# דינמיקת רוטור מנוע סילון

## אנליזה משולבת ניסויים

**ד"ר אייל סתר**
**רפאל**

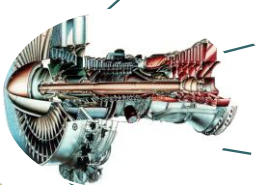
17/11/16

# נושאי השיחה

## דינמיקת רוטור מנוע סילון בתהליך התכן

מהן התופעות הדינמיות הדומיננטיות?

מהי רגישות המודל לאי וודאויות?



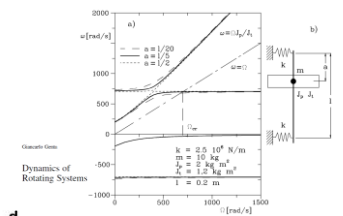
כיצד לתקף את המודל

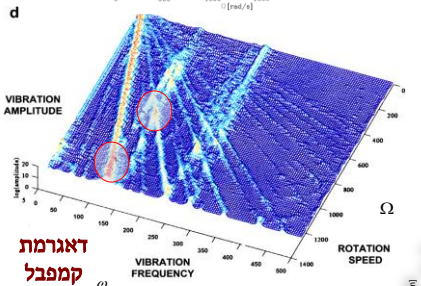
מהו המודל הפשוט ביותר?

כיצד לשלב בין מודלים?

# מאפיינים דינמיים

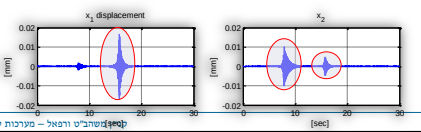
- לרוטור תדרים עצמיים התלויים בתדר הסיבוב
- לרוטור קיים ערור סינכרוני עקב חוסר איזון התלוי בריבוע המהירות
- תדר עצמי = מהירות סיבוב מהירות קריטית (רזוננס)




דאגרמת קמפבל

Control of vibration and resonance in aero engines and rotating machinery – An overview
D.J. Ewins





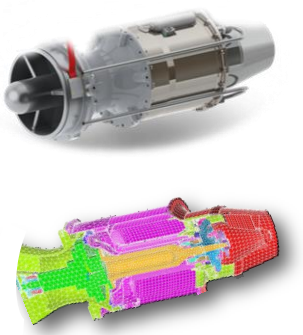


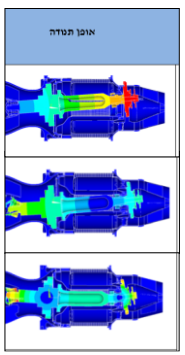

# מהירויות קריטיות - אנליזה

## מודל מנוע מלא

אופני תנודת הרוטור

- Stationary and rotating parts
- Over 40 material types
- ~250,000 Elements, ~400,000 Nodes, ~1,000,000 DOFs





# מהירויות קריטיות - אנליזה

## מודל מנוע מלא

אופני תנודה נוספים

**עושר דינמי נוסף –**
**האם רלוונטי?**





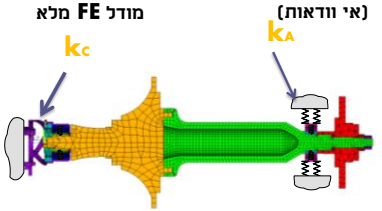
# מהירויות קריטיות - אנליזה

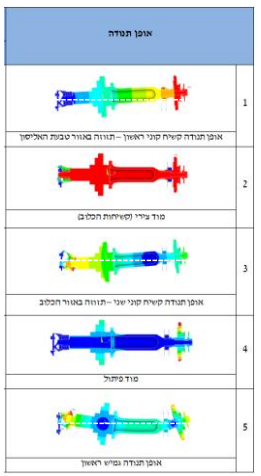
## מודל רוטור בלבד

- רוטור תלוי על תושבות
- מודל מדמה רוטור (ללא להבים)
  - כולל אפקט ג'ירוסקופי
  - ללא הקשחה צנטרפוגלית

תושבת אחורית- קפיץ (אי וודאות)

תושבת קדמית- מודל FE מלא

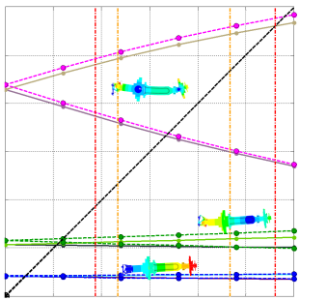


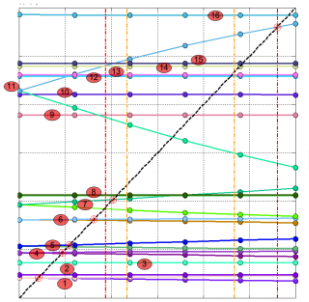
# מהירויות קריטיות - אנליזה

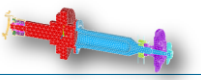
## השוואת מודלים – דיאגרמת קמפבל

### רוטור בלבד



### מנוע מלא





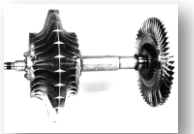


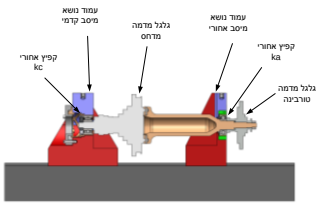


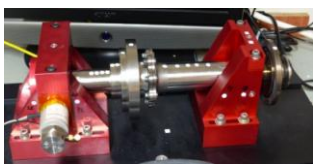
# אנליזה מודלית – ניסוי

## מערכת הניסוי

- תיקוף המודל וכיול קשיחות תנאי שפה על ידי ניסוי אנליזה מודלית
- דימוי תנאי השפה כבהכללת הרוטור במנוע.
- מדידת שלושת אופני התנודה הראשונים למדמה רוטור ללא להבים וללא סיבוב



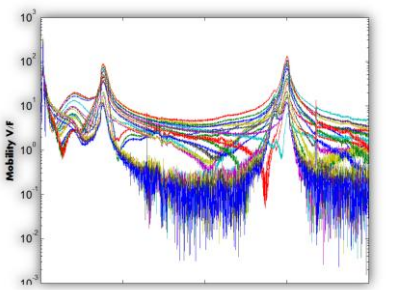


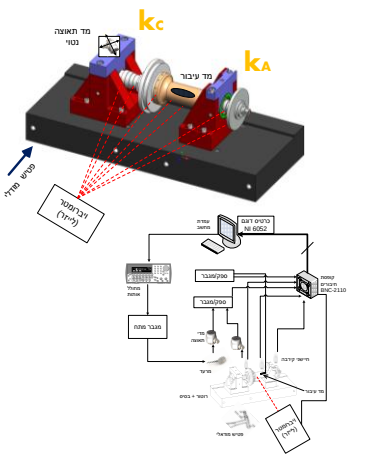



# אנליזה מודלית – ניסוי

## תוצאות הניסוי - FRF

### פונקצית תגובת התדירות (FRF)




$k_A = 266 kgf / mm \ (Designed)$

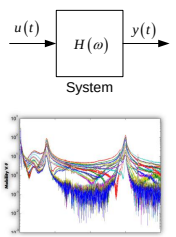




# אנליזה מודלית – ניסוי

## ניתוח תוצאות

- **זיהוי תגובת התדירות על פי תגובת ההלם**




$$u_l(t) = A\delta(t), \quad y_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{\lambda_n t}\phi_{n,k}(t), \quad H_{l,k}(\omega) = \frac{F\left[y_k(t)\right]}{F\left[u_l(t)\right]} = \frac{Y_k(\omega)}{u_l(\omega)}$$

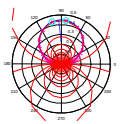


- **חילוץ פרמטרים מודליים מתגובת התדירות**
  - **שערוך הגדלים השאריתיים - Circle fit (LS)**
    - **הקשה בנקודה בודדת וריבוי נקודות חישה**
    - **הצגה בעקום Nyquist**
    - **מציאת הגדלים השאריתיים** $A_{n,k} = \phi_{n,k}\phi_{n,l}$

**על פי גיאומטריית המעגלים**

$$H = \begin{bmatrix} H_{1,1} \dots & \begin{pmatrix} H_{1,k} \\ \dots \\ H_{l,k} \\ \dots \\ H_{N,k} \end{pmatrix} & \dots H_{1,N} \\ \dots \dots & & \dots \dots \\ \dots \dots & & H_{N,N} \end{bmatrix}$$

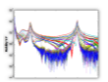
$$H_{l,k}(\omega) = \sum_{n=1}^{N} \frac{\phi_{l,n}\phi_{n,k}}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2\zeta_n i\omega\omega_n} \cong \frac{A_{n,k} i\omega}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2\zeta_n i\omega\omega_n} + B_{l,k}$$



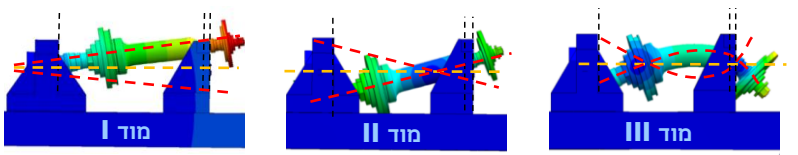
D.J. Ewins, Modal Testing,- Theory, Practice and Applications
I. Bucher, D.J. Ewins
Modal Analysis and Testing of Rotating Structures

# אנליזה מודלית – ניסוי

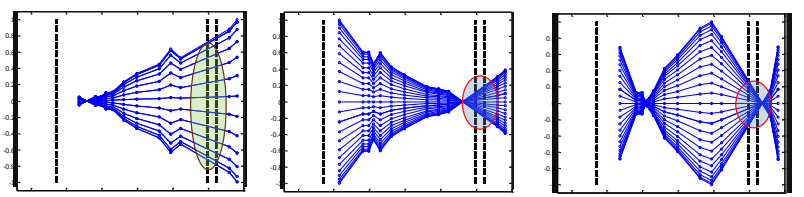
## השוואת תוצאות הניסוי לאנליזה – אופני תנודה



### אופני תנודה – אנליזה




### אופני תנודה – ניסוי

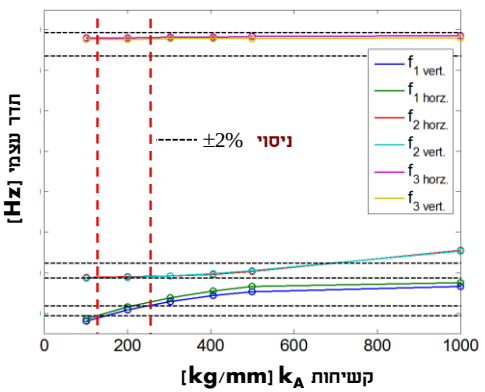


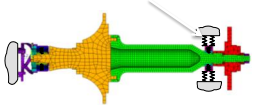


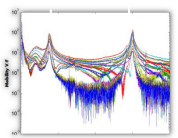


# אנליזה מודלית – ניסוי

## השוואת ניסוי ואנליזה– כיול המודל





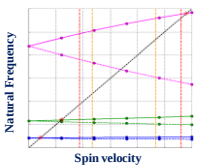


$150 < k_A < 250\, kg/mm$ Design: $k_A = 266 kg/mm$

# התעוררות דינמית בהאצה

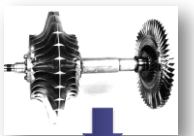
## מודל אנליטי טרנזיינטי

- מודל רוטור FE וניסוי -> אופני תנודה ומהירויות קריטיות
- חליפת מהירויות קריטיות בהאצה?
- מודל אנליטי 4DOF -> למהירויות קריטיות קשיחות




### תנודות הרוטור וראקציות במיסבים

- פרמטרים שולטים: קצב האצה, ריסון
  חוסר איזון, קשיחויות תושבות



### מודל משמר

$$m\ddot{x}+K_{11}x+\phi_y K_{12}=m\varepsilon\left(\dot{\theta}^2\cos(\theta+\alpha)+\ddot{\theta}\sin(\theta+\alpha)\right)$$

$$m\ddot{y}+K_{11}y-\phi_x K_{12}=m\varepsilon\left(\dot{\theta}^2\sin(\theta+\alpha)-\ddot{\theta}\cos(\theta+\alpha)\right)$$

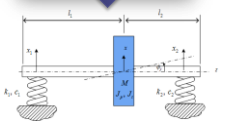
$$J_t\ddot{\phi}_x+\left(\dot{\theta}\dot{\phi}_y+\ddot{\theta}\phi_y\right)J_p+\phi_x K_{22}-K_{12}y=-\left(\dot{\theta}^2\sin(\theta)-\ddot{\theta}\cos(\theta)\right)\chi\left(J_T-J_p\right)$$

$$J_t\ddot{\phi}_y-\dot{\theta}\dot{\phi}_x J_p+\phi_y K_{22}+K_{12}x=\left(\dot{\theta}^2\cos(\theta)+\ddot{\theta}\sin(\theta)\right)\chi\left(J_T-J_p\right)$$

### הוספת ריסון מודלי

$$\mathbf{C_M}=\mathbf{\Phi}^T\mathbf{C}\,\mathbf{\Phi} \qquad \left(-\omega^2\mathbf{M}+\mathbf{K}\right)\phi=0 \qquad \mathbf{\Phi}^T\mathbf{M}\mathbf{\Phi}=\mathbf{I}$$

$$diag\left[\mathbf{C_M}\right]=2\zeta_n\omega_n \qquad \mathbf{C}=\mathbf{\Phi}^{-T}\mathbf{C_M}\mathbf{\Phi}^{-1}=\mathbf{M}\mathbf{\Phi}\mathbf{C_M}\mathbf{\Phi}^T\mathbf{M}$$



### ראקציות במיסבים

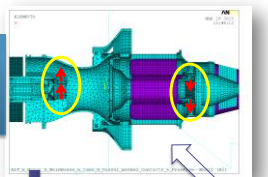
$$\mathbf{f_b}=-\mathbf{K}_{[xy]}\mathbf{x}-\mathbf{C}_{[xy]}\dot{\mathbf{x}}$$



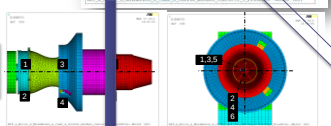


# התעוררות דינמית בהאצה

## שילוב מודלים



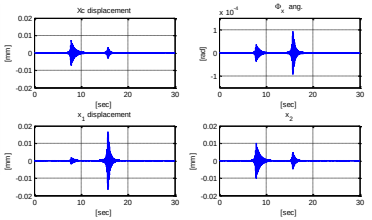
הזנת הראקציות במיסבים ככוחות סובבים במודל FE ללא גוף סובב



נקודות חישה

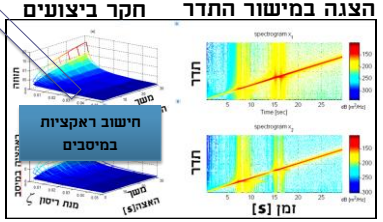
חיזוי WHIRL ורגישות בית המנוע

### תנודות הרוטור בזמן




### הצגה במישור התדר

### חקר ביצועים



# סיכום ומסקנות

**התאמת המודל לבעיה-** חיזוי דינמיקת הרוטור בהתבסס על מודל רוטור בלבד בהינתן תושבות גמישות.

מדמה הרוטור הוכח **כפלטפורמה ניסויית לתיקוף** המודלים הנומריים

הניתוח הדינמי מחייב **שילוב של ניסוי ואנליזה** – יחדיו משלימים את התמונה המלאה

ניתן **לשלב בין מודלים** לקבלת תמונה רחבה יותר תוך ניצול משאבים מיטבי

**אפקטים נוספים** כגון תנודות להבים מחייבים התייחסות שונה לפישוט המודל