 Stirling Engine χαρακτηρίζεται από την στιβαρή κατασκευή της. Είναι μονάδα σχεδιασμένη για οικιακή χρήση και σίγουρα όχι για πειραματική. Το γεγονός αυτό μας δημιούργησε αρκετούς προβληματισμούς σχετικά με το ποιες μετρήσεις πρέπει να λάβουμε, με τι όργανα και σε ποια σημεία, αφού ήταν σχετικά δύσκολη η πρόσβαση στη μονάδα.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός οργάνων για επαγγελματική όσο και εργαστηριακή χρήση. Με τον τρόπο αυτό μπορέσαμε να πάρουμε μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια στα σημεία που είχαμε πρόσβαση ενώ στα υπόλοιπα προσπαθήσαμε να μειώσουμε τα συστηματικά και τα τυχαία σφάλματα.

Επόμενο μέλημά μας ήταν να διεξάγουμε τις μετρήσεις σε συνθήκες όσο το δυνατόν πιο σταθερές. Το γεγονός ότι ο ψύκτης αέρα είναι τοποθετημένος σε υπαίθριο χώρο, μας επέβαλε την όλη διαδικασία να την πραγματοποιήσουμε βραδινές ώρες. Έτσι το σύστημα θα μπορούσε να ισορροπήσει γρηγορότερα και θα είχαμε τη δυνατότητα λήψης περισσότερων μετρήσεων. Επιπλέον η μηχανή είναι προγραμματισμένη κάθε 30 λεπτά της ώρας να αυτορυθμίζεται μεταβάλλοντας την μέση πίεση της. Πράγμα που σημαίνει ότι θα έπρεπε στο διάστημα αυτό να έχουμε προλάβει να φτάσουμε στη θερμική ισορροπία και να έχουμε καταγράψει τις μετρήσεις μας. Για το λόγο αυτό οι μεταβολές της πίεσης που εισάγαμε στη μονάδα δεν ήταν μεγάλες.

Τη μεγαλύτερη τεχνική δυσκολία παρουσίασαν οι μετρήσεις ταχύτητας αέρα στο στόμιο αερισμού της μονάδας λόγω:

- α) της μεγάλης ευαισθησίας του οργάνου
- β) του ανομοιόμορφου προφίλ ταχύτητας του αέρα στο στόμιο
- γ) στην απόλυτη καθετότητα ως προς την κατεύθυνση της ροή του αέρα που απαιτούσε η αρχή λειτουργίας του οργάνου.

Για να είμαστε όσο το δυνατόν πιο ακριβείς, χωρίσαμε με μεταλλικά σύρματα την οπή σε 12 στοιχειώδεις επιφάνειες των οποίων υπολογίσαμε το εμβαδόν. Στη συνέχεια μετρήσαμε την ταχύτητα του αέρα σε καθένα από αυτά τα 12 εμβαδά. Το γινόμενο του εμβαδού επί την ταχύτητα του αέρα σε κάθε στοιχειώδη επιφάνεια αντιστοιχεί στην τοπική παροχή αέρα. Προσθέτοντας τις 12 τοπικές παροχές, βρήκαμε την ολική παροχή μάζας αέρα από το στόμιο της μονάδας. Διαιρώντας την παροχή προς το συνολικό εμβαδόν του στομίου βρήκαμε ένα μέγεθος με μονάδες ταχύτητας που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα του αέρα από το στόμιο.

Ενεργειακός ισολογισμός

Ημερομηνία καταγραφής μετρήσεων : 27 – 02 - 2010

Η κυκλική διατομή από την έξοδο των καπναερίων, που είναι:

$$A = \frac{\pi \cdot d}{4} \quad (1)$$

Όπου: $d = 0,08m$

Άρα: $A = 0,005024m^2$

Διατομή αερισμού στο προστατευτικό πλαίσιο της μηχανής, που αποτελείται από δύο ημικύκλια και ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο :

$$A_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{8} + (x \cdot y) + \frac{\pi \cdot d^2}{8} \quad (2)$$

Όπου: $d = 0,08m$

$x = 0,11m$

$y = 0,08m$

Άρα: $A = 0,01267m^2$

Η θερμοκρασία στο χώρο του εργαστηρίου:

$$NET = 20,5 \quad (^\circ C)$$

Η εισερχόμενη θερμότητα που προκύπτει από την καύση του καυσίμουQ

$$Q_u = \dot{V} \cdot H_{ub} \cdot \sigma \quad [kW]$$

Όπου H_{ub} η θερμογόνος δύναμη του φυσικού αερίου.

Η τιμή της έχει άμεση σχέση με την σύσταση του φυσικού αερίου και έχει ληφθεί από τα δεδομένα της εταιρίας παροχής αερίου Αττικής. Για το διάστημα 1-2-2010 έως 25-02-2010, η τιμή ήταν :

$$H_{ub} = 11,5416 \quad \left[\frac{kW \cdot h}{Nm^3} \right]$$

Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς.

$$W_{el} \quad [kW]$$

Θερμική ισχύς προς το εξωτερικό κύκλωμα νερού.

$$Q_q \quad [kW]$$

Απώλειες λόγω απόδοσης καυστήρα (εσωτερικός βαθμός απόδοσης καύσης).

$$Q_f = Q_F \cdot (1 - EFFN) \quad [kW]$$

Θερμικές απώλειες από τον αερισμό του πλαισίου.

$$Q_a = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [kW]$$

Όπου: $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}_a \quad \left[\frac{kg}{h} \right]$

Η πυκνότητα του αέρα είναι για τους 45 °C, είναι :

$$\rho = 1,29 \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\dot{V}_a = u_a \cdot A_1 \cdot \sigma_x \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\sigma_x = \frac{3600}{sec} = \frac{1}{h} \quad \text{συντελεστής μετατροπής του χρόνου}$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p του αέρα στους 50 °C

$$c_p = 1008,5 \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Η θερμοκρασιακή διαφορά του αέρα αερισμού:

$$\Delta T = T_A - NET \quad [^\circ C]$$

Θερμικές απώλειες καπναερίων.

Η θερμότητα που αποβάλλεται από το σύστημα μέσω των καπναερίων είναι:

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [kW]$$

Όπου: $\dot{m}_c = \rho_{cm} \cdot \dot{V}_c \quad \left[\frac{kg}{h} \right]$

ρ_{cm} η μέση πυκνότητα του καπναερίου

$$\rho_{cm} = \frac{p_L}{R \cdot T_A} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

p_L είναι η πίεση του εξωτερικού αέρα

$$p_L = 97000 \cdot e^{-g \cdot z / R_L \cdot T_L} \quad [Pa]$$

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

$$g = 9,81 \quad \left[\frac{m}{sec^2} \right]$$

z είναι το υψόμετρο της καμινάδας

$$R_L = 288 \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Η παροχή όγκου του καυσαερίου είναι:

$$\dot{V}_c = u_f \cdot A \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\sigma_x = \frac{3600}{sec} = \frac{1}{h} \quad \text{συντελεστής μετατροπής του χρόνου}$$

Όπου c_c η ειδική θερμοχωρητικότητα του καυσαερίου:

$$c_c = \frac{1011 + 0.05 \cdot T_A + 0,0003 \cdot T_A^2 + (f_{co} + f_{c1} + f_{c2} + f_{c3}) \cdot \sigma(CO_2)}{1 + f_{c3} + \sigma(CO_2)} \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

Όπου f_{c0} f_{c1} f_{c2} f_{c3} οι συντελεστές για το φυσικό αέριο είναι:

$$f_{c0} = 17,6$$

$$f_{c1} = 0,015$$

$$f_{c2} = -0,000009$$

$$f_{c3} = 0,0116$$

Τέλος όπου ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά των καπναερίων σε σχέση με το περιβάλλον του εργαστηρίου.

$$\Delta T = NET \quad (^\circ C)$$

Υπολογισμοί

Εφαρμόζοντας το παραπάνω τυπολόγιο για τις μετρήσεις που πήραμε στα 80 bar, έχουμε αναλυτικά τα παρακάτω αποτελέσματα.

Θερμική ισχύς αποδιδόμενη από το καύσιμο:

$$Q_u = 2,36 \cdot 11,5416 = 26,54568 \quad [kW]$$

Ηλεκτρική αποδιδόμενη ισχύς:

$$W_{el} = 5,3 \quad [kW]$$

που αντιστοιχεί στο 19,97% της προσδιδόμενης από το καύσιμο ισχύος

Θερμότητα αποδιδόμενη στον αερόψυκτο ψύκτη:

$$Q_q = 16,3 \quad [kW]$$

που αντιστοιχεί στο 61,40% της προσδιδόμενης από το καύσιμο ισχύος

Απώλειες από τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της καύσης.

$$Q_f = Q_u \cdot (1 - EFFN) = 26,54568 \cdot (1 - 0,992) = 0,212665 \quad [kW]$$

που αντιστοιχεί στο 0,80% της προσδιδόμενης από το καύσιμο ισχύος

Θερμικές απώλειες από τον αερισμό του πλαισίου.

$$\dot{V}_a = 61,554938 \quad [m^3/h]$$

$$\dot{m} = 79,405869 \quad [kg/h]$$

$$\Delta T = 37,6 \quad [^{\circ}C]$$

$$Q_a = 0,8364 \quad [kW]$$

που αντιστοιχεί στο 3,15% της προσδιδόμενης από το καύσιμο ισχύος

Θερμικές απώλειες καπναερίων.

$$\begin{aligned} p_L &= 96920,417 && [Pa] \\ \rho_{cm} &= 8,11 && [kg/m^3] \\ \dot{V}_c &= 27,1296 && [m^3/h] \\ \dot{m}_c &= 205,4759 && [kg/h] \\ c_c &= 916,372 && [J/kg \cdot K] \\ \Delta T &= 21,1 && [^{\circ}C] \\ Q_c &= 1,1815 && [kW] \end{aligned}$$

που αντιστοιχεί στο 4,45% της προσδιδόμενης από το καύσιμο ισχύος

Παρατηρούμε ότι το άθροισμα των θερμικών απωλειών είναι:

$$\Sigma Q_{loss} = W_{el} + Q_q + Q_f + Q_a + Q_c = 23.8303 \quad [kW]$$

Δηλαδή έχουμε απόκλιση στο θερμικό ισοζύγιο της τάξης του **10,23%**.

P [bar]	Qu [kW]	Qf [kW]	Wel [kW]	Qq [kW]	Qa [kW]	Qc [kW]	Qlost [kW]	Vu [Nm ³ /h]
30	12,6957	0,050783	1,6	8,8	0,6446	0,534619	1,0657	1,10
50	18,87052	0,003223	3	12,04	0,8904	0,72012	2,1067	1,64
70	22,8524	0,15997	4,6	14	0,784001	1,288	2,02	1,98
80	26,5456	0,212365	5,3	16,3	0,8363	1,1859	2,7153	2,30
90	29,0848	0,32	5,9	18,5	0,76258	1,4	2,2015	2,52
110	36,08	0,4329	7,4	22,2	0,7981	1,7605	3,4873	3,13
120	39,056	0,54679	7,9	23,83	0,6447	1,6323	4,506	3,38
130	41,046	0,6977	8,5	24,2	0,752	1,7977	5,09858	3,56

Πίνακας 8.1: Αποτελέσματα ενεργειακού ισολογισμού

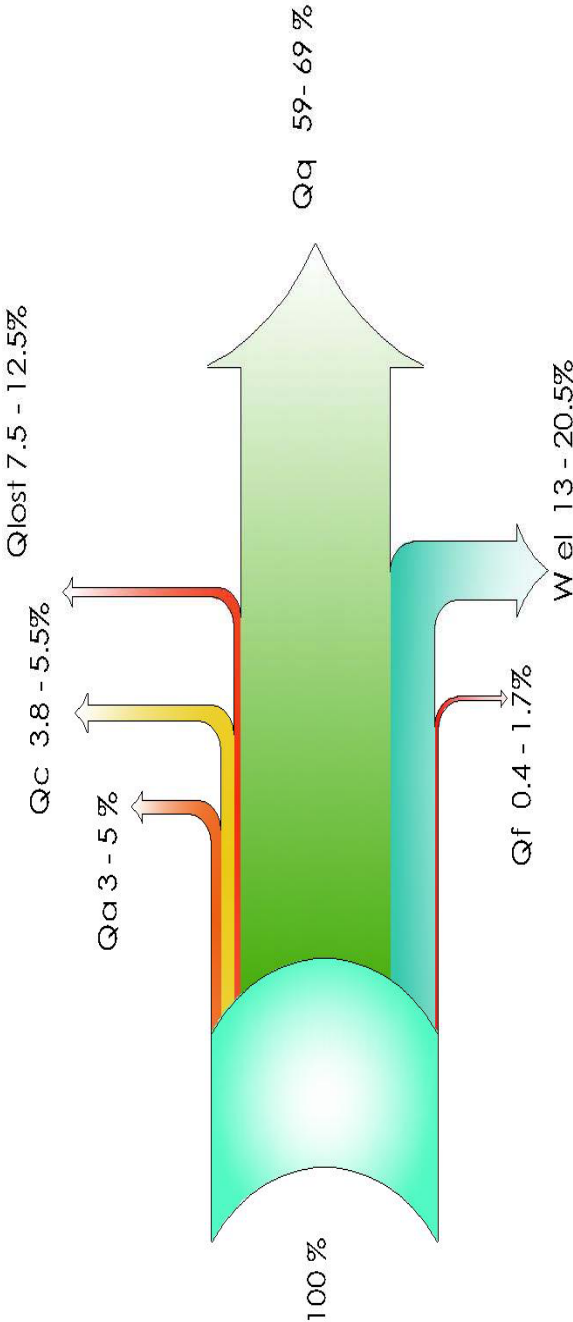
P [bar]	Qf [%]	Wel [%]	Qq [%]	Qa [%]	Qc [%]	Qlost [%]
30	0,40%	12,60%	69,31%	5,08%	4,21%	8,39%
50	0,60%	15,90%	63,80%	4,72%	3,82%	11,16%
70	0,70%	20,13%	61,26%	3,43%	5,64%	8,84%
80	0,80%	19,97%	61,40%	3,15%	4,45%	10,23%
90	1,10%	20,29%	63,61%	2,62%	4,82%	7,57%
110	1,20%	20,51%	61,53%	2,21%	4,88%	9,67%
120	1,40%	20,23%	61,00%	1,65%	4,18%	11,54%
130	1,70%	20,71%	58,96%	1,83%	4,38%	12,42%

Πίνακας 8.2: Ποσοστιαία αποτελέσματα ενεργειακού ισολογισμού

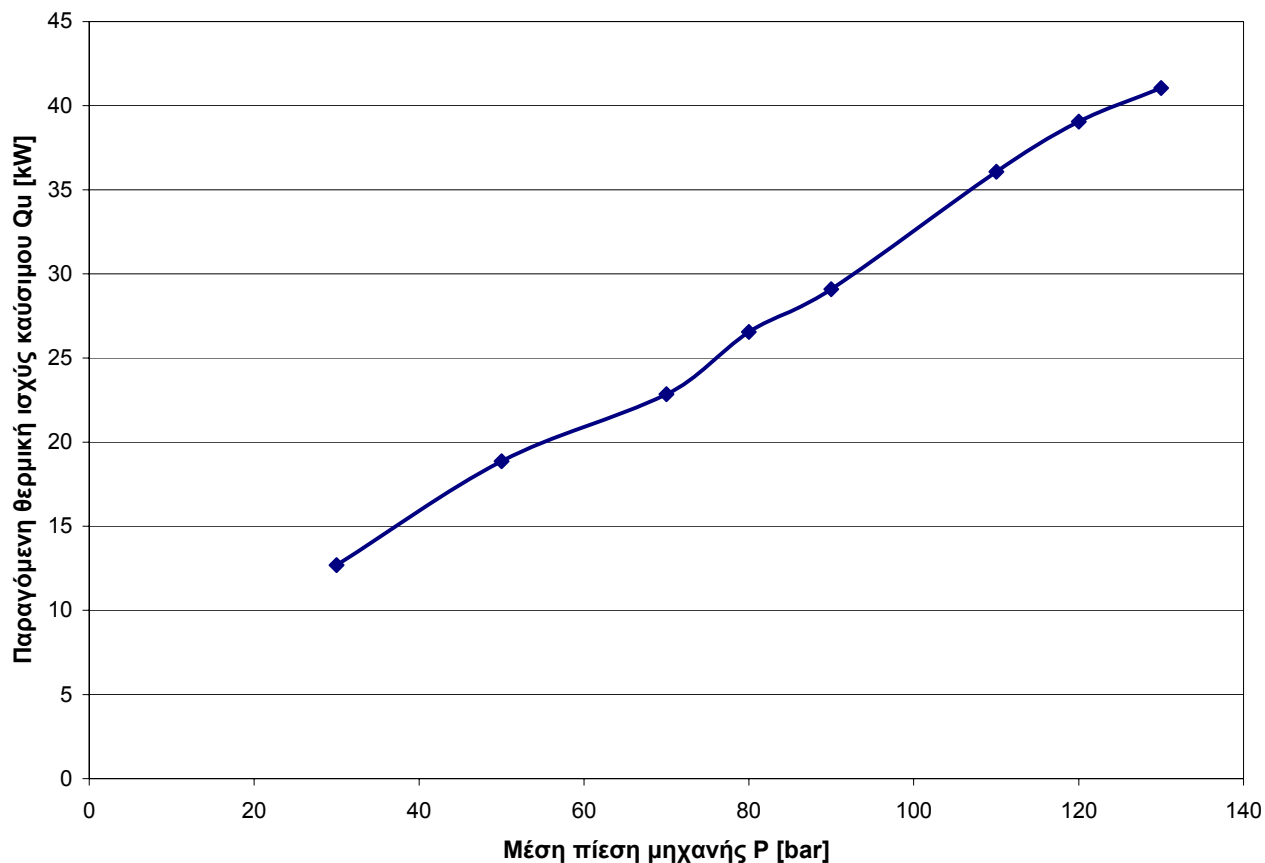
Η απόκλιση στο θερμικό ισοζύγιο είναι αρκετά ικανοποιητική. Βέβαια είναι απαραίτητο και χρήσιμο να αιτιολογήσουμε τους λόγους ύπαρξης της.

- Δεν έχουμε φτάσει σε μόνιμη κατάσταση. Τα φαινόμενα αποθήκευσης θερμότητας δεν έχουν ολοκληρωθεί, οπότε μέρος της θερμικής ενέργειας από την καύση δεν ανιχνεύεται τις θερμικές απώλειες.
- Υπάρχουν συστηματικά σφάλματα από την ακρίβεια και την κλάση των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήσαμε.
- Υπάρχουν τυχαία σφάλματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Χρησιμοποιείται μέση τιμή για την κατανάλωση του φυσικού αερίου, αφού είναι δύσκολο να λαμβάνουμε στιγμιαία κατανάλωση. Όμως οι απώλειες υπολογίζονται στη μονάδα του χρόνου.
- Η ταχύτητα που μετρήθηκε του απαγόμενου αέρα από το κέλυφος της μονάδας, εμπεριέχει το σφάλμα που προκύπτει από τον πεπερασμένο αριθμό στοιχειωδών επιφανειών που χωρίστηκε το άνοιγμα.
- Η παραπάνω ταχύτητα μετρήθηκε πάνω ακριβώς στο άνοιγμα του κελύφους. Οπότε επηρεάζεται από τις διαμητικές δυνάμεις μεταξύ του αέρα και του τοιχώματος. Δεν υπήρχε τη περίοδο των μετρήσεων, η δυνατότητα να κάνουμε τη μέτρηση αυτή σε ικανή απόσταση ώστε να έχει αναπτυχθεί πλήρως το οριακό στρώμα.

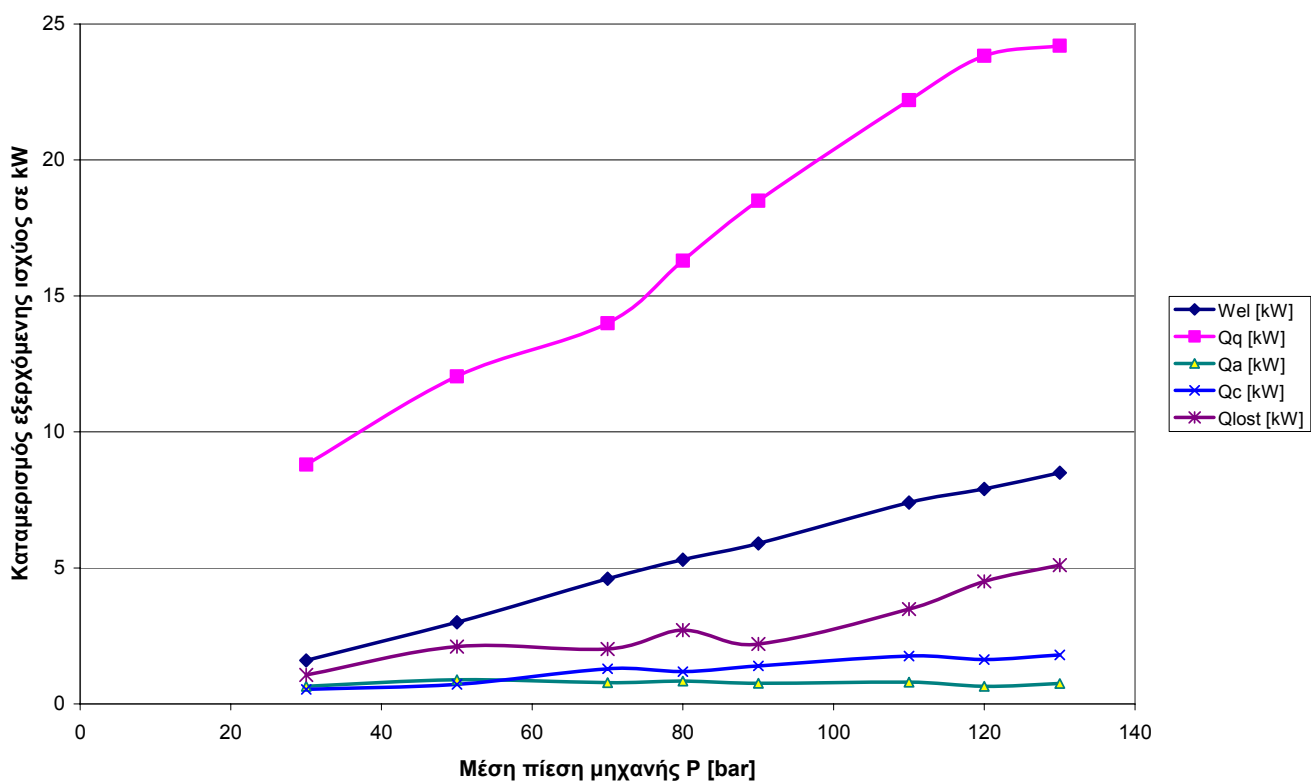
Τον ενεργειακό ισολογισμό μπορούμε να τον αποτυπώσουμε και σε ένα διάγραμμα Sankey:



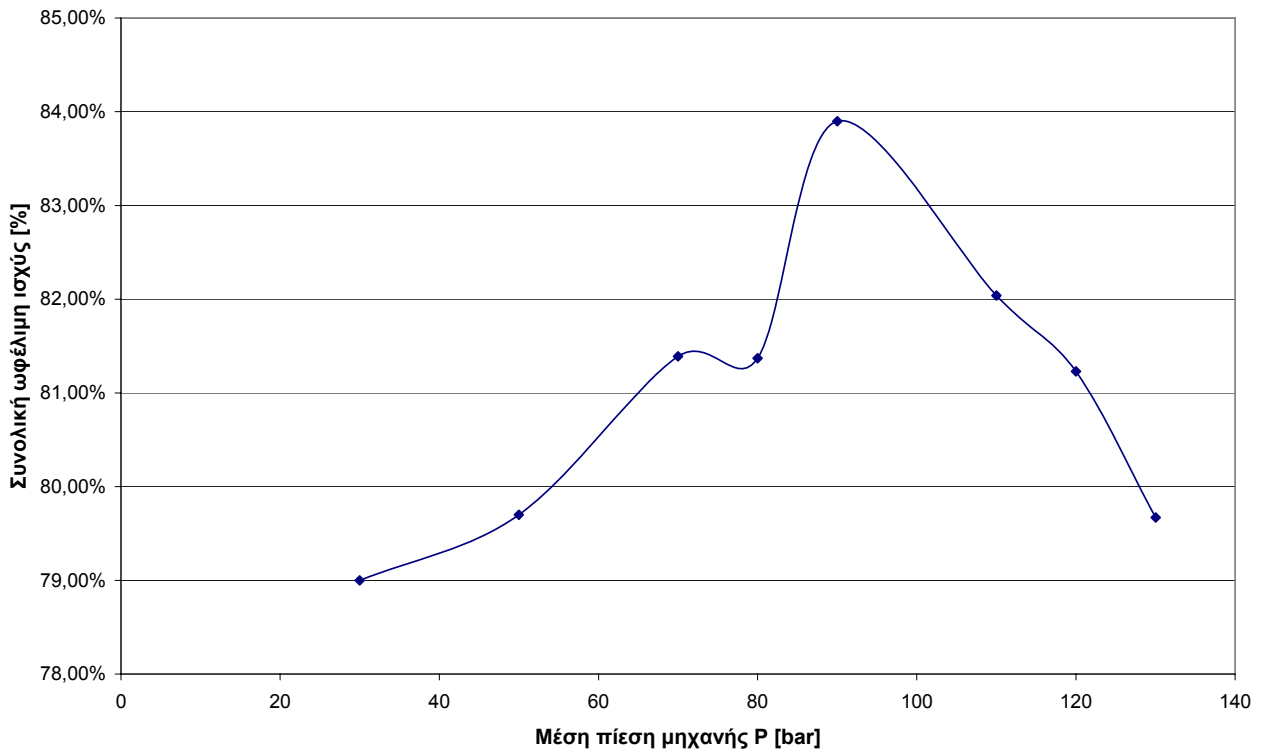
Σχήμα 8.1: Διάγραμμα Sankey



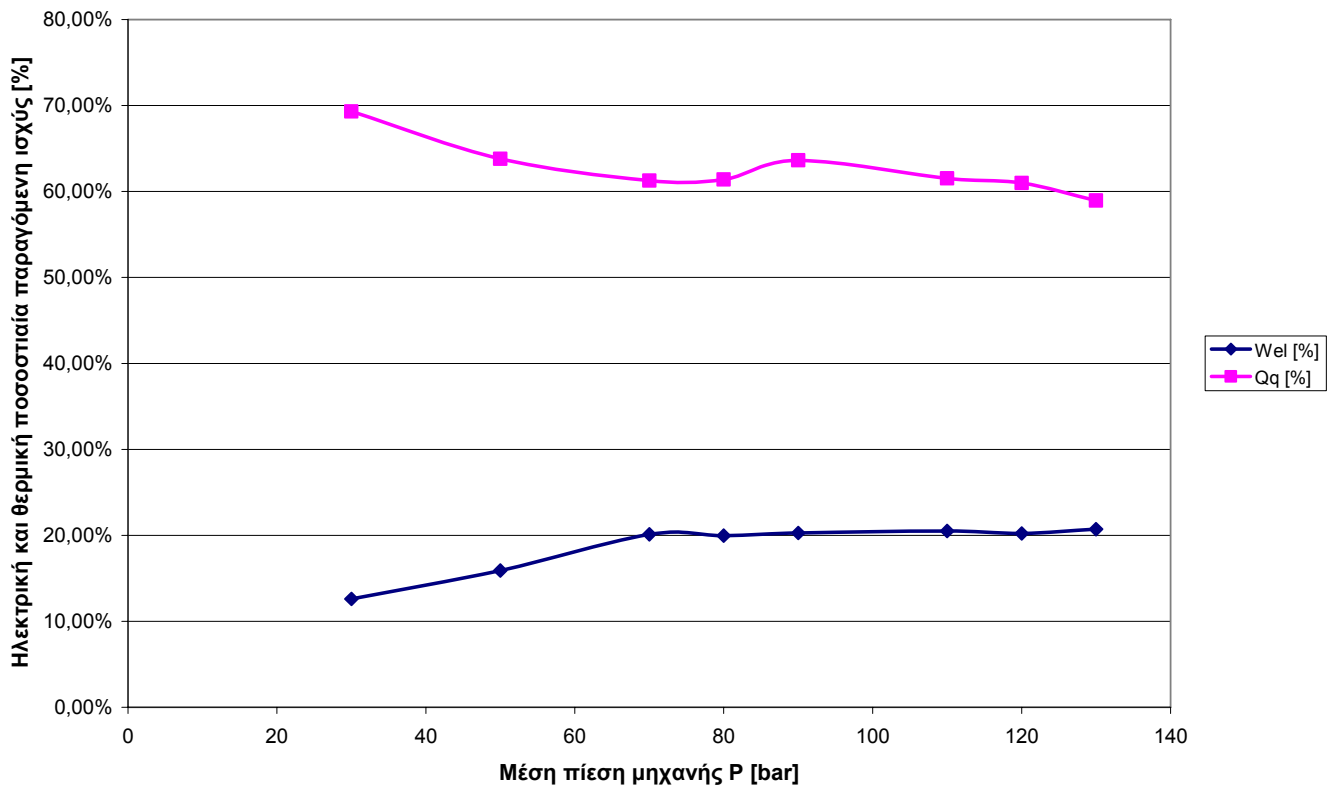
Σχήμα 8.1: Μεταβολή της παραγόμενης θερμικής ισχύς από την καύση του φυσικού αερίου σε συνάρτηση με την μέση πίεση της μηχανής.



Σχήμα 8.2: Μεταβολή της εξερχόμενης ισχύος από τα διάφορα μέρη και συστήματα της μονάδας.



Σχήμα 8.3: Συνολική ωφέλιμη ισχύς σε συνάρτηση με την μέση πίεση της μηχανής.



Σχήμα 8.4: Ηλεκτρική και θερμική παραγόμενη ισχύς σε συνάρτηση με την μέση πίεση της μηχανής.

Στο **σχήμα 8.1** παρατηρούμε ότι η παραγόμενη θερμική ισχύς, που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την κατανάλωση καυσίμου, είναι ανάλογη γραμμικά με την μέση πίεση λειτουργίας της μονάδας.

Στο **σχήμα 8.2** παριστάνεται ο καταμερισμός της παραγόμενης ισχύος. Η παράμετρος W_{el} αντιστοιχεί στη ηλεκτρική ισχύ που παράγει η ηλεκτρογεννήτρια. Η παράμετρος Q παριστάνει τη θερμική ισχύ που καταναλώνεται στον εξωτερικό ψύκτη αέρα. Τα Q_a και Q_c αντιστοιχούν στη θερμική ισχύ αερισμού και των καυσαερίων αντίστοιχα. Τέλος το Q_{loss} αντιστοιχεί στις άδηλες απώλειες. Παρατηρούμε ότι όλα αυτά τα μεγέθη παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και ανάλογη της επιλεγμένης από το χρήστη μέσης πίεσης της μηχανής.

Στο **σχήμα 8.3** παριστάνεται η συνολική ωφέλιμη παραγόμενη ισχύς. Είναι το άθροισμα της θερμικής ισχύος που καταναλώνεται στον εξωτερικό ψύκτη αέρα και της ηλεκτρικής ισχύος που διοχετεύεται στο δίκτυο. Παρατηρείται μια αξιοθαύμαστη σταθερότητα της ωφέλιμης παραγωγής της μονάδας σε όλο το εύρος της μέσης πίεσης. Παρόλα αυτά η μονάδα σε πίεση 90 bar παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά και απόδοση.

Στο **σχήμα 8.4** παρατηρούμε ότι στις πιέσεις μέχρι και τα 70 bar, το ποσοστό της ενέργειας του καυσίμου που μετατρέπεται σε ηλεκτρική αυξάνει σχεδόν γραμμικά ενώ στη συνέχεια παρουσιάζει σταθεροποίηση σε μια τιμή περίπου 20%. Σε αυτό συμβάλει το γεγονός ότι ο άξονας περιστροφής της γεννήτριας είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον στροφαλοφόρο άξονα της μηχανής Stirling. Η μηχανή όμως περιστρέφεται με λίγο παραπάνω από 1500 στροφές ανά λεπτό. Οπότε σταθεροποιείται η θερμική ενέργεια που εισέρχεται από τον θερμαντήρα στο εργαζόμενο μέσο. Άρα σταθεροποιείται και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς. Αντίθετα η θερμική ισχύς που καταναλώνεται στο εξωτερικό κύκλωμα, μειώνεται στις χαμηλές πιέσεις και σταθεροποιείται αντίστοιχα στις υψηλές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική ενέργεια στο κύκλωμα αυτό προκύπτει από το υπόλοιπο της θερμικής ενέργειας καύσης που δεν πέρασε από το θερμαντήρα στο εργαζόμενο μέσο και από εκεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Καθώς αυξάνει η ηλεκτρική ισχύς, μειώνεται η θερμική στο εξωτερικό κύκλωμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Installation and operation instructions Stirling 161 micro CHP module”: Solo Stirling GmbH, version 4.2, March 2005.

ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗ SOLO 161 ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΕΜΒΟΛΩΝ
--

Στο πρόγραμμα αυτό εφαρμόζεται η αδιαβατική ανάλυση στην περίπτωση της μηχανής Solo 161 V Stirling Engine

Οι κάθε μορφής απώλειες παραλείπονται.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής αυτής ελήφθησαν από το βιβλίο "The Regenerator and the Stirling Engine" του Allan Organ σελ 565. Επίσης πολλά στοιχεία αναφέρονται στο βιβλίο "Installation guide" της εταιρίας παραγωγής της μηχανής.

Σύστημα μονάδων μέτρησης το SI.

Στοιχεία Μηχανής

Τύπος μηχανής

BHTA

Αριθμός κυλίνδρων

ΕΝΑΣ

Μηχανισμός Οδήγησης

ΤΥΠΟΥ 10 ΤΗΣ PHILIPS

Χαρακτηριστικά εργαζόμενου αερίου (Ήλιο He) στη μηχανή

Μάζα αερίου

$$M := 0.745 \cdot 10^{-3}$$

Παγκόσμια σταθερά αέρα

$$\frac{R}{M} := 2077$$

Λόγος θερμοχωρητικοτήτων

$$\gamma := 1.664$$

Ειδική θερμότητα υπό σταθερά πίεση

$$c_p := \gamma \cdot \frac{R}{\gamma - 1}$$

Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο

$$c_v := \frac{R}{\gamma - 1}$$

Θερμοκρασίες (σε K)

Στο θερμαντήρα

$$T_h := 973$$

Στον ψύκτη

$$T_k := 333$$

Στον αναγεννητή (Ενεργός)

$$T_r := \frac{T_h - T_k}{\ln\left(\frac{T_h}{T_k}\right)} \quad T_r = 596.88$$

Παράμετροι λειτουργίας της μηχανής

Γωνία στροφάλου σε deg

$$\theta := 0 \dots 360 \quad n := 1 \dots 359$$

Μέση τιμή διαφοράς φάσης μεταξύ των δύο εμβόλων της μηχανής σε deg

$$\alpha := 90$$

Συχνότητα μηχανής (Hz)

$$f := 50$$

Επιζήμιοι όγκοι των εργαζόμενων χώρων

Συμπίεσης

$$V_{c1c} := 9.135 \cdot 10^{-6}$$

Εκτόνωσης

$$V_{c2e} := 7.733 \cdot 10^{-6}$$

Όγκοι σάρωσης των εργαζόμενων χώρων

$$V_E := 59.4 \cdot 10^{-6}$$

Λόγος μ του όγκου V_E προς τον όγκο σάρωσης στην εκτόνωση V_{swe} , $\mu = V_E / V_{swe}$:

$$\mu := 0.973 \quad V_{swe} := \frac{V_E}{\mu}$$

Λόγος k του όγκου σάρωσης στη συμπίεση προς τον όγκο σάρωσης στην εκτόνωση $k = V_{swc} / V_{swe}$

$$k := 1.031 \quad V_{swc} := k \cdot V_{swe}$$

$$\text{Εκτόνωσης} \quad V_{swe} = 6.105 \times 10^{-5}$$

$$\text{Συμπίεσης} \quad V_{swc} = 6.294 \times 10^{-5}$$

Μη μεταβαλλόμενοι όγκοι των εναλλακτών θερμότητας

$$\text{Ψύκτη} \quad V_k := 5.606 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Αναγεννητή} \quad V_r := 19.308 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Θερμαντήρα} \quad V_h := 5.606 \cdot 10^{-6}$$

Μεταβολές των όγκων των εργαζόμενων χώρων

$$\text{Εξίσωση μεταβολής του όγκου του χώρου συμπίεσης} \quad V_c(\theta) := V_{clc} + 0.5 \cdot V_{swc} \cdot (1 + \cos(\theta \cdot \text{deg}))$$

$$\text{Εξίσωση μεταβολής του όγκου του χώρου εκτόνωσης} \quad V_e(\theta) := V_{cle} + 0.5 \cdot V_{swc} \cdot [1 + \cos[(\theta + \alpha) \cdot \text{deg}]]$$

$$\text{Εξίσωση μεταβολής της παραγώγου του όγκου του χώρου συμπίεσης} \quad DV_c(\theta) := -0.5 \cdot V_{swc} \cdot \sin(\theta \cdot \text{deg})$$

$$\text{Εξίσωση μεταβολής της παραγώγου του όγκου του χώρου εκτόνωσης} \quad DV_e(\theta) := -0.5 \cdot V_{swe} \cdot \sin[(\theta + \alpha) \cdot \text{deg}]$$

$$\text{Ολικός όγκος μηχανής} \quad \underline{V}(\theta) := V_c(\theta) + V_e(\theta) + V_k + V_r + V_h$$

Μεταβολή της πίεσης

Μεταβολή της πίεσης του αερίου συναρτήσει της γωνίας στροφάλου θ (έχει θεωρηθεί ότι η πίεση p έχει την ίδια τιμή μία δοσμένη χρονική στιγμή σε όλη την έκταση της μηχανής, δηλαδή δεν υπάρχει πτώση πίεσης).

$$p_r(\theta) := \frac{M \cdot R}{\frac{V_c(\theta)}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e(\theta)}{T_h}}$$

Χρησιμοποιούμε αριθμητικές μεθόδους εξαιτίας των πολύπλοκων και πολυάριθμων διαφορικών εξισώσεων. Έτσι έχουμε ότι η μεταβολή του όγκου σε έναν εργαζόμενο χώρο ισούται με την διαφορά της τιμής του όγκου αυτού για δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές, που στην προκειμένη περίπτωση εκφράζεται με τη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών, ανά μοίρα, θέσεων του στροφαλοφόρου. Άρα :

$$\text{Για τον χώρο της συμπίεσης} \quad dV_c(\theta) := V_c(\theta + 1) - V_c(\theta)$$

$$\text{Για τον χώρο της εκτόνωσης} \quad dV_e(\theta) := V_e(\theta + 1) - V_e(\theta)$$

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΩΔΙΚΑ

```

Calc := "Section 1-----"
ind ← 1          Γραμμή 1: προσδιορισμός δείκτη
pind-1 ← pr(0)  Γραμμή 2: αρχική τιμή πίεσης
Tcind-1 ← Tk    Γραμ. 3: αρχική τιμή θερμοκρασίας συμπιεστή
Teind-1 ← Th    Γραμ. 4: αρχική τιμή θερμοκρασίας εκτονωτή
Tckind-1 ← Tk   Γραμ. 5, 6: αρχική τιμή θερμοκρασίας
Theind-1 ← Th   διεπιφάνειας ck, he

mcind-1 ←  $\frac{p_{ind-1} \cdot Vc(0)}{R \cdot Tc_{ind-1}}$  Γραμ. 7: μάζα αερίου στο συμπιεστή στην
έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας

"Section 2-----"
dpind-1 ←  $\frac{-\gamma \cdot p_{ind-1} \cdot \left( \frac{dVc(ind-1)}{Tck_{ind-1}} + \frac{dVe(ind-1)}{The_{ind-1}} \right)}{\frac{Vc(ind-1+0.5)}{Tck_{ind-1}} + \frac{Ve(ind-1+0.5)}{The_{ind-1}} + \gamma \cdot \left( \frac{Vk}{Tk} + \frac{Vr}{Tr} + \frac{Vh}{Th} \right)}$ 
dmcind-1 ←  $\frac{p_{ind-1} \cdot dVc(ind-1) + Vc((ind-0.5)) \cdot \frac{dp_{ind-1}}{\gamma}}{R \cdot Tck_{ind-1}}$ 

"Section 3-----"
mkind-1 ←  $\frac{p_{ind-1} \cdot Vk}{R \cdot Tk}$ 
mrind-1 ←  $\frac{p_{ind-1} \cdot Vr}{R \cdot Tr}$  Γραμ. 10, 11, 12: συσσωρευμένη μάζα
αερίου στον ψύκτη αναγεννητή και
θερμαντήρα στο τέλος της 1ης μοίρας
mhind-1 ←  $\frac{p_{ind-1} \cdot Vh}{R \cdot Th}$ 

"Section 4-----"
dmkind-1 ←  $mk_{ind-1} \cdot \frac{dp_{ind-1}}{p_{ind-1}}$ 
dmrind-1 ←  $mr_{ind-1} \cdot \frac{dp_{ind-1}}{p_{ind-1}}$  Γραμ. 13, 14, 15: μετ. μάζας αερίου
στον ψύκτη αναγεννητή και
θερμαντήρα στην έναρξη του βήματος
της γωνίας φάσης
dmhind-1 ←  $mh_{ind-1} \cdot \frac{dp_{ind-1}}{p_{ind-1}}$ 

"Section 5-----"
gAckind-1 ← -dmcind-1
gAkrind-1 ← gAckind-1 - dmkind-1 Γραμ. 16, 17, 18, 19: παροχή μάζας
στις διεπιφάνειες ck, kr, rh, he
κατά τη διάρκεια του βήματος
της γωνίας φάσης
gArhind-1 ← gAkrind-1 - dmrind-1
gAheind-1 ← gArhind-1 - dmhind-1

```

Γραμ. 8: μεταβ. πίεσης κατά τη διάρκεια του 1ου βήματος (μιας μοίρας) του αλγόρ.

Γραμ. 9: μεταβ. μάζας αερίου στο συμπιεστή για την 1η μοίρα του αλγόρ.

"Section 6-----"

$$The_{ind-1} \leftarrow \begin{cases} Th & \text{if } gAhe_{ind-1} \geq 0 \\ Te_{ind-1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Tck_{ind-1} \leftarrow \begin{cases} Tc_{ind-1} & \text{if } gAck_{ind-1} \geq 0 \\ Tk & \text{otherwise} \end{cases}$$

Γραμ. 20, 21: συνθήκες θερμοκρασιών στις διεπιφάνειες he, ck κατά τη διάρκεια του βήματος της γωνίας φάσης

"Section 7-----"

while ind < 10.360 **Γραμ. 22: έναρξη επαναλ/νων εντολών (loop)**

"Section 7.1-----"

$$p_{ind} \leftarrow dp_{ind-1} + p_{ind-1}$$

$$dp_{ind} \leftarrow \frac{-\gamma \cdot p_{ind} \cdot \left(\frac{dVc(ind)}{Tck_{ind-1}} + \frac{dVe(ind)}{The_{ind-1}} \right)}{\frac{Vc(ind + 0.5)}{Tck_{ind-1}} + \frac{Ve(ind + 0.5)}{The_{ind-1}} + \gamma \cdot \left(\frac{Vk}{Tk} + \frac{Vr}{Tr} + \frac{Vh}{Th} \right)}$$

"Section 7.2-----"

$$dmc_{ind} \leftarrow \frac{p_{ind} \cdot dVc(ind) + Vc(ind + 0.5) \cdot \frac{dp_{ind}}{\gamma}}{R \cdot Tck_{ind-1}}$$

$$mc_{ind} \leftarrow dmc_{ind} + mc_{ind-1}$$

"Section 7.3-----"

$$mk_{ind} \leftarrow \frac{p_{ind} \cdot Vk}{R \cdot Tk}$$

$$mr_{ind} \leftarrow \frac{p_{ind} \cdot Vr}{R \cdot Tr}$$

$$mh_{ind} \leftarrow \frac{p_{ind} \cdot Vh}{R \cdot Th}$$

$$me_{ind} \leftarrow M - (mc_{ind} + mk_{ind} + mr_{ind} + mh_{ind})$$

Γραμ. 27, 28, 29, 30: μάζα στον ψύκτη, αναγεννητή, θερμαντήρα και εκτονωτή στην έναρξη του επομένου βήματος της γωνίας φάσης

"Section 7.4-----"

$$Tc_{ind} \leftarrow \frac{p_{ind} \cdot Vc(ind + 0.5)}{R \cdot mc_{ind}}$$

$$Te_{ind} \leftarrow \frac{p_{ind} \cdot Ve(ind + 0.5)}{R \cdot me_{ind}}$$

Γραμ. 31, 32: θερμοκρασία στο συμπιεστή και εκτονωτή στην έναρξη του επομένου βήματος της γωνίας φάσης

"Section 7.5-----"

$$dmk_{ind} \leftarrow mk_{ind} \cdot \frac{dp_{ind}}{p_{ind}}$$

$$dmr_{ind} \leftarrow mr_{ind} \cdot \frac{dp_{ind}}{p_{ind}}$$

$$dmh_{ind} \leftarrow mh_{ind} \cdot \frac{dp_{ind}}{p_{ind}}$$

Γραμ. 33, 34, 35: μεταβολή μάζας στον ψύκτη, αναγεννητή και θερμαντήρα στην έναρξη του επομένου βήματος της γωνίας φάσης

Γραμ. 23: πίεση αερίου στο τέλος του βήματος της γωνίας φάσης

Γραμ. 24: μετ. πίεσ. αερίου στο τέλος του βήματος της γωνίας φάσης

Γραμ. 25, 26: μετ. μάζας και μάζα στο συμπιεστή στην έναρξη του βήματος της γωνίας φάσης

"Section 7.6-----"	
$gAck_{ind} \leftarrow -dmc_{ind}$	Γραμ. 36, 37, 38, 39: παροχή μάζας στις διεπιφάνειες ck, kr, rh, he κατά τη διάρκεια του επομένου βήματος της γωνίας φάσης
$gAkr_{ind} \leftarrow gAck_{ind} - dmk_{ind}$	
$gArh_{ind} \leftarrow gAkr_{ind} - dmr_{ind}$	
$gAhe_{ind} \leftarrow gArh_{ind} - dmh_{ind}$	
"Section 7.7-----"	
$W_{ind} \leftarrow p_{ind} \cdot (dVc(ind) + dVe(ind))$	Γραμ. 40, 41, 42: ολικό παραγ. έργο, έργο στο συμπ. και εκτονωτή κατά τη διάρκεια του βήμ. της γωνίας φάσης
$Wc_{ind} \leftarrow p_{ind} \cdot dVc(ind)$	
$We_{ind} \leftarrow p_{ind} \cdot dVe(ind)$	
"Section 7.8-----"	
$The_{ind} \leftarrow \begin{cases} Th & \text{if } gAhe_{ind} \geq 0 \\ Te_{ind} & \text{otherwise} \end{cases}$	Γραμ. 43, 44: συνθήκες θερμοκρασιών στις διεπιφάνειες he, ck κατά τη διάρκεια του επομένου βήματος της γωνίας φάσης
$Tck_{ind} \leftarrow \begin{cases} Tc_{ind} & \text{if } gAck_{ind} \geq 0 \\ Tk & \text{otherwise} \end{cases}$	
"Section 7.9-----"	
$enthck_{ind} \leftarrow cp \cdot Tck_{ind} \cdot gAck_{ind}$	Γραμ. 45, 46, 47, 48: ενθαλπία στις διεπιφάνειες ck, kr, rh, he κατά τη διάρκεια του βήματος της γωνίας φάσης
$enthkr_{ind} \leftarrow cp \cdot Tk \cdot gAkr_{ind}$	
$enthrh_{ind} \leftarrow cp \cdot Th \cdot gArh_{ind}$	
$enthhe_{ind} \leftarrow cp \cdot The_{ind} \cdot gAhe_{ind}$	
"Section 7.10-----"	
$Qk_{ind} \leftarrow Vk \cdot dp_{ind} \cdot \frac{cv}{R} - cp \cdot (Tck_{ind} \cdot gAck_{ind} - Tk \cdot gAkr_{ind})$	Γραμ. 49, 50, 51: θερμότητα στον ψόκτη, αναγεν. και θερμαντήρα κατά τη διάρκεια του βήματος της γωνίας φάσης
$Qr_{ind} \leftarrow Vr \cdot dp_{ind} \cdot \frac{cv}{R} - cp \cdot (Tk \cdot gAkr_{ind} - Th \cdot gArh_{ind})$	
$Qh_{ind} \leftarrow Vh \cdot dp_{ind} \cdot \frac{cv}{R} - cp \cdot (Th \cdot gArh_{ind} - The_{ind} \cdot gAhe_{ind})$	
"Section 7.11-----"	
$qk_{ind} \leftarrow \frac{Qk_{ind}}{mk_{ind}}$	Γραμ. 52, 53, 54: ειδική θερμότητα στον ψόκτη, αναγεν. και θερμαντήρα κατά τη διάρκεια του βήματος της γωνίας φάσης
$qr_{ind} \leftarrow \frac{Qr_{ind}}{mr_{ind}}$	
$qh_{ind} \leftarrow \frac{Qh_{ind}}{mh_{ind}}$	
$w_{ind} \leftarrow \frac{W_{ind}}{mc_{ind} + me_{ind}}$	Γραμ. 55: ειδικό παραγ. έργο κατά τη διάρκ. του βήμ. της γων. φάσης
$s_{ind,0} \leftarrow p_{ind}$	Γραμ. 55: αποτέλεσμα πίεσης
$s_{ind,1} \leftarrow dp_{ind}$	Γραμ. 56: αποτέλεσμα μετ. πίεσης

Γραμ. 49, 50, 51:
θερμότητα στον
ψόκτη, αναγεν.
και θερμαντήρα
κατά τη διάρκεια
του βήματος της
γωνίας φάσης

$$s_{ind,2} \leftarrow T_{e,ind}$$

Γραμ. 58, 59: αποτέλεσμα θερμοκρασίας στον εκτονωτή και συμπιεστή

$$s_{ind,3} \leftarrow T_{c,ind}$$

$$s_{ind,4} \leftarrow \frac{gA_{ck,ind} + gA_{kr,ind}}{2} \cdot (360 \cdot f)$$

$$s_{ind,5} \leftarrow \frac{gA_{kr,ind} + gA_{rh,ind}}{2} \cdot (360 \cdot f)$$

$$s_{ind,6} \leftarrow \frac{gA_{rh,ind} + gA_{he,ind}}{2} \cdot (360 \cdot f)$$

Γραμ. 60, 61, 62: αποτέλεσμα παροχής μάζας στον ψύκτη, αναγεννητή και θερμοαντήρα

$$s_{ind,7} \leftarrow mc_{ind}$$

$$s_{ind,8} \leftarrow mk_{ind}$$

Γραμ. 63, 64, 65, 66, 67: αποτέλεσμα συσσωρευμένης μάζας στο συμπιεστή, ψύκτη, αναγεννητή, θερμοαντήρα και εκτονωτή

$$s_{ind,9} \leftarrow mr_{ind}$$

$$s_{ind,10} \leftarrow mh_{ind}$$

$$s_{ind,11} \leftarrow me_{ind}$$

Γραμ. 68, 69, 70: αποτέλεσμα θερμότητας στον ψύκτη, αναγεννητή, και θερμοαντήρα

$$s_{ind,12} \leftarrow Q_{k,ind}$$

$$s_{ind,13} \leftarrow Q_{r,ind}$$

$$s_{ind,14} \leftarrow Q_{h,ind}$$

$$s_{ind,15} \leftarrow W_{ind}$$

Γραμ. 71: αποτ. ολικού παραγ. έργου

$$s_{ind,16} \leftarrow W_{c,ind}$$

Γραμ. 72, 73: αποτ. παραγ. έργου στο συμπιεστή και εκτονωτή

$$s_{ind,17} \leftarrow W_{e,ind}$$

$$s_{ind,18} \leftarrow q_{k,ind}$$

Γραμ. 74, 75, 76: αποτ. ειδικής θερμότητας στον ψύκτη, αναγεννητή και θερμοαντήρα

$$s_{ind,19} \leftarrow q_{r,ind}$$

$$s_{ind,20} \leftarrow q_{h,ind}$$

$$s_{ind,21} \leftarrow w_{ind}$$

Γραμ. 77: αποτ. ειδικού παραγ. έργου

$$ind \leftarrow ind + 1$$

Γραμ. 78: επόμε. βήμα επαναλ. διαδικ.

Γραμ. 79: τέλος επαναλ. διαδικ.

S

	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	$4.978 \cdot 10^6$	$1.449 \cdot 10^4$	966.913	333.354	-0.016	-0.019	-0.021
2	$4.993 \cdot 10^6$	$1.531 \cdot 10^4$	967.75	333.729	-0.015	-0.019	-0.021
Calc = 3	$5.008 \cdot 10^6$	$1.606 \cdot 10^4$	968.676	334.129	-0.015	-0.018	-0.021
4	$5.024 \cdot 10^6$	$1.681 \cdot 10^4$	969.653	334.547	-0.015	-0.018	-0.021
5	$5.041 \cdot 10^6$	$1.757 \cdot 10^4$	970.68	334.983	-0.014	-0.018	-0.021
6	$5.059 \cdot 10^6$	$1.833 \cdot 10^4$	971.757	335.438	-0.014	-0.018	-0.021
7	$5.077 \cdot 10^6$	$1.909 \cdot 10^4$	972.884	335.912	-0.013	-0.017	-0.021

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Στον κώδικα αυτό έχουν ορισθεί οι αρχικές τιμές που παίρνουν οι μεταβλητές του συστήματος. Κάθε μεταβλητή έχει κάτω δεξιά ένα δείκτη (**int**) που έχει ως αρχική τιμή το **1** και τελική την **10 x 359**. Αντιστοιχεί δηλαδή σε δέκα πλήρεις κύκλους. Θα μπορούσαμε να επεκτείνουμε το πεδίο τιμών του δείκτη **int** και πέραν των δέκα κύκλων, αλλά θα χρειαζόμασταν περισσότερο υπολογιστικό χρόνο. Εξάλλου μετά τις έξι επαναλήψεις έχουν ήδη σταθεροποιηθεί οι συνθήκες.
- Αφού έχουν ορισθεί όλες οι αρχικές τιμές των μεταβλητών αρχίζει η επαναληπτική διαδικασία, κατά την διάρκεια της οποίας υπολογίζονται οι μεταβολές των μεταβλητών καθώς και οι νέες τιμές τους.
- Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μια μεταβλητή με την ονομασία **s** με κάτω δεξιά δείκτη **ind**. Δίπλα στο δείκτη **ind**, μετά από ένα κόμμα υπάρχει ένας δευτερος αριθμητικός δείκτης, ο οποίος αντιστοιχεί σε μια από τις μεταβλητές. Έτσι το **Sind** με αριθμητικό δείκτη:

 - 0 αντιστοιχεί στην πίεση **p** του εργαζόμενου αερίου,
 - 1 στη μεταβολή της πίεσης **dp**,
 - 2 στη θερμοκρασία στο χώρο εκτόνωσης **Te**,
 - 3 στη θερμοκρασία στο χώρο συμπίεσης **Tc**,
 - 4 στην παροχή μάζας στον ψύκτη **gAk**,
 - 5 στην παροχή μάζας στον αναγεννητή **gAr**,
 - 6 στην παροχή μάζας στο θερμαντήρα **gAh**,
 - 7 στη συσσωρευμένη μάζα στο χώρο συμπίεσης **mc**,
 - 8 στη συσσωρευμένη μάζα στον ψύκτη **mk**,
 - 9 στη συσσωρευμένη μάζα στον αναγεννητή **mr**,
 - 10 στη συσσωρευμένη μάζα στο θερμαντήρα **mh**,
 - 11 στη συσσωρευμένη μάζα στο χώρο εκτόνωσης **me**,
 - 12 στην απαγόμενη θερμότητα από τον ψύκτη **Qk**,
 - 13 στη συναλασσόμενη θερμότητα με τον αναγεννητή **Qr**,
 - 14 στην προσαγόμενη θερμότητα στο θερμαντήρα **Qh**,
 - 15 στο παραγόμενο ολικό έργο **W**,
 - 16 στο καταναλισκόμενο έργο στο χώρο συμπίεσης **Wc**,
 - 17 στο παραγόμενο έργο στο χώρο εκτόνωσης **We**,
 - 18 στην ειδική θερμότητα στον ψύκτη **qk**,
 - 19 στην ειδική θερμότητα στον αναγεννητή **qr**,
 - 20 στην ειδική θερμότητα στο θερμαντήρα **qh**,
 - 21 στο ειδικό παραγόμενο έργο **w**.
- Μπορούμε να εισάγουμε όσες μεταβλητές ακόμα επιθυμούμε, αρκεί να έχουμε προηγουμένως δηλώσει τόσο την αρχική τους τιμή όσο και τον τύπο μεταβολής τους. Επίσης μπορούμε να ζητήσουμε από τον κώδικα ταυτόχρονα περισσότερες από μία μεταβλητές για κάποια θέση της γωνίας στροφάλου ή για κάποιο πλήθος κύκλων λειτουργίας της μηχανής. Τότε όμως ο κώδικας γίνεται περισσότερο "βαρύν".
- Τρέχοντας τον κώδικα εξάγουμε διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

1. Διάγραμμα συνολικού όγκου V , όγκου χώρου εκτόνωσης V_e και όγκου χώρου συμπίεσης V_c ως προς τη γωνία θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται ο συνολικός όγκος V , ο όγκος V_e του χώρου εκτόνωσης και V_c του χώρου συμπίεσης συναρτήσει της γωνίας θ . Επίσης υπολογίζονται οι ακρότατες τιμές (**max** και **min**) του συνολικού όγκου V και οι τιμές της γωνίας θ για τις οποίες αυτό συμβαίνει.

$$V(\theta) := V_e(\theta) + V_c(\theta) + V_k + V_r + V_h$$

$$V'(\theta) := \frac{d}{d\theta} V(\theta)$$

$$\theta_{\min} := \text{root}(V'(\theta), \theta, 90, 180)$$

$$V_{\min} := V(\theta_{\min})$$

$$\theta_{\min} = 135$$

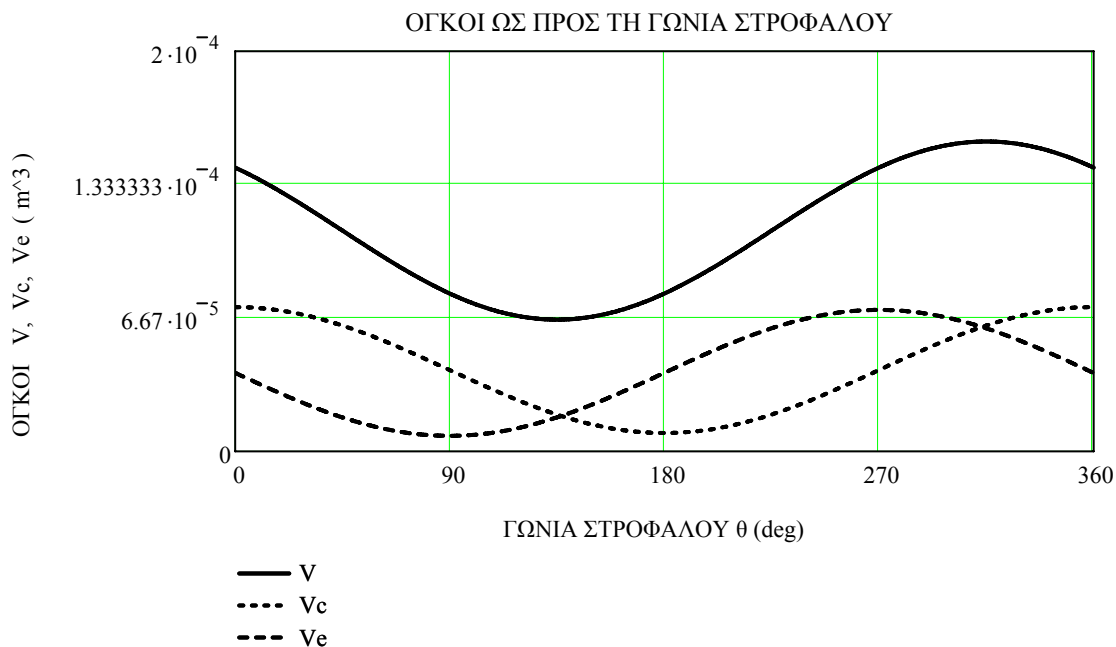
$$V_{\min} = 6.582 \times 10^{-5}$$

$$\theta_{\max} := \text{root}(V'(\theta), \theta, 270, 330)$$

$$V_{\max} := V(\theta_{\max})$$

$$\theta_{\max} = 315$$

$$V_{\max} = 1.54835 \times 10^{-4}$$



2. Διάγραμμα πίεσης p ως προς τη γωνία θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η πίεση p (δείκτης 0) του εργαζόμενου αερίου συναρτήσει της γωνίας θ για τους **έξι πρώτους** κύκλους λειτουργίας.

Φαίνεται η σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων από τον *έκτο κύκλο* λειτουργίας και μετά. Ορίζονται οι έξι πρώτοι κύκλοι (1, 2, 3, 4, 5, 6). Υπολογίζεται σε bar η μέση αριθμητική τιμή της πίεσης p κατά τη διάρκεια του **έκτου κύκλου**.

$$pr1(n) := \frac{\text{Calc}_{n+360 \cdot 0, 0}}{10^5}$$

$$pr2(n) := \frac{\text{Calc}_{n+360 \cdot 1, 0}}{10^5}$$

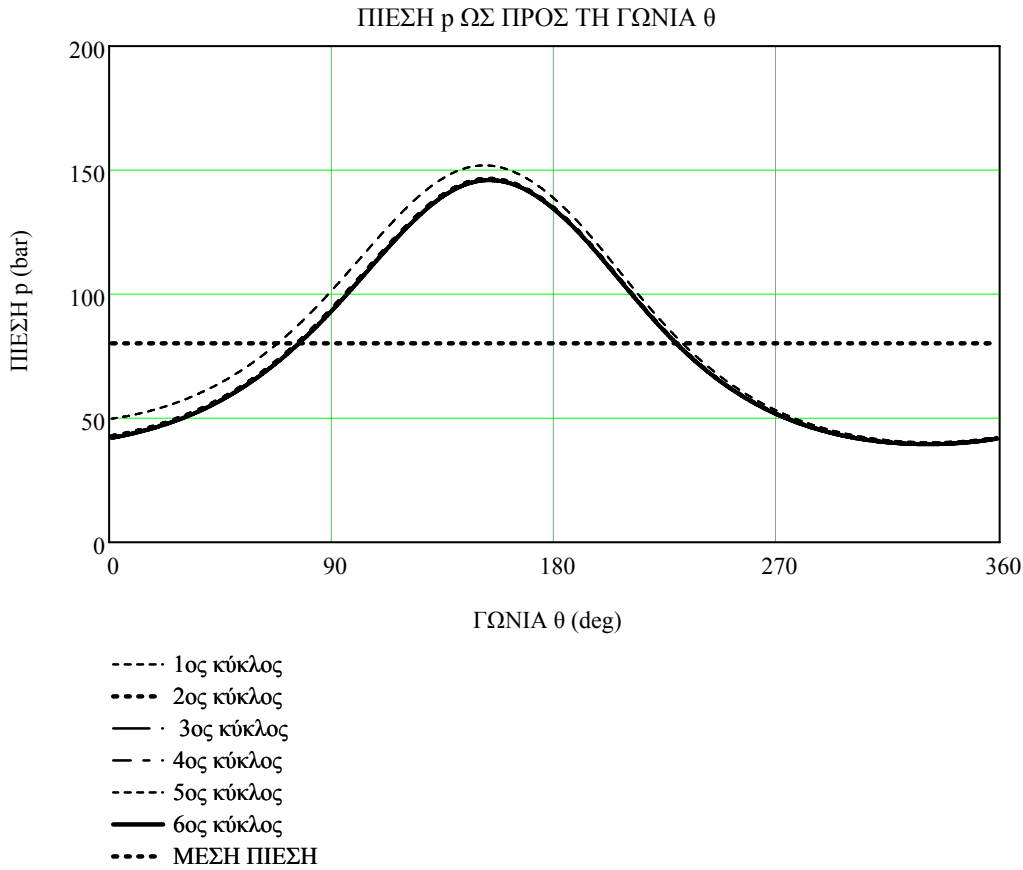
$$pr3(n) := \frac{\text{Calc}_{n+360 \cdot 2, 0}}{10^5}$$

$$pr4(n) := \frac{\text{Calc}_{n+360 \cdot 3, 0}}{10^5}$$

$$pr5(n) := \frac{\text{Calc}_{n+360 \cdot 4, 0}}{10^5}$$

$$pr6(n) := \frac{\text{Calc}_{n+360 \cdot 5, 0}}{10^5}$$

$$pr6_{n+360.5} := pr6(n) \quad pr6_{mean} := \frac{\sum pr6_{n+360.5}}{n} \quad pr6_{mean} = 80.145 \quad p_{max} := 146.51 \quad p_{min} := 39.484$$



3. Διάγραμμα εκατοστιαίας μεταβολής της πίεσης p ως προς τη γωνία θ.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση της απόλυτης τιμής της % μεταβολής της πίεσης p συναρτήσει της γωνίας θ:

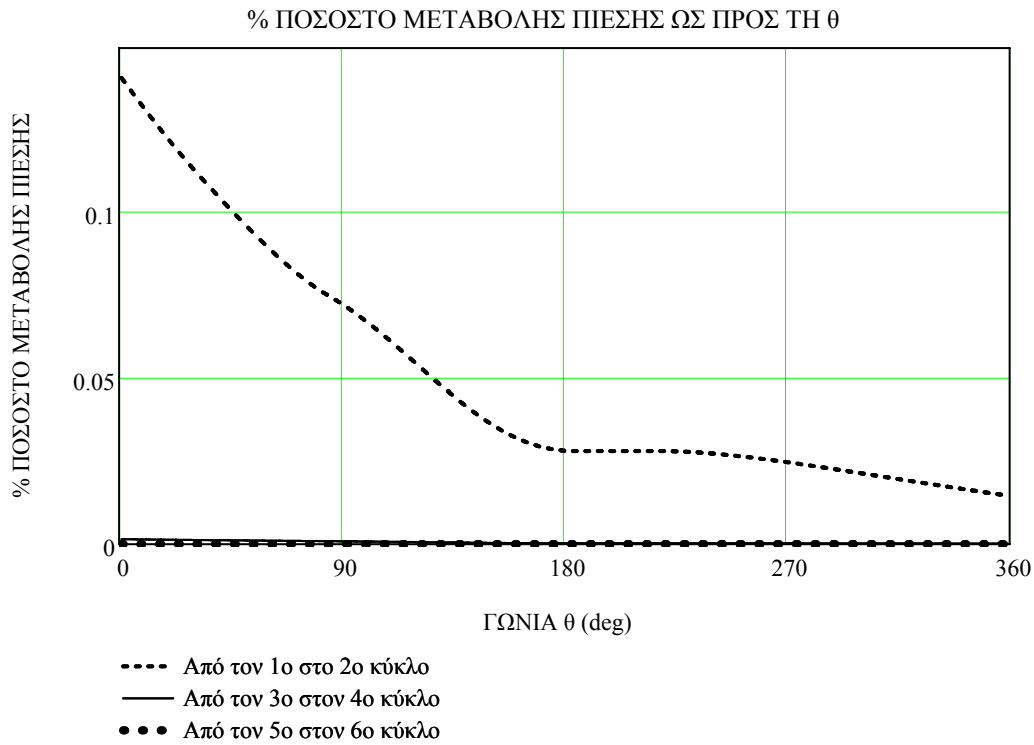
1. Μεταξύ πρώτου και δεύτερου κύκλου λειτουργίας.
2. Μεταξύ τρίτου και τέταρτου κύκλου λειτουργίας.
3. Μεταξύ πέμπτου και έκτου κύκλου λειτουργίας. Η σύγκλιση είναι εμφανής.

$$pr1(n) := \frac{Calc_{n+360.0,0}}{10^5} \quad pr2(n) := \frac{Calc_{n+360.1,0}}{10^5} \quad pr3(n) := \frac{Calc_{n+360.2,0}}{10^5}$$

$$pr4(n) := \frac{Calc_{n+360.3,0}}{10^5} \quad pr5(n) := \frac{Calc_{n+360.4,0}}{10^5} \quad pr6(n) := \frac{Calc_{n+360.5,0}}{10^5}$$

$$\pi\%1_2p(n) := \left| \frac{pr2(n) - pr1(n)}{pr1(n)} \cdot 100\% \right| \quad \pi\%3_4p(n) := \left| \frac{pr4(n) - pr3(n)}{pr3(n)} \cdot 100\% \right|$$

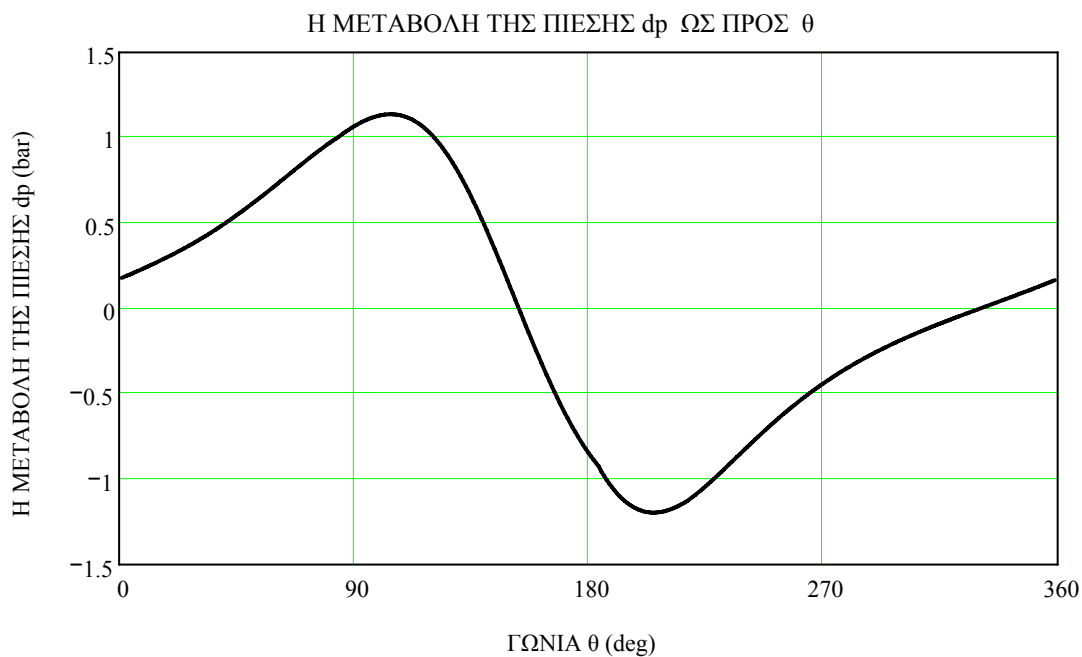
$$\pi\%5_6p(n) := \left| \frac{pr6(n) - pr5(n)}{pr5(n)} \cdot 100\% \right|$$



4. Διάγραμμα μεταβολής πίεσης dp ως προς τη γωνία θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση της μεταβολής της πίεσης dp (δείκτης 1) του εργαζόμενου αερίου μετρούμενη σε bar, συναρτήσει της γωνίας θ κατά τον **έκτο κύκλο** λειτουργίας, οπότε ουσιαστικά έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση.

$$k := 5 \quad dp(n) := \frac{\text{Calc}_{n+360 \cdot k, 1}}{10^5}$$



5. Διάγραμμα θερμοκρασίας T_e ως προς τη γωνία θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία T_e (δείκτης 2) του χώρου εκτόνωσης και η σύγκλισή της συναρτήσει της γωνίας θ για τους **έξι πρώτους** κύκλους λειτουργίας. Φαίνεται η σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων από τον έκτο κύκλο λειτουργίας και μετά. Παρατηρούμε μια μεγάλη κυκλική μεταβολή της θερμοκρασίας του αερίου μέσα στο χώρο εκτόνωσης μεταξύ των προσεγγιστικών τιμών 759K και 1007K. Η μέση τιμή είναι σαφώς μικρότερη της θερμοκρασίας του θερμαντήρα που είναι 973K.

$$k := 5$$

$$Te1(n) := Calc_{n+360 \cdot 0, 2}$$

$$Te2(n) := Calc_{n+360 \cdot 1, 2}$$

$$Te3(n) := Calc_{n+360 \cdot 2, 2}$$

$$Te4(n) := Calc_{n+360 \cdot 3, 2}$$

$$Te5(n) := Calc_{n+360 \cdot 4, 2}$$

$$Te6(n) := Calc_{n+360 \cdot 2, 2}$$

$$Te6_{n+360 \cdot k} := Calc_{n+360 \cdot k, 2} \quad Te6_{mean} := \frac{\sum_{n+360 \cdot k} Te6}{360} \quad Te6_{mean} = 766.194$$

Προσεγγιστικά με τη βοήθεια του trace:

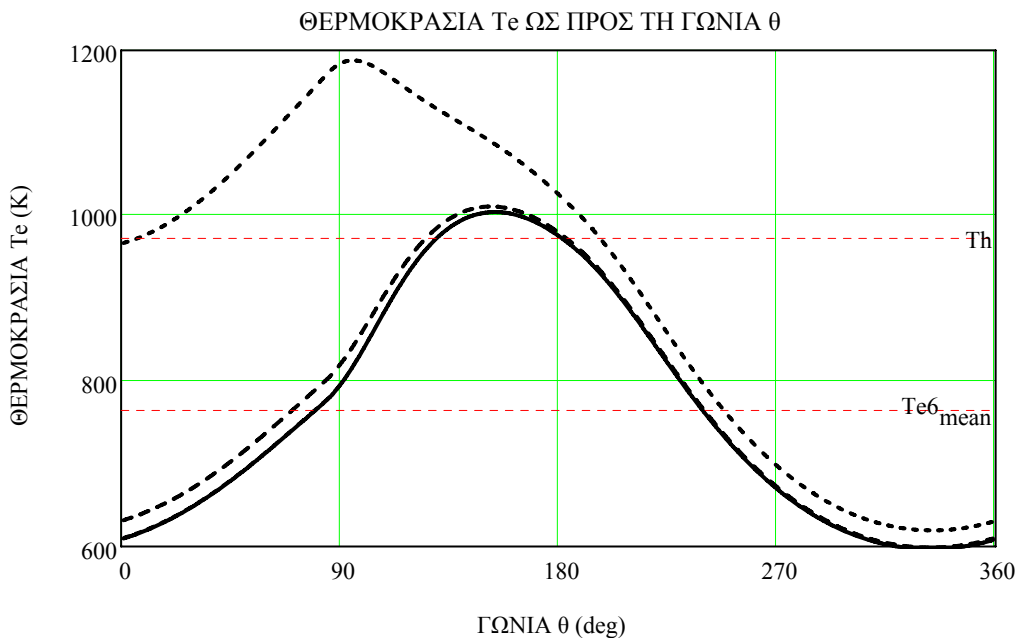
$$\theta_{emin} \equiv 342$$

$$T_{emin} \equiv 759$$

$$\theta_{emax} \equiv 155$$

$$T_{emax} \equiv 1007$$

$$T_h = 973$$



6. Διάγραμμα θερμοκρασίας T_c ως προς τη γωνία θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία T_c (δείκτης 3) του χώρου συμπίεσης και η σύγκλισή της συναρτήσει της γωνίας θ για τους **έξι πρώτους κύκλους** λειτουργίας. Φαίνεται η σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων από τον έκτο κύκλο λειτουργίας και μετά. Παρατηρούμε μια μεγάλη κυκλική μεταβολή της θερμοκρασίας του αερίου μέσα στο χώρο εκτόνωσης μεταξύ των προσεγγιστικών τιμών 300K και 400K. Η μέση τιμή είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας του ψύκτη που είναι 333K.

$k := 5$

$$Tc1(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot 0, 3}$$

$$Tc2(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot 1, 3}$$

$$Tc3(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot 2, 3}$$

$$Tc4(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot 3, 3}$$

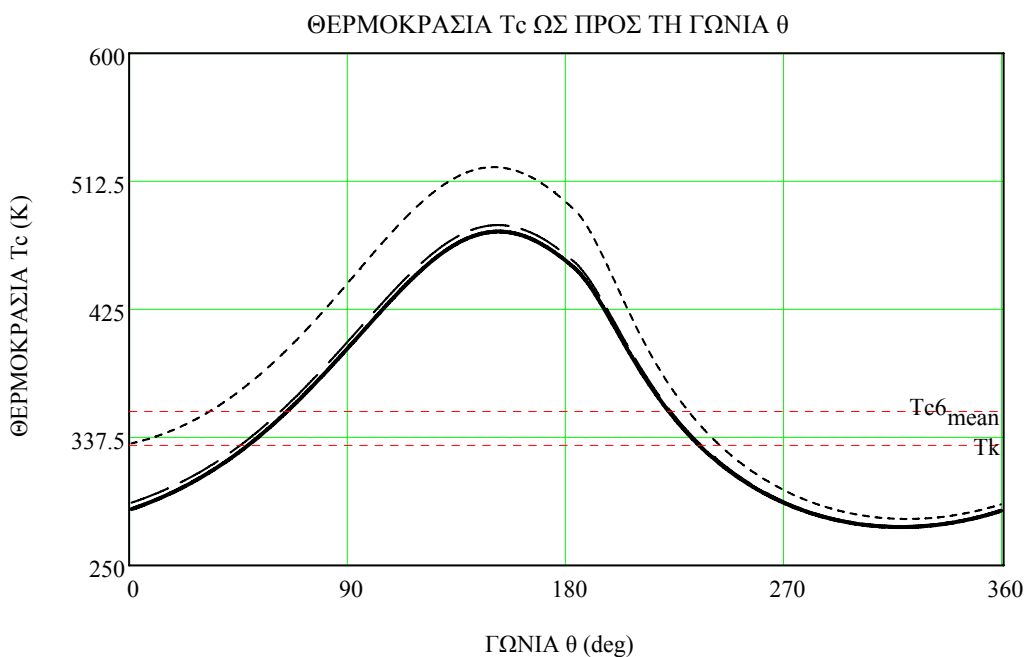
$$Tc5(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot 4, 3}$$

$$Tc6(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot 2, 3}$$

$$Tc6_{n+360 \cdot k} := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 3} \quad Tc6_{\text{mean}} := \frac{\sum Tc6_{n+360 \cdot k}}{n} \quad Tc6_{\text{mean}} = 356.536$$

Προσεγγιστικά με τη βοήθεια του trace: $\theta_{\text{cmin}} \equiv 320$ $T_{\text{cmin}} \equiv 300$

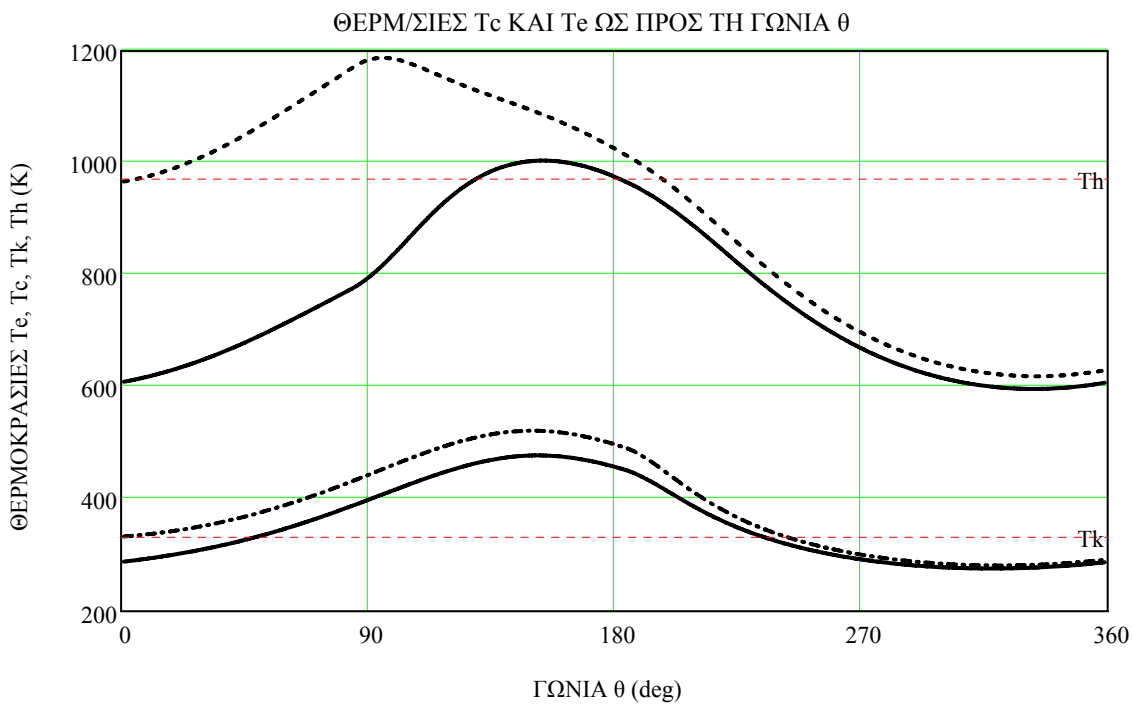
$\theta_{\text{cmax}} \equiv 152$ $T_{\text{cmax}} \equiv 400$ $T_k = 333$



7. Διάγραμμα θερμοκρασιών του χώρου συμπίεσης T_c και του χώρου εκτόνωσης T_e ως προς τη γωνία θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία T_c του χώρου συμπίεσης και η σύγκλιση της συναρτήσει της γωνίας θ κατά τον **έκτο κύκλο** λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση. Επίσης στο ίδιο διάγραμμα η θερμοκρασία T_e του χώρου εκτόνωσης.

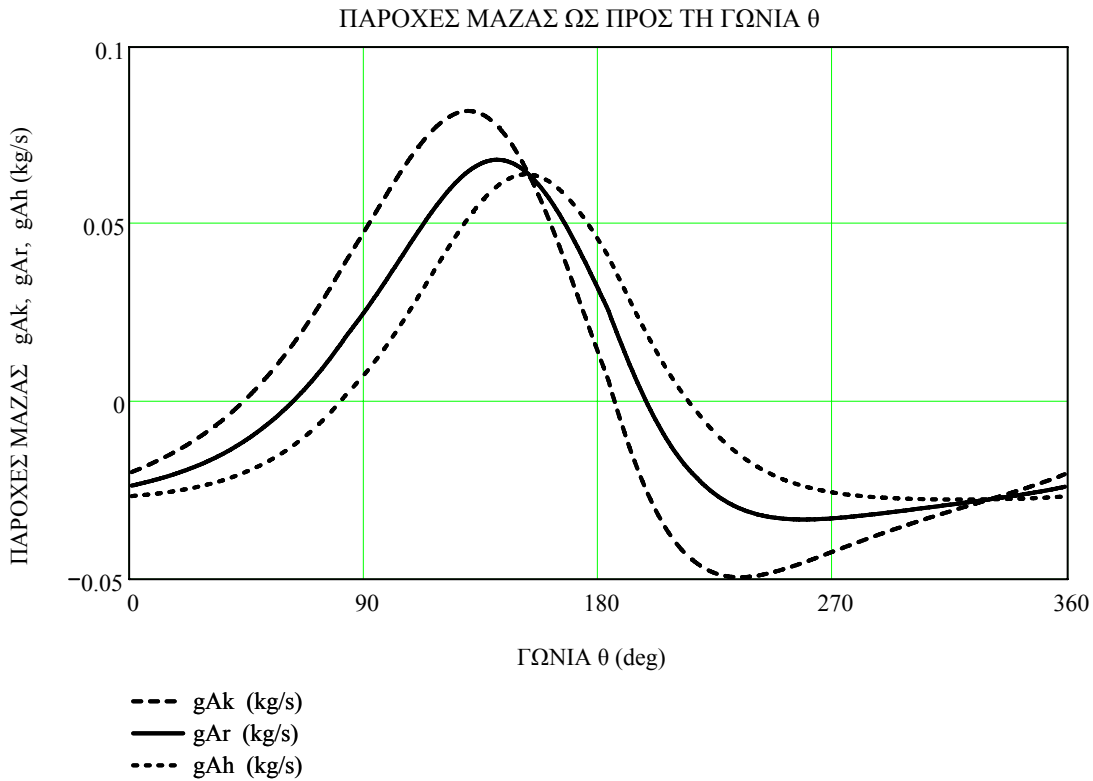
$k := 5$



8. Διάγραμμα παροχών μάζας (mass flow) g_{Ak} , g_{Ar} , g_{Ah} συναρτήσει της γωνίας θ.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλονται οι παροχές μάζας (mass flow) στον ψύκτη g_{Ak} (δείκτης 4), στον αναγεννητή g_{Ar} (δείκτης 5) και στο θερμαντήρα g_{Ah} (δείκτης 6) συναρτήσει της γωνίας θ κατά τον **έκτο κύκλο** λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση.

$$\theta := n \quad k := 5 \quad g_{Ak}_n := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 4} \quad g_{Ar}_n := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 5} \quad g_{Ah}_n := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 6}$$



9. Διάγραμμα συσσωρευμένης μάζας στα πέντε κελιά συναρτήσει της γωνίας θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλονται οι συσσωρευμένες μάζες στο χώρο συμπίεσης **mc** (δείκτης 7) στον ψύκτη **mk** (δείκτης 8), στον αναγεννητή **mr** (δείκτης 9) στο θερμαντήρα **mh** (δείκτης 10) και στο χώρο εκτόνωσης **me** (δείκτης 11) συναρτήσει της γωνίας θ , κατά τον **έκτο κύκλο** λειτουργίας. Λόγω της διάταξης της μονοκύλινδρης μηχανής οι συσσωρευμένες μάζες στον ψύκτη και στο θερμαντήρα μεταβάλλονται διαφορετικά, σε αντίθεση με την τετρακύλινδρη τύπου A, Ford-Philips 4-215 όπου μεταβάλλονται ακριβώς όμοια..

$$k := 5 \quad m_c(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 7} \quad m_k(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 8}$$

$$m_r(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 9}$$

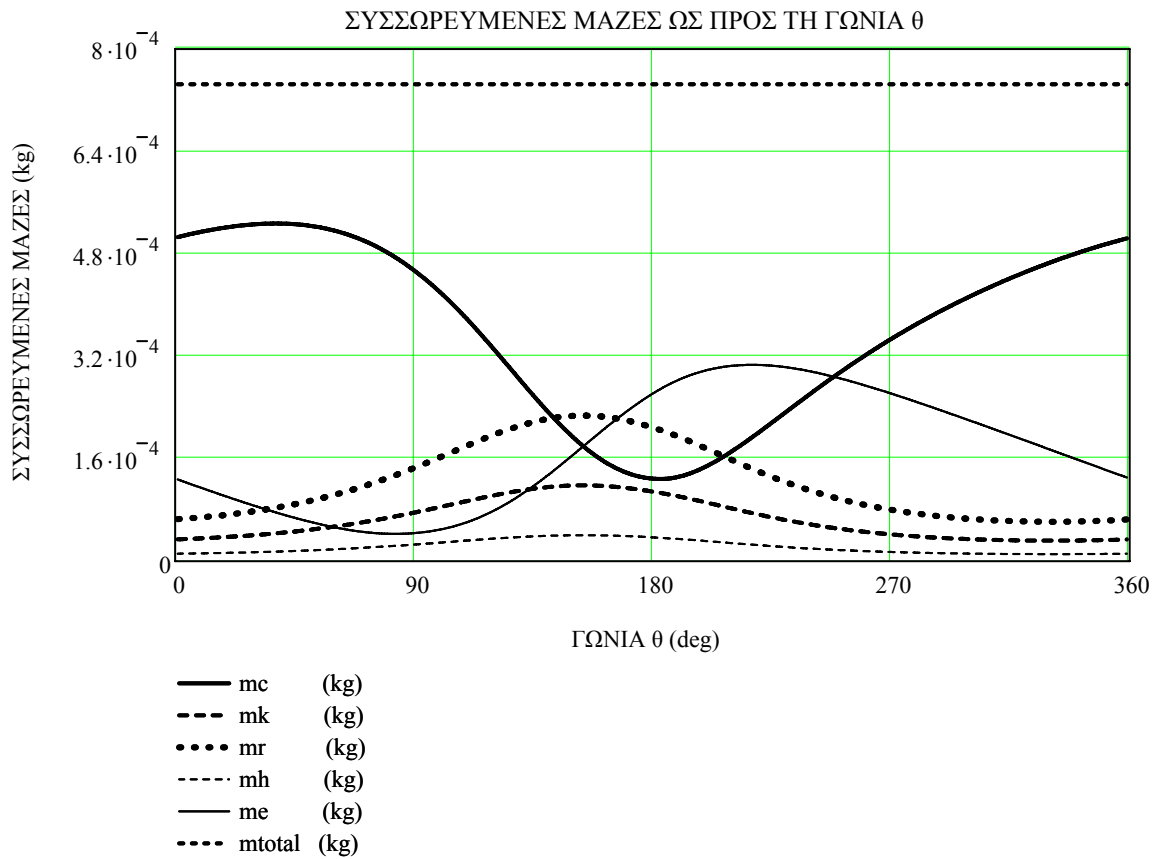
$$m_h(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 10} \quad m_e(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 11}$$

Η ολική μάζα θα είναι: $mtotal(n) := m_c(n) + m_k(n) + m_r(n) + m_h(n) + m_e(n)$

$mtotal(n) =$

$7.45 \cdot 10^{-4}$
$7.45 \cdot 10^{-4}$
$7.45 \cdot 10^{-4}$

Πράγματι ελήφθη σε kgr: $M = 7.45 \times 10^{-4}$



Παρατήρηση

Με το συντελεστή x που ακολουθεί υπολογίζονται οι ρυθμοί των ενεργειακών μεγεθών σε (kW).
Για παράδειγμα ο ρυθμός θερμότητας στον ψύκτη Q_k υπολογίζεται σε (kW).

Συντελεστής μετατροπής x (το 10^3 για να πάρουμε το αποτέλεσμα σε K) : $x := \left(\frac{360 \cdot f}{10^3} \right)$

10. Διάγραμμα ρυθμού ροής ενέργειας (Heat-flow rate) στους τρεις εναλλάκτες συναρτήσει της γωνίας θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλονται οι ρυθμοί ροής ενέργειας (Heat-flow rate) στους τρεις εναλλάκτες κατά τον έκτο κύκλο λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση.

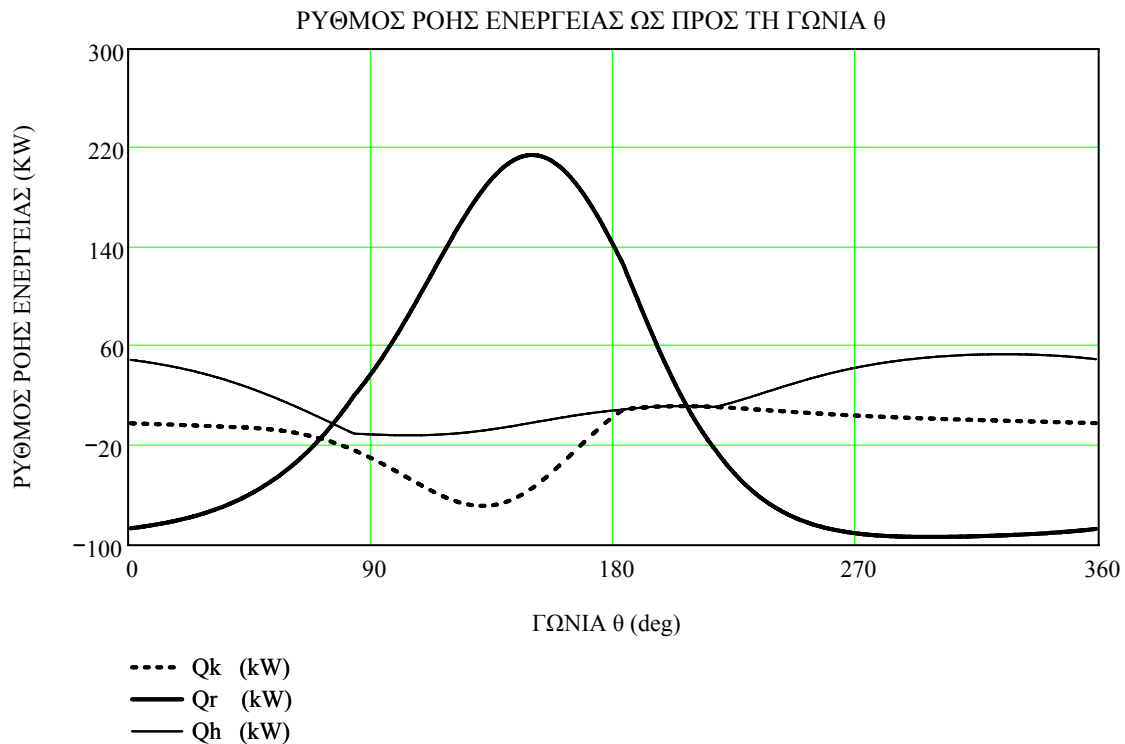
- i. Η απαγόμενη από τον ψύκτη Q_k (δείκτης 12).
- ii. Η συναλλασσόμενη στον αναγεννητή Q_r (δείκτης 13).
- iii. Η προσφερόμενη από τον θερμαντήρα Q_h (δείκτης 14).

$k := 5$

$$Q_k(n) := \text{Calc}_{n+360-k, 12} \cdot x$$

$$Q_r(n) := \text{Calc}_{n+360-k, 13} \cdot x$$

$$Q_h(n) := \text{Calc}_{n+360-k, 14} \cdot x$$



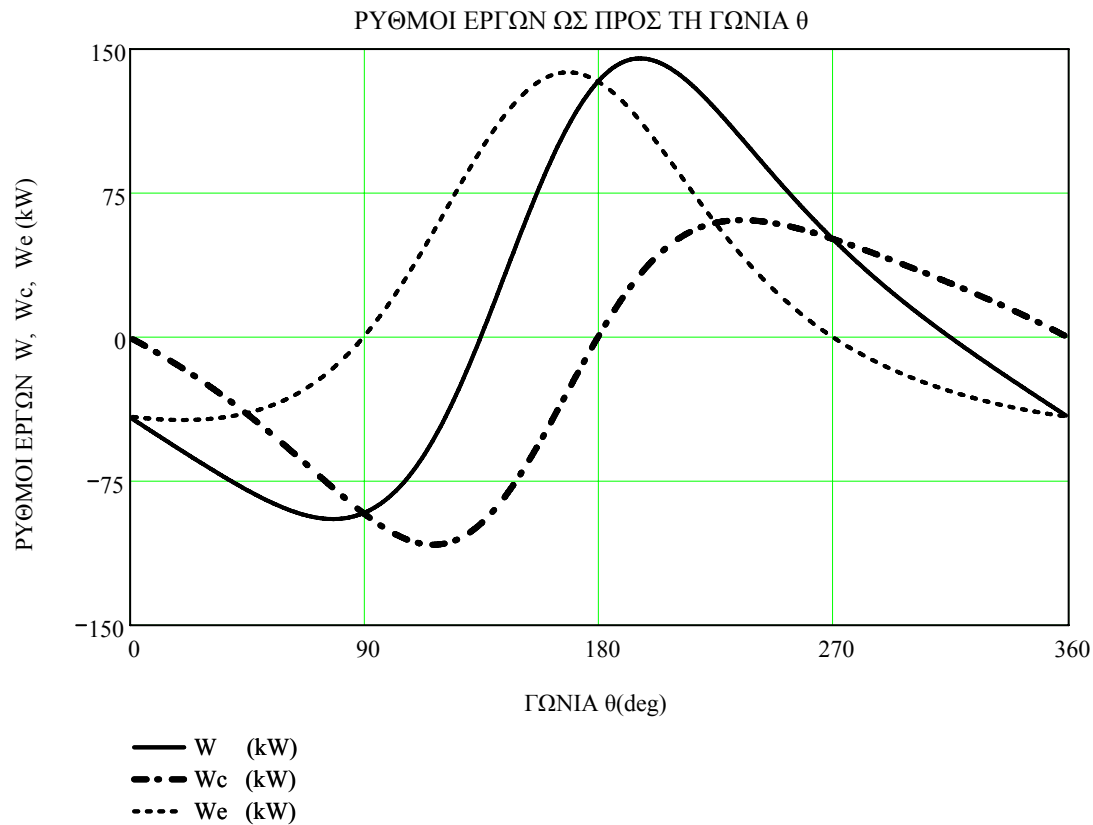
11. Διάγραμμα ρυθμού έργων W , W_c και W_e συναρτήσει της γωνίας θ .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλονται οι ρυθμοί έργων κατά τον **έκτο** κύκλο λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση:

- i. Ο ρυθμός του συνολικού έργου W (δείκτης 15).
- ii. Ο ρυθμός έργου στο χώρο συμπίεσης W_c (δείκτης 16).
- iii. Ο ρυθμός έργου στο χώρο εκτόνωσης W_e (δείκτης 17).

$$k := 5$$

$$W(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 15} \cdot x \quad W_c(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 16} \cdot x \quad W_e(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 17} \cdot x$$



12. Διάγραμμα ρυθμών ειδικών θερμοτήτων q_k , q_r , q_e και ρυθμού ειδικού έργου w συναρτήσει της γωνίας θ .

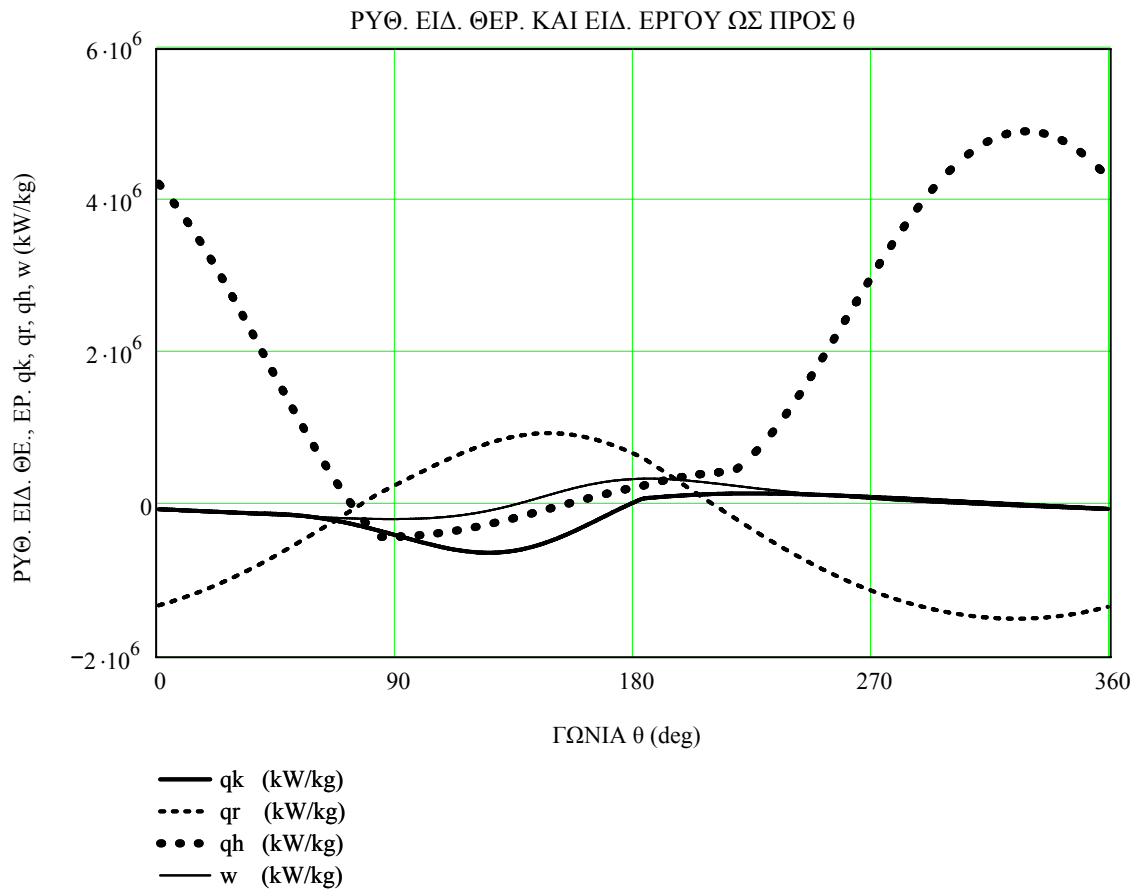
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλονται οι ρυθμοί ειδικών θερμοτήτων και ο ρυθμός ειδικού έργου κατά τον **έκτο κύκλο** λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση:

- i. Ο ρυθμός ειδικής θερμότητας στον ψύκτη **q_k** (δείκτης 18).
- ii. Ο ρυθμός ειδικής θερμότητας στον αναγεννητή **q_r** (δείκτης 19).
- iii. Ο ρυθμός ειδικής θερμότητας στο θερμαντήρα **q_h** (δείκτης 20).
- iv. Ο ρυθμός ειδικού έργου στους εργαζόμενους χώρους συμπίεσης και εκτόνωσης **w** (δείκτης 21).

$k := 5$

$q_k(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 18} \cdot x$ $q_r(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 19} \cdot x$

$q_h(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 20} \cdot x$ $w(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 21} \cdot x$



13. Διάγραμμα ενεργειών συναρτήσει της γωνίας θ.

Ορίζουμε τα ακόλουθα ενεργειακά μεγέθη ανά κύκλο λειτουργίας της μηχανής:

1. Απορριπτόμενη θερμότητα Q_k από τον ψύκτη σε J / κύκλο:

$$Q_k(n) := \sum_{j=1}^n \text{Calc}_{j+360-k, 12}$$
2. Συναλλασσόμενη θερμότητα Q_r με τον αναγεννητή σε J / κύκλο:

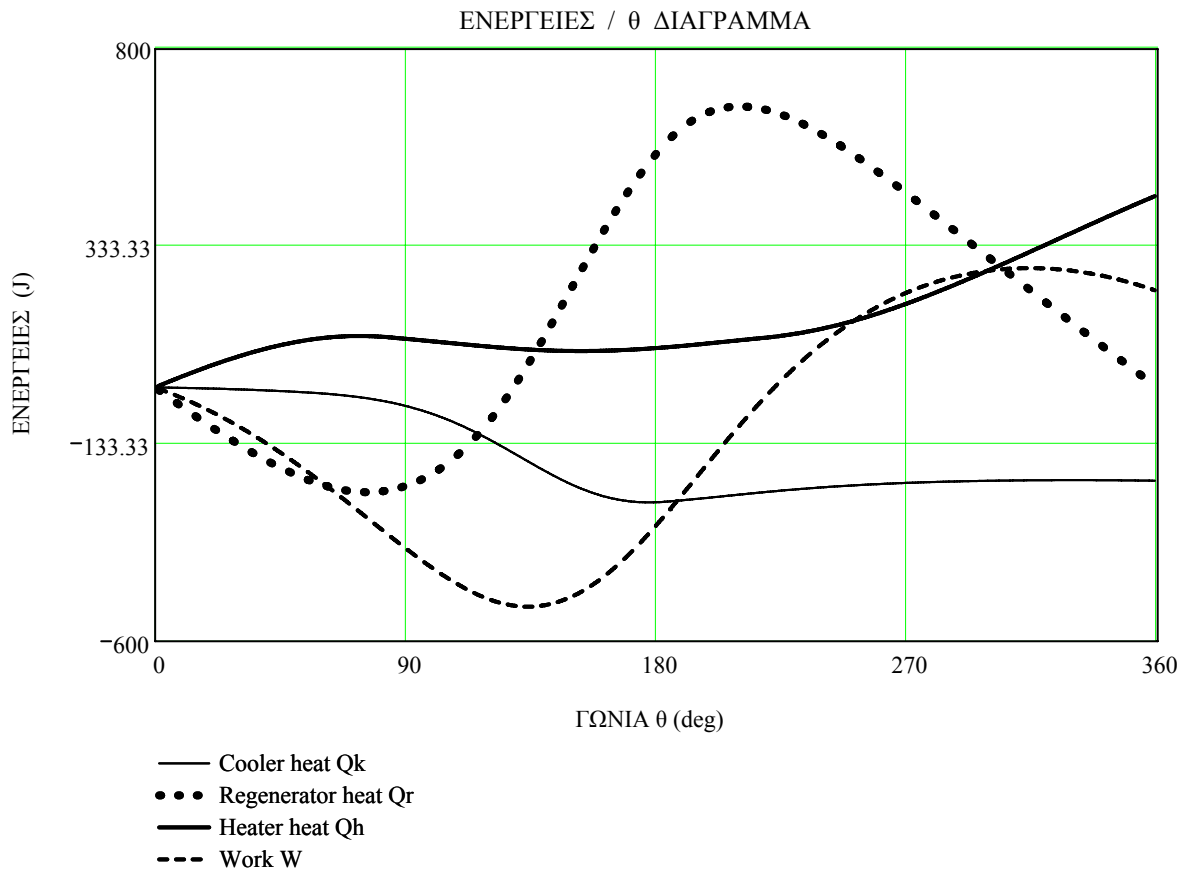
$$Q_r(n) := \sum_{j=1}^n \text{Calc}_{j+360-k, 13}$$
3. Προσδιδόμενη θερμότητα Q_h στο θερμαντήρα σε J / κύκλο:

$$Q_h(n) := \sum_{j=1}^n \text{Calc}_{j+360-k, 14}$$
4. Ολικό παραγόμενο έργο W σε J / κύκλο

$$W(n) := \sum_{j=1}^n \text{Calc}_{j+360-k, 15}$$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλονται οι ορισθείσες ενέργειες κατά τον έκτο κύκλο λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση:

k := 5



14. Διάγραμμα ροπής συναρτήσει της γωνίας θ.

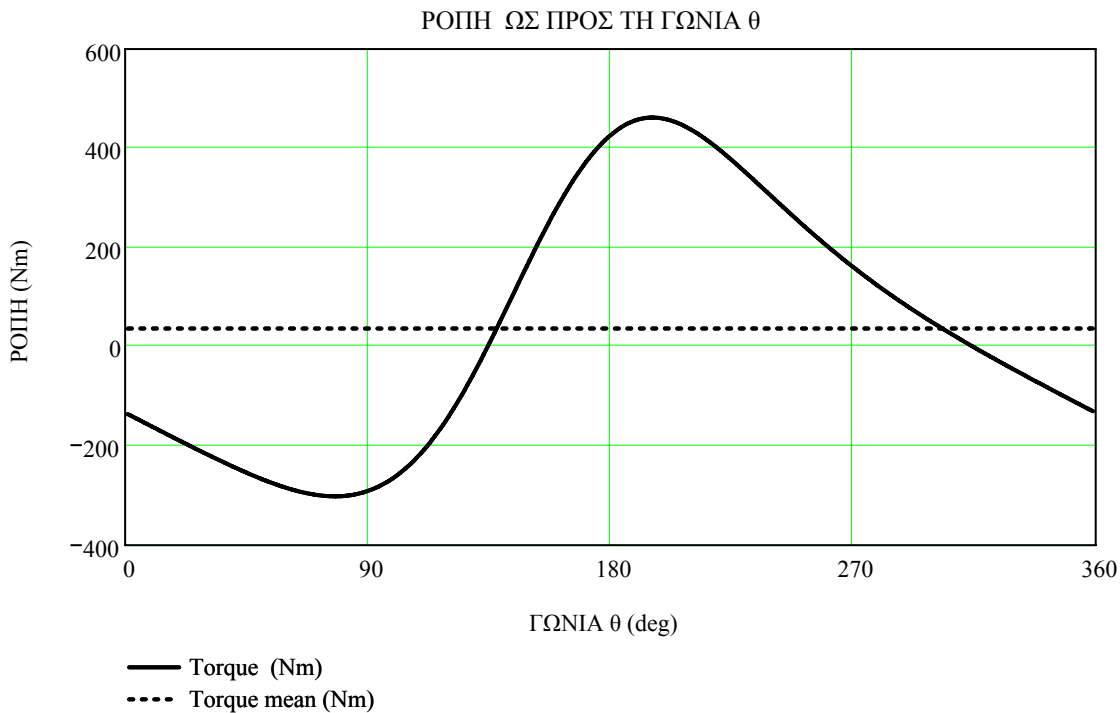
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η ροπή κατά τον **έκτο κύκλο** λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση καθώς και η μέση αριθμητική τιμή της. Παρατηρούμε ότι η ροπή είναι θετική από 119.5deg έως 299.5deg. Από το διάγραμμα των όγκων των εργαζόμενων χώρων παρατηρούμε ότι για το ίδιο διάστημα της γωνίας θ ο συνολικός όγκος αυξάνει.

k := 5

$$W(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 15 \cdot x} \quad \text{Torque}(n) := \frac{W(n)}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot 1000$$

$$\text{Torque}_{\text{mean}} := \frac{\sum_n \left(\frac{W(n)}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot 1000 \right)}{360} \quad \text{Torque}_{\text{mean}} = 36.514$$

$$\theta_{\text{min}} = 135 \quad \theta_{\text{max}} = 315$$

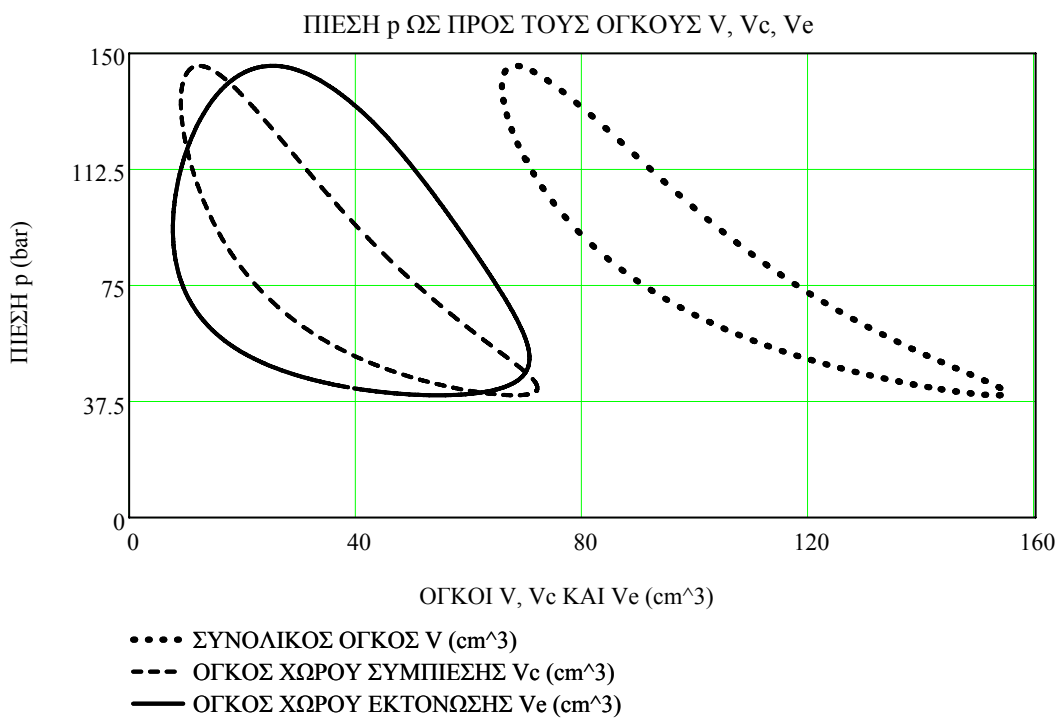


15. Διάγραμμα πίεσης p συναρτήσει των όγκων V , V_c και V_e .

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η πίεση του εργαζόμενου αερίου κατά τον **έκτο κύκλο** λειτουργίας οπότε έχει πλέον επέλθει η σταθεροποίηση, ως προς:

- i. Το συνολικό όγκο V . Το εμβαδόν παριστά το ωφέλιμο έργο ανά κύκλο λειτουργίας.
- ii. Τον όγκο του χώρου συμπίεσης V_c . Το εμβαδόν παριστά απώλεια ανά κύκλο λειτουργίας.
- iii. Τον όγκο του χώρου εκτόνωσης V_e . Το εμβαδόν παριστά την προσφερόμενη θερμότητα στο αέριο ανά κύκλο λειτουργίας.

$k := 5$ $p(n) := \text{Calc}_{n+360 \cdot 4, 0}$



Μέση πίεση p_{mean} του εργαζόμενου αερίου (σε bar) κατά τον έκτο κύκλο λειτουργίας οπότε έχουν πλήρως αποκατασταθεί σταθερές συνθήκες.

$$k := 5$$

$$p_{n+360 \cdot k} := \text{Calc}_{n+360 \cdot k, 0} \quad p_{mean} := \frac{1}{10^5} \frac{\sum_n p_{n+360 \cdot k}}{360} \quad p_{mean} = 80.145$$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1. Απορριπτόμενη θερμότητα Q_k από τον ψύκτη σε J / κύκλο: $Q_k := \sum_{j=1}^{360} \text{Calc}_{j+360 \cdot k, 12} \quad Q_k = -220.719$
2. Συναλλασσόμενη θερμότητα Q_r με τον αναγεννητή σε J / κύκλο: $Q_r := \sum_{j=1}^{360} \text{Calc}_{j+360 \cdot k, 13} \quad Q_r = -2.156 \times 10^{-3}$
3. Προσδιδόμενη θερμότητα Q_h στον θερμαντήρα σε J / κύκλο: $Q_h := \sum_{j=1}^{360} \text{Calc}_{j+360 \cdot k, 14} \quad Q_h = 454.876$
4. Ολικό παραγόμενο έργο W σε J / κύκλο: $W := \sum_{j=1}^{360} \text{Calc}_{j+360 \cdot k, 15} \quad W = 227.103$
5. Έργο W_c στο συμπιεστή σε J / κύκλο: $W_c := \sum_{j=1}^{360} \text{Calc}_{j+360 \cdot k, 16} \quad W_c = -224.358$
6. Έργο W_e στον εκτονωτή σε J / κύκλο: $W_e := \sum_{j=1}^{360} \text{Calc}_{j+360 \cdot k, 17} \quad W_e = 451.461$
7. Ισχύς P σε Watt, για: $f = 50 \quad P := W \cdot f \quad P = 1.136 \times 10^4$
8. Ροπή Torque σε Nm, για: $f = 50 \quad \text{Torque}_{mean} = 36.514$
9. Βαθμός απόδοσης e της μηχανής: $e := \frac{W}{Q_h} \cdot 100\% \quad e = 49.926\%$
10. Μέση πίεση p_{mean} εργαζόμενου αερίου σε bar: $p_{mean} := \frac{1}{10^5} \frac{\sum_n p_{n+360 \cdot k}}{360} \quad p_{mean} = 80.15$
11. Μέγιστη πίεση p_{max} εργαζόμενου αερίου σε bar: $p_{max} = 146.51$
12. Ελάχιστη πίεση p_{min} εργαζόμενου αερίου σε bar: $p_{min} = 39.484$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ**ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΕΛΕΓΧΟΥ**

Τερματικό	Αριθμός	Περιγραφή
X1	PE	Τροφοδοσία 380V
	N	Τροφοδοσία 380V
	L1	Τροφοδοσία 380V
	L2	Τροφοδοσία 380V
	L3	Τροφοδοσία 380V
X2	N	Διακόπτης ασφαλείας
	1	Διακόπτης ασφαλείας
	2	Διακόπτης ασφαλείας
	PE	Διακόπτης ασφαλείας
	N	Αντλία εξωτ. κυκλώματος
	3	Αντλία εξωτ. Κυκλώματος (συνεχής λειτουργία)
	4	Αντλία εξωτ. Κυκλώματος (διακόπτης)
	PE	Αντλία εξωτ. κυκλώματος
	N	Ουδέτερος

X3	1a	Σήμα λειτουργίας +12 V
	1b	Σήμα λειτουργίας γείωση
	2a	Σήμα σφάλματος +12 V
	2b	Σήμα σφάλματος γείωση
	3a	M BUS A είσοδος από εξωτ. θερμιδομετρητή
	3b	M BUS B είσοδος από εξωτ. θερμιδομετρητή
	4a	Δεσμευμένο
	4b	Δεσμευμένο
	5a	Μετρητής αερίου + (είσοδος)
	5b	Μετρητής αερίου - (είσοδος)
	6a	Αισθητήρας θερμότητας 1
	6b	Αισθητήρας θερμότητας 1
	7a	Αισθητήρας θερμότητας 2
	7b	Αισθητήρας θερμότητας 2
	8a	Αισθητήρας θερμότητας 3
	8b	Αισθητήρας θερμότητας 3
	PE	
	9	N/O είσοδος (λειτουργία)
	10	N/O είσοδος (λειτουργία)
	11	N/O είσοδος (παύση)
	12	N/O είσοδος (παύση)
	13	+ EXT. 0 – 10 V
	14	- EXT. 0 – 10 V

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ SOLO STIRLING 161 CHP

Εξωτερικές διαστάσεις	
Μήκος	1280 mm
Πλάτος	700 mm
Ύψος	980 mm
Βάρος	460 kg
Απόδοση (για θερμοκρασία εισόδου 50 C)	
Η ηλεκτρική ισχύς	2 – 9,5 kW
Θερμικής ισχύς	8 – 26 kW
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης	22 – 24 %
Ολικός βαθμός απόδοσης	92 – 90 %
Δεδομένα μηχανής	
Τύπος	Solo Stirling 161
Σχεδιασμός	V – 2 Stirling (α type)
Όγκος κυλίνδρου	160 mm ³
Εργαζόμενο αέριο	Ήλιο
Μέγιστη πίεση του εργαζόμενου μέσου	150 bar
Ταχύτητα περιστροφής	1500 rpm
Καυστήρας και θάλαμος καύσης	
Απόδοση καυστήρα	16 – 40 kW
Καύσιμο	Φυσικό αέριο
Εξαρτήματα αερίου	B 23
Πίεση γραμμής αερίου	50 +15/ -5 mbar
Υποπίεση καυσαερίων	max. 2 mbar
Παροχή όγκου καυσαερίων	85o C
Σύστημα	άφλογη οξειδωση
Σύστημα ελέγχου φλόγας έναρξη / λειτουργία	ιονισμός / θερμοκρασία
Ρύποι NO ^x	80 – 120 mg/m ³
Ρύποι CO ²	40 – 60 mg/m ³
Συμπύκνωμα στο μέγιστο φορτίο	περίπου 6 lt/h

Σύστημα Ηλίου	
Πίεση αερίου στο δοχείο	220 bar
Πίεση αντοχής δίσκου ασφάλειας	250 – 280 bar
Ποσότητα Ηλίου	4.6 Ballongas
Διαρροή Ηλίου στη λειτουργία	100 – 300 mlN/h
Διαρροή Ηλίου χωρίς λειτουργία	0 – 100 mlN/h
Λίπανση	
Τύπος	Κλειστό κύκλωμα, υπό πίεση
Ποσότητα	1,7 lt
Κατανάλωση	Καθόλου
Διάρκεια ζωής	15000 lt
Σύστημα ψύξης	
Όγκος ψυκτικού υγρού (εσωτερικό)	4,12 lt
Αντιψυκτικό	2% Wagurit KI 640
Ποσότητα αντιψυκτικού 0, -10, -20° C	10, 20, 30 %
Πλακοειδής εναλλάκτης	GEA M 18 – 40 - GG
Παροχή όγκου υγρού ψύξης	0,5 – 2 $\frac{m^3}{h}$
Πτώση πίεσης στον εναλλάκτη (για 1,5 $\frac{m^3}{h}$)	92 mbar
Πίεση ψυκτικού αερίου (max., εξωτερικό)	3 bar
Μέγιστη θερμοκρασία εξόδου	65o C
Σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο	
Τάση	400V
Συχνότητα	50 Hz
Φάσεις	3
Ένταση εκκίνησης	25 A
Ένταση λειτουργίας	15,5 A

Γεννήτρια	
Αριθμός πόλων	2 ζεύγη
Ισχύς	11kW
3- φασικό σύστημα	σύνδεση αστέρα
Μέγιστη απόδοση	92,5%
Συνημίτονο φ	0,85
Τύπος προστασίας	IP 54
Χρονικές καθυστερήσεις	
Έναρξη	3 min
Παύσης	3 – 5 min
Μετάβαση στο 50% του φορτίου	0,5 min
Θόρυβος	
Σε απόσταση 1 m	53 – 60 dB (A)
Ασφάλεια και προστασία	
Προστασία εξοπλισμού και πλαισίου	IP 42
Έλεγχος CHP	VP 109
Ασφάλεια εξοπλισμού αερίου	EN 676
Ασφάλεια καυστήρα	EN 298
Οδηγίες για χαμηλή τάση	EN 60335-1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

ΚΩΔΙΚΟΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Η μονάδα είναι εφοδιασμένη με ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο μπορεί να ανιχνεύσει τα σημαντικότερα σφάλματα που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη λειτουργία της και να ειδοποιήσει για αυτά εμφανίζοντας στην οθόνη ένα 2-ψηφίο αριθμητικό κωδικό.

Κωδικός σφάλματος	Σύντομη περιγραφή	Αίτιο σφάλματος
0	Πίεση μηχανής πολύ μικρή	<ul style="list-style-type: none">• Η μέση πίεση έχει πέσει κάτω από ένα ελάχιστο όριο.
1	Η μηχανή σβήνει αμέσως μετά την εκκίνηση της	<ul style="list-style-type: none">• Η μηχανή αποσυνδέθηκε από το δίκτυο διανομής στη φάση run-on και ξεκίνησε εκ νέου πριν ακινητοποιηθεί.• Ο διακόπτης της γεννήτριας ενεργοποιήθηκε χειροκίνητα.
2	Ανοιχτό θερμοζεύγος	<ul style="list-style-type: none">• Το θερμοζεύγος συνδέθηκε λανθασμένα.• Το θερμοζεύγος έχει βλάβη.
3		<ul style="list-style-type: none">• Η γεννήτρια χρειάζεται πολύ ώρα μετά την έναρξη για να φθάσει στην ονομαστική ταχύτητά της.• Μετά από το σφάλμα 54 ο διακόπτης περιορισμού της ταχύτητας παραμένει ανοιχτός.

4	Αύξηση ταχύτητας	<ul style="list-style-type: none"> • Το επίπεδο της ταχύτητας είναι πολύ επίπεδο • Η πίεση στη μηχανή είναι πάρα πολύ υψηλή. • Αισθητήρας ταχύτητας ελαττωματικός. • Μετά από το σφάλμα 54 ο διακόπτης περιορισμού της ταχύτητας παραμένει ανοιχτός
6	Θερμοκρασία ψύξης πολύ υψηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Η θερμοκρασία ψύξης στο εσωτερικό ψυκτικό κύκλωμα είναι μεγαλύτερη των 85 °C. Θερμοκρασία παροχής της CHP πολύ υψηλή. • Ολισθαίνων ρυθμιστής κλειστός . Χαλασμένη αντλία ή αποσυνδεδεμένη από την παροχή ρεύματος . • Απώλειες ψύξης στο εσωτερικό ψυκτικό κύκλωμα
7	Θερμοκρασία He πολύ υψηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Η θερμοκρασία του He δεν ελέγχεται - υπερθέρμανση. Πρόβλημα εκκίνησης, το φορτίο δεν είναι αρκετά μεγάλο μετά την αλλαγή από λειτουργία με φλόγα σε λειτουργία με FLOX. • Η μεταβολή από χαμηλά σε υψηλά φορτία γίνεται πολύ γρήγορα. • Το θερμοηλεκτρικό ζεύγος έχει βλάβη.

10	Ταχύτητα πολύ χαμηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Η ταχύτητα της μηχανής είναι πολύ χαμηλή. • Πρόβλημα στη συχνότητα του δικτύου διανομής. • Ο ταχογράφος έχει πρόβλημα ή έχει ρυθμιστεί λανθασμένα.
11	Πίεση λαδιού	<ul style="list-style-type: none"> • Ο διακόπτης πίεσης λαδιού έχει βλάβη. • Δεν υπάρχει λάδι στην ελαιολεκάνη, διαρροή λαδιού. Χαλασμένα ρουλεμάν • Πρόβλημα αντλίας λαδιού. Διάλειμμα κατά τη διάρκεια της πλήρωσης φίλτρων στο αρχικό ξεκίνημα.
12	Watchdog time out	<ul style="list-style-type: none"> • Το λογισμικό ελέγχου έχει εμφανίσει κάποιο πρόβλημα. • Ο πίνακας έχει βλάβη. • Εξωτερικά προβλήματα
23	Watchdog oscillator	<ul style="list-style-type: none"> • Ο ηλεκτρικός ταλαντωτής χάλασε. • Εάν επαναληφθεί: έχει βλάβη ο πίνακας.
27	Κατανάλωση ενέργειας	<ul style="list-style-type: none"> • Η ταχύτητα έχει μειωθεί κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. • Η μηχανή αυξάνει την παραγωγή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. • Σοβαρή ζημιά στη μηχανή.

28	Λανθασμένη κατάσταση μηχανής	<ul style="list-style-type: none"> • Το λογισμικό έχει βλάβη. • Οι βαλβίδες ηλίου δεν ενεργοποιούνται πλέον. • Σοβαρό ηλεκτρικό ελάττωμα.
31	Τέλος αύξησης θερμοκρασίας	<ul style="list-style-type: none"> • Αρχική φάση χρονοβόρα. • Η εκκίνηση του καυστήρα έχει ρυθμιστεί πολύ αργά. • Η πίεση τροφοδοσίας του καυσίμου είναι χαμηλή. • Η ταχύτητα του ανεμιστήρα είναι πολύ μεγάλη. • Ο μηχανισμός ελέγχου της έναυσης ανταποκρίθηκε • Πιέστε το κομβίο πάνω στη συσκευή!*
32	Θερμοκρασία καυσαερίων πολύ χαμηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Η θερμοκρασία των καυσαερίων έπεσε κάτω από τα επιτρεπτά όρια. • Η παροχή καυσίμου διακόπηκε. • Θερμοζεύγος έχει βλάβη
33	Θερμοκρασία καυσαερίων πολύ υψηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Η θερμοκρασία των καυσαερίων ανέβηκε πάνω από τα επιτρεπτά όρια. • Ο εσωτερικός θάλαμος καύσης έχει τοποθετηθεί λανθασμένα. • Το μίγμα καυσίμου είναι πολύ πλούσιο.

37	Δεν καταγράφεται άφλογη οξειδωση	<ul style="list-style-type: none"> • Ο διακόπτης της άφλογης λειτουργίας έκλεισε από λάθος: • Το self test απέτυχε • Το θερμοηλεκτρικό ζεύγος ελέγχου του FLOX έχει βλάβη • Η παροχή καυσίμου σταμάτησε • Χαμηλή θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης • Ο διακόπτης της FLOX έχει πρόβλημα
38	Συνολική ποσότητα He πολύ υψηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Η εξωτερική βαλβίδα παροχής δεν είναι σφιχτή
40	Ελάχιστη συχνότητα του δικτύου διανομής	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόβλημα στο κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής.
41	Χαμηλή τάση L1	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόβλημα στο κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής • Τεστ ασφαλείας στο F1 κατά την εκκίνηση.
42	Χαμηλή τάση L2	<ul style="list-style-type: none"> • Το κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής.
43	Χαμηλή τάση L3	<ul style="list-style-type: none"> • Το κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής.
44	Σφάλμα προγράμματος, έλεγχος συχνοτήτων	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόβλημα λογισμικού. Το L1 διακόπηκε. Εξωτερική παρέμβαση.
45	Μέγιστη συχνότητα του δικτύου διανομής	<ul style="list-style-type: none"> • Το κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής..
46	Υψηλή τάση L1	<ul style="list-style-type: none"> • Το κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής

47	Υψηλή τάση L2	<ul style="list-style-type: none"> • Το κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής.
48	Υψηλή τάση L3	<ul style="list-style-type: none"> • Το κύκλωμα ασφαλείας του δικτύου διανομής
49	Σφάλμα προγράμματος, έλεγχος τάσεων	<ul style="list-style-type: none"> • Πρόβλημα λογισμικού. Εξωτερική παρέμβαση
50	Ασυμμετρία της τάσης	<ul style="list-style-type: none"> • Η μία από τις 3 φάσεις διαφέρει περισσότερο από 30 V.
51	Λήξη χρόνου γεμίσματος	<ul style="list-style-type: none"> • Η μηχανή χρειάζεται πολύ χρόνο να φτάσει την αρχική πίεση. • Η βαλβίδα παροχής έχει βλάβη, δεν έχει εισαχθεί. • Η πίεση παροχής της μπουκάλας πολύ χαμηλή. • Ο αισθητήρας της πίεσης της μηχανής έχει βλάβη
52	Θερμοκρασία He πολύ χαμηλή Έναρξη	<ul style="list-style-type: none"> • Η θερμοκρασία ελέγχου του εργαζόμενου αερίου δεν μπορούσε να διατηρηθεί κατά τη φάση της έναρξης. • Η ισχύς του καυστήρα είναι χαμηλή. Αραιό μίγμα. • Πίεση παροχής καυσίμου χαμηλή. Πιθανόν επίσης: η θερμοκρασία ψύξης πολύ υψηλή, 90 °C.

53	Θερμοκρασία He πολύ χαμηλή FLOX MODE	<ul style="list-style-type: none"> • Η θερμοκρασία ελέγχου του εργαζόμενου αερίου δεν μπορούσε να διατηρηθεί και για αυτό το λόγο έπεσε κάτω από μια επιτρεπόμενη τιμή. • Η παροχή καυσίμου διακόπηκε. • Ελάττωμα του καυστήρα. • Πιθανόν επίσης: η θερμοκρασία ψύξης πολύ υψηλή, 90 °C.
54	Υπερβολική ταχύτητα	<ul style="list-style-type: none"> • Η επιτρεπόμενη ταχύτητα λειτουργίας έχει ξεπεραστεί. • Πρόβλημα στη συχνότητα του δικτύου διανομής. • Πρόβλημα του δικτύου διανομής. Κεραυνός.
55	Πίεση εκκίνησης πολύ Υψηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Η πίεση εκκίνησης πολύ υψηλή. • Η μηχανή δεν μπορεί να εκκινήσει.
56	Θερμοκρασία He πολύ υψηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Σαν πρόσθετη προφύλαξη ασφάλειας ένα hardware ελέγχει τη θερμοκρασία των εναλλακτών θερμότητας για υπερθέρμανση. • Θερμοηλεκτρικό ζεύγος ελαττωματικό. • Ελάττωμα καυστήρα. • Σφάλμα προγράμματος. • Διαφορετικά ως λάθος 7

57	Πίεση δοχείου πολύ υψηλή	<ul style="list-style-type: none"> • Πίεση δεξαμενών ηλίου κάτω από τα 45 bar. • Διαρροή ή ο δίσκος ρήξης είναι ελαττωματικός.
63	Σφάλμα έναυσης	<ul style="list-style-type: none"> • Ο μηχανισμός έναυσης έχει καταγράψει ένα σφάλμα του καυστήρα κατά την εκκίνηση. Η παροχή καυσίμου διακόπηκε. • Το μίγμα εκκίνησης είναι φτωχό. • Ignition sensing electrode faulty.
88	Κανονική κατάσταση λειτουργίας	

Ο μηχανισμός ελέγχου της έναυσης του καυσίμου στο πάνελ ελέγχου καταγράφει την πίεση του ανεμιστήρα, την έναυση και τη φλόγα . Σε περίπτωση σφάλματος, το κόκκινο κομβίο φωτίζεται και για να απενεργοποιηθεί πρέπει να πιεστεί. Πιέζοντας το για παραπάνω από 3 sec, το λαμπάκι θα σβήσει και μετά αφήνοντας το θα δείξει έναν αριθμό φωτεινών σινιάλων τα οποία σημαίνουν:

- 1 x:** Σήμα πίεσης αέρα από τον ελεγκτή της πίεσης πριν την εκκίνηση του φυσητήρα
- 2 x:** Καθόλου πίεση αέρα 5 sec μετά την εκκίνηση του φυσητήρα
- 3 x:** Η πίεση του αέρα ελαττώνεται μετά από 5 sec ή περισσότερο
- 4 x:** Καθόλου φλόγα κατά τη διάρκεια του χρόνου ασφάλειας
- 5, 6 x:** Σβήσιμο της φλόγας μετά την έναυση

Ένα εφεδρικό σύστημα ασφαλείας, το οποίο λειτουργεί ανεξάρτητα από το ηλεκτρονικό, είναι εγκατεστημένο στον αεριοψύκτη της μηχανής κοντά στην έξοδο του νερού και έχει άμεση απόκριση από τις βαλβίδες καυσίμου. Εάν η θερμοκρασία εδώ φτάσει τους 90 °C, η παροχή καυσίμου διακόπτεται. Ο περιοριστής της θερμοκρασίας επαναρυθμίζεται με τον τερματισμό των λειτουργιών πατώντας το κόκκινο κομβίο και επιτρέποντας του να ψυχθεί για λίγα λεπτά. (Το ψυκτικό νερό στις μηχανής τον αεριοψύκτη πρέπει να είναι κάτω από τους 50 °C).