



הנדסה ואדריכלות

עתון אגודת האינג'נרים והארכיטקטים בישראל

JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF
ENGINEERS AND ARCHITECTS IN ISRAEL



בטיחות בתכנון ומונע טורבינה תעשייתית המבוסס על מונע תעופותי

י. סינאי, י. רוזביץ, מ. הירש, מנועי בית-שמש בע"מ

Design Problems of an Industrial Gas Turbine Engine Derived from an Aircraft Gas Turbine Engine

J. SINAI, J. ROZEWICZ, M. HIRSCH, Bet-Shemesh Engines Ltd.

The 800 KW industrial turbine of Bet-Shemesh Engines was developed with use of aircraft engine components and technology; however the accent has been placed upon simplicity, low price and a short development time.

Examples of some aspects of the design are as follows:

The design of the part of the engine downstream the gas generator emphasized the use of existing hardware.

A special analysis of the reduction gear with respect to the approach and recess points on the gears was required because of their high speeds.

A mathematical model of the engine with its control system was developed to evaluate the stability of the complete engine at various operating conditions. The control system includes components from existing engine controls. It provides fuel limiting during acceleration and control of requested free turbine speed as well as top speed limiting of the gas generator.

The stator vanes of the free turbine represent a new aerodynamic design. The stators were designed to be compatible with existing rotor blades from a different engine.

סימונים

תמסורת הפחיתות

- k_{pt} — יחס לחצי המגע בגלגל השיניים הקטן.
- k_{st} — יחס לחצי המגע בגלגל השיניים הגדול.
- N_p — מספר השיניים בגלגל הקטן.
- S_{pt} — מהירות החלקה יחסית בשורש השן של הגלגל הקטן.
- S_{st} — מהירות החלקה יחסית בשורש שן הגלגל הגדול.
- x_p — מקדם תיקון פרופיל השן.
- α — זווית הלחץ.
- β — זווית השיפוע של גלגלים המשופעים.
- i — יחס תמסורת.

מודל המנוע

- f_t — מומנט האינרציה של גל יצרן הגז.
- J_t — מומנט האינרציה של גל הטורבינה החופשית.
- $s = \frac{d}{dt}$ — משתנה לפלס עבור תנאי התחלה שווים לאפס בפונקציות התמסורת.

ערכים אינרמנטלים של פרמטרים במערכת,

Steady State נתון

- $v_t = \delta (T_t)$ — טמפרטורה טוטלית.
- $p_t = \delta (P_t)$ — לחץ טוטלי.
- $h_t = \delta (H_t)$ — קצב ספיקת אנתלפיה טוטלית.

כאשר :

- $i = 0$ — זניסת אויר ליצרן הגז.
- $i = 2$ — יציאת אויר ממדחס יצרן הגז.
- $i = 3$ — יציאת גזים מתא השריפה.
- $i = 4$ — יציאת גזים מטורבינת יצרן הגז.
- $i = 5$ — יציאת גזים מהטורבינה החופשית.

- $p_{in} = \delta (P_{in})$ — לחץ דלק בכניסה לזוסת ההחשה.
- $g'_a = \delta (G'_a)$ — ספיקת אויר במדחס.
- $g'_e = \delta (G'_e)$ — ספיקת גזים בטורבינה.
- $g'_t = \delta (G'_t)$ — ספיקת דלק.
- $n_t = \delta (N_t)$ — מהירות סיבוב יצרן הגז.
- $n_n = \delta (N_n)$ — מהירות סיבוב הטורבינה החופשית.

- $h'_t = \delta (H'_t)$ — הפרש בין קצב מפל אנתלפיה טוטלית בטורבינת יצרן הגז והמדחס.

- M_t — מומנט (אי-איוון) על גל יצרן הגז.
- $m_t = \delta (M_t)$ — מומנט העומס על גל הטורבינה החופשית.
- $r_t = \delta (R_t)$ — מצב פתיחת מצערת דלק של יצרן הגז.
- $r_n = \delta (R_n)$ — מצב פתיחת מצערת דלק של זוסת הטורבינה החופשית.
- $z_t = \delta (Z_t)$ — שיעור פתיחת מעבר הדלק בזוסת האיזודרומי.

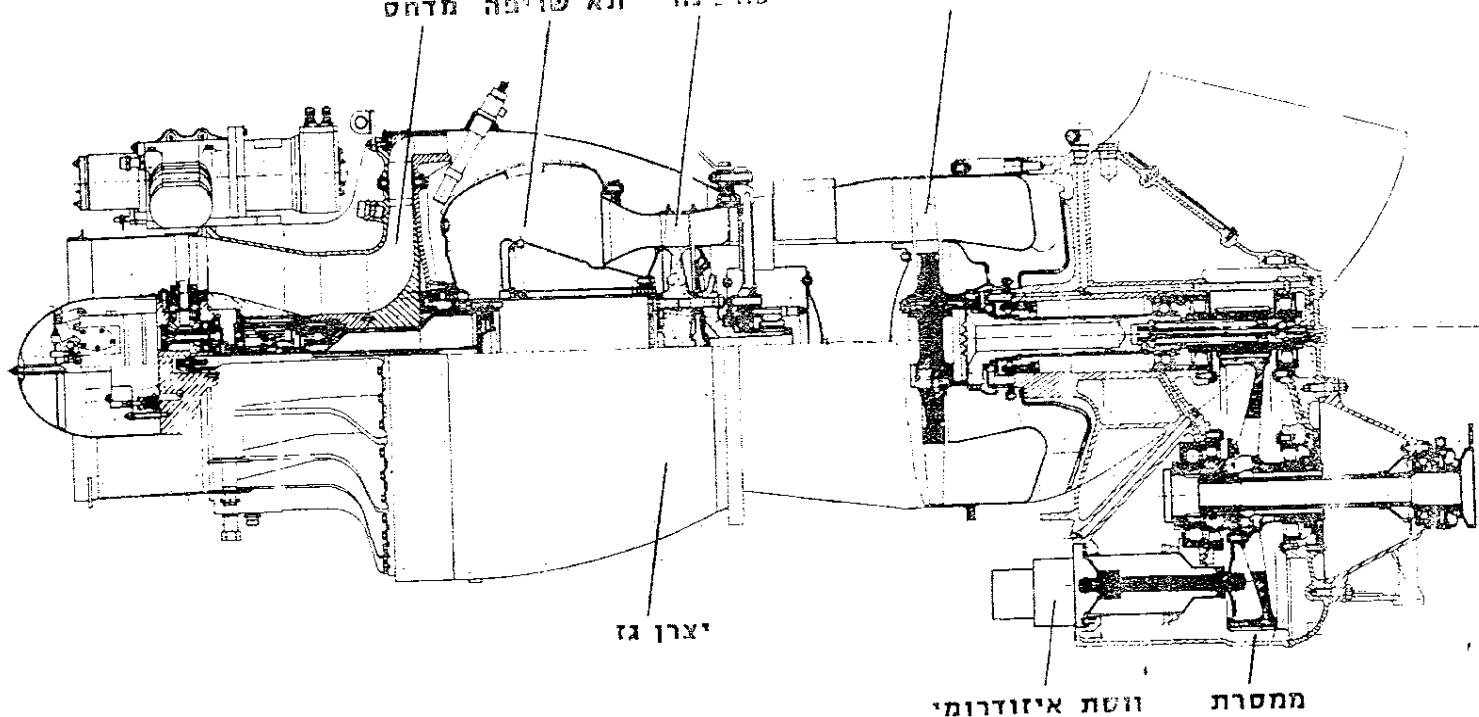
- $T_{at}, \tau_{at}, T_a, \tau_a, T_t, \tau_t, T_n, \tau_n, \tau$ — קבועי זמן בפונקציות התמסורת.
- $k_a, k_t, k_z, k_i, k_n, k_n, k_L$ — הגברים בפונקציות התמסורת.

1. מבוא

המשימה שמפעל מנועי בית-שמש נטל על עצמו הייתה לפתח טורבינת של 800 קו"ט שתשמש כמנוע ליחידות לשעת חרום או ליחידות במיתקנים משולבים (הספק וחום). כמה עקרונות הנחו את המפעל במבצע זה :

- המנוע חייב להיות זול, פשוט ובעל גפח קטן.
- פיתוח במחיר נמוך ובזמן קצר.
- שימוש בחלקים קיימים ובטכניקות וכלים המיוצרים במפעל או במפעל האם "טורבומכח".

טורבינה חופשית טורבינה תא שריפה מדחס



ציור מס' 1: חתך כללי — מנוע טורבינת גז 800 kW

ג. הספק גומינלי;

ד. שימוש באחד מסוגי הכפות הקיימים בייצור ב"טורבומכח".

ה. מהירות סיבובים (המתייחסת להנחות בתיכנון התמסורת).

ביצוע הפרויקט היה תלוי בתיכנון דרגת טורבינה שתענה על ההנחות שהנחנו בתיכנון דרגת טורבינת קיימות כידוע שתי בעיות טיפוסיות [1]:

1. בחירת נזירים ופרופילים לקסקדת כפות שיתנו את האפקטים הארוטרמודינמיים הנדרשים (בעיית "הפוכה").

2. חישוב ביצועי הדרגה ומציאת הפרמטרים של הנרימה בפרופיל הקסקדות הנתון (בעיית "ישרה").

במקרה הבדון נאלצנו להשתמש באופן חלקי בשיטה "הפוכה" ובאופן חלקי בשיטה "ישרה". נאלצנו להתאים לקסקדת הרוטור הקיימת את הפרופילים של הנזירים. חישובים ארוטרמודינמיים של הדרגה נעשו בשיטת trial and error בהחלפת הפרמטרים שניתנו לבחירת הפרמטרים שהחלפו היו: הקוטר הממוצע של הדרגה, גובה הלהבים, ודרגת הריאקציה. המגבלות שהיו לפרמטרים אלה נבעו ממפל האנטלפיה הדרוש לקבלת הנצילות הדרושה וכמו כן מתנאי חוק הנובעים מצורת הכפות הקיימות. החישובים הארוטרמודינמיים בשלב הראשון נעשו לזרימה דו-מימדית לפי הקוטר הממוצע. צורת ומידת הקוטר הממוצע נבחרו על סמך חישובים רביי-משתנים שנעשו בעזרת מחשב. אחרי זה נעשו חישובי זרימה קווי-תלת-מימדית לשבעה קוי זרימה.

כפי שידוע, חישובים ארוטרמודינמיים שמשמשים בהם למעשה מתבססים על הנחות המתייחסות לתנאים קיימים בשכבת גבול. הנחות מסוג זה מתבססות במידה רבה על השערות כלליות. נכונות השערות אלה נבדקת בצורה ניסיונית. כפי שהוזכר לעיל, מבחינות כלכליות נאלצנו להגביל את משך התיכנון והביצוע של הפרויקט. לכן בוטלו הניסויים הארוטרמודינמיים של רכיבי הטורבינה, ובמקום זה הוחלט להכין שלושה סוגי סטטור לאב-טיפוס הטורבינה שהניסויים בהם ייעשו ביחד עם המערכת כולה. דבר זה התאפשר על-ידי טכניקת יציקה מדויקת אשר בה הכלי העיקרי משותף ל-3 הסוגים.

עד עתה נעשו הניסויים רק לסוג אחד של סטטור. במקרה זה התקבל הספק של 790 קו"ט (מתוקן לתנאים סטנדרטיים). אפשר לצפות שאחרי

לתפקידיו המיועדים של המנוע — הנצילות והמשקל הם רק גורמים מישניים. יצרן הגז שנבחר דומה מאוד למנוע המסוג "פוגה" — מנוע פשוט (מדחס אחד וטורבינה אחת), שכבר נבנה לאלפים במשך שנים רבות, מחירי הפיתוח והכלים שלו כבר שולמו והוא הוכיח את עצמו כאלפי מנועים.

החלק השני — טורבינת הספק, ממסרת ומערכת ויסות, תוכנן במנועי בית-משל לפי עקרונות דומים למנועים העופתיים, אך שונה לסם הוזלת מחיר הייצור והפיתוח. להלן יובאו מספר דוגמאות משיקולי התיכנון של המערכות הנזכרות. הסקירה אינה כוללת את כל בעיות התיכנון — אלא רק מספר דוגמאות בהן התיכנון היה שונה מהמקובל.

2. ארוטרמודינמיקה של הטורבינה החופשית

הצד הארוטרמודינמי בפרויקט זה המתייחס לבעיות הבסיסיות הבאות:

1. טורבינה חופשית להחלפת אנרגיה תרמית של גזים היוצאים מייצור הגז לאנרגיה מיכנית;
 2. צינור עליטה לגזי השריפה;
 3. צינור המחבר את יצרן הגז עם טורבינת כוח.
- הבעיה הראשונה הצריכה פתרון בתחום העיצוב עקב מגבלות שנכללו בפרויקט. שתי הבעיות האחרות הינן בעיות טיפוסיות בתיכנון מנועי טורבינת גז.

יצרן הגז הוא מערכת בסיסית של מנוע סילון המיוצרת החף המקביל לאנרגיה איזותרמית של גזי שריפה בגודל של 935 קו"ט. על מנת לקבל כוח של 800 קו"ט היה צורך לתכנן טורבינה חופשית בעלת נצילות אפקטיבית של 85%—86%, דבר המצריך כ-87% נצילות איזותרמית. בחינות כלכליות אילצו אותנו להשתמש במנוע החדש ברכיבים ממנועים הנמצאים בייצור החברה "טורבומכח". הרכיב העיקרי שכדאי היה להשתמש בו היה כפות הרוטור. כידוע, תיכנון וביצוע של קסקדת הרוטור מתווה עומס גדול מבחינת תיכנון, ניסויים ארוטרמודינמיים וקביעת הטכנולוגיה לייצור.

לאור האמור לעיל, הנחנו בפרויקט זה את ההנחות הבאות:

- א. פרמטרים תרמודינמיים של הנרימה;
- ב. ספיקה הנרימה;

קשיח של הגלגל הקטן ומיבנה צלחת קוגית של הגלגל הגדול, מיסבים קרובים לגלגל.

אשיבות מיוחדת יש לבלאי בנקודות הפגיעה וההיפרדות של השיניים. בלאי זה מושפע מאוד על ידי תיקון פרופיל השן, ולמעשה תיקון הפרופיל המתאים נבחר כתוצאה משיקולים אלה (ראה נספח א'). בתמסורות תעשייתיות ואוטומטיביות נהוג לבחור תיקון פרופיל המשווה את ההחלקה היחסית בשתי הנקודות — הפגיעה וההיפרדות. בתמסורות תעופתיות מהירות מגדילים את תיקון הפרופיל בעיקר כדי להקל על הגלגל הקטן (המניע). לשם קביעת תיקון הפרופיל בממסרת הנדונה נחקרו מקרים של שבר ובלאי בממסרות תעופתיות רבות. נבדק ההבדל במושג "אורך חיים" בתנאים תעופתיים ותעשייתיים — בתנאים תעופתיים פירושו אורך החיים של הגלגל החלש ביותר בסדרת הייצור. כתוצאה מבדיקות אלו, נבחר תיקון פרופיל קטן במקצת מהמקובל בממסרת תעופתית (אך גדול מהמקובל בממסרת אוטומטיבית) ועל ידי כך התאפשרה הקלה בדרישות הדיוק הגיאומטרי והמטלורגי (קשיות ועובי השכבה הקשה) של הגלגל הגדול.

3.2 חיבור בית הטורבינה לממסרת

המיבנה המקובל, המונע היתפסות של הטורבינה אחרי הדממה ומונע עיוותים גדולים עקב המאמצים התרמיים, הוא מיבנה של דופן כפולה והרמוניקה.

במקומו נבחר מיבנה יותר פשוט וקל לייצור — חיבור 3 סנדלים גמישים ובידוד על בית הטורבינה. הבידוד מונע התקררות מהירה אחרי הדממה והסנדלים הגמישים מאפשרים שהרור מסוים של המאמצים התרמיים. פשרה זו דרשה הגדלה מסוימת במידות הטורבינה.

3.3 מיבנה החלק האחורי

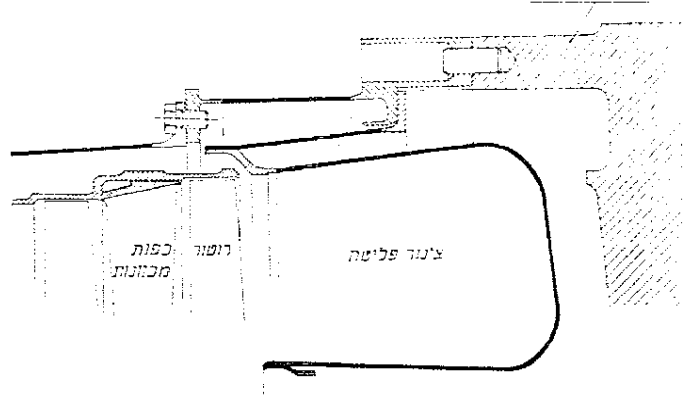
נבדקו 3 סוגים עקרוניים של מיבנה:

מיבנה א' מאפשר חופש בתיכנון הממסרת, אך הוא ארוך ודורש גל ארוך וצינור פליטה לא פשוט, עם אטימה.

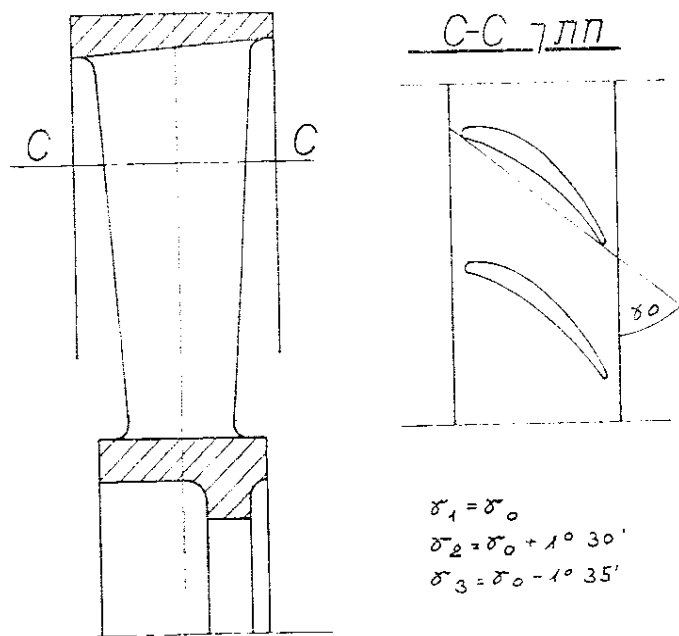
מיבנה ב' הוא קומפקטי, מתאים לממסרת עם דרגת הפחתה אחת, אך דורש צינור פליטה מסובך מאוד מטיפוס מכנסיים.

מיבנה ג' הוא הגדול ביותר בפנחו, אך מאפשר צורה פשוטה של צינור פליטה הבנוי רק מחלקי קונוסים; הוא מתאים לממסרת רדיאלית. בגלל שיקול של שימוש בכלים קיימים (מודליציקה, מיתקני ייצור ומדידה לבית הממסרת) הוחלט להשתמש במיבנה ב' לממסרת בעלת יחס הפחתה 6:1. במקרה של דרישה ליחס 12:1 יהיה צורך ב-2 דרגות הפחתה. במקרה זה, ממסרת רדיאלית שהיא מאונחת וקומפקטית עונה על הדרישות וגם אינה יותר יקרה מממסרת רגילה (מהיר גלגלי שיניים עולה הרבה עם הקוטר) ולכן המיבנה המתאים יהיה מיבנה ג'.

בית הממסרת



צינור מס' 3: חיבור התפשטות על עקרון הרמוניקה



צינור מס' 2: נחירי הסטטור של טורבינה חופשית

השלמת כל הניסויים נשיג, או אמילי נעבור את ההספק שהנחנו בהחלטה: 800 קו"ט.

3. בעיות הממסרת ומיבנה כללי

3.1 ממסרת

מיבנה החלק האחורי של המנוע: לזוי הרבה בעקרון הממסרת ולהיפך. מהירות הטורבינה החופשית היא 18 000 סב"ד. נבדקו שני יחסי המסורת: 1:6 ליציאה של 3000 סב"ד ו-1:12 ליציאה של 1500 סב"ד — מהירויות המתאימות לגנרטורים 50 הרץ.

לממסרות כאלה ישנם שני סוגי פתרונות — הממסרת התעשייתית שהיא מגושמת וכבדה והממסרת התעופתית שהיא יקרה ודורשת דיוק רב בייצור. הוחלט להשתמש בממסרת תעופתית הדומה לזו של הליקופטר, אך לשם הוזלתה בוצעו כמה שינויים וביניהם:

— בית הממסרת מברזל יציקה (ולא אלומיניום כמו בהליקופטר);

— הקלת מה בדרישות הדיוק הגיאומטריות והמטלורגיות של הגלגל הגדול, כפי שנראה להלן.

בממסרת שנבחרה, המהירות הוויקפית של השיניים היא גבוהה — 55 מ' בשניה. בסוג כזה של ממסרת יש לחשב בעיקר את עמידות השן בבלאי, כתוצאה משתי התופעות:

(A) Scuffing (Scoring) — שהיא מעין גלוח של השיניים כתוצאה מהחירית החלקה יחסית גבוהה הגורמת לקריעה זמנית של שכבה חשוכה;

(B) Pitting — חורים קטנים הנוצרים בחומר באופן מקומי כתוצאה מלחץ מגע גבוה.

להקטנת הבלאי מתופעות אלה יש להבטיח:

א. איכות ייצור טובה — חומר מתאים, דיוקים בייצור הגלגלים ובמרחק בין המרכזים, טיב שטח, שגיאות פרופיל מינימליות, קשיות וטיפול תרמי נכונים, מניעת מיקרוטזקים של השחחה מרביות של המיסבים.

ב. מגע טוב לכל אורך השן — על ידי דיוק בזווית המעלה, שהרור הגלגלים מהכפיפה של גלי יציאה וכניסה — למשל על ידי חיבור משונן, מינימום הפרשי שקיעות לאורך השן — למשל על ידי מיבנה

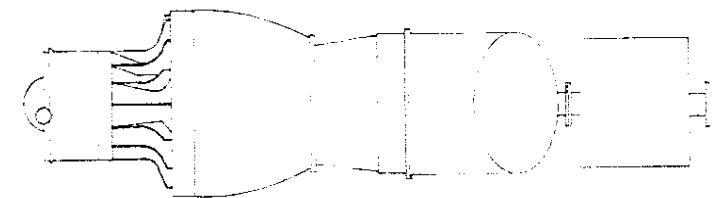
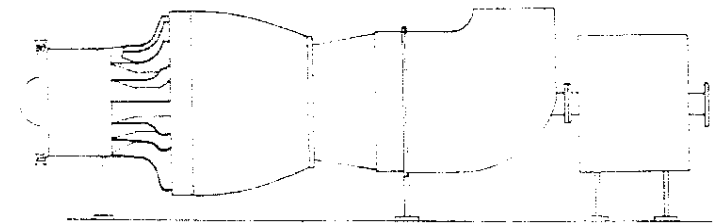
ציור מס' 7: מיבנה ג'

צייר מוסי' 8 : תיאור כללי של מערכת מנוע טורבינה חופשית

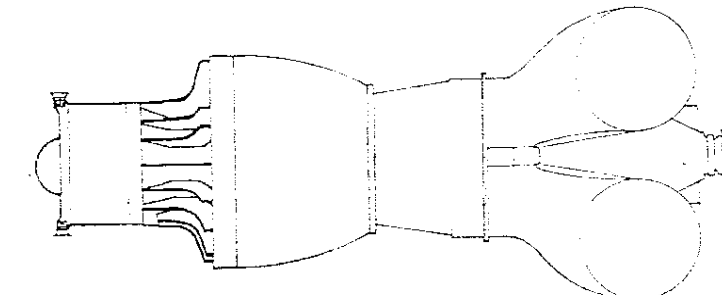
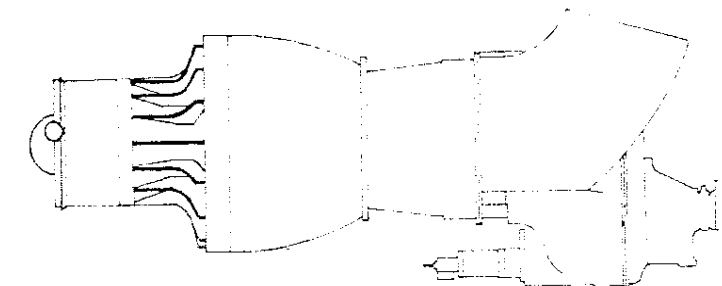
ציור מס' 9: תיאור מערכת הדלק

ציור מס' 10: מודל מערכת הויסות + מנוע

ציור מס' 4 : חיבור התפשטות עם סנדלים



ציור מס' 5 : ג'ימנה א'



ציור מס' 6: מלכנה ב'

4. מערכת הויסות

— החלק הבלתי-ליניארי, העונה על בעיות יציבות ותופעות מעבר לגבי התנעה ושינויים גדולים בעומס.

הדיון שנביא להלן, מתייחס לחלק הליניארי שבמודל. פיתוח המודל, דרש תיאור התהליך הדינמי של המנוע מצד אחד, ושל מערכת הויסות מצד שני, כך שתענה על ספציפיקציות שהמנוע נדרש לעמוד בהן.

4.3.1 מודל המנוע

משוואות התהליך התקבלו מתוך הקשרים בין הפרמטרים התרמו-דינמיים והדינמיים השונים באמצעות מפה משוערת של ביצועי המנוע ב-S.S. לגבי מדחם וטורבינת-היצרן, תא השריפה, הטורבינה החופשית וצינור הפליטה, וכן מתוך שיקולי דינמיקה עבור:

— השפעת האינרציות של רוטור יצרן הגז, רוטור הטורבינה החופשית והעומס, לגבי תאוצה או תאוצה.

— השפעת קיבול הנפח של תא השריפה לגבי הצטברות או התפרקות מסת הגזים בו.

— השפעת קיבול החום של תא השריפה.

קבלנו 12 משוואות תהליכים המקשרות בין הפרמטרים הבאים:

$$p_0; t_0; p_0; t_0; \left(\frac{dt_0}{dt} \right); p_1; t_1; p_1; t_1; g'_1; g'_1; \left(\frac{dg'_1}{dt} \right); \\ g'_1; n_1; \left(\frac{dn_1}{dt} \right); n_2; \left(\frac{dn_2}{dt} \right); m_2$$

כינוס המשוואות הביא לידי משוואת תהליך כדלקמן:

$$n_2 = n_2(m_2, g'_1, t)$$

$$n_1 = n_1(m_1, g'_1, t)$$

התקבלו משוואות דיפרנציאליות מסובכות מסדר גבוה.

מתוך חישוב ראשוני של המקדמים בפונקציות הנ"ל, התברר כי ניתן להנחיה חלק מהם, מבחינת סדר גודל; אלה הם מקדמי הגזרות הגבוהות הנובעים ממקדמי קיבול תא השריפה למסת ולחום.

הדבר אמור לגבי תחום הדינמיות תנודת המערכת של עד כ-100 c.p.s.

גורם נוסף המביא לידי פישוט, הוא ענין הצימוד בין פרמטרים ביצרן הגז לפרמטרים בטורבינה החופשית. בחישוב ובניסויים שערכנו, התברר כי שינויים בביצועי הטורבינה, בחוג פתוח, כמעט ואינם משפיעים על פרמטרי הגז ביציאת טורבינת יצרן הגז.

ניתן היה, איפוא, להנחיה את הצימוד בין יצרן הגז לבין הטורבינה החופשית, ואז במקום להשתמש במונחים של פרמטרי ספיקה, טמפרטורה, לחץ וכו' — בכניסה לטורבינה החופשית, יכולנו להשתמש במונח הכולל יותר של: אנתאלפית גזי הפליטה של יצרן הגז המסופק לטורבינה החופשית כמקור אנרגיה בלתי תלוי בביצועיה בחוג פתוח (ללא מערכת הויסות).

(ראה נספח ב'-1).

4.3.2 מודל מערכת הויסות

(ראה נספח ב'-2).

דימוי מערכת הויסות, אופיין על-ידי פונקציות התמסורת של הרכיבים השונים המקשרות בין הפרמטרים הבאים:

$$n_1; n_2; \left(\frac{dn_1}{dt} \right); g'_1; r_1; r_2$$

$$g'_1 = g'_1(n_1, n_2, r_1, r_2, t) \quad \text{כך ש:}$$

4.3.3 מודל כולל (מנוע בצורה מערכת הויסות)

(ראה נספח ב'-3).

המודל הכולל התקבל כתגובת שינוי במהירות סיבוב הטורבינה החופשית או יצרן הגז לשינויים בעומס ובמצעיות:

$$n_2 = n_2(m_2, r_1, r_2, t)$$

$$n_1 = n_1(m_1, r_1, r_2, t) \quad \text{יצרן הגז:}$$

4.1 בעיות פיתוח מיוחדות

בפיתוח מערכת הויסות, הוצבו שתי בעיות:

— אפשרות תמרון גדולה על מנת לקצר את זמן הפיתוח ולא להכות לתיכנון סופי עד למדידת נתונים של המנוע.

— שימוש ברכיבים זולים.

פתרון הבעיות ניתן על-ידי:

— שימוש ברכיבים קיימים עם שינויים מתאימים להגדלת אפשרות הכיוון שלהם.

— פיתוח אנאליטי של מודל דינמי המאפשר איתור מתיר של השפעת פרמטרים שונים.

4.2 תיאור המערכת ורכיביה

— מצערת דלק יצרן הגז — מופעלת במצב התנעה לפתיחת מעבר דלק מכסימלי דרכה, מהירות הפתיחה נקבעת על-פי שיקולים של קצב האצה דרוש של המנוע תוך שמירה על יציבות דינמית.

— משאבת דלק — מופעלת באמצעות ממסרת מיכנית מגל יצרן הגז. המשאבה מאופיינת בכך שבמחזוריות הביניים הלוחות ספיקת הדלק במהירות הסיבוב שלה, בעוד שבמהירות הגבוהות אין השפעה של מהירות סיבוב המשאבה (בגלל אפקט הניקה על-ידי ורימה טורבו-לנטית חזקה), ולפיכך יבוצע הויסות על-ידי הווסתים.

— ווסת מהירות יצרן הגז — פועל באמצעות משקולות צנטריפוגליות הסובבות בהתאם למהירות סיבוב יצרן הגז. עליה במהירות הסיבוב גורמת לסגירה פרופורציונלית של מעבר הדלק, ולהיפך. כאלמנט במערכת הטורבינה החופשית, נועד הווסת לשמש כמגביל למהירות מכסימלית מותרת של יצרן הגז, והשפעתו על דינמיקת הויסות בתחום העליון של המהירות, זניחה.

— ווסת החשה (מגביל החשה) — נועד למתן החשות מהירות מדי של ספיקת דלק ליצרן, בכך נמנעת הצפת תא השריפה בדלק, וכן תופעת ה"Rumbling", כאשר המנוע יוצא ממשטר חורמה שלו. הווסת פועל כך, שכאשר חלה עליית-הדרגה בלחץ דלק בכניסת אליו, הוא סוגר עצמו, ונפתח בפיגור זמן הניתן לכיול; לירידה בלחץ דלק אין הוא מגיב, הוא מופעל על-ידי הדלק עצמו. השפעת הווסת ניכרת בהפעלה מהירה מדי של המצערת בשעת התנעה, או כאשר ישנם שינויים חריפים וגדולים בעומס.

הרכיבים דלעיל שימשו את יצרן הגז גם בהיותו מנוע דחף, והותאמו לדרישות מערכת הויסות הנדושת, הרכיבים הנוספים למערכת הם:

— ווסת איזודרמי (איזוכרמי) — וווסת מופעל בהתאם לסיבובי הטורבינה החופשית באמצעות משקולות צנטריפוגליות המפעילות מערכת סרוו פנימית לוויסות פניית נחיר מעבר הדלק. אופי הווסת הוא אינטגרלי + פרופורציונלי בעל פיגור מסדר ראשון, כך שפתיחת מעבר הדלק + מהירות הפתיחה, יהיו פרופורציונלים לירידה במהירות הסיבוב ביחס לערך הנומינלי, ולהיפך.

האפקט האינטגרלי מאפשר להגיע לשגיאת מצב אפסית במהירות הסיבוב הנומינלית של הטורבינה החופשית עבור שינויים בעומס. האפקט הפרופורציונלי, מאפשר שיפור היציבות הדינמית של כלל המערכת (בחוג סגור) בכל תחום של העומס.

— קובע הפרש לחצים (ΔP const) — שומר על הפרש לחץ-דלק קבוע בין כניסת ויציאת הווסת. לפיכך, ספיקת הדלק בעד הווסת תהיה פרופורציונלית ישירות לשיעור פתיחת נחיר הווסת. פעולת האלמנט היא כזו שכאשר נוצר עודף בלחץ דלק בכניסה לווסת, נפתח מעבר שחרור דלק כך שהלחץ יורד תוצה לערכו הנומינלי.

4.3 מודל דינמי

עקרונית, כולל המודל שני חלקים עיקריים:

— החלק הליניארי, העונה על בעיות יציבות ותופעות מעבר (Transient) כאשר קיימת סטיה אינקרמנטלית ממצב נומינלי (S.S. (Steady State) נתון.

נ ש פ ח א'

לחץ מגע יחסי והחלקה יחסית בנקודות ההיפרדות
והפגישות של השיניים

לחץ המגע, המשפיע על ה-Pitting מחושב לפי משוואות הרץ.
בנקודות ההיפרדות והפגישות משתמשים ביחס k
לחץ מגע בשורש השן
$$k = \frac{\text{לחץ מגע במעגל החלוקה}}{\text{לחץ מגע בשורש השן}}$$

במסגרת להפחתת מהירות, נקודת הפגישות היא בשורש השן של
הגלגל הקטן, המניע, ונקודת ההיפרדות בשורש הגלגל הגדול, המונע. אם
תיקון הפרופיל שווה בגודלו אך הפוך בסמנו בשני הגלגלים, מקבלים את
הנוסחאות כדלקמן ליחס k [2]:
בפגישות, בשורש הגלגל הקטן:

$$k_{pr} = \frac{\sin \alpha}{2A \left[1 + i \left(1 - \frac{A}{\sin \alpha} \right) \right]}$$

ולנקודות ההיפרדות, בשורש הגלגל הגדול:

$$k_{gr} = \frac{\sin \alpha}{2B \left[1 + \frac{1}{i} \left(1 - \frac{B}{\sin \alpha} \right) \right]}$$

כאשר:

$$A^2 = \left[\frac{2(1-x_p) \cos \beta}{iN_p} + 1 \right]^2 - \cos^2 \alpha$$

$$B^2 = \left[\frac{2(1+x_p) \cos \beta}{N_p} + 1 \right]^2 - \cos^2 \alpha$$

תופעת ה-Scoring מושפעת ממהירות ההחלקה היחסית $\frac{\Delta V}{V}$ בשתי
הנקודות הנזכרות, הנוסחאות, בקירוב, הן: (למסגרת הפחתה) [2]
בפגישות, בשורש הגלגל הקטן:

$$S_{pr} = \frac{i+1}{\frac{\sin \alpha}{A - \sin \alpha} - i}$$

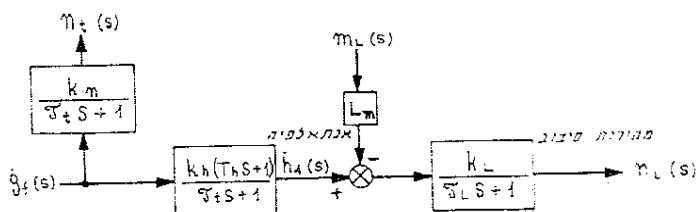
ובהיפרדות, בשורש הגלגל הגדול:

$$S_{gr} = \frac{i+1}{\frac{i \sin \alpha}{B - \sin \alpha} - 1}$$

כדי להקטין את הבלאי בנקודות אלו נשמרו הכללים כדלקמן:

- (1) $k < c_1$
- (2) $S_{pr} \leq S_{gr}$
- (3) $S_{gr} < c_2$
- (4) $S_{gr} + S_{pr} < c_3$

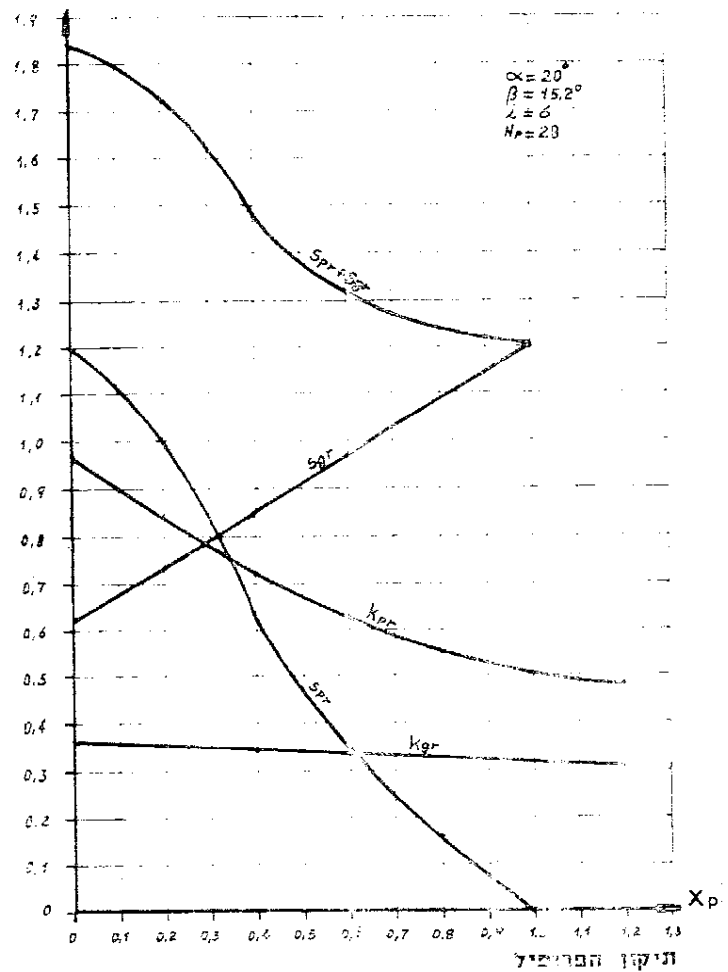
המגבלות c_1, c_2, c_3 נקבעות מהנסיון ותלויות בטיב השטח, הקשיות,
שינויי הקשיות, עומק השכבה הקשה וגו' ונבדקות מיקרו-סקופים.
התלות של יחס לחצי המגע ומהירות ההחלקה היחסית במקדם תיקון
הפרופיל במסגרת הנדונה — נראית בצורה מס' 11.



ציור מס' 12: פונקציות התמסורת של המנוע

S-החלקה יחסית

K-לחץ מגע יחסי



ציור מס' 11: החלקה יחסית ולחץ מגע יחסי כפונקציות של מקדם תיקון הפרופיל

לחץ מגע יחסי כפונקציה של חל שינוי מדרגה בעומס בעוד המצטרות
קבועות במצבן הנוכחיות.

$$r_m = r_r = 0$$

$$m_L \neq 0$$

התקבל, שכאשר האפקט הפרופורציונלי בוטל היה חזק יותר, היתה
קיימת השפעה על אייזוציות מהירות חסיבות של היצרן (נכנס ל-
Hunting) הדבר טותר את מטרת האפקט הפרופורציונלי שנועד להגדיל
את יציבות המערכת.

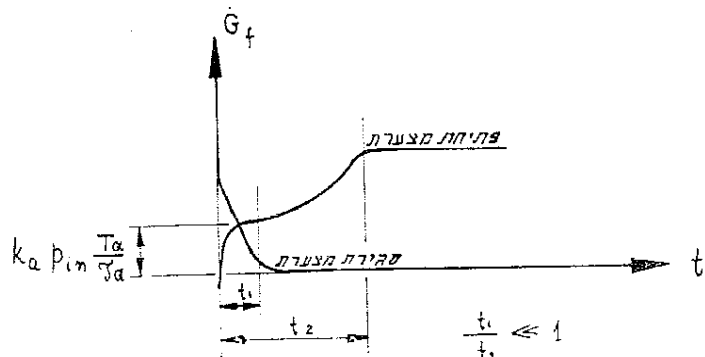
בבדיקה חישבונית וחבר, כי הגורם המפריע היה דווקא ווסת ההחשה
שאף הוא נועד למתן תזוזות מהירות של דלק, אלא שנוצר אפקט לא
סימטרי: כאשר מעבר הדלק מוסת האיזודרומי נפתח ($z, z' > 0$) עלה
לחץ הדלק, ווסת ההחשה נפתח בפיגור זמן, בעוד שבכיוון הפוך אין לו
השפעה. האפקט גורם לאי-יציבות חזקה ולאייזוציות.

ניתן היה להתגבר על בעיה זו על-ידי שינוי מעבר הדלק בווסת
האיזודרומי כפונקציה של מידת הפתיחה, כדי להחליש השפעה חזקה על
ווסת ההחשה. על-ידי כך ניתן היה להגדיל את האפקט הפרופורציונלי
בווסת וכן להאיש את מהירות הפתיחה שלו. ואמנם, התקבלה יציבות בכל
תחום של שינויי עומס (דיון אנאליטי מובא בנספח ב').

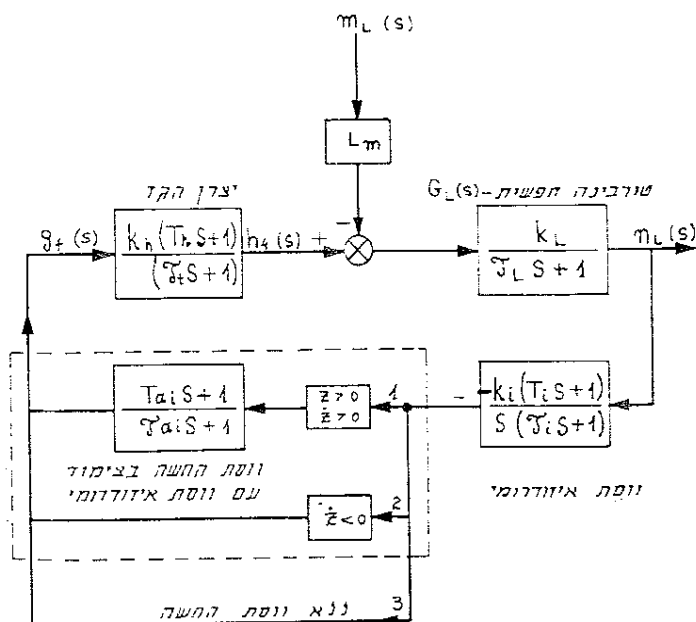
המודל המוצג יכול לתוות בסיס לזישוב ראשוני, בקירוב טוב, מודל
מורכב יותר גבוה על-ידינו חישבונית וכן מעשית — בניסויים.

$$g'_{\tau}(s) = k_s \frac{T_s s + 1}{\tau_s s + 1} P_{in}(s)$$

$p_{in}, p'_{in} > 0$	כאשר	$\frac{T_a}{\tau_c} < 1$
$p_{in}, p'_{in} \leq 0$	כאשר	$\frac{T_a}{\tau_c} \approx 1$


$$z_1 \frac{dz_1}{dt} + z_1 = k_2 (T_1 n_L + \int n_L dt)$$
$$g'_z(s) = \frac{-k_i (T_i s + 1)}{s (T_i s + 1)} n_z(s)$$
$$g'_1(s) = k_1 \cdot z_1(s) : k_1 = k_2 k_2$$

ציור מס' 14: תגובת הווסת האינדורמי לפונקציית מדרגה
בשינוי סיבובי הטורבינה החופשית



ציור מס' 15: פונקציית התמסורת של מערכת הויסות + המנוע הנפעל
לשינוי בעומס

כאמור לעיל, מכיל המודל המורכב את משוואות התהליכים של כל האלמנט בנפרד : מדחס יצרן תגז, תא השריפה, טורבינת יצרן תגז, הטורבינה החופשית וצינור הפליטה. כאשר כל אחד מהם מהווה נפה בקרה.

המודל הפשוט יותר, המובא להלן, מורכב ממאון מומנט בין מרחס טורבינות יצרן הגז ומומנט ההאצה שלו, ומאון מומנטים על הטורבינה החופשית בין הגזים לבין העומס ומומנט ההאצה.

$$(1) \quad J_t \frac{dn_t}{dt} = \delta M_{0t} \quad (\text{סביב S.S. נחון})$$
$$M_{\text{eff}} = M_t \left(\frac{60}{2\pi} \right) ; \text{דאסער}$$

$$(2) \quad M_{62} = \frac{H_2}{N_2}$$

$$(3) \quad \delta H'_i = h'_i = \left(\frac{\partial H'_i}{\partial N'_i} \right)_{g'_i} n_i + \left(\frac{\partial H'_i}{\partial G'_i} \right)_{n_i} g'_i$$

$$(4) \quad \delta H'_i = h'_i = \left(\frac{\partial H'_i}{\partial N_i} \right)_{g'_i} n_i + \left(\frac{\partial H'_i}{\partial G'_i} \right)_{N_i} g'_i$$

פונקציות התמסורת :

$$n_1(s) = \frac{k_n}{(r_1 s + 1)} g'_1(s)$$

$$h_0(s) = \frac{k_h (T_h s + 1)}{(\tau_h s + 1)} g'_f(s)$$

: 7283

$$k_n = \frac{\left(\frac{\partial H_t}{\partial G_t}\right)_{N_t}}{\frac{H_t}{N_t} - \left(\frac{\partial H_t}{\partial N_t}\right)_{G_t}} \quad \dots \quad k_n = \left(\frac{\partial H_t}{\partial N_t}\right)_{G_t} k_n + \left(\frac{\partial H_t}{\partial G_t}\right)_{N_t}$$

$$\tau_i = \frac{J_i N_i}{H_i - \left(\frac{\partial H_i}{\partial N_i} \right)_{T_i}} ; \quad T_h = \frac{\left(\frac{\partial H_i}{\partial G_i} \right)_{N_i} \tau_i}{\left(\frac{\partial H_i}{\partial N_i} \right)_{k_n} + \left(\frac{\partial H_i}{\partial G_i} \right)_{N_i}}$$

זאן מומנטים :

$$J: \frac{dn_i}{dt} = \left(\frac{\partial M_i}{\partial H_i} \right)_{T, N_i} h_i + \left(\frac{\partial M_i}{\partial N_i} \right)_{T, H_i} n_i - m_i.$$

$$m_{\text{gr.}} = m_{\text{L}} (60/2\pi) ; \quad M_{\text{gr.}} = M_{\text{L}} (60/2\pi) \quad : \text{אשר}$$

ונקציית התמסורת:

$$n_L(s) = \frac{k_L [h_4(s) - L_{minL}(s)]}{ns + 1}$$

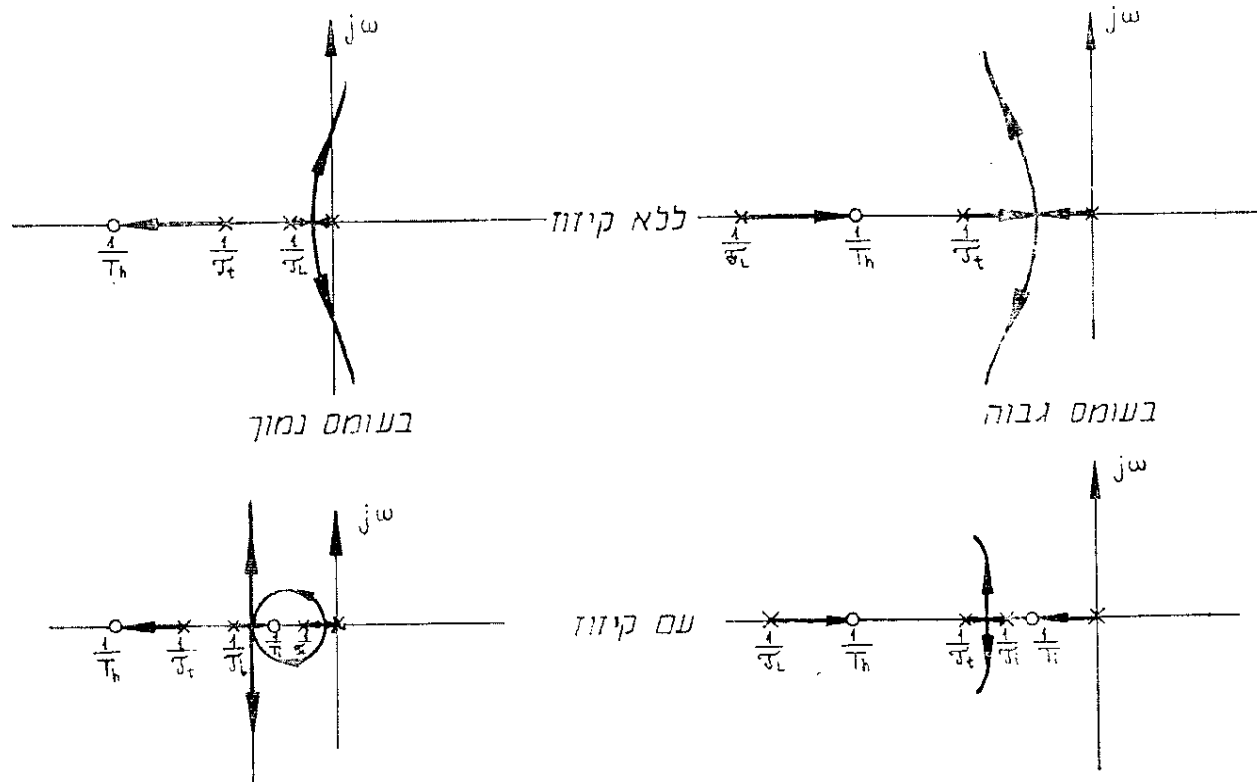
$$k_L = \frac{\left(\frac{\partial M_{SL}}{\partial H^4} \right)_{NL}}{\left(\frac{\partial M_{SL}}{\partial N^4} \right)_{H^4}} ; \quad I_{LM} = \frac{(60/2\pi)}{- \left(\frac{\partial M_{SL}}{\partial N^4} \right)_{H^4} \left(\frac{\partial M_{OL}}{\partial H^4} \right)_{NL}}$$

2- מודל מערכות חיוסות

נתייחס כאן רק לאלמנטים המשפיעים על דינמיקת הויסות בפעולת
טורבינה החופשית בסיבובים נומינליים.

1.2.1 ווסת החשה

$$\tau_a \frac{dg'_r}{dt} + g'_r = k_a \left(T_a \frac{dp_{in}}{dt} + p_{in} \right)$$



ציור מס' 16: שורשי המשוואה האופיינית בחוג סגור

קריטריון יציבות לפי Routh:

$$(a) \quad k_1 < \frac{\tau_L + \tau_t}{k_h k_L [\tau_L \tau_t - T_h (\tau_L + \tau_t)]}$$

$$\tau_L \tau_t - T_h (\tau_L + \tau_t) \geq 0 \quad \text{כאשר}$$

$$(b) \quad k_1 > 0$$

$$\tau_L \tau_t - T_h (\tau_L + \tau_t) < 0 \quad \text{כאשר}$$

(ג) עבור $\frac{T_1}{\tau_1} > 1$ (לאחר מיתון התלות בין מעבר הדלק בווסת

למידה הפתיחה): התגובה איטית יותר ב"t = 0 מאשר ב"t = 0 מאשר ב"t = 0. קיימת השפעה ומתירות אינטגרציה נמוכה מאשר ב"t = 0. קיימת השפעה חלשה על ווסת ההחשה.

פונקציית התמסורת בחוג פתוח:

$$GH(s) = k_1 k_h k_L \frac{(T_h s + 1)(T_t s + 1)}{s(\tau_L s + 1)(\tau_t s + 1)(\tau_1 s + 1)}$$

מכונים כך ש:

$$\tau_L < T_h < \tau_t < \tau_1 < T_1 \quad \text{בעומס גבוה}$$

$$T_h < \tau_t < \tau_1 < T_1 < \tau_L \quad \text{בעומס נמוך}$$

בבדיקת המשוואה האופיינית, מתקבלת יציבות בכל תחום של עומס.

בציור 16 ניתן תיאור של שורשי המשוואה האופיינית בחוג סגור כפונקציה של הגבר הווסת k_1 . ממנו נקבל תמונה על אזורי היציבות של המערכת.

BIBLIOGRAPHY:

סיפורות:

1. Horlock, J. H.: Axial Flow Turbines, Butterworth, 1966.
2. Gay, C. E.: Minimize Wear in Gears, "Machine Design", Vol. 42, No. 24, 1970.
3. Sobey, A. J. and Suggs, A. M.: Control of Aircraft and Missile Power Plant, Wiley, 1963.
4. Guillon, M.: Etude et determinations des Systemes Hydrauliques. Dunod, 1961.

3.2 ווסת החשה בעימוד עם הווסת האינטרומי

$$T_L \rightarrow T_{a1} \quad z, z' > 0 \quad \frac{T_{a1}}{\tau_{a1}} < 1$$

$$\tau_a \rightarrow \tau_{a1}$$

$$k_a \rightarrow k_{a1} \quad z, z' \leq 0 \quad \frac{T_{a1}}{\tau_{a1}} \approx 1$$

3-2 מודל כולל (מנוע בצרוף מערכת הווסת)

$$(א) \quad \frac{T_1}{\tau_1} > 1 \quad \text{עבור} \quad \text{תעבוד המערכת במסלולים (1) ו-(2) בהתאם}$$

לפתיחת או סגירת מעבר הדלק בווסת האינטרומי. מתקבלת קפיצה בתגובה ב: $t = 0$ בשיעור $k_1 T_{int}$ ($z > 0, z' \gg 0$) והשפעה חזקה על ווסת החושה הגורם לאי-יציבות כמוסבר לעיל. (הערה: תגובת הווסת האינטרומי בשלושת המקרים הנדונים, מתוארת בציור מס' 14, גרפים א', ב' ו-ג', בהתאמה).

$$(ב) \quad \frac{T_1}{\tau_1} \approx 1 \quad \text{עבור} \quad \text{תעבוד המערכת במסלול (3). מהירות}$$

האינטגרציה של הווסת גבוהה מאשר ב"t = 0 (א) אך אין תגובה קפיצה ב"t = 0.

מתקבלת יציבות בעומסים הגבוהים (τ_L נמוך). הווסת עובד בווסת אינטגרלי טהור.

פונקציית התמסורת בחוג פתוח:

$$GH(s) = k_1 k_h k_L \frac{(T_h s + 1)}{s(\tau_L s + 1)(\tau_t s + 1)}$$

המשוואה האופיינית:

$$(\tau_L \tau_t) s^2 + (\tau_L + \tau_t) s^2 + (1 + k_1 k_h k_L T_h) s + (k_1 k_h k_L) = 0$$