יום העיון השלישי
במנועי סילון וטורבינות גז

בחסות:

המעבדה למנועי סילון וטורבינות גז,

הפקולטה להנדסת אוירונוטיקה וחלל, הטכניון

ענף הנעה, המחלקה לאוירונוטיקה, היחידה

למו"פ - היחידה לתשתיות, מנהלת פיתוח אמל"ח

ותשתיות, משרד הביטחון

יום ה', י"א בחשון תשס"ד, 06/11/2003,
9:00 – 17:00, אולם האודיטוריום (חדר 235), הפקולטה להנדסת אוירונוטיקה וחלל, הטכניון

יום העיון השלישי
במנועי סילון וטורבינות גז

הפעילות ההנדסית בארץ בתחום ההנעה הסילונית נמשכת ומתעצמת ומתפרשת על מגוון רחב של נושאים, החל בתחזוקה וכלה בפיתוח של יחידות שלמות וחדשות. מספר רב של גופים עוסקים בארץ באופן פעיל ושוטף בתחום זה ובהם מפא"ת, ח"א, אל-על, תע"א, מנועי בית שמש, תע"ש, רפא"ל, אורמת, חברת החשמל, RSL, בקר הנדסה, הטכניון ועוד.

שיפורים וחידושים טכנולוגיים של השנים האחרונות ופרוייקטים חדשים המתנהלים בארץ מצדיקים את המשך קיומם של מפגשים מקצועיים שיהיו מיועדים להפריה הדדית, החלפת מידע וקרקע נוחה לעידוד שיתוף פעולה. בימי העיון הראשון והשני שהתקיימו באוקטובר 2001 ו- 2002, התכנסו ונפגשו בכל פעם כמאה מהנדסים ומדענים מתחום ההנעה, הוצגו עבודות מהתעשיות השונות ומהטכניון ולהערכת הרוב, ימי העיון הוגדרו כמוצלחים והסתיימו עם טעם של עוד...

יום העיון השלישי יכלול בעיקר הרצאות על הפעילויות השונות במפעלים, במכונים ובאוניברסיטאות בארץ, דיון פתוח ולמעונינים, סיור במעבדה למנועי סילון. כמו כן זו תהיה הזדמנות טובה למפגשים מקצועיים ולהחלפת דעות.

בברכת הצלחה ליום העיון

פרופסור חבר לוי ישעיהו, יו"ר יום העיון

פרופסור חבר לוי ישעיהו, ראש המעבדה למנועי סילון וטורבינות,
הפקולטה להנדסת אוירונוטיקה וחלל, קריית הטכניון, חיפה 32000

Tel. 04-8293807 Fax 04-8121604
e-mail: levyy@aerodyne.technion.ac.il http://www.jet-engine-lab.com

סדר היום:

08:30 -09:30 הרשמה

09:30 -10:10 דברי פתיחה:
משה אייזנברג / מנל"מ

מר רוני גורדנה / משהב"ט

דברים לזכרו של שלמה לוי ז"ל:
מר עמנואל ליבן / עדמטק
משפחת שלמה לוי ז"ל

10:10 -12:25 **מושב ראשון- יו"ר: מר יעקב מעיין/**
מנועי בית שמש

1. **פרופ"ח ישעיהו לוי** / הפקולטה להנדסת אוויר' וחלל, הטכניון/
FLOXCOM -פיתוח תא שריפה לטורבינת גז עם פליטה נמוכה של NOx

2. **מר אריק רינג**/אורמת תעשיות/
טורבינת גז המונעת באנרגית שמש

3. **דר' רנטה קליין** /
RSL Electronics/
שיטה חדשנית לזיהוי הזדקרות מדחס באמצעות חתימת רעידות

11:05-11:15 **הפסקה + כיבוד קל (10 דק')**

4. **מר אלברט לוי** /מנועי בית שמש /
הקטנת תצרוכת השמן של מנוע סילון

5. **מר משה טסל** / אופטיגייד /
קירור מקדים בטורבינות גז

6. **דר' ולרי שרבאום** / הפקולטה להנדסת אוויר' וחלל, הטכניון/
תהליכי הצתה במנוע סילון

7. **מר אלכס דולניקוב וישראל צור**
/רפא"ל/
תכן משולב לסעפת דלק במנוע סילוני זעיר

12:30-14:30 **ארוחת צוהריים**

14:30-16:50 **מושב שני - יו"ר: דר' עמירם לייטנר**/ רפא"ל

8. **פרופ' דוד ליאור**/R-JET ובקר מערכות הנדסה/
תכן מוקדם של מנוע טורבופרופלור

9. **מר יוליאן בוגיצ'י**/ תע"א/בד"ק/
מערכת למדידה לא ישירה של פגמים

10. **דר' מיכאל ליכטצינדר**/ הפקולטה להנדסת אוויר' וחלל, הטכניון /
שיחזור מפת מדחס אפקטיבית למנוע סילון חד צירי במצב מעבר

15:25-15:35 **הפסקה + כיבוד קל. (10 דק')**

11. **דר' רמי שלף**/ אטם הנדסה /
אטמים במעברי גז במנועי סילון וטורבינות גז בתעשייה הישראלית

12. **מר אלכס שוסטרמן** / הפקולטה להנדסת אוויר' וחלל, הטכניון/
מנוע סילון זעיר – פרויקט גמר

13. **מר אלכס סירוטה** / תע"א/
שיפור יעילות של מנועי סילון וטורבינות תעשייתיות בעזרת ציפוי חלק על חלקי מדחס

14. **מר עמנואל ליבן** / עדמטק/
הערות ולקחים מתהליכי פיתוח מנועים בארץ

16:50-17:10 **דיון ודברי סיכום**

הרצאה מס' 1

FLOXCOM - Low-NOx Combustor for High Efficiency Gas Turbines

Prof. Yeshayahou Levy,
Faculty of Aerospace Engineering, Technion

The primary objective of the project is to develop innovative low NOx level combustors for small gas turbines, (typically less than 20 ppmv). Other objectives are:

to improve the internal combustor aerodynamics in order to obtain a more uniform wall temperature for lower thermal stresses, to lower the values of the exhaust gas pattern factors for more circumferential uniformity of the gas temperature at the combustor.

The work include global modelling of the combustor, chemistry–turbulence interaction, integrated wall cooling and combustion aerodynamics, high momentum and uniform fuel stream injection and more

The method in the FLOXCOM project is based on a technologically innovative combustion solution, the Flameless Oxidation (Mild combustion) method. This promising technology allows operation of the combustor at high temperatures with ultra-low NOx levels. In addition, this combustion mode has further advantages over other advanced NOx reduction technology such as safety, reliability and the possibility for its incorporation in a heat exchanger cycle using high air temperatures at the combustor inlet.

The investigation is directed toward the completion of the studies required to validate the engineering feasibility of the Flameless Oxidation technology and to produce operating pilot combustors that will show its improved performance.

Two testing facilities for sectors of the combustor were built at the Technion for testing in Portugal and Italy for operation at different pressures. Simulation results of the global and detailed simulations as well as preliminary test results will be presented.

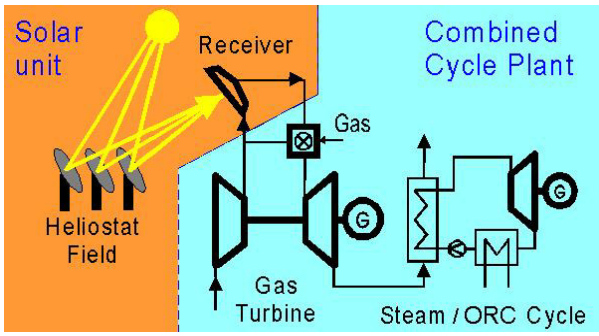
The project is financed by the EC, Directorate J – Energy, under CONTRACT N°: ENK5 - CT 2000 – 00114, performed by a consortium of 8 participating institutes and coordinated by the Technion.

הרצאה מס' 2

Gas Turbine Solarization - Development and Testing

Arik (Ariel) Ring,
ORMAT Industries Ltd

Solar energy is the most abundant energy source on earth:
Introduction of solar energy into the gas turbine part of combined cycle power plants offers a significant potential for achieving high efficiency and cost reduction of solar power.



ORMAT, a long time leader in the renewable energy field, has developed the "ORMAT Solar Turbine 3" (OST3) - a gas turbine for solar hybrid operation, as briefly reviewed below:

Technological Background

- Major Concentrating Solar Power (CSP) technologies are: Parabolic Troughs, Dishes and Solar Towers. The solar tower technology is the most promising CSP technology, allowing the highest temperatures of any solar technology. A solar tower system includes several two-axis tracking mirrors called Heliostats, reflecting the sunlight to one or more receivers located on a tower, thus achieving a high concentration beam of light. The beam heats a fluid in the receiver, which then delivers the heat to a heat engine.

- Some barriers which held back developments of this field were: The large volume and large pressure drop of the solar receivers; the need for high temperature materials, the wide and sometimes extreme range of air to fuel ratios and the required initial investment.

- A high efficiency cycle at high temperatures reduces the solar collectors area. The collectors constitute the major investment of any solar power plant.

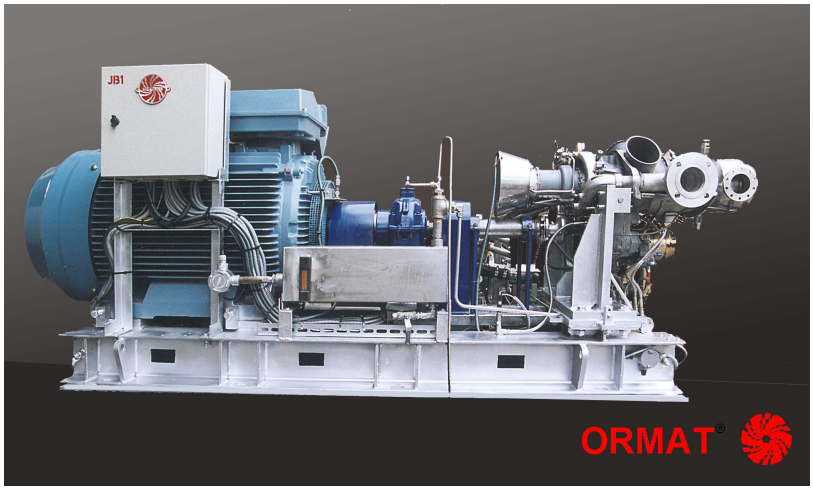
The Development Process

- ORMAT is the coordinator of the successful SOLGATE project partly funded by the EU 5th framework program. ORMAT supplied a complete Power Converting Unit (PCU) including the solarized gas turbine, starter, reduction gearbox, shafts, electrical generator, oil cooling system, electrical boards and the control system.

- The main tasks of the OST3 solarization process (adapting a GT to accept solar heated air) included the following: design and manufacturing of a super alloy combustor; the fuel system including an injector, an igniter and a metering valve; a state-of-the-art digital control system, which substituted the engine hydro mechanical control and the starting system.

Testing

- The PCU was tested at ORMAT's headquarters in Yavne with a heat exchanger to simulate the solar system and was then shipped to the Plataforma Solar de Almeria in the south of Spain for system integration, commissioning and solar hybrid testing. Solar hybrid test runs took place at the PSA CESA1 solar tower from December 2002 till August 2003.
- The German Aerospace Center DLR supplied the pressurised volumetric receivers capable of up to 1000°C air outlet.
- The SOLGATE project achieved its main objectives: gas turbine solarization; successful integration of the gas turbine with the solar receivers and heliostat field; steady operation of the gas turbine in a solar hybrid mode with up to 800°C at the combustor entrance and up to 960°C at the receiver outlet. Simulation tools for solarized gas turbine power plants were developed.
- The expected efficiencies of the OST3 and the receivers were verified.
- ORMAT Solar Turbine 3 is the first GT to achieve continuous solar hybrid operation with 800°C solar heated air producing over 230 kWe.



ORMAT Solar Turbine 3 (OST3)

Conclusions: The solar hybrid gas turbine technology is a viable technology. Incorporating state of the art high temperature materials, control systems, heliostats and receivers, this technology could achieve a cost reduction of solar electricity, providing high efficiency base load or peaking electrical power. The hybrid operation with fossil fuel allows the turbine to operate at the maximum efficiency most of the time with no need for expensive storage systems.

ORMAT is planning to continue the tests with a solar receiver capable of heating the air up to 1100°C with the longer-term target being a demonstration power plant in the range of 10 MW.

הרצאה מס' 3

שיטה חדשנית לזיהוי הזדקרות מדחס באמצעות חתימת רעידות

ד"ר רנטה קליין,
RSL Electronics Ltd

בהרצאה תוצג המתודולוגיה של Vib-RAY – אנליזה אוטומטית וממוקדת של חתימות רעידות במרחבים שונים, המשקפת את התנהגות הרכיבים המכניים של המערכת הנבדקת. אנליזה זו, הממוקדת לאופני כשל של כל רכיב, מאפשרת גילוי אמין ובשלבים מוקדמים (לפני החמרה או כשל) של תקלות או התדרדרות. המתודולוגיה של Vib-RAY מאפשרת דיאגנוסטיקה בהתייחס לתנועה הסיבובית, לשינויי מבנה או לתופעות אווירודינמיות.

בהרצאה נתמקד ביישום המתודולוגיה לדיאגנוסטיקה של מנועי סילון. נדון בדוגמאות של זיהוי הזדקרות מדחס (הזדקרות סמויה וגלויה) באמצעות חתימות הרעידות, יכולות ניתוח אופן הכשל והייתכנות האוטומציה של הזיהוי.

נעמוד על ההבדלים בין אבחון אוטומטי של תופעות דינמיות ואווירודינמיות, ועל חשיבות הבנת וניתוח אופני הכשל. תובא דוגמה של זיהוי וניתוח כשל במסב כדורי אשר ממחישה את כוחה של השיטה לשמש ככלי בחקר תקלות.

יודגם תהליך האנליזה של כל אחת מהדוגמאות, אופן זיהוי התופעה, והייתכנות הזיהוי והסיווג האוטומטי.

הרצאה מס' 4

הקטנת תצרוכת השמן של מנוע סילון

מר אלברט לוי,

מנועי בית שמש בע"מ

בהרצאה תוצג בעיה שהתעוררה במסגרת פיתוח מנוע סילון בו היתה תצרוכת שמן מוגזמת והשיטה בה נפתרה בעיה זו.

תחילה תוצג מערכת השמן של המנוע והסיבות המשוערות לתצרוכת השמן המוגזמת. כמו כן, תתוארנה תוצאות מדידות תצרוכת השמן ומדידות הלחצים הפנימיים במנוע אשר משפיעים על זרימת השמן במחזורו ועל אובדנו למנוע. בהמשך תתוארנה השיטות השונות שניסו לפתור את הבעיה ולבסוף יוצג הפתרון שאומץ אשר הקטין את צריכת השמן של המנוע ב 70%.

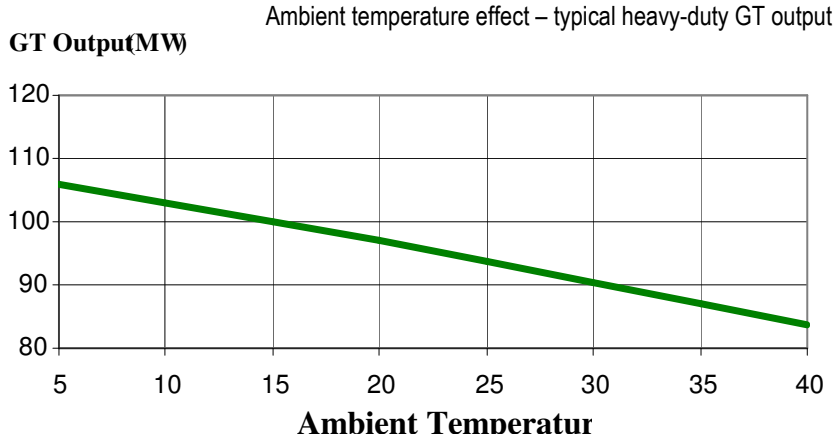
הרצאה מס' 5

קירור מקדים בטורבינות גז

מר משה טסל,

אופטיגייד בע"מ

טורבינות גז לייצור חשמל סובלות מירידה בהספק המופק כתוצאה מעליית הטמפרטורה של הסביבה. הפסד ההספק הוא בערך 0.7% על כל מעלת צלזיוס אחת (1^0C = 0.7% GT output).



בניסיון לשחזר את ההספק משתמשת התעשייה באמצעים שונים לקירור האוויר הנכנס אל מדחס הטורבינה. בעבר היה מקובל להשתמש בצ'ילרים ומזגנים. אולם כיום טכנולוגיות אלו כבר כמעט שאינן קיימות עקב מחירן הגבוה ומסורבלות אחזקתן.

במהלך חמש השנים האחרונות הפכה שיטת הקירור באמצעות ערפול (Inlet Fog-Cooling), לשיטה המובילה. היא עקרון הפעולה של מערכות אלו הוא הזרקת ערפל מים לתוך אוויר הסביבה המגיע למדחס. טיפות המים הזעירות מתאדות באוויר וכתוצאה מהמרת האנרגיה צונחת הטמפרטורה של האוויר הנכנס. ככל שהטיפות זעירות יותר כך גדלה יעילות האידוי וקטנה הסכנה של הגעת טיפות מים ללהבי המדחס.

בשנים האחרונות חל גידול במספר החברות המייצרות ומוכרות מערכות של קירור מקדים באמצעות ערפול ומספרן מוערך ב כ 20 – 15.

השיטה הרווחת ביותר בקרב אותן חברות היא מערכת מים בלחץ גבוה (150-200 bar). הדיזות בשיטה זו מתבססות בעיקר על חור יציאה קטן ביותר (0.1-0.5 micron) דרכו מוזרקים המים בלחץ רב.

הבקרה המקובלת בשימוש היא באמצעות חישוב פסיכרומטרי המתבסס על מדידת לחות וטמפרטורה של הסביבה. הנתונים מאפשרים קביעה תיאורטית של כמות המים אשר ניתן להוסיף לאוויר הנכנס למדחס הטורבינה.

המגבלה של שיטה זאת שכמות המים נקבעת עפ"י חישוב תיאורטי וללא אינדיקציה Online של המצב האמיתי בכניסה למדחס ואינה לוקחת בחשבון מים חופשיים באוויר אשר מקורם בעיבוי על קונסטרוקציות או כשל במערפלים. בהרצאה תינתן סקירה על הצורך והפתרונות הקיימים, סקירה על השוק, ובידול של מערכת אופטיגייד לעומת המערכות האחרות בשוק.

הרצאה מס' 6

IGNITION PROCESS AT JET ENGINES

Dr. Valery Sherbaum, Prof. Yeshayahou Levy and Mr. Valery Nadvany,
Faculty of Aerospace Engineering, Technion

This work refers to a vaporizing system for a small jet engine. It focuses on the design for the fuel injection within the vaporizer housing while maintaining all external dimensions and operating conditions.

Three types of fuel nozzles with impact atomizer were investigated:

- existing atomizer,
- atomizer with additional air blowing,
- atomizer with inclined and concave impactor.

Droplet size distribution, under various nozzle pressures and air velocities, was measured with Phase Doppler Particle Anemometry (**PDPA**) and spray characteristics were obtained by photography.

Modified atomization systems demonstrated improved performance and better atomization than the existing one. Basic atomizer parameters (droplets SMD, liquid flux, spray cone) were investigated using water. At a later stage, the modified impact atomizers were tested and successful spark ignition was demonstrated.

The influence of igniter location on ignition was studied experimentally.

The analysis of the results, i. e. influence of the combustor air velocity, air velocity inside the vaporizer, the droplets size and flux distribution, the igniter location were performed and results of the CFD simulations were used. The obtained results are compared with the data of other researchers. This study revealed that for successful ignition local droplets diameter and local air velocity at the ignition point are of the utmost importance. A possible scheme of ignition by pyrophoric fuel is proposed.

הרצאה מס' 7

תכן משולב לסעפת דלק במנוע סילוני זעיר

מר ישראל צור ומר אלכס דולניקוב,
מח' הנעה סילונית/מנו"ר/רפא"ל

ההרצאה מתארת את תהליך התכן המחודש של סעפת הדלק במנוע "סטארגייט". מטרת שיפור התכן היא להקטין את מפל הלחץ על הסעפת, וזאת בכדי להוריד למינימום את עבודת משאבת הדלק, ובכך לאפשר מזעור של המשאבה והקטנת מקור האנרגיה הנדרש להפעלתה.

תהליך התיכון מחדש כלל ניסויים ואנליזה משולבת של זרימה ומעבר חום. האנליזה נעשתה באמצעות באמצעות התוכנית IDEAS/ESC.

השלב הראשון בתהליך היה אימות, חישוב מול ניסוי, של מפלי הלחץ כנגד ספיקות הדלק בסעפת הראשונית.

השלב השני בתהליך היה איתור צווארי הבקבוק, מבחינת מפל הלחץ, לאורך הסעפת. שלב זה בוצע באמצעות האנליזה, תוך התחשבות בטמפרטורת כניסה נמוכה (-40^0C) של הדס"ל, ושינויי צמיגות ניכר של הדלק עם הטמפרטורה. טמפרטורה הדלק עולה בסד"ג של כ- 100^0C במורד הזרם עד למזרקי הדלק.

בשלב זה הסעפת תוכנה מחדש, ולאחר מספר סבבים של אנליזה ותכן תיבמי, הסעפת הראתה שיפור משמעותי במפלי הלחץ. הסעפת יוצרה ונערך ניסוי שאימת את תוצאות האנליזה.

אופי מפלי הלחץ בסעפת הוא מורכב וכולל, מפלים הידראוליים כגון, שינויי קוטר ורדיוסי עקמומיות, ומפלי חיכוך בצנרת שבחלקה היא למינרית ובחלקה טורבולנטית, בזרימה שהיא גם מפותחת וגם שאינה מפותחת, בנוסף ישנה רגישות גבוהה לתלות של החיכוך ומפלי הלחץ בטמפרטורת הדלק.

חישוב התנגדויות קלסי של צנרת אינו מספיק במקרה הזה, רק חישוב CFD משולב מעבר חום מאפשר חיזוי מדויק של מפלי הלחץ בסעפת.

התכן הושלם ללא צורך בסבבי ייצור וניסוי, ותוך הבנה טובה של תהליך הזרימה ומעבר החום בסעפת.

השתתף בכתיבה: ד"ר עמירם לייטנר - מח' הנעה סילונית/מנו"ר/רפאל.

הרצאה מס' 8

תכן מוקדם של מנוע טורבופרופלור

פרופ' דוד ליאור,

R-JET ובקר הנדסה בע"מ

שוק המנועים התעופתים בתחום הספק של עד 200 קווט שבוי עדיין על ידי מנועי בוכנה, במשקל של 1 קג לקווט לערך. אמינות המנועים קטנה ומהווה מקור תקלות עקרי בתעופה אזרחית וצבאית.

המגבלות העיקריות המונעות נצילות גבוהה של טורבינות גז בתחום הספק זה הן המידות הקטנות של הרכיבים האירודינמים הנדרשות ביחסי לחצים גבוהים ובספיקות אויר קטנות [פחות מ-1 קג לשנייה], אשר גורמות לנצילויות נמוכות עקב השפעות שכבת הגבול ומרווחים

עם החלקים הסטטים. מיגבלה נוספת היא טכנולוגית-אין אפשרות לקרר להבי טורבינה קטנים ודקים-אך טמפרטורות גבוהות דרושות להשגת נצילויות מחזור גבוהות.

מוצג מחזור OCN -בו השריפה סובבת עם המדחס והטורבינה, בו הנצילויות האירודינמיות של הטורבינה ושל המדחס גבוהות 5-8% משל אלו במחזור קונבנציונלי, כמו כן מוצג פתרון יחודי של מחזור זה לקירור יעיל חיצוני של להבי הטורבינה המאפשר הגדלת טמפרטורת כניסה לטורבינה עד 1700 קלוין ללא השקעה בדחיסת אויר קירור. מבנה המנוע כולל 2 דרגות דחיסה ציריות ודרגת דחיסה אחת מעורבת,ללא דיפיוזר מדחס וללא סטטור לפני 2 טורבינות ריאקציה הסובבות בכוונים נגדיים. הטורבינה הראשונה מניעה את המדחס והטורבינה השנייה היא חופשית ומניעה את הפרופלור דרך תימסורת.

הפרופלור מורכב קונצנטרית על המנוע כדוחף או מושך לפי בחירה. מוצגים מיספר קונפיגורציות בהתאם לשיטת הרכבה במטוס.

מידות עיקריות- אורך-680 מ"מ קוטר-250 מ"מ.

משקל-כולל מקרר שמן ואלטרנטור 1 ק"ווט -27 קג.

ביצועי המנוע המתקבליסדומים לאלו של מנועי בוכנה מודרנים תוך חסכון של 125 קג.

הביצועים המתקבלים בתנאים סטטים בפני הים בטמפרטורת כניסה לטורבינה של 1273 קלוין הספק 124 קוו"טנצילות תרמית 28%.

בטמפרטורת כניסה של לטורבינה של 1505 קלוין הספק180 קוו"ט נצילות תרמית 30%.

בעומס מופחת הנצילות של הרכיבים נשארת כמעט קבועה, בניגוד לירידת הנצילות במחזור קונבנציונלי.

כתוצאה מכך הנצילות התרמית של המחזור נשארת גבוהה יחסית עד 30% מההספק המקסימלי.

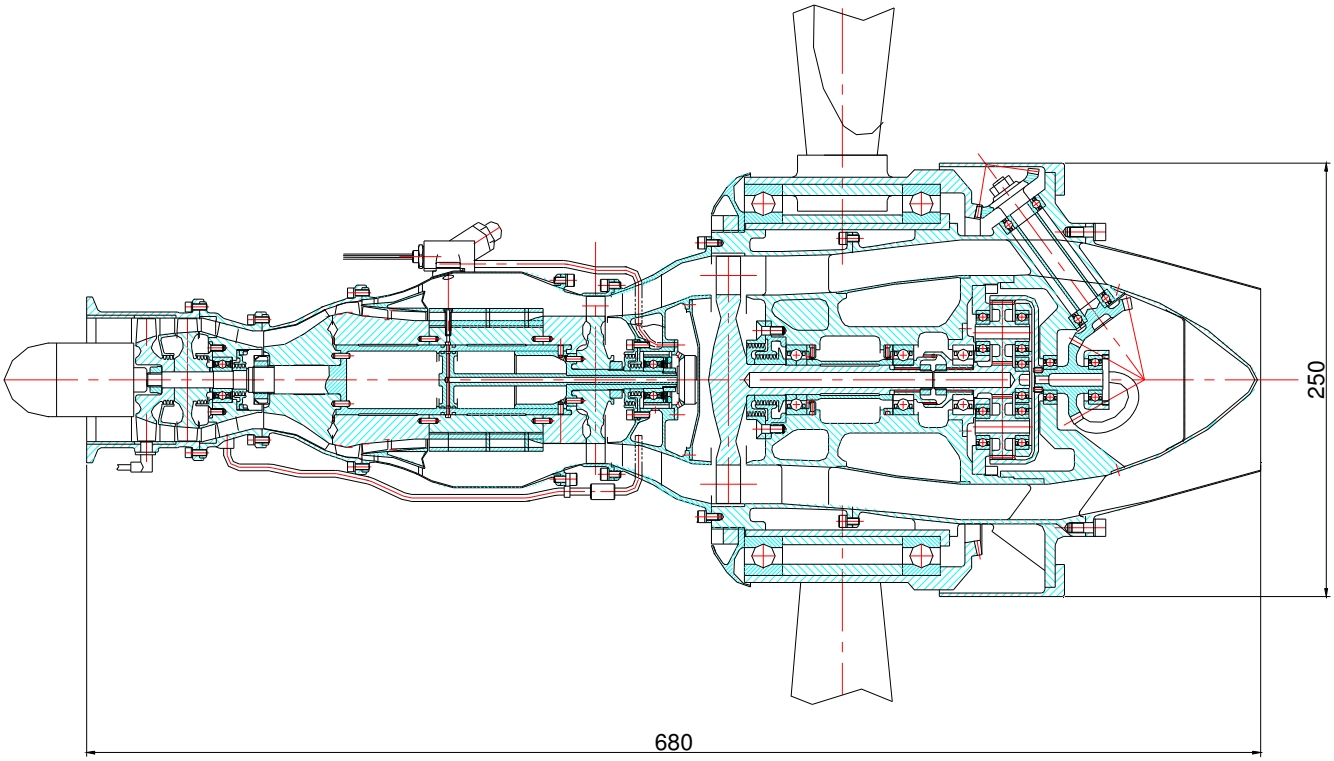
מוצגים עקומות רגישות של הביצועים לנצילויות הרכיבים ומפלי הלחץ בתא השריפה.

התכן המכני מתאים לאורך חיים גבוה 10000 שעות ואמינות גבוהה של הרכיבים הקריטים-

[מיסבים, טורבינה, תמסורת]

עלות יצור לסדרה של 200 לשנה $20000

OCN - Engine with pulling propeller



הרצאה מס' 9

AN AFFORDABLE AND ACCURATE OPTICAL REMOTE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR JET ENGINES INSPECTION

Mr. Julian Bughici, Engine Test Facilities Engineer –
IAI-Bedek Aviation Group , Engines Division
Mr. Haim Shitzer, Electro –Optical Engineer Shitzer Engineering

The system provides a straightforward capability to measure, linear dimensions, on a captured digital image.

The technique is based on a comparative measurement between
a known reference dimension value and the required dimension.

By optical means the system projects an accurate pattern with a known linear dimension on the inspected surface.

The image is captured and analyzed by a dedicated software program.

The system relates to an optical add-on kit and a method for viewing and measuring defects in internal, essentially inaccessible locations inside of jet engines.

The measuring system includes a collimated laser beam generator for producing a predetermined reference pattern.

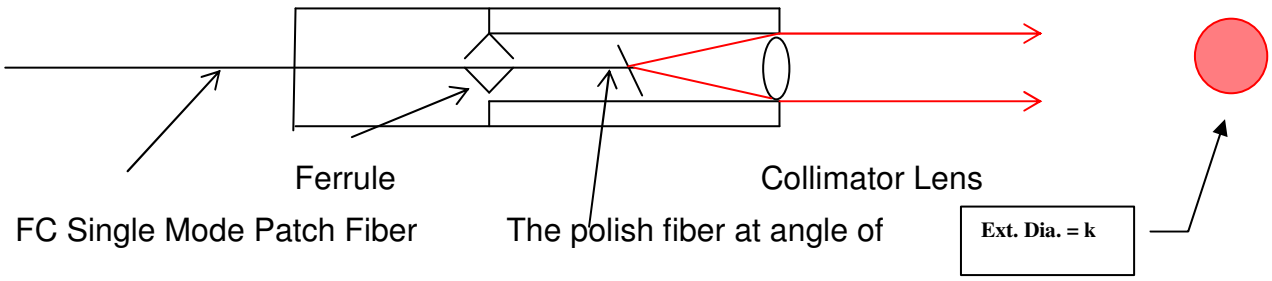
The projected pattern has at least one dimension essentially invariant within the range of working distances of 50 mm.

This system is particularly advantageous for use with borescopes, which include an imaging system.

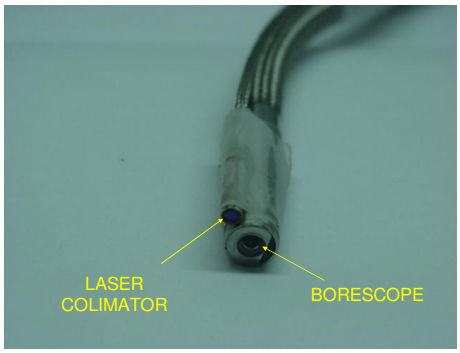
As the borescope produces an image of the target area, that includes the pattern having a known dimension, the dimensions of the defect in the target area can be analyzed and comparatively determined.

The comparison is performed by image processing means using an appropriate algorithm of a computer software program.
In this way, the distance of the distal end of the borescope from the target area need not be measured, controlled or known in order to achieve an accurate defects measurement.

The reference laser pattern in the system is in the form of a circular spot of a known diameter, which is constant within a range of working distances.



LASER WITH BORESCOPE



MEASUREMENT PORTABLE KIT

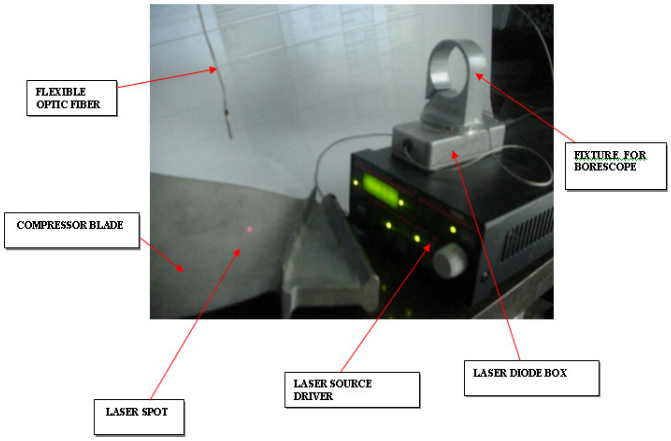


FIG. 1. Collimated Laser (λ=660nm) Spot by Single Mode Fibe

FIG. 2: A digital picture of inspected area is taken .

FIG. 3: A dedicated image analyzer software is used to measure , record and archive the picture with dimensions and relevant inspection information.

הרצאה מס' 10

Evaluation of the Effective Engine Compressor Map Using Data Acquisition During Transient Operation

Dr. Michael Lichtsinder and Prof. Yeshayahou Levy,
Faculty of Aerospace Engineering, Technion

This lecture discusses low cost and fast evaluation of the effective compressor and/or other engine maps using data acquisition during transient engine operation. The objective of the present study is to re-evaluate the effective engine performance maps in higher precision. This is done using data acquisition during aircraft operation at different altitudes, Mach numbers, angles of attack, side slip angles and during post-stall. The method is based on conventional dynamic engine model. The unknown engine map characteristics are excluded from the model while corresponding number of some measured values are added to the model input. For example, if an unknown compressor map is described by two equations, then rotational speed and turbine output temperature (measured for an engine control) are added to the ordinary input parameters (fuel mass flow, altitude and Mach number). The unknown map values are calculated using inverse solution of the equations of the "short" mathematical model. It is fast solution due to the following reasons: a) the "short" model contains less equations in comparison with the conventional model, b) initial conditions (t=0) are not used and not calculated because time derivative of state values are usually measured and/or calculated on-line (as rotational speed).

The evaluation of the effective compressor and/or other maps during transient engine operation has the following advantages in comparison with the evaluation during steady-state operation. One may evaluate a single <u>operating line only</u> during steady state at constant altitude and Mach number while relatively large region (fragment) of the compressor map may be evaluated during engine acceleration and deceleration maneuver. The model input parameters are changed fast in transient operation so large number of map points may be evaluated during relatively short time in comparison with steady-state data acquisition. The map <u>accuracy is increased and cost decreased</u> for maps evaluation during engine transient operation. Some jet engine maps may be evaluated simultaneously.

The resulting data from the "short" model contains all engine parameters including stall margin and equivalence ratio so that this model may be also used for engine control.

הרצאה מס' 11

אטמים במעברי גז במנועי סילון וטורבינות גז בתעשיה הישראלית

דר' רמי שלף,

אטם הנדסה ש.א. בע"מ

<u>רקע</u>

חברת אטם הנדסה ש.א. בע"מ הוקמה בארץ ב-1993 כחברה היחידה לתכנון וייצור של אטמים מכניים, מיסבי החלקה ומכלולים משולבים לתעשיה התהליכית הישראלית – מפעלים כימיים, פטרוכימיים, מתקני מים וביוב, מפעלי מזון, מפעלי תרופות וכד'.

כמתוכנן, אטם הנדסה הפכה לספק משמעותי של מפעלים כמו בתי-זיקוק, מפעלי ים המלח, מפעלי רותם, מפעלי מכתשים - אגן ודומיהם.

בשנה האחרונה, לקראת מלאת עשור להקמת החברה, רבו ההזדמנויות לעבודה מול גורמים ותעשיות ביטחוניות – חיל הים ומערכות הנעה, עשות אשקלון ומרסני טנקים, מנועי בית שמש ומנועי סילון קטנים, וכן אורמת וטורבינות בתחום האנרגיה.

פעילות "אד-הוק" זו הביאה להחלטה להפנות משאבים סדורים לכוונים אלה במטרה להיחשף לתעשיות וגורמים בתחום הביטחוני בכלל ובשדה הטורבינות בפרט.

<u>טכנולוגיות ישימות</u>

1) השיטה הוותיקה והרחבה ביותר באטימת מעברי גז הינה אטמי מבוך – Labyrinth Seals. יתרון השיטה בפשטותה לייצור, בבסיס הנתונים הרחב הזמין לחישוב ביצועים ובעלותה הנמוכה. חסרון השיטה נעוץ בביצועים נמוכים (זליגה גבוהה) הכרוכים בהגדלת ההפסדים הפרזיטיים של המכונה.

אטמי מבוך מיוצרים ככלל ע"י יצרני הטורבינות ואינם מצריכים יידע מיוחד.

2) שיטה וותיקה אחרת הינה שימוש באטמי מרווח הקפיים - Clearance Seals. שיטה זו מקובלת בעיקר במנועים קטנים באטימת בתי מיסבים. יתרון השיטה בפשטותה ההנדסית, בפשטות חיזוי הביצועים וברמות אטימה גבוהות מאד יחסית לאטמי מבוך.

חסרון השיטה נעוץ בצורך בייצור קפדני ומדויק ובישימות לקטרים קטנים – לערך עד "4.

אטמי מרווח הקפיים מיוצרים ככלל ע"י יצרני אטמים מכניים.

3) שיטה יחסית מודרנית אך עם נסיון מבצעי רחב דיו מתבטאת באטמי מברשת - Brush Seals. אטמי מברשת מיושמים כיום בצורה גורפת למדי ומחליפים אטמי מבוך במנועי סילון ובטורבינות גז וקיטור קרקעיות. יתרון אטמי המברשת בבקרת זליגה משופרת (1/2 עד 1/10 מאטמי מבוך מסורתיים) להקטנת ההפסדים הפרזיטיים של הטורבינה וסלחנות למצבי מעבר (Transients) שאינה קיימת באטמי מבוך קשיחים.

אטמי מברשת מיצרים כיום ע"י כמה יצרי מנועים ושתי חברות אטמים.

בחברות אורמת טורבינות בע"מ ומנועי בית שמש בע"מ הובע עניין גבוה בבחינת אטמי מברשת ליישומים שונים. בחברת אטם הנדסה הידע והרצון ליישם טכנולוגיות של אטמי מרווח הקפיים ואטמי מברשת ביישומים מתאימים בתעשיה הישראלית, הביטחונית והאזרחית כאחת.

הרצאה מס' 12

מנוע סילון זעיר - CS-TRAER Micro Jet Engine

מר אלכס שוסטרמן, מר דני לוין, מר סטניסלב גלייזר, מר ולנטין אוגנב, מר יאיר גורדון,
הפקולטה להנדסת אוירונוטיקה וחלל, טכניון

מטרת הפרויקט הינה תכן ויצור של מנוע סילון קטן במסגרת פרוייקט גמר בפקולטה להנדסת אווירונאוטיקה וחלל בטכניון ע"י קבוצת סטודנטים הנמצאים בשלבי סיום של התואר. במהלך הפרוייקט, סטודנטים צריכים ליישם את מה שנלמד במהלך התואר, וכמו כן ללמוד דברים חדשים הרלוונטיים לביצוע הפרויקט.

תכן המנוע נעשה תחת מספר אילוצים, כגון מגבלת קוטר חיצוני של 100 מ"מ, ודרישה ליחס דחף משקל מינימאלי של 5. היחס המשוער שהתקבל לבסוף הינו גדול מ-6. מסת המנוע המשוערת הינה 1.4 ק"ג, דחף משוער של 9.5 ק"ג.

תהליך התכן התחלק למספר שלבים שנעשו במקביל, תחת דרישה לתיאום מתמיד ביניהם:

- תכן וייצור של המדחס הצנטריפוגלי החד שלבי. חישוב וייצור שלב הסטטור (רדיאלי וצירי) והכונס, תוך התאמתם לרוטור (אימפלר) קיים (Turbonetics Inc.). תהליך כלל סריקת לייזר תלת מימדית של גלגל האימפלר.
- אנליזת סיבובים קריטיים של המכלול המסתובב (מדחס – ציר – טורבינה) בעזרת תוכנת אלמנטים סופיים. מטרת האנליזה הייתה להשיג תחום עבודה "נקי" מתדרים עצמיים, ע"י שינוי פרמטרי הציר ומיקום המיסבים.
- תכן ויצור של מרססים זעירים עבור המנוע, כולל בדיקת יעילותם במערכת Phase Doppler Anemometry.
- חישוב בסיסי של תא השריפה כולל ביצוע ניסויי בעירה עבור דגם מוקטן של התא (1 ל- 6 לפי ספיקות) שכלל מרסס אחד.
- תכן של טורבינה חד שלבית צירית ונחיר המשולב עם מעטפת חיצונית, תוך ביצוע אנליזת חוזק בעזרת תוכנת אלמנטים סופיים.

לאורך הפרויקט נעשה שימוש בכלי אנליזה ותיב"ם מתקדמים – Ansys, Solid Works.

הפרויקט נעשה עם העזרה של אנשי מעבדה למנועי סילון, אנשי בית המלאכה ואנשי מעבדת תיב"ם בפקולטה להנדסת מכונות.

הרצאה מס' 13

שיפור יעילות של מנועי סילון וטורבינות תעשייתיות בעזרת ציפוי חלק על חלקי מדחס

מר אלכס סירוטה,

ראש המעבדה הכימית, מפעל מנועים, תע"א

עם עליה בחספוס פני השטח באזור מעבר הגזים, יורדת יעילות המדחס. בדרך כלל עליה בחספוס פני השטח מיוחסת לתופעה הנקראת fouling. תופעה זו מתפתחת במספר דרכים:

החלקים מחלידים ותוצרי קורוזיה מחספסים את פני השטח;

חלקיקים שונים נשאבים לתוך המנוע ונדבקים לפני השטח ;

אדי לחות מתעבים ולאחר ההתנדפות נשארים גרגרי מלחים.

הצטברות משקעים אלה גורמת לחספוס פני שטח באזור מעבר גזים, ירידה בזרימת האוויר וירידה ביעילות המנוע.

יצרני מנועי סילון משתמשים בציפויים שונים עבור חלקי פלדה במדחסים כדי להגדיל אורך החיים של החלקים ולשפר יעילות המדחס. למשל, ציפויים קרמיים על בסיס אלומיניום משמשים למטרה זו קרוב לארבעים שנה. במשך הזמן הזה גם החומרים וגם שיטות היישום עברו שורה של שינויים במטרה לשפר את איכות הציפוי.

בהמשך נציג ציפוי על בסיס אלומיניום-סיליקון בעל תכונות משופרות, אשר מקטין התפתחות החספוס (fouling) על חלקי מדחס במנועי סילון. ניסיון רב שנים מוכיח, שציפוי זה מגן על החלקים החדשים ומאפשר שיקום חלקים משומשים. בשנת 2002 מפעל מנועים קיבל הסמכה ליישום תהליך זה.

הרצאה מס' 14

הערות ולקחים מתהליכי פיתוח מנועים בארץ

מר עמנואל ליבן,

עדמטק

1. בכל תהליך פיתוח קיימים קשרי גומלין בין דרישות הלקוח לבין תקציבים ואילוצים שונים אשר בסופו של דבר משפיעים על הפתרון ולוח הזמנים.

תהליך הפיתוח במנועים הוא ארוך מאוד, וקיימת חשיבות גדולה מאוד ליישום הניסיון המצטבר בעת קביעת תצורה מתוכננת.

תהליכים אלו הם מאוד יקרים במשאבים ובזמן, ולכן חשוב ביותר לסיים את הפיתוח "במחזור אחד".

אפשר להגיע ליעד זה אם בתחילת הפיתוח ינוסח מפרט שקול ומאוזן המשקף בצורה נכונה את הצרכים של הלקוח, ואם נדע ונכיר את האמצעים, המשאבים והיכולות העומדים לרשותנו.

2. בין המרכיבים המפרטיים אפשר למנות את:
   - ביצועים (מפרט טכני).
   - מחיר הצטיידות ו-LCC.
   - ממשקים לכל הטיס.
3. מבין מרכיבי האילוצים, ניתן למנות את:
   - התקציב ופריסתו.
   - לו"ז ואבני דרך.
   - כ"א מקצועי.
   - אמצעים/משאבים.
   - ניהול ומנהיגות טכנית.
   - שת"פ עם הלקוח.
4. הערכת חסר או הגזמה באחד מהמרכיבים האמורים לעיל יפגעו בתכנית ויגרמו לפיגורים, הפסדים כספיים, סבבי פיתוח חוזרים ואי שביעות רצון הלקוח.
5. בהרצאה יודגמו מספר תהליכי פיתוח אמיתיים שבוצעו בתקופה האחרונה אשר יעזרו להבין את החשיבות של קיום ותזמון נכון של קשרי הגומלין הנ"ל.

בין הדוגמאות יוצגו:

- פיתוח משאבת דלק.
- תהליך הצתה.
- אלטרנטור.

6. כמו כן, תערך השוואה בין תהליך רצוי לבין המציאות לשם הפקת הלקחים.