

## מערכות בקרה

הבקרה נחלקת למספר סוגים:

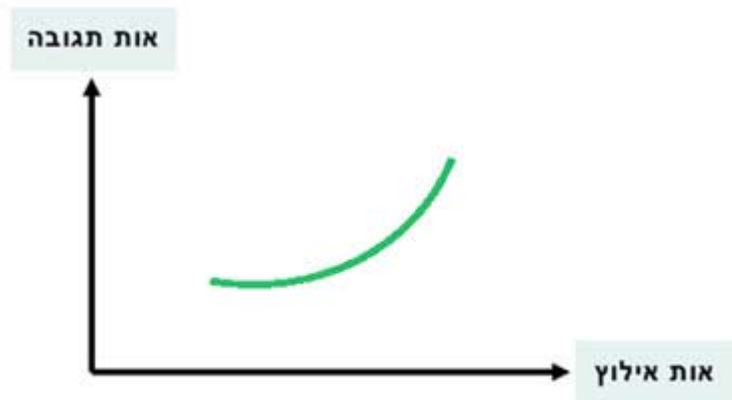
- בקרה דו מצבית
- בקרה רב דרגתית
- בקרה רציפה

### בקרה דו מצבית

בבקרה דו מצבית למפעיל יש רק שתי אפשרויות: הוא יכול לנתק את המפסק או לחברו, אין מצב ביניים כלשהוא. הבקר יכול להפיק רק שני אותות בקרה.

כאשר מופק אות אחד רכיב הבקרה מופסק OFF (או מופעל בעוצמה נמוכה) ובמצב השני הוא מופעל בעוצמה גבוהה ON.

### בקרה דו מצבית



### דוגמה ראשונה:

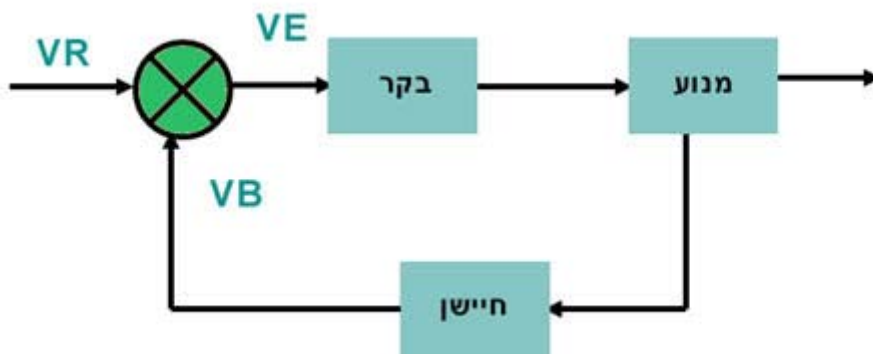
תנור אפיה ביתי הוא מערכת בקרה הפועלת בחוג סגור. גוף החימום המותקן בתנור מופעל כאשר הטמפרטורה בתנור נמוכה. פעולת גוף החימום מופסקת כאשר הטמפרטורה עולה מעל לערך הרצוי.

**דוגמה שנייה:**

מקרר ביתי הוא מערכת בקרה הפועלת בחוג סגור. המדחס המותקן במקרר מופעל כאשר הטמפרטורה במקרר גבוהה ומופסק כאשר הטמפרטורה יורדת מתחת לערך הרצוי.

**בקרה רב דרגתית**

**וויסות רב דרגתי** מאפשר שליטה על קצב אספקת אנרגיה או חומר במספר מסוים של דרגות קבועות מראש.



החיישן מודד את מהירות המנוע ובעקבות זאת נותן פקודה לבקר שיעביר מתח למנוע בהתאם לסל"ד. בקרה רב דרגתית מורכבת יותר מבחינת הבקרה.

**לדוגמה:**

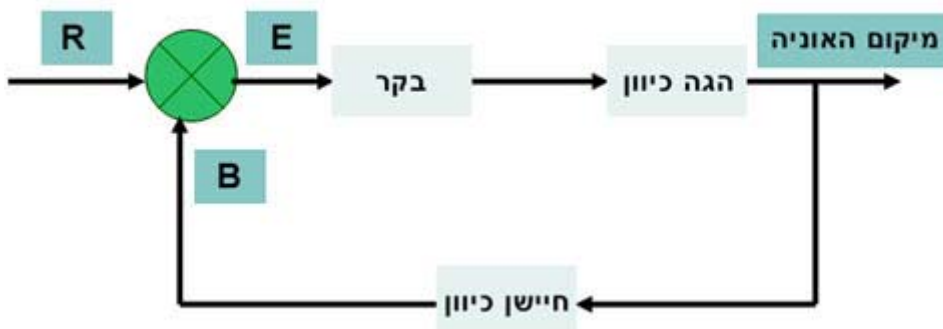
למאוורר ביתי יש כמה מהירויות. כל שינוי בעוצמת המתח למאוורר יגדיל את הסיבוב של המנוע. המאוורר בעקבות זאת, יוציא כמות אויר גדולה יותר.

### בקרה רציפה

**בקרה רציפה** מאפשרת שליטה בקצב אספקת אנרגיה או חומר בכל ערך רצוי בתחום פעולה מסוימת. במערכות רבות ערכו של הערך הרצוי משתנה ללא הרף והמערכת מבצעת תיקון כל הזמן באופן רציף. בקרה רציפה היא בקרה בזמן אמת. בקר של מערכת רציפה הוא מורכב מאוד מפני שהוא מקבל נתונים בזמן אמת ומתקן בהתאם.

### לדוגמה:

בקרת כיוון של אונייה המפליגה בלב ים מבוצעת באמצעות מערכת בקרה בחוג סגור שעובדת באופן רציף. הערך הרצוי משתנה ללא הרף.



חיישן מודד כל הזמן את מיקום האוניה בים בזמן אמת. מערכת הבקרה מקבלת כל הזמן ערך רצוי חדש R. מערכת התיקון מסיטה את לוח ההגה של האוניה בהתאם לשגיאה E שנוצרה. ההפרעה E נוצרת עקב גלים, זרמים, רוח.

### דוגמא נוספת:

כאשר ברובוט בבקרה רציפה בזמן אמת הבקר מקבל מסלול תנועה ותוך תנועת הרובוט הבקר מחשב את המסלול ומוציא פקודות למנועי הרובוט

על מנת להתמודד עם הפער בין הערך המצוי לערך הרצוי של מערכות טכנולוגיות, יש להכין אמצעים לתיקון סטיות של המשתנה המבוקר (גודל פיסיקלי) מערכו הרצוי. סטיות אלה נגרמות עקב הפרעות במערכת.

#### **דוגמה:**

מזגן פועל בדירה. אם נשאיר חלון פתוח, תגרם הפרעה לפעולת המערכת. המזגן יצטרך לעבוד יותר זמן בעוצמה גבוהה יותר, על מנת לקרר את הדירה.

הפיתרון הנפוץ הוא להתבסס על מדידת המשתנה המבוקר באופן רציף. למשל, בדוגמה זו, מדידת הטמפרטורה של הדירה כל הזמן. אם מתגלה סטייה/שגיאה בינו לבין הגודל הרצוי נעשה תיקון מיידי. בדוגמה, אם המזגן כוון לטמפרטורה של 22 מעלות בחדר ובמדידה נמצאו 24 מעלות, זו סטייה מהגודל הרצוי. לפיתרון זה קוראים **בקרת משוב**.

המשוב הוא העברת מידע) אינפורמציה (לתיקון הסטייה.

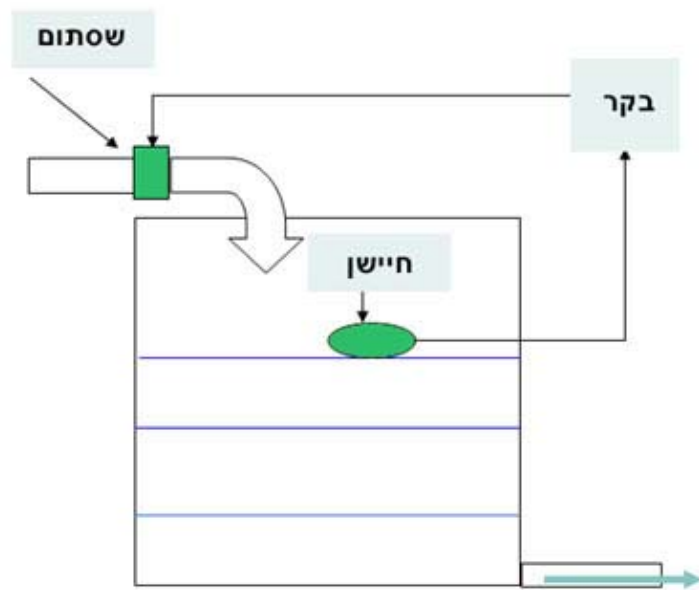
#### **אילו סוגי משוב קיימים?**

אנו מבחינים בשני סוגי משוב: משוב שלילי, משוב חיובי.

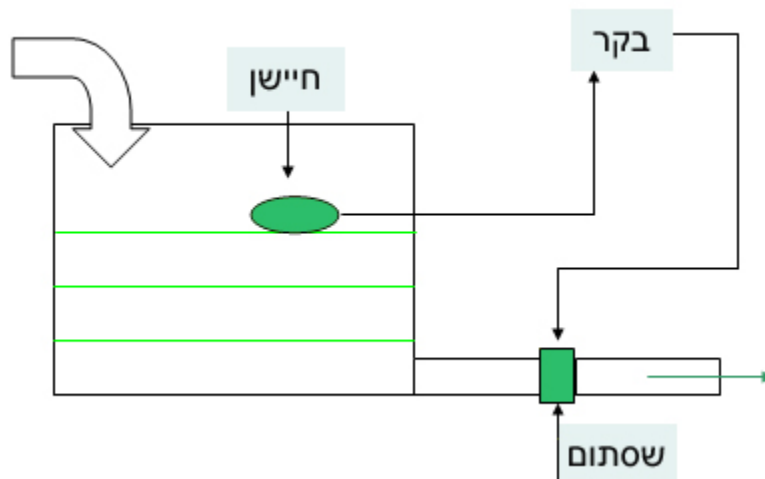
- **משוב שלילי** מאפשר פעולה תקינה של מערכת. משוב שלילי שואף להקטין את השגיאה ל - 0. מערכת בקרה תפעל באופן תקין אך ורק עם משוב שלילי. לדוגמה, בניאגרה של בית, ככל שהשסתום נסגר, מופסקת כניסת המים למיכל ההדחה. השסתום מעביר את המשוב.

- משוב חיובי** הוא משוב שגורם שמערכת לא תפעל בצורה תקינה ובמקום להקטין את השגיאה (הסטייה) - השגיאה הולכת וגדלה, עד שהמערכת מגיעה לרוויה ויכולת מקסימאלית או הפסקת פעולת המערכת. למשל, המסת מלח במים: אפשר להמיס מלח עד שלב מסויים, עד שהוא נמס. זו רוויה.

### מערכת לבקרת מפלס עם משוב חיובי



### מערכת בקרת מפלס עם משוב שלילי



**לסיכום**

אם נבקר את שתי המערכות בעזרת אותו בקר, הבקר יפתח את השסתום כאשר מפלס המים יורד באחת המערכות, תגרום השגיאה לתיקונה (מערכת עם משוב שלילי) ובאחרת תגרום השגיאה להגדלתה (משוב חיובי).

**חישוב משוב חיובי / שלילי**

נוסחה לחיוב שגיאה/משוב:

$$c - r = e$$

$$e = \text{שגיאה/סטייה}$$

$$r = \text{ערך רצוי}$$

$$c = \text{ערך מצוי}$$

**משוב חיובי:**  $e = r + c$  - כלומר השגיאה הולכת וגדלה.

**משוב שלילי:**  $e = r - c$  - כלומר השגיאה שואפת להגיע ל-0.

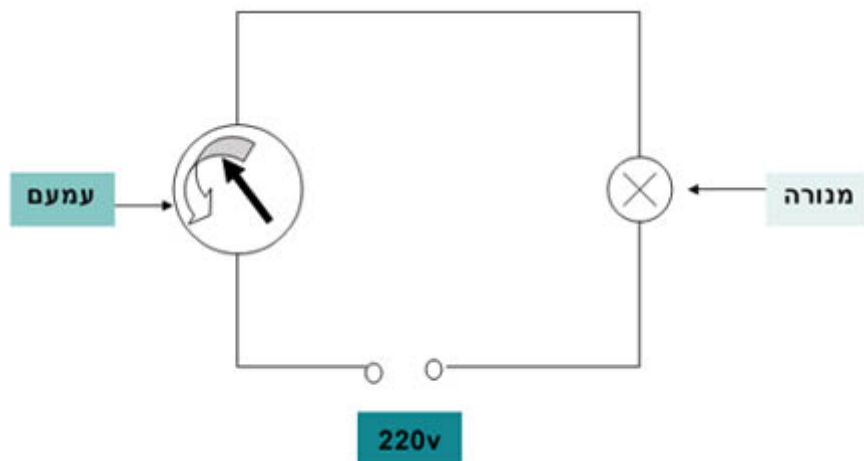
## מערכת בקרה

**מערכת בקרה** היא אוסף של רכיבים הפועלים במשותף ומתפקדים יחד, בתהליך שמטרתו לווסת משתנים פיזיקליים. אחת מסוגי המערכות שנלמד היא מערכת בקרה בחוג פתוח.

### מערכות בקרה בחוג פתוח

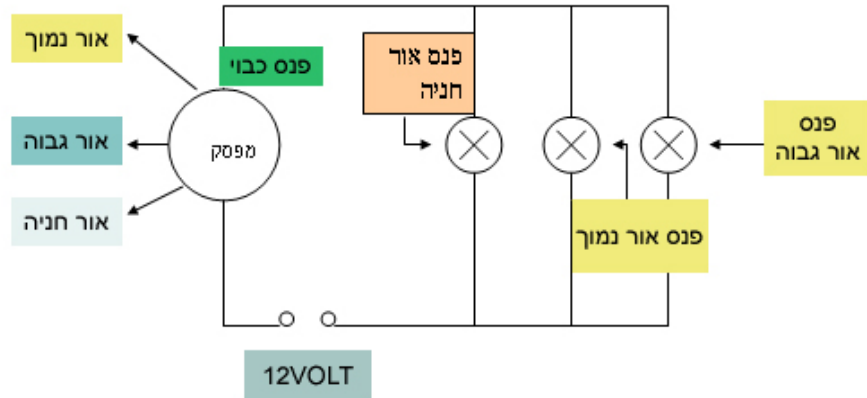
אינן כוללות מערכת שתפקידה לתקן או לצמצם סטיות בערכו של המשתנה המבוקר.

### עמעם אורות



עמעם אורות מאפשר לשנות מתח חשמלי המגיע למנורה, כך משפיעים על עוצמת האור. עוצמת האור הרצויה נקבעת לפי תחושת האדם ולא משתמשים במכשירי מדידה.

## מערכת לבקרת עוצמת אור ברכב



לרשות הנהג עומדות ארבע אפשרויות בחירה של מצבי תאורה:

1. לא להפעיל את הנורות כלל.
2. להפעיל את פנסי החנייה בלבד.
3. להפעיל את האור הנמוך (אור דרך).
4. להפעיל את האור הגבוה.

אפשר לתאר את המערכת בעזרת דיאגרמה:





אנו רואים שבמערכת זו אין מדידת עוצמת האור שמפיקות הנורות וכן לא מדידה של השפעתן על הסביבה. המערכת לא מתאימה את עצמה לעוצמת האור הרצויה כיוון שאין לה אמצעי מדידה ותיקון עוצמת אור.

### דוגמה:

מערכת רמזורים בצומת פועלת לפי זמנים הנקבעים מראש. מערכת הרמזורים אינה פועלת לפי מספר המכוניות העומדות בצומת ולא על פי זרם התנועה בכל אחד מהצירים.

מערכות בחוג פתוח הן מערכות השולטות על המשתנה המבוקר באמצעות הפעלת המערכת לזמן קצוב, בלי למדוד את ערכו של המשתנה המבוקר.

גם מערכות אלו נקראות מערכות בחוג פתוח, אף שהם מפסיקות לפעול מעצמן. מערכות אלו מתוכננות לעבוד בתנאי סביבה בלתי משתנים. כאשר תנאי הסביבה ישתנו תיווצר הפרעה, ומערכות אלו לא יוכלו לתקן את ההפרש בין ערכו של הערך הרצוי ובין הערך של המשתנה המבוקר.

### דוגמה:

המצנם (טוסטר) - קליית פרוסת הלחם במצנם מבוצעת על ידי דריכת ידית והפעלת גופי חימום. לאחר זמן קצוב קפיץ משתחרר ומעלה את הפרוסה. במערכת זו אין לנו תהליך מדידה לכן הפרוסה יכולה להיות קלויה יותר מדי או פחות מדי.

אפשר לתאר את המצנם בדיאגרמה:



אין מערכת מדידה לצבע הקלי, לכן מערכת הבקרה לא יכולה לשנות את משך הזמן שהקלי ישהה בתוך המצנן.

**חשוב לדעת!**

מערכות תעשייתיות הפועלות בחוג פתוח אינן מדויקות, הן מושפעות משינויים סביבתיים לכן, משתמשים בהן כאשר אין דרישות גבוהות לביצועי התהליך המבוקר.

**במערכות בקרה בחוג סגור :**

יש מדידה של המשתנה המבוקר. תוצאות המדידה משפיעות על פעולת רכיבי המערכת, ומטרתן לתקן את השגיאה.

**כל מערכת בקרה בחוג סגור כוללת:**

1. **פעולת מדידה** שבה נמדד ערכו של המשתנה המבוקר. בפעולת המדידה מועבר אות חשמלי לבקר המערכת. אות זה נקרא גם אות משוב.
2. **פעולת השוואה** בה מתבצעת השוואה באמצעות פעולת חיסור בין אות משוב המופק ממוצא החיישן (מדידה) לאות המייצג את הערך הרצוי. אות זה נקרא **אות ייחוס**.
3. **פעולת אות תיקון** מתבצעת באמצעות שינוי המשתנה המבוקר. פעולה זו חוזרת ומשפיעה על התהליך המבוקר ועל תוצאות המדידה.

**דוגמה למערכת בחוג סגור:**

**בקרת טמפרטורה במקרר ביתי-** במקרר יש תהליך שבו אויר מצונן מוריד את הטמפרטורה השוררת במקרר. המקרר פועל כמערכת בקרה בחוג סגור, משום שיש לשמור על טמפרטורה קבועה בתוך המקרר.

מערכת הבקרה צריכה להתגבר על הפרעות כגון: פתיחת דלת מקרר - לאורכי זמן שונים וחשיפה לטמפרטורות סביבה שונות (משום שגוף המקרר אינו מבודד לחלוטין את חלל המקרר מהסביבה).

הפרעות אלו ואחרות מאלצות את המערכת להגיב לשינוי בטמפרטורה. לשם כך יש לבקר את הטמפרטורה במקרר בחוג סגור. במערכת הבקרה יש חיישן המודד את הטמפרטורה בתוך המקרר.

בקר משווה את הטמפרטורה הרצויה עם הטמפרטורה הנמדדת ובהתאם לכך הבקר יחליט עם להפעיל או להפסיק את תהליך הקירור.

דיאגרמת מלבנים

מאפשר לתאר רכיבים במערכת הבקרה. כל רכיב במערכת הבקרה יוצג במלבן.

מידע הנכנס למלבן יקרא בשם אות מבוא (קלט). אות המבוא הוא משתנה פיזיקלי כלשהוא.

מידע היוצא מהמלבן יקרא בשם אות מוצא (פלט). אות המוצא הוא משתנה פיזיקלי היוצא מהמערכת (תפוקת המערכת).



כל רכיב מיוצג על ידי מלבן, אות מוצא ואות מבוא (קלט, פלט)

בדיאגרמת המלבנים, אפשר לראות את שלושת מאפייני המערכת: **קלט** – תהליך – **פלט**.

הבה נדגים ונתרגל שימוש בדיאגרמת מלבנים.

במערכות טכנולוגיות מאופיינות בקיומם של:

**קלט** - הדברים שמוזנים במערכת

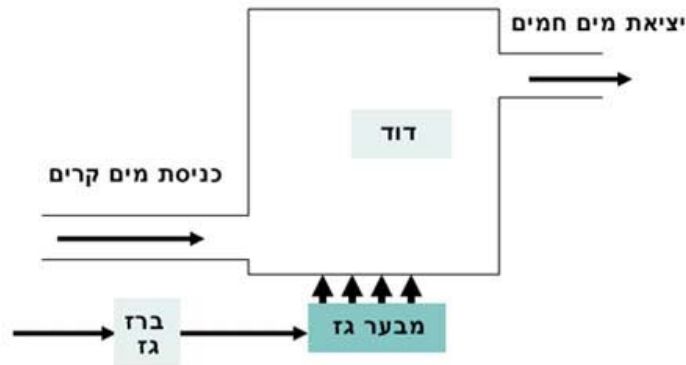
**תהליך** - סדרת הפעולות המתבצעות במערכת

ערך קלוז בן עזרא

## פלט- התוצרים שהמערכת מפיקה

מאפיינים אלה שרטטנו בתוך דיאגרמת מלבנים.

### מערכת לחימום מים בדוד



בציור מתוארת מערכת לחימום מים בדוד. המערכת כוללת ברז המווסת את ספיקת הגז. למבער הגז המותקן מתחת לדוד. בעירת הגז במבער מחממת את המים שבדוד.

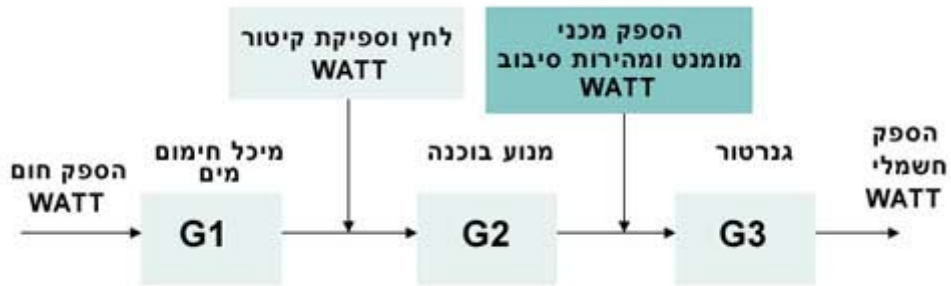


המלבן שבאיור מתאר את כל מערכת הדוד כמלבן אחד שבו מידת פתיחת הברז משפיעה על טמפרטורת המים.

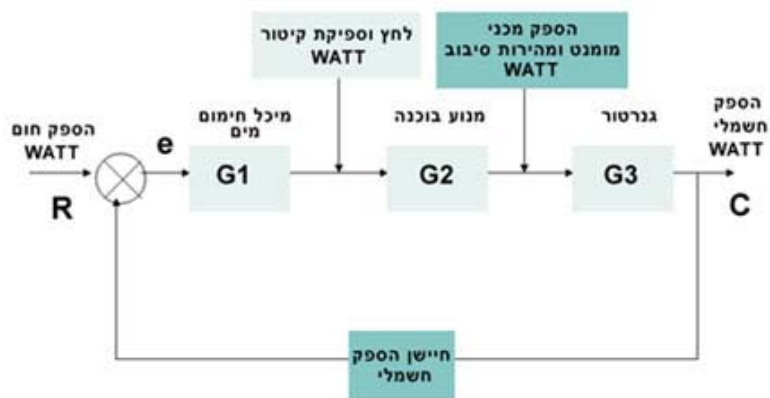
את מערכת הבקרה אפשר לתאר כרצף מלבנים. כל תת מערכת משפיעה על תת המערכת העוקבת על ידי אות המוצא. אות מוצא של תת-מערכת

אחת מהווה את אות המבוא של תת מערכת עוקבת. במערכת מלבנים בחוג פתוח, כל רכיב יקבל מלבן .

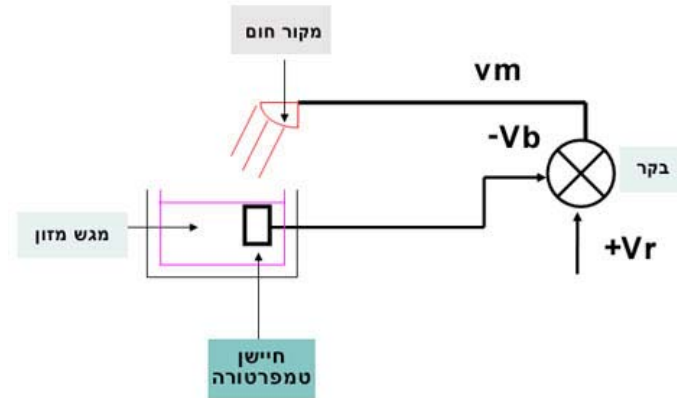
מערכת לייצור חשמל בחוג פתוח



מערכת מלבנים בחוג סגור



מערכת לבקרת טמפרטורה של המזון



המערכת נועדה לשמור את המזון בטמפרטורה רצויה. עוצמתו של מקור החום נקבעת על פי מתח  $V_m$  המסופק לו. המתח  $V_b$  הוא מתח מוצא החיישן והוא משתנה ביחס ישר לטמפרטורת המזון. המתח  $V_r$  הוא המתח המתאים לטמפרטורה הרצויה.

### הפרעה

#### הפרעה בחוג פתוח וסגור

לכל מערכת יש גורם פיזיקלי שעלול להפריע לפעולתה התקינה. ההפרעה יכולה להתרחש במערכת בחוג סגור או במערכת בחוג פתוח.

#### **מהי 'הפרעה במערכת בקרה'?**

**הפרעה** היא התרחשות חיצונית שאין עליה שליטה ואשר משפיעה על ערכו של המשתנה המבוקר.

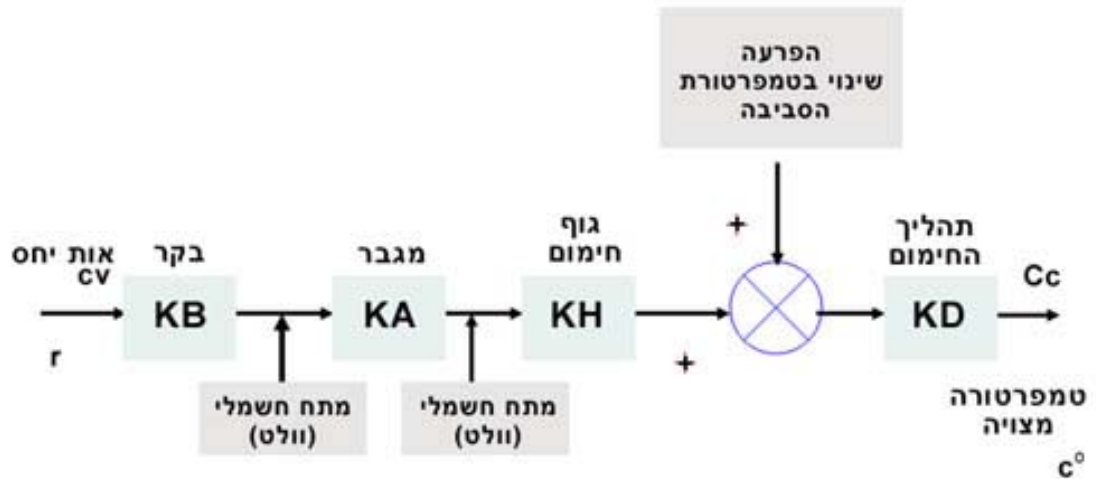
כדי להדגים את ההפרעה למערכת, בואו נחשוב מה יקרה למקרר במידה ונשאיר את דלת המקרר פתוחה?

אם נשאיר את דלת המקרר פתוחה, הרי שתתרחש הפרעה במערכת בקרה. במקרה זה, ההפרעה תשפיע על ערך פיזיקאלי שהוא הטמפרטורה בתוך המקרר.

הפרעות למערכת הבקרה עשויות להופיע במערכות בחוג סגור או במערכות בחוג פתוח.

### מערכת לבקרת טמפרטורה בחוג פתוח

מערכת הבקרה בחוג פתוח אינה מסוגלת להתגבר על הפרעות. הפרעה למערכת בקרה בחוג פתוח תיראה כך:



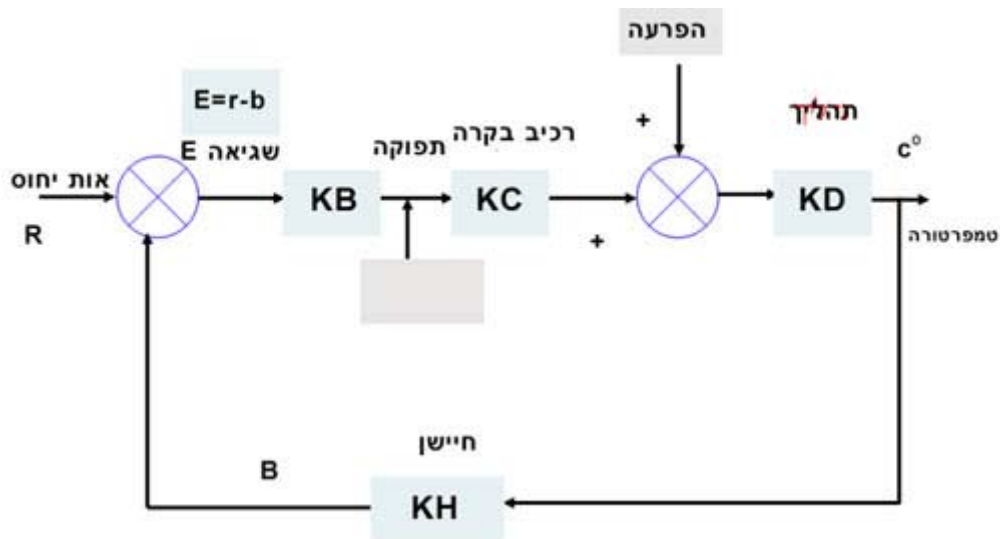


## מערכת בקרה בחוג סגור עם הפרעה

תפקידן של מערכות בקרה בחוג סגור להתגבר על עומס חיצוני כלומר, על הפרעה למערכת.

לפניכם מערכת בקרה בחוג סגור, המתוארת בעזרת דיאגרמת מלבנים הכוללת את ההפרעה.

**מערכת בקרה בחוג סגור בעזרת דיאגרמת מלבנים הכוללת את ההפרעה**



ההפרעה מתווספת לפעולת המשתנה המבקר על התהליך ומסיטה אותו. מדידת המשתנה המבוקר, שהוא מוצא התהליך והשפעת המדידה על פעולת המערכת, מאפשרת למערכת בקרה בחוג סגור להתגבר על ההפרעות.

**נתאר את אופן פעולת וויסות טמפרטורה במקרר:**

כאשר נפתח את דלת המקרר ביום קיץ חם, כניסת האויר החם למקרר תגרום לעליית הטמפרטורה במקרר. השינוי בטמפרטורה יימדד על ידי חיישן, שיתן אות חשמלי לפי הטמפרטורה שנמדדה, אל בקר המקרר.

הבקר ייתן אות לתיקון השגיאה (יגרום להפעלת המדחס) שיוריד את הטמפרטורה במקרה.

אילוץ הוא שינוי (בכניסה) בערך פיזיקלי שבכניסה למערכת.  
האילוץ הוא ההפרש (שינוי) שבוצע בכניסה למערכת.  
האילוץ יסומן באות  $\Delta\theta$  (טתה).

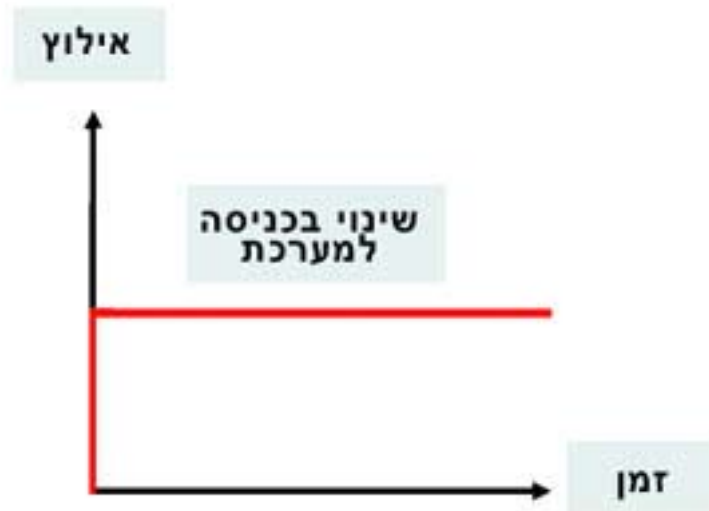


נהוג להשתמש ב-4 סוגי אילוץ:

- אילוץ מדרגה
- אילוץ שיפוע
- אילוץ הלם
- אילוץ סינוס

### אילוץ מדרגה

אילוץ מדרגה מתאר שינוי פתאומי בכניסה למערכת. השינוי הוא ממצב קבוע אחד למצב קבוע אחר. שינוי זה בגודל קבוע לאורך זמן.



באילוך מדרגה אנו רואים שיש קפיצה פתאומית ב-0 זמן  
לאחר מכן השינוי נשאר קבוע.

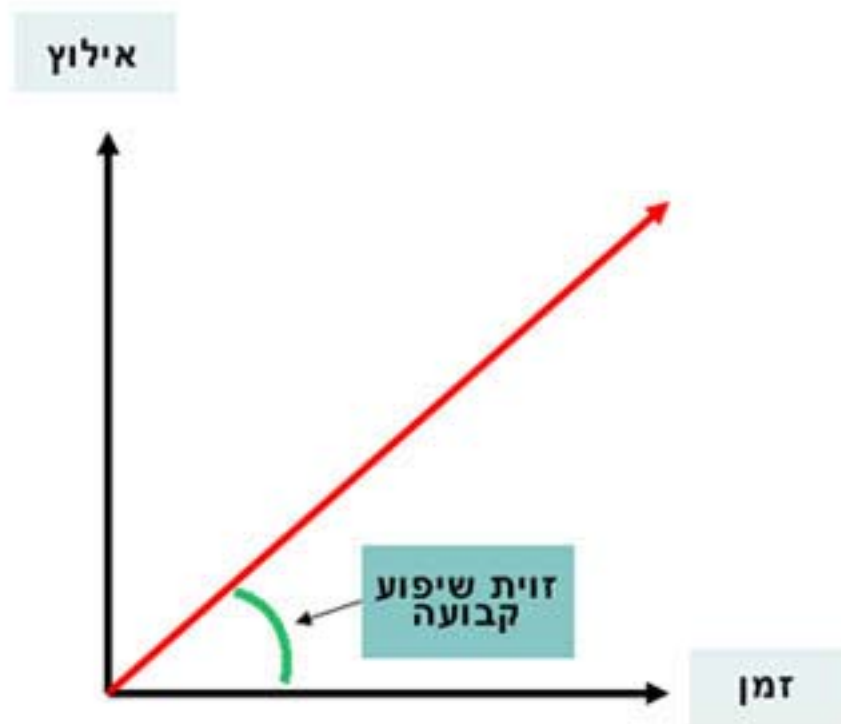
**דוגמה:**

נהג נוהג את מכוניתו במהירות 50 קמ"ש. הנהג כעת מעוניין להעלות את  
המהירות מיידית עקב רצונו לעקוף. המהירות החדשה היא 80 קמ"ש.  
המערכת מקבלת אילוך מדרגה של 30 קמ"ש.

**מה ההבדל בין אילוך מדרגה לאילוך הלם?**

### אילוך שיפוע

**אילוך שיפוע** זהו שינוי בכניסה למערכת בקצב קבוע לאורך זמן.



#### דוגמה:

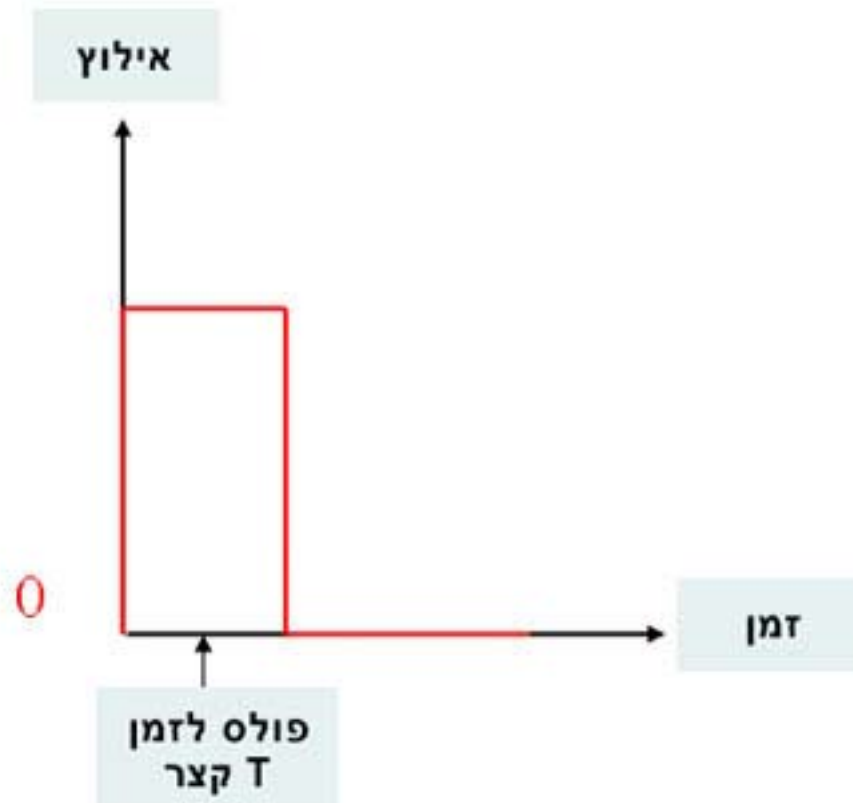
בריכת מים שמתמלאת מים. הכוח הפועל על שטח הבריכה מתחיל לעלות בהדרגה. אילוך שיפוע הוא שימושי במיוחד במערכות אלקטרוניות וחשמל.

#### דוגמה נוספת:

כאשר תינתן פקודה (במערכת עקיבא) למערכת בקרת ירי של תותח לעקוב במהירות קבועה אחר מטרה כלשהי יהיה בכך אילוך שיפוע לגבי מצב התותח.

### אילוך הלם

**אילוך הלם** זהו שינוי פתאומי בגודל יחסי קבוע כאשר שינוי זה מתקיים בזמן קצר יחסית.



אילוץ הלם הוא אילוץ שבו מערכת הבקרה מקבלת פולסים חשמליים קצרים לשינוי רגעי בכניסה למערכת.

#### דוגמה ראשונה:

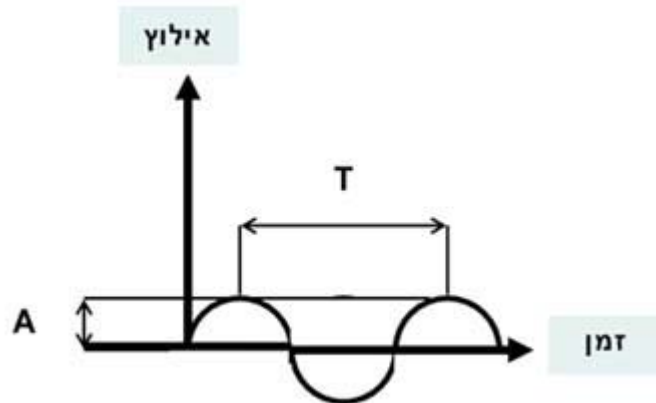
התנעת רכב - הסטרטר נותן הנעה ראשונית שמהווה פולס הלם למנוע.

#### דוגמה שניה:

למטופל שעבר אירוע לב נותנים זרם חשמלי בעוצמה גבוהה לזמן קצר. זוהי מכת הלם - שריר הלב מקבל שוק ובעקבות זאת צפויה תגובה שהיא פעולת שריר הלב.

### אילוץ סינוס

אילוץ סינוס הוא שינוי בכניסה למערכת בתדירות קבועה. לאילוץ סינוס אפשר לקרוא בשם אילוץ תדר.



**A** משרעת גובה גל הסינוס

**T** מרחק בין מרכז למרכז גל אחר

### דוגמה:

כאשר חלק של מכונה כושל, אומרים עליו ש'החומר התעייף' עקב מכות ותדר קבוע בזמן העבודה.

### לסיכום

מתוך ארבעת האילוצים שלמדנו עליהם, האילוץ הנפוץ ביותר הוא אילוץ מדרגה. אילוץ זה קיים במיוחד בניתוח מערכות מכניות טרמיות והידראוליות. שלושת האילוצים האחרים נפוצים יותר בבדיקות של מערכות חשמל ואלקטרוניקה.

## חישובי תגובות

**מצב מתמיד** מאפיין שיווי משקל בין כל הגורמים הפועלים במערכת הבקרה. תגובת המערכת במצב המתמיד נקראת גם **תגובה סטטית** שמתקבלת לאחר הפעלת אות האילוץ למערכת. נתאר את התלות בין אות האילוץ לבין אות תגובה סטטית בעזרת גרף (סטטי).

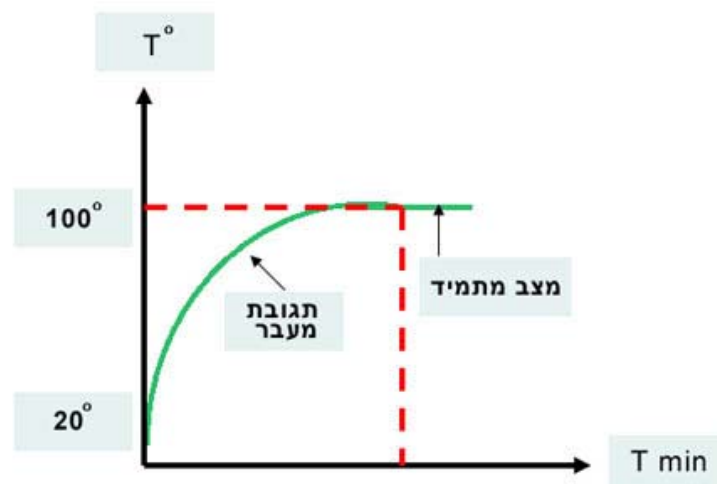


### דוגמה לגרף:

אפשר לשנות את המהירות של מנוע חשמלי על ידי שינוי המתח החשמלי המגיע אליו. המהירות תלך ותגדל עד אשר תתייצב בערך קבוע, המתאים לעצמת המתח.

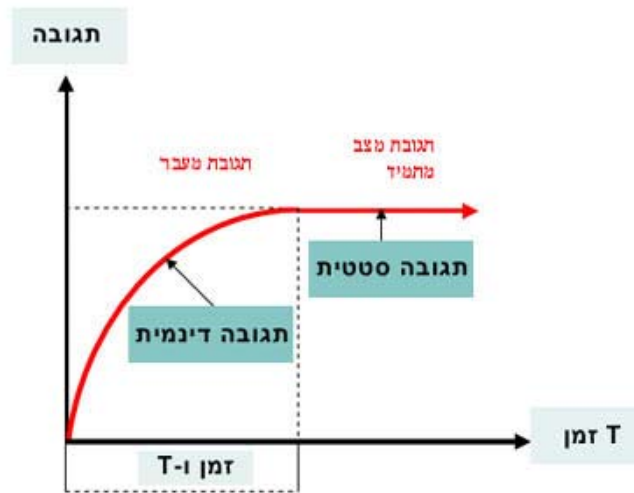
בעזרת גרף סטטי ניתן לחשב את ההגבר הסטטי.

**הגבר סטטי** הוא היחס בין גודל השינוי באות המוצא לגודל השינוי באות המבוא כאשר השינויים נמדדים במצב המתמיד. את אות ההגבר של רכיב מסוים נסמן באות  $K$ .



**הגבר סטטי K** שווה ליחס בין שינוי באות המוצא (תגובה) ובין שינוי באות המבוא (אילוץ).

ההגבר הסטטי הוא היחס בין גדלים פיסיקליים והוא מבטא את השפעתם של הגדלים האלה זה על זה.  
ההגבר הסטטי הוא גודל פיסיקלי בעל יחידות.



**דוגמה ראשונה:**

מערכת היגוי במכונית מאפשרת שליטה על זווית הגלגלים. נתון שינוי של 20 מעלות בזווית ההגה גורם שינוי של 2 מעלות בזווית הגלגלים:

נחשב את ההגבר של מערכת ההיגוי:

**אילוץ:**

$$\Delta\theta_1 = 20^\circ$$

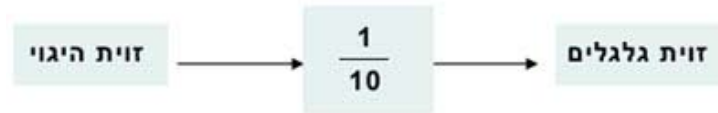
**תגובה:**

$$\Delta\theta_0 = 2^\circ$$



$$K = \frac{\Delta\theta_{out}}{\Delta\theta_{in}} = \frac{2^\circ}{20^\circ} = \frac{1^\circ}{10^\circ}$$

ובתאור מלבנים נקבל:



**דוגמה שניה:**

מזגן תפקידו למזג את הבית. המזגן במצב מנוחה, הטמפרטורה בבית

היא 16 מעלות:

נחשב את ההגבר של המזגן:

**אילוץ:**

3 כ"ס  $\Delta\theta_1$

**תגובה:**

22.2 C  $\Delta\theta_0$

$$k = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{20.2}{3-0} = \frac{4.2}{3} = 1.4 \frac{c^\circ}{hp}$$

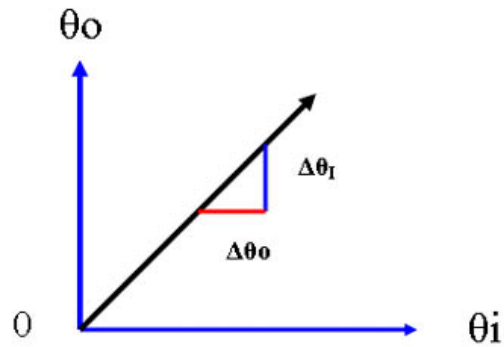
**גרף סטטי**

גרף סטטי הוא בעל שני צירים, כאשר הציר האופקי מייצג כניסה

למערכת, והציר האנכי מייצג מוצא (יציאה) של המערכת.

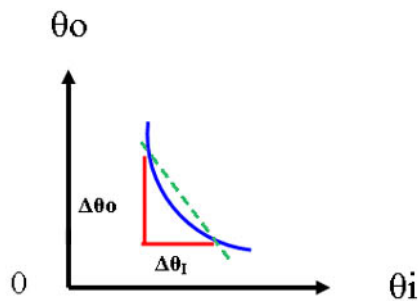
**מבחינים בשני סוגי גרף סטטי:**

• גרף סטטי ליניארי



גרף סטטי ליניארי, גרף חיובי הוא גרף עולה

• גרף סטטי לא-ליניארי



גרף סטטי לא-ליניארי, גרף שלילי יורד.

בגרף הסטטי הליניארי ההגבר מתקבל כשיפוע הקו בגרף לא-ליניארי יש לחשב את ההגבר בתחום העבודה, כלומר בתחום שעשויים להיות שינויים במערכת

לגרף הליניארי ההגבר הסטטי הוא קבוע ולגרף לא-ליניארי ההגבר

הסטטי הוא לא קבוע לכן מקובל לבצע יישור קו

**השוואה בין גרף ליניארי וגרף לא-ליניארי**

גרף סטטי לא-ליניארי	גרף סטטי ליניארי
יש לחשב את ההגבר בתחום העבודה	ההגבר מתקבל כשיפוע הקו
ההגבר הסטטי לא קבוע	ההגבר הסטטי קבוע

