

בקרים בעלי שתי דרגות חופש ויישומם במערכת הינע חשמלי

פרופ' סעד תפוחי, ד"ר יורם הורן וד"ר אלון קופרמן

1. מבוא

מטרתם העיקרית של אלגוריתמי בקרה הינה להבטיח פעולה רצויה של מערכת בחוג סגור החשופה למגוון הפרעות ואי-ודאויות. ישנם שני מקורות עיקריים ליצירת אי-ודאות: האחד מבוסס על העובדה כי מודל ה-plant עבורו מתוכננים הבקרים אינו מייצג בצורה מדויקת את המערכת האמיתית. מקור השני לאי-ודאות הנם שינויי פרמטרי המערכת בעת פעולה. לדוגמה, התנגדות סלילי המנוע יכולה להשתנות אם המנוע פועל בטמפרטורה גבוהה. ברובטיקה, האינרציה יכולה להשתנות עד פי 10.

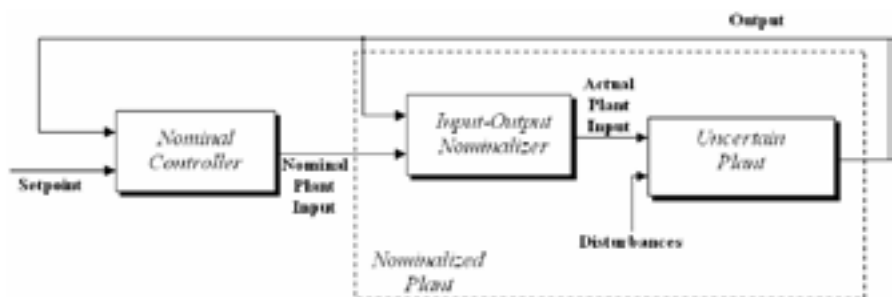
המון אלגוריתמים הוצעו לאורך השנים לתכנון בקרים רובאסטיים. רוב האלגוריתמים מבוסס על תכנון המאפשר לקבל תגובה לא אופטימאלית אך מספקת עבור כל ההפרעות והאי-ודאות אשר הוגדרו מראש. תהליך תכנון צריך לקחת בחשבון המון פרמטרים ובד"כ הנו מסובך ודורש כוח חישוב לא מבוטל.

מאמר זה מדבר על שיטה שונה לתכנון מערכת חסינה. על ידי הוספת דרגת חופש השיטה מאפשרת לתכנן את הבקר הראשי על פי ה-plant הנומינאלי בלבד (הנבנה מנתוני יצרן) ומשאירה לבקר משני (nominalizer) לטפל בהפרעות ואי-ודאות כך, שהבקר הראשי "רואה" בכל רגע ורגע את ה-plant הנומינאלי בלבד [1]. דיאגרמת בלוקים של המערכת מתוארת באיור 1.

הבקר המשני (nominalizer) יכול לבצע שני תפקידים: האחד – לבצע שחזור של מצבי ה-plant במידה והם לא נמדדים (state reconstruction), השני – לשערך את ההפרעות והאי-ודאות (disturbance observation). במידה והבקר הראשי הנו מסוג משוב מצב, הוא ישתמש במצבי ה-plant המשוחזרים ע"י הבקר המשני.

2. הגדרת הבעיה והצגת פתרון

רוב מערכות דינאמית לא ליניארית ניתנות לתיאור בצורה



איור 1: מערכת בקרה בעלת שתי דרגות חופש

נומינאלית הבאה,

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_n &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, t) + \mathbf{b}(\mathbf{x}_n, t)\mathbf{u}_c \\ y_n &= \mathbf{c}(t)\mathbf{x}_n \end{aligned} \quad (1)$$

אם המערכת הנומינאלית נחשפת להפרעות ואי-ודאות, הדינאמיקה החדשה נתונה ע"י

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_d &= (\mathbf{f} + \Delta\mathbf{f}) + (\mathbf{b} + \Delta\mathbf{b})\mathbf{u}_c + \mathbf{d} \\ y_d &= \mathbf{c}(t)\mathbf{x}_d \end{aligned} \quad (2)$$

או בצורה משוכתבת

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_d &= \mathbf{f} + \mathbf{b}(\mathbf{u}_c + \mathbf{u}_u) \\ y_d &= \mathbf{c}(t)\mathbf{x}_d \end{aligned} \quad (3)$$

כאשר

$$\mathbf{u}_u = \mathbf{b}^+(\Delta\mathbf{f} + \Delta\mathbf{b}\mathbf{u}_c + \mathbf{d}) \quad (4)$$

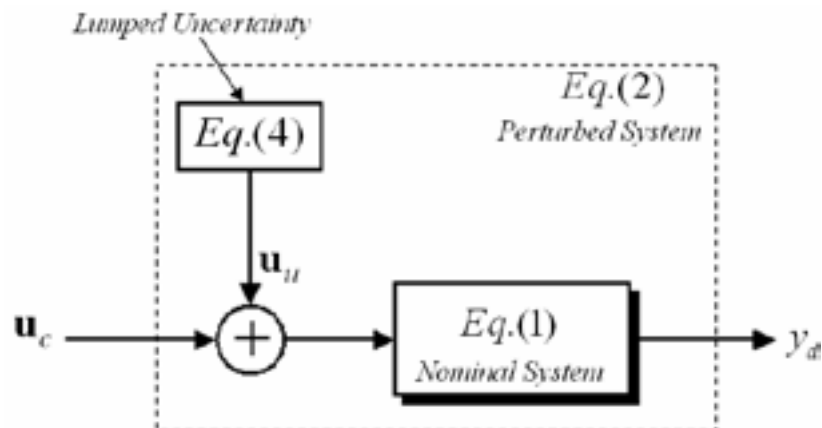
הנו איבר המבטא את סך הסטייה של ה-plant ממצבו הנומינאלי ו-b+ הנה מטריצה פסאודו-הופכית של b. על פי (3), ניתן לשקף את סך הסטייה של ה-plant ממצבו הנומינאלי ע"י כניסת הפרעה u_u המתווספת לכניסת בקרה u_c, כמתואר באיור 2 [2].

לפיכך, אם נצליח לשערך את u_u מהר ומדויק בעזרת אלגוריתם מתאים, נוכל להחסירו מכניסת הבקרה וכך לבטל את השפעת ההפרעות והאי-ודאות על המקר החיצוני (ראה איור 3). הגישה הוצגה תחת השם "נומינאליזציה כניסה- יציאה" (input-output nominalization) ב-[3].

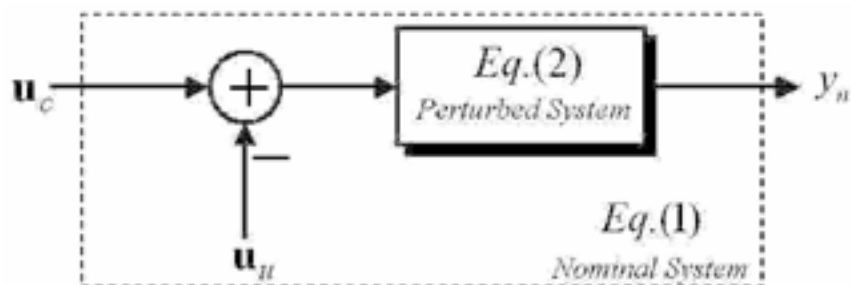
תכנון ה-nominalizer יכול להתבצע במספר גישות עבור מערכות ליניאריות ולא ליניאריות. הקורא המעוניין להתעמק בפרטים מופנה לסקירה מעמיקה ב-[4]. כדאי לציין כי לאחרונה הוצעה שיטה אוניברסאלית לכלל המערכות המאפשרת

תכנון רובאסטי של משערכים [5].

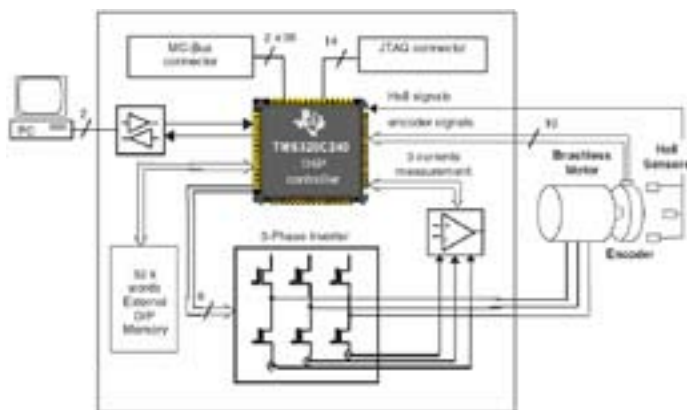
ה-nominalizer משתמש בווקטור קניסות בקרה וביציאת המערכת על מנת לשערך את סך הסטייה של ה-plant ממצבו הנומינאלי, כמתואר באיור 4. רחב הפס של הפעולה צריך להיות גבוה משמעותית מרוחב הפס של הבקר הראשי על מנת למנוע אינטראקציה בין פעולות הבקרים.



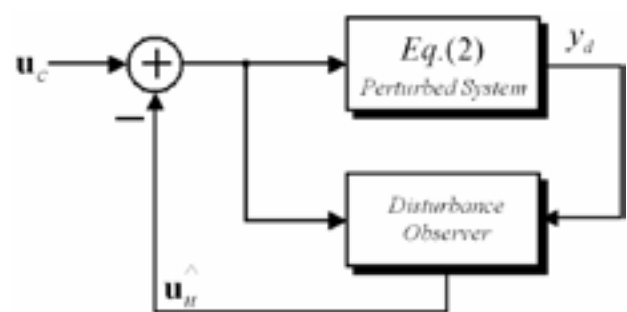
איור 2: מערכת עם הפרעות ואי-ודאות



איור 3: פיצוי הפרעות ואי-ודאות



איור 5: דיאגרמת בלוקים של מערכת ניסיונית



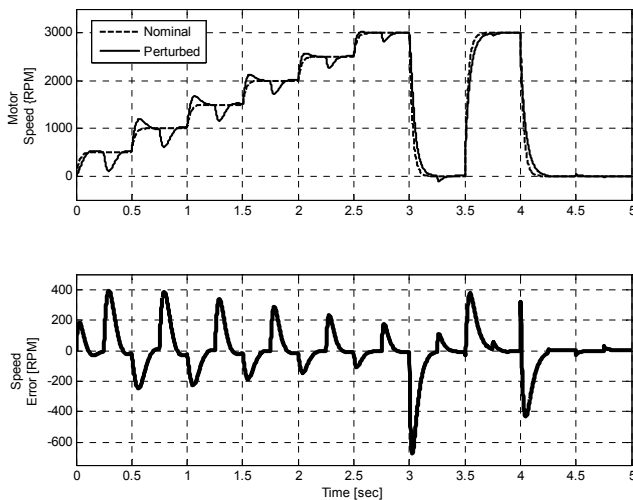
איור 4: טופולוגיית הנומינאליזציה

3. יישום במערכת הינע חשמלי

האלגוריתם נוסה על מערכת הנע חשמלי מסוג MCK240 של חברת Technosoft, הכוללת מנוע סינכרוני מסוג Brushless, מהפך תלת פאזי ומעבד אותות ספרתי מסוג TMS320F240. המערכת מוצגת באיור 5.

הבקר הראשי מסוג PI תוכנן על פי נתוני יצרן ובקר המשני תוכנן בשיטת [4] Extended Luenberger Observer. המערכת קיבלה פקודת מהירות מתנה והמנוע הועמס בשיטת העמסה המתוארת ב-[6] ע"י עומס פולסי. כמו כן המערכת נחשפה לשינוי התנגדות סלילי

הסטטור, כמתואר באיור 6. תוצאות הניסוי ללא נומינליזציה מוצגות באיור 7. ניתן לראות כי המערכת מושפעת בצורה קשה ע"י העומס והאי-ודאות וקיימת סטייה משמעותית בין התגובה הנומינאלית לתגובה המתקבלת. תוצאות הניסוי עם נומינליזציה מוצגות באיור 8. ניתן לראות כי ביצועי המערכת השתפרו בצורה משמעותית וקיימת התאמה מצוינת בין התגובה הנומינאלית לתגובה המתקבלת.



איור 7: תוצאות הניסוי ללא נומינליזציה

[5] Q.-C. Zhong, A. Kuperman and R. Stobart, "Design of UDE-based controllers from their two-degree-of-freedom nature," Int. J. Robust Nonl. Control, To appear.

[6] A. Kuperman, Y. Horen and S. Tapuchi, "A differential state-space approach to simultaneous emulation of uncertainties and disturbances in voltage-controlled brushless motors," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 2, pp. 727 – 734, Feb. 2010.



פרופ' סעד תפוחי – דיקן הנדסת חשמל ואלקטרוניקה המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון.

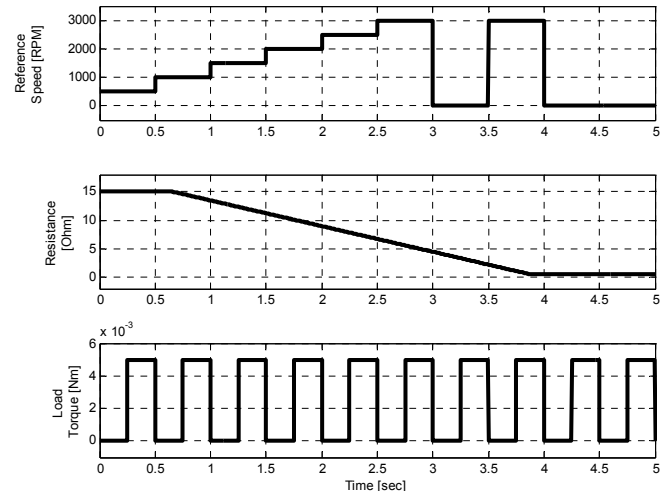
לאחר שנים רבות של ניסיון פדגוגי במוסדות הנדסאים ואקדמיים שונים. התקבל למכללת סמי שמעון בשנת 1999 כראש המחלקה להנדסת חשמל. ב-2002

מונה לדרגת מרצה בכיר. בשנים 2002-2006 מונה לראש אקדמי בקמפוס אשדוד. וראש המחלקה להנדסת חשמל בקמפוס אשדוד. מאז שנת 2006 מונה לדיקן להנדסת חשמל ואלקטרוניקה בשני הקמפוסים. עוסק בעיקר בשני נושאי מחקר:

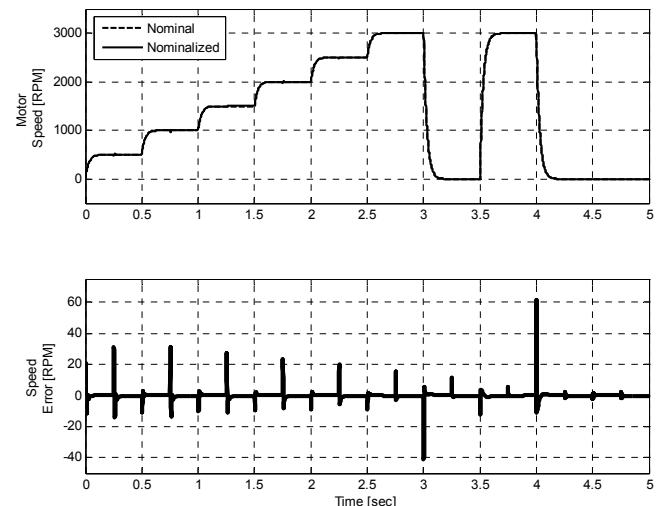
1. Radio Frequency Communication and HAP Systems.
2. DC-DC Converters and Power Electronics in difference techniques

ד"ר יורם הורן – ראש המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה בקמפוס ב"ש המכללה האקדמית להנדסה סמי שמעון.

ד"ר אלון קופרמן – מרצה בכיר במחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה המרכז האוניברסיטאי אריאל.



איור 6: תנאי הניסוי



איור 8: תוצאות הניסוי ללא נומינליזציה

4. ביבליוגרפיה

[1] T. Umeno, T. Kaneko, and Y. Hori, "Robust servosystem design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robust manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 40, no. 5, pp. 473–485, Oct. 1993.

[2] A. Kuperman and R. Rabinovici, "Virtual torque and inertia loading of controlled electric drive," IEEE Trans. Educ., vol. 48, no. 1, pp. 47 – 52, Feb. 2005.

[3] A. Kuperman, Y. Horen, S. Tapuchi, I. Katz and A. Abramovitz, "Input-output nominalization of linear systems with slow-varying uncertainties," COMPEL – Int. J. Comp. Math. Electric. Electron. Eng., vol. 29, no. 1, pp. 72 – 89, 2010.

[4] A. Radke and Z. Gao, "A survey of state and disturbance observers for practitioners," in Proc. American Control Conf., Minneapolis, USA, pp. 5183 – 5188, Jun. 2006.