



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Μελέτη και Ανάλυση εφαρμογών του κινητήρα Stirling”

Εισηγητής
Δρ.Χασάπης Δ.Δημήτριος

Σπουδαστής
Παρχαρίδης Ν.Ευστάθιος

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012
ΣΕΡΡΕΣ





ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

“ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ”

ΘΕΜΑ

**“ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΟΥ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ STIRLING”**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δρ.Χασάπης Δ.Δημήτριος

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ Παρχαρίδης Ν.Ευστάθιος

ΤΕΙ ΣΕΡΡΩΝ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή	
1.1 Σκοπός της πτυχιακής εργασίας.....	2
1.2 Στόχοι της πτυχιακής εργασίας.....	3
1.3 Θεματική περίληψη.....	4
1.4 Η ανάγκη για εναλλακτικά συστήματα ενέργειας.....	6-7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Κινητήρας Stirling μια πιο γενική προσέγγιση	
2.1 Η εφεύρεση του κινητήρα Stirling και οι πρώτες εφαρμογές.....	9-10
2.2 Κινητήρας Stirling: 19 ^{ος} αιώνας.....	11
2.3 Κινητήρας Stirling: 20 ^{ος} αιώνας.....	12
2.4 Γεννήτρια Stirling Philips MP1002CA.....	13-14
2.5 Κινητήρας Stirling: 21 ^{ος} αιώνας.....	15
2.6 Κατασκευή κινητήρων Stirling στις Η.Π.Α.	16-17
2.7 Κατασκευή κινητήρων Stirling στην Ευρώπη.....	18-19
2.8 Ο κινητήρας Stirling στα ελληνικά δεδομένα.....	20
2.9 Κινητήρας Stirling και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας..	21
2.9.1 Γεωθερμία.....	21-22
2.9.2 Βιοκαύσιμα.....	23
2.9.3 Ηλιακή ενέργεια.....	24-27
2.10 Infinia Corporation.....	28-32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Κινητήρας Stirling, μια πιο ειδική προσέγγιση	
3.1 Αρχή λειτουργίας.....	34-45
3.2 Συνθήκες πίεσης.....	46-47
3.3 Τριβή και λίπανση.....	48
3.4 Σύγκριση με τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.....	49-50
3.5 Κινητήρας Stirling, πλεονεκτήματα.....	51-52
3.6 Μειονεκτήματα κινητήρα Stirling.....	53-58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Ανάλυση Εφαρμογών	
4.1 Εισαγωγή.....	60-62
4.2 Κινητήρας Stirling τύπος A (alpha type).....	63-67

4.3	Κινητήρας Stirling τύπος Β (beta type).....	68-70
4.4	Κινητήρας Stirling τύπος Γ (gamma type).....	71-73
4.5	Ενδεικνύμενο έργο, ισχύς και απόδοση.....	74-75
4.6	Υπολογιστικό παράδειγμα.....	76-79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Ηλιακές Εφαρμογές		
5.1	Εμπορικές εφαρμογές ηλιακού πιάτου-κινητήρα Stirling.....	81
5.1.1	SBP.....	81-82
5.1.2	Eurodish.....	82-83
5.1.3	Suncatcher.....	84-85
5.2	Κόστος εγκατάστασης.....	86
5.2.1	Κόστος εφαρμογής Eurodish.....	86
5.2.2	Κόστος εφαρμογής Suncatcher.....	87
5.2.3	Κόστος εφαρμογής Innova/Trinum.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Εν κατακλείδι		
6.1	Επίλογος.....	91
6.2	Συμπεράσματα.....	91
6.3	Προτάσεις.....	92
6.4	Ευχαριστίες.....	92
	Βιβλιογραφία.....	93-95
	Ιστοσελίδες.....	96-97

Υπεύθυνη Δήλωση : Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην πτυχιακή εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Σερρών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο



Εισαγωγή

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι να διερευνήσει ποικιλοτρόπως τον κινητήρα Stirling, να διασαφηνίσει τις αρχές λειτουργίας του ώστε να γίνει πιο προσιτός σε ένα μεγαλύτερο φάσμα ατόμων και να αποτελέσει έναυσμα για περαιτέρω μελέτη. Επίσης μέσω της συγκεκριμένης εργασίας ολοκληρώνεται ίσως η πρώτη έντυπη προσπάθεια που αφορά τον κινητήρα Stirling στα ελληνικά μιας και ελληνική βιβλιογραφία δεν προϋπήρχε.

1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχοι της πτυχιακής εργασίας αρχικά είναι να εξεταστεί το αντικείμενο του κινητήρα Stirling από πλευράς ενεργειακής απόδοσης, αξιοπιστίας, πρακτικότητας αλλά και από οικονομικής άποψης. Επιπλέον θα γίνει ανάλυση όλων αυτών των ζητημάτων και θα επικεντρωθούμε στους λόγους για τους οποίους ο εν λόγω κινητήρας δεν είναι σχετικά διαδεδομένος καθώς επίσης και στους λόγους για τους οποίους με δειλά βήματα επανέρχεται σιγά-σιγά ξανά στο προσκήνιο ενώ είχε εγκαταλειφθεί πριν από αρκετά χρόνια. Περεταίρω αναζήτηση θα πραγματοποιηθεί στην εξέλιξη της τεχνολογίας που συναντάται στον κινητήρα Stirling από την εφεύρεσή του τον 19^ο αιώνα έως και τις μέρες μας. Τέλος θα γίνει η προσπάθεια να γίνει αντιληπτή μια συγκεκριμένη διάταξη του μέσω της παράθεσης παραδειγμάτων εφαρμογής σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μιας και αυτό επιτάσσει το “ενεργειακό” ρεύμα των καιρών. Κυριότερος από όλους τους στόχους είναι να δοθεί η δυνατότητα σε οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο να έρθει σε επαφή με όλες τις παραπάνω έννοιες και εφαρμογές και αυτό να αποτελέσει ένα μεγάλο πρώτο βήμα για περεταίρω εμβάθυνση στο αντικείμενο του κινητήρα Stirling.

1.3 ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε έχοντας σκοπό την αποσαφήνιση της λειτουργίας του κινητήρα Stirling λαμβάνοντας υπόψιν την όλο και μεγαλύτερη ανάγκη για αξιοποίηση εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω απλοποιημένων κατασκευών.

Εξετάζονται οι αρχές λειτουργίας του κινητήρα Stirling μέσω των οποίων εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα τα οποία χρησιμοποιούνται για να καλυφθεί η ανάγκη που προαναφέρθηκε. Τόσο μέσω θεωρητικής όσο και μέσω πρακτικής προσέγγισης γίνεται μια εκτενής προσπάθεια για να αποδειχτεί ότι ο εν λόγω κινητήρας δύναται να καταλάβει πολύ σημαντική θέση στο παγκόσμιο ενεργειακό στερέωμα.

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης πραγματοποιείται η μελέτη του μοντέλου αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας και εξετάζονται σφαιρικά τόσο οι δυνατότητες όσο και οι απαιτήσεις του καθώς και αν εν τέλει αποτελεί την τεχνολογία του μέλλοντος που μέχρι τώρα δεν αξιοποιούσαμε ή απλά έναν ακόμα κινητήρα.

1.4 Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται μία παγκόσμια μεταστροφή προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας αυξητικών τάσεων με την πάροδο των ετών. Αυτό αποτελεί ένα φαινόμενο για το οποίο ευθύνες καταλογίζονται σε μία σειρά παραγόντων.

Ένα από τα κυριότερα αίτια αυτής της μεταστροφής είναι η ίδια η φύση του πετρελαίου το οποίο αποτελεί την κυριότερη και την ευρύτερα διαδεδομένη πηγή ενέργειας. Η ποσότητα πετρελαίου που υπάρχει στον πλανήτη μας είναι περιορισμένη καθώς η παραγωγή του είναι μια διαδικασία την οποία η φύση περαιώνει έπειτα από πολυετή έκθεση οργανικών ουσιών σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις στο υπέδαφος. Ο περιορισμός αυτός του πετρελαίου καθιστά την τιμή του αυξανόμενη μίας και η ζήτηση αυξάνεται ενώ η προσφορά μειώνεται με την πάροδο των ετών. Βέβαια στη διαμόρφωση της τιμής του πετρελαίου εμπλέκονται και άλλα χαρακτηριστικά όπως η διεξαγωγή πολέμων και διάφορες οικονομικές κινήσεις αλλά αυτό αποτελεί ζήτημα για περαιτέρω ανάλυση σε κάποιο οικονομικό έντυπο.

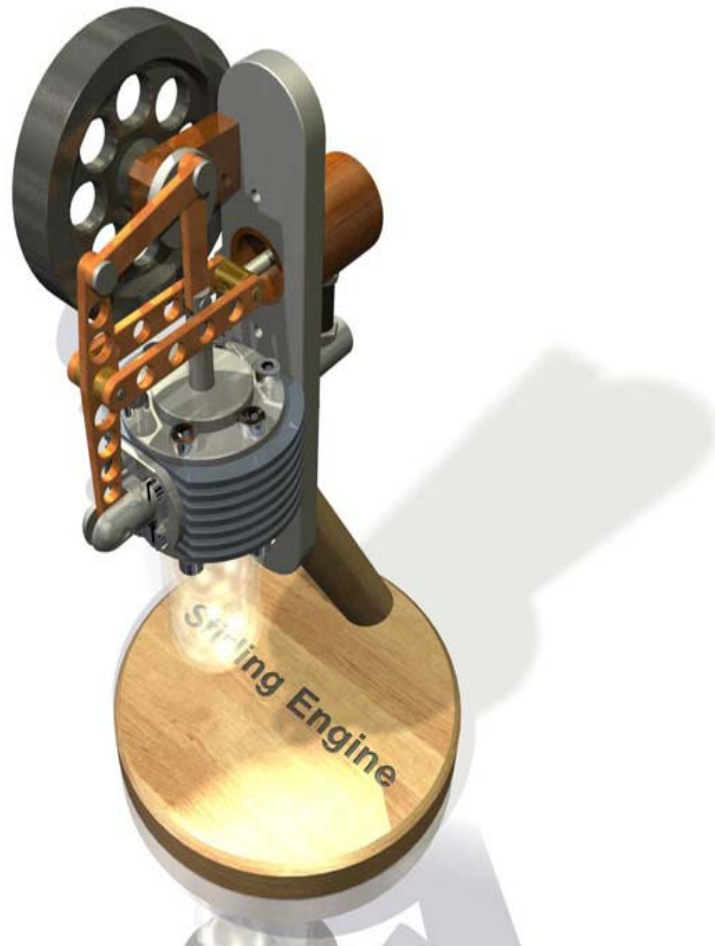
Ο δεύτερος μεγαλύτερος παράγοντας είναι η οικολογική συνείδηση η οποία καλλιεργείται στο μυαλό όλων στις μέρες μας και ενώ μοιάζει και ίσως θα έπρεπε να θεωρείται το κυριότερο αίτιο όλης αυτής της κίνησης προς εναλλακτικές μορφές ενέργειας η αλήθεια είναι πως μόλις τα τελευταία έτη παρουσιάστηκαν εναλλακτικά μοντέλα ενεργειακών συστημάτων των οποίων η απόκτηση καθίσταται εφικτή από οικονομικής άποψης. Έτσι αφού εξασφαλίστηκαν βιώσιμες καθώς και οικονομικές λύσεις παρατηρήθηκε μια μαζική αυξανόμενη τάση αξιοποίησής τους τόσο σε ιδιωτικές όσο και σε δημόσιες εφαρμογές.

Ορισμένες από τις πιο διαδεδομένες μορφές συστημάτων εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι ανεμογεννήτριες, οι υδρογεννήτριες καθώς και τα βιοκαύσιμα. Ο κινητήρας Stirling επίσης αποτελεί ένα τέτοιο

σύστημα υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις και αυτό μάλιστα θα διαπιστωθεί σε επόμενα κεφάλαια όπου θα διενεργηθεί περαιτέρω ανάλυση του ζητήματος.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο



Κινητήρας Stirling, μια πιο γενική προσέγγιση

2.1 Η ΕΦΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ STIRLING ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ο κινητήρας Stirling ή διαφορετικά ο κινητήρας αέρος του Stirling εφευρέθηκε και καταχωρήθηκε ως πατέντα από τον Robert Stirling το έτος 1816. Ο εν λόγω κινητήρας συνιστούσε το αποτέλεσμα ακολουθίας προηγούμενων προσπαθειών δημιουργίας ενός κινητήρα αέρος (air engine) αλλά πιθανότατα ήταν ο πρώτος ο οποίος τέθηκε σε λειτουργία το 1818 με σκοπό την άντληση υδάτων από κάποιο ορυχείο, κατασκευασμένος από τον Robert Stirling. Το κύριο αντικείμενο της πατέντας αυτής του Stirling ήταν ένας εναλλάκτης θερμότητας τον οποίο ονόμασε "εξοικονομητή" (economiser) εξαιτίας της δυνατότητας του κινητήρα να εξοικονομεί καύσιμο σε ένα συγκεκριμένο εύρος εφαρμογών. Η προσπάθεια αυτή επέφερε καρπούς σε όλο της το μεγαλείο όταν επιτεύχθηκε η σταθεροποίηση της πίεσης του αέρα σε υψηλά επίπεδα στο εσωτερικό του κινητήρα (pressurization) και κατ' επέκταση η σημαντική αύξηση της απόδοσής του, οδηγώντας έτσι τους μηχανικούς ενός εργοστασίου επεξεργασίας σιδήρου στη Μεγάλη Βρετανία (Dundee Factory) να τον επιλέξουν για να καλύψει τις ανάγκες του εξ ολοκλήρου. Τότε μάλιστα προσδιορίζεται η στιγμή που εισήχθει ο όρος "μηχανή αέρος κλειστού κύκλου" (closed cycle air engine). Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη εφεύρεση υπήρξε εξίσου απόπειρα αναζήτησης μιας ασφαλούς εναλλακτικής λύσης απέναντι στις εκρήξεις που σημειώνονταν στους λέβητες των ατμομηχανών οι οποίες είχαν στοιχίσει συχνά τόσο σε υλικές ζημιές όσο και σε ανθρώπινες ζωές εκείνη την εποχή.

Η ανάγκη δημιουργίας συνθηκών υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων αποσκοπώντας στην αύξηση της απόδοσης επέφερε μεγάλους προβληματισμούς στους Robert και James Stirling όσον αφορά την επιλογή των υλικών κατασκευής τα οποία ήταν διαθέσιμα εκείνη την εποχή. Έτσι με την Επιστήμη της Τεχνολογίας των Υλικών να βρίσκεται στα πρώτα της ακόμα

βήματα, φυσικό επόμενο ήταν να παρατηρούνται πολύ συχνά, ίσως και πιο συχνά από όσο φανταζόμαστε αστοχίες στους κινητήρες αυτούς, οι οποίες ευτυχώς δεν είχαν καμία σχέση με αυτές των κινητήρων ατμού. Με την συνεχή αναζήτηση για αύξηση της απόδοσης παράλληλα επήλθε η αύξηση του ρυθμού αστοχίας και αυτό όπως είναι φυσικό, αποτέλεσε τον κυριότερο λόγο εγκατάλειψης της πρακτικής εφαρμογής του κινητήρα Stirling στη βιομηχανία της εποχής και μάλιστα ενώ βρισκόταν ακόμη στα πρώτα χρόνια της ύπαρξης του.

2.2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING: 19^{ος} ΑΙΩΝΑΣ

Μετά την αποτυχία των αδελφών Stirling να βελτιώσουν τον κινητήρα που εισήγαγαν στο εργοστάσιο Dundee δεν έχει καταγραφεί καμία περεταίρω ανάπτυξη τους στην εξέλιξη των κινητήρων αέρος και έτσι ο κινητήρας Stirling δεν ανταγωνίστηκε ποτέ ξανά τους κινητήρες ατμού σε βιομηχανικές εφαρμογές. Με το πέρας των ετών οι μηχανές ατμού εμφανίζονταν ως η επικρατέστερη επιλογή στη βιομηχανία. Παρόλα ταύτα, περίπου στο 1860 μικρότερες μηχανές θερμού αέρος τύπου Stirling παρήχθησαν και βρήκαν εφαρμογή σε σημεία όπου απαιτούνταν αξιόπιστες πηγές ενέργειας μικρής και μεσαίας κλίμακας όπως η άντληση υδάτων ή η παροχή αέρα σε καθολικά εκκλησιαστικά όργανα. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές οι θερμοκρασίες λειτουργίας κρατούνταν σε χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής εκείνα τα χρόνια να υπερπληρούν τις προδιαγραφές καλής λειτουργίας συνθέτοντας μία αρκετά αξιόπιστη κατασκευή.

Εμπορικά, το δυνατό σημείο του εν λόγω κινητήρα ήταν το εξής: είχε την δυνατότητα να τον βάλει σε λειτουργία οποιοσδήποτε μπορούσε να ανάψει μια εστία φωτιάς εν αντιθέσει με την πολυπλοκότητα των ατμομηχανών. Αρκετές παραλλαγές του κινητήρα Stirling παρέμειναν στην παραγωγή, αλλά εκτός από κάποιες μηχανικές βελτιώσεις ο κατασκευαστικός σχεδιασμός του παρέμεινε ο ίδιος σε γενικές γραμμές έως το τέλος του 19^{ου} αιώνα.

2.3 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING: 20^{ος} ΑΙΩΝΑΣ

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο κινητήρας Stirling βρήκε εφαρμογή σε πολύ απλές και μάλλον οικιακές κατασκευές και σταδιακά παραγκωνίστηκε από την εισαγωγή των ηλεκτροκινητήρων και των μικρού μεγέθους μηχανών εσωτερικής καύσης. Στα τέλη της δεκαετίας του 1930 η χρήση του είχε περιοριστεί δραματικά, βρίσκοντας ορισμένες μόνο εφαρμογές σε παιχνίδια και μικρής κλίμακας συστήματα εξαερισμού.

Εκείνη την χρονική περίοδο η εταιρία Philips αναζητούσε διεξόδους επέκτασης του δικτύου πωλήσεων των ραδιοφωνικών συσκευών της σε μέρη που δεν είχαν πρόσβαση σε ηλεκτρικό δίκτυο και που οι απόκτηση μπαταριών ήταν δυσπρόσιτη. Έτσι η κεντρική διεύθυνση της Philips αποφάσισε πως μία λύση είναι να προσφέρει σε αυτό το αγοραστικό κοινό μαζί με το προϊόν της μια χαμηλής απόδοσης γεννήτρια και έτσι συγκέντρωσε μία ομάδα μηχανικών στο κέντρο έρευνας και εξέλιξης στο Eindhoven για να ανασύρουν εναλλακτικές μεθόδους επίτευξης του στόχου αυτού.

Ύστερα από μία σειρά συγκρίσεων και πειραματικών εφαρμογών οι μηχανικοί οι οποίοι συγκεντρώθηκαν στο Eindhoven κατέληξαν ότι η λύση του κινητήρα Stirling πληροί των απαιτήσεων τους επικεντρώνοντας στα πλεονεκτήματα της αθόρυβης λειτουργίας του καθώς και στο ότι η λειτουργία του πραγματοποιείται μέσω χρήσης διαφόρων και πολύ απλών μορφών θέρμανσης όπως η ανάφλεξη παραφινέλαιου, προϊόν το οποίο καταναλωνόταν ευρέως εκείνη την εποχή σε λάμπες. Επίσης έλαβαν υπόψιν τους ότι υπήρχε ένα ικανοποιητικό επίπεδο τεχνογνωσίας με την άνθηση των μηχανών εσωτερικής καύσης το οποίο δεν είχε μεταφερθεί έως τότε στον κινητήρα Stirling, γεγονός το οποίο άνοιξε νέους ορίζοντες στην χρήση βελτιωμένων κατασκευαστικών υλικών.

2.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ STIRLING PHILIPS MP1002CA

Λαμβάνοντας ως βάση τον πρώτο πειραματικό κινητήρα Stirling ο οποίος παρήγαγε πραγματική ισχύ της τάξεως των 16W, πολλά εξελιγμένα μοντέλα έφτασαν στο στάδιο της κατασκευής μέχρι και το τέλος του δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 ο κινητήρας με την χαρακτηριστική ονομασία "Type 10" είχε πάρει την έγκριση του υπεύθυνου του προγράμματος έρευνας και εξέλιξης της Philips, Johan de Witt στο Dordrecht, για να εισαχθεί σε άμεση παραγωγή σε διάταξη γεννήτριας όπως είχε εξ αρχής προταθεί.

Η παραγωγή απέδωσε στο εμπορικό τμήμα της Philips ένα προϊόν με 200W ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο λαμβάνοντας την κωδική ονομασία "The Bungalow set". Αμέσως μετά την επιτυχή παραγωγή που ολοκλήρωσε η Philips δόθηκαν εντολές προγραμματισμού της παραγωγικής διαδικασίας για 250 μονάδες του "The Bungalow set" εντός του έτους 1951.

Παρόλη την αισιοδοξία των μηχανικών της Philips αυτό ήταν το σημείο στο οποίο εγκαταλείφθηκε το εγχείρημα. Εκτός του ότι καθίστατο αδύνατο να παραχθεί σε ανταγωνιστικές τιμές, οι ενεργειακές απαιτήσεις των τρανζίστορ των ραδιόφωνων που καλούνταν να καλύψουν εμφανίστηκαν να είναι κατά πολύ μικρότερες από τις ενεργειακές δυνατότητες που εμφανιζόταν να έχουν οι εν λόγω γεννήτριες.

Έτσι, αυτό το αποτέλεσμα οδήγησε μόνο 150 από τις γεννήτριες της Philips στην παραγωγή. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα κάποιες από αυτές να καταλήξουν σε μηχανολογικά εργαστήρια κολεγίων και πανεπιστημίων ανά τον κόσμο καθιστώντας μία πολύ χρήσιμη εισαγωγή στη μελέτη του κινητήρα Stirling για τις επόμενες γενιές σπουδαστών.

Η Philips επέμεινε στην πειραματική εξέλιξη κινητήρων Stirling για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και συνέχισε τις διεργασίες για βελτίωση της λειτουργίας τους έως τα τέλη της δεκαετίας του 1970, σημειώνοντας τη μοναδική της εμπορική επιτυχία με τον ανεστραμμένου κύκλου κινητήρα Stirling

(Cryocooler) στον τομέα της ψύξης. Παρόλα αυτά κατασκευάστηκαν πολλά και διαφορετικά μοντέλα και καταχωρήθηκαν πατέντες για πολλά από αυτά, τις οποίες η Philips εμπορεύτηκε με άλλες εταιρίες και ούτε λίγο ούτε πολύ η εξέλιξη αυτών των μοντέλων δημιούργησε την βάση όσων γνωρίζουμε στη σύγχρονη εποχή για τον κινητήρα Stirling.



Μια από τις συνολικά 150 γεννήτριες Philips MP1002CA

2.5 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING 21^{ος} ΑΙΩΝΑΣ

Στις μέρες μας διαφαίνεται η αναγέννηση του κινητήρα Stirling και μάλιστα πολλοί είναι αυτοί που υποστηρίζουν ότι αποτελεί την τεχνολογία του μέλλοντος. Κι αν σκεφτεί κανείς ότι ο κινητήρας κλείνει σύντομα τους 2 αιώνες ζωής, θα έλεγε πως πολύ το καθυστερήσαμε!

Ήδη προσμετρώνται πολλές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες χρησιμοποιούν μοντέλα Stirling προσαρμοσμένα στις εκάστοτε συνθήκες τις οποίες ορίζει η ζήτηση των καταναλωτών. Αρκετά είναι τα παραδείγματα ανά τον κόσμο με πρωτεργάτη τις Η.Π.Α. μιας και εκεί εδρεύει η εταιρία Infinia Applications που κληρονόμησε από τη Philips όλη την τεχνογνωσία τη δεκαετία του 1970 όταν η δεύτερη εγκατέλειψε την έρευνα και κατ'επέκταση την παραγωγή του κινητήρα, έχοντας τον έως σήμερα, το κυριότερο εμπορικό της προϊόν.

Ακολουθώντας το παγκόσμιο αυτό ρεύμα η Ελλάδα δεν θα μπορούσε να μείνει και πολύ πίσω απαριθμώντας ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε οικιακό ή ακόμα και ερασιτεχνικό επίπεδο δίχως όμως αυτά να είναι τόσο σημαντικά ώστε να είναι ονομαστά.

2.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ STIRLING ΣΤΙΣ Η.Π.Α.

Οι Η.Π.Α. απαριθμούν μια πλειάδα εταιριών οι οποίες έχουν ως αντικείμενο ενασχόλησής τους, τους εν λόγω κινητήρες σχεδιάζοντας τους ποικιλοτρόπως και χρησιμοποιώντας διάφορες μορφές ενέργειας για την θέρμανσή τους. Ορισμένες από τις πλέον εδραιωμένες εταιρίες στον χώρο είναι οι εξής:

- ❖ **Infinia Corporation.** Εγκαθιδρύθηκε εισάγοντας το PowerDish χρησιμοποιώντας συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια μέσω παραβολικού καθρέπτη (πιατο-dish) παράγοντας 3.2kW/PowerDish.
- ❖ **SunPower Inc.** Μοναδικό προϊόν της το BIOWATT εξειδικευμένο για οικιακή χρήση προδίδοντας θερμότητα μέσω καύση βιομάζας. Αποδίδει από 500W-10kW ηλεκτρικής ενέργειας.
- ❖ **Stirling Technology Co.** Εταιρία εξειδικευμένη στην κατασκευή τόσο κινητήρων όσο και ψυκτών χαμηλής έως και μηδενικής συντήρησης.
- ❖ **Stirling Technology Inc.** Εδρεύει στην Αθήνα του Ohio και κατασκευάζει μόνο το μοντέλο ST-5 το οποίο χρησιμοποιεί πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή βιομάζα.

- ❖ **Stirling Thermal Motors Inc.** Τα μεγαλύτερα επιτεύγματά της είναι το 25kw PowerUnit, το SunDish Solar System και το 10kW PowerUnit το οποίο προορίζεται για χρήση στην υβριδική αυτοκίνηση από τη General Motors Corporation.

- ❖ **StirlingBioPower.** Παράγει ηλεκτρισμό μέσω της καύσης βιομάζας, βιοκαυσίμου, αποβλήτων ή ακόμα και με τη χρήση της αποβαλλόμενης θερμότητας

- ❖ **Thermal engines.** Εμπορεύεται κιτ κατασκευής κινητήρων Stirling μικρής σχετικά απόδοσης για εφαρμογές που απαιτούν μικρής αλλά σταθερής έντασης ηλεκτρικό ρεύμα.

2.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ STIRLING ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Οι κατασκευάστριες εταιρίες που εδρεύουν στην Ευρώπη ξεπερνούν τις δέκα με τις περισσότερες από αυτές να είναι Γερμανικής προέλευσης, κατασκευάζοντας εφαρμογές κινητήρων Stirling πάνω από μια δεκαετία και μάλιστα επικεντρώνοντας στην εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Γερμανικές κατασκευάστριες εταιρίες

- ❖ **Sunvention.** Κατασκευάζει τις γεννήτριες SunPulse Electric μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρισμό και SunPulse water χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια για την άντληση υδάτων.

- ❖ **Solo Kleinmotoren.** Με τεχνογνωσία από το 1990 η εν λόγω εταιρία κατασκευάζει κινητήρες ισχύος 10kW οι οποίοι χρησιμοποιούν φυσικό αέριο

- ❖ **D.Viebach.** Κατασκευάζει κινητήρες με άξονα ισχύος 500W για εκπαιδευτική χρήση μόνο

Κατασκευάστριες εταιρίες στην Υπόλοιπη Ευρώπη

- ❖ **G. Cussons Ltd.** Κατασκευάζει το μοντέλο P5691 Stirling Cycle Hot Air Engine για εκπαιδευτικό σκοπό μόνο.

- ❖ **Sigma Elektroteknisk A.S.** Το τελευταίο μοντέλο αυτής της Νορβηγικής εταιρίας είναι το PCP 1-130 για χρήση σε εφαρμογές συνδυασμού θερμότητας-ισχύος. Η ίδια εταιρία το 1997 κατέβαλε προσπάθεια για τη χρήση κινητήρων Stirling στην αυτοκίνηση σε εφαρμογές στη Μεγάλη Βρετανία.

- ❖ **Kockums Submarine Engines.** Ίσως η πιο παλιά κατασκευάστρια εταιρία στην Ευρώπη η οποία κατασκευάζει κινητήρες Stirling για υποβρύχια προσμετρώντας έως τώρα 5 εφαρμογές στον τομέα αυτό για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των υποβρυχίων κατά την κατάδυσή τους.

2.8 Ο ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Παρακολουθώντας όλη αυτή την κίνηση προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας παγκοσμίως ο ελληνικός χώρος δεν θα μπορούσε παρά να ακολουθήσει. Παρατηρείται μεγάλο ενδιαφέρον για εφαρμογές τόσο από επιχειρήσεις όσο και από οικογένειες. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αλλά και οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν τις πρώτες θέσεις στο ενδιαφέρον των Ελλήνων αλλά διακρίνονται και ορισμένα παραδείγματα εγκαταστάσεων Stirling κινητήρων σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η μοναδική εταιρία που έχει ως αντικείμενό της το εμπόριο κινητήρων Stirling είναι η Stratelis Μηχανολογικές Εγκαταστάσεις, η οποία εμπορεύεται τους κινητήρες TEDOM. Η συγκεκριμένη εταιρία προσφέρει ενεργειακές λύσεις προσαρμοσμένες με ευελιξία στις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Πιο αναλυτικά τα μοντέλα της Stratelis χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο ή βιοαέριο για την παραγωγή ηλεκτρισμού και μάλιστα απαριθμεί περίπου 30 εφαρμογές στο χώρο των Βαλκανίων και της κεντρικής Ευρώπης.

Εν συνεχεία παρατηρούνται κάποιες μεμονομένες περιπτώσεις Ελλήνων οι οποίοι ενδιαφέρονται περισσότερο ερασιτεχνικά ή ίσως και εκπαιδευτικά θα λέγαμε για του κινητήρες Stirling, παρόλα ταύτα ακόμα και δειλά-δειλά το ενδιαφέρον φαίνεται να αυξάνεται και το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ενθαρυντικό για το ενεργειακό μέλλον της χώρας μας.

2.9 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι εφαρμογές του κινητήρα Stirling είναι ότι λειτουργούν χρησιμοποιώντας συμβατικές μορφές ενέργειας όπως είναι το πετρέλαιο για παράδειγμα αλλά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) εξίσου αλλά ίσως και πιο αποδοτικά. Αυτό όμως που αξίζει να εξεταστεί είναι η χρήση Α.Π.Ε. μιας και η παροχή τους δεν στοιχίζει τίποτα στις περισσότερες περιπτώσεις στον καταναλωτή και μάλιστα παρέχονται δίχως να επιβαρύνουν το περιβάλλον με επιπρόσθετους ρύπους.

2.9.1 Γεωθερμία

Αναφέροντας τον όρο γεωθερμία εννοούμε την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας η οποία έγκειται σε υπόγειες τοποθεσίες. Συνήθως αναφερόμαστε σε θερμές πηγές υπόγειων υδάτων των οποίων η θερμοκρασία βρίσκεται σε σχετικά υψηλό επίπεδο. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποτελεί χαρακτηριστικό ορισμένων μόνο περιοχών περιορίζοντας έτσι γεωγραφικά τις συγκεκριμένες εφαρμογές.

Στην εισαγωγή αναφέρθηκε ότι ο κινητήρας Stirling αυξάνει την απόδοσή του βάσει των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ θερμού και ψυχρού θαλάμου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η θερμοκρασία των υδάτων δεν είναι δυνατόν να ξεπεράσει τους 100° C μιας και μετά το όριο αυτό αναφερόμαστε σε ατμό αλλά πρακτικά η θερμοκρασία στις θερμές υδάτινες πηγές σπάνια βρίσκεται σε επίπεδα άνω των 70° C. Οπότε αν θεωρήσουμε ότι η μέγιστη θεωρητική θερμοκρασία που μπορούμε να επιτύχουμε μέσω της γεωθερμίας στο θερμό μέρος του κινητήρα δεν ξεπερνάει τους 100° C αυτό που απομένει για να αυξηθεί η απόδοση μιας τέτοιας εφαρμογής είναι να επιτύχουμε όσο το δυνατόν

χαμηλότερη θερμοκρασία στο ψυχρό μέρος του κινητήρα. Για αυτό το λόγο τέτοιου είδους εφαρμογές είναι ιδανικές για χρήση σε γεωγραφικά σημεία όπου οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερες αλλά παράλληλα η γεωμορφολογία του υπεδάφους παρέχει ζεστό νερό.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω μία ιδανική περίπτωση εγκατάστασης τέτοιων εφαρμογών θα ήταν σε χώρες όπως η Ισλανδία όπου συνδυάζονται υψηλές θερμοκρασίες στο υπέδαφος με χαμηλές θερμοκρασίες υπέργεια. Παρόλα ταύτα η διαφορά θερμοκρασίας ψυχρού-θερμού μέρους παραμένει σε σχετικά μικρά επίπεδα για τα δεδομένα του κινητήρα παραπέμποντας στη χρήση κινητήρων χαμηλού θερμοκρασιακού διαφορικού (low difference stirling engines).



Γεωθερμική πηγή υδάτων

2.9.2 Βιοκαύσιμα

Με αυτό τον όρο αναφερόμαστε σε καύσιμα στερεής, υγρής ή και αέριας μορφής τα οποία προέρχονται από τη βιομάζα η οποία αποτελεί το βιοδιασπώμενο κλάσμα προϊόντων ή αποβλήτων διάφορων ανθρώπινων και μη δραστηριοτήτων. Προέρχονται από οργανική ύλη και θεωρούνται ανανεώσιμα καύσιμα αφού το ποσό διοξειδίου του άνθρακα που αποδεσμεύεται κατά την καύση έχει ήδη δεσμευτεί από τη φύση κατά την ανάπτυξη της οργανικής ύλης.

Η θερμογόνος δύναμη της βιομάζας αυξάνεται ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που εμπεριέχει αγγίζοντας τα 20.000 kJ/kg στο ποσοστό 0% υγρασίας. Η ανάφλεξη της βιομάζας απαιτεί περιβάλλον θερμοκρασίας 550 °C αναπτύσσοντας κατά την καύση θερμοκρασίες της τάξεως των 1000 °C έως περίπου 1500 °C. Τα συγκεκριμένα επίπεδα θερμοκρασιών καθιστούν τα βιοκαύσιμα μια ικανοποιητική λύση για την παροχή θερμότητας σε μια εφαρμογή Stirling σημειώνοντας πλήρως αποδεκτές τιμές στο θερμοκρασιακό διαφορικό λειτουργίας. Αυτό βέβαια εξαρτάται εξίσου και από το πώς θα διαχειριστεί η ψύξη του κινητήρα και θα εξεταστεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Καύση βιομάζας (Pellet)

2.9.3 Ηλιακή ενέργεια

Κατά καιρούς, έχουν έρθει στο προσκήνιο ποικίλες εφαρμογές οι οποίες σαν στόχο τους έχουν την αξιοποίηση τόσο της ηλιακής ακτινοβολίας όσο του ηλιακού φωτός. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα παραγωγής ενέργειας μέσω της αξιοποίησης του ηλίου είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Λιγότερο διαδεδομένα είναι τα φωτοβολταϊκά film, οι κύλινδροι κενού αλλά και παραβολικοί καθρέπτες με κινητήρα Stirling ελεύθερου εμβόλου.

Τα περισσότερα αν όχι όλα τα συστήματα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό έχουν ως αρχή λειτουργίας την αξιοποίηση του ηλιακού φωτός. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και με τις ηλιακές εφαρμογές του κινητήρα Stirling. Είναι από τις ελάχιστες κατασκευές που αξιοποιεί την ηλιακή θερμότητα για να παραχθεί μηχανικό έργο και εν συνεχεία ηλεκτρισμός. Με χρήση παραβολικών καθρεπτών η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται στο θερμό άκρο του κινητήρα και με χρήση tracker ακολουθείται η ιδανική κίνηση της κατασκευής μέχρι τη δύση του ηλίου.



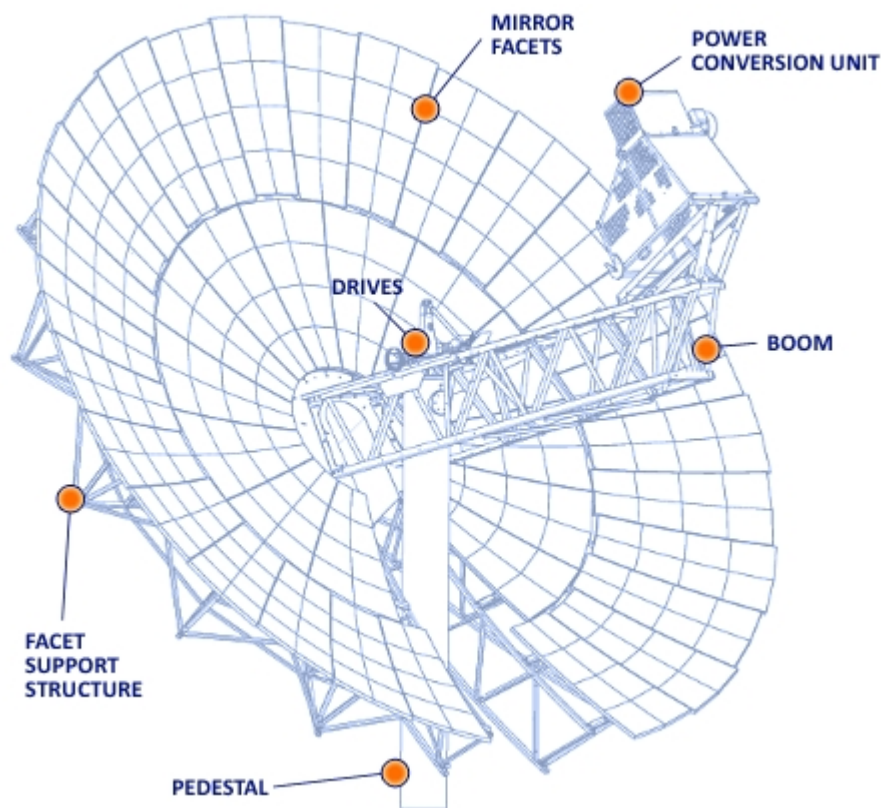
Εφαρμογή Stirling solar dish

Κατά προσέγγιση η μέση αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στο θερμό άκρο της κατασκευής σε περιβάλλον με μια μέση ηλιοφάνεια αγγίζει του 750 °C ενώ η αντίστοιχη θερμοκρασία στο ψυχρό άκρο αγγίζει τους 60 °C. Τα δεδομένα αυτά καθιστούν τα εν λόγω συστήματα ικανά να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια της τάξεως 1-3,2 kW και μάλιστα με διαστάσεις ηλιακού πιάτου 4,5 μέτρα στη διάμετρό του. Βέβαια εξετάζοντας τα προϊόντα διαφόρων κατασκευαστών παρατηρείται ότι καθώς αυξάνονται οι διαστάσεις του πιάτου αυξάνεται και η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία και κατ' επέκταση η απόδοση του συστήματος.

Παρόλο που σε αρχική ανάλυση ίσως φαίνεται μια κατασκευή από εξεζητημένα υλικά, θα λέγαμε πως η πραγματικότητα απέχει αρκετά από την πρώτη παρατήρηση. Οι περισσότεροι κατασκευαστές προμηθεύονται τα εξαρτήματά τους από βιομηχανίες κατασκευής εξαρτημάτων για αυτοκίνητα κρατώντας το κόστος σε χαμηλά σχετικά επίπεδα. Ο μοναδικός μάλλον λόγος για τον οποίο τα συγκεκριμένα προϊόντα συναντώνται σε υψηλές τιμές είναι διότι δεν έχουν εμπορευματοποιηθεί πλήρως μιας και μετρούν μόλις πέντε έτη ζωής και δεν υπάρχει ευρεία ενημέρωση του αγοραστικού κοινού για ενεργειακή λύση ως εναλλακτική των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Κατασκευαστικά μέρη Solar dish Stirling

Τα βασικά κατασκευαστικά μέρη της εφαρμογής παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα αναλυτικά



- ❖ **Mirror Facets**: Έδρες παραβολικού καθρέπτη
- ❖ **Power Conversion Unit**: Μονάδα μετατροπής ενέργειας (κινητήρας Stirling)
- ❖ **Drives**: Οδηγοί κινήσεων
- ❖ **Boom**: Πρόβολος στήριξης
- ❖ **Facet Support Structure**: Κατασκευή υποστήριξης εδρών
- ❖ **Pedestal**: Υποστύλωμα

Παρατηρήσεις

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα όλες οι έδρες των επιμέρους παραβολικών καθρεπτών βρίσκονται στερεωμένοι στο δικτύωμα υποστήριξης του συνόλου των καθρεπτών το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με τον πρόβολο στήριξης. Στον πρόβολο στήριξης ανατίθεται όχι μόνο η στήριξη των παραβολικών καθρεπτών καθώς και της μονάδας μετατροπής ενέργειας αλλά και η κίνηση ολόκληρης της κατασκευής μέσω των οδηγών για να επιτευχθεί η ιδανική γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ηλίου στο άκρο της μονάδας μετατροπής ενέργειας, το οποίο αντικρίζει τους καθρέπτες. Τέλος το σταθερό μέρος της κατασκευής είναι το υποστύλωμα το οποίο βρίσκεται πακτωμένο στο κάτω επίπεδο και καταπονείται με το βάρος ολόκληρης της κατασκευής.

2.10 Infinia Corporation

Ο λόγος για τον οποίο αξίζει να αφιερωθεί χρόνος στη μελέτη της συγκεκριμένης εταιρίας είναι γιατί διαδραμάτισε πολύ σημαντικό ρόλο το 1986, όταν η Philips εγκατέλειψε την εξέλιξη κινητήρων Stirling. Η Infinia Co. ήταν η εταιρία η οποία κληρονόμησε την τεχνογνωσία και έναν διόλου αμελητέο αριθμό κατοχυρωμένων ευρεσιτεχνιών.

Λόγω της Infinia Co. στις μέρες μας ζούμε ίσως την αναγέννηση του “αμφιλεγόμενου” κινητήρα Stirling. Η ίδια εξελίσσει από το 1986 εξαιρετικής αξιοπιστίας συστήματα ελεύθερου εμβόλου καθώς και θερμοακουστικούς ψύκτες χρησιμοποιώντας αντίστοιχη τεχνολογία. Μάλιστα ύστερα από τόση έμφαση σε προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης (R&D) πλέον είναι ικανή να παρέχει το ελάχιστο 20 έτη εγγύησης καλής λειτουργίας σε όλες τις εφαρμογές της.

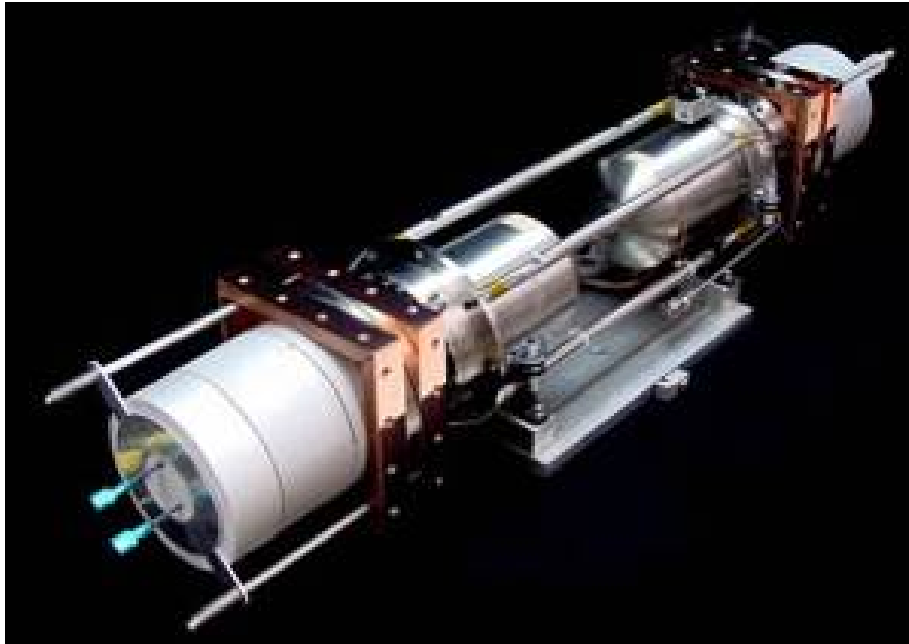
Στις μέρες μας η Infinia Co. αποτελεί μια βιώσιμη επιχείρηση η οποία τελευταία αντιμετωπίζει ορισμένες δυσκολίες. Παρόλα ταύτα παρέχει στο εμπορικό δίκτυό της 4 ενεργειακές λύσεις βασισμένες στο μοντέλο του Stirling, το Micro CHP, Remote Power, Tactical Power και PowerDish.

Πιο αναλυτικά το Micro CHP αποτελεί σύστημα συνδυασμού ισχύος και θερμότητας (Combined Heat and Power) το οποίο προορίζεται για οικιακή χρήση. Μάλιστα χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα πρακτικό μιας και καλύπτει τις ανάγκες της εκάστοτε οικίας σε θέρμανση, σε ηλεκτρισμό ή και σε συνδυασμό των δύο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα επίπεδα θορύβου σε κατάσταση λειτουργίας είναι σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα, ότι δεν απαιτείται κανενός είδους συντήρηση και επιπροσθέτως ότι υπάρχει άμεση ανταπόκριση σε περιπτώσεις στιγμιαίας ζήτησης θερμότητας ή ηλεκτρισμού.



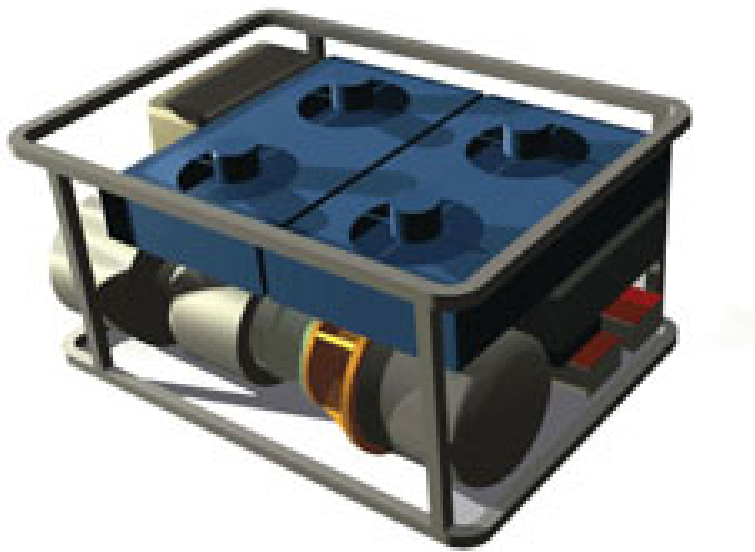
Γεννήτρια Infinia Co. Micro CHP σε οικία

Χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές λειτουργίας η Infinia Co. κατασκευάζει το σύστημα Remote CHP το οποίο παρέχει ακριβώς τις ίδιες ενεργειακές λύσεις που παρέχει και το Micro CHP αλλά σε μεγαλύτερες ονομαστικές τιμές ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα που συναντάμε σε αυτή την κατασκευή είναι ότι η εφαρμογή της προορίζεται για απομακρυσμένες περιοχές που αντιμετωπίζουν ενεργειακές ελλείψεις όπως χωριά τα οποία είναι απομακρυσμένα από τα αστικά κέντρα. Η συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί μηδενική σχεδόν συντήρηση και μηδενικά επίπεδα λίπανσης. Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι το σύστημα Remote CHP έχει χρησιμοποιηθεί για την παροχή ενέργειας σε αεροναυπηγικές και διαστημικές εφαρμογές καθώς και σε εγκαταστάσεις εθνικής σημασίας όπου απαιτούνται σταθερές και αξιόπιστες πηγές ηλεκτρισμού μιας και είναι εξελιγμένο σε συνεργασία με το NASA Glenn Research Center.



Θεωρητικό σχέδιο Infinia Co. Remote CHP

Εξίσου επαναστατικό σύστημα χαρακτηρίζεται το Tactical Power ισχύος 3kW το οποίο στόχο έχει την παροχή ενέργειας σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες χρησιμοποιώντας ως καύσιμη ύλη diesel. Τελεί υπό εξέλιξη σε συνεργασία με τις αμερικάνικες στρατιωτικές δυνάμεις και πιο συγκεκριμένα με το τμήμα Communications and Electronics Research and Development Command (CERDEC). Στην πρακτική του αξία συγκαταλέγονται η χρήση ως φορητή γεννήτρια, η χρήση ως δευτερεύουσα πηγή ενέργειας σε οχήματα, αλλά και η δυνατότητα προσαρμογής για κάλυψη οποιασδήποτε μορφής ενεργειακής ανάγκης όσον αφορά τη θέρμανση ή και τον ηλεκτρισμό σε απομακρυσμένες βάσεις υπό αντίξοες συνθήκες.



Θεωρητικό σχέδιο συστήματος Infinia Co. Tactical Power



Infinia Co Tactical Power μοντέλο υπό εξέλιξη

Η τελευταία αλλά ίσως και η πιο φιλική στο περιβάλλον κατασκευή της Infinia Co. είναι το Powerdish με απόδοση 3,2kW και διάμετρο 4,7 μέτρα. Ένα παραβολικό κάτοπτρο συγκεντρώνει τις ακτίνες του ηλίου στο θερμό άκρο του κινητήρα παρέχοντας θερμότητα. Το ψυχρό άκρο του χρησιμοποιεί την τεχνολογία του αερισμού για να κρατηθεί σε χαμηλά επίπεδα η θερμοκρασία. Η πρόταση αυτή της Infinia Co. έχει εφαρμογές τόσο σε οικιακό όσο και σε βιομηχανικό αλλά και πολεοδομικό επίπεδο εγκαθιστώντας το μεμονομένα ή και προσθετικά. Το κόστος του Powerdish ακόμα βρίσκεται σε υψηλά έως απαγορευτικά επίπεδα παρόλα ταύτα αναμένεται σύμφωνα με την Infinia Co. να πέσει δραματικά μόλις η παραγωγή αυξηθεί.



Ολοκληρωμένη εγκατάσταση Infinia Co. Powerdish

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο



Κινητήρας Stirling μια πιο ειδική προσέγγιση

3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Για να γίνει αντιληπτή η αρχή λειτουργίας μιας διάταξης Stirling θα ήταν ορθό να γίνει μια προσέγγιση η οποία θα εξετάζει τη διάταξη ξεκινώντας από λευκό χαρτί και σιγά-σιγά μέχρι την ολοκλήρωση της διάταξης να επεξηγείται σταδιακά η αρχή λειτουργίας. Παρακάτω χρησιμοποιείται μια διάταξη η οποία στο σύνολό της αποτελείται από πολύ απλά υλικά με τα οποία ερχόμαστε σε επαφή καθημερινά ώστε να ξεπεραστεί κάποιο ενδεχόμενο πολυπλοκότητας του παραδείγματος όσον αφορά το κατασκευαστικό μέρος και έτσι ώστε να καθίσταται δυνατό να επικεντρωθούμε στην αρχή λειτουργίας πιο εύκολα.

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1 δένουμε με ένα ελαστικό υλικό το στόμιο ενός κυλινδρικού δοχείου. Καθίσταται εύκολα κατανοητό ότι το ελαστικό υλικό διαστέλλεται όταν ο αέρας θερμαίνεται ενώ συστέλλεται όταν ο αέρας ψύχεται. Αυτό συμβαίνει διότι η εσωτερική πίεση του αερίου επιδρά στα τοιχώματα του ελαστικού υμένα. Η τοποθέτηση του εν λόγω υμένα αρχικά σκοπό έχει να κάνει ορατή την επίδραση της πίεσης διότι αυτή καθαυτή η πίεση δεν είναι ορατή στο ανθρώπινο μάτι παρά μόνο η επίδραση της επάνω στα υλικά.



FIG:1 Container and rubber

FIG:2 Heating the air

FIG:3 Cooling the air

FIG:1 Δοχείο και ελαστικός υμένας

FIG:2 Θέρμανση του αέρα

FIG:3 Ψύξη του αέρα

Έμβολο μετατόπισης

Αν ένα έμβολο τοποθετηθεί όπως στο σχήμα 4 (FIG:4) και η διάμετρος του εμβόλου είναι λίγο πιο μικρή από την εσωτερική διάμετρο του δοχείου το αέριο ωθείται μέσω του διακένου μεταξύ τοιχωμάτων και εμβόλου πάνω και κάτω από το δρομέα όταν αυτός κινείται κάτω και πάνω αντίστοιχα. Εντωμεταξύ όταν το δοχείο θερμαίνεται στο κάτω μέρος του και στο επάνω ψύχεται, έτσι ώστε να επικρατεί διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ βάσης και κορυφής του δοχείου το ελαστικό υλικό που τοποθετήθηκε συνεχώς θα διαστέλλεται και θα συστέλλεται.

Όταν το έμβολο κινηθεί προς το επάνω μέρος του δοχείου το αέριο μέσα σε αυτό εξαναγκάζεται σε μετακίνηση στο κάτω μέρος του δοχείου. Εντωμεταξύ το κάτω μέρος του δοχείου θερμαίνεται ώστε να θερμανθεί και το αέριο, αυξάνοντας την τιμή της πίεσής του, η οποία μεταφέρεται μέσω του διακένου εμβόλου-δοχείου από το δοχείο στον ελαστικό υμένα όπου προκαλεί διαστολή.

Αντιθέτως όταν η κατάλληλη δύναμη εφαρμοστεί για να μετακινηθεί προς τα κάτω το έμβολο, το αέριο εντός του δοχείου ωθείται στο επάνω μέρος του. Εντωμεταξύ το επάνω μέρος είναι το ψυχρό μέρος της διάταξης και το αέριο ψύχεται, μειώνεται η θερμοκρασία και η πίεσή του με αποτέλεσμα ο ελαστικός υμένας να συσταλεί.

Επομένως το έμβολο κινείται ελεύθερα επάνω-κάτω και ο ελαστικός υμένας συνεχώς διαστέλλεται και συστέλλεται. Άρα η κύρια λειτουργία της διάταξης έως τώρα είναι με την κίνηση του εμβόλου να μετακινείται αέριο δημιουργώντας μια συνεχή ροή μεταξύ ψυχρού και θερμού μέρους.



FIG:4 Displacer

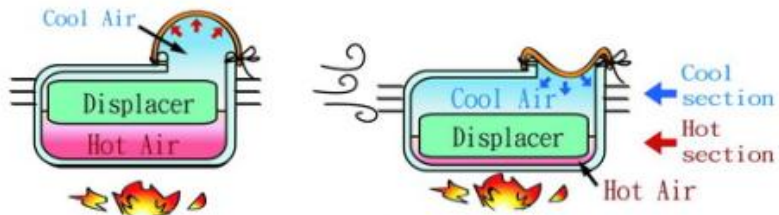


FIG:5 Operation of Displacer

FIG:4 Έμβολο μετατόπισης

FIG:5 Λειτουργία Εμβόλου-Δρομέα

Στρόφαλος

Μπορούμε να εξασφαλίσουμε την κίνηση του εμβόλου επάνω και κάτω, πολύ απλά συνδέοντας το έμβολο με ένα στρόφαλο: Όταν ο στρόφαλος περιστρέφεται το έμβολο κινείται πάνω-κάτω. Όταν επιτευχθεί η σύνδεση στροφάλου εμβόλου, θερμαίνουμε το κάτω μέρος του δοχείου ενώ ψύχουμε το επάνω. Δια χειρός κινούμε το στρόφαλο αρχικά διότι η εναλλασσόμενη θέρμανση και ψύξη που εφαρμόζεται δεν επαρκεί για την διαγραφή ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας έως τώρα κι έτσι παρατηρούμε τη συστολή και διαστολή του ελαστικού υμένα, επαναλαμβανόμενα.

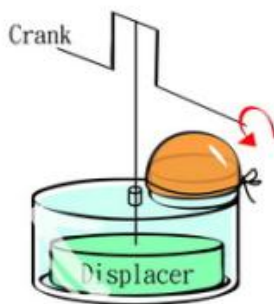


FIG:6 Crankshaft mechanism

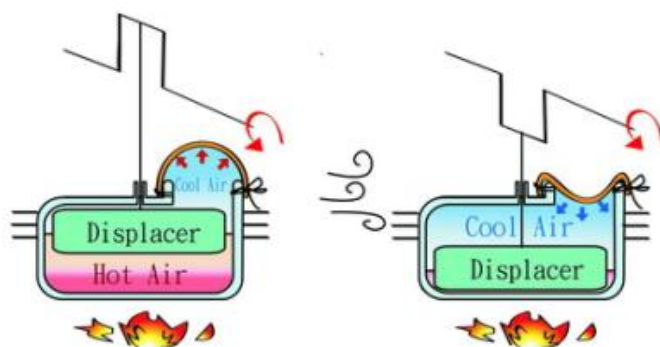


FIG:7 Operation of Crankshaft mechanism

FIG:6 Μηχανισμός στροφάλου

FIG:7 Λειτουργία μηχανισμού στροφάλου

Έμβολο έργου

Η συστολή και διαστολή του ελαστικού υμένα μπορούν να μετατραπούν σε απόδοση ισχύος ενώ η λειτουργία του αυτή είναι αντίστοιχη με τη λειτουργία ενός δυναμικού εμβόλου. Μπορεί να επιτευχθεί υπερσύνδεση του στρόφαλου με τον υμένα και εκμεταλευόμενοι τις κινήσεις του υμένα να περιστρέφουμε το στρόφαλο.

Το μέρος του στρόφαλου που συνδέεται με το έμβολο και αυτό που συνδέεται με το έμβολο έργου είναι απαραίτητο να έχουν διαφορά φάσης που αντιστοιχεί σε γωνία 90° . Σημειώνεται ότι το έμβολο δεν κινείται μόνο του αλλά από το στρόφαλο ο οποίος με τη σειρά του κινείται από την υπερσύνδεση με το έμβολο έργου-υμένα.

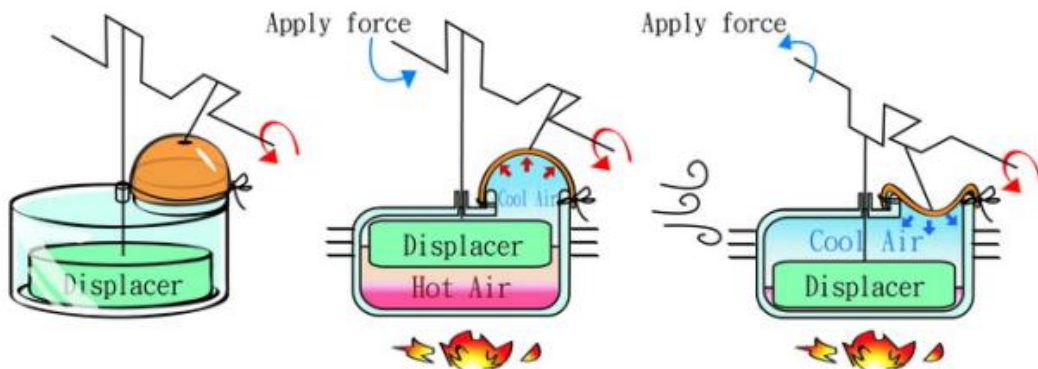


FIG:8 The force of rubber

FIG:9 Apply force to rotate the crank

FIG:8 Δύναμη του υμένα-δυναμικού εμβόλου

FIG:9 Εφαρμογή δύναμης περιστροφής στρόφαλου

Γιατί 90° γωνιακή απόκλιση;

Όπως φαίνεται στο σχήμα 9, όταν το έμβολο φτάνει στο άνω σημείο, ο όγκος του αέρα για θέρμανση στο κάτω σημείο έχει τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή ενώ παρατηρείται και η μεγαλύτερη τιμή πίεσης. Όταν το έμβολο μετακινείται στο κάτω σημείο ο όγκος αερίου για ψύξη έχει τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή ενώ η πίεση του τη μικρότερη δυνατή τιμή. Στόχος είναι να βρεθεί σε ποιο σημείο από τις θέσεις που καταλαμβάνει ο στρόφαλος εντός 360° παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή περιστροφική δύναμη, ώστε να συνδεθεί με το δυναμικό έμβολο και εν συνεχεία χωρίς επιπλέον υποβοήθηση να καλυφθεί ένας πλήρης κύκλος.

Από όλες όμως τις θέσεις του στροφάλου, μόνο στο σημείο που καταγράφεται απόκλιση 90° με το δυναμικό έμβολο παρατηρείται η μέγιστη περιστροφική δύναμη που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός πλήρους κύκλου, η οποία αποκλιση ονομάζεται και γωνία φάσης.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι αποτελέσματα λειτουργίας σε στατικό περιβάλλον και παρατηρήθηκαν έπειτα από πειραματικές μετρήσεις. Τυπικά η γωνία φάσης θεωρείται δεδομένη στις 90°. Όταν όμως η περιστροφική ταχύτητα, το φορτίο, η θερμοκρασία ή η εργαζόμενη ουσία της διάταξης διαφοροποιηθεί, η ιδανική γωνία φάσης ενδέχεται να είναι διαφορετική.

Σφόνδυλος

Τα παραπάνω εξαρτήματα δεν είναι αρκετά για να πραγματοποιηθεί ομαλή λειτουργία επειδή η συστολή και διαστολή του ελαστικού υμένα δεν είναι αρκετή για να δημιουργήσει την απαιτούμενη περιστροφική δύναμη και αυτή με τη σειρά της μια πλήρη περιστροφή του στροφάλου. Για αυτόν το λόγο τοποθετείται σφόνδυλος με υψηλή περιστροφική αδράνεια. Για επιπλέον υποβοήθηση τοποθετείται βαρίδιο στην εξωτερική επιφάνεια του σφονδύλου προσδίδοντας επιπρόσθετη περιστροφική αδράνεια.

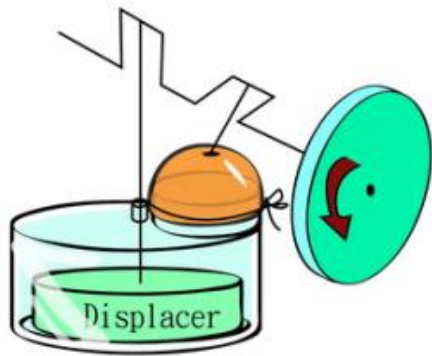


FIG:10 Round flywheel

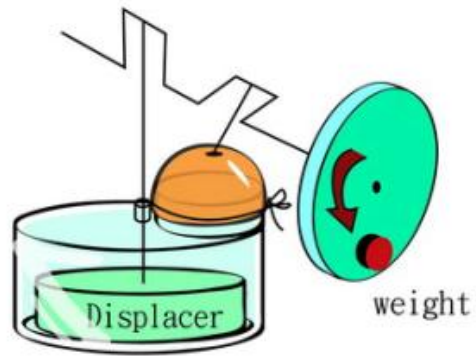


FIG:11 Flywheel weight

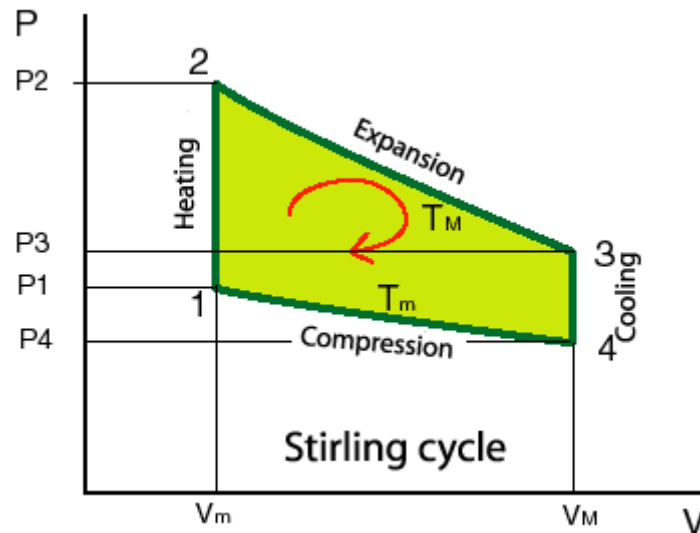
FIG:10 Περιστρεφόμενος σφόνδυλος

FIG:11 Τοποθέτηση βαριδίου

Θεωρητική λειτουργία

Ο ιδανικός κύκλος Stirling συνίσταται από τέσσερις θερμοδυναμικές διεργασίες της εργαζόμενης ουσίας οι οποίες διεξάγονται με την παρακάτω διαδοχή:

- ❖ Ισόθερμη εκτόνωση : Ο χώρος εκτόνωσης και ο αντίστοιχος εναλλάκτης θερμότητας παραμένουν υπό συνθήκες σταθερής υψηλής θερμοκρασίας και η εργαζόμενη ουσία μεταβαίνει οριακά σε ισόθερμη εκτόνωση απορροφώντας ενέργεια από την πηγή θερμότητας.
- ❖ Ισόχωρη ψύξη : Η εργαζόμενη ουσία διέρχεται από τον αναθερμαντήρα όπου ψύχεται αποβάλλοντας θερμότητα σε αυτόν η οποία χρησιμοποιείται στον επόμενη φάση.
- ❖ Ισόθερμη συμπίεση : Ο χώρος συμπίεσης και ο αντίστοιχος εναλλάκτης θερμότητας παραμένουν σε σταθερή χαμηλή θερμοκρασία ώστε η εργαζόμενη ουσία να ολοκληρώσει μία "σχεδόν" ισόθερμη συμπίεση αποβάλλοντας θερμότητα στην ψυχρή δεξαμενή.
- ❖ Ισόχωρη θέρμανση : Η εργαζόμενη ουσία περνάει ξανά από τον αναθερμαντήρα όπου ανακτά την απωλεσμένη θερμότητα, ανεβάζοντας την θερμοκρασία στον χώρο εκτόνωσης.



- 1-2 Heating: Θέρμανση
- 2-3 Expansion: Εκτόνωση
- 3-4 Cooling: Ψύξη
- 4-1 Compression: Συμπίεση

Η θεωρητική θερμική απόδοση του κύκλου Stirling έπειτα από σχετικούς υπολογισμούς αποδεικνύεται ότι είναι ίση με αυτή του θεωρητικού κύκλου Carnot δηλαδή ίση με την υψηλότερη δυνατή απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί από οποιαδήποτε θερμική μηχανή. Έτσι είναι λογικό ο θεωρητικός αυτός κύκλος να απέχει αρκετά από ότι πραγματικά συμβαίνει στο εσωτερικό ενός κινητήρα Stirling στην πράξη, γι' αυτό και θα πρέπει να θεωρηθεί ως ένα πολύ καλό σημείο εκκίνησης οποιασδήποτε απόπειρας για μια ολοκληρωμένη ανάλυση.

Πρακτικά Ζητήματα

Στην πραγματικότητα υπήρξαν πολλές διαφωνίες διατυπωμένες σε βιβλία θερμοδυναμικής μηχανικής για την απόσταση μεταξύ θεωρητικού και πραγματικού κύκλου Stirling και μάλιστα αυτό είναι αμφίβολο αν εν τέλει κατέσται εποικοδομητικό, μιας και δημιούργησε αρκετή σύγχυση στους μελετητές.

Όσον αφορά τα πιο πρακτικά ζητήματα, αυτά έχουν να κάνουν με τη μείωση της πραγματικής απόδοσης και πιο συγκεκριμένα με τα φυσικά όρια που καλούμαστε να λάβουμε υπόψιν στη μετάδοση της θερμότητας καθώς και με την τριβή που δημιουργείται λόγω του ιξώδους των αερίων που εσωκλείονται στους θαλάμους συμπίεσης. Υπάρχουν όμως κι άλλα ζητήματα πρακτικής μηχανικής τα οποία τίθενται υπό συζήτηση όπως για παράδειγμα η προτίμηση πιο απλών μηχανισμών μετάδοσης κίνησης έναντι άλλων πολυσύνθετων με σκοπό την προσέγγιση του ιδανικού κύκλου, περιορισμοί που συναντώνται όσον αφορά τα διαθέσιμα υλικά και τις ιδιότητες των μη-ιδανικών αερίων ως εργαζόμενων ουσιών, τη μετάδοση θερμότητας, την αντοχή σε εφελκυσμό, τον ερπυσμό, την αντοχή σε θραύση, και το σημείο τήξης των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή.

Μία από τις ερωτήσεις που τίθενται συχνά είναι αν ο θεωρητικός κύκλος με την ισόθερμη εκτόνωση και συμπίεση είναι στην πραγματικότητα η ορθή προσέγγιση στη λειτουργία του πραγματικού κύκλου Stirling (αποδίδεται σε δυναμοδεικτικό διάγραμμα). Ο καθηγητής **C.J. Rallis** αναφέρθηκε στο ότι είναι πολύ δύσκολο να φανταστούμε συμπίεσεις και εκτονώσεις οι οποίες προσεγγίζουν την ισόθερμη συμπεριφορά και ότι θα ήταν πιο ρεαλιστικό αν λαμβάναμε υπόψιν τις εν λόγω διεργασίες ως αδιαβατικές ώστε να γίνει σωστότερα η αναγωγή σε ένα θερμοδυναμικό ισοδύναμο κύκλο. Μια ιδανική θεωρητική ανάλυση όπου η εκτόνωση και η συμπίεση συγκαταλέγονται ως αδιαβατικές διεργασίες με ισόθερμους εναλλάκτες θερμότητας και ιδανικό

αναθερμαντήρα παρουσιάστηκε από τον **Rallis** και ο ίδιος μετονόμασε το κύκλο αυτόν σε " κύκλο ψευδο-Stirling " ή " ιδανικό αδιαβατικό κύκλο Stirling " . Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα αυτού του ιδανικού κύκλου είναι ότι δεν σχετίζεται με την απόδοση του κύκλου Carnot. Ένα περαιτέρω συμπέρασμα αυτού του ιδανικού κύκλου είναι ότι οι μέγιστες αποδόσεις εμφανίζονται σε μικρότερες σχέσεις συμπίεσης χαρακτηριστικό το οποίο παρατηρείται στις πραγματικές μηχανές με αποτέλεσμα η απόσταση μεταξύ θεωρητικού και πραγματικού κύκλου να γίνει μικρότερη. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώθηκε σε μία ανεξάρτητη έρευνα που διεξήγαγε ο **T. Finkelstein** γύρω από την αδιαβατική συμπίεση και εκτόνωση στον κύκλο Stirling.

Λειτουργία

Από τη στιγμή που ο κινητήρας αποτελεί έναν κλειστό κύκλο διεργασιών αυτό σημαίνει ότι εμπεριέχει συγκεκριμένη ποσότητα αερίου το οποίο ονομάζεται εργαζόμενη ουσία. Και συνήθως είναι Ατμοσφαιρικός αέρας, Ήλιο ή Υδρογόνο. Υπό κανονική λειτουργία ο κινητήρας είναι απόλυτα στεγανός με αποτέλεσμα καμία ποσότητα αέριας μάζας να μην εισέρχεται ή να εξέρχεται από αυτόν. Γι' αυτό το λόγο δεν είναι απαραίτητη η χρήση βαλβίδων όπως σε άλλους εμβολοφόρους κινητήρες.

Ο κινητήρας Stirling πραγματοποιεί κύκλους διεργασιών όπως οι υπόλοιπες θερμικές μηχανές μέσω τεσσάρων κύριων διαδικασιών: ψύξη, συμπίεση, θέρμανση και εκτόνωση, μετακινώντας την εργαζόμενη ουσία εμπρός και πίσω κατά το διαμήκη άξονά του, μεταξύ θερμών και ψυχρών εναλλακτών θερμότητας, συχνά με θερμικό αναγεννητή τοποθετημένο μεταξύ θέρμανσης και ψύξης.

Με τον όρο θερμικό αναγεννητή αναφερόμαστε σε ένα εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας όπου και προσωρινά αποθηκεύεται θερμότητα, τον οποίο τοποθετούμε μεταξύ θερμού και ψυχρού κυλίνδρου με τέτοιο τρόπο ώστε η εργαζόμενη ουσία να τον διαπερνά πρώτα προς το θερμό και μετά προς το ψυχρό μέρος του κινητήρα. Η χρησιμότητά του είναι να συγκρατεί και να ανακυκλώνει θερμότητα στη διάταξη με σκοπό να αυξηθεί η απόδοση, όπου σε διαφορετική περίπτωση η θερμότητα θα διαπερνούσε τον κινητήρα και θα κατέληγε στο περιβάλλον μέσω μη αναστρέψιμης διαδικασίας.

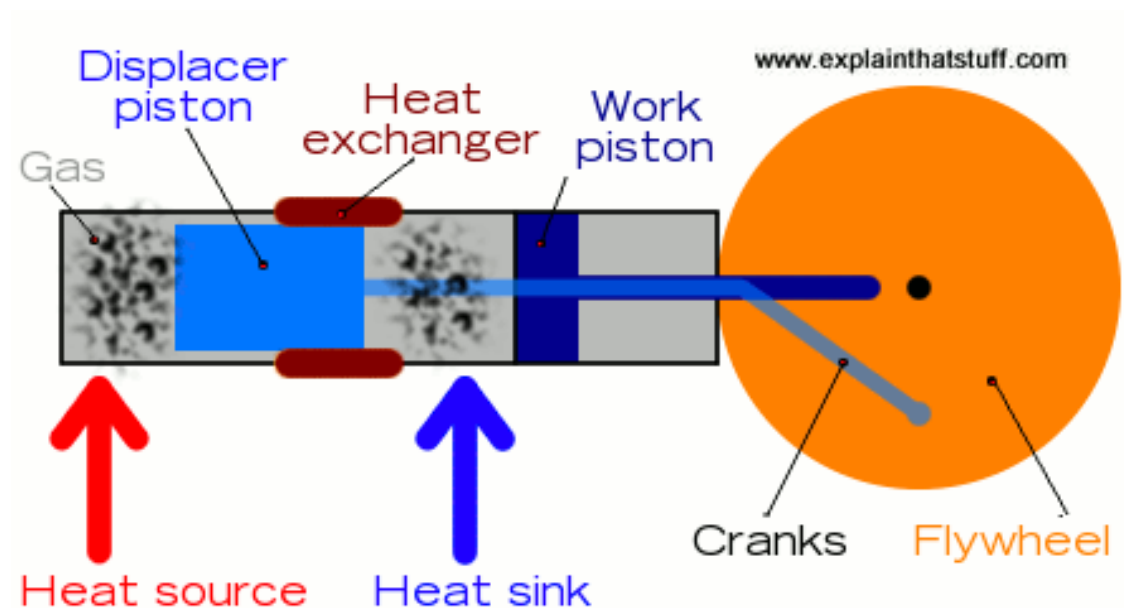
Ο θερμός εναλλάκτης βρίσκεται σε επαφή με μία εξωτερική πηγή θερμότητας όπως για παράδειγμα είναι ένας καυστήρας πετρελαίου και ο ψυχρός εναλλάκτης βρίσκεται σε επαφή με μία εξωτερική δεξαμενή αποβολής θερμότητας όπως για παράδειγμα μεταλλικά πτερύγια αέρος.

Μία οποιαδήποτε μεταβολή στη θερμοκρασία της εργαζόμενης ουσίας θα προκαλέσει αντίστοιχη μεταβολή στην πίεση καθώς το έμβολο ωθεί το αέριο εναλλασσόμενα σε εκτόνωση και συμπίεση. Το αέριο ακολουθεί την αντίστοιχη συμπεριφορά που περιγράφεται από τους νόμους των αερίων όσον αφορά τη σχέση πίεσης, θερμοκρασίας και μεταβολής όγκου. Όταν το αέριο θερμανθεί επειδή βρίσκεται σε έναν ερμητικά κλειστό θάλαμο η πίεση αυξάνεται και το έμβολο ωθείται αποδίδοντας έργο. Όταν το αέριο ψύχεται αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται λιγότερο έργο για να συμπιεστεί και αυτό είναι που εξασφαλίζει την ισχύ εξόδου του κύκλου.

Συνοψίζοντας ο κινητήρας Stirling εκμεταλλεύεται την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού και ψυχρού του άκρου δημιουργώντας έναν κύκλο σταθερής ποσότητας μάζας αερίου όπου μετά από θέρμανση και εκτόνωση, ψύξη και συμπίεση μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανική ενέργεια. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ψυχρού και θερμού άκρου τόσο μεγαλύτερη καθίσταται και η απόδοση της διάταξης. Η μέγιστη θεωρητική απόδοση είναι αυτή του κύκλου Carnot, στην πραγματικότητα όμως οι κινητήρες παρουσιάζουν πάντοτε μικρότερες αποδόσεις λόγω τριβής και άλλων απωλειών.

Τυπική σχηματική αναπαράσταση

Στο παρακάτω σχήμα συνοψίζονται τα μηχανικά μέρη αλλά και τα εξαρτήματα που απαρτίζουν μια πλήρη διάταξη κινητήρα Stirling.



Gas: Αέριο (εργαζόμενη ουσία)

Displacer piston: Έμβολο μετατόπισης

Heat exchanger: Εναλλάκτης θερμότητας (θερμικός αναγεννητής)

Work piston: Δυναμικό έμβολο

Flywheel: Τροχαλία

Crank: Στρόφαλοι

Heat sink: Θερμή δεξαμενή

Heat source: Πηγή θερμότητας

3.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

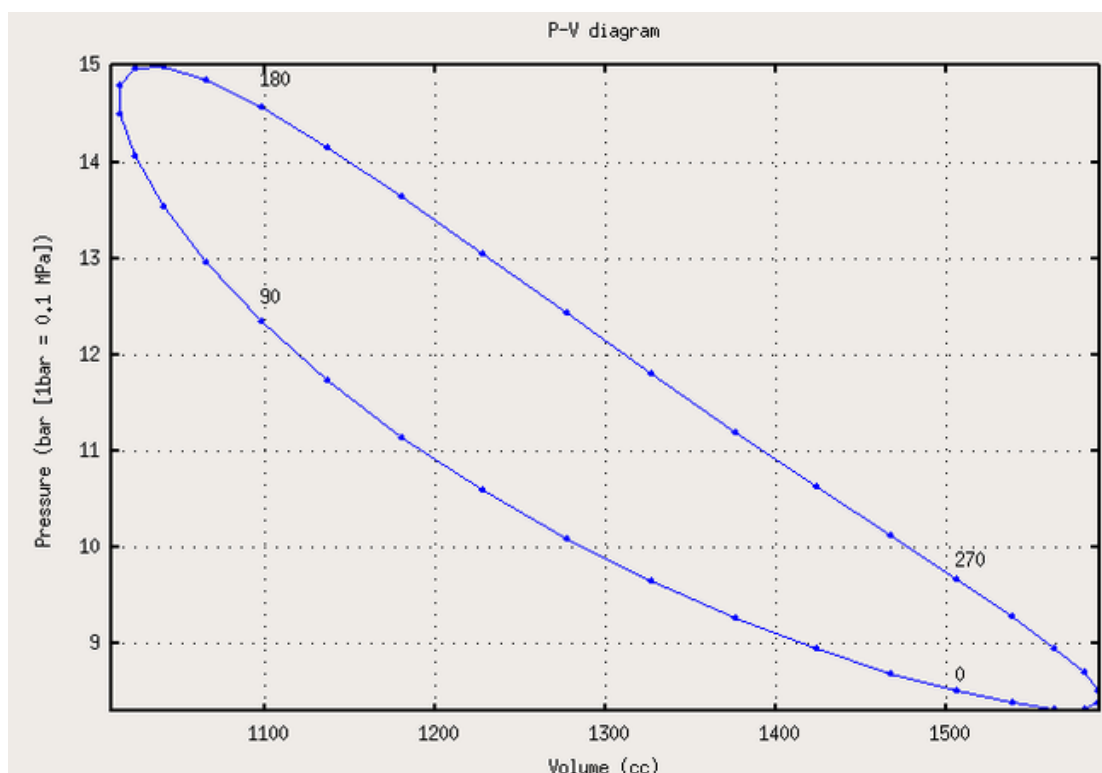
Στους περισσότερους κινητήρες Stirling υψηλής απόδοσης, η ελάχιστη πίεση της εργαζόμενης ουσίας παίρνει τιμές ανώτερες της ατμοσφαιρικής. Αυτή η αρχική πίεση λειτουργίας είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω χρήσης μηχανισμού τρόμπας ή πληρώνοντας τον κινητήρα μέσω δοχείου πεπιεσμένου αερίου ή ακόμα και σφραγίζοντας τους θαλάμους όταν η μέση θερμοκρασία είναι χαμηλότερη της μέσης θερμοκρασίας λειτουργίας. Όλες αυτές οι μέθοδοι συμβάλλουν στη αύξηση της μάζας της εργαζόμενης ουσίας εντός του θερμοδυναμικού συστήματος.

Επιπλέον μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην επιλογή των εναλλακτών θερμότητας, έτσι ώστε να παρέχουν τον απαιτούμενο βαθμό μεταφοράς θερμότητας. Εφόσον οι εναλλάκτες είναι σχεδιασμένοι ορθώς και επομένως έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν τις απαραίτητες συνθήκες για να υπάρξει ρεύμα μεταφοράς θερμότητας τότε ο κινητήρας σε πρώτη προσέγγιση θα παράξει ισχύ ανάλογη της μέσης πίεσης όπως προβλέπουν οι αριθμοί **West** και **Beale** οι οποίοι αποτελούν παραμέτρους για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης κινητήρων Stirling. Στην πράξη βέβαια η τιμή της μέγιστης πίεσης περιορίζεται εντός των ορίων της ασφαλούς λειτουργίας του θαλάμου συμπίεσης.

Από πολλές οπτικές γωνίες οι ρυθμίσεις λειτουργίας ενός κινητήρα Stirling αποτελούν ένα πολυδιάστατο ζήτημα αντικρουόμενων απαιτήσεων. Μία από τις δυσκολίες επίτευξης υψηλών τιμών πίεσης κατά τη διαδικασία βελτίωσης της απόδοσης, είναι ότι τα απαιτούμενα ποσά θερμότητας αυξάνονται σε αναλογία με την πίεση. Έτσι εν τέλει η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται όλο και δυσκολότερα με την αύξηση της πίεσης μιας και μεγαλύτερες τιμές πιέσεων απαιτούν αυξημένο πάχος τοιχωμάτων των θαλάμων συμπίεσης του κινητήρα το οποίο ως φυσικό επόμενο έχει την αύξηση της αντίστασης στη μεταφορά της θερμότητας.

Παρατηρήσεις

Στο παρακάτω δυναμοδεικτικό διάγραμμα παρατηρούνται οι αυξομειώσεις της πίεσης συναρτήσει του όγκου σε ένα πλήρη αδιαβατικό κύκλο λειτουργίας ενός κινητήρα Stirling . Ο αδιαβατικός κύκλος Stirling βρίσκεται πολύ κοντά στον ιδανικό κύκλο Stirling παρόλα ταύτα οι τέσσερις θερμοδυναμικές διεργασίες είναι ελάχιστα διαφορετικές όπως φαίνεται στο διάγραμμα παρακάτω.



- 180° με 270°: Ψευδο-ισόθερμη εκτόνωση, ο χώρος εκτόνωσης θερμαίνεται από την εξωτερική πηγή και το αέριο υπόκειται σε σχεδόν ισόθερμη εκτόνωση.
- 270° με 0°: Σχεδόν-ισόχωρη ψύξη, το αέριο περνά από τον αναγεννητή στον οποίο ψύχεται και αποβάλλει θερμότητα, με σκοπό αυτή να χρησιμοποιηθεί στον επόμενο κύκλο.
- 0° με 90°: Ψευδο-ισόθερμη συμπίεση, ο χώρος συμπίεσης ψύχεται μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και το αέριο υπόκειται σε σχεδόν ισόθερμη συμπίεση.
- 90° με 180°: Σχεδόν-ισόχωρη θέρμανση, το αέριο περνά από τον αναγεννητή προς τον χώρο εκτόνωσης "παραλαμβάνοντας" τη θερμότητα για την πραγματοποίηση του επόμενου κύκλου.

3.3 ΤΡΙΒΗ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΣΗ

Σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, σε κινητήρες όπου η εργαζόμενη ουσία είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας ή σε οποιαδήποτε θερμική μηχανή αερίου, το οξυγόνο σε συνδυασμό με το υγρό λιπαντικό δύναται να προκαλέσει ανάφλεξη και εν τέλει έκρηξη. Τουλάχιστον ένας άνθρωπος έχει χάσει τη ζωή του σε τέτοιου είδους έκρηξη ενώ αριθμούνται και ορισμένοι τραυματίες. Επίσης τα λιπαντικά μπορούν να "φράξουν" τους εναλλάκτες θερμότητας και ειδικότερα τον αναγεννητή θερμότητας.

Για τους παραπάνω λόγους οι σχεδιαστές των κινητήρων προτιμούν μοντέλα χωρίς την ύπαρξη λίπανσης, κατασκευασμένα από υλικά με χαμηλούς συντελεστές τριβής όπως ο γραφίτης. Σε ορισμένα ακόμα μοντέλα αποφεύγεται η επαφή κινούμενων επιφανειών χρησιμοποιώντας ελαστικά στεγανοτικά έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η στεγανότητα του εμβόλου.

Αυτοί είναι οι λόγοι οι οποίοι συμβάλλουν στην ύπαρξη λιγότερης συντήρησης καθώς και στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλής λειτουργίας στους κινητήρες Stirling σε σχέση με του πιο διαδεδομένους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Αρχικά, σε μια πρώτη προσέγγιση εν αντιθέσει με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, ο κινητήρας Stirling έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί πιο εύκολα και πιο αποτελεσματικά ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, να λειτουργεί παράγοντας χαμηλότερα επίπεδα θορύβου καθώς και να είναι πιο αξιόπιστος απαιτώντας χαμηλότερα επίπεδα συντήρησης.

Οι κινητήρες Stirling λοιπόν προτιμώνται για χρήσεις όπου παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο αυτά τα μοναδικά πλεονεκτήματα και ειδικότερα αν το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας (€/kWh) είναι πιο σημαντικό από το συνολικό κόστος ανά μονάδα ισχύος (€/kW). Με βάση αυτό το δεδομένο ο κινητήρας Stirling ανταγωνίζεται κοστολογικά τις Μ.Ε.Κ. σε αποδόσεις έως και 100kW περίπου.

Βέβαια σε σύγκριση με μια Μ.Ε.Κ. της ίδιας τάξης ισχύος, ο κινητήρας Stirling αποτελεί μια πιο ακριβή, βαριά και μεγάλη σε διαστάσεις κατασκευή. Παρόλα αυτά είναι πιο αποδοτικός από τις περισσότερες από αυτές. Οι χαμηλότερες απαιτήσεις του για συντήρηση καθιστούν το συνολικό ενεργειακό κόστος συγκρίσιμο. Επίσης συγκρίσιμος καθίσταται και ο θερμικός βαθμός απόδοσης που για μικρούς σχετικά κινητήρες ποικίλει από 15% έως και 30%.

Τέλος για εφαρμογές micro-CHP (combined heat and power), δηλαδή για συνδυασμένη απόδοση θερμότητας και ισχύος σε σχετικά μικρού μεγέθους εφαρμογές, αναδεικνύεται η υπεροχή του Stirling. Επίσης επιλέγεται και για άλλες εφαρμογές, όπως για την άντληση υδάτων, την αστροναυσιπλοία καθώς και για τη μετατροπή ενέργειας από πηγές ενέργειας οι οποίες βρίσκονται σε πλεόνασμα και δεν είναι συμβατές για χρήση σε μια Μ.Ε.Κ. όπως για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα τα αγροτικά απόβλητα και τα απορρίμματα

3.5 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING, ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Οι κινητήρες Stirling έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με απευθείας σύνδεσή τους σε μια οποιαδήποτε διαθέσιμη πηγή θερμότητας. Σε αυτές τις πηγές συμπεριλαμβάνονται, η ηλιακή, η γεωθερμική, η βιοχημική, η πυρηνική ενέργεια καθώς και ανεπιθύμητη θερμότητα που αποβάλλεται από βιομηχανικές εφαρμογές όπως επίσης και από μηχανές εσωτερικής καύσης μέσω εκμετάλλευσης της θερμότητας των καυσαερίων. Μια συνεχούς καύσης διαδικασία θα μπορούσε να παράσχει την απαιτούμενη θερμότητα, κι έτσι οι εκπομπές οι οποίες σχετίζονται με τη διακοπτόμενη λειτουργία μιας παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης θα μπορούσαν να μειωθούν.
2. Οι περισσότεροι τύποι Stirling έχουν τα έδρανα κύλισης και τα σφραγίσματα στεγανότητας τοποθετημένα στο ψυχρό μέρος του κινητήρα και έτσι απαιτούν λιγότερη λίπανση αποδίδοντας περισσότερες ώρες καλής λειτουργίας από άλλους παλινδρομικούς κινητήρες.
3. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται στο σύνολο της κατασκευής είναι κατά κάποιον τρόπο απλούστεροι από πολλούς παλινδρομικούς κινητήρες. Δεν είναι απαραίτητη η χρήση βαλβίδων οποιουδήποτε τύπου και το σύστημα παροχής θερμότητας είναι σχετικά απλό. Ορισμένες εφαρμογές Stirling μπορούν να κατασκευαστούν ακόμα και με υλικά που βρίσκονται σε ένα τυπικό νοικοκυριό.

4. Στον κινητήρα Stirling χρησιμοποιείται εργαζόμενη ουσία μίας φάσεως, κάτι το οποίο καθιστά το μέγεθος της εσωτερικής πίεσης κοντά στο επιτρεπόμενο όριο κατασκευής κι έτσι σε ένα σωστά σχεδιασμένο κινητήρα η πιθανότητα έκρηξης αποτελεί ένα σχετικά απίθανο ενδεχόμενο. Εν αντιθέσει στις ατμομηχανές οι οποίες χρησιμοποιούν εργαζόμενη ουσία δύο φάσεων (αέρια/υγρή), μια εσφαλμένα ρυθμισμένη βαλβίδα εκτόνωσης μπορεί να προκαλέσει έκρηξη.
5. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χαμηλές τιμές πιέσεων λειτουργίας δίνουν τη δυνατότητα χρήσης κυλίνδρων με μικρό βάρος.
6. Μπορούν να κατασκευαστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί αθόρυβη λειτουργία, χωρίς να χρειάζεται κατά οποιονδήποτε τρόπο παροχή αέρα όπως για παράδειγμα σε χρήση αερανεξάρτητης πρόωσης σε υποβρύχιες χρήσεις.
7. Εκκινούν τη λειτουργία τους εύκολα (αργά στην αρχή και μετά από προθέρμανση) και είναι πιο αποδοτικοί σε κρύο καιρό εν αντιθέσει με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης οι οποίοι εκκινούν εύκολα σε ζεστό σχετικά καιρό αλλά όχι το ίδιο εύκολα και σε κρύο.
8. Ένας κινητήρας Stirling ο οποίος χρησιμοποιείται για την άντληση υδάτων μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε το νερό να ψύχει το θάλαμο συμπίεσης κάτι το οποίο καθίσταται εφικτό όταν αντλείται σχετικά κρύο νερό.
9. Είναι αρκετά ευέλικτοι στη χρήση τους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνδυασμένη παραγωγή (CHP applications) θερμότητας και ισχύος τον χειμώνα καθώς και για ψύξη τους καλοκαιρινούς μήνες.
10. Η θερμότητα που αποβάλλεται από μια τέτοια διάταξη καθίσταται εκμεταλλεύσιμη μέσω του αναγεννητή, σε αντίθεση με τις M.E.K. αναδεικνύοντας τον κινητήρα Stirling ως την ιδανική λύση για εφαρμογές διπλής απόδοσης, θερμότητας και ισχύος

3.6 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ STIRLING

Ζητήματα μεγέθους και κόστους

1. Ο κινητήρας Stirling απαιτεί στη διάταξή του την ύπαρξη εναλλακτών θερμότητας τόσο για την προσδιδόμενη όσο και για την αποβαλλόμενη θερμότητα και αυτοί πρέπει να διατηρούν την πίεση της εργαζόμενης ουσίας σε συγκεκριμένα επίπεδα μιας και η πίεση σε αυτή τη διάταξη είναι ανάλογη της αποδιδόμενης ισχύος. Επιπλέον ο εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος βρίσκεται στην πλευρά όπου πραγματοποιείται η εκτόνωση, συχνά λειτουργεί υπό πολύ υψηλά μεγέθη θερμοκρασιών, κι έτσι τα υλικά κατασκευής του θα πρέπει να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά την πιθανή μετάβαση των μετάλλων σε μια θερμοδυναμικά πιο σταθερή κατάσταση που κοινώς ονομάζουμε οξείδωση καθώς και τα φαινόμενα ερπυσμού (παραμόρφωση) που παρουσιάζονται. Στην πράξη λοιπόν όσο πιο απαιτητική είναι η κατασκευή στην ποιότητα και στις αντοχές των υλικών, αυξάνεται αναλόγως το κόστος της. Τα υλικά και η συναρμολόγηση για έναν εναλλάκτη θερμότητας υψηλών θερμοκρασιών καταλαμβάνει περίπου το 40% του συνολικού κόστους κατασκευής του κινητήρα.
2. Όλοι οι θερμοδυναμικοί κύκλοι απαιτούν την ύπαρξη μεγάλων διαφορών θερμοκρασιών για την επίτευξη αποδοτικής λειτουργίας. Σε μια μηχανή εξωτερικής καύσης η θερμοκρασία του θερμαντήρα πάντα ισούται ή υπερέχει της θερμοκρασίας εκτόνωσης. Αυτό σημαίνει ότι μεταλλουργικά οι απαιτήσεις του θερμαντήρα είναι πολύ υψηλές, κάτι το οποίο συναντάται επίσης στους συμπιεστές (τουρμπίνες) αερίων. Εν αντιθέσει στους κινητήρες Otto ή Diesel στους οποίους η θερμοκρασία στην εκτόνωση ξεπερνά κατά πολύ τα μεταλλουργικά

όρια των υλικών κατασκευής του κινητήρα διότι η θερμότητα εισόδου δεν μεταδίδεται διαμέσου του κινητήρα, έτσι τα υλικά κατασκευής βρίσκονται πιο κοντά στη μέση θερμοκρασία λειτουργίας της ουσίας κι έτσι οι απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν είναι μικρότερης κλίμακας από αυτές ενός κινητήρα Stirling.

3. Η διασπορά της αποβαλλόμενης θερμότητας είναι ένα εξαιρετικά περίπλοκο ζήτημα μιας και η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου κρατείται όσο το δυνατόν χαμηλότερα ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου των μηχανισμών αποβολής θερμότητας καθιστώντας δύσκολη την τοποθέτηση του κινητήρα σε εφαρμογές όπου οι μικρές διαστάσεις είναι προαπαιτούμενο χαρακτηριστικό του κινητήρα.
4. Ο συνολικός όγκος τέτοιων κινητήρων καθώς και το κόστος των υλικών κατασκευής αποτελούν τους δύο κυριότερους λόγους οι οποίοι απέτρεψαν τις αυτοκινητοβιομηχανίες από την υιοθέτηση του κινητήρα Stirling για χρήση στην αυτοκίνηση ως πρωτεύουσα κινητήρια δύναμη.

Ζητήματα ισχύος και ροπής

1. Οι κινητήρες Stirling, ειδικά αυτοί που λειτουργούν με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές έχουν σχετικά μεγάλες διαστάσεις για το μέγεθος της ισχύος την οποία αποδίδουν (μικρή σχετική ισχύς). Αυτό συμβαίνει κυρίως εξαιτίας του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας των αερίων ο οποίος περιορίζει τη ροή μεταφοράς θερμότητας ο οποίος μπορεί να αξιοποιηθεί από ένα "ψυχρό" εναλλάκτη θερμότητας της τάξεως των 500 W/m²K και από ένα θερμό εναλλάκτη της τάξεως των 500-5000 W/m²K. Εν συγκρίσει με τις μηχανές εσωτερικής καύσης το εν λόγω ζήτημα αποτελεί μια πρόκληση για τον εκάστοτε σχεδιαστή του κινητήρα ο οποίος καλείται να τον σχεδιάσει έτσι ώστε να μπορεί να μεταφέρει ποσά θερμότητας εντός της εργαζόμενης ουσίας και άλλοτε να μπορεί να αντλεί ποσά θερμότητας από αυτήν. Λόγω της μειωμένης θερμικής απόδοσης η απαιτούμενη ροή μεταφερόμενης θερμότητας αυξάνεται για μικρά διαφορικά θερμοκρασιών, έτσι και η επιφάνεια του εναλλάκτη θερμότητας (επομένως και το κόστος κατασκευής) ανά αποδιδόμενο kW αυξάνει με τη δεύτερη δύναμη του $1/\Delta T$. Συμπερασματικά καταλήγουμε ότι το σχετικό κόστος κινητήρων Stirling οι οποίοι εργάζονται σε μικρά θερμοκρασιακά διαφορικά είναι πολύ μεγάλο. Αυξάνοντας τη διαφορά θερμοκρασίας και/ή την πίεση ο κινητήρας ωθείται στην απόδοση περισσότερης ισχύος με την προϋπόθεση ότι οι εναλλάκτες θερμότητας είναι σχεδιασμένοι για να διαχειρίζονται τόσο μεγάλα ποσά θερμότητας και να προσδίδουν τη απαραίτητη μεταφερόμενη θερμική ροή.
2. Ένας κινητήρας Stirling δεν είναι δυνατόν να εκκινήσει ακαριαία, είναι απαραίτητο κυριολεκτικά να ζεσταθεί. Αυτό ισχύει για όλες τις μηχανές εσωτερικής καύσης αλλά

ίσως ο Stirling να χρειάζεται λίγο παραπάνω χρόνο για να ζεσταθεί σε σχέση με άλλους κινητήρες όμοιου τύπου όπως για παράδειγμα τις ατμομηχανές. Οι κινητήρες Stirling λειτουργούν καλύτερα όταν χρησιμοποιούνται ως μηχανές με σταθερή ταχύτητα λειτουργίας. Η ισχύς εξόδου ενός τέτοιου κινητήρα τείνει να παραμένει σταθερή κατά τη λειτουργία και για να γίνει αυτή η ρύθμιση κάποιες φορές απαιτείται σχεδιασμός ακριβείας καθώς και χρήση ορισμένων επιπλέον μηχανισμών. Συνήθως οι αλλαγές της απόδοσης επιτυγχάνονται μεταβάλλοντας τη διαδρομή των εμβόλων ή μεταβάλλοντας την ποσότητα της μάζας της εργαζόμενης ουσίας.

Ζητήματα εργαζόμενης ουσίας-αερίου

Το αέριο που χρησιμοποιείται πρέπει να έχει μικρή θερμοχωρητικότητα ώστε δεδομένου ενός ποσού μεταφερόμενης θερμότητας να επιτυγχάνεται μεγάλη αύξηση της πίεσης. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτό το ζήτημα το Ήλιο είναι η ιδανική επιλογή για εργαζόμενη ουσία λόγω της πολύ μικρής θερμοχωρητικότητας που το διακατέχει. Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι μια βιώσιμη λύση για επιλογή ως εργαζόμενη ουσία αλλά το οξυγόνο σε μια μηχανή αέρος υψηλών πιέσεων επιφέρει κινδύνους εκρήξεων των λιπαντικών ουσιών.

Αποζητώντας την εξασφάλιση της αποφυγής τέτοιων κινδύνων η Philips εισήγαγε τη χρήση άλλων αερίων ως εργαζόμενων ουσιών. Το χαμηλό ιξώδες και η υψηλή θερμική αγωγιμότητα καθιστούν το Υδρογόνο ως το ιδανικό αέριο για τη συγκεκριμένη χρήση κυρίως γιατί ο κινητήρας λειτουργεί πιο γρήγορα σε σχέση με τη χρήση άλλων αερίων ουσιών.

Παρόλα ταύτα λόγω της απορρόφησης του υδρογόνου και δεδομένου του μεγάλου βαθμού διάχυσής του σε σχέση με το μικρό μοριακό βάρος του, όταν αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες το υδρογόνο διαρρέει το στερεό μέταλλο των τοιχωμάτων που το περικλείουν. Η διάχυση μέσω του ανθρακούχου χάλυβα είναι πολύ υψηλή για να αποτελέσει πρακτική λύση, ενώ οριακά χαμηλή είναι σε μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο ανοξείδωτος χάλυβας. Επίσης συγκεκριμένα κεραμικά υλικά μπορούν να μειώσουν τη διάχυση.

Τα σφραγίσματα των ερμητικά κλειστών θαλάμων θα πρέπει να είναι ικανά να διατηρούν την πίεση σε συγκεκριμένα επίπεδα δίχως η επαναπλήρωση χαμένης εργαζόμενης ουσίας να είναι απαραίτητη. Για μηχανές υπό μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των δύο κυλίνδρων (ΔT) ίσως ορισμένοι επιπλέον μηχανισμοί να είναι απαραίτητοι για να διατηρηθούν τα υψηλά επίπεδα πιέσεων της εργαζόμενης ουσίας. Τέτοιου είδους μηχανισμοί είναι ένα αποθεματικό δοχείο αερίου ή μια γεννήτρια πλήρωσης αερίου.

Το υδρογόνο παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού συνήθως. Το υδρογόνο όμως δύναται να προκαλέσει την ψαθυροποίηση των μετάλλων. Επίσης το υδρογόνο είναι εύφλεκτο αέριο και αυτό ελοχεύει κινδύνους σε περίπτωση διαφυγής του από τη μηχανική διάταξη που το εγκλωβίζει. Σε παραδείγματα τεχνολογικά εξελιγμένων κινητήρων Stirling συνήθως συναντάται το Ήλιο ως εργαζόμενη ουσία γιατί αποδίδει πολύ κοντά στο υδρογόνο επηρεάζοντας σημαντικά λιγότερο τα μέταλλα τη κατασκευής. Το Ήλιο είναι αδρανές, εξαλείφοντας έτσι την πιθανότητα ανάφλεξης. Είναι όμως σχετικά ακριβό και θα πρέπει να προμηθεύεται σε δοχεία υπό πίεση.

Τέλος ο ερευνητής **Allan Organ** απέδειξε ότι ένας καλοσχεδιασμένος και ρυθμισμένος σωστά κινητήρας Stirling με εργαζόμενη ουσία ατμοσφαιρικό αέρα είναι θεωρητικά εξίσου αποδοτικός όσο κι ένας κινητήρας που χρησιμοποιεί υδρογόνο ή ήλιο αλλά οι κινητήρες υδρογόνου και ηλίου θα έχουν κατά πολλές φορές μεγαλύτερη απόδοση ανά μονάδα όγκου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο



Ανάλυση εφαρμογών

4.1 Εισαγωγή

Η θεωρία **Schmidt** είναι μια μέθοδος ισόθερμων υπολογισμών. Αποτελεί μια απλή μέθοδο καθώς και την πιο χρήσιμη τόσο για την μελέτη όσο και για την εξέλιξη κινητήρων Stirling. Η θεωρία αυτή βασίζεται στη μελέτη της ισόθερμης εκτόνωσης και συμπίεσης ενός ιδανικού αερίου

Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη μέσω της εν λόγω θεωρίας πρέπει να τηρούνται ορισμένες προϋποθέσεις όσον αφορά τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη διάταξη του κινητήρα που εξετάζεται. Η απόδοσή του μπορεί να υπολογιστεί από ένα διάγραμμα P-V. Ο όγκος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας εσωτερική γεωμετρία. Όταν επιλεγθεί ο όγκος, η μάζα της εργαζόμενης ουσίας και η θερμοκρασία, τότε η πίεση υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων $PV=mRT$.

Εν τέλει οι κινητήρες Stirling διαχωρίζονται σε κινητήρες τριών τύπων, Α(alpha), Β(beta), Γ(gamma) και αναλύονται οι ιδιαιτερότητες του καθενός παρακάτω.

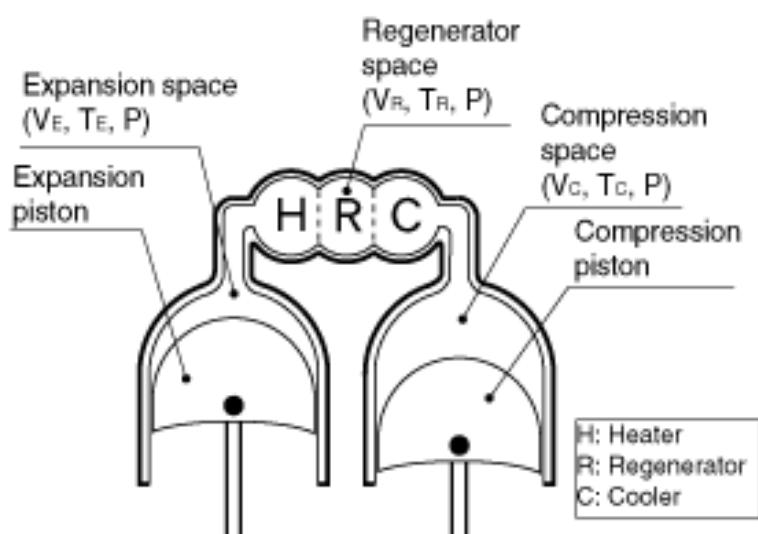
Η πίεση υπολογίζεται βάσει των παρακάτω προϋποθέσεων:

1. Δεν υπάρχει απώλεια πίεσης στους εναλλάκτες θερμότητας και επίσης δεν υπάρχουν εσωτερικές διαφορές πίεσης.
2. Η εκτόνωση και η συμπίεση είναι διεργασίες οι οποίες πραγματοποιούνται ισόθερμα.
3. Οι καταστάσεις της εργαζόμενης ουσίας λαμβάνονται υπ' όψιν ως καταστάσεις ενός ιδανικού αερίου.
4. Δημιουργείται ιδανική θερμική αναγέννηση.
5. Ο ουδέτερος χώρος κυλίνδρου εκτόνωσης διατηρεί τη θερμοκρασία του αερίου T_E και ο ουδέτερος χώρος κυλίνδρου συμπίεσης διατηρεί τη θερμοκρασία του αερίου T_C κατά τη διάρκεια του θεμοδυναμικού κύκλου.
6. Η θερμοκρασία του αερίου στο θερμικό αναγεννητή αποτελεί το μέσο όρο των θερμοκρασιών εκτόνωσης και συμπίεσης. (T_E, T_C)
7. Ο όγκος εκτόνωσης και ο όγκος συμπίεσης εναλλάσσονται ακολουθώντας μια ημιτονοειδή καμπύλη.

Όνομασία	Σύμβολο	Μονάδα Μέτρησης
Πίεση κινητήρα	P	Pa
Όγκος εμβόλου εκτόνωσης	V _{SE}	m ³
Όγκος εμβόλου συμπίεσης	V _{SC}	m ³
Ουδέτερος όγκος εκτόνωσης	V _{DE}	m ³
Όγκος αναγεννητή	V _R	m ³
Ουδέτερος όγκος συμπίεσης	V _{DC}	m ³
Στιγμαίος όγκος εκτόνωσης	V _E	m ³
Στιγμαίος όγκος συμπίεσης	V _C	m ³
Συνολικός στιγμιαίος όγκος	V	m ³
Συνολική μάζα εργαζόμενης ουσίας	m	Kg
Σταθερά αερίων	R	J/kgK
Θερμοκρασία αερίου θαλάμου εκτόνωσης	T _E	K
Θερμοκρασία αερίου θαλάμου συμπίεσης	T _C	K
Θερμοκρασία αερίου στον αναγεννητή	T _R	K
Γωνία φάσης	dx	Deg
Λόγος θερμοκρασιών	t	
Λόγος όγκων εμβόλων	v	
Λόγος νεκρών όγκων	X	
Ταχύτητα κινητήρα	n	Hz
Ενδεικνύμενο έργο εκτόνωσης	W _E	J
Ενδεικνύμενο έργο συμπίεσης	W _C	J
Ενδεικνύμενο έργο	W _i	J
Ενδεικνύμενη ισχύς εκτόνωσης	L _E	W
Ενδεικνύμενη ισχύς συμπίεσης	L _C	W
Ενδεικνύμενη ισχύς	L _i	W
Ενδεικνύμενη απόδοση	e	

4.2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING ΤΥΠΟΣ Α (ALPHA TYPE)

Το παρακάτω σχήμα περιγράφει το μοντέλο των υπολογισμών ενός κινητήρα Stirling τύπου Α.



Ωρολογιακά:

Έμβολο εκτόνωσης
Χώρος εκτόνωσης
Χώρος θερμικού αναγεννητή
Χώρος συμπίεσης
Έμβολο συμπίεσης
Θερμαντήρας, Αναγεννητής, Ψύκτης

Ο κινητήρας Stirling τύπου A αξιοποιεί δύο δυναμικά έμβολα σε ξεχωριστούς κύλινδρους, σε έναν θερμό και ένα ψυχρό. Ο θερμός κύλινδρος βρίσκεται εντός του εναλλάκτη υψηλής θερμοκρασίας ενώ ο ψυχρός εντός του εναλλάκτη χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτός ο τύπος κινητήρα έχει υψηλό λόγο ισχύος ανά όγκο αλλά αντιμετωπίζει τεχνικά προβλήματα κυρίως λόγω εμφάνισης υψηλότερων των αποδεκτών θερμοκρασιών στο θερμό κύλινδρο αλλά και στις αντοχές του όσον αφορά τη στεγανότητα.

Παρακάτω προσδιορίζεται ο όγκος των κυλίνδρων εκτόνωσης και συμπίεσης σε μια δεδομένη γωνία στροφάλου. Η στιγμιαία τιμή του όγκου περιγράφεται από τη στιγμιαία τιμή της γωνίας στροφάλου x . Αυτή η γωνία έχει τιμή $x=0$ όταν το έμβολο εκτόνωσης βρίσκεται στο πιο υψηλό σημείο. (άνω νεκρό σημείο) Η στιγμιαία τιμή του όγκου εκτόνωσης V_E περιγράφεται στην εξίσωση 2 μέσω του όγκου του εμβόλου εκτόνωσης V_{SE} , του ουδέτερου όγκου εκτόνωσης V_{DE} υπό των προϋποθέσεων που ορίστηκαν.

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE} \quad (2)$$

Ο στιγμιαίος όγκος συμπίεσης V_C βρίσκεται στην εξίσωση (3) μέσω του όγκου του εμβόλου συμπίεσης V_{SC} , του ουδέτερου όγκου συμπίεσης V_{DC} και της γωνίας dx .

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2}\{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC} \quad (3)$$

Ο συνολικός στιγμιαίος όγκος υπολογίζεται από την εξίσωση (4)

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (4)$$

Από τις προϋποθέσεις 1,2,3: Η συνολική μάζα αερίου εντός του κινητήρα m υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την πίεση P , την εκάστοτε θερμοκρασία T , τον εκάστοτε όγκο V και τη σταθερά του αερίου R

$$m = \frac{PV_E}{RT_E} + \frac{PV_R}{RT_R} + \frac{PV_C}{RT_C} \quad (5)$$

Ο λόγος των θερμοκρασιών t , ο λόγος των όγκων εμφόλων v και άλλοι λόγοι νεκρών όγκων υπολογίζονται μέσω των παρακάτω εξισώσεων

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (6)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (7)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (8)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (9)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (10)$$

Η θερμοκρασία του θερμικού αναγεννητή T_R υπολογίζεται από την εξίσωση (11) μέσω της προϋπόθεσης δ

$$T_R = \frac{T_E + T_C}{2} \quad (11)$$

Αν η εξίσωση (5) μετασχηματιστεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (6) και (10) αρχικά και έπειτα (2) και (3) η μάζα του αερίου m περιγράφεται από την επόμενη εξίσωση

$$m = \frac{PV_{SE}}{2RT_C} \{S - B \cos(x - a)\} \quad (13)$$

Όπου,

$$a = \tan^{-1} \frac{v \cdot \sin dx}{t + \cos dx} \quad (14)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} \quad (15)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2tv \cos dx + v^2} \quad (16)$$

Η πίεση του κινητήρα P υπολογίζεται από την επόμενη εξίσωση χρησιμοποιώντας την εξίσωση (13)

$$P = \frac{2mRT_c}{V_{SE} \{S - B \cos(\theta - a)\}} \quad (17)$$

Η μέση πίεση P_{mean} υπολογίζεται ως

$$P_{mean} = \frac{1}{2\pi} \int P dx = \frac{2mRT_c}{V_{SE} \sqrt{S^2 - B^2}} \quad (18)$$

Το c υπολογίζεται από την εξίσωση (19)

$$c = \frac{B}{S} \quad (19)$$

Ως αποτέλεσμα η πίεση του κινητήρα υπολογίζεται από την εξίσωση (20) βάσει της μέσης πίεσης P_{mean}

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{S^2 - B^2}}{S - B \cos(x - a)} = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (20)$$

Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση της εξίσωσης (17) όταν το $\cos(x-a) = -1$, η πίεση του κινητήρα P λαμβάνει την ελάχιστη τιμή και έτσι προκύπτει η παρακάτω εξίσωση

$$P_{\min} = \frac{2mRT_c}{V_{SE}(S+B)} \quad (21)$$

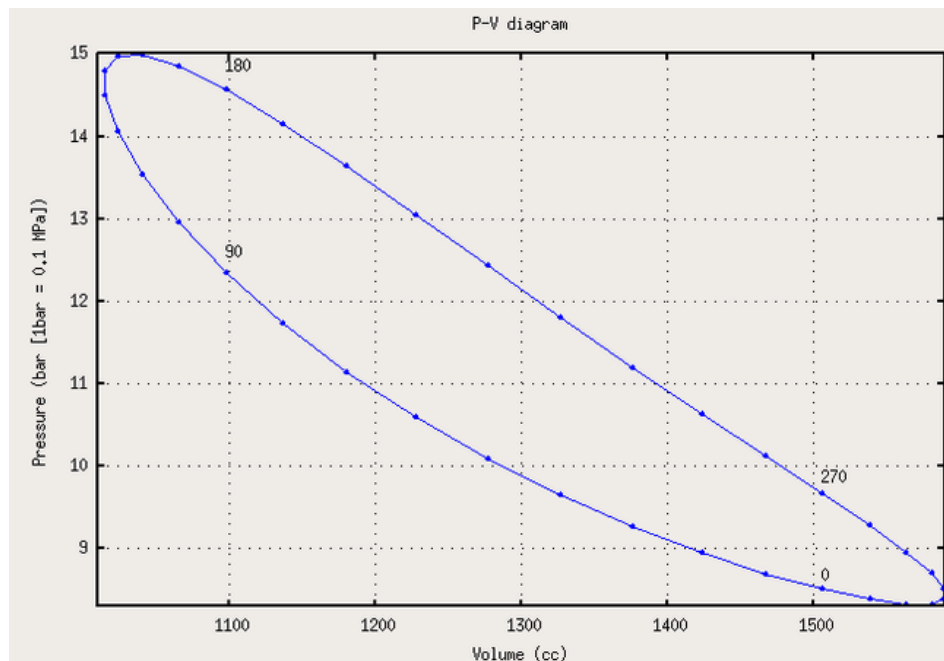
Οπότε η πίεση του κινητήρα βάσει της ελάχιστης πίεσης P_{\min} περιγράφεται από την εξίσωση (22)

$$P = \frac{P_{\min}(S+B)}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{\min}(1+c)}{1-c\cos(x-a)} \quad (22)$$

Παρομοίως όταν $\cos(x-a)=1$ η πίεση του κινητήρα P λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της πίεσης P_{\max} , οπότε η παρακάτω εξίσωση προκύπτει

$$P = \frac{P_{\max}(S-B)}{S-B\cos(x-a)} = \frac{P_{\max}(1-c)}{1-c\cos(x-a)} \quad (23)$$

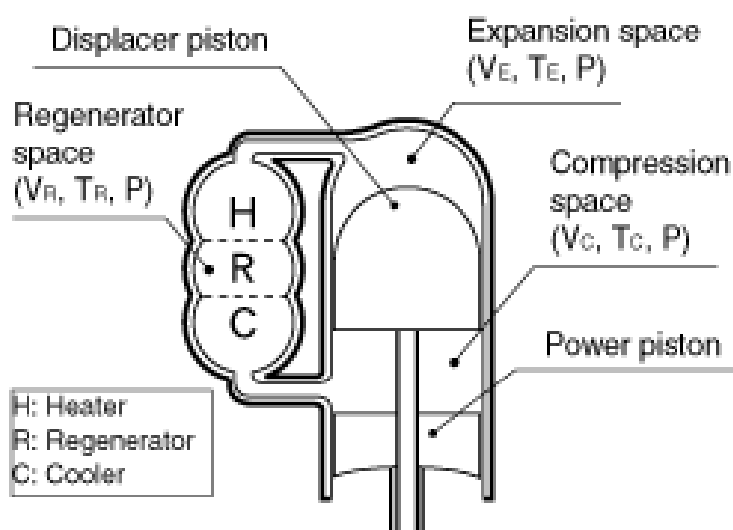
Το διάγραμμα P-V του κινητήρα Stirling Τύπου A μπορεί πλέον να σχεδιαστεί



Πηγή: Dr. Koichi Hirata, *Schmidt Theory for Stirling engines* (1997)

4.3 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING ΤΥΠΟΥ Β (BETA TYPE)

Παρομοίως καθορίζονται οι εξισώσεις για τον κινητήρα Stirling Β Τύπου. Το σχήμα παρακάτω περιγράφει συνοπτικά το υπολογιστικό μοντέλο του κινητήρα.



Ωρολογιακά:

Θερμαντήρας, αναγεννητής, ψύκτης

Χώρος θερμικού αναγεννητή

Έμβολο μετατόπισης

Χώρος εκτόνωσης

Χώρος συμπίεσης

Δυναμικό έμβολο

Ο κινητήρας Stirling τύπου B εμπεριέχει το δυναμικό έμβολο αλλά και το έμβολο μετατόπισης τοποθετημένα εντός του ίδιου κυλίνδρου και με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται ορισμένα τεχνικά προβλήματα που παρουσιάζονται στον κινητήρα τύπου A, όπως η αντοχή σε στεγανότητα.

Παρακάτω ο στιγμιαίος όγκος εκτόνωσης V_E και ο στιγμιαίος όγκος συμπίεσης V_C περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις μέσω του όγκου εμβόλου μετατόπισης V_{SE} , του όγκου του εμβόλου έργου V_{SC} και της γωνίας φάσης dx μεταξύ του δρομέα-εμβόλου και του δυναμικού εμβόλου.

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE} \quad (24)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2}\{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC} - V_B \quad (25)$$

Στην περίπτωση του κινητήρα Stirling τύπου B ο δρομέας και το έμβολο έργου είναι τοποθετημένα στον ίδιο κύλινδρο. Όταν και τα δύο έμβολα επικαλύπτουν τη διαδρομή τους ένας δραστικός χώρος δημιουργείται. Ο όγκος επικάλυψης V_B μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης (25) από την παρακάτω εξίσωση

$$V_B = \frac{V_{SE} + V_{SC}}{2} - \sqrt{\frac{V_{SE}^2 + V_{SC}^2}{4} - \frac{V_{SE}V_{SC}}{2} \cos dx} \quad (26)$$

Έπειτα ο συνολικός στιγμιαίος όγκος V προσδιορίζεται στην εξίσωση

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (27)$$

Η πίεση του κινητήρα P υπολογίζεται βάσει της μέσης πίεσης P_{mean} , της ελάχιστης πίεσης P_{min} και της μέγιστης πίεσης P_{max} όπως και στην περίπτωση του κινητήρα Stirling τύπου A.

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{max} (1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (28)$$

Διάφοροι λόγοι και συντελεστές παρατίθενται εν συνεχεία

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (29)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (30)$$

$$X_B = \frac{V_B}{V_{SE}} \quad (31)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (32)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (33)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (34)$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad (35)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 - 2X_B \quad (36)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (37)$$

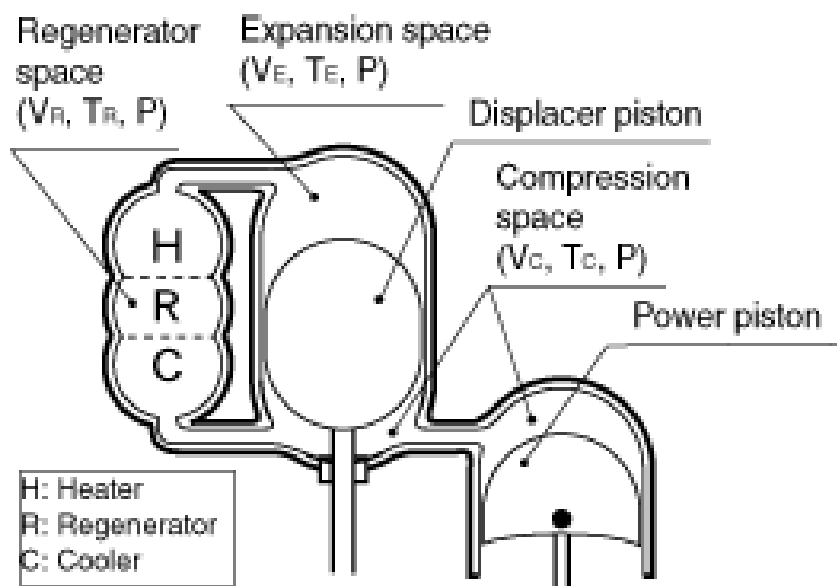
$$c = \frac{B}{S} \quad (38)$$

Το διάγραμμα P-V του κινητήρα Stirling B τύπου μπορεί πλέον να σχεδιαστεί με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων.

Πηγή: Dr. Koichi Hirata, *Schmidt Theory for Stirling engines* (1997)

4.4 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ STIRLING ΤΥΠΟΥ Γ (GAMMA TYPE)

Το σχήμα 3 παραθέτει το υπολογιστικό μοντέλο ενός κινητήρα Stirling τύπου Γ



Ωρολογιακά:

Ψύκτης, Θερμικός Αναγεννητής, Θερμαντήρας

Χώρος θερμικού αναγεννητή

Χώρος εκτόνωσης

Έμβολο μετατόπισης

Χώρος συμπίεσης

Έμβολο έργου

Ο κινητήρας Stirling τύπου Γ είναι ουσιαστικά ένας κινητήρας τύπου Β του οποίου το δυναμικό έμβολο βρίσκεται σε ξεχωριστό κύλινδρο δίπλα από το έμβολο μετατόπισης αλλά και τα δύο έμβολα είναι συνδεδεμένα στον ίδιο σφόνδυλο. Αυτή η μετατροπή αποδίδει μικρότερο λόγο συμπίεσης αλλά είναι μηχανικά απλούστερη και συνήθως λαμβάνει χώρα σε εφαρμογές Stirling με πολλούς κύλινδρους.

Παρόμοιοι υπολογισμοί με τους κινητήρες τύπου Α και Β λαμβάνουν χώρα. Ο στιγμιαίος όγκος εκτόνωσης V_E και ο στιγμιαίος όγκος συμπίεσης V_C περιγράφονται από τις παρακάτω εξισώσεις μέσω του όγκου του δρομέα εμβόλου V_{SE} , του όγκου δυναμικού εμβόλου V_{SC} και της γωνίας φάσης μεταξύ δρομέα-εμβόλου και δυναμικού εμβόλου

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + V_{DE} \quad (39)$$

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1 - \cos x) + \frac{V_{SC}}{2}\{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC} \quad (40)$$

Ο συνολικός στιγμιαίος όγκος V προσδιορίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$V = V_E + V_R + V_C \quad (41)$$

Η πίεση του κινητήρα P βάσει της μέσης πίεσης P_{mean} , της ελάχιστης πίεσης P_{min} και της μέγιστης πίεσης P_{max} υπολογίζεται στην επόμενη εξίσωση

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{max} (1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (42)?$$

Επιπλέον υπολογίζονται τα εξής

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (43)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (44)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (45)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (46)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (47)$$

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad (48)$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tV_R}{1+t} + v + 2X_{DC} + 1 \quad (49)$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t-1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad (50)$$

$$c = \frac{B}{S} \quad (51)$$

Το διάγραμμα P-V ενός κινητήρα Stirling τύπου Γ μπορεί πλέον να σχεδιαστεί με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω εξισώσεων

Πηγή: Dr. Koichi Hirata, *Schmidt Theory for Stirling engines* (1997)

4.5 ΕΝΔΕΙΚΝΥΜΕΝΟ ΕΡΓΟ, ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ

Το ενδεικνύμενο έργο (εμβαδό δυναμοδεικτικού διαγράμματος P-V) στο χώρο συμπίεσης και εκτόνωσης μπορούν να υπολογιστούν με αναλυτική επίλυση χρησιμοποιώντας τους παραπάνω συντελεστές. Το ενδεικνύμενο έργο στο χώρο εκτόνωσης ή αλλιώς ενδεικνύμενη ενέργεια W_E (J) υπολογίζεται με βάση τη μέση πίεση P_{mean} , την ελάχιστη πίεση P_{min} και τη μέγιστη πίεση P_{max} και περιγράφεται από την παρακάτω παράσταση

$$W_E = \int P dV_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = \frac{P_{max} V_{SE} \pi c \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (52)$$

Το ενδεικνύμενο έργο συμπίεσης περιγράφεται από την επόμενη εξίσωση

$$W_c = \int P dV_c = - \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c t \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = - \frac{P_{min} V_{SE} \pi c t \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = - \frac{P_{max} V_{SE} \pi c t \cdot \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (53)$$

Το ενδεικνύμενο έργο ανά κύκλο λειτουργίας του κινητήρα δίδεται παρακάτω W_i

$$= \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c (1 - t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1 - t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} = \frac{P_{max} V_{SE} \pi c (1 - t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \quad (54)$$

Οι σχέσεις μεταξύ P_{mean} , P_{min} και P_{max} είναι:

$$\frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{mean}}} = \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \quad (55)$$

$$\frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{mean}}} = \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \quad (56)$$

Η ενδεικνύμενη ισχύς εκτόνωσης $L_E(W)$, η ενδεικνύμενη ισχύς συμπίεσης $L_C(W)$ και η ενδεικνύμενη ισχύς του κινητήρα $L_i(W)$ δίδονται παρακάτω χρησιμοποιώντας τις στροφές του κινητήρα ανά δευτερόλεπτο $n(\text{rps}, \text{Hz})$.

$$L_E = W_E n \quad (57)$$

$$L_C = W_C n \quad (58)$$

$$L_i = W_i n \quad (59)$$

Το ενδεικνύμενο έργο εκτόνωσης W_E που συναντάται στην εξίσωση (52) αντιστοιχεί στη θερμότητα που υπεισέρχεται στον κινητήρα από την πηγή θερμότητας. Το ενδεικνύμενο έργο συμπίεσης W_C το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση (53) αντιστοιχεί στην αποβαλλόμενη θερμότητα του κινητήρα από το ψυκτικό μέσο. Η θερμική απόδοση του κινητήρα δίδεται από την επόμενη σχέση

$$e = \frac{W_i}{W_E} = 1 - t \quad (60)$$

Αυτή η απόδοση ισούται με την απόδοση μιας μηχανής Carnot η οποία είναι η υψηλότερη δυνατή απόδοση από οποιαδήποτε θερμική μηχανή.

4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Να σχεδιαστεί το διάγραμμα P-V και να υπολογιστεί η ενδεικνύμενη ισχύς ενός κινητήρα Stirling τύπου A σύμφωνα με τα παρακάτω δεδομένα:

Όγκος εμβόλου εκτόνωσης 0.628 cm^3

Όγκος εμβόλου συμπίεσης 0.628 cm^3

Ουδέτερος όγκος χώρου εκτόνωσης 0.2 cm^3

Ουδέτερος όγκος χώρου συμπίεσης 0.2 cm^3

Όγκος αναγεννητή 0.2 cm^3

Γωνία φάσης 90 deg

Μέση πίεση 101.3 kPa

Θερμοκρασία αερίου κατά την εκτόνωση 400 degC

Θερμοκρασία αερίου κατά τη συμπίεση 30 degC

Ταχύτητα κινητήρα 2000 rpm

Επίλυση

Ο λόγος των θερμοκρασιών t , ο λόγος των όγκων εμβόλων και άλλοι λόγοι νεκρών όγκων υπολογίζονται από τις εξισώσεις (6)-(10)

$$t = \frac{30 + 273}{400 + 273} = 0.450$$

$$v = \frac{0.628 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 1.000$$

$$X_{DE} = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 0.318$$

$$X_{DC} = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 0.318$$

$$X_R = \frac{0.2 \times 10^{-6}}{0.628 \times 10^{-6}} = 0.318$$

Κάθε συντελεστής υπολογίζεται από τις εξισώσεις (14), (15), (16) και (19)

$$a = \tan^{-1} \frac{1 \times \sin 90^\circ}{0.45 + \cos 90^\circ} = 65.772^\circ$$

$$S = 0.45 + 2 \times 0.45 \times 0.318 + \frac{4 \times 0.45 \times 0.318}{1 + 0.450} + 1 + 2 \times 0.318 = 2.767$$

$$B = \sqrt{0.45^2 + 2 \times 0.45 \times \cos \frac{\pi}{2} + 1} = 1.097$$

$$c = \frac{1.097}{2.767} = 0.396$$

Η πίεση του κινητήρα υπολογίζεται από τη σχέση (20)

Για γωνία στροφάλου $\alpha=0\text{deg}$

$$P = \frac{101.3 \times 10^3 \sqrt{1 - 0.396^2}}{1 - 0.396 \cos(0 - 65.772)} = 101.988 \times 10^3 \text{ (Pa)} = 101.988 \text{ (kPa)}$$

Για γωνία στροφάλου $\alpha=10\text{deg}$

$$P = 109.893 \text{ (kPa)}$$

Για γωνία στροφάλου $\alpha=20\text{deg}$

$$P = 118.011 \text{ (kPa)}$$

Έπειτα κάθε στιγμιαίος όγκος καθορίζεται από τις εξισώσεις (2), (3) και (4)

Για γωνία στροφάλου $\alpha=0\text{deg}$

$$V_E = \frac{0.628 \times 10^{-6}}{2} (1 - \cos 0^\circ) + 0.2 = 0.200 \times 10^{-6} (\text{m}^3) = 0.200 (\text{cm}^3)$$

$$V_C = \frac{0.628 \times 10^{-6}}{2} \{1 - \cos(0^\circ - 90^\circ)\} + 0.2 = 0.514 \times 10^{-6} (\text{m}^3) = 0.514 (\text{cm}^3)$$

$$V = 0.2 + 0.2 + 0.514 = 0.914 (\text{cm}^3)$$

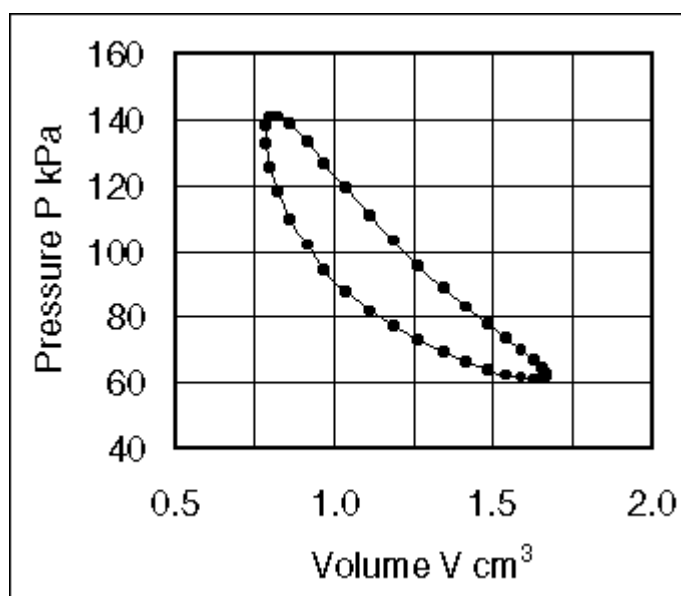
Για γωνία στροφάλου $\alpha=10\text{deg}$

$$V = 0.864 (\text{cm}^3)$$

Για γωνία στροφάλου $\alpha=20\text{deg}$

$$V = 0.826 (\text{cm}^3)$$

Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς για ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας το διάγραμμα P-V μπορεί να σχεδιαστεί όπως στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4

Το ενδεικνύμενο έργο δίδεται από τις εξισώσεις (52), (53) και (54)

$$W_E = \frac{101.3 \times 10^3 \times 0.628 \times 10^{-4} \times 3.14 \times 0.396 \times \sin 65.772^\circ}{1 + \sqrt{1 - 0.396^2}} = 3.760 \times 10^{-2} (\text{J})$$

$$W_C = -\frac{101.3 \times 10^3 \times 0.628 \times 10^{-4} \times 3.14 \times 0.396 \times 0.45 \times \sin 65.772^\circ}{1 + \sqrt{1 - 0.396^2}} = -1.692 \times 10^{-2} (\text{J})$$

$$W_i = 3.760 \times 10^{-2} - 1.692 \times 10^{-2} = 2.068 \times 10^{-2} (\text{J})$$

Η ενδεικνύμενη ισχύς του κινητήρα προσδιορίζεται από τη σχέση (59)

$$L_i = \frac{5.452 \times 10^{-2} \times 2000}{60} = 0.689 (\text{W})$$

Η ενδεικνύμενη ισχύς του κινητήρα είναι 0.689 W.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ



Ηλιακές Εφαρμογές

5.1 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΙΑΤΟΥ-ΚΙΝΗΤΗΡΑ STIRLING

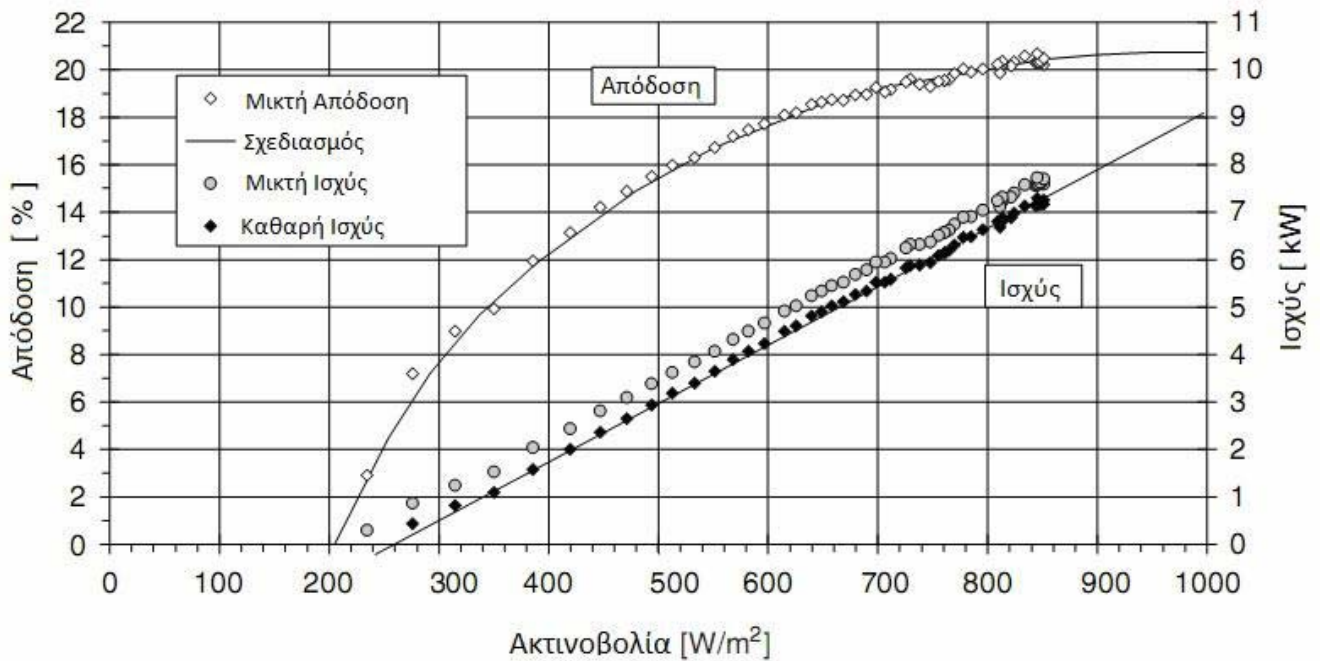
Οι ηλιακές εφαρμογές ηλιακού πιάτου σε συνδυασμό με διάταξη Stirling κερδίζουν έδαφος τα τελευταία έτη έναντι των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αλλά και επειδή οι εφαρμογές Stirling αποδίδουν συνδυασμένη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Ορισμένες από τις πιο εξελιγμένες εφαρμογές παρατίθενται εν συνεχεία αναλυτικά.

5.1.1 SBP

Η εταιρία “**Schalich, Bergemann und Partner, SBP**” κατέχει τα πρωτεία για την πιο δοκιμασμένη εφαρμογή ηλιακού πιάτου κατγράφοντας 50.000 ώρες λειτουργίας στην Αλμερία της Ισπανίας. Ο παραβολικός καθρέπτης της διάταξης αποτελείται από χαλύβδινη μεμβράνη πάχους 0,23mm και διαμέτρου 7m στην οποία έχουν τοποθετηθεί επιμέρους μικρότερες επιφάνειες καθρέπτη μικρού σχετικά πάχους.

Το παραβολικό σχήμα του κατόπτρου επιτυγχάνεται εναποθέτοντας προένταση στη χαλύβδινη μεμβράνη πέραν του ορίου ελαστικότητάς της με τη χρήση ύδατος στην εμπρόσθια επιφάνεια πρόσπτωσης και με την επιβολή συνθηκών κενού στην οπίσθια, δημιουργώντας ένα ενεργό σύστημα κενού.

Ο κινητήρας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην εν λόγω διάταξη είναι τύπου Stirling, φέρει την κωδική ονομασία “V-160” και κατασκευάζεται από τη γερμανική εταιρία “**Solo Kleinmotoren**”. Ο κινητήρας αυτός έχει κυβισμό 160 κυβικά εκατοστά η διάταξή του περιλαμβάνει δύο έμβολα και το εργαζόμενο μέσο είναι το Ήλιο κατγράφοντας θερμικό βαθμό απόδοσης 30% ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης ολόκληρης της εφαρμογής είναι καταγεγραμμένος σε ποσοστό 20.9% όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.

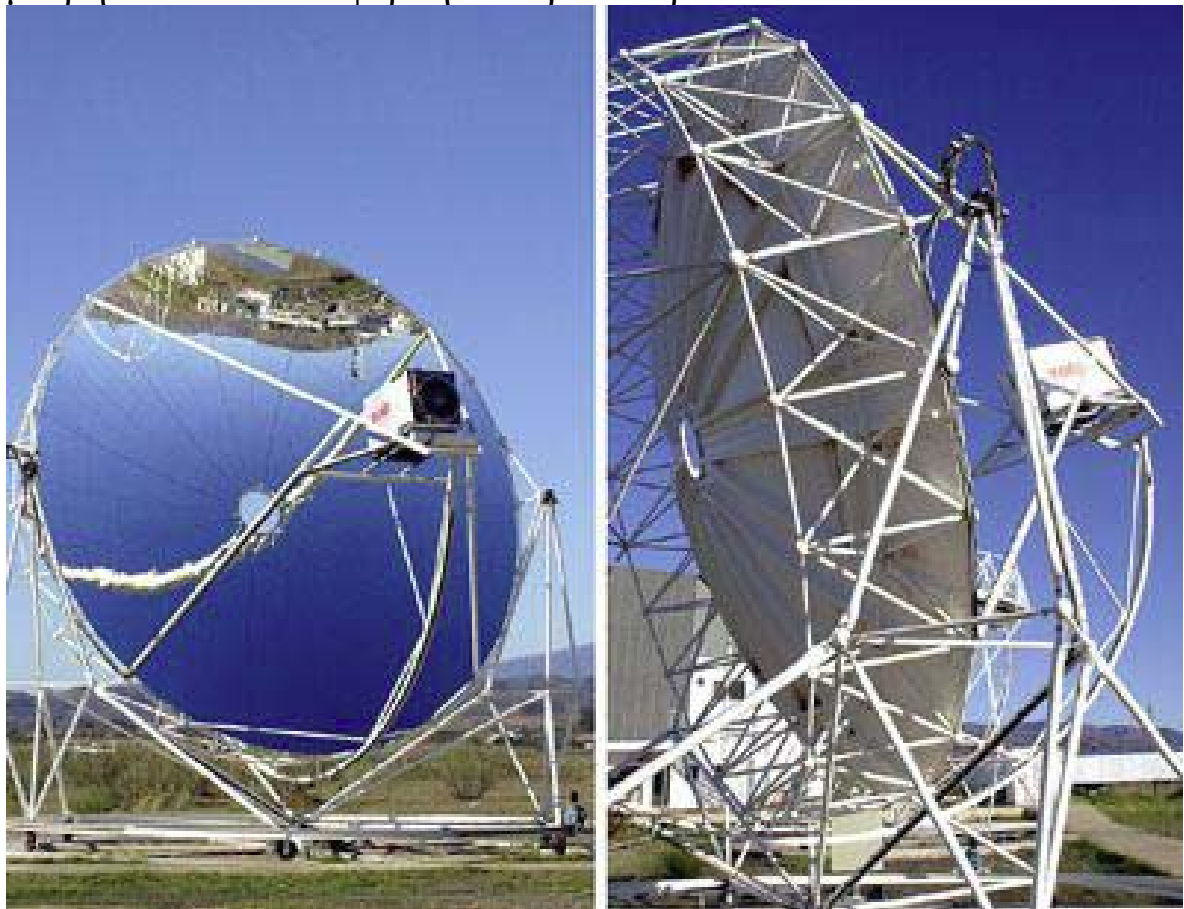


Καμπύλη απόδοσης-ισχύος συναρτήσεως της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

5.1.2 Eurodish

Έπειτα από την ήδη εισηγμένη διάταξη SBP παρουσιάζεται η εφαρμογή Eurodish για την κατασκευή του οποίου συνεργάστηκε μια σειρά φορέων, οργανισμών, εταιριών αλλά και κέντρων ερευνών. Αναφορικά συνεργάστηκαν **European Community, SBP, MERO, Klein+Steki, Inabensa**, και τα κέντρα έρυνας και ανάπτυξης **DLR** και **CIEMAT**. Η κυριότερη διαφοροποίηση από τον προκάτοχο της εφαρμογής αυτής είναι η αντικατάσταση της προτεταμένης μεμβράνης με ένα κελί από γυαλί πάνω στο οποίο τοποθετήθηκαν οι

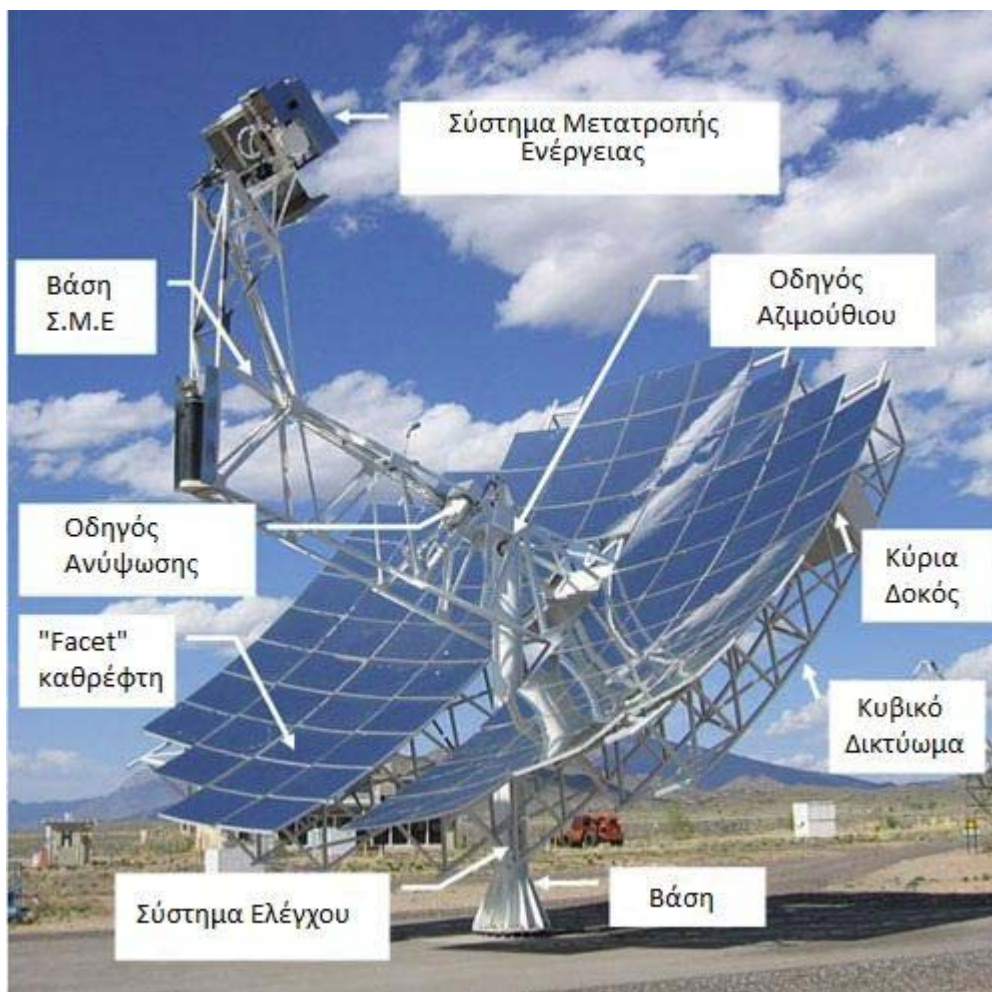
ανακλαστήρες ενώ χρησιμοποιήθηκε ο νέος εξελιγμένος κινητήρας Stirling της Solo Kleinmotoren με κωδική ονομασία 161. Ο βαθμός απόδοσης ολόκληρης της διάταξης είναι 22% ενώ η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας έπειτα από μετρήσεις καταγράφεται σε 20.252 kWh και ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης σε 15.7%. Παρακάτω απεικονίζεται η διάταξη φωτογραφημένη όπως έχει εγκατασταθεί στην περιοχή του New Mexico από όπου και προέρχονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που αναφέρθηκαν πρωτότερα.



Εγκατάσταση του εξελιγμένου Eurodish

5.1.3 SUNCATCHER

Η εταιρία Stirling Energy Systems, είναι αυτή που κατέχει τα πρωτεία στην εξέλιξη εφαρμογών ηλιακού πιάτου. Το μοντέλο της, Suncatcher είναι αυτό με τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης αγγίζοντας το ποσοστό του 31,25% ενώ τα χαρακτηριστικά που έχουν δημοσιευτεί από την εταιρία υποδεικνύουν μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης της τάξεως του 26% για περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό και μέγιστη ισχύ τα 25kW. Το ηλιακό κάτοπτρο αποτελείται από επιμέρους ανακλαστικές γυαλιού. Το εργαζόμενο μέσο είναι το Υδρογόνο και ο κινητήρας Stirling είναι τύπου τεσσάρων εμβόλων. Η πλήρης διάταξη της εφαρμογής παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα.



Χαρακτηριστικά εφαρμογής Suncatcher

Πίεση λειτουργίας	20MPa
Βαθμός απόδοσης	90%
Επιφάνεια Συγκέντρωσης	
Τύπος	Παραβολική επιφάνεια από 82 facets
Υλικό ανακλαστικής επιφάνειας	Καθρέπτης από λεπτό γυαλί.
Διάμετρος	10.57m
Προβαλλόμενη επιφάνεια	87,7m ²
Συντελεστής ανάκλασης	91.01m ²
Εστιακό μήκος	91%
Οπτικός βαθμός απόδοσης	88%
Δέκτης	
Διάμετρος ανοίγματος	0.2m
Θερμοκρασία δέκτη	720° C
Μηχανή Stirling	
Τύπος	Kockums 4-95 SES
Μέγεθος	380cm ³ , 4 κύλινδροι
Εργαζόμενο μέσο	Υδρογόνο
Βαθμός απόδοσης	38-40%
Γεννήτρια	
Τύπος	Επαγωγική
Ταχύτητα περιστροφής	1800rpm
Βαθμός απόδοσης	92-94%
Στοιχεία απόδοσης συστήματος	
Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για DNI 1000 W/m²	25kW
Μέγιστος καθαρός βαθμός απόδοσης	29.4%
Ετήσιος βαθμός απόδοσης	24%
Απαραίτητη ηλιακή ακτινοβολία	>300 W/m ²

5.2 ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Τα ηλιακά συστήματα πιάτου αποτελούν μεμονομένες εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κι έτσι για τον υπολογισμό του κόστους ενός πάρκου παραγωγής, το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους της εγκατάστασης καταλαμβάνεται από το κόστος αγοράς των ίδιων των συστημάτων. Βέβαια το κόστος είναι πολύ λογικό να μεταβληθεί από τη στιγμή που θα μεταβληθεί και ο αριθμός των συστημάτων που θα κατασκευάσει το εργοστάσιο. Στην εγκατάσταση και τη μεταφορά στην εκάστοτε τοποθεσία αντιστοιχεί ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους ενώ στη συντήρηση και στη λειτουργία αντιστοιχεί ενδεικτικά ποσοστό 1%.

5.2.1 Κόστος εφαρμογής EuroDish

Σύμφωνα με στοιχεία που δημοσιεύτηκαν από την ίδια την εταιρία κατασκευής SBP, όσον αφορά την εφαρμογή EuroDish εκτιμάται το κόστος για παραγωγή 500 και 5000 συστημάτων ανά έτος που αντιστοιχούν σε 5MW και 50MW αντίστοιχα. Το πραγματικό κόστος μίας μονάδας προϊόντος της τάξεως των 10kW, σε 10.000\$/kW δίχως να συμπεριληφθούν τα έξοδα μεταφοράς και εγκατάστασης. Επιπλέον το κόστος για παραγωγή 500 μονάδων έχει εκτιμηθεί στα 2500\$/kW ενώ για παραγωγή 5000 μονάδων στα 1500\$/kW.

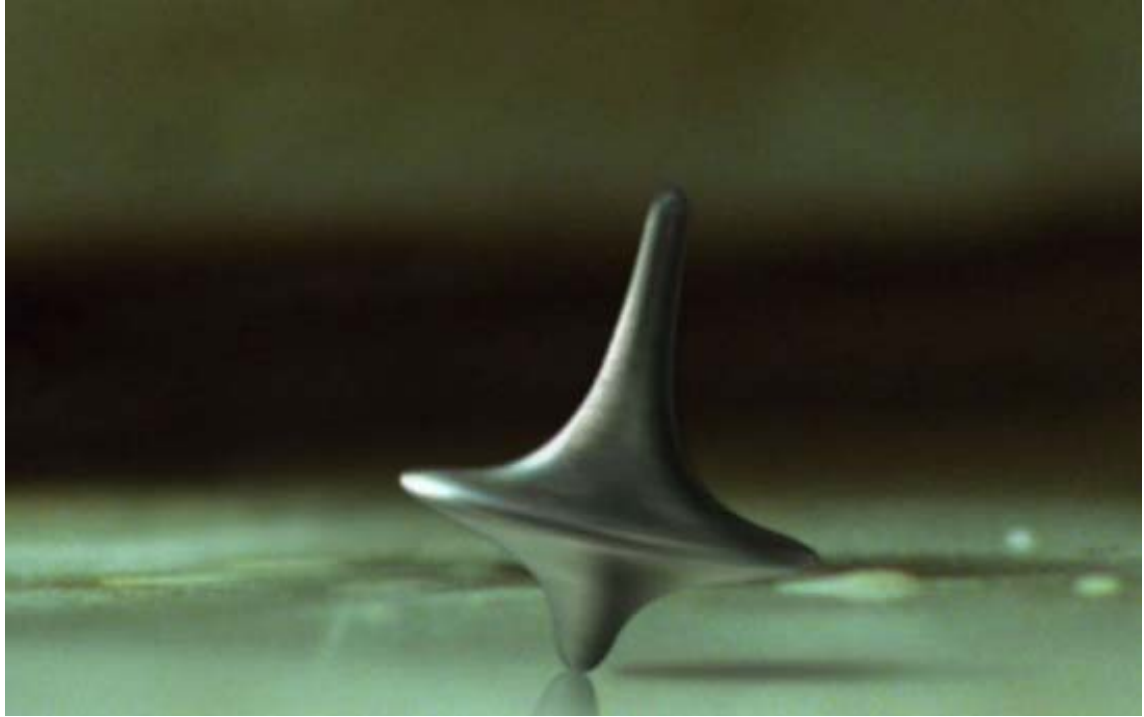
5.2.2 Κόστος εφαρμογής Suncatcher

Το πραγματικό κόστος της εφαρμογής Suncatcher ονομαστικής ισχύος 25kW ανέρχεται στα 8550\$/kW εμπεριέχοντας το κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης. Επιπλέον για εγκατάσταση συνολικής ισχύος της τάξεως των 100MW το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 3000\$/kW. Οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές και προέρχονται από το πρόγραμμα SAM (System Advisor Model) το οποίο αποτελεί πρόγραμμα μοντελοποίησης για κατασκευή έργων με χρήση Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας το οποίο έχει εξελιχθεί από τις εταιρίες NREL και SANDIA.

5.2.3 Κόστος εφαρμογής Innova/Trinum

Η εν λόγω εφαρμογή ίσως είναι η μοναδική που προορίζεται για ιδιώτες, κατοικίες και μικρών απαιτήσεων εγκαταστάσεις. Το κόστος της εφαρμογής ανέρχεται στα 20.000€ ενώ αποδίδει 1Kw ηλεκτρισμό και 3kW θερμότητα. Ενδεικτικά, η απόδοση σε ηλεκτρισμό εντός ενός έτους σε μετρήσεις κεντρικής Ιταλίας, ανέρχεται σε 2.100kWh ενώ σε θερμότητα σε 6.400kWh.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο



Εν κατακλείδι

6.1 Επίλογος

Στο σημείο αυτό θεωρώ πως η διπλωματική αυτή εργασία έφτασε στο τέλος της εκπληρώνοντας τους στόχους που τέθηκαν επί τάπητος εξ αρχής. Τόσο το επιστημονικό όσο και το οικονομικό μέρος του κινητήρα Stirling αναλύθηκε και αποδόθηκε με τρόπο απλό και κατανοητό από ένα σύγχρονο παρατηρητή, χωρίς να προαπαιτείται κάποιου είδους εξειδίκευση. Έτσι ολοκληρώνεται μια εισαγωγική μελέτη και ανάλυση σε θέματα γύρω από τον εν λόγω κινητήρα ελπίζοντας να δώσει στον μελετητή, τόσο το κατάλληλο ερέθισμα αλλά και τα αντίστοιχα στοιχεία για μια περαιτέρω και εις βάθος μελέτη και έρευνα.

6.2 Συμπεράσματα

Έπειτα από τη μελέτη των ζητημάτων που παρατίθενται στην διπλωματική εργασία θα μπορούσε κανείς να πεί ότι ο κινητήρας Stirling αποτελεί ένα περίπλοκο ζήτημα. Το δεδομένο είναι ότι οι περισσότεροι από εμάς δεν είμαστε εξοικιωμένοι με κινητήρες που δεν ανήκουν στον τομέα των Μ.Ε.Κ. ή των ηλεκτροκινητήρων. Σίγουρα είναι κινητήρας που μόλις τα τελευταία χρόνια έρχεται σε επαφή με αυτόν το ευρύ κοινό, και μάλιστα δεν είναι λίγοι αυτοί που υποστηρίζουν ότι αυτή είναι η τεχνολογία του μέλλοντος.

Όπως παρατηρείται στην εργασία ο κινητήρας Stirling απαριθμεί τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα και αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του. Η τιμή αγοράς ενός κινητήρα ή μιας ολοκληρωμένης εγκατάστασης τη συγκεκριμένη στιγμή είναι σχεδόν απαγορευτική. Ήδη όμως τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί πτώση και έτσι αναμένεται να συνεχιστεί μιας και όλο και περισσότεροι από εμάς είτε ατομικά είτε μαζικά

στρεφόμαστε προς πιο οικονομικές αλλά και οικολογικές λύσεις με περίτρανο παράδειγμα τον εν λόγω κινητήρα.

6.3 Προτάσεις

Η εν λόγω εργασία θα πρέπει να αποτελέσει ένα εμπειριστατομένο ερέθισμα όσον αφορά ζητήματα του κινητήρα Stirling και επίσης μια αφετηρία για ενασχόληση με συγκεκριμένα ζητήματα μέσα από ένα πρίσμα εξειδίκευσης. Συνθέτοντας έτσι μια ολοκληρωμένη αλλά πιο γενική προσέγγιση, δίνεται η δυνατότητα στον μελετητή να έρχεται σε επαφή με όλα τα ζητήματα που πιθανώς θα τον απασχολήσουν, τα οποία βρίσκονται συγκεντρωμένα σε μια πιο γενική μορφή.

Επιπλέον προτείνεται η ενασχόληση με το οικονομικό κομμάτι του θέματος του κινητήρα Stirling διότι καθιστά ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο ζήτημα συνυπολογίζοντας τη μεγάλη μεταστροφή του σύγχρονου ανθρώπου προς ήπιες μορφές ενέργειας αλλά και πιο οικολογικές ενεργειακές λύσεις.

6.4 Ευχαριστίες

Η ευγνωμοσύνη καθώς και οι ευχαριστίες μου αρχικά θα πρέπει να δωθούν στον κ. Χασάπη Δημήτριο που δέχθηκε να με διαφωτίσει και να ασχοληθεί με το θέμα των κινητήρων Stirling παρέχοντας σημαντική βοήθεια σε συνδυασμό με εξειδικευμένη γνώση. Εν τέλει θα πρέπει να ευχαριστήσω όλο το διδακτικό προσωπικό του ΤΕΙ Σερρών για τη γνώση και την εκπαίδευση που μου παρείχε καθιστώντας την ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας δυνατή.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

- Χασάπης Δ. Δημήτριος ΤΕΙ Σερρών (2005) *'' Θερμοδυναμική ''* Εκπαιδευτικό σύγγραμμα
- Σπυρίδων Γ. Παπαβλασσόπουλος Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα (2010) *'' Εγκατάσταση Θερμοκινητήρα Stirling Συμπαραγωγής Solo 161V Στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής Ε.Μ.Π. - Συσχετισμός των πρώτων πειραματικών & υπολογιστικών αποτελεσμάτων ''* Διπλωματική Εργασία
(http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/3369/3/papavlasopouloss_stirling.pdf)
- Κρασσάς Ν. Βασίλειος Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Αθήνα (2011) *'' Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα, μια Οικονομοτεχνική Μελέτη για την Ελληνική Επικράτεια ''* Διπλωματική Εργασία
(http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/3890/3/krassasy_solarpower.pdf)
- Τσαρούχη Α. Παναγιώτα Πολυτεχνείο Πατρών (2011) *'' Ευφύης έλεγχος ενεργειακής μηχανής τεχνολογίας Stirling χαμηλής θερμοκρασιακής διαφοράς ''* Διπλωματική Εργασία
([http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4614/3/Nimertis_Tsarouchi\(ele\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4614/3/Nimertis_Tsarouchi(ele).pdf))
- Τερζάκης Κωνσταντίνος Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Αθήνα Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών (2008) *'' Βελτιστοποίηση Αδιαβατικής Ανάλυση Μηχανών Stirling-Παράγοντες Επίδρασης της Απόδοσης ''*
(http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/1160/1/terzakisk_stirling.pdf)

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Wikipedia, *Robert and James Stirling, Dundee Factory, Stirling Engine*, search (2012) (http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)
- Clifford M. Hargreaves, *The Philips Stirling Engine*, (1991)
- Halit Karabulut, Huseyin Serdar Yucesu, Can Cinar, Fatih Aksoy Gazi University, Ankara , Afyon Kocatepe University, Afyon Departments of Mechanical Technology '' *An experimental study on the development of a B-type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources* '' Turkey (2008)
- Youssef Timoumi, Iksander Tlili, Sassi Ben Nasrallah, Ecole National d'Ingenieurs de Monastir '' *Design and performance optimization of GPU-3 Stirling engines* '' Tunisie (2007)
- Youssef Timoumi, Iksander Tlili, Sassi Ben Nasrallah, Ecole National d'Ingenieurs de Monastir '' *Optimization of Stirling engines* '' (2008)
- P.Munn Ph.D, CESL, Corrosin and environmental services LTD '' *Corrosion-It's causes and prevention in heating and cooling systems* ''
- Koichi Hirata, Japan, '' *Assembly Drawing of LSE-01 engine* '' (1996)
- Andy Ross, Ross Experimental '' *Making Stirling Engines* '' (1997)
- Noel P. Nightgale Mechanical Technology Incorporated, Mod II Design Report, NASA CR R&D Department of Energy, New York '' *Automotive Stirling Engine* '' (1986)
- Lanny G. Thiemme Lewis Research Center NASA, US Department of Energy, Office of Vehicle and Energy R&D, Cleveland Ohio, '' *High-Power Baseline and Motoring Test Results for the GPU-3 Stirling engine* '' (1981)

- William R. Martini Lewis Research Center NASA US Department of Energy, Office of Vehicle and Energy R&D, Cleveland Ohio '' Stirling Engine Design Manual '' Second Edition (1983)
- Frank Kyei Manu, Aloysius Obodaoko, Proffesor E. Carr Everbach '' *Solar Stirling-Engine water pump, Proposal Draft* '' (2005)
- Halit Karabulut, Fatih Aksoy, Erkan Ozturk, Department of Mechanical Technology Renewable Energy Gazi University Ankara Turkey '' *Thermodynamic analysis of a B-type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever* ''
- Sterling D. Allan, Rosemad, CA, USA, '' *World's largest solar installation to use Stirling engine technology* '' (2005)
(http://pesn.com/2005/08/11/9600147_Edison_Stirling_largest_solar/)
- Bancha Kongtragool, Somchai Wongwises '' *A review of solar-power Stirling engines and low differential Stirling engines* '' (2002)
(<http://www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/refs/solar/Stirling.pdf>)
- Wikipedia '' *Renewable energy* '' search (2012)
http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy
- American Stirling Company Frequently Asked Questions sector, '' *Questions and Answers* '' (<http://www.stirlingengine.com/faq>)
- Wikipedia '' *Carnot Cycle* '' search (2012)
http://en.wikipedia.org/wiki/Carnot_cycle
- Israel Urieli, C. J. Rallis University of Witwatersand School of Mechanical engineering '' *Stirling cycle engine development* '' (1975)
- Theodor Finkelstein, Allan J. Organ '' *Air engines: the history, science and reality of the perfect engine* '' (2001)
- Eurodish Co. SBP GbR, Stirling system description, Stuttgart '' *A new decentralized Solar Power Technology* '' (2001)
(<http://pointfocus.com/images/pdfs/eurodish.pdf>)
- Stratelis, TEDOM '' *Συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας* '' <http://www.stratelis.gr/2/stirling6.htm>

Ιστοσελίδες

- <http://www.stirlingshop.com/index.html> , Stirling engine as educational tool
- <http://www.microchap.info/IDGTE%20paper.pdf> ,Stirling engine micro CHP
- <http://www.infiniacorp.com/> , Stirling engine manufacturing
- http://en.wikipedia.org/wiki/GM_Stir-Lec_I General Motors Stir-lec Car
- <http://www.sunpower.com/> Free piston Stirling engines
- <http://www.stirling-tech.com/> Stirling Technology Incorporate
- <http://www.stirlingbiopower.com/STIRLING/BASSE.swf> About Stirling BioPower
- http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_engine Heat engine
- <http://www.bsrsolar.com/> Efficient multifunctional solar system
- <http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/post.html> Index of Stirling engine manufacturers (post 1940)
- <http://www.solo-germany.com/> 1991-2000 period
- <http://www.cussons.co.uk/en/ukindex.htm> Company sector
- <http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/misc/sig.html>
- <http://www.kockums.se/en/> Products & Services
- <http://www.greentechmedia.com/articles/read/stirling-energy-systems-dish-engine-solar-maker-files-for-chapter-7-bankrup/> Projects
- <http://www.treehugger.com/solar-technology/improved-solar-power-dish-with-stirling-engine-made-by-car-parts-suppliers.html> Improved Solar Power Dish with Stirling Engine made by Car Parts Suppliers
- http://www.stirling.dk/page_content.php?menu_id=28&type=submenu How it works
- <http://www.bios-bioenergy.at/en/electricity-from-biomass/stirling-engine.html> Description of the biomass CHP technology based on Stirling engines

- http://www.grc.nasa.gov/WWW/TECB/rps_asc.htm Advanced stirling convertor
- <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/09/tower-automotive-to-supply-stirling-suncatcher-mirror-facets> News 2009
- http://www.energy.ca.gov/sitingcases/solartwo/documents/applicant/afc/volume_02+03/MASTER_Appendix%20B.pdf Appendix B, Solar Stirling engine
- <http://crestoneagle.com/2011/08/11/tessera-withdraws-suncatcher-application/> Mattie Belle Lakish ,'' *Tessera withdraws Suncatcer application* ''
- <https://sam.nrel.gov/> System Advisor Model
- <https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2008/solargrid.html> '' *Sandia stirling energy systems set new world record for solar-to-grid conversion efficiency* '' (2008)



ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2012
ΣΕΡΡΕΣ

