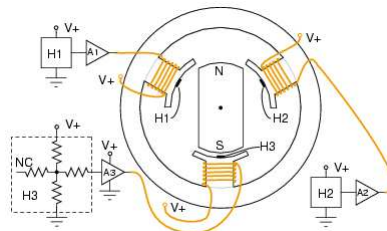


מפעילים חשמליים



<http://www.allaboutcircuits.com>

קורס מכטרוניקה

מאת: שי ארוגטי

רוב התמונות במצגת זו נלקחו מהספר:

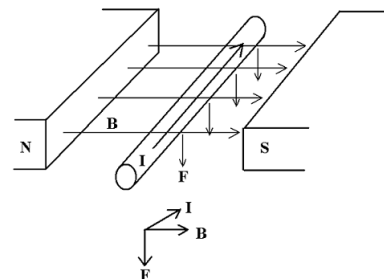
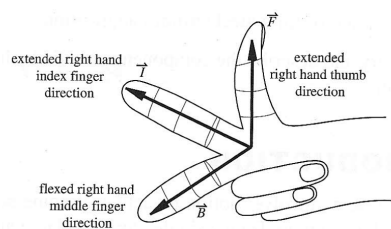
Introduction to MECHATRONICS and Measurement Systems – David G. Alciatore, Michael B. Hstand

עקרונות אלקטרומגנטיים

חוק Lorentz (Lorentz's Force Law): כאשר זרם זרם במוליך הנתון בשדה מגנטי, נוצר כוח הפועל על המוליך. כוח זה מאונך למוליך (לכיוון הזרם) ומאונך לכיוון השדה המגנטי.

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}$$

כאשר $\vec{F}$ הוא ווקטור הכוח, $\vec{I}$ הינו ווקטור הזרם ו- $\vec{B}$ הוא ווקטור השדה המגנטי.



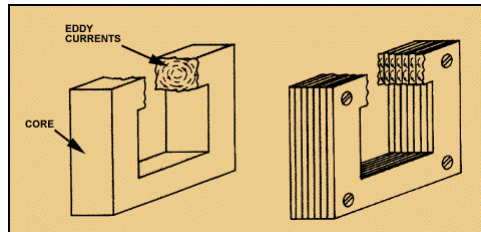
חדירות (Permeability)

תכונת החדירות של החומר מתארת עד כמה יהיה קל (או קשה) לקווי השטף המגנטי לחדור את החומר.

רוב המתקנים האלקטרומגנטיים משתמשים בליבות ברזל כדי להגביר את השטף המגנטי. לברזל יש חדירות גבוהה (כמה מאות פעמים בהשוואה לזו של האוויר).

ליבות ברזל בנויות לרוב משכבות דקות (רבדים) המודבקות אחת לשנייה ע"י חומר מבודד. השכבות מאפשרות מעבר שטף בכיוון ציר הליבה ומצמצמות באופן ניכר זרמי אדי (eddy current).

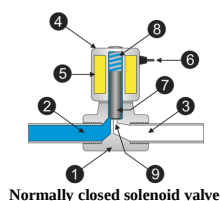
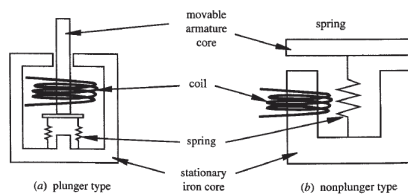
זרמי אלה נוצרים בליבה בעקבות שינויים בשדה המגנטי (וגורמים ליצירת חום ואיבוד אנרגיה – כלומר פוגעים בנצילות)



סולנואידים וממסרים (Solenoids and Relays)

סולנואיד (Solenoid)

מבוססת על סליל ניח ועל ליבת מרזל ניידת (ניתנת להזזה) הנקראת עוגן (Armature). כאשר זרם חשמלי זורם בסליל, הליבה זזה כדי להקטין למינימום את ההתנגדות למעבר קווי שטף במעגל המגנטי (Magnetic reluctance). ניתן לומר (בקירוב טוב) כי הכוח הפועל על הליבה הנעה הינו פרופוזיוני לזרם הזורם בסליל בריבוע, ולאחד חלקי מרווח האוויר בריבוע.



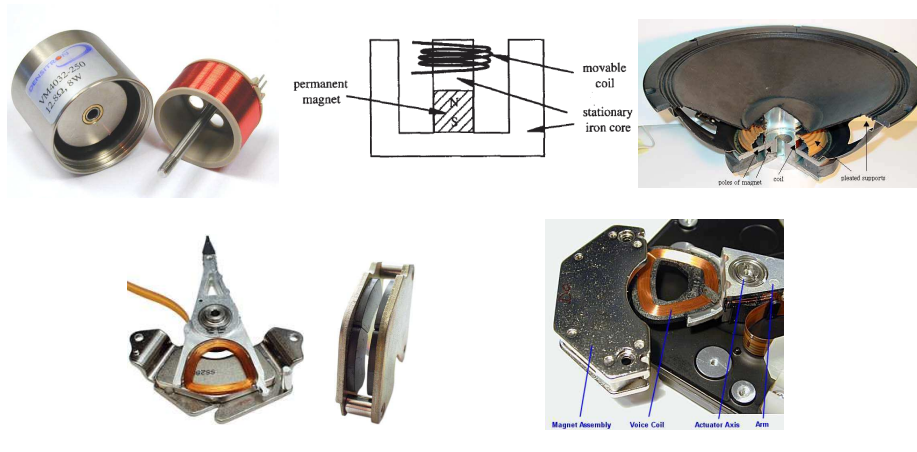
השימוש בסולנואידים מוגבל ליישומים בהם נדרשים רק שני מצבים (on-off applications), כגון בריחים, מנעולים, מתגים (מפסקים), ברזים חשמליים.

דוגמא נפוצה לשימוש בסולנואיד היא בממסר חשמלי (מפסק אלקטרו מכני). הסולנואיד מאפשר סגירה או ניתוק של מגעים חשמליים. מתח חשמלי נמוך המסופק לסליל של הממסר מאפשר בקרה של זרם חשמלי גבוהה דרך המגעים של הממסר (ליישומים של הפעלה וניתוק - enable/disable circuits). (קצב המיתוג המקסימאלי אינו משתווה לזה של ממסר אלקטרוני המבוסס על טרנזיסטור)

מפעיל מסוג Voice coil

מבוסס על סליל הנע בשדה מגנטי שנוצר ע"י מגנט קבוע וליבת ברזל (הסליל מחומר לעומס נע). הסליל יכול לנוע בשני כיוונים. שימושים נפוצים של מפעיל מסוג זה הם רמקולים וכוננים קשיחים (מניע את ראש הקריאה-כתיבה).

הכוח הפועל על הסליל הנע הינו פרופורציונאלי לזרם הזורם דרך הסליל.

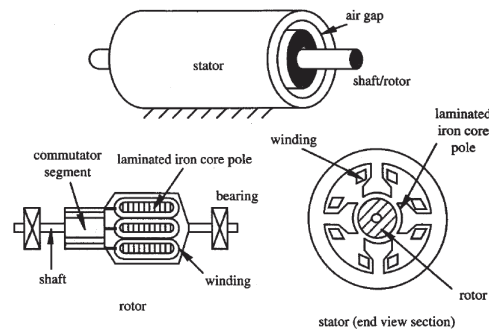


מנועים חשמליים

החלק החיצוני הנייח נקרא סטטור (Stator), תפקידו ליצור שדה מגנטי רדיאלי. הקטבים בסטטור יכולים להיות מבוססים על מגנטים קבועים או על סלילים נושאי זרם.

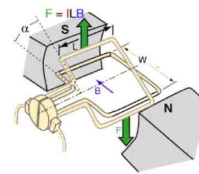
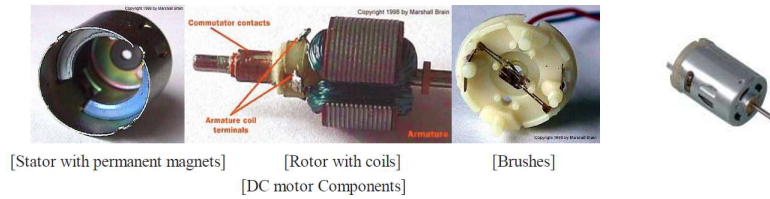
החלק הפנימי הנע נקרא רוטור (Rotor), הוא מבוסס על גל מסתובב הנתמך ע"י מסבים. הרוטור נקרא לעיתים גם עוגן (Armature).

במנוע DC קיימות מברשות (עשויות גרפיט) המאפשרות מגע חשמלי קבוע עם מחלק (Commutator) המותקן על הרוטור (ומסתובב יחד עם הרוטור). המחלק מאפשר מעבר זרם חשמלי (בקוטביות משתנה) דרך הסלילים של הרוטור.



קיים מרווח אוויר קטן בין הרוטור והסטטור, שם מתקיימת פעולת הגומלין בין השדה המגנטי של הסטטור והשדה המגנטי של הרוטור.

דוגמאות המתייחסות למנוע DC (מנוע זרם ישיר) עם מגנטים קבועים.



עקרונות הפעולה של מנועים חשמליים

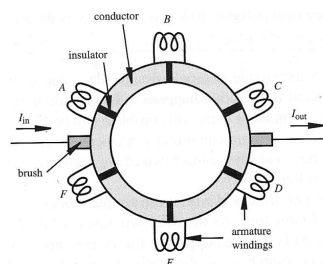
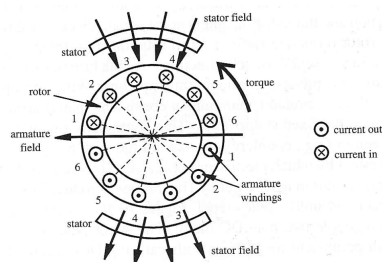
שני עקרונות עיקריים:

מומנט נוצר עקב פעולת גומלין בין השדה המגנטי של הסטטור והזרם הזורם בעוגן (רוטור)

מומנט נוצר עקב פעולת גומלין בין שני שדות מגנטיים אחד של הסטטור והשני של העוגן (רוטור)

האיור מתאר מנוע DC (מגנט קבוע) עם 6 סלילי עוגן (רוטור).

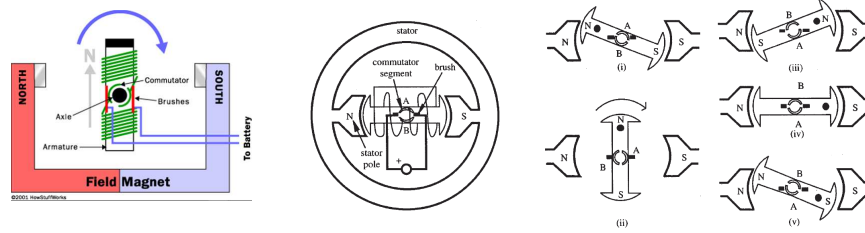
פעולת הגומלין בין השדה הגנטי הקבוע בסטטור והזרמים ברוטור יוצרים מומנט (חוק Lorentz) כדי להבטיח את רציפות המומנט יש לשנות את כיווני הזרמים זרך סלילי הרוטור. השינוי מתאפשר ע"י שימוש במחלק (commutator). בדוגמא, מחלק עם 6 מקטעים (כמספר הסלילים)



כאן, מומנט נוצר בגלל העובדה שקטבים דומים נוטים לדחות אחד את השני וקטבים מנוגדים נוטים למשוך אחד את השני.

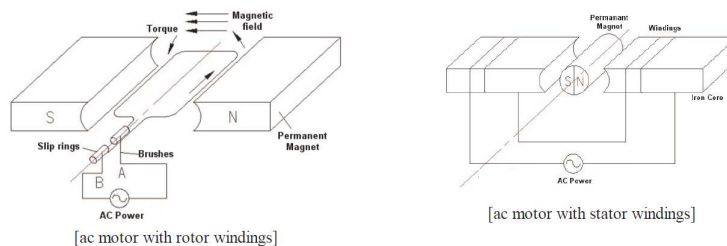
במנוע DC עם מגנט קבוע, הקטבים בסטטור יוצרים שדה מגנטי קבוע. כיוון הזרם ברוטור מתחלף (ע"י ה-commutator) ומוביל לשינוי בכיוון השדה המגנטי של הרוטור.

פעולת הגומלין בין השדה המשתנה של הרוטור והשדה הקבוע של הסטטור יוצרים מומנט על הגל המוביל לסיבוב.



סיווג מנועים חשמליים

מנועי AC – אין צורך במנגנון המחליף את כיוון הזרם דרך הסלילים של הרוטור, מכיוון ששדה מגנטי מסתובב נוצר כתוצאה מהפעלת זרם חילופים (AC). קיימים סלילים בסטטור או ברוטור או בשניהם.

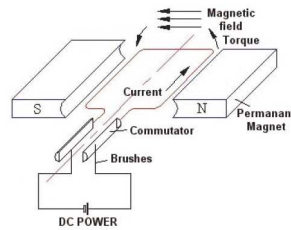


מנוע AC אסינכרוני (מנוע השראה Induction motor) – הכריכות ברוטור אינן מחוברות למקור מתח חיצוני. לעומת זאת, מתח חשמלי מושרה בכריכות הרוטור כתוצאה מהשדה המגנטי המשתנה סביב הסטטור. הרוטור מסתובב במהירות יותר איטית בהשוואה למהירות הסיבוב של השדה המגנטי בסטטור (תופעה הנקראת החלקה - slip), מה שמאפשר את ההשראה, ולכן המנוע נקרא אסינכרוני.

מנוע AC סינכרוני – הכריכות ברוטור מעורערות בזרם חשמלי ע"י טבעות החלקה (ללא מחלף). השדה המגנטי ברוטור מסתובב באותה מהירות כמו השדה המגנטי הנוצר ע"י הסטטור.

מנועי DC

מנועי DC עם מברשות (brushed DC motor) – מבוססים על מחלף ומברשות. בדרך כלל מגנט קבוע בסטטור וסלילים ברוטור.



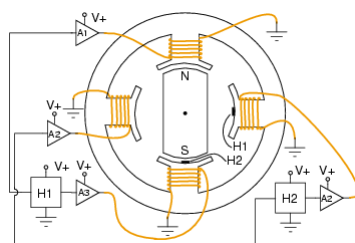
מנועי DC ללא מברשות (brushless DC motor) – כאן המבנה הפוך ביחס למנוע DC עם מברשות ומגנט קבוע.

המגנט הקבוע (לרוב יותר ממגנט אחד) נמצא ברוטור והסלילים נמצאים בסטטור. המגנט הקבוע ברוטור מבטל את הצורך במחלף ומברשות.

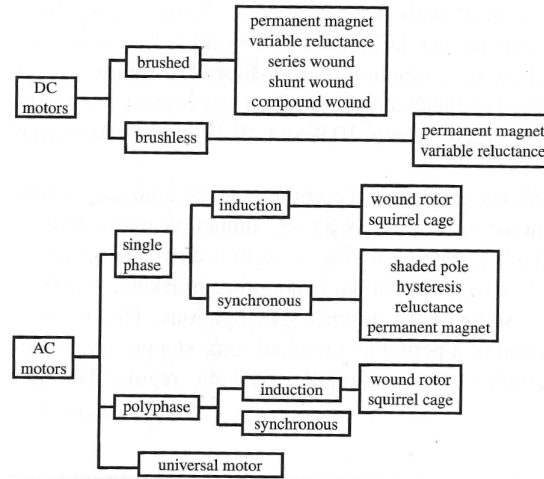
כדי לסובב את השדה המגנטי הנוצר ע"י הסלילים בסטטור (והמתח הקבוע המסופק), משתמשים בטרנזיסטורים ובחיישני קרבה (proximity sensors). הטרנזיסטורים משמשים כמפסקי on-off עבור הסלילים. תזמון ההפעלה של הסלילים נקבע לפי מיקום הרוטור כאשר אינפורמציה על מיקום הרוטור מתקבלת מחיישני הקרבה (בדרך כלל מבוססים על hall effect).

מכיוון שאין צורך בכריכות או ליבת ברזל עבור הרוטור, מומנט האינרציה שלו בדרך כלל נמוך בהשוואה למנועי DC עם מברשות. כמו כן, אין בעיה של פיזור חום המתפתח ברוטור (מכיוון שברוטור לא זורם זרם חשמלי) ותחזוקת המנוע יותר פשוטה (אין צורך להחליף את המברשות וה"פחמים" במחלף כתוצאה מבלאי).

באופן כללי למנועים ללא מברשות יש ביצועים יותר טובים, אולם הם יותר יקרים והבקרה שלהם יותר מורכבת (הם מחייבים מערכת מיתוג אלקטרונית, בעוד מנוע עם מברשות ניתן להפעלה ע"י חיבור למקור מתח ישר בלבד).



דיאגרמת המתארת סוגים שונים של מנועים חשמליים



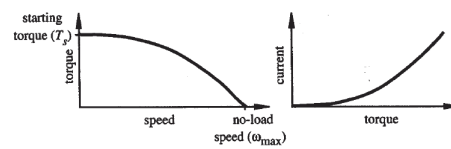
מנועי DC

עקומות מומנט-מהירות (torque-speed curves)

עקומה זו מציגה את המומנט שהמנוע מספק במהירויות סיבוב שונות, עבור מתח הפעלה נתון.

מומנט התחלתי (Stall or Starting torque), מסומן ע"י T_s הוא המומנט המקסימאלי שמנוע DC יכול לספק. מומנט זה מתקבל במהירות סיבוב אפס.

מהירות ללא עומס (No-load speed), מסומנת ע"י ω_{max} היא מהירות הסיבוב המקסימאלית של המנוע, כאשר מופעל ללא עומס (במהירות זו המנוע אינו מספק מומנט כלל).

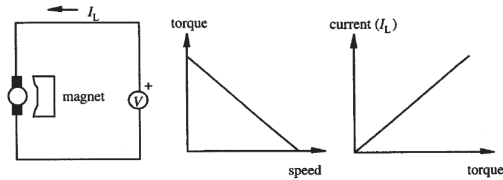


אופיינים של מנועי DC מסוגים שונים

באיורים הבאים V הינו המתח המסופק למנוע, I_A הינו הזרם דרך סלילי הרוטור (Armature), I_F הוא הזרם בסלילי הסטטור (זרם השדה Field) ו- I_L הוא הזרם הכללי הנצרך ממקור המתח (Load current).

מנוע DC עם מגנט קבוע

השדה המגנטי בסטטור מתקבל ע"י מגנט קבוע.

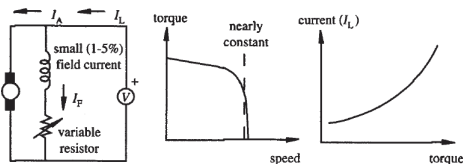


קל לשנות את כיוון הסיבוב של המנוע, ע"י שינוי קוטביות מתח ההספקה (מכיוון שמתח זה מסופק רק לרוטור).

מתאים מאוד למערכות מכטרוניות המבוקרות ע"י מחשב בגלל האופיינים הליניאריים שלא והקלות היחסית בתכנון מערכת הבקרה.

קיימים גם מנועי DC בהם השדה המגנטי של הסטטור מבוסס גם הוא על אלקטרומגנט. מנועים אלה מיועדים ליישומים בהם נדרש הספק גדול (מעל 20 HP, מעל 20 כוח סוס). קיימות מספר צורות חיבור כפי שנתון באיורים הבאים (כל צורת חיבור מייצרת אופיין מומנט-מהירות שונה).

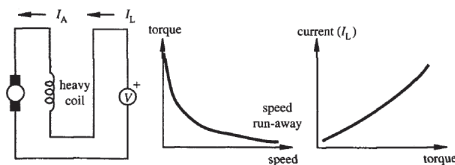
מנוע DC עם חיבור מקבילי (Shunt motor)



סלילי העוגן (רוטור) והשדה (סטטור) מחוברים במקביל ומופעלים ע"י אותו מקור מתח.

מנועים אלה מסוגלים להסתובב במהירות פחות או יותר קבועה לאורך תחום גדול של עומסים, כמו כן יש להם את מומנט ההנעה הנמוך ביותר (בהשוואה למנועי DC אחרים).

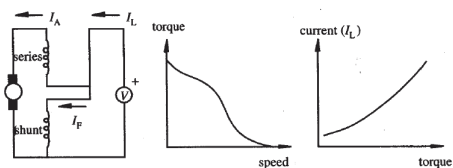
מנוע DC סדרתי (Series Motor)



סלילי העוגן (רוטור) והשדה (סטטור) מחוברים בטור כך שהזרם בשניהם הינו זהה.

למנועים אלה יש מומנט התנעה גבוהה מאוד, המהירות משתנה מאוד כתוצאה משינויים בעומס, ולמנוע מהירות גבוהה מאוד כאשר העומס הינו קטן.

מנוע מורכב – מנוע משולב - (Compound motor)



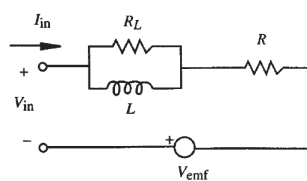
כולל גם סלילי שדה טוריים וגם סלילי שדה מקביליים. המבנה המורכב מוביל למאפיינים של מנוע טורי יחד עם מאפיינים של מנוע מקבילי.

יש לזכור כי במקרה של מנוע DC טורי מקבילי או משולב שינוי קוטביות מתח ההספקה לא יוביל לשינוי כיוון הסיבוב של המנוע, מכיוון שגם השדה וגם העוגן מופעלים ע"י אותו ספק מתח.

משוואות התנועה של מנוע DC עם מגנט קבוע

משוואות חשמליות

מעגל התמורה של העוגן נתון באופן הבא:



מתוך המעגל (R_L זניח):

$$V_{in} = L \frac{dI_{in}}{dt} + RI_{in} + k_e \omega$$

כאשר L הינו מקדם ההשראות של סלילי העוגן ו- R התנגדות.

כוח אלקטרומגנטי מושרה (V_{emf} , Back emf voltage), נוצר ברוטור כתוצאה מהתנועה של המוליך החשמלי בשדה המגנטי הנתון ע"י הסטטור (המנוע הוא גם גנרטור). המתח המושרה תלוי במהירות הסיבוב באופן ליניארי.

$$V_{emf} = k_e \omega$$

כאשר k_e הינו קבוע המתח המושרה (electrical (back emf) constant)

משוואות תנועה (המודל הדינמי של המנוע)

המומנט הנוצר ע"י המנוע הינו יחסי לזרם סלילי העוגן

$$T = k_t I_{in}$$

כאשר k_t הינו קבוע המומנט (torque constant)

משוואת התנועה של המנוע מתקבלת מתוך החוק השני של ניוטון

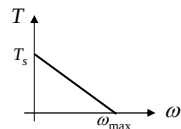
$$T = (J_a + J_L) \frac{d\omega}{dt} + T_f + T_L$$

כאשר J_a ו- J_L הינם מומנטי האינרציה הפולאריים של העוגן ושל העומס, בהתאמה. המומנט המתנגד T_f נוצר כתוצאה מחיכוך מכאני, ו- T_L הינו מומנט מתנגד המופעל ע"י העומס.

במצב המתמיד (steady state) המשוואה החשמלית הופכת ל-

$$V_{in} = RI_{in} + k_e \omega = \left(\frac{R}{k_t} \right) T + k_e \omega$$

וכאשר פותרים עבור המומנט מתקבל:



$$T = \left(\frac{k_t}{R} \right) V_{in} - \left(\frac{k_e k_t}{R} \right) \omega$$

זוהי משוואת קוו ישר וניתן לחשב ממנה את מומנט ההתנעה T_s (כאשר מאפסים את ω) ואת מהירות הסיבוב המקסימלית ω_{max} (כאשר מאפסים את T).

ניתן להראות כי ההספק המקסימאלי מהמנוע מתקבל במהירות השווה לחצי המהירות ללא עומס (no-load speed).

מתוך אופיין המנוע ניתן לרשום את הקשר הבא, בין המומנט שמייצר המנוע ומהירות הסיבוב (משוואת קוו ישר)

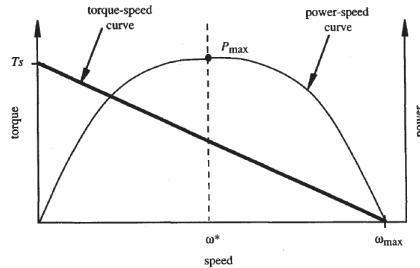
$$T(\omega) = T_s \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{max}} \right)$$

כדי לקבל את עקום ההספק ניתן לכפול את המשוואה האחרונה ב- ω ($P = T\omega$).

$$P(\omega) = T\omega = \omega T_s \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{max}} \right)$$

נקודת המקסימום (הספק) תתקבל מתוך גזירה והשוואה לאפס.

$$\frac{dP}{d\omega} = T_s \left(1 - \frac{2\omega}{\omega_{\max}} \right) = 0 \Rightarrow \omega^* = \frac{1}{2} \omega_{\max}$$



אם נתונה ההתנגדות החשמלית של העוגן (ניתן תמיד למדידה) והקבוע k_t (ניתן ע"י היצרן), אז ניתן לחשב את זרם ומומנט ההתנעה ע"י:

$$T_s = k_t \frac{V_{in}}{R} \quad -I \quad I_s = \frac{V_{in}}{R}$$

בקרה אלקטרונית של מנוע DC עם מגנט קבוע

כאמור ניתן להפעיל מנוע DC עם מגנט קבוע ע"י חיבור ישיר למקור מתח (לדוגמא סוללה). ניתן גם לבקר את מהירות הסיבוב והמומנט המיוצר ע"י שינוי עוצמת המתח בכניסה.

כל אלה (בנוסף למחיר נמוך מאוד) הופכים את מנוע ה-DC עם מגנט קבוע לנפוץ מאוד ביישומים בעלי הספק מזערי ושאינם דורשים ביצועים גבוהים. במערכות כאלה המנוע מופעל בחוג פתוח.

במערכות הדורשות ביצועים גבוהים (לדוגמא מהירות סיבוב מדויקת או זווית סיבוב מסוימת), יש להפעיל את המנוע עם מערכת בקרה בחוג סגור. במקרה כזה גם נדרש חיישן (לפחות אחד) אשר מודד את מיקום או מהירות הסיבוב של המנוע.

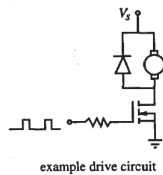
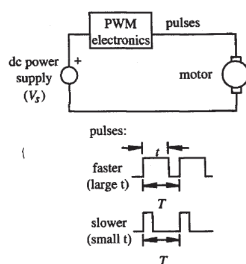
האות הנמדד (מייצג את תנאי העבודה בפועל) מחוסר מאות הייחוס אשר מייצג את תנאי העבודה הרצויים) והתוצאה נקראת שגיאה (או שגיאת עקיבה). השגיאה מוזנת לבקר אשר יוצר אות תיקון שמטרתו להביא את המנוע אל תנאי העבודה הרצויים (כלומר לאפס את השגיאה).

את אות המוצא של הבקר (מבוסס לרוב על מחשב) יש להגביר לפני הכניסה למנוע (כי אות המוצא של הבקר מייצג אינפורמציה ואינו כולל את ההספק הדרוש לסיבוב המנוע).

קיימים שני סוגים של מערכות הגברה, מערכות המבוססות על מגברים ליניאריים (טרנזיסטורים פועלים באזור הפעיל, מערכת המייצרת פחות רעשים אך אינה יעילה ודורשת פיזור רב של הספק - חום).

הסוג השני של מערכות הגברה (מערכות הגברה ממותגות) מבוסס על שינוי רוחב הפולס (PWM – pulse width modulation) (מערכות אלה יעילות מאוד מבחינת פיזור ההספק ומתאימות מאוד למערכות בקרה המבוססות על מיקרו-מעבד, אך מייצרות רעש חשמלי).

מגבר המבוסס על אות PWM כולל מקור מתח קבוע ומפסק אלקטרוני (לרוב טרנזיסטור MOSFET). הטרנזיסטור משמש כמתג הנסגר ונפתח בתדר קבוע עם duty-cycle משתנה.



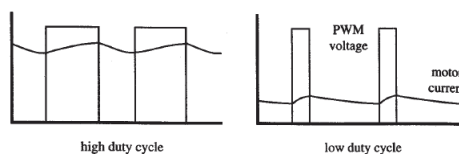
ה duty-cycle מוגדר ע"י:

$$\text{duty-cycle} = \frac{t}{T} 100\%$$

כאשר t הינו משך הזמן בו המתג סגור (ON)

ו- $T = 1/f$ הוא זמן המחזור הקבוע (ON + OFF).

ה- duty-cycle נקבע ע"י מערכת הבקרה, שינוי ה- duty-cycle מוביל לשינוי הזרם הממוצע דרך סלילי המנוע וכן גם לשינוי בהספק ובמהירות של המנוע.

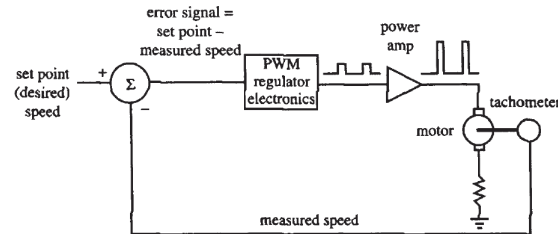


הדיודה הנמצאת במקביל למנוע נקראת Flyback diode (שמות נוספים snubber diode, freewheeling diode). תפקידה לשמור על הטרנזיסטור כתוצאה מה- voltage spikes (קפיצות מתח מהירות) הנוצרים בסלילי המנוע.

כאמור, המתח על סליל חשמלי הינו יחסי לנגזרת הזרם ($V_L = L(di_L/dt)$)

כאשר הזרם דרך הסליל מנותק באופן מהיר, הנגזרת השלילית הגבוהה מאוד של הזרם מובילה למתח שלילי גבוה המופיע על הסליל לזמן קצר ("ספייק"). מתח זה גבוה בהרבה ממתח הספק ולכן שואף להזרים זרם דרך הטרנזיסטור בכיוון הפוך, מה שיכול לגרום לנזק ושרפת הטרנזיסטור. הדיודה מאפשרת לזרם הנוצר כתוצאה מה- "ספייק" לזרום, אך לא דרך הטרנזיסטור, ופיזור ההספק דרך הדיודה. לעיתים הדיודה נמצאת במקביל לטרנזיסטור ולא במקביל למנוע (או שהיא נמצאת בשני המקומות).

דיאגרמת המלבנים הבאה מתארת באופן סכמטי מערכת בקרה של מנוע DC ע"י בקרה ואות בקרה מסוג PWM.

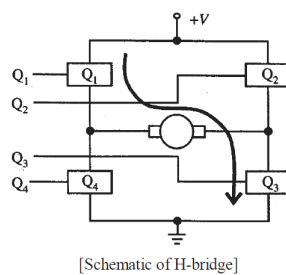


הפתרון שהוצג עד כה להפעלת מנוע DC ע"י אות PWM וטרנזיסטור יחיד, מאפשר הזרמת זרם דרך המנוע בכיוון סיבוב אחד בלבד (לדוגמא אך ורק מהירות חיובית).

זה נובע מהיכולת של הטרנזיסטור להוליך זרם בכיוון אחד בלבד.

כדי לספק זרם למנוע בשני כיוונים יש להשתמש ב-H-Bridge drive (זה הכרחי לצורך בקרת מקום וגם נחוץ במקרים מסוימים לבקרה בחוג סגור של מהירות).

דרייבר מסוג H-bridge מבוסס על ארבעה טרנזיסטורים המסודרים סביב המנוע באופן הבא:

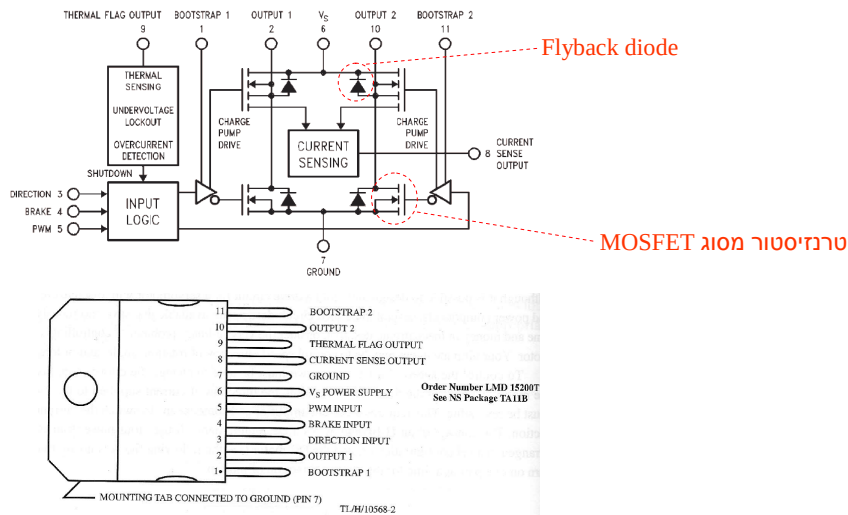


כאשר הטרנזיסטורים Q1 ו-Q3 מופעלים (ON) והטרנזיסטורים Q2 ו-Q4 אינם מופעלים (OFF), יזרום זרם דרך המנוע בכיוון הנתון באיור והמנוע יסתובב לכיוון אחד.

אם Q2 ו-Q4 מופעלים (ON) ו-Q1 ו-Q3 אינם מופעלים (OFF) הזרם יזרום בכיוון ההפוך והמנוע יסתובב לצד השני

פתרון פשוט (ולא יקר) להנעה של מנוע DC מבוסס על שימוש במעגל מוכלל הכולל את ה- H-bridge יחד עם כל המרכיבים הנחוצים הנוספים (מערכת לוגית ודיודות).

הרכיב LMD15200 המופיע באיור ונתון כאן לדוגמא מאפשר זרם של עד 3A, מתח עד 55V וכולל גם מעגלי הגבלת זרם ומתח וכן ניתוק המנוע כאשר טמפרטורה הרכיב גבוהה מדי.



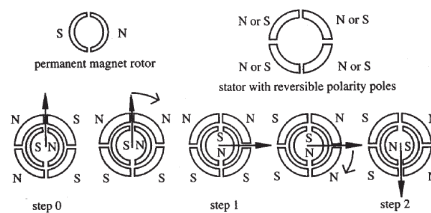
מנועי צעד

יתרונות: מסתובב לשני כיוונים, ניתן לסובב במרווחים (increments) קבועים ומדויקים ללא משוב (כלומר ניתן להביא את המנוע לזווית רצויה באופן מדויק ללא משוב), מומנט החזקה במהירות אפס (holding torque), ניתן לבקרה באופן דיגיטלי.

המנוע מסתובב במרווחים קבועים ומדויקים הנקראים **צעדים** (steps) בתגובה לכניסה דיגיטלית המבוססת על סדרה של דפקים (pulses).

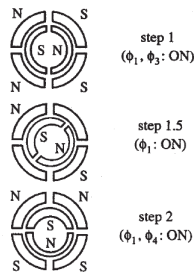
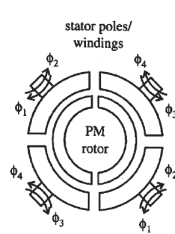
עקרון פעולה

במקרה של מנוע צעד המבוסס על מגנט קבוע, הסטטור מבוסס על סלילים היוצרים קטבים מגנטיים והקטבים של הרוטור מתקבלים ממגנט קבוע.



למנוע צעד תעשייתי, מספר גדול של קטבים אשר קובע מספר גדול של מצבי שיווי משקל עבור הרוטור.

האיור הבא ממחיש את המבנה ואת סדר ההפעלה הנוכח של הסלילים במנוע צעד חד קוטבי (unipolar) עם 4 פאזות (כלומר 4 סלילי סטטור $\phi_1 - \phi_4$). המנוע מבוסס על רוטור מגנט קבוע עם שני קטבים וסטטור בעל 4 קטבים כאשר כל קוטב מלוּפף ע"י שני סלילים עם כיוונים מנוגדים (complementary windings).



סדר הפעלת הסלילים הרצוי לסיבוב המנוע בצעדים מלאים או בחצי צעד נתון בטבלאות הבאות:

TABLE 9.1
Unipolar full-step phase sequence

Step	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	OFF

CW
↓
CCW
↑

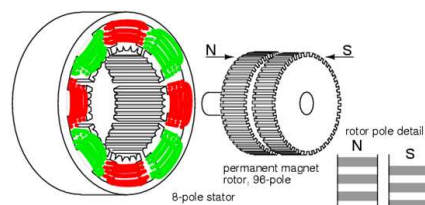
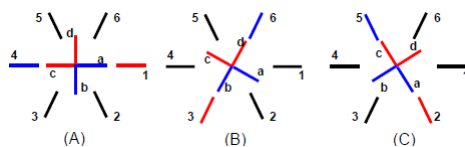
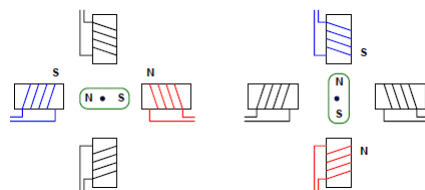
TABLE 9.2
Unipolar half-step phase sequence

Step	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
1	ON	OFF	ON	OFF
1.5	ON	OFF	OFF	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
2.5	OFF	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
3.5	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	ON	ON	OFF
4.5	OFF	OFF	ON	OFF

CW
↓
CCW
↑

(לדוגמא, ϕ_1 ו- ϕ_2 מלופפים בכיוונים מנוגדים על הקוטב העליון מצד שמאל)

כאשר משתמשי בחצאי צעד הרזולוציה של המנוע (מספר הצעדים בסיבוב שלם) גדלה פי שניים (במקרה הנדון מתקבלים 8 צעדים כאשר כל צעד הינו 45 מעלות). אבל, מומנט ההחזקה (holding torque) כמו גם מומנט ההנעה אינם קבועים בכל צעד (כי מספר הסלילים המופעלים בכל צעד אינו קבוע).



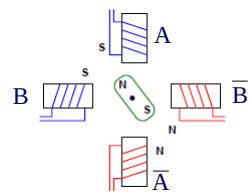
מנוע כזה נותן צעדים בגודל 90 מעלות או 45 מעלות אם משתמשים גם בחצאי צעדים.

רזולוציה כזאת בדרך כלל אינה מספיקה

מספר צעדים יותר גדול יתקבל ע"י הגדלת מספר הקטבים בסטטור והגדלת מספר השיניים ברוטור.

בדוגמה כאן הסטטור מתבסס על שישה קטבים וברוטור יש ארבע שיניים. הצעד המתקבל הוא של 15 מעלות.

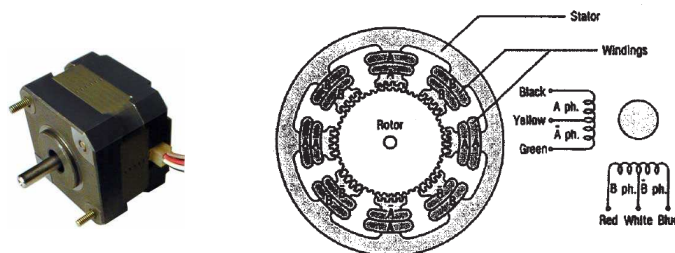
כדי להגדיל את מספר השיניים ברוטור משתמשים בשתי רצועות שיניים, אחת עם קטבים מסוג N והשנייה עם קטבים מסוג S (כאשר קיימת הזזה מסוימת בין שתי הרצועות). הקטבים ברוטור מבוססים כל מגנט קבוע.



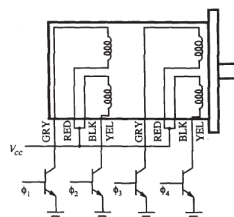
ניתן גם לשנות את הזרם דרך הסלילים
באופן הדרגתי ליצירת micro steps
לדוגמא אם הזרם דרך הסלילים A ו- $\bar{A}$ יהיה גדול
במעט מהזרם דרך הסלילים B ו- $\bar{B}$, אז הרוטור יעצר
כך שהקטבים שלו קרובים יותר ל A ו- $\bar{A}$ מאשר ל- B
ו- $\bar{B}$.

מבנה ובקרה

האיור הבא ממחיש מבנה של מנוע צעד מעשי, חד קוטבי (unipolar) עם 4 פאזות.



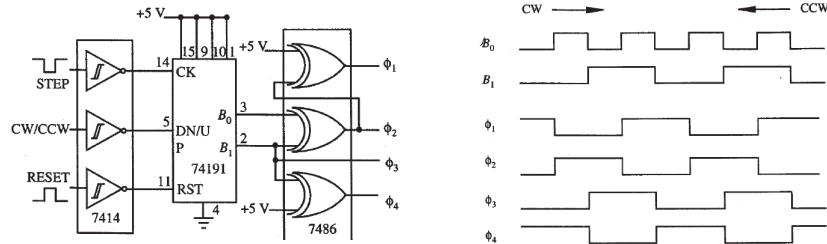
הפעלה - ארבעת הטרנזיסטורים החיצוניים (מסוג טרנזיסטור הספק) ממותגים ON ו- OFF כדי
למגנט את הקטבים של הסטטור באופן כזה שיגרמו לסיבוב הרוטור.



מעגלי הפעלה (drive circuit, driver) של מנועי צעד

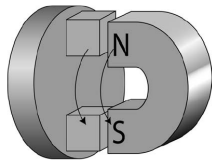
האיור הבא ממחיש מעגל הפעלה בצעד שלם (full-step) למנוע צעד חד קוטבי. המעגל מבוסס על חוצצי שמיט טריגר (Schmitt trigger) ברכיב 7414, על מונה מעלה מטה מסוג 74191 ועל רכיב מסוג 7486 הכולל שערי XOR (exclusive OR).

מעגל הפעלה דומה ניתן לרכוש ברכיב אחד (monolithic IC), לדוגמא: Signetic SAA1027, Allegro UCN 5804N



הביטויים הבוליאניים שמקבלים את מוצא המונה (מונה בן שתי הסיביות) ויוצרים את סידרת הכניסות הרצויה לסלילי המנוע נתונים ע"י:

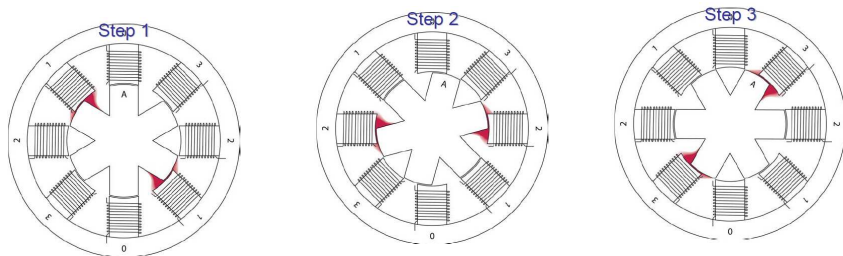
$$\phi_1 = \bar{\phi}_2 = \phi_2 \oplus 1, \quad \phi_2 = (B_0 \cdot \bar{B}_1) + (\bar{B}_0 \cdot B_1) = B_0 \oplus B_1, \quad \phi_3 = B_1, \quad \phi_4 = \bar{B}_1 = B_1 \oplus 1$$



קיימים גם מנועי צעד הפועלים על עקרון של שינוי הרלוקטנס המגנטי (Magnetic Reluctance).

אם הדיסק (באיור הנתון) עשוי מחומר פרומגנטי והקטבים על הדיסק אינם מקבילים לקטבים של המגנט אז יופעל מומנט אשר ישאף לסובב את הדיסק כדי להקטין ככול האפשר את מרווח האוויר דרכו צריכים קווי השטף לעבור.

במנוע צעד המבוסס על עקרון של רלוקטנס משתנה (VR - Variable Reluctance) הרוטור בנוי מחומר פרומגנטי ולא ממגנטים קבועים.



מנועי סרוו (RC servo motors)



מנוע סרוו הוא מנוע זרם ישר (DC Motor) בעל מערכת תמסורת פנימית של גלגלי שיניים ובקרה אלקטרונית על מיקום המנוע.

מנועי RC servo (בדרך כלל) אינם מסתובבים בצורה חופשית אלא נעים לאורך זווית שלרוב היא בין 0 ל- 180 מעלות.

מנועי סרוו פועלים בחוג סגור המאפשר בקרה על מיקום המנוע (ופיצוי במקרה של שגיאה בין המיקום הרצוי ומיקום המנוע בפועל).

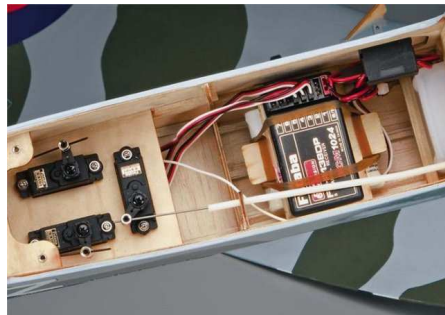


שימושים: מערכות הנשלטות מרחוק (RC) כגון: טיסנים, מסוקים, מכוניות קטנות וסירות (זה היעוד המקורי). מנועי הסרוו מאפשרים שליטה על המצערת ועל מערכות ההיגוי (לדוגמה זווית הלהבים במסוק).

בגלל יתרונות רבים שיש למנועי סרוו (קלות השליטה - רמת מתח TTL וממשק נוח עם מירקו-מעבדים, מומנט גבוה - משקל וגודל נמוכים, יעילות - צריכה נמוכה של אנרגיה), הם גם נפוצים מאוד בישומי רובוטיקה ומשמשים להנעה של רובוטים ניידים קטנים וזרועות רובוטיות.

מנועי סרוו הינם דרך זולה ונפוצה ליישומים רובוטיים המצריכים תנועה ובקרה.

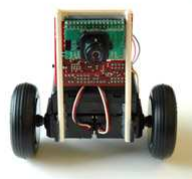
השימוש במנועי סרוו מבטל את הצורך בתכנון מערכת בקרה בחוג סגור.



מנועי סרוו ומקלט המותקנים בתוך טיסן רדיו



מנועי סרוו המשמשים להנעה של רובוט נייד קטן.



השוואה בין מנועי סרוו (Servo) למנועי צעד (Step Motors)

מנועי צעד פועלים בחוג פתוח ומנועי סרוו פועלים בחוג סגור לצורך בקרה על מיקומם (במנועי צעד המיקום תלוי בכניסה המסופקת למנוע ללא תלות בעומס או הפרעות חיצוניות, **וזאת כל עוד והם פועלים בטווח העומס המוגדר להם**).

לרוב מנועי סרוו ינועו בטווח זוויות מוגבל (0-180 מעלות) ונדרש להמירם ידנית כך שיוכלו לנוע בטווח רחב יותר של מעלות (360 ומעלה לסיבובים מלאים, הסבה כזאת מבטלת את המשוב המובנה במנוע). מנועי צעד אינם מוגבלים בתנועה (מאפשרים בקרת מיקום ומהירות ללא משוב).

מנועי צעד מאבדים כח במהירויות גבוהות, למנועי סרוו מומנט גבוה יחסית לגודלם.

שליטה במנועי סרוו

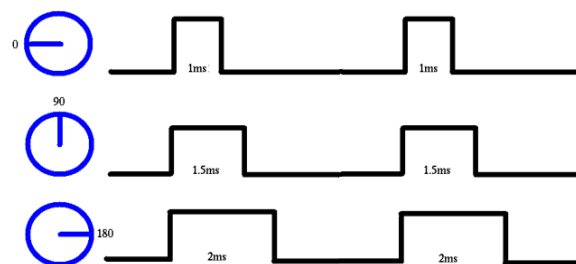
שליטה במנועי סרוו מבוצעת על ידי שליחת אות דיגיטלי (גל מרובע) אל חוט הבקרה של המנוע. רוחב הגל (Pulse Width) קובע את הזווית אליה ינוע המנוע (זהו אות הייחוס).

ערכים אופייניים:

פולס ברוחב 1 מילי-שנייה, המנוע ינוע מקסימום שמאלה (0 מעלות בשרטוט).

פולס ברוחב 1.5 מילי-שנייה, המנוע ינוע למרכז (90 מעלות בשרטוט).

פולס ברוחב 2 מילי-שנייה, המנוע ינוע מקסימום ימינה (180 מעלות בשרטוט).



קצב החזרה הינו כ- 50Hz כלומר מרווח הזמן בין שני אותות עוקבים הוא כ- 20msec. מרווח זמן זה אינו חייב להיות מדויק (מרווח זמן בגבולות 10-70msec לרוב יאפשר פעולה תקינה של הסרוו).

מתח הפעלה של מנועי סרוו

מנועי סרוו עובדים בטווח מתחים בדרך כלל בין 4.8 ל-6 וולט. הסיבה לשימוש בסטנדרט זה היא הקרבה לרמת TTL (שהיא 5 וולט) שבה פועלים רוב המקרו-מעבדים שמשמים לשליטה על מנועי הסרוו.

חיווט מנועי סרוו

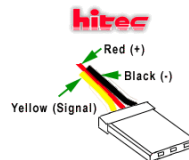
לכל מנועי הסרוו יש שלושה חוטים

חוט שחור או חום שהוא אדמה (-), משותפת גם למתח ההספקה וגם לאות השליטה

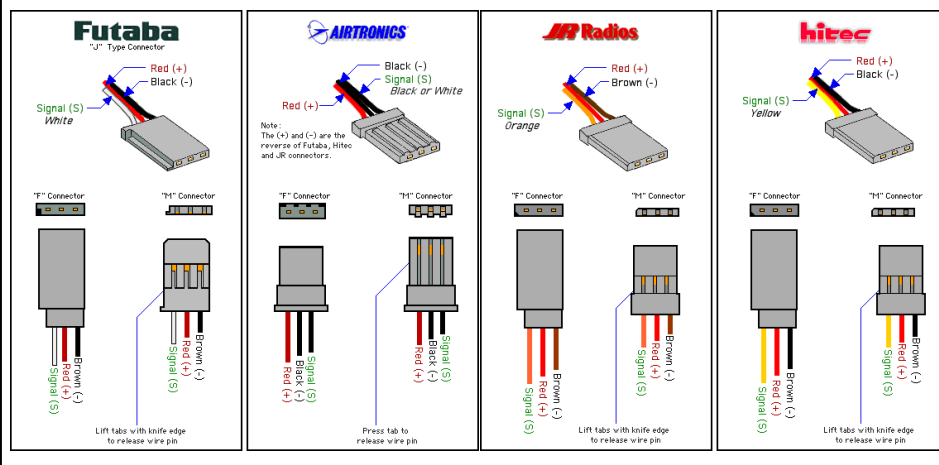
חוט אדום שהוא המתח (+), מספק את האנרגיה החשמלית להפעלת המנוע.

חוט צהוב, כתום או לבן שהוא חוט האות לשליטה במנוע (אות הייחוס).

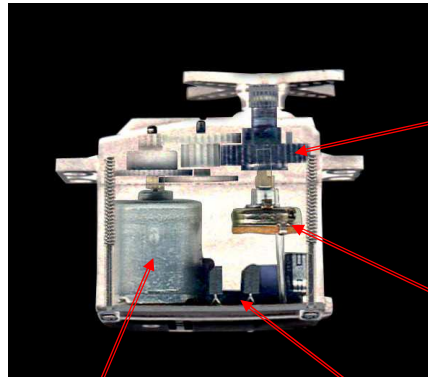
לדוגמה:



חיוטים שונים ומחברים של יצרני סרוו נפוצים (לא קיים תקן צבעים אחיד).



מבנה של מנוע סרוו



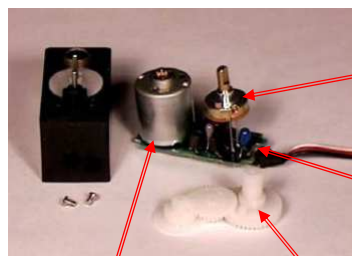
תמסורת מכאנית (גיר),
יכולה להיות עשויה
מפלסטיק או מתכת,
עם או ללא מיסבים.

נגד משתנה (חיישן)
משמש למדידת מיקום
המנוע

מעגל אלקטרוני משמש להפעלה
(הספק) ובקרה. בסרוו מתקדם
מעגל זה כולל גם מיקרו מעבד
(digital servo)

מנוע DC עם מברשות

מבנה של מנוע סרוו



נגד משתנה (חיישן)
משמש למדידת מיקום
המנוע

מעגל אלקטרוני משמש להפעלה
(הספק) ובקרה. בסרוו מתקדם
מעגל זה כולל גם מיקרו מעבד
(digital servo)

תמסורת מכאנית (גיר),
יכולה להיות עשויה
מפלסטיק או מתכת,
עם או ללא מיסבים.

מנוע DC עם מברשות

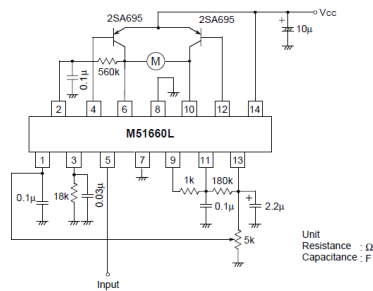
המעגל החשמלי של מנוע סרוו

בתוך הסרוו קיים מעגל חד יציב המייצר פולס באורך משתנה. אורך הפולס המיוצר הינו יחסי למיקום של הסרוו (למעשה אורך הפולס נקבע ע"י הנגד המשתנה המשמש במשולב).

אות השגיאה מתקבל ע"י השוואה של אות הבקרה במבוא הסרוו, עם הפולס המתקבל ממעגל החד יציב. ההפרש בין הרוחב של שני האותות קובע את גודל השגיאה ואת אות התיקון שנשלח למנוע (כאשר הסרוו נמצא במקום הרצוי שני האותות הם בעלי רוחב פולס זהה).

קיימים מעגלים ייעודיים המשמשים לבנייה של מנועי סרוו, לדוגמא M51660L (לרכיב זה יש להוסיף, בין היתר, שני טרנזיסטורים מסוג PNP ליצירת H-Bridge)

Servo motor control circuit for radio-controlled



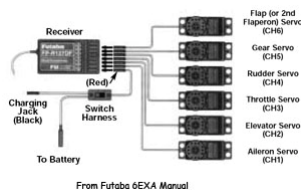
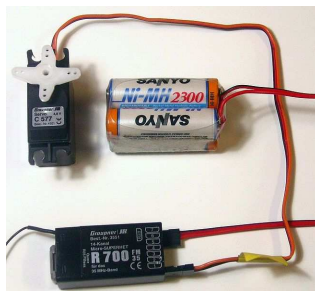
PIN CONFIGURATION (TOP VIEW)

Servo position voltage	1
Timing capacitor	2
Timing resistor	3
External PNP transistor drive (1)	4
Input	5
Output (1)	6
GND	7
Error pulse output	8
Output (2)	9
Stretcher input	10
External PNP transistor drive (2)	11
Regulated voltage output	12
Supply	13
	14

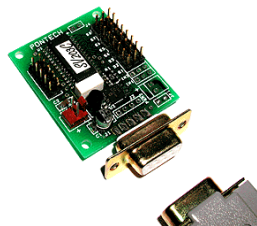
Outline 14P5A

הפעלת מנוע סרוו

במקור, מנועי סרוו תוכננו כך שיקבלו אות הפעלה ממקלט של מערכת שלט רחוק. זה גם החיבור הסטנדרטי והסרוו מקבל את או הייחוס ומתח ההזנה מהמקלט.



From Futaba 6EXA Manual



ניתן לייצר את אותות ההפעלה של מנוע הסרוו ע"י שימוש במיקרו-בקר. קיימים גם מעגלים הניתנים לרכישה ומאפשרים הפעלה של מספר מנועי סרוו (בדרך כלל שמונה) כאשר אות הייחוס מתקבל ע"י תקשורת טורית (Serial Servo Controller). גם מעגלים אלה מבוססים על מיקרו-בקרים (לדוגמא המעגל בתמונה מתבסס על PIC16C73 microcontroller)

הפעלת מנוע סרוו (המשך)

ניתן לייצר גל ריבועי עם פולס ברוחב משתנה ע"י שימוש ברכיב 555

כאן הנגד המשתנה R_2 קובע את רוחב הפולס.

משוואת המעגל הן:

$$T_{HIGH} = 0.693(R_1 + R_2)C$$

$$T_{LOW} = 0.693(R_3)C$$

סיבוב הנגד המשתנה עד לגבול העליון
יוביל לפולסים ברוחב:

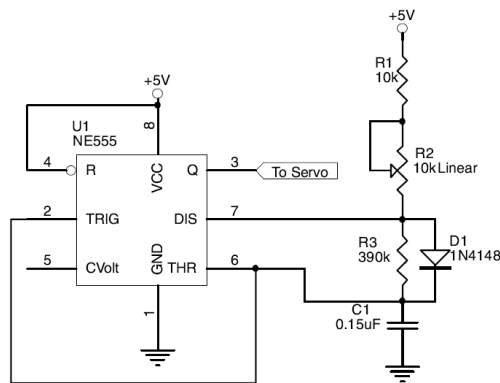
$$0.693(10k + 10k)0.15e^{-6} = 2.079ms$$

סיבוב הנגד המשתנה עד לגבול התחתון
יגרום לפולסים ברוחב:

$$0.693(10k + 0)0.15e^{-6} = 1.039ms$$

פרק הזמן בין פולס לפולס במעגל הנתון

$$0.693(390k)0.15e^{-6} = 40.54ms$$



שינוי מנוע סרוו כך שתתאפר תנועה של 360 מעלות

כאן מעוניינים להפעיל את הסרוו כמנוע DC רגיל (בדרך כלל להנעה של רובוטים ניידים קטנים).

מנוע הסרוו יפעל בחוג פתוח (ללא חיישן מקום), ניתן להוסיף חיישן מהירות חיצוני ובקר את מהירות המנוע ע"י בקר בחוג סגור.

יתרונות השימוש במנוע סרוו (במקרה זה) הם: מנוע זול, מומנט גבוה יחסית לגודל, זמינות, תמסורת גלגלי שיניים אינטגרלית, מערכת הפעלה (drive) אינטגרלית (אין צורך להוסיף רכיבים להגברת הזרם כגון H-bridge)

לצורך שינוי המנוע יש:

לפרק את המנוע.

Remove This
Tab



לחתוך את המעצור המכאני (stopper) הקיים בגלגלי השיניים (תפקידו להגן על הפוטנציומטר מסיבוב בזווית גדולה מדי).

להוציא את הנגד המשתנה (חיישן המיקום), להלחים במקומו שני נגדים זהים בעלי ערך של כ-2.2k (הנגדים מולחמים כך שמדמים מצב בו הפוטנציומטר נמצא כל הזמן במרכז ללא קשר למיקום המנוע, כלומר שני הנגדים מחוברים אחד לשני במקום שקודם היה מחובר הזחלן של הפוטנציומטר).

במצב זה הפעלת אות פיקוד עם רוחב פולס גדול מ-1.5msec יגרום לסיבוב המנוע בכיוון השעון והפעלת אות פיקוד עם רוחב פולס קטן מ-1.5msec יגרום לסיבוב בכיוון ההפוך (הזרם שיופק למנוע יהיה יחסי לרוחב הפולס)

שינוי מנוע סרוו כך שתתאפר תנועה של 360 מעלות (המשך)

הפתרון שהוצג טוב כל עוד המנוע מסתובב באופן רציף (מכיוון שבתוצאה שהתקבלה קשה להשיג מצב אפס כלומר מצב בו השגיאה שווה אפס, מה שיגרום לזחילה איטית של המנוע כאשר אות הפיקוד הינו 1.5msec)

פתרון: אם הסרוו מבוסס על הרכיב M51660 אז ניתן להגדיל את ה- "תחום המת" (dead-band) על ידי הגדלת ההתנגדות הרגל מספר 9.

ניתן כמובן גם לנתק את המנוע לגמרי מהמעגל החשמלי, להשתמש רק במנוע ובתמסורת המקוריים, כאשר מעגל ההגברה הינו חיצוני.



מנוע סרוו עם גלגל המיועד להנעה של רובוט נייד