

בחירת מנועים נכונה



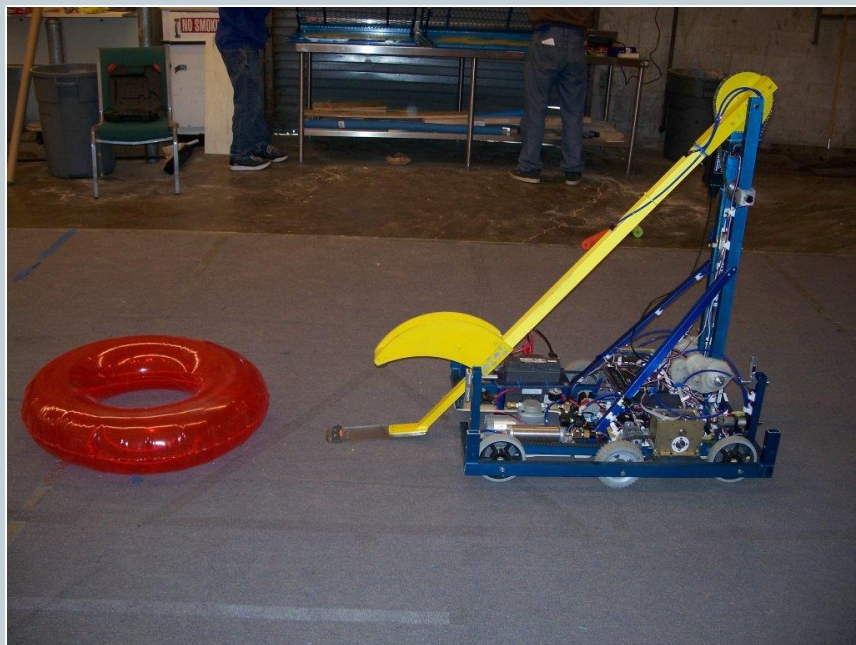
ליאב עוז-ארי

מי אני?



- **בוגר FIRST:**
 - 2005-2006 בגימנסיה העברית "הרצליה" (FRC-1578)
- **מנטור בFIRST:**
 - 2008, 2009, 2010, 2011 מנטור בברגי הרעם מעמק חפר (FRC-2630)
 - 2013 - 2016 מנטור בD-Bug מעירוני ד' תל-אביב (FRC-3316)
- **בוגר הטכניון:**
 - 2006-2010 תואר ראשון בהנדסת מכונות
 - 2010-2012 תואר שני בהנדסת מכונות
- **ברקיסט:**
 - בוגר תוכנית "ברקים" של העתודה האקדמית
- **מהנדס מכונות:**
 - צה"ל 2011-2017
 - 2017 - Common Sense Robotics - ???

מוטיבציה



- רובוטים צריכים מנועים כדי לזוז
- לא כל המנועים זהים
- רוצים שהמערכת תעבוד הכי "טוב"

בשביל זה צריך לדעת איך לבחור מנוע!
אבל: גם תמסורת!

התהליך שנעבור היום



1. ניתוח פיזיקלי של המערכת (כוח, מומנט, אנרגיה, הספק)
2. השוואת ביצועים של מנועים שונים
3. בחירת מנוע, ובחינת הנתונים שלו
4. התאמת תמסורת למנוע בהתאם למערכת ולנתוני המנוע



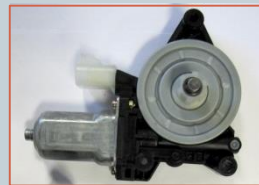
4



3



2



1



מושגים פיזיקליים בסיסיים



• כוח:

"כוח הוא כל דבר שיכול לגרום לגוף בעל מסה להאיץ"

באנגלית: Force

• מומנט:

באנגלית: Torque

כמו כוח אבל בסיבוב:

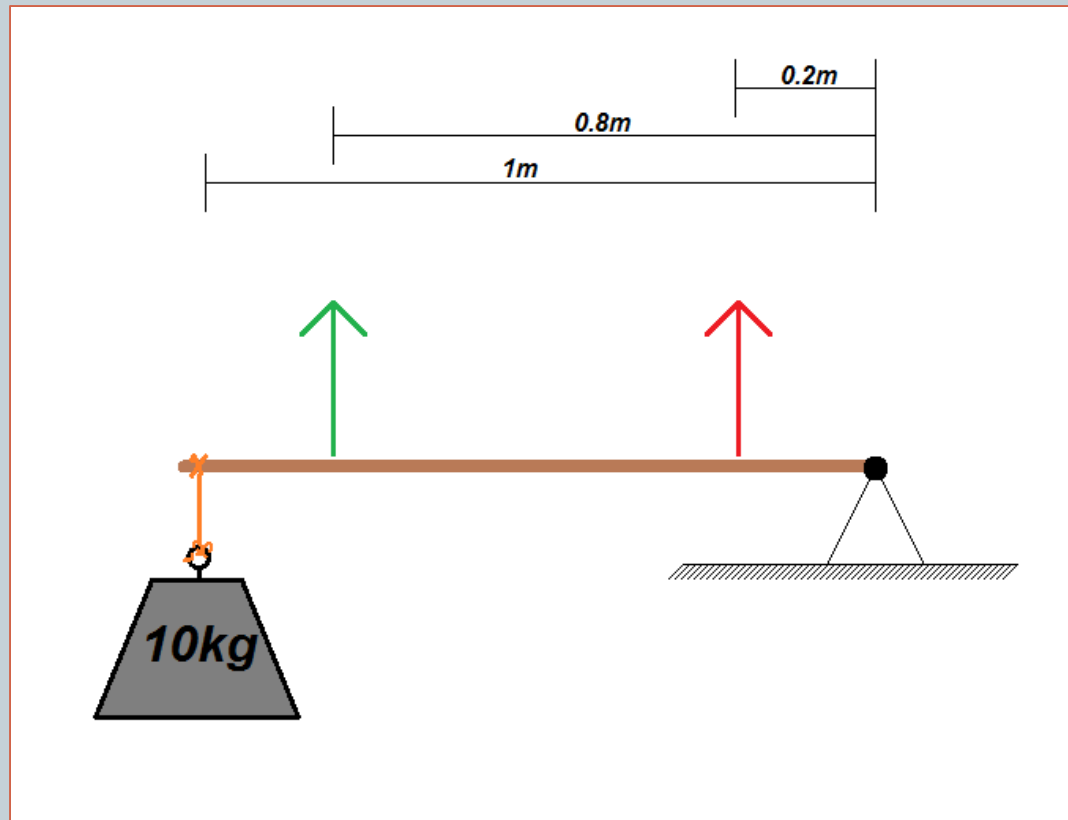
$$T_{[Nm]} = F \cdot d$$

"מומנט = כוח כפול זרוע"

דוגמה למומנט



- היכן צריך להפעיל יותר כוח על מנת להחזיק את המשקולת, בחץ האדום או בחץ הירוק?



מושג נוסף: עבודה



- עבודה = הוספת אנרגיה למערכת

- באנגלית: Work

- הגדרה:

$$W_{[J]} = F \cdot \Delta x$$

"עבודה = כוח כפול דרך"

- דוגמה:

העבודה הנדרשת להרמת משקולת בעלת מאסה של 30 ק"ג לגובה 2.5 מטר היא:

$$W = F \cdot \Delta x = mg \cdot 2.5 = 30 \cdot 9.81 \cdot 2.5 \cong 735_J$$

עבודה בסיבוב



- הגדרה מאוד דומה, במקום:

$$W_{[J]} = F \cdot \Delta x$$

"עבודה = כוח כפול דרך"

- נשתמש ב:

$$W_{[J]} = T \cdot \Delta\theta$$

"עבודה = מומנט כפול שינוי בזווית"

מושג אחרון: הספק



- הספק = קצב ביצוע עבודה
- באנגלית: Power
- אינטואיציה: הליכה בעליה לעומת ריצה בעליה
- הגדרה:

$$P_{[watt]} = \frac{W}{t}$$

"הספק = קצב ביצוע העבודה"

הספק מסתובב



- אמרנו שהספק הוא:

$$P = \frac{W}{t}$$

- ושעבודה בסיבוב היא:

$$W = T \cdot \Delta\theta$$

- נציב ונקבל:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{T \cdot \Delta\theta}{t} = T \frac{\Delta\theta}{t} = T \cdot \omega$$

"הספק בסיבוב הוא המומנט כפול מהירות הסיבוב"

עקרון ניתוח מערכת



● מציאת העבודה הנדרשת לביצוע, ע"י:

○ בסיבוב:

✦ מציאת המומנט

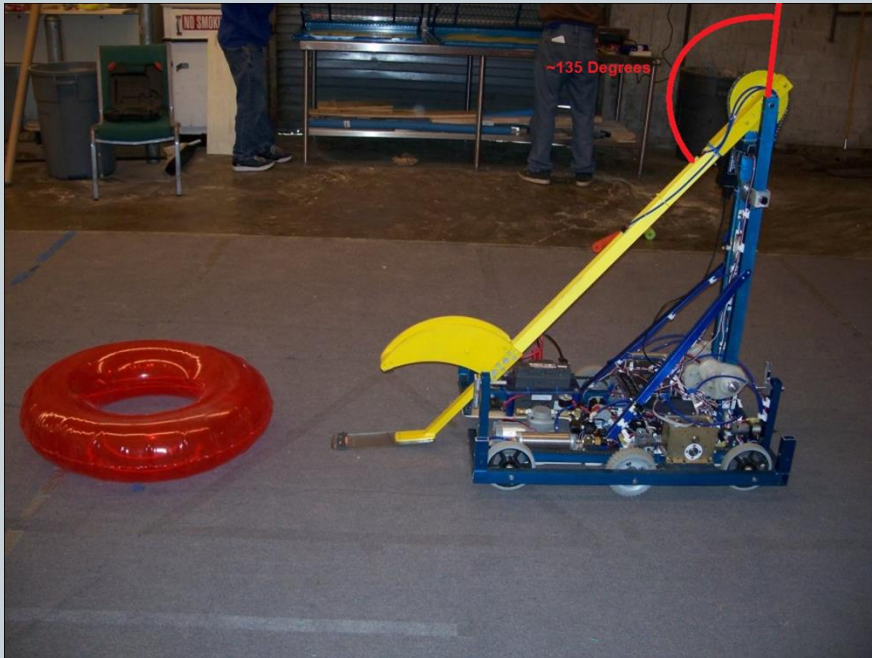
✦ מציאת השינוי הזוויתי הנדרש

○ בקו ישר:

✦ מציאת הכוח

✦ מציאת הדרך

דוגמה



- אורך הזרוע: 1.5 מטר
- משקל הזרוע: 2 ק"ג
- משקל החפץ המורם: 7 ק"ג
- טווח עבודה: כ-135 מעלות
או: $\frac{3\pi}{4}$ רדיאנים.
- מה העבודה הנדרשת להרמת הזרוע למצב אנכי?

דוגמה



- שיטת החישוב: מציאת המומנט המקסימלי, וחישוב בעזרתו כאילו הוא פועל לאורך כל הדרך. את משקל הזרוע נחשב כאילו הוא פועל במרכז הזרוע.

- המומנט במקרה שלנו:

$$T = F_1 d_1 + F_2 d_2 = 2 \cdot 9.81 \cdot 0.75 + 7 \cdot 9.81 \cdot 1.5$$

$$T = 117.72_{Nm}$$

- העבודה:

$$W = T \cdot \Delta\theta = 117.72 \cdot \frac{3\pi}{4} = 277.37_J \cong 280_J$$

תזכורת לגבי השלבים



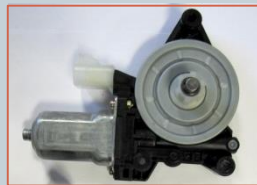
1. ניתוח פיזיקלי של המערכת (כוח, מומנט, אנרגיה, הספק)
2. השוואת ביצועים של מנועים שונים
3. בחירת מנוע, ובחינת הנתונים שלו
4. התאמת תמסורת למנוע בהתאם למערכת ולנתוני המנוע



4



3



2



1

נתונים רלוונטיים של מנוע



- הספק מקסימלי (Maximum Power, Peak Power) [Watt]:
ההספק המקסימלי בהחלט שמנוע יכול לתת (אבל לא דווקא זה שהוא נותן בכל רגע נתון!)
- מומנט עצירה (Stall Torque, Maximum Torque) [Nm]:
המומנט המקסימלי בהחלט שמנוע יכול לתת. במומנט הזה המנוע עוצר ולא מסוגל להסתובב כלל. לחלוטין לא המומנט בו מתכננים לעבוד.

דוגמה לנתוני מנוע



• מנוע CIM רגיל, נתונים מאתר אנדימרק

dr-FIRST-p/am-0255.htm

Home View Cart My Account Help

SEARCH ALL PRODUCTS HERE
SEARCH OUR ENTIRE WEBSITE

PRODUCTS Home > Motors & Servos >
2.5" CIM Motor (am-0255)

Price: \$28.00 Qty: 1 Add to cart
Stock Status: In Stock
Product Code: AM-0255

Description Files & Documents

Product Overview:
2.5 inch CIM, Brushed DC Motor
Motor has this label, stamped in white:
AM802-001A
PM25R-45F-1003
12VDC PM25R
RoHS
060611

Specifications:

Physical Specs
• Size: 2.5 inch diameter, 4.34 inch long body
• Output Shaft size: 0.313 +/- 0.0004, with 2mm keyway
• Weight: 2.82 pounds
• Mounting Holes: #10-32 tapped holes (2), on a 2" bolt circle

Performance Specs
• Voltage: 12 volt DC
• No load RPM: 5,310 (+/- 10%)
• Free Current: 2.7 amps
• Maximum Power: 337 Watts (at 2655 rpm, 172 oz-in, and 68 amps)
• Stall Torque: 2.42 N-m, or 343.4 oz-in
• Stall Current: 133 amps

Products in the Same Category:

- Planetary Gearmotor Kit (am-2281) Price: \$350.00
- PQ27 Gearmotor (am-0915) Price: \$69.00
- Hi-Tec Servo, model HS-425HD (am-0010) Price: \$11.00

Average Customer Review: | Total Reviews: 24
★★★★★
5 of 5

Write your own review

Performance Specs:

- Voltage: 12 volt DC
- No load RPM: 5,310 (+/- 10%)
- Free Current: 2.7 amps
- Maximum Power: 337 Watts (at 2655 rpm, 172 oz-in, and 68 amps)
- Stall Torque: 2.42 N-m, or 343.4 oz-in
- Stall Current: 133 amps

• הספק מקסימלי: 337 וואט

• מומנט עצירה: 2.43 ניוטון-מטר

נתוני המנוע של חברת VEX



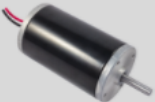
חברת VEX עשתה עבודה מדהימה בריכוז נתונים לגבי המנועים של פירסט

המידע זמין בכתובת הבאה:

<http://motors.vex.com>

יש שם עוד הרבה מידע חשוב, נרחיב עוד בסוף

	Free Speed (RPM)	Free Current (A)	Maximum Power (W)	Stall Torque (N · m)	Stall Current (A)
CIM Motor	5330	2.7	337	2.41	131
Mini CIM Motor	5540	3	215	1.41	89
BAG Motor	13150	1.8	149	0.43	50
775pro	18730	0.7	347	0.71	134
AndyMark R5775-125	5800	1.6	43	0.28	18
BaneBots RS-775 18V	13050	2.7	246	0.72	97
AndyMark 9015	14270	3.7	134	0.36	71
BaneBots RS-550	19000	0.4	190	0.38	84

	Free Speed (RPM)	Free Current (A)	Maximum Power (W)	Stall Torque (N · m)	Stall Current (A)
CIM Motor 	5330	2.7	337	2.41	131

מה עושים עם זה?



- הנתון של ההספק הוא החשוב ביותר!
- הספק=קצב ביצוע עבודה, לכן אם יודעים את העבודה הדרושה ואת הקצב בה מבצעים אותה, ניתן לדעת...
- כמה זמן זה ייקח!

$$P = \frac{W}{t}$$

$$t = \frac{W}{P}$$

במקרה שלנו:

$$t = \frac{W}{P} = \frac{280_J}{337_{watt}} = 0.83_{sec}$$

מצויין! (או שלא?)



- ברור שרוצים זרוע זריזה, אבל עד כדי כך?
- מותר בכלל להשתמש בעוד מנוע כזה?
- יש לנו משקל פנוי על הרובוט למנוע כזה?
- אנחנו סומכים על המנוע הזה? הוא אמין?
- ...

אולי נבדוק עוד מנועים?

נתוני מנוע רשמיים



• ב-2012 פירסט שחררה נתוני מנוע רשמיים באתר שלה:

Make	Part Number	Max Power (W)	Stall Torque (oz-in)	Free Speed (rpm)	Free Current (A)	Stall Current (A)	Notes
AndyMark	am-0912	180.83	60.7	16000	1.2	63.8	
AndyMark	am-0914	48.50	3101	84	0.6	22	
BaneBots	M3-RS395-12	48.05	16.65	15500	0.5	15	
BaneBots	M5-RS550-12						
	M5-RS550-12-B	253.52	70.55	19300	1.4	85	
BaneBots	M7-RS775-12	83.05	61.1	7300	1.1	30	
BaneBots	M7-RS775-18	273.03	112.8	13000	1.8	86.7	
CIM	FR801-001	340.11	344	5310	2.7	133	
Denso	262100-3030 (Right)	23.48	1501.1	84	1.8	18.6	
Denso	262100-3040 (Left)	23.48	1501.1	84	1.8	21	
Denso	AE235100-0160	18.16	18.4	5300	1	7	Pinion: 12 tooth, 20°PA, 0.75 module
Fisher Price	00801-0673	291.59	75.4	20770	0.82	108.7	Motor from 2011 KOP
Fisher Price	00968-2719	172.37	57.5	16100	2	63	Motor from 2010 KOP
Fisher Price	00968-9015	185.02	63.7	15600	1.25	70	
Fisher Price	00968-9012	172.82	59.5	15600	1	63.5	
Fisher Price	00968-9013	209.26	67.3	16700	2	75	Motor from 2012 KOP
Keyang	16627960	24.55	1883.44	70	0.5	20	
Nippon-Denso	E6DF-14A365-BB	22.30	1302	92	2.8	24.8	
Nippon-Denso	E6DF-14A366-BB	22.30	1302	92	2.8	24.8	
VEX	276-2177 (high speed)	4.00	134.4	160	0.15	3.6	At 7.2 Volts
VEX	276-2177 (standard)	4.00	215	100	0.15	3.6	At 7.2 Volts

מייבאים לאקסל, קצת צבע ו...



Make	Part Number	Max Power (W)	Stall Torque (n-m)
CIM	FR801-001	340.11	2.4
Fisher Price	00801-0673	291.59	0.5
BaneBots	M7-RS775-18	273.03	0.8
BaneBots	M5-RS550-12/B	253.52	0.5
Fisher Price	00968-9013	209.26	0.5
Fisher Price	00968-9015	185.02	0.4
AndyMark	am-0912	180.83	0.4
Fisher Price	00968-9012	172.82	0.4
Fisher Price	00968-2719	172.37	0.4
BaneBots	M7-RS775-12	83.05	0.4
AndyMark	am-0914	48.5	21.9
BaneBots	M3-RS395-12	48.05	0.1
Keyang	16627960	24.55	13.3
Denso	262100-3030 (Right)	23.48	10.6
Denso	262100-3040 (Left)	23.48	10.6
Nippon-Denso	E6DF-14A365-BB	22.3	9.2
Nippon-Denso	E6DF-14A366-BB	22.3	9.2
Denso	AE235100-0160	18.16	0.1
VEX	276-2177 (high speed)	4	0.9
VEX	276-2177 (standard)	4	1.5

לא צריך לעבוד קשה!



Make	Part Number	Max Power (W)	Stall Torque (n-m)	Time to perform task
CIM	FR801-001	340.11	2.4	0.8
Fisher Price	00801-0673	291.59	0.5	0.9
BaneBots	M7-RS775-18	273.03	0.8	1
BaneBots	M5-RS550-12/B	253.52	0.5	1.1
Fisher Price	00968-9013	209.26	0.5	1.3
Fisher Price	00968-9015	185.02	0.4	1.5
AndyMark	am-0912	180.83	0.4	1.5
Fisher Price	00968-9012	172.82	0.4	1.6
Fisher Price	00968-2719	172.37	0.4	1.6
BaneBots	M7-RS775-12	83.05	0.4	3.3
AndyMark	am-0914	48.5	21.9	5.6
BaneBots	M3-RS395-12	48.05	0.1	5.6
Keyang	16627960	24.55	13.3	11
Denso	262100-3030 (Right)	23.48	10.6	11.5
Denso	262100-3040 (Left)	23.48	10.6	11.5
Nippon-Denso	E6DF-14A365-BB	22.3	9.2	12.1
Nippon-Denso	E6DF-14A366-BB	22.3	9.2	12.1
Denso	AE235100-0160	18.16	0.1	14.9
VEX	276-2177 (high speed)	4	0.9	67.5
VEX	276-2177 (standard)	4	1.5	67.5

חזותית:



0.8 שניות



CIM

11.5 שניות



מנוע חלון דנסו

1 שניות



ביין-בוטס 775

זהו?



- עוד לא!
- עוד אין הבטחה שנגיע עם המנוע להספק המצויין

תזכורת לגבי השלבים



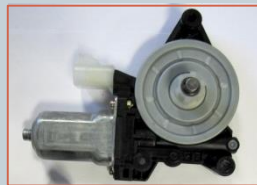
1. ניתוח פיזיקלי של המערכת (כוח, מומנט, אנרגיה, הספק)
2. השוואת ביצועים של מנועים שונים
3. בחירת מנוע, ובחינת הנתונים שלו
4. התאמת תמסורת למנוע בהתאם למערכת ולנתוני המנוע



4



3



2

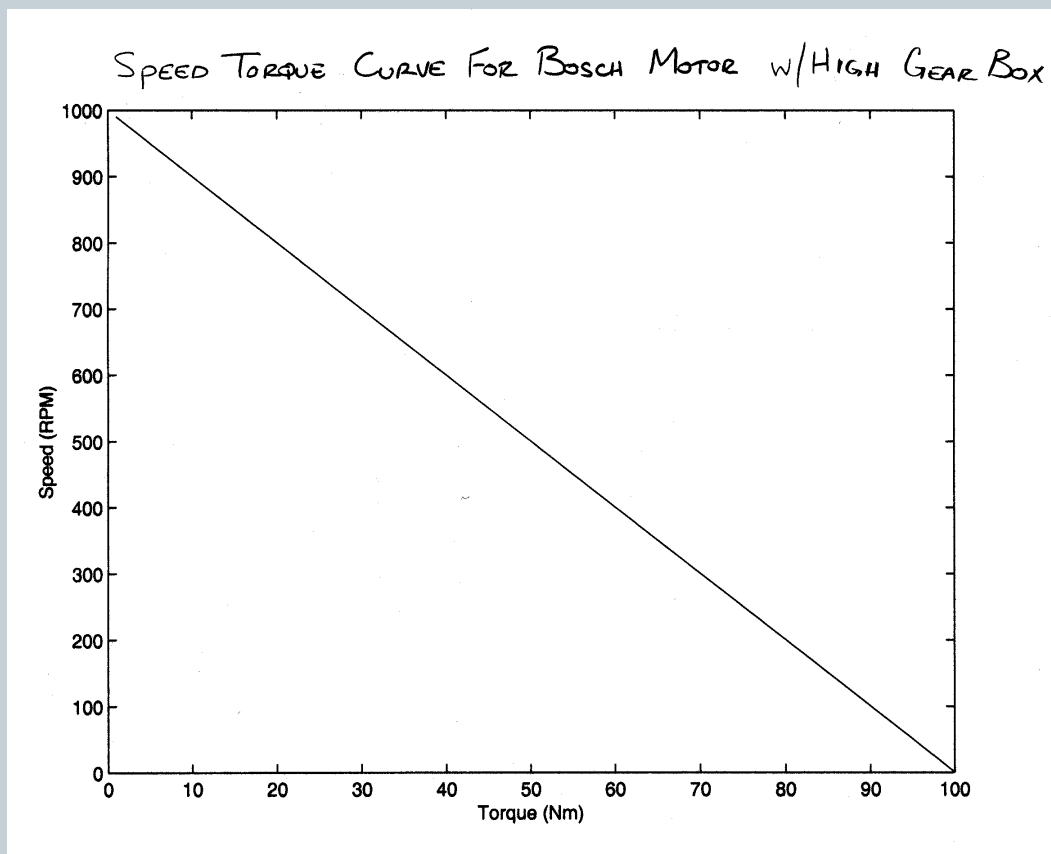


1

קצת על מנועים



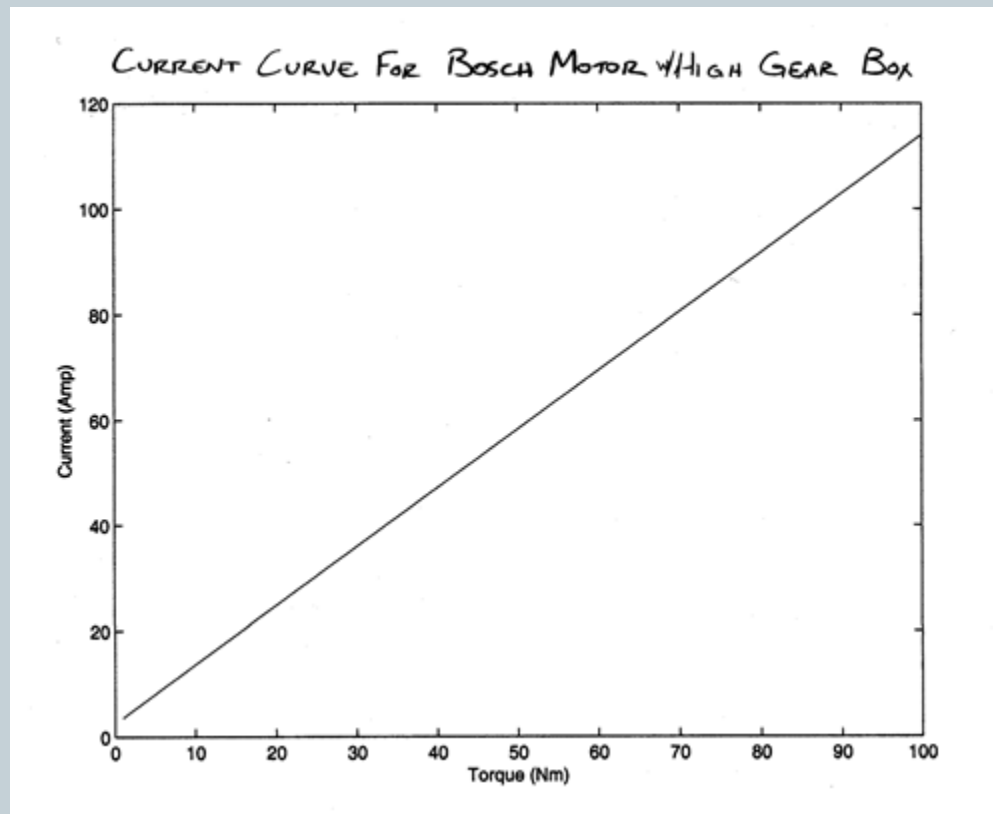
• עקומת מהירות/מומנט עבור מנועי זרם ישר:



קצת על מנועים



- עקומת מומנט/מומנט* עבור מנועי זרם ישר:



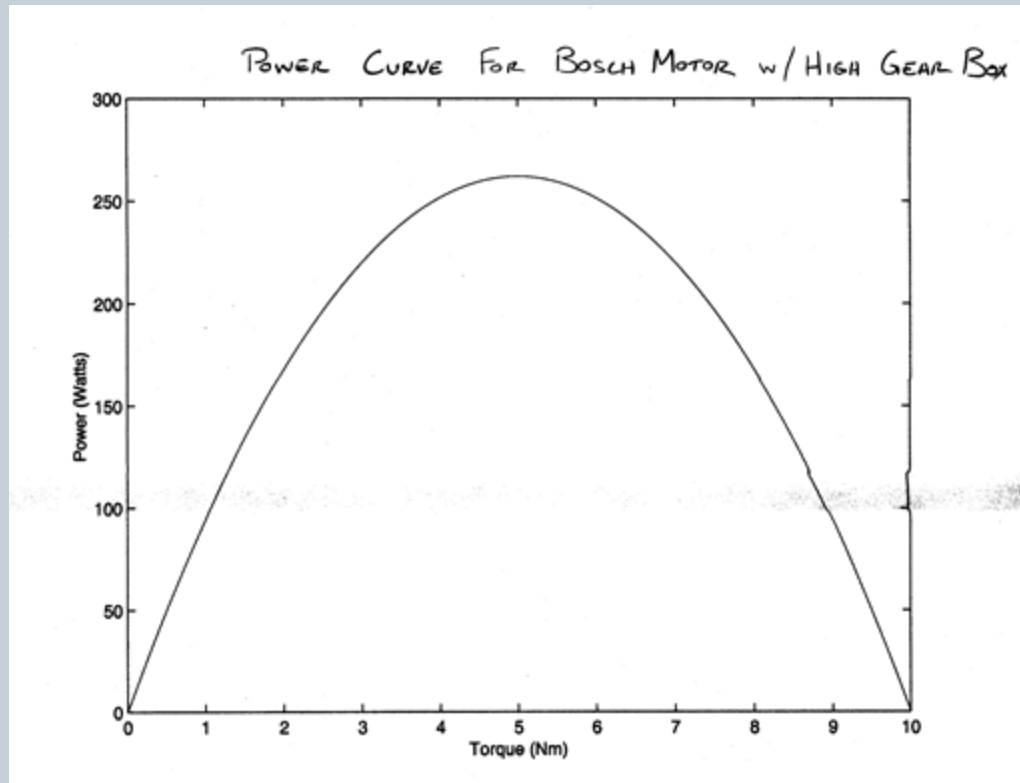
* - למעשה זאת עקומת זרם/מומנט, אבל היא מספיק קרובה לעקומת מומנט על מנת שנתייחס אליה ככזו.

קצת על מנועים



• עקומת הספק/מומנט עבור מנועי זרם ישר:

$$P = T \cdot \omega$$



בחירת תמסורת



- תאורטית, יש לבחור תמסורת כך שהמנוע יחווה 50% ממומנט העצירה שלו
- ישנם גורמים נוספים המשפיעים על החלטה:
 - חיכוכים במערכת
 - מתח הסוללה יורד ואיתו גם המומנט המקסימלי של המנועים
- ולכן:

יש לתכנן תמסורת כך שהמנוע יחווה 35% ממומנט העצירה שלו

בחירת תמסורת



- מומנט מקסימלי של המנוע:

Make	Part Number	Max Power (W)	Stall Torque (n-m)
CIM	FR801-001	340.11	2.4
Fisher Price	00801-0673	291.59	0.5
BaneBots	M7-RS775-18	273.03	0.8

- מומנט נדרש לביצוע הפעולה (חושב מזמן):

$$T = 117.72_{Nm}$$

- הורדת הילוכים דרושה:

$$R = \frac{117.72}{0.8 \cdot 0.35} \cong 420$$

תיאוריה מול מציאות



The screenshot shows the BaneBots website interface. At the top left is the BaneBots logo. Below it is a navigation bar with 'Home > Planetary > P60 Stock 7nn'. On the right side of the page, there is a small orange box with the text 'Due to increase in price...'. The main content area displays a list of planetary gearboxes. Each item includes a small image of the gearbox, a description, a price, and a code. The items are:

- P60 Stock 7nn** (Price: \$44.50)
 - P60 Gearbox: Stock, Standard Shaft, RS-775 Mount, 4:1** (Code: P60K-4-0007)
 - P60 Gearbox: Stock, Standard Shaft, RS-775 Mount, 16:1** (Code: P60K-44-0007)
 - P60 Gearbox: Stock, Standard Shaft, RS-775 Mount, 64:1** (Code: P60K-444-0007)
 - P60 Gearbox: Stock, Standard Shaft, RS-775 Mount, 256:1** (Code: P60K-4444-0007)

On the left side of the page, there are several menu sections: 'Account' (Account Information, Order History, Logout), 'Categories' (Electronics, Spur, Planetary, P60 Stock 3nn, P60 Stock 5nn, P60 Stock 7nn, P60 Custom 3nn, P60 Custom 5nn, P60 Custom 7nn, P80 Stock CIM, P80 Stock 2 CIM motors, P80 Stock 7nn, P80 Custom CIM, P80 Custom 7nn, Gearbox Parts, Brushed Motors, Accessories, Wheels & Hubs, FIRST, Closeout Specials), 'Information' (Shipping & Payment, Warranty & Returns, Privacy Notice, Conditions of Use, Distributors, Contact Us), and 'Search' (Enter keywords, Search, Advanced Search).

יש כזו תמסורת בכלל? •

מהאתר של ביין בוטס, קיימות תמסורות מתאימות ביחסים: •

1:4 ○

1:16 ○

1:64 ○

1:256 ○

רעיון!



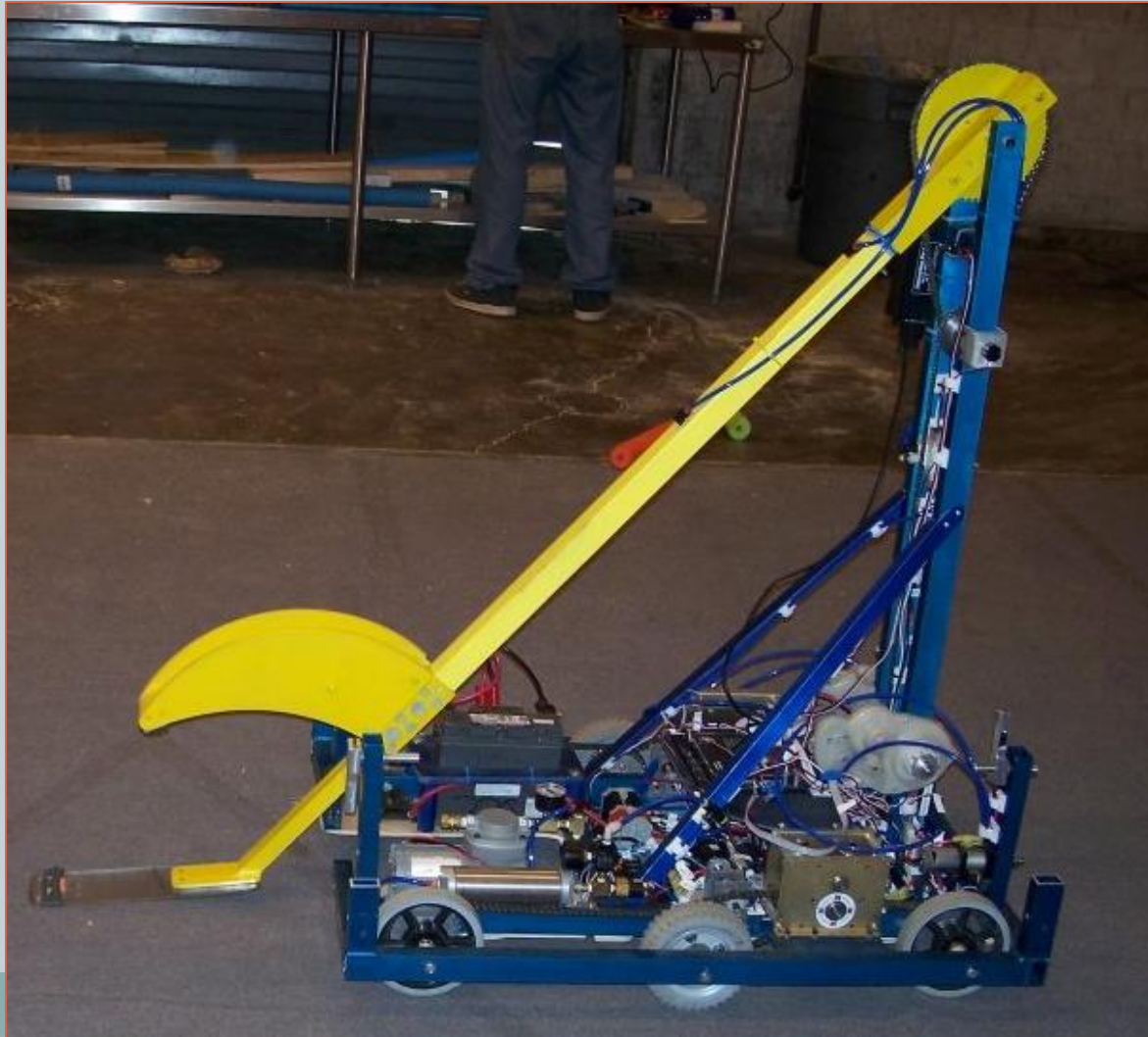
- ניקח תמסורת 1:256 ונתאים לה גלגלי שיניים חיצוניים (עם שרשרת) כדי להגיע ליחס הרצוי:

$$R = \frac{420}{256} \cong 1.64$$

- למשל, גלגל 20 שיניים וגלגל 35 שיניים $\frac{35}{20} = 1.75$



דוגמה



סיימנו! (?)



- לא ממש.
- תחזיקו חזק, שלב אחרון!

הגבלת מומנט על התמסורת



- באתר של ביין בוטס מצויין שלא מומלץ לעבוד עם התמסורת שלהם במומנט של מעל:

35 oz. – in ○

47 Nm ○

- בתכנון כרגע התמסורת מקבלת:

$$T = \frac{117.72_{Nm}}{1.75} = 67_{Nm}$$

- פתרון: להגדיל את גלגל השיניים על הזרוע ל-50 שיניים, ולקבל הפחתה של 2.5 לפני התמסורת:

$$T = \frac{117.72_{Nm}}{2.5} = 47_{Nm}$$

- גם גבולי, אבל סביר.

אז מה יצא לנו?



- הפחתה של 1:2.5 לפני התמסורת

- תמסורת הפחתה של 1:256

- סה"כ הפחתה של 640

- המומנט שהמנוע מרגיש:

$$T = \frac{117.72_{Nm}}{640} = 0.18_{Nm}$$

- אבל רצינו שירגיש:

$$T = 0.8 \cdot 0.35 = 0.28_{Nm}$$

בוא ננסה אחרת!



- בוא ננסה להשתמש בתמסורת הקטנה יותר, 1:64!
- גם לה נתאים גלגלי שיניים חיצוניים כדי להגיע ליחס הרצוי:

$$R = \frac{420}{64} \cong 6.5$$

- למשל, גלגל 10 שיניים וגלגל 66 שיניים $\frac{66}{10} = 6.6$



אז מה יצא לנו עכשיו?



- הפחתה של 1:6.6 לפני התמסורת

- תמסורת הפחתה של 1:64

- סה"כ הפחתה של 422

- המומנט שהמנוע מרגיש:

$$T = \frac{117.72_{Nm}}{422} = 0.278_{Nm}$$

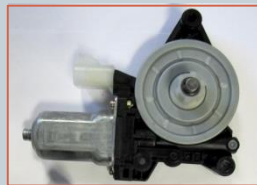
- ורצינו שירגיש:

$$T = 0.8 \cdot 0.35 = 0.28_{Nm}$$

תזכורת לגבי השלבים



1. ניתוח פיזיקלי של המערכת (כוח, מומנט, אנרגיה, הספק)
2. השוואת ביצועים של מנועים שונים
3. בחירת מנוע, ובחינת הנתונים שלו
4. התאמת תמסורת למנוע בהתאם למערכת ולנתוני המנוע



4

3

2

1

אז מה בחרנו בסופי?



- מנוע ביינבוטס RS-775
- עם תמסורת ביינבוטס 1:64
- תמסורת חיצונית 10:66 (1:6.6)
- עובדים ב-35% מהמומנט המקסימלי
- צפויים להגיע לכ-70-75% מההספק המקסימלי של המנוע, כלומר כ-190 וואט
- נדרש 280 ג'אול לביצוע המשימה, לכן צפוי שהזרוע תתרומם ב:

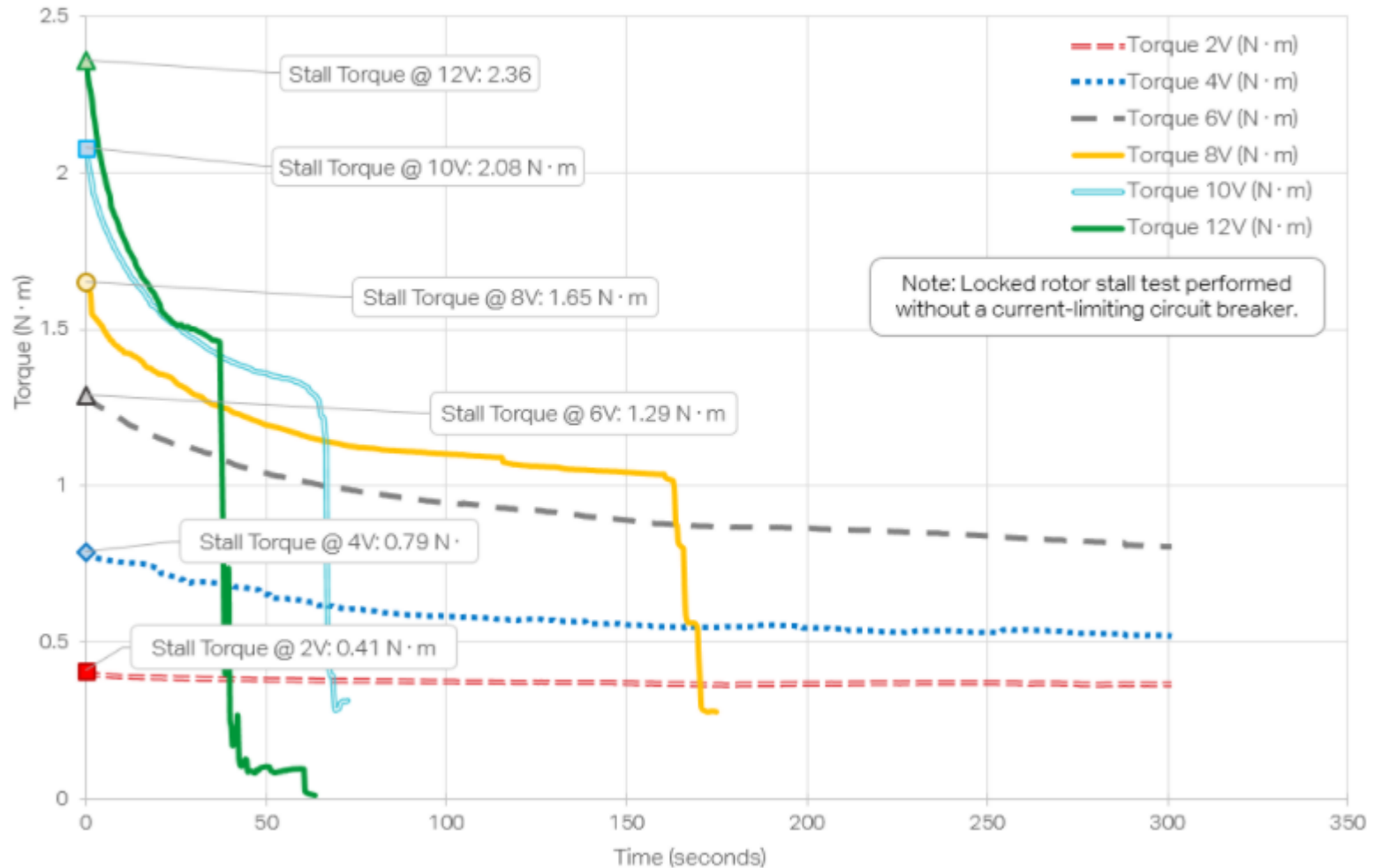
$$t = \frac{W}{P} = \frac{280_J}{190_{watt}} = 1.47_{sec}$$



העשרה



Locked Rotor Stall Test - CIM (217-2000)



ומה לגבי נושאת המטוסים?



- 100,000,000 ק"ג של עיר ניידת (כולל כור גרעיני)
- אפשר להרים דבר כזה עם מנוע CIM?

