

מתנעים רכים לא רק הגבלת זרם ההנעה

הנעת מנועים א-סינכרוניים, הנפוצים ביותר בתעשייה, היא נושא בעל חשיבות המכתיב התייחסות בשני היבטים עיקריים: זרם ההנעה הנצרך מרשת החשמל, והמומנט שמייצר המנוע בזמן ההנעה. קיימות מספר שיטות להנעת המנועים הא-סינכרוניים. אחת מהן היא הנעה בעזרת מתנע רך אלקטרוני. רבים נוטים לחשוב שיכולת המתנע הרך מתבטאת רק ביכולת להגביל את זרם ההנעה, אך במאמר זה נמחיש כיצד יכול מתנע רך למעשה גם לשלוט על תהליך ההנעה, ולא רק להגביל את זרם ההנעה.

דוגמאות למתנעים לעבודה במתח נמוך (עד 1,000V)

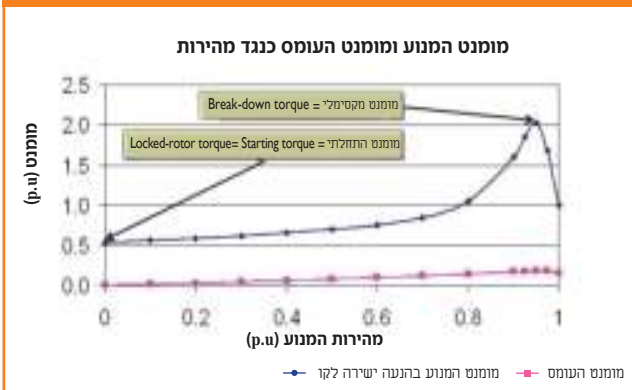


הנעה ישירה לקו (Direct On Line) (start - DOL)

בשיטה זו מניעים את רוב המנועים הא-סינכרוניים. המנוע מחובר לרשת החשמל ללא כל אמצעי ריסון לזרם ולמומנט, ובדרך כלל הוא יותנע על-ידי מגען ישירות לקו.

המומנט שמייצר המנוע בתחילת תהליך ההנעה ישירה לקו. במנועים למתח נמוך, מומנט זה הוא עד פי 2 מהמומנט הנומינלי של המנוע. במנועים למתח גבוה, מומנט זה הוא בדרך כלל פחות מהמומנט הנומינלי של המנוע.

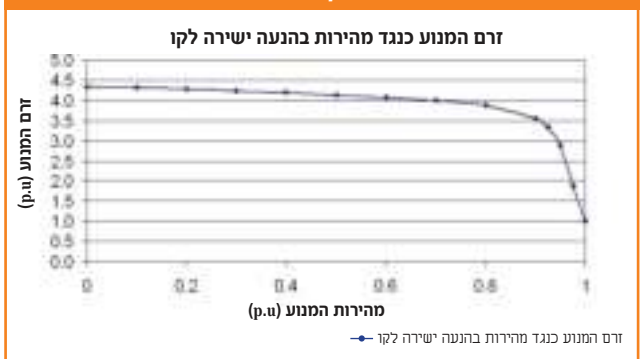
איור 2: מומנט המנוע בתהליך ההנעה ישירה לקו של מנוע ומומנט העומס



מומנט מקסימלי (Break-down torque) – זהו המומנט שמייצר המנוע לקראת סיום תהליך ההנעה. במנועים למתח נמוך וגם במנועים למתח גבוה, מומנט זה הוא עד פי 2.5 מהמומנט הנומינלי של המנוע. כאמור, בהנעה ישירה לקו, המומנטים המיוצרים על-ידי המנוע אינם נשלטים, ולכן צפויים הלמים מכניים בזמן ההנעה. כך למשל, מנוע למתח נמוך המייצר מומנט גדול פי 1.8 בתחילת ההנעה, ואף פי 2.5 מהמומנט הנומינלי, לקראת סוף ההנעה, בהחלט יגרום בלאי במערכת המכנית לאורך זמן. במקביל, זרם גדול פי 4.5, או יותר, יגרום מפלי מתח ברשת החשמל. במקרה של רשת מוגבלת, כמו באוניות, מפלי מתח מעל 13% מסוג זה אינם מותרים.

באיור 1 מוצג זרם ההנעה ישירה לקו של מנוע למתח ביניים: 11kV, 5.5MW, 349A. זרם זה גדול פי 4.5 מהזרם הנומינלי של המנוע (בכל האירורים מוצגות יחידות יחסיות P.U.). במנועים למתח ביניים, הזרם בהנעה ישירה לקו גדול פי 4.5 עד פי 6.5 מהזרם הנומינלי.

איור 1: זרם בהנעה ישירה לקו של מנוע א-סינכרוני



במנועים למתח נמוך, זרם ההנעה גדול פי 5 עד פי 8 מהזרם הנומינלי של המנוע. מעבר לכך, קיימים מקרים בהם זרמי ההנעה חורגים מגבולות אלה. באיור 2 מוצגת התנהגות מומנט המנוע הא-סינכרוני בעת ההנעה ישירה לקו. בגרף מוצגת גם התנהגות עומס אופייני בזמן ההנעה (במקרה זה, גרף העומס הוא של מדחף ימי ללא עומס) עד נקודת העבודה בסיבובים נומינליים של המנוע. קיימות שתי נקודות חשובות של מומנט על ציר המהירות האופייניות למנועים א-סינכרוניים: מומנט התחלתי (Starting torque/Locked-rotor torque) – זהו

שיטות הנעה למנועים א-סינכרוניים

קיימות מספר שיטות להנעת מנועים א-סינכרוניים. נציין בקצרה את החשובות שבהן, על יתרונותיהן וחסרונותיהן העיקריים.

הנעה בעזרת משנה מהירות

הנעה זו היא אולי ההנעה האולטימטיבית למנוע א-סינכרוני, שכן היא מאפשרת ויסות מושלם של המומנט והזרם, ולמעשה ניתן להניע בזרם גדול פי 1.5 מהזרם הנומינלי ובמומנט המותאם לדרישות האפליקציה. חסרונה של השיטה הוא מחירו היקר של משנה מהירות, בעיקר למנועי מתח גבוה, ואף למנועי מתח נמוך בהספקים גבוהים. עלות משנה מהירות למתח גבוה היא פי 6 ויותר מעלותו של מתנע רך לאותו מנוע. לכן, שיטה זו יקרה אם לא נדרש ויסות מהירות רציף של המנוע בזמן עבודה.

הנעה בעזרת נגדים במעגל הרוטור

בשיטה זו נדרש מנוע עם רוטור מלופף (ולא רוטור כלוב). קצות הליפופים מחוברים לנגדים חיצוניים דרך טבעות החלקה. בעת ההנעה מחוברים נגדים חיצוניים בטרור לסלילי הרוטור, וכך מתקבל מומנט גבוה בזרם נמוך. בשיטה זו המנוע יקר יותר, שכן אין זה מנוע עם רוטור כלוב, כי אם רוטור מלופף. כמו כן נדרשים פיקוד חיצוני (קונטקטורים-מגנטיים) לחיבור וניתוק נגדים, וכן תחזוקה למערכת טבעות החלקה.

הנעה בעזרת מתח מופחת

קיימות מספר שיטות להנעה מסוג זה: הנעת כוכב משולש (Star/Delta starter), שנאי עצמי (Auto Transformer), נגדים טוריים במעגל הסטטור (Primary Resistance), ומתנע רך אלקטרוני (Soft Starter). המשותף לכל השיטות שייסקרו להלן הוא אופן השליטה על מומנט המנוע ביחס להפחתת זרם המנוע.

ניתן לומר **בקירוב**, כי המומנט שמייצר המנוע קטן ביחס ריבועי להקטנת המתח של המנוע (נוסחה 1).

נוסחה 1: מומנט המנוע בשיטות הנעה של מתח מופחת

$$M_{\text{reduced}} = (U_{\text{reduced}}/U_n)^2 \times M_{\text{DOL}}$$

M_{reduced} – המומנט המופחת של המנוע כאשר המתח בכניסה של המנוע מופחת
 U_{reduced} – המתח המופחת של המנוע באחת משיטות ההנעה עם מתח מופחת
 U_n – המתח הנומינלי של המנוע
 M_{DOL} – המומנט שפיקד המנוע בשיטת הנעה ישירה לקו (ללא הפחתת המתח)

לדוגמא:

המנוע שגרף המומנט שלו מובא באיור 1 לעיל יחובר ל-65% מהמתח הנומינלי שלו. המומנט התחילי (Locked-Rotor torque) במתח מלא הוא 0.45p.u. (כלומר 45% מהמומנט הנומינלי של המנוע). המומנט המופחת של המנוע ב-65% מתח יחושב לפי נוסחה 1, כדלקמן:

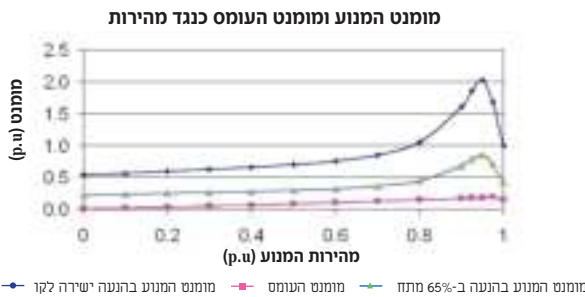
$$M_{\text{reduced}} = (0.65/1)^2 \times 0.45 = 0.19 \text{ p.u.}$$

במילים אחרות, ניתן לומר שהמומנט יהיה מופחת לפי החישוב הבא:

$$(0.45 - 0.19) / 0.45 = 0.577 = 58\%$$

הפחתה של 35% במתח ובזרם תגרום להפחתה של 58% במומנט! כפי שהוזכר קודם, מנועים למתח גבוה אינם מייצרים מומנטים תחיליים גבוהים, ולכן חשוב לוודא שהמנוע ייצר מומנט מספיק גבוה כדי לאפשר האצה. מומנט מספיק גבוה פירושו תמיד מומנט הגבוה ממומנט העומס בכל נקודת מהירות – ממהירות אפס ועד

איור 3: מומנט ההנעה של מנוע א-סינכרוני במתח מלא ובמתח מופחת של 65% מהמתח הנומינלי ומומנט העומס



למהירות הנומינלית (לדוגמא, איור 3). אם מומנט זה לא יהיה גבוה ממומנט העומס – המנוע לא יאיץ.

הנעת כוכב משולש

בשיטת הנעה זו, סלילי המנוע מחוברים תחילה למתח פאזי, ורק לקראת סיום ההנעה יחוברו למתח המלא (השלב) של המערכת. פירוש הדבר הוא, שבשלב הראשון יוקטן מתח המנוע ל- $1/\sqrt{3}$ מהמתח הנומינלי, כלומר ל-58% מהמתח הנומינלי. המומנט יקטן ביחס הריבועי, כפי שהוסבר לעיל.

שיטה זו פשוט יחסית ליישם במנועים קטנים, אולם קיימים בה מספר חסרונות: לא ניתן לכייל ולהתאים את ההנעה לתנאי העומס, נדרש חיזוק של 6 מוליכים מהמנוע (יקר במנועים גדולים), וקיימת תופעה של זרמי מעבר גבוהים (switching currents) עד כדי זרמים של הנעה ישירה לקו בעת המעבר מחיבור כוכב לחיבור משולש.

הנעה בעזרת שנאי עצמי

בשיטה זו המנוע מחובר לצידו המשוני של שנאי עצמי (Autotransformer). למעשה, המנוע מוזן במצב זה ממתח של 50% עד 85% מהמתח המלא. יתרונה הגדול ואולי היחיד של שיטה זו הוא בזרם הרשת הנמוך יחסית. חסרונות עיקריים של השיטה: זרמי המיגנט הצפויים, השנאי העצמי מוגבל במספר ההנעות שלו, מהווה אלמנט בקרה בחוג פתוח, ואינו מאפשר כל שליטה או הגנה על המנוע, זהו מיתקן גדול וכבד, והוא אינו מאפשר "הדממה רכה" (כמו מתנע רך).

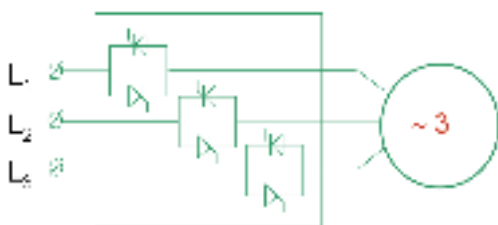
הנעה בעזרת נגדים טוריים במעגל הסטטור

בשיטה זו מחברים נגדים בטרור למעגל הסטטור כך שהמנוע מקבל מתח חלקי למשך זמן ההנעה. יתרונה היחיד של פתרון זה הוא פשטותו. בפתרון זה אין כל שליטה על תהליך ההנעה או הגנה.

הנעה בעזרת מתנע רך

בשיטה זו מתח המנוע מופחת על-ידי מערכת טייריסטורים (SCRs) המחוברים בחיבור "מקבילי הפוך" (Anti parallel connection), כמתואר באיור 4.

איור 4: מבנה עקרוני של מתנע רך במתח נמוך – בכל פאזה זוג טייריסטורים (Thyristors) בחיבור "מקבילי הפוך" (Anti Parallel)



והתאמה מדויקת לאפליקציה המכאנית והתאמה לרשת החשמל, הגנה מתקדמת על המנוע, תקשורת למערכות בקרה ועוד.

הנעה במתנע רך למתח גבוה

מתנע רך למתח גבוה שונה בשני אופנים עיקריים ממתנע רך למתח נמוך:

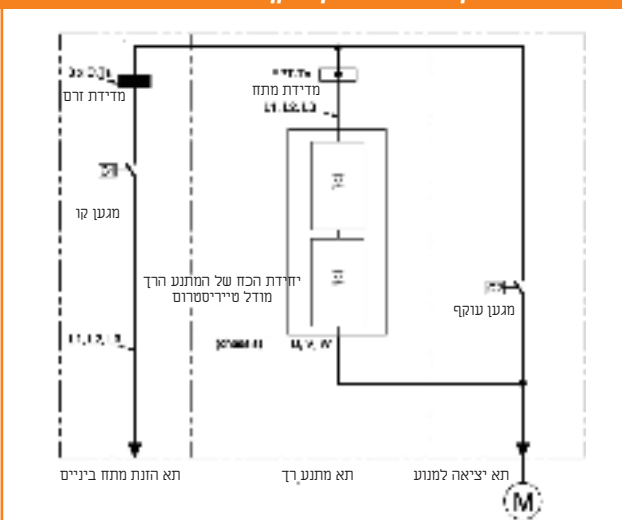
א. נדרשים מספר טייריסטורים בטור בכל פאזה כדי לאפשר לטייריסטורים להתגבר על המתח ההופכי הגבוה ($PIV=Pick$ Inverse Voltage).

ב. מתנע למתח גבוה חייב להיות משולב בלוח מתח גבוה כדי לאפשר את פעולתו. בלוח משולבים מגען קו (Line Contactor) ומגען עוקף (Bypass Contactor).
באיוורים 8 ו-9 מוצגים לדוגמא מבנה ותוכנית עקרוניים של מתנע רך למתח גבוה עד 13.8 ק"ו.

איור 8: מבנה עקרוני של מתנע למתח גבוה עד 13.8 ק"ו - מספר טייריסטורים לפאזה יתגברו על המתח ההופכי (PIV).



איור 9: תוכנית עקרונית של מתנע למתח 11 ק"ו לזרם 400 אמפר עם מגען בכניסה ומגען עוקף

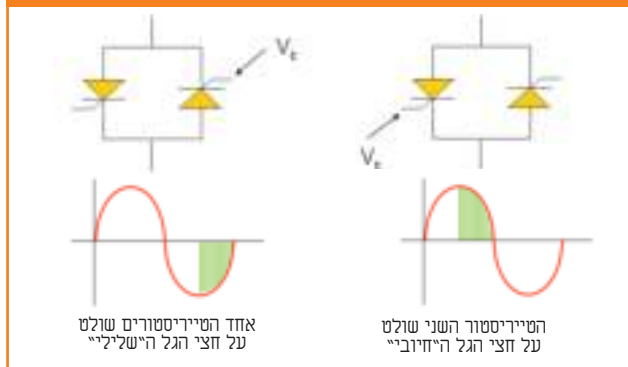


איור 10: מתנע למתח 11 ק"ו לזרם 400 אמפר עם מגען בכניסה ועם מגען עוקף



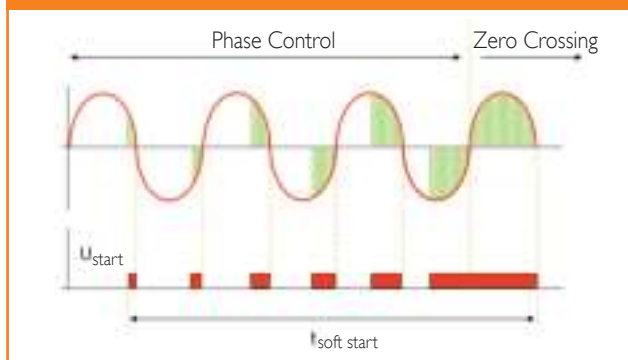
חיבור זה, יחד עם שליטה מבוקרת-מיקרופרוססור, מאפשר בקרה אוטומטית על תהליך ההנעה של המנוע. במערכת זו, מתח המנוע אינו מופחת באופן קבוע, אלא "נשלט" באמצעות מערכת הבקרה השולטת על זוויות ההצתה של טייריסטורים (איור 5).

איור 5: אופן השליטה על הטייריסטורים כדי לקבל בקרת גל המתח ביציאה מהמתנע



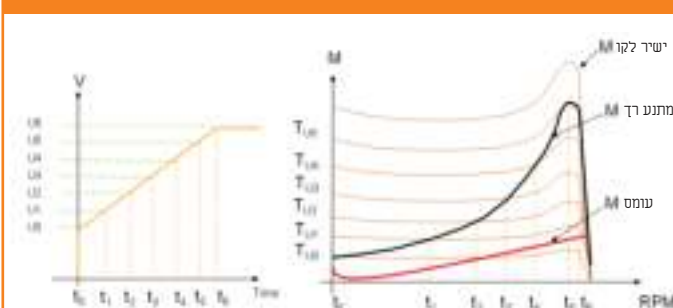
מערכת הפיקוד של המתנע שולטת על "זוויות ההצתה" של הטייריסטורים, ומתקבלת מערכת "בקרת פאזה" (Phase Control), כמתואר באיור 6. המנוע "רואה" בכל רגע נתון מתח אפקטיבי (RMS voltage) שונה, עד אשר תהליך ההנעה מסתיים, והמנוע מקבל מתח מלא לעבודה.
זהו מצב "חציית אפס" (Zero Crossing).

איור 6: מערכת הטייריסטורים מבוקרת-המחשב יוצרת "בקרת פאזה" (Phase Control) בהתאם לזוויות ההצתה של הטייריסטורים.



כפי שהוסבר לעיל, בשונה מכל שיטות ההנעה בהן מתח המנוע מופחת, הנעה בעזרת מתנע רך מאפשרת מעבר בין עקומות מומנט מופחתות מתח באופן רציף, כפי שמוצג באיור 7. נוסף על כך, מתנע רך אלקטרוני מאפשר בקרה בחוג סגור, כיול

איור 7: מתנע רך מאפשר מעבר רציף בין עקומות מומנט של המנוע, כאשר כל עקומת מומנט מופחת תואמת למידת הפחתה מסוימת במתח.



מימוש גמישות מובנית במתנע רך - מקרה הדגמה

11 שניות על מנת לתת מענה מהיר לצורכי ההינע של הספינה). מנגד, עמידה בזמן זה מתאפשרת באמצעות הפעלת מומנט מקסימלי של פי 1.9 מהמומנט הנומינלי של המתנע (גם זה מנוגד

לדרישות - מקסימום 1.3 פעמים מהמומנט הנומינלי). כדי להתמודד עם בעיה זו הוחלט שיש ליישם את יכולת "הנעת פולס" (Pulse Start) המתקדמת של המתנע. בעזרת "הנעת פולס" ניתן למעשה "לפסל" את צורת הגל, כך שבתחילת ההנעה יהיה הזרם גבוה באופן יחסי, ולקראת סיום ההנעה יהיה הזרם נמוך באופן יחסי - כל זאת על מנת לגרום להפחתת מומנט ניכרת, שתביא

את מומנט המתנע לערך של 1.3p.u, כלומר לא יותר מ-130% מהמומנט הנומינלי של המתנע.

בעזרת תוכנת המתנע ניתן לכייל זרם הנעה של 280% מהזרם הנומינלי של המתנע לזמן קצוב ומחושב. בפרק זמן זה, מומנט

פרויקט האונייה Oasis of the Seas הוא פרויקט דגל ברמה בינלאומית. האונייה נבנתה במספנות STX בעיר טוקיו בפינלנד עבור חברת "רויאל קריביאן". עלות הפרויקט כמיליארד יורו,

וזו אוניית הנוסעים הגדולה והיקרה בעולם. יש לה אונייה - Allure of the Seas אחות בשם

מספר נתונים טכניים:

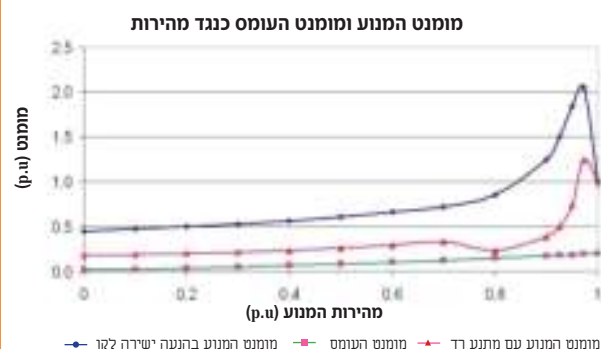
אורך האונייה הוא 361 מטר, רוחבה - 66 מטר בנקודה הרחבה ביותר, גובהה 72 מטר מעל פני המים. יש בה 16 סיפונים לאורחים (ובנוסף, סיפונים למערכות טכניות). היא עשויה להכיל עד 6,300 נוסעים ועוד 2,160 אנשי צוות. האונייה היא מסוג "דיזל -

חשמל" - כלומר, לא מנועי הדיזל הם שמניעים ישירות את המדחפים, אלא גנרטורים אשר מונעים על-ידי מנועי הדיזל הם שמזינים מנועים חשמליים אשר מניעים את המדחפים. באונייה מותקנים 3 גנרטורים של 13,860kW, ועוד 3 גנרטורים של

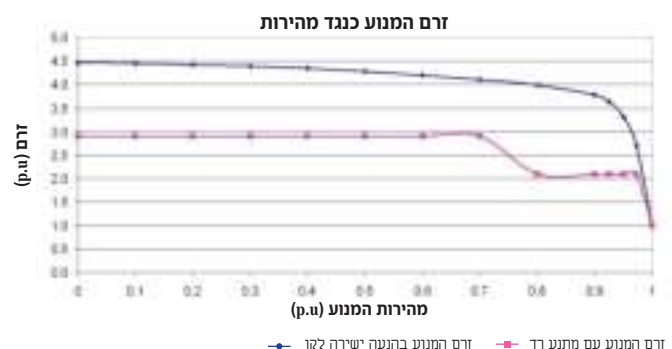
Oasis of the Seas בהפלגת הבכורה - אוקטובר 2009



איור 11: עקומות מומנט ועקומות זרם של המתנע בשלב הסימולציה



המתנע נמוך מהערך הגבולי של 130%. לקראת סיום ההנעה מוריד המתנע את הזרם לערך של 200% מהזרם הנומינלי, ואז מוגבל המומנט המקסימלי ל-130% מהמומנט הנומינלי, כמתואר באיורים 11 ו-12.



איור 12: עקומות זרם אמיתיות של המתנע בזמן ההנעה. בנוסף להגבלת המומנט, מתקבלת העמסה הדרגתית (הניתנת לכיול) של הגנרטורים המזינים.



18,480kW. סך כל יכולת ייצור החשמל שלהם עומדת איפוא על 197MW.

מדחפי האונייה מונעים באמצעות 3 מנועים חשמליים בהספק של 20MW כל אחד. מנועים אלה מוזנים מששת הגנרטורים, באמצעות וסתי מהירות.

נוסף על כך, בחרטום האונייה ממוקמים 4 מדחפי חרטום צידיים (Bow Thrusters), בהספק של 5.5MW כל אחד, מתח ההזנה 11 kV, וזרם כל מנוע 349 אמפר. כל מדחף הוא בקוטר של 4 מטרים. תכנון אופן ההנעה של מדחפי חרטום אלה היה אתגר לא קטן. הדרישות היו חמורות, שכן נדרש להניע את המנועים תוך פרק זמן של כ-11 שניות, אולם בד בבד נדרש גם שהמומנט המקסימלי של המנוע (Break-Down torque) לא יעלה על 1.3 פעמים המומנט הנומינלי של המנוע. דרישות אלה מנוגדות האחת לשנייה, כיוון שכדי להקטין את המומנט המקסימלי נדרש להקטין את מתח הכניסה למנוע בעזרת המתנע. אילו כך נעשה, היה זמן ההנעה מגיע לכ-20 שניות - זמן ארוך מדי מבחינת פיקוד הספינה (נדרשו

3. סיכום

מתנע רך אינו רק אמצעי להגבלת זרם ההנעה של המנוע, כפי שיש הנוטים לחשוב; הוא גם מאפשר שליטה על תהליך ההנעה. זאת, בנוסף על יכולות הגנה על המנוע, מדידות שונות, ותקשורת

למערכות בקרה. שליטה זו אפשרית בשל מערכת הבקרה מבוססת-מיקרומחשב, ובמיוחד בשל הגמישות שמאפשרת המערכת למפעיל על מנת להגיע לתוצאות הנעה מיטביות.