

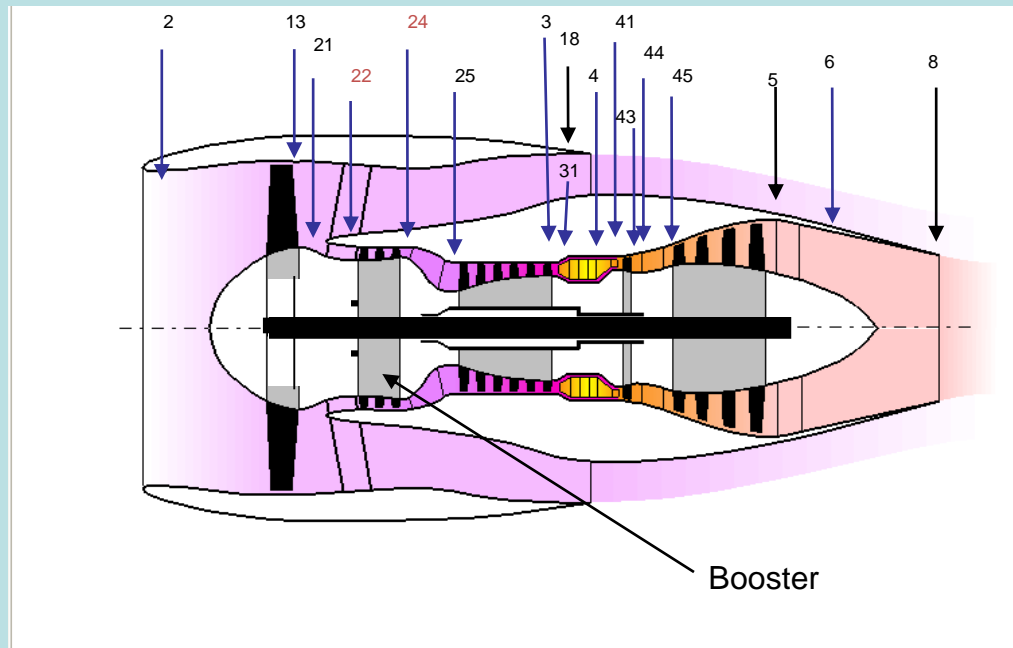
שיטות בקרה למנוע דו-צירי המבוססות על מודל מנוע חלקי

ד"ר מיכאל ליכטצינדר

מב"ש



1 מנוע דו-צירי עם בוסטר





2 תוכן המצגת

(1) דרישות מהבקרה של מנוע סילון דו-צירי.

(2) שתי אסטרטגיות הנפוצות לבקרת מנועי סילון.

(3) העקרונות של בקרת מנוע סילון דו-צירי מודרנית מדויקת ומהירה.

(4) שתי דוגמאות לבקרת מנוע דו-צירי המבוססת על מודל מנוע חלקי ללא מפות המדחסים וללא

הסתמכות על מדידת טמפרטורות גבוהות:

(א) פרמטר מבוקר (PLA) הוא מהירות סיבוב ציר ל.נ. N_L .

(ב) פרמטר מבוקר הוא טמפרטורה ביציאה מתא שריפה T_4 .

3 דרישות מהבקרה של מנוע סילון דו-צירי

פרמטר מבוקר - T_4, N_L, N_H או פרמטר אחר

פרמטר מבקר – ספיקת דלק (שטח צנ"פ קבוע)

1. שגיאה מרבית של פרמטר מבוקר במצב מתמיד.
2. זמן התיצבות מסרק למכסימום וממכסימום לסרק.
3. תגובת יתר של מהירות סיבוב לשני הצירים.
4. מהירות סיבוב מרבית לשני הצירים.
5. טמפרטורה מרבית ביציאה מתא השריפה.
6. מרווח הזדקרות של המדחסים.
7. יחס אקוויוולנטי בתא השריפה (למניעת כיבוי עשיר\עני).



4 שתי אסטרטגיות הגנה למנועי סילון

נפוצות שתי אסטרטגיות הגנה למנועי סילון:

(א) הגבלת ספיקת דלק מתוקנת כפונקציה של מהירות סיבוב מתוקנת

$$G_{f,cor} = f(N_{cor})$$

(ב) הגבלת נגזרת מתוקנת של מהירות סיבוב כפונקציה של מהירות סיבוב מתוקנת

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{cor} = f(N_{cor})$$

עקומות הגבלה עליונה ותחתונה של הפונקציות מחושבות באמצעות סימולציות או ניסויים.

תהליך הבקרה אמור להיות בין ההגבלות.

למנוע חד צירי העקומות בלתי תלויות בתנאי טיסה. למנוע דו-צירי מצב אחר.

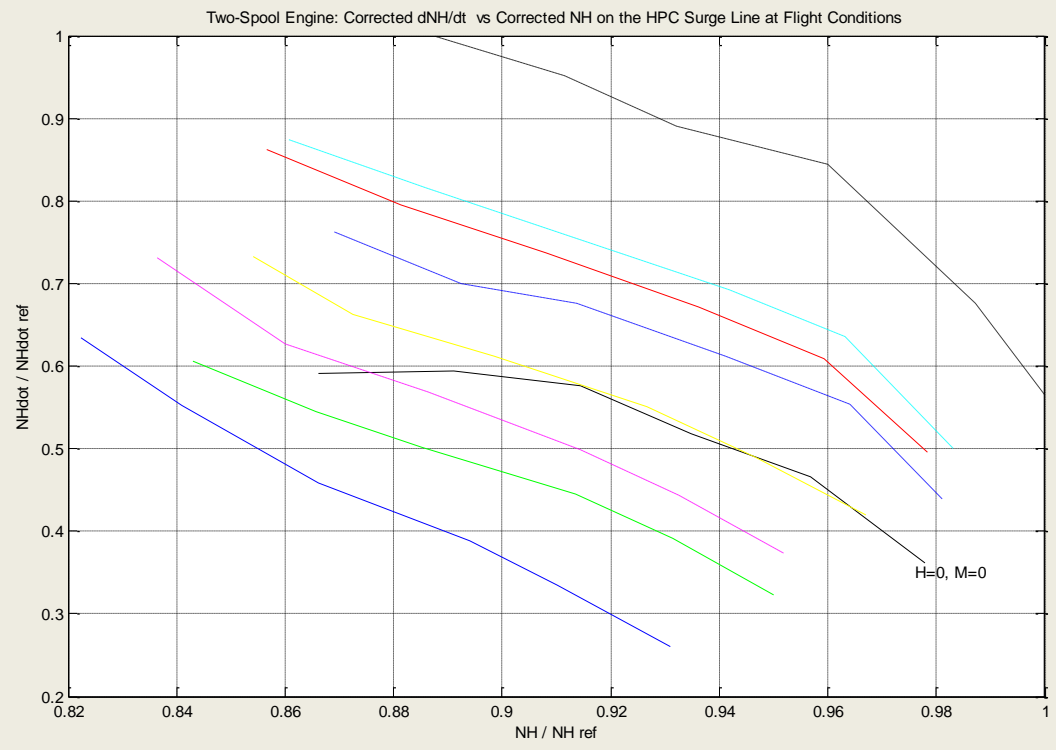


למנוע דו-צירי בתנאי טיסה

$$\frac{dN_H}{dt} \Big|_{cor} = f(N_{H,cor})$$

פיזור פונקצית

$$\frac{\frac{dN_H}{dt} \Big|_{cor}}{\frac{dN_H}{dt} \Big|_{cor,ref}}$$



$$\frac{N_{H,cor}}{N_{H,cor,ref}}$$

אחת הסיבות של פיזור בין הקווים היא שבמצב מעבר קיימת השפעה הדדית בין הצירים ואין קשר חד-משמעי בין מהירויות N_H, N_L . בנוסף לפיזור של הפונקציה למנוע מסוים, קיים הפיזור בין מנועים.

מסקנה:

למנוע דו-צירי שתי האסטרטגיות הנ"ל לא מאפשרות לנצל את מלוא הפוטנציאל של קיצור זמן

מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

החשה.



5 עשרת העקרונות לבקרה מודרנית מדויקת ומהירה למנוע דו-צירי

1. להשתמש באלגוריתמי בקרה יותר יעילים מהקונוונציונליים בזכות מחשב מודרני שמאפשר חישוב בזמן אמת של מודל מנוע מלא או חלקי.
2. במודל מנוע חלקי לא להשתמש במפות מדחסים: LPC , HPC ו- IPC , משום שקיים פיזור המפות בין המנועים (באין ברירה, ניתן להשתמש לבקרה בקווי הזדקרות המדחסים).
3. באלגוריתם בקרה של מנוע דו-צירי לא להשתמש בפונקציות הגבלה קונוונציונליות
4. באלגוריתם הבקרה לא להשתמש בטמפרטורות גבוהות מדודות בגלל פיגור בזמן מדידה ופיזור בשדה הטמפרטורות (פרט לגיבוי לבקרה).
5. לא להשתמש במסנן לחץ נמוך לפקודת PLA בהחשה כי המסנן גורם להגדלת זמן התיצבות.
6. יש לקבוע סדר עדיפויות להגנת מנוע מפני סיכונים (הזדקרות מדחסים, טמפרטורת יתר בתא שריפה) לצורך קביעת פרמטר מבוקר (פקודת PLA): N_L or T_4 or N_H . אלגוריתם הבקרה נבחר בהתאם לפרמטר המבוקר.



עשרת העקרונות לבקרה מודרנית (המשך)

7. לבקרה אדפטיבית (פחות תלויה בתנאי טיסה) להשתמש בפרמטרים מתוקנים של הבקר

$$. (\tau_{cor}) \text{ ומסננים } (K_{P,cor}, K_{I,cor})$$

8. לבקרה מהירה, הפקודה אמורה להיות מכסימלית בהחשה ומינימאלית בהאטה (bang-bang).

בהחשה טמפרטורה ביציאה מתא שריפה אמורה להיות קרובה למכסימלית ומרווח הזדקרות

מדחסים - מינימאלי.

9. להציג מודל הבקר בצורה דיסקרטית - zero-order-hold (z-transform) בהתאם לשיטת חישוב

במחשב בקרה.

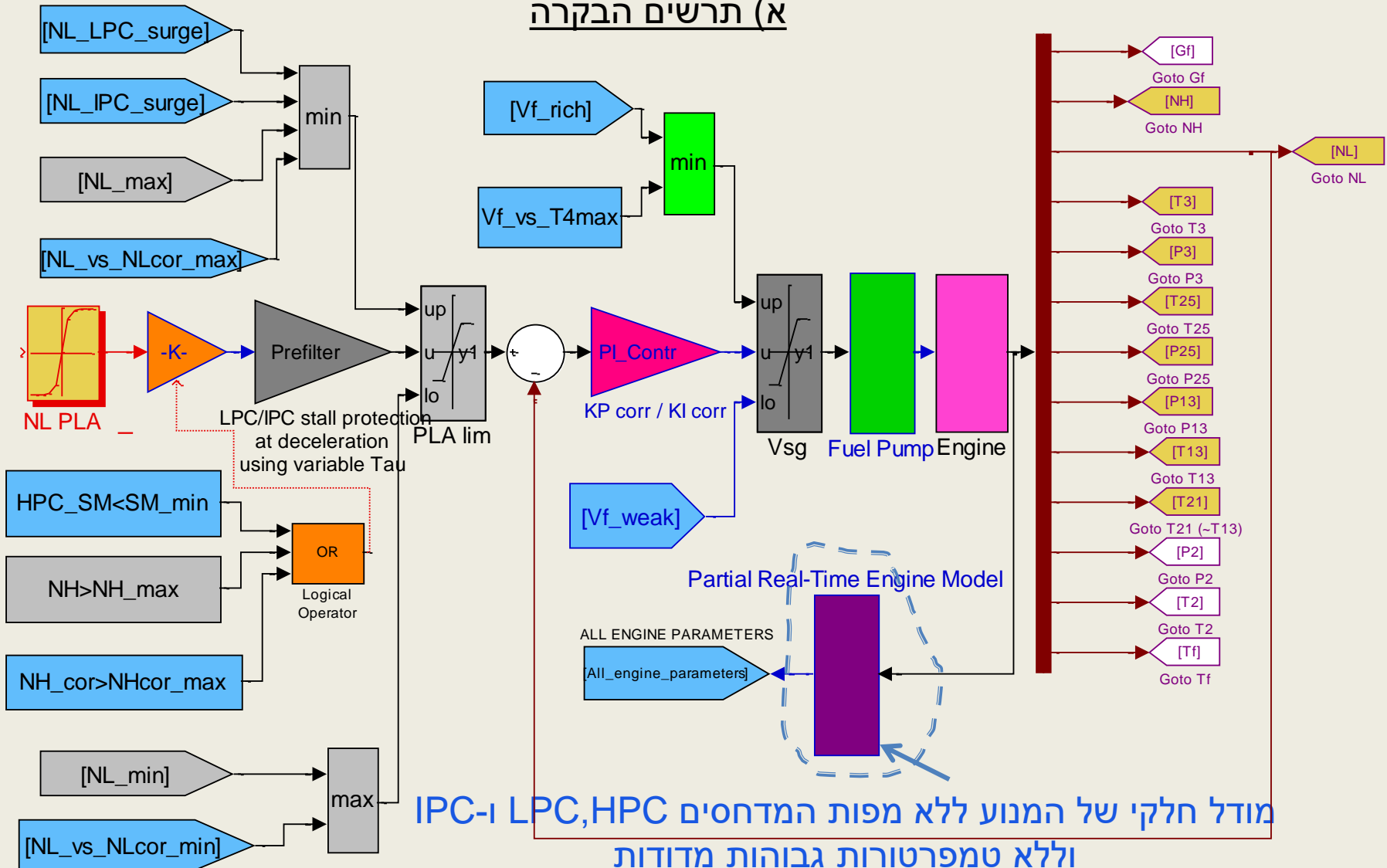
10. הבקרה אמורה לכלול בקרה חלופית למקרה של כשל בחיישנים.

הקפדה בעקרונות אלו מביאה לבקרה איכותית של מנוע דו-צירי.



6 בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא מהירות סיבוב ציר ל.נ.

(א) תרשים הבקרה



מודל חלקי של המנוע ללא מפות המדחסים LPC, HPC ו-IPC

וללא טמפרטורות גבוהות מדודות

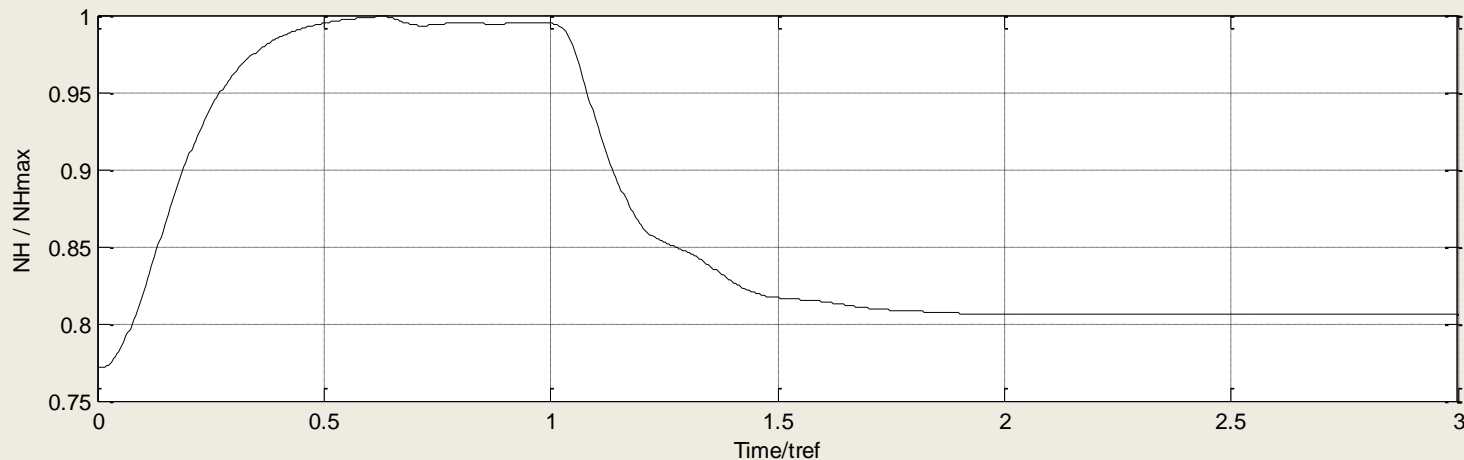
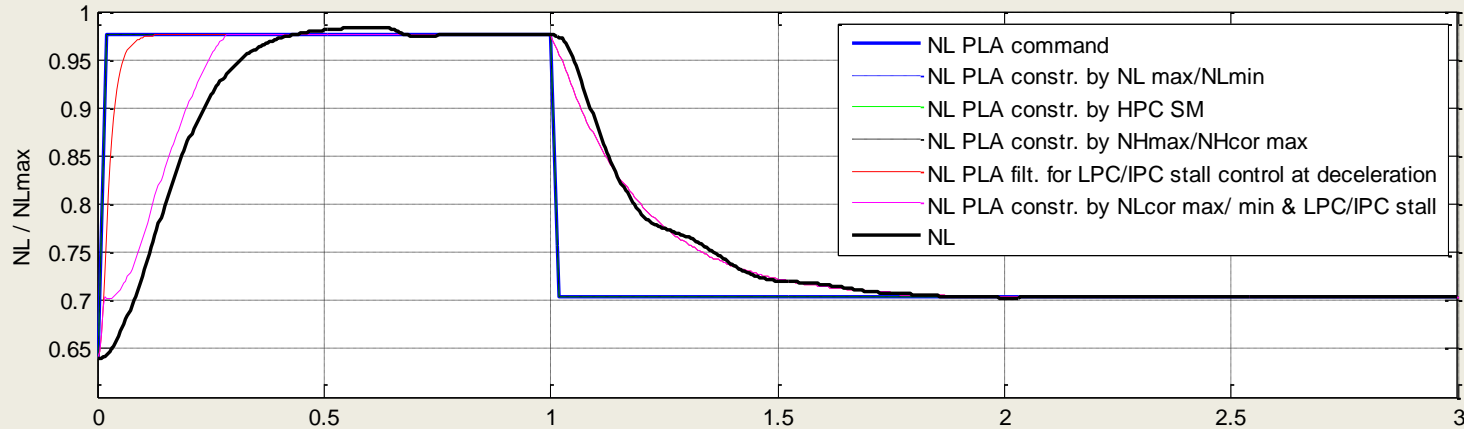
מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש



בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא מהירות סיבוב ציר ל.נ. (המשך)

(ב) פקודה $N_{L.com}$ ותגובה N_L ו- N_H

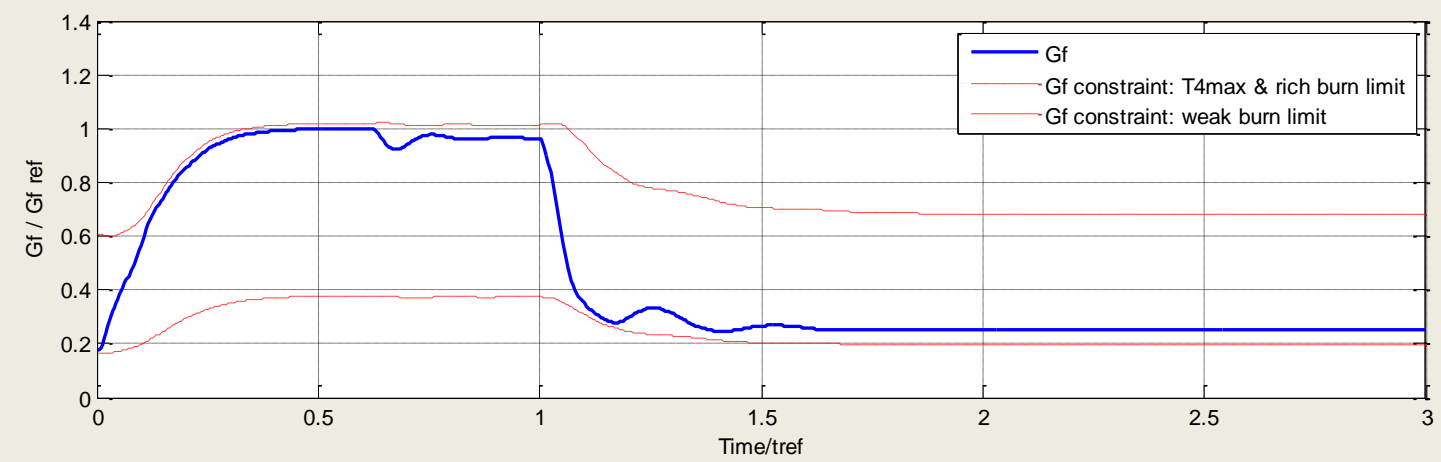
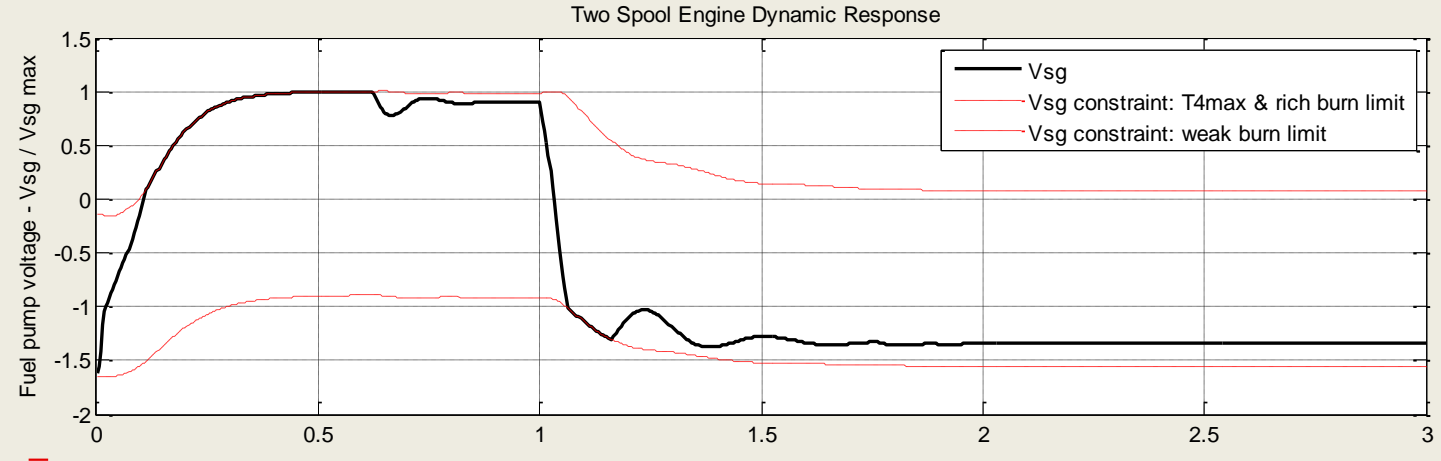
Two Spool Engine Dynamic Response





בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא מהירות סיבוב ציר ל.נ. (המשך)

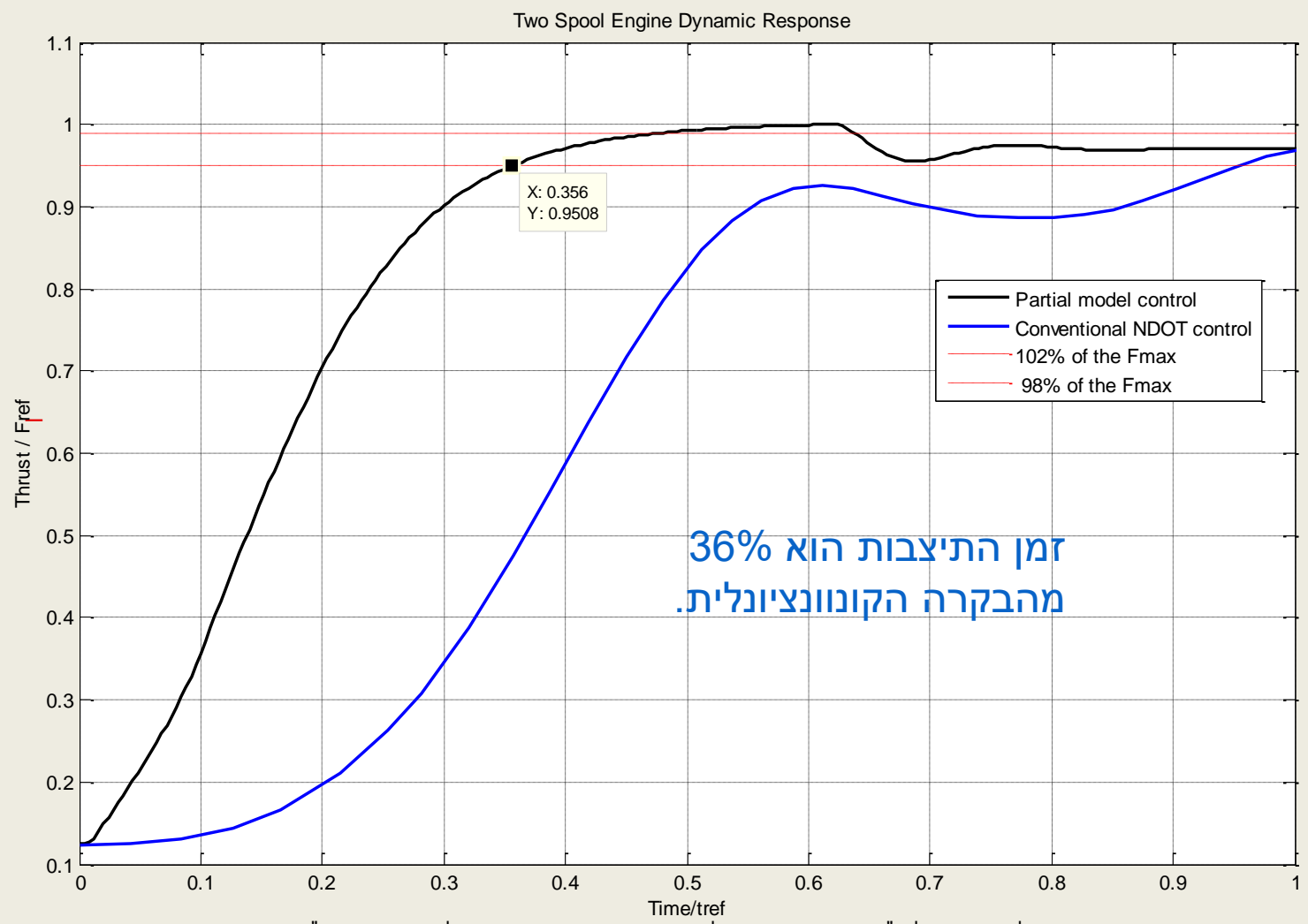
ג) הגבלת ספיקת דלק להגנה מפני טמפרטורת יתר וכיבוי עשיר/עני





בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא מהירות סיבוב ציר ל.נ. (המשך)

(ד) דחף

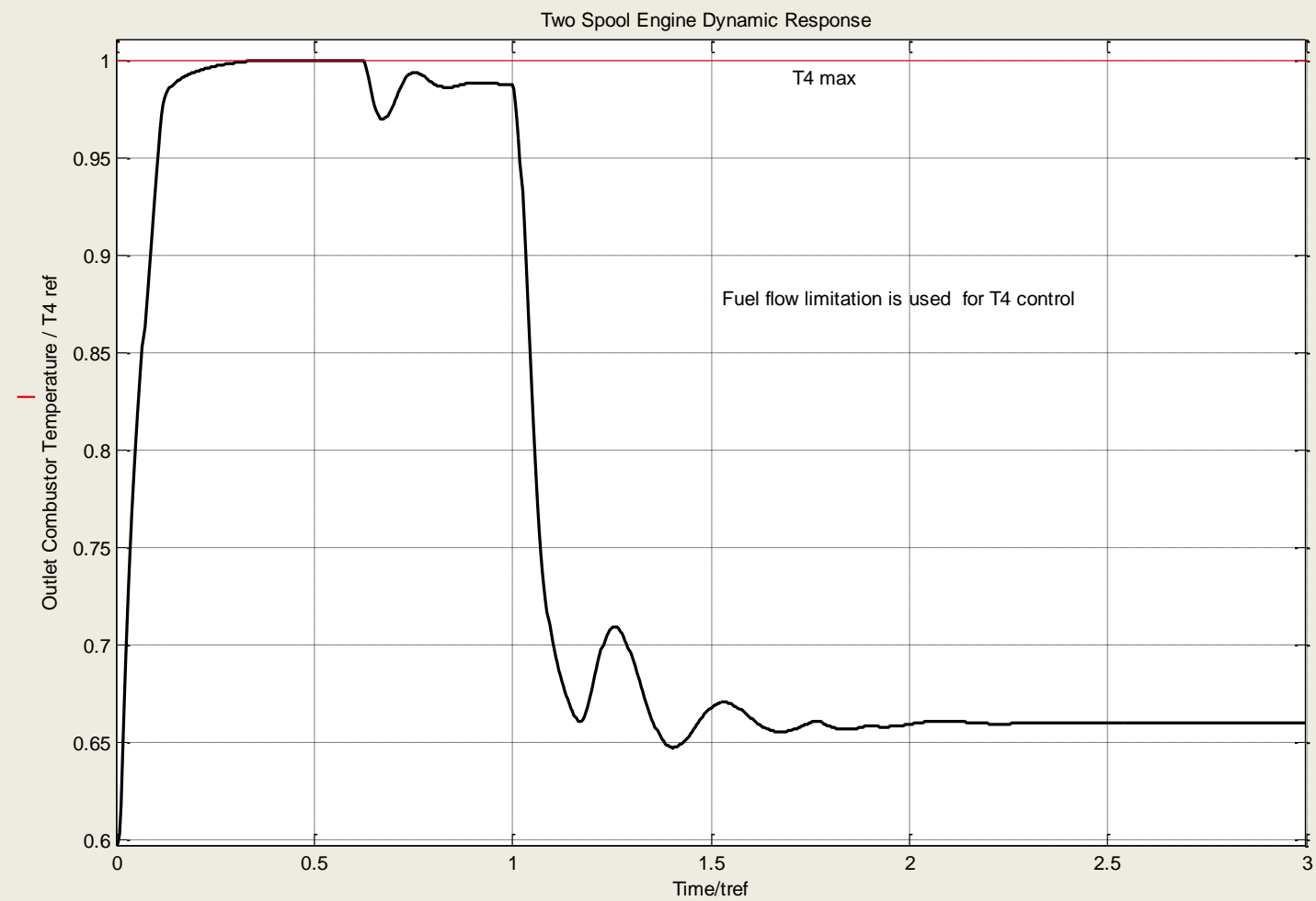


מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש



בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא מהירות סיבוב ציר ל.נ. (המשך)

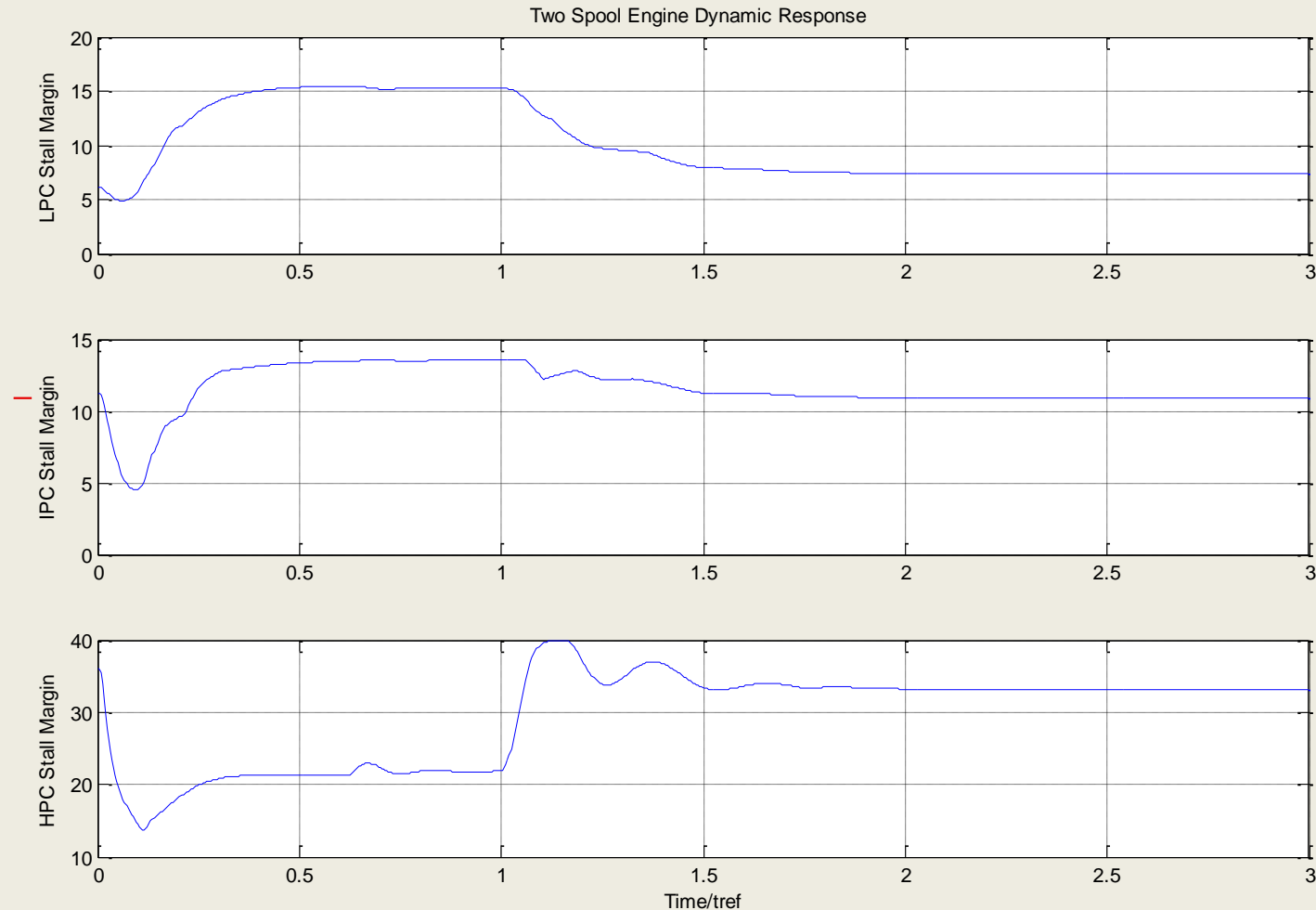
(ה) טמפרטורה ביציאה מתא השריפה T_4





בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא מהירות סיבוב ציר ל.נ. (המשך)

ו) מרווח הזדקרות



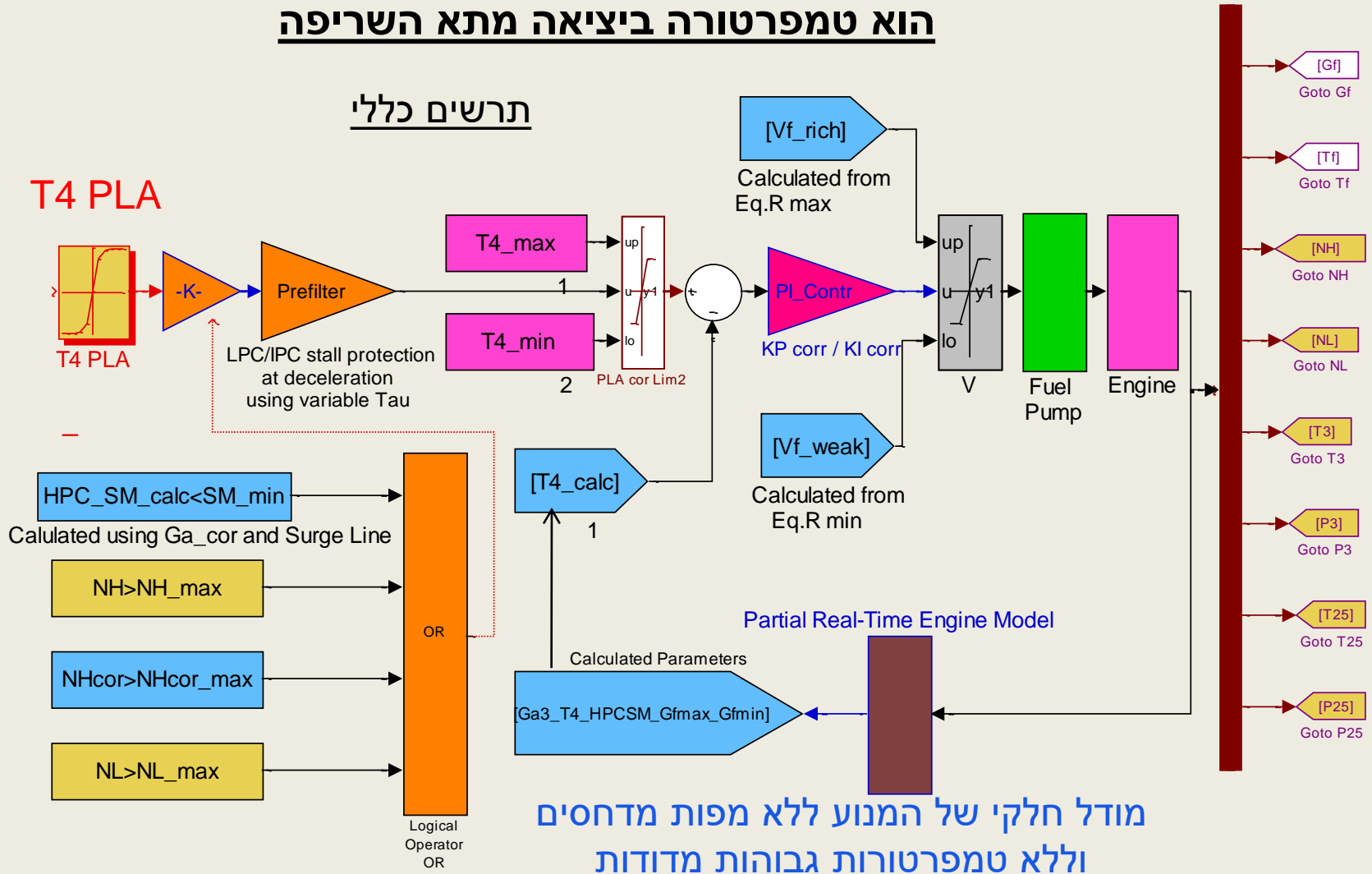
מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש



7 בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר (PLA)

הוא טמפרטורה ביציאה מתא השריפה

תרשים כללי



מודל חלקי של המנוע ללא מפות מדחסים
וללא טמפרטורות גבוהות מדודות



מודל חלקי לחישוב T_4 וספיקת אוויר בתא השריפה על סמך הפרמטרים המדודים

1. Combustor Power Balance

$$[HA(T_4) \cdot G_{a_{31}} + HF(T_4) \cdot G_f] \cdot 2325.98 = [HA(T_3) \cdot G_{a_{31}} + HF(T_f) \cdot G_f] \cdot 2325.98 + \eta_b \cdot Q_R \cdot G_f$$

$$\eta_b = \eta_e \cdot (1 - (.05 \cdot G_{a_{31}} \cdot 16^\lambda) / V_{ch} / (P_{31} / 100000)^{1.8} / \exp(T_{31} / 300))$$

2. HP Spool Power Balance Dynamic Equation

$$\text{Power HPT} \cdot \eta_{m_HP} - \text{Power HPC} - \text{Extracted Power} = \frac{J_{HP} \cdot \pi^2}{900} \cdot N_{HP} \cdot \frac{dN_{HP}}{dt}$$

$$\text{Power HPT} = [HA(T_4) \cdot G_{a_{31}} + HF(T_4) \cdot G_f - HA(T_{43}) \cdot G_{a_{31}} - HF(T_{43}) \cdot G_f] \cdot 2325.98$$

$$\text{Power HPC} = [(HA(T_3) - HA(T_{25})) \cdot G_{a_{31}}] \cdot 2325.98$$

3. HPT map

$$a) G_{g,HPT,cor} = f(N_{HPT,cor}, \frac{P_{43}}{P_{41}})$$

$$b) \eta_{HPT} = f(N_{HPT,cor}, \frac{P_{43}}{P_{41}})$$

$$\Rightarrow c) T_{43} = f(\frac{P_{43}}{P_{41}}, \eta_{HPT}, T_4)$$

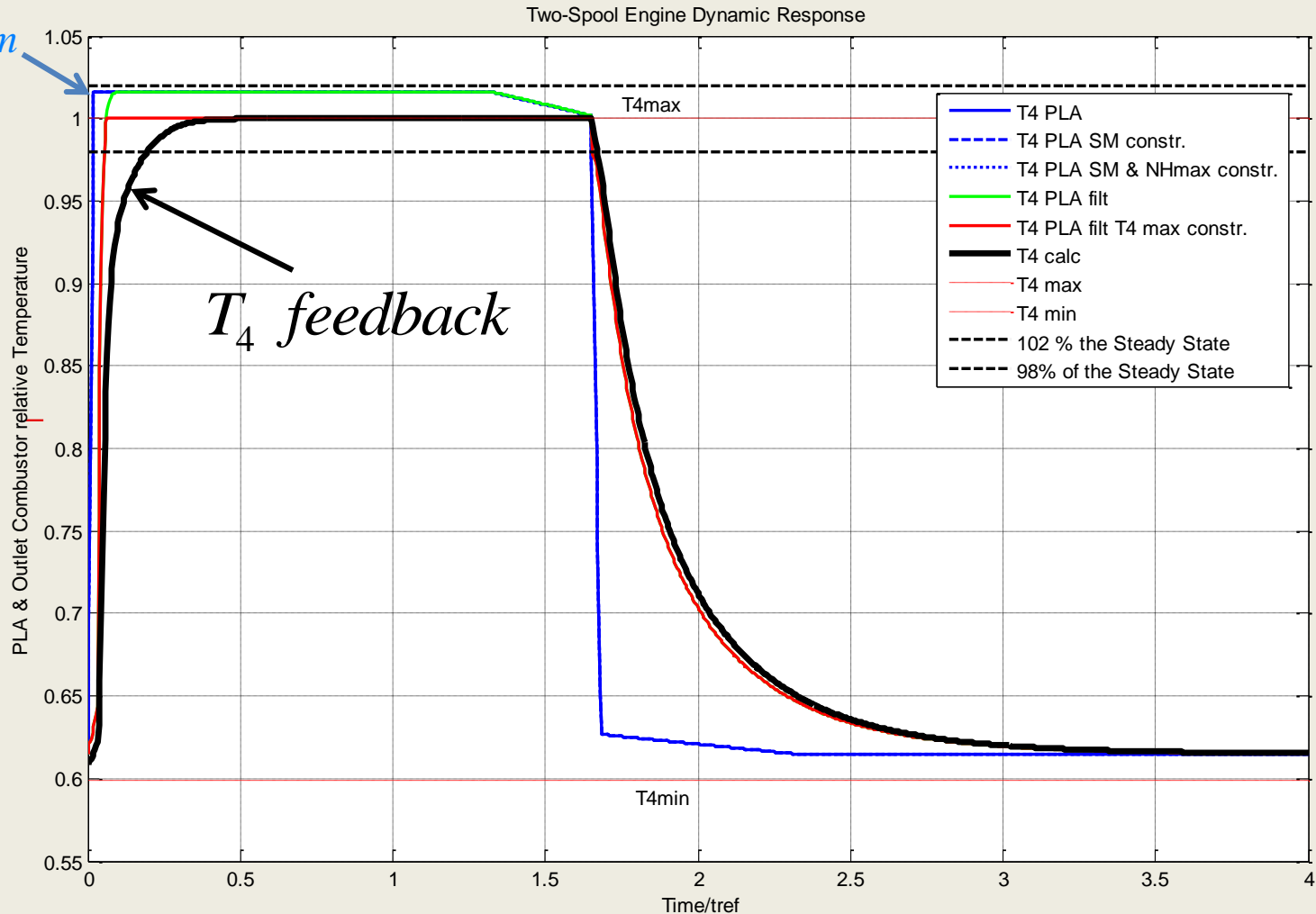
הערה: כיוון שטווח שינוי של יחס לחצים בטורבינה בדרך כלל קצר מאוד אפשר להניח שיחס הלחצים קבוע ונתון. בהנחה זו ניתן לא להשתמש במשוואה a) של מפת הטורבינה ולחשב את הנצילות מתוך משוואה b).



$T_{4,com}$ בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא

(א) טמפרטורה ביציאה מתא השריפה

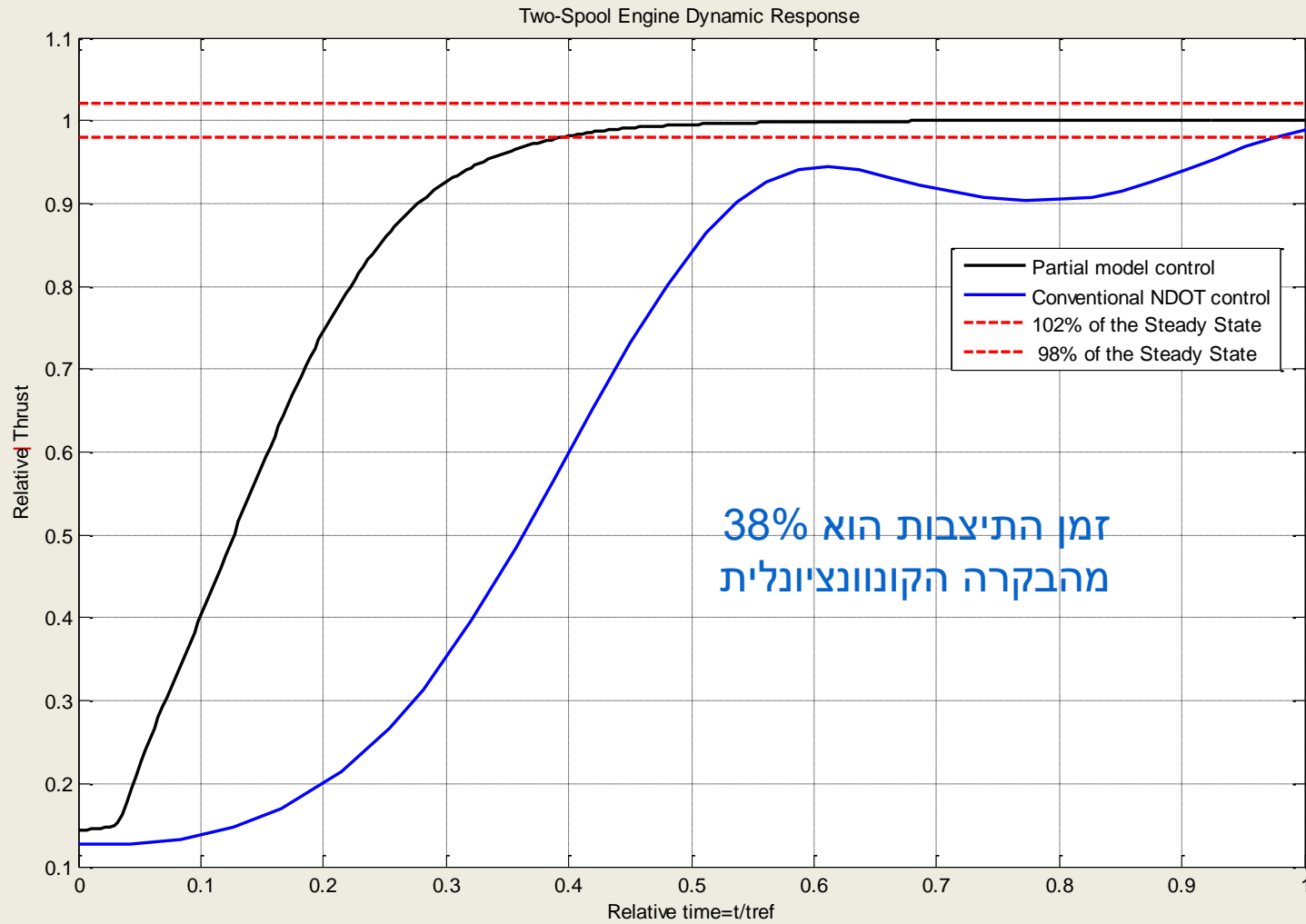
$T_{4,com}$





$T_{4,com}$ בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא

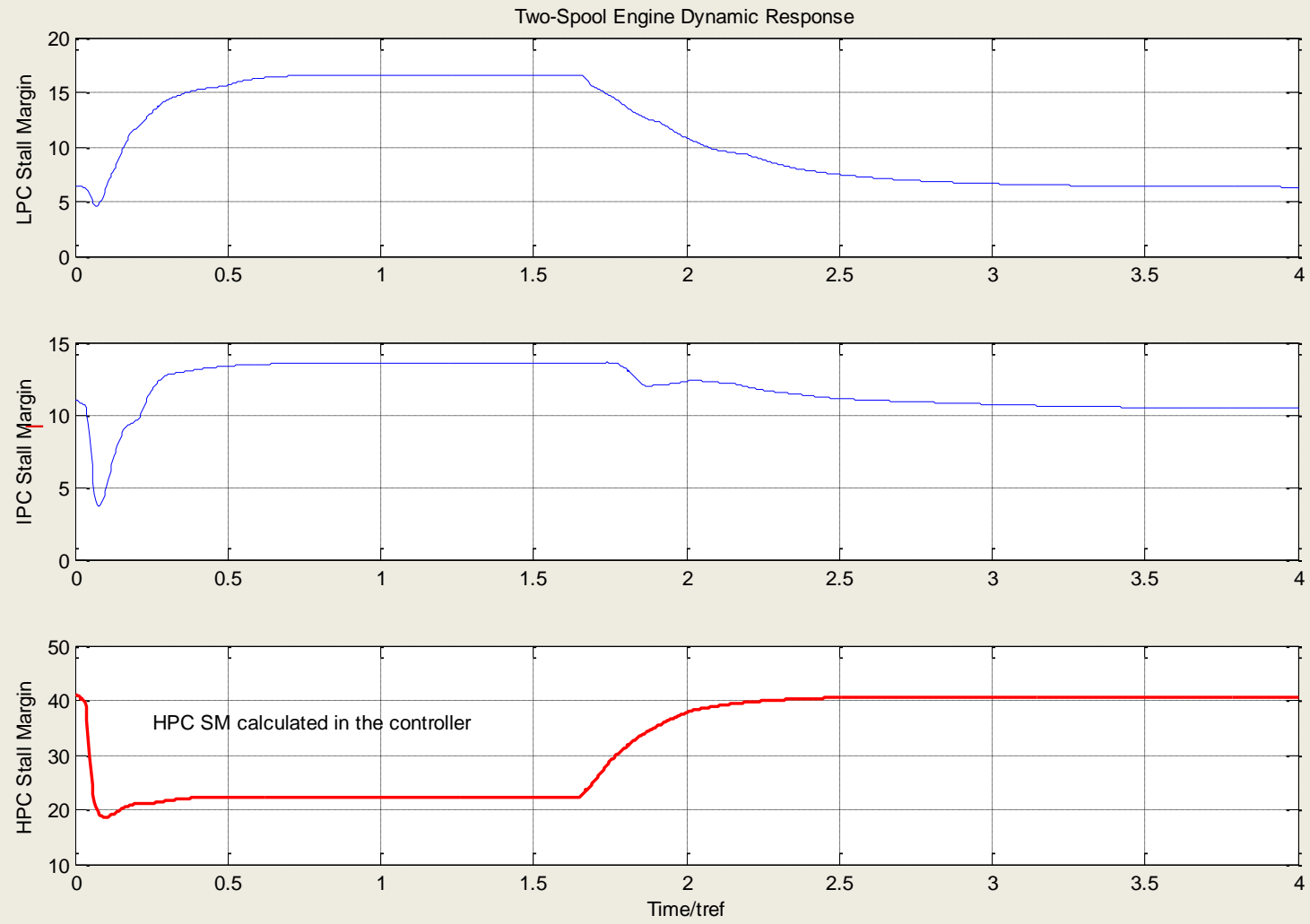
(ב) דחף





$T_{4,com}$ בקרת מנוע דו-צירי. הפרמטר המבוקר הוא

ג) מרווח הזדקרות





8 מסקנות

1. בקרת מנוע דו-צירי המבוססת על מודל מנוע חלקי ללא הסתמכות על מדידת טמפרטורות

גבוהות, יותר מדויקת ומהירה בהשוואה לבקרה קונוונציונלית.

2. בדוגמאות זמן התיצבות של מנוע דו-צירי בעל בקרה זו הוא 36-38% מבקרה קונוונציונלית.

3. כל הסימולציות מנוע דו-צירי בחוג סגור, המוצגות במצגת זו, מבוצעות בזמן אמת בקוד SIMULINK

באמצעות PC.

4. חסרון של שיטת הבקרה המבוססת על מודל מנוע חלקי, בהגדלה יחסית של מספר חיישנים

הנדרשים לבקרה.