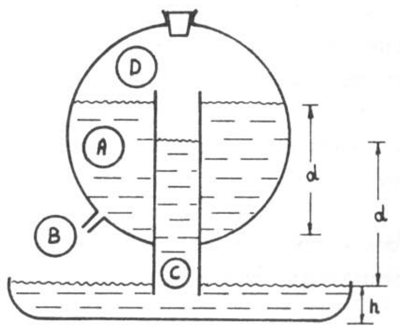
חלק א': מבוא לבקרה

פרק 1
מושגי יסוד בבקרה

1.1 רקע היסטורי

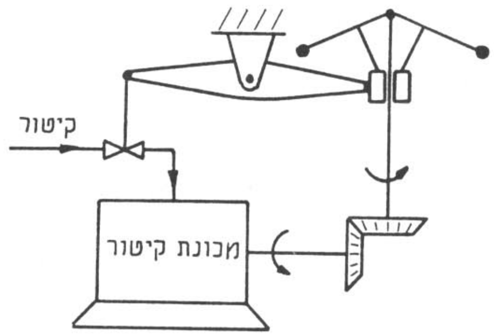
במאה השלישית לפני הספירה המציא פילון (Philon) מביזנט, מנגנון המווסת את מיפלס השמן בתוך מיכל של מנורת שמן. המצאה זו מהווה כנראה את הדוגמה הראשונה של מכשיר ויסות. המנגנון של פילון פשוט יחסית. ציור 1-1 מראה את המנגנון בלבד, ללא המנורה.

מטרת ההמצאה היא לשמור על מיפלס h קבוע במיכל התחתון, למרות שינויים בצריכה או בכמות השמן במאגר A . הצריכה נובעת מפתיל שהוכנס לתוך המיכל התחתון. בחלק התחתון של המאגר קיים צינור יציאה B, דרכו מטפטף השמן לתוך המיכל התחתון. צינור זה הוא צינור נימי, כלומר, הוא צינור דק מאד, ואויר אינו יכול לעלות דרכו לתוך המאגר. לעומת זאת, לצינור C קוטר גדול, וכאשר המיפלס h יורד מתחת לקצה התחתון של צינור זה, יכנס מעט אויר לתוך הצינור, ויעלה לאיזור D. באיזור זה שורר תת-לחץ מסויים. עליית הלחץ ב- D תגרום לטפטוף מוגבר של שמן דרך B , עד שהמיפלס h יעלה די כדי לסגור שוב את קצה צינור C. אם כן, הקצה התחתון של C קובע את המפלס h. שני המרחקים d שווים, ותלויים בהפרש בין הלחץ האטמוספרי והלחץ באזור D. מענין לציין כי המצאתו של פילון עדיין בשימוש, אחרי יותר מאלפיים שנה. מיפלס השמן בתנור נפט ביתי מווסת על-ידי עקרון כמעט זהה.



ציור 1-1: המנגנון של פילון לויסות מיפלס השמן

נעבור עתה לתקופה קרובה יותר לזמננו. בשנת 1788 השתמש וואט (Watt) , ממציא מכונת הקיטור, בכדורי תנופה כדי לווסת את מהירות המכונה, כמתואר בציור 1-2. הווסת מורכב משני כדורי תנופה המחוברים למכונה ומסתובבים במהירות יחסית למהירותה. כאשר מהירות זו גדלה, עולים הכדורים עקב הכוח הצנטריפוגלי. תנועה זו מועברת על-ידי חוליה מכנית לשסתום הקיטור, סוגרת אותו מעט ושוב מקטינה את מהירות המכונה. (למען האמת, וואט לא המציא וסת זה, אך שיפר אותו. הוא היה הראשון להשתמש בו כדי לווסת מכונות קיטור, ולכן נקרא הוסת על שמו.) מיותר לציין שמנועים וטורבינות מודרניים מווסתים על ידי וסתים מתוחכמים יותר, אך גם וסתים אלה מבוססים לעיתים קרובות על העקרון המתואר.



ציור 1-2 : וסת המהירות של וואט (Fly-ball Governor)

מהאמור לעיל עלול להיוצר הרושם כי תורת הבקרה או הויסות היא מדע עתיק, אך אין הדבר כך. עד למאה העשרים היתה הבקרה יותר אמנות ממדע. פילון, וואט, והרבה אחרים בנו מכשירים אשר הצליחו או נכשלו, אך מבלי להבין את הסיבות שגרמו להצלחות ולכשלונות. העיסוק בבקרה בגישה מדעית התחיל רק בשנות השלושים של המאה הנוכחית, ועיקר התיאוריה שעליה מבוססת תורת הבקרה פותחה מאז מלחמת העולם השניה.

כיום, קשה שלא לפגוש מערכות בקרה או ויסות בכל מקום, ולא רק בתעשיה. בבית למשל, קיים ויסות מיפלס המים ב"ניאגרה" שבנוחיות. במטבח, קיים מקרר עם וסת טמפרטורה (תרמוסטט), השומר על טמפרטורה כמעט קבועה במקרר. וסתים דומים נמצאים במגהץ החשמלי, במתקן להסקה המרכזית או במזגן האויר. במכונית, ניתן למצוא תרמוסטט מכני המווסת את טמפרטורת המים ברדיאטור.

אלה כמובן וסתים פשוטים מאד. בתעשיה מוצאים וסתים ובקרים מסובכים יותר, המבקרים בצורה מהירה ומדויקת טמפרטורה, לחץ, מיפלס נוזל, ספיקה, pH (חומציות), מהירות, מצב מכני, עובי, ומשתנים אחרים. סוג זה של בקרה נקרא **בקרת תהליכים** (Process Control). התעשיה הכימית היתה בין חלוצות השימוש והפיתוח של מערכות בקרה, אך היום מוצאים מערכות אלה גם בבתי זיקוק, תחנות כוח, תעשית מזון, תעשית מתכת, ובכל תעשיה מודרנית אחרת.

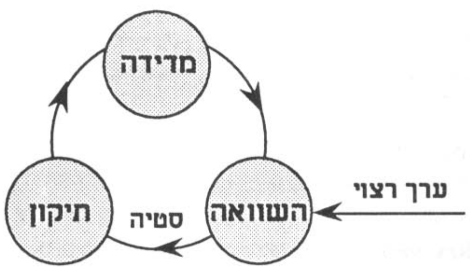
מערכות הבקרה המסובכות ביותר אינן מופיעות בתעשיה, אלא בכלי טייס (טייס אוטומטי), בכלי נשק (בקרת אש) ובטילים. כיבוש החלל היה בלתי אפשרי ללא מערכות בקרה מתוחכמות.

מהן למעשה מטרות הבקרה ? ברור כי הגורם הכלכלי חשוב מאד בתעשיה. הבקר יכול למלא מקומו של עובד או מספר עובדים, לפעול להגדלת התפוקה, לשפור טיב המוצר, וכתוצאה מכך לחסוך כסף ולהגדיל את הרווחים. אך הגורם הכלכלי אינו הגורם הבלעדי. בקר עובד בטוח יותר מאשר האדם. הבקר אינו מתעיף ואינו עושה שגיאות (אלא אם יצא מכלל שימוש). הבקר, בדרך כלל, זריז יותר מהאדם. לכן, שימוש במערכות בקרה משפר את הבטיחות במפעל במידה ניכרת. גורם זה חשוב במיוחד בתעשיות העובדות בציוד יקר מאד או בחומר מסוכן כמו תחנות כוח, תעשיה כימית, בתי זיקוק, כור גרעיני וכו'. אין היום בכלל אפשרות להפעיל מפעל כגון בתי זיקוק ללא מערכות בקרה.

1.2 מהו משוב (Feedback)?

נגדיר עתה מספר מונחי יסוד. המקצוע יקרא "בקרה אוטומטית" (Automatic Control) או בקיצור "בקרה". מהו ההבדל בין **ויסות** ו**בקרה** ? למעשה כמעט ואין הבדל. המונח "ויסות" מתייחס, בדרך כלל, למערכות פשוטות, בעוד "בקרה" מתייחסת למערכות מתוחכמות יותר. המונח "ויסות" רחב יותר וכולל גם מערכות ללא משוב, בעוד "בקרה" מציין, בדרך כלל, רק מערכות עם משוב. הגדרה זו מביאה אותנו לשאלה הבאה: מהו **משוב** (Feedback)?

כדי לבקר מערכת כלשהי אנו זקוקים לשלוש פעולות יסודיות, ראה ציור 1-3: **א.** עלינו למדוד את הגורם אותו נרצה לבקר. למשל, אם ברצוננו לבקר את הטמפרטורה במתקן כלשהו, נשתמש בתרמומטר המסוגל למדוד טמפרטורה זאת. **ב.** עלינו להשוות את המדידה לערך הרצוי (או המטרה). הערך הרצוי מייצג פקודה הנכנסת למערכת מבחוץ. **ג.** במידה וקיימת סטיה בין הערך הרצוי לבין המדידה, יש לבצע תיקון שיקרב את המשתנה המבוקר (הטמפרטורה, בדוגמה שלנו) לערך הרצוי.



ציור 1-3 : מערכת בעלת חוג סגור

מערכת, בה המדידה משפיעה על התיקון, והתיקון חוזר ומשפיע על המדידה (אחרת אינו ממלא את תפקידו), נקראת באנגלית **feedback system**. התרגום המילולי של מונח זה הוא מערכת בעלת היזון חוזר, אך בדרך כלל משתמשים במונח קצר יותר **משוב**. ניתן גם לאמר שזו מערכת בעלת **חוג סגור** או **closed-loop system** . אין למעשה הבדל בין שני מונחים אלה.

מבדילים בין שני סוגי מערכות עיקריים :

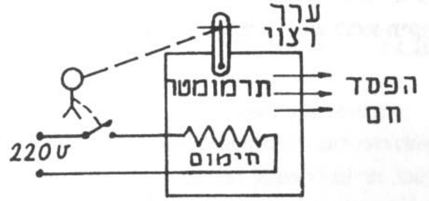
א. **מערכת ויסות** (**Regulating System** או **Regulator**). במערכת זו הערך הרצוי נשאר בדרך כלל קבוע, ומטרת הוסת היא לבטל את השפעתן של הפרעות חיצוניות אחרות, (עומס, אספקה, וכו'). למשל, הערך הרצוי של תרמוסטט במקרר נשאר בדרך כלל קבוע, אך התרמוסטט חייב להתגבר על השינויים בעומס, (שנוי בטמפרטורה החיצונית, או פתיחת הדלת). לכן, תרמוסטט זה הוא Regulator .

ב. **מערכת סרבו** או **עקיבה** (**Servomechanism , Servo-System**). תותח העוקב אחרי מטוס על ידי מערכת בקרה מייצג מערכת סרבו, היות והערך הרצוי (כיוון המטוס) משתנה כל הזמן. במערכת סרבו, הפרעות חיצוניות אחרות הן, בדרך כלל, בעלות חשיבות משנית. ההבדל בין שני סוגי המערכות אינו יסודי, ורוב התיאוריה שנלמד מתאימה לשניהם. השוני הוא רק בדרישות המעשיות, כפי שיפורט בפרק 7.

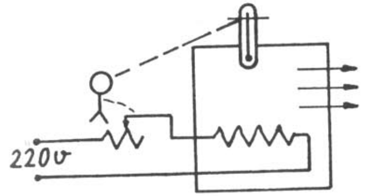
כאן יש להזכיר עוד מונח: **אוטומציה**. זהו מונח רחב מאד, המכסה שטחים שונים, ביניהם גם בקרת תהליכים. אוטומציה אינה משתמשת בהכרח במשוב, והרבה מערכות לאוטומציה פועלות בחוג פתוח. פרקים 12 עד 17 של ספר זה מוקדשים כולם למערכות המשמשות ל- **אוטומציה תעשייתית.**

1.3 דוגמאות של מערכות בקרה

ציור 1-4 מראה דוד מים עם אלמנט חשמלי לחימום המים. אדם המתבונן בתרמומטר משווה את המדידה לערך הרצוי, ובהתאם לתוצאות ההשוואה סוגר או פותח מפסק. כאן קיים חוג סגור עם משוב, והאדם הוא אחת מחוליות החוג. לכן, המערכת אינה מתארת בקרה אוטומטית, אלא **בקרה ידנית** (manual control). יתר על כן, לאדם זה יש רק שתי אפשרויות: הוא יכול לסגור את המפסק, או לפתוח אותו, ללא מצב ביניים. בקרה כזאת נקראת בקרת **on-off** , ובעברית, בקרה דו-מצבית, או בקרת גע-תוק, (מגע-ניתוק). טיב הבקרה כאן תלוי בתגובת האדם, ובפיגורים השונים במערכת. למשל, אם לתרמומטר תגובה אטית מאד, הבקרה אינה יכולה להיות מוצלחת. בקרת on-off גורמת ברוב המקרים למערכת בלתי יציבה, כלומר, המפסק נסגר ונפתח, והטמפרטורה המבוקרת אינה קבועה , אלא מתנדנדת סביב ערך ממוצע מסוים.



ציור 1-4: בקרה on-off ידנית



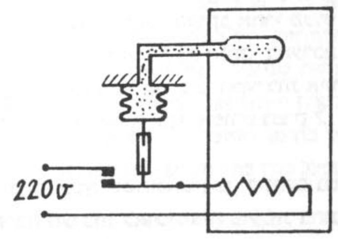
ציור 1-5: בקרה פרופורציונלית ידנית

כדי למנוע אי-יציבות זו, יש לעבור לבקרה פרופורציונלית, כמתואר בציור 1-5 . במקרה זה משתמשים בריאוסטט (נגד משתנה) במקום מפסק, והמערכת תגיע לשיווי משקל ברגע שהאדם ימצא את המצב הנכון של הזחלן, כלומר, כאשר האנרגיה החשמלית המסופקת לגוף החימום שווה בדיוק להפסדי חום.

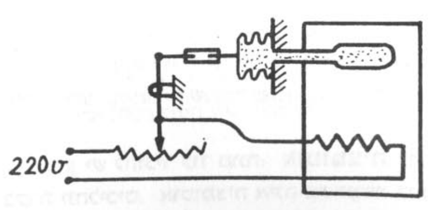
כדי להביא את שתי המערכות הקודמות לפעולה אוטומטית, יש למצוא מתקן אשר יחליף את האדם בתפקידו. ראשית, יש להחליף את התרמומטר לאחד אחר המסוגל להפעיל כוח מכני. לצורך זה, משתמשים לעיתים קרובות ב**תרמומטר לחץ** (pressure thermometer). זו מערכת סגורה הכוללת שלושה חלקים:

א) **גולה** (bulb) החשה את הטמפרטורה, ובתוכה מילוי כספית, גז אינרטי, או נוזל בעל לחץ אדים גבוה.

ב) **ציור נימי** (capillary) המעביר את הלחץ בגולה ל- ג) רכיב המסוגל למדוד לחץ, כגון **צינור בורדון** (Bourdon tube) , ספירלה, דיאפרגמה, או **מפוחית** (bellows). בדוגמאות שלפנינו (ציורים 1-6 ו- 1-7) משתמשים במפוחית. עליית הטמפרטורה גורמת לעליית הלחץ בגולה ולהתפשטות המפוחית. אם רוצים לקרוא את הטמפרטורה, יכולה תזוזת המפוחית להפעיל מחוג המסתובב ביחס לסקלה מתאימה. בדוגמאות האמורות אין קריאה, והמפוחית מחוברת ישר למפסק (ציור 1-6) או לריאוסטט (ציור 1-7). בשני המקרים יש לדאוג לאפשרות כיוונון אורך המוט היוצא מהמפוחית (למשל, בעזרת שרוול עם הברגה) כדי לאפשר שנוי הערך הרצוי.

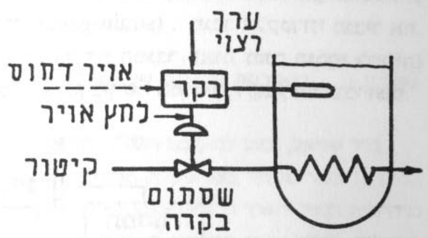


ציור 1-6: בקרה on-off אוטומטית

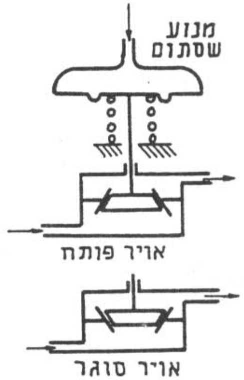


ציור 1-7: בקרה פרופורציונלית אוטומטית

הדוגמאות הנזכרות הן פשוטות מאד, אך אינן מעשיות. מטרתן רק להדגים שיטות שונות של בקרה. למפוחית אין, בדרך-כלל, מספיק כוח כדי להפעיל ריאוסטט או שסתום בצורה מדויקת. לכן, משתמשים לרוב בבקרים עם מקור חיצוני של אנרגיה, כמו חשמל או אויר דחוס. ציור 1-8 מראה מערכת אופינית לבקרת תהליכים, באמצעות בקר פנוימטי.



ציור 1-8: מערכת בקרה פנוימטית



ציור 1-9: שסתום בקרה פנוימטי

התהליך במקרה זה הוא מיכל עם נוזל. ברצוננו לחמם נוזל זה ולהחזיקו בטמפרטורה מסוימת קבועה (כלומר, בערך הרצוי). החימום נעשה על ידי קיטור העובר דרך נחשון החימום שבמיכל. הבקר משווה את המדידה מהתרמומטר לערך הרצוי, ובהתאם לסטיה הוא נותן אות של לחץ אויר לשסתום בקרה. שסתום זה הוא שסתום פנוימטי הנפתח או נסגר על ידי לחץ אויר. מצב השסתום יחסי ללחץ המגיע מהבקר. (ברור שלחץ זה אינו יכול להיות גבוה יותר מלחץ האספקה שמקבל הבקר ממקור האויר הדחוס.) בצורה כזו, שולט הבקר על כמות הקיטור המגיעה לתהליך, ועל-ידי כך גם על הטמפרטורה.

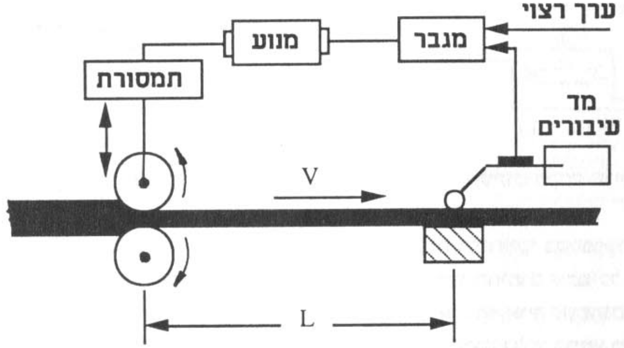
כיצד פועל שסתום פנוימטי? פעולתו פשוטה מאד, ומתוארת באופן סכמטי בציור 1-9. החלק העליון נקרא **מנוע שסתום** (valve motor) או ה**מפעיל** (actuator) , וכולל דיאפרגמה הפועלת כנגד קפיץ. הלחץ מהבקר פועל על הדיאפרגמה, ותפקיד המנוע לתרגם לחץ זה לתזוזה יחסית. הדיאפרגמה מחוברת בעזרת מוט לחלק הנע ביחס לתושבת, כדי לשנות את שטח המעבר הפתוח לזרימה. חלק זה נקרא **פקק השסתום** (valve plug) או **מגופה**. הזורם העובר דרך השסתום יכול להיות קיטור (בציור 1-8), מים, דלק או כל זורם אחר, בהתאם לצורך.

לשסתום בקרה פנוימטי שני סוגים: "אויר פותח" או "אויר סוגר". ההבדל ביניהם הוא בכיוון התושבת, כמתואר בציור 1-9. בחירת כיוון הפעולה נעשית, בדרך כלל, על-פי שיקולי בטיחות. כלומר, אם עקב קילקול כלשהו, לחץ האויר מפסיק להגיע לשסתום, רצוי שהשסתום יעבור אוטומטית למצב הבטוח יותר. למשל, בשסתום המעביר דלק לתנור, ברור שהמצב הסגור יהיה המצב הבטוח יותר, לכן היינו בוחרים במקרה זה בשסתום מהסוג "אויר פותח" (ברגיל סגור). מאידך, אם השסתום מביא מי קירור למנוע דיזל של אניה, המצב הפתוח יהיה הבטוח ביותר, ורצוי לבחור בשסתום מהסוג "אויר סוגר" (ברגיל פתוח).

ניתן להשיג שסתומי בקרה פנוימטיים בגדלים שונים, מחומרים ומבנים שונים, בהתאם לצורך. רובם פועלים באותו תחום לחצים סטנדרטי על הדיאפרגמה. תחום זה נקבע כ- 0.2-1.0 אטמ' = 3-15 psi , לפי הסכם בין היצרנים השונים. ז.א. ב- 3 psi (0.2 אטמ') יהיה השסתום סגור לגמרי, וב- 15 psi (1.0 אטמ') יהיה פתוח לגמרי (או להפך, בהתאם לכיוון הפעולה). גם הבקרים הפנוימטיים השונים בנויים להעברת אותו תחום לחצים, דבר המאפשר חיבור שסתום של יצרן אחד לבקר של יצרן שני. פרק 9 מוקדש כולו לשסתומי בקרה.

בשנים האחרונות קיימת נטיה לעבוד עם שסתומי בקרה פנוימטיים הפועלים בלחץ מוגבר, שתחום העבודה שלהם 0.4-2.0 אטמ' = 6-30 psi. הדבר מאפשר הקטנת קוטר הדיאפרגמה (ובזאת הוזלת השסתום) עבור אותו כוח הפעלה. כמובן, יש לבחור גם בבקר המפיק לחץ מוגבר באותו התחום. אולם כיום, רוב הבקרים בתעשייה הם אלקטרוניים, והדבר מחייב התקנת ממיר זרם ללחץ (i/P) בין הבקר לבין שסתום הבקרה (ראה קטע 11.4).

ציור 1-10 מראה מערכת בקרה אחרת. כאן יש לבקר עובי פס (פס מתכת, למשל) העובר בין שני גלילים (מכונת עירגול). העובי נמדד בעזרת גלגל המחובר למד-עיבורים (strain-gage). מגבר אלקטרוני מגביר את המתח הנמוך הבא ממד העיבורים, ומשווה אותו לערך הרצוי. פקודת המגבר (אות מתח היחסי לסטיה) מניעה מנוע חשמלי המכוון (דרך תמסורת גלגלי שיניים) את המרחק בין שני הגלילים, וקובע את עובי הפס.



ציור 1-10 : מערכת לבקרת עובי פס

דוגמה זו מדגימה תופעה חשובה בבקרה, והיא **זמן מת** (dead time). תקון עובי הפס אינו משפיע מיד על המדידה, היות והפס נע במהירות סופית v. אם נגדיר כ- L את המרחק בין מקום התיקון ומקום המדידה, אזי הזמן העובר בין שתי פעולות אלה הוא זמן מת ושווה ל-

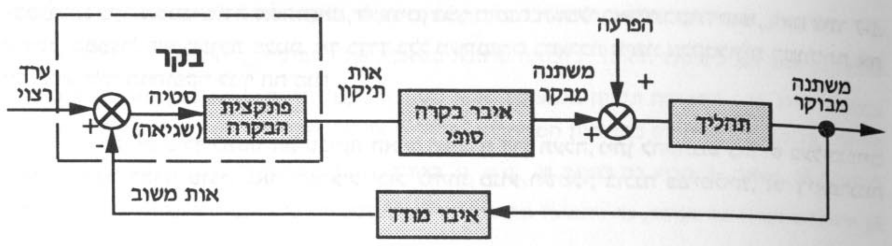
$$T_d = \frac{L}{v} \qquad (1\text{-}1)$$

לכן, זמן מת נקרא באנגלית גם distance-velocity lag או transportation lag. זמן מת מזיק מאד לטיב הבקרה, ולכן יש להקטין אותו עד כמה שאפשר. למשל, בדוגמה הנזכרת, יש למקם את מכשיר המדידה קרוב ככל האפשר למקום התיקון.

1.4 דיאגרמת מלבנים (דיאגרמת משבצות)

נהוג להשתמש ב**דיאגרמת מלבנים** (block diagram) כדי לתאר באופן סכמטי את הרכיבים השונים של המערכת ואת חיבורם. כל רכיב מתואר על ידי מלבן, בתוכו כתוב השם (או הפונקציה המתמטית) המתאר את הרכיב.

ציור 1-11 מראה דיאגרמת מלבנים של מערכת בקרה מקובלת. ננצל דיאגרמה זו כדי להגדיר את המונחים הנפוצים ביותר.



ציור 1-11: דיאגרמת מלבנים של מערכת בקרה

בצד שמאל, נכנס למערכת ה**ערך הרצוי** (או ה**מטרה**) כפקודה חיצונית. מעשית, נעשה הדבר בדרך כלל על ידי כפתור מיוחד בעל סקלה מכויילת הקיים בבקר, ומאפשר כיוונון מדויק של הערך הרצוי. (במערכות מודרניות רבות, הערך הרצוי מופיע כאות חשמלי הנשלח ע"י מחשב, (ראה "בקרת ערכים רצויים" בקטע 11.6.2). באנגלית, מוגדר הערך הרצוי כ- **set point** או כ- **reference** במקום התרגום המילולי - desired value.

העיגול בדיאגרמה מתאר אלמנט המסכם את שני האותות (סיגנלים) המתחברים אליו, כל אחד עם הסימן המתואר. במקרה שלנו, נכנס אות המשוב עם סימן שלילי, ולכן אלמנט הסיכום מחשב למעשה הפרש, ומבצע את פעולת ההשוואה. הפרש זה בין הערך הרצוי ואות המשוב (שלפעמים נקרא גם "הערך המצוי") נקרא **סטיה** (deviation) או **שגיאה** (error). כדאי לציין כי אלמנט ההשוואה הוא ,בדרך כלל, חלק אינטגרלי של ה**בקר**, אך בדיאגרמת המלבנים נוח יותר לצייר אותו כאלמנט נפרד.

מה**בקר** (controller או regulator), הנקרא לפעמים גם "וסת", יוצא אות התלוי בסטיה שהתקבלה ובפונקצית הבקרה. קיימות פונקציות בקרה רבות, בהן נדון בפרק הבא. האות ביציאת הבקר יכול להיות חשמלי, פנוימטי, הידראולי, או מכני, בהתאם לאופן פעולת הבקר. בדוגמה בציור 1-8, אות זה הוא פנוימטי. לעומת זאת, בציור 1-10 , הבקר הוא המגבר האלקטרוני, וביציאה מתקבל אות חשמלי (מתח).

הבקר מוציא **אות תיקון**, ובעזרתו מפעיל את **איבר הבקרה הסופי** (final control element). רכיב זה מופעל ע"י הבקר, והוא בעצם מקשר בין מערכת הבקרה לבין מקור אנרגיה או חומר. בהתאם לאות התיקון, מווסת איבר זה את כמות האנרגיה או החומר הנכנסים לתהליך.

ישנם סוגים שונים של איברי בקרה סופיים, אך הנפוץ ביותר בבקרת תהליכים תעשייתיים הוא שסתום בקרה, ראה ציורים 1-8 ו- 1-9. לפעמים מעדיפים להגדיר אלמנט נוסף: **אלמנט הפעלה** או **מפעיל** (actuator) , כלומר, האלמנט המקבל את אות התיקון, ומספק את הכוח או את האנרגיה להפעלת איבר הבקרה הסופי. לפיכך, המפעיל בציור 1-9 הוא מנוע השסתום, כלומר, הדיאפרגמה והקפיץ. במקרים מסוימים משתמשים במנוע חשמלי עם תמסורת גלגלי שיניים (ראה ציור 1-10) במקום מנוע שסתום פנוימטי, אך מפעיל חשמלי כזה יקר בהרבה (עד פי עשרה) מאשר מפעיל פנוימטי. בנוסף למחירו הגבוה, הוא גם איטי יותר (עקב האינרציה הגדולה), והוא מפתח הרבה פחות כוח מאשר מפעיל פנוימטי בעל גודל דומה.

חסרונם הגדול של שסתומי בקרה הוא בזה, שהם גורמים למפל לחץ ניכר. כדי להשיג בקרה תקינה, מפל הלחץ על פני השסתום צריך להיות בסדר גודל של 30% עד 50% ממפל הלחץ הכולל של המערכת. (הסבר לכך נמצא בפרק 9.) כדי למנוע הפסד לחץ זה, ניתן להשתמש במשאבה כאיבר בקרה סופי, ואילו המפעיל יהיה מנוע חשמלי בעל ויסות מהירות אלקטרוני (variable-speed drive). גם כאן, הדבר כרוך בעלות גבוהה בהרבה מזו עבור שסתום בקרה בעל מפעיל פנוימטי.

במערכות בקרת טמפרטורה משתמשים, לעיתים, בגוף חימום חשמלי כאיבר בקרה סופי, ראה ציור 1-7. באותו ציור, המפעיל הוא מערכת מכנית, אך בדרך כלל משתמשים במערכת מיתוג אלקטרונית המווסתת את האנרגיה החשמלית המסופקת לגוף החימום.

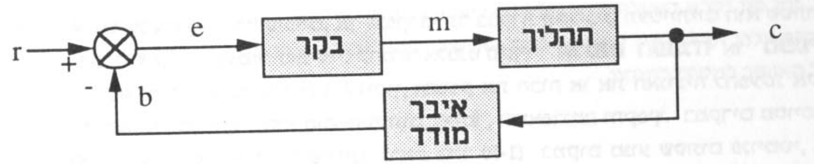
במערכות בהן יש צורך לווסת את ספיקת האויר העוברת דרך תעלה, ניתן להשתמש בתריס בעל כנפיים מסתובבות כאיבר בקרה סופי. כאן, המפעיל יכול להיות מנוע חשמלי, בוכנה פנוימטית, או דיאפרגמה פנוימטית.

האות היוצא מאיבר הבקרה הסופי נקרא לפעמים ה**משתנה המבוקר** (**manipulated variable**). בציור 1-8, אות זה הוא ספיקת הקיטור, ובציור 1-10 הוא המרחק בין הגלילים.

המלבן הבא מראה את ה**תהליך** (**process** או **plant**). התהליך כולל את המתקן שבו עלינו לבקר משתנה מסוים. בציור 1-8 זהו המיכל, ובציור 1-10 כל מכונת העירגול. ה**הפרעה** (**disturbance**) נכנסת למערכת לפני התהליך (או לתוכו), והיא נובעת משינויים ב**עומס** (**load**) או ב**אספקה** (**supply**). כל גורם חיצוני שאין עליו שליטה ואשר משפיע על המשתנה המבוקר מוגדר כאן כ**הפרעה**.

המלבן האחרון מראה את ה**איבר המודד** (**measuring element**). בדוגמאות שנזכרו האיבר המודד הוא התרמומטר או מד העיבורים בהתאמה. האיבר המודד מודד את ה**משתנה המבוקר** או **משתנה התהליך** (**controlled variable**), הנקרא גם **process variable** או **measured variable**). בציור 1-8, משתנה זה הוא הטמפרטורה, ובציור 1-10 עובי הפס. תוצאת המדידה נותנת את **אות המשוב** (**feedback signal**), ואות זה עובר חזרה לבקר כדי להשלים את החוג הסגור, או במילים אחרות, כדי לספק משוב למערכת.

לפעמים נוח יותר להשתמש בדיאגרמה מקוצרת, כמו בציור 1-12. איבר הבקרה הסופי מצורף כאן לתהליך (או לבקר, במידה והדבר נוח יותר). ציור 1-12 מראה גם את האותיות המקובלות בבקרת תהליכים לסימון המשתנים העיקריים. האות **r** מייצגת את הערך הרצוי (**r**eference), **e** את הסטיה (**e**rror), **m** את יציאת הבקר (אות התיקון), **c** את המשתנה המבוקר (**c**ontrolled variable), ו-**b** את אות המשוב. הסטיה **e** תהיה $e = r - b$. במקרים רבים, מקצרים את דיאגרמת המלבנים עוד יותר, על-ידי צירוף האיבר המודד לתהליך. הדיאגרמה תכלול אז רק שני מלבנים: "בקר" ו"תהליך", ואות המשוב יהיה c במקום b, ולכן $e = r - c$.



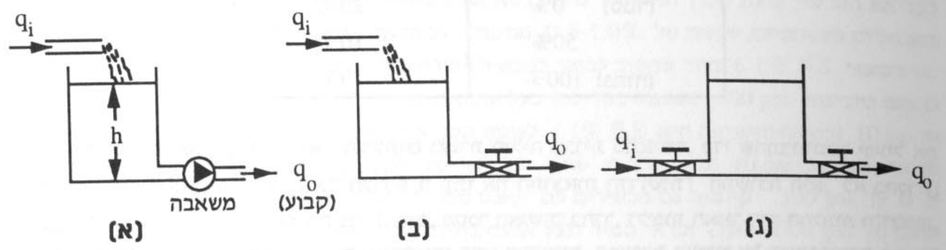
ציור 1-12: דיאגרמת מלבנים מקוצרת

בסיום קטע זה, כדאי להדגיש נקודה חשובה: דיאגרמת המלבנים אינה מראה זרימת חומר או זרימת אנרגיה, אלא: זרימת אינפורמציה.

1.5 ויסות עצמי

בקטע זה, נדון על תכונתם של תהליכים הנקראת **ויסות עצמי** (**self-regulation**), ומוגדרת כיכולתו של תהליך להגיע לשיווי משקל ללא עזרת בקר או וסת.

לדוגמה, ניקח את שלושת התהליכים המתוארים בציור 1-13. בתהליך (א), הספיקה q_i זורמת לתוך מיכל, כשעומד הנוזל בתוכו הוא h. ביציאה שואבת משאבה את הספיקה q_o החוצה. המשאבה אינה משאבה צנטריפוגלית (בה הספיקה תלויה בלחצים) אלא משאבה בעלת הדחק קבוע, כגון משאבת בוכנה, היוצרת ספיקה קבועה (התלויה רק במהירות המשאבה). במילים אחרות, הספיקה q_o אינה פונקציה של העומד h. בתהליך זה, ישאר h קבוע רק בתנאי ש- $q_i = q_o$ בדיוק. ההפרש הקטן ביותר בין q_i ו- q_o יגרום לעליה או ירידה מתמדת של העומד, עד שהמיכל מתרוקן, או הנוזל גולש החוצה. לכן, זהו תהליך ללא כל ויסות עצמי.



ציור 1-13: תהליך (א): ללא ויסות עצמי, (ב) ו- (ג): עם ויסות עצמי

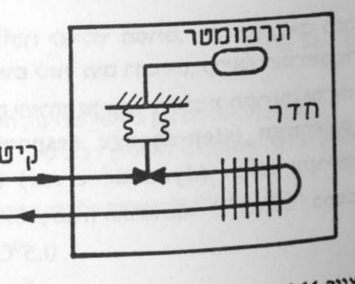
בתהליך (ב) החלפנו את המשאבה בברז הפתוח חלקית. כאן כן תלוי q_o בעומד, והוא יחסי ל- $\sqrt{h}$. אם נגדיל את q_i, העומד h יעלה במידה מסוימת, עד שהספיקה q_o ביציאה שווה ל- q_i החדש, ובמצב זה ישאר התהליך בשיווי משקל. כלומר, זה תהליך עם ויסות עצמי. (ויסות עצמי כמובן אינו מבטיח ש- h ישאר תמיד בערך רצוי מסוים, אלא רק ש- h יגיע למצב שיווי משקל חדש, ללא עזרת וסת.)

בתהליך (ג) קיים ויסות עצמי מוגבר, היות וגם הספיקה q_i תלויה ב- h. עליית h תגרום להגדלת q_o ולהפחתת q_i. (למעשה, q_i תלוי בהפרש הלחצים, אך נניח שאנו מחזיקים את לחץ המים בכניסה קבוע.)

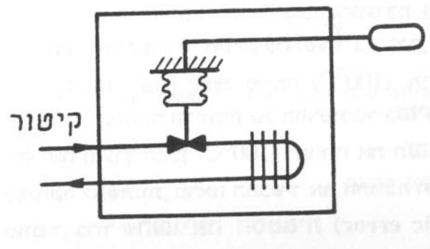
לויסות עצמי חשיבות רבה. במידה ותכונה זו קיימת בתהליך מסוים, תפקיד הבקר לרוב יהיה קל יותר. נחזור לנושא זה עוד בפרקים הבאים.

1.6 ויסות בחוג פתוח

ציור 1-14 מראה מערכת בקרת טמפרטורה להסקת חדר. תרמומטר לחץ מודד את הטמפרטורה בחדר, ובהתאם לכך, שסתום הבקרה מגדיל או מקטין את ספיקת הקיטור לתוך הרדיאטור. מערכת זו עובדת בחוג סגור כמובן, היות ותיקון בכמות הקיטור ישפיע חזרה על טמפרטורת החדר הנמדדת.



ציור 1-14: בקרת טמפרטורה בחוג סגור



ציור 1-15: ויסות טמפרטורה בחוג פתוח

המערכת בציור 1-15 זהה לקודמת, פרט לעובדה שכאן התרמומטר מודד את הטמפרטורה בחוץ, ולא בתוך החדר. במבט ראשון, הדבר די הגיוני, היות ואם קר יותר בחוץ, נצטרך יותר קיטור כדי לשמור על אותה הטמפרטורה הרצויה בתוך החדר. כדי שמערכת זו תעבוד כמצופה, יש לבצע את הבדיקה הבאה: נניח שהטמפרטורה הרצויה בתוך החדר היא 20^oC . במשך מספר ימים, נמדוד את הטמפרטורה החיצונית, וכן את המצב הדרוש של השסתום כדי לקבל 20^oC בתוך החדר. נאמר שהתקבלו התוצאות הבאות:

טמפרטורה חיצונית	מצב הדרוש בשסתום
20^oC	(סגור) 0%
10^oC	50%
0^oC	(פתוח) 100%

נניח שנחבר את המפוחית ואת השסתום בעזרת חוליה מכנית מתאימה, כדי שהתרמומטר יפעיל את השסתום בהתאם לטבלה הנ"ל. האם מערכת זו תתן את התוצאות הדרושות? התשובה היא: **לא בהכרח!** כל עוד התנאים השונים (כגון - רוח חיצונית, גשם, מספר האנשים בחדר, דליפות האויר דרך החלונות והדלתות, טמפרטורת הקיטור, וכו') זהים לתנאים שהתקיימו בזמן הבדיקות, המערכת תשמור על הטמפרטורה הרצויה של 20^oC . ברגע ואחד מתנאים אלה משתנה, התוצאות בטבלה כבר אינן מתאימות, ולא נקבל את הטמפרטורה הרצויה בחדר. הסיבה לכך היא שבמערכת זו אין משוב. הטמפרטורה בחוץ אמנם משפיעה על התיקון, אך התיקון אינו משפיע חזרה על הטמפרטורה בחוץ. לכן, המערכת אינה מגיבה להפרעות, פרט לשינויים בטמפרטורה החיצונית. אם כך, מה התועלת בויסות בחוג פתוח? בדוגמה הנ"ל אין למעשה שום תועלת, אבל, לפעמים מערכת בחוג פתוח יכולה להיות יותר פשוטה וזולה, היות ואין צורך באלמנט ההשוואה. במידה והדרישות לגבי הדיוק אינן גדולות, המערכת בחוג פתוח עשויה לספק אותן.

במערכות מסובכות, משתמשים לפעמים בצירוף של בקרה בחוג סגור וויסות בחוג פתוח. שיטה זו נקראת באנגלית **feedforward** (הזון קדימה), ונדון בה בפרק 8 .

1.7 תגובה סטטית ותגובה דינמית

כשמדובר בתגובה של מכשיר מדידה מסוים, של בקר, של תהליך, או אפילו של מערכת בקרה שלמה, יש להבדיל בין **תגובה סטטית** (static response) ו**תגובה דינמית** (dynamic response).

התגובה הסטטית היא תגובת המערכת במצב של שיווי משקל. מצב זה נקרא גם בשם **מצב מתמיד** (steady state). תיאורטית, מגיעים למצב המתמיד רק בזמן $t = \infty$, אך מעשית מוגדר מצב מתמיד כמצב בו לא רואים או מרגישים יותר שינויים (מתחת לסף מסוים).

התגובה הדינמית היא תגובת המערכת (כפונקציה של הזמן) לאילוץ מסוים. לדוגמה, אם נקח תרמומטר שהיה בשיווי משקל עם האויר בסביבה, ונכניס אותו פתאום לתוך מים רותחים, קריאת התרמומטר תתחיל לעלות, ותגיע למצב מתמיד (100^oC) אחרי זמן מה (כמה עשרות שניות). השתנות הקריאה עד אז מהווה את התגובה הדינמית של התרמומטר ל**שינוי מדרגה** (step-change response), וההפרש בין הקריאה והערך הנכון (100^oC) מהווה את ה**שגיאה הדינמית** (dynamic error). כאשר הקריאה מפסיקה להשתנות, מראה המכשיר את התגובה הסטטית. אם, לדוגמה, מורה התרמומטר 100.5^oC במצב מתמיד, ברור ש**השגיאה הסטטית** (static error) שווה ל- 0.5^oC .

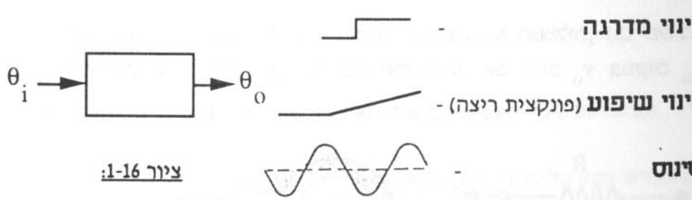
התגובה הדינמית של האלמנטים השונים ושל המערכת כולה היא בעלת חשיבות ראשונית בתורת הבקרה. למשל, דיוקו הסטטי של התרמומטר אינו עוזר לנו אם התגובה הדינמית איטית מדי, כי הבקר אינו יכול לבצע תיקון מהיר אם המידע שהוא מקבל מהתרמומטר מגיע באיחור רב. פרק 5 מוקדש כולו לנושא של התגובה הדינמית, שהוא אולי הנושא החשוב ביותר בתורת הבקרה. מטרתנו כאן רק לתת מבוא קצר לנושא.

שני גורמים משפיעים על התגובה הסטטית: (א) **דיוק** (accuracy), (ב) **כושר הבחנה (רזולוציה)** או **תחום מת** (dead zone). הדיוק הסטטי נקבע על ידי השגיאה הסטטית, המוגדרת כקריאת המכשיר פחות הערך האמיתי. נהוג לבטא את השגיאה באחוזים של תחום המדידה של המכשיר. במכשירים תעשייתיים, שגיאה של 0.5-1.0% מתקבלת על הדעת. (באנגלית, רושמים 1% of Full Scale או בקיצור 1% F.S.). ברור שחשוב לבחור במכשיר מדידה בעל התחום המתאים. למשל, אם נרצה למדוד לחצים בסביבות 800 psi, נשתמש במד-לחץ בעל תחום מ- 0 עד 1000 psi. מכשיר זה עלול לתת שגיאה עד 10 psi (במידה והשגיאה היא 1% F.S). לעומת זאת, אם ננסה למדוד לחץ של 80 psi באותו מכשיר, שגיאה דומה של 10 psi תהיה יותר מ- 10% של הקריאה. לכן, כדאי לעבור כאן למכשיר אחר, בעל תחום מ- 0 עד 100 psi. קיימים גם מכשירים עם "אפס מבוטל" (suppressed zero) , לדוגמה, מכשיר עם תחום מ- 900-1000 psi, וכדאי תמיד לנצל אותם במידה והדבר אפשרי, כדי שהשגיאה המוחלטת תהיה קטנה יותר.

הגורם השני המשפיע על התגובה הסטטית הוא כושר ההבחנה (רזולוציה), או תחום מת. כושר ההבחנה מוגדר כשינוי הקטן ביותר במשתנה הנמדד אשר יגרום לתגובת המכשיר. נהוג לבטא גם את כושר ההבחנה באחוזים של תחום המדידה, והוא נקבע על ידי גורמים כגון חיכוך, חופש מכני, היסטרזיס (hysteresis) בתוך החומר, ועוד. לדוגמה, אם נמיר מתח מסוים לאות בינרי בעל 8 סיביות בעזרת ממיר A/D (ראה סעיף 11.6), אזי הרזולוציה תהיה מוגבלת ל- $1 / 2^8 = 1 / 256 = 0.4\%$.

ברור שלא ניתן להשיג דיוק סטטי טוב כאשר כושר ההבחנה גרוע. לעומת זאת, כושר הבחנה טוב אינו מבטיח עדיין דיוק סטטי טוב. (יש לציין שכושר ההבחנה נקרא לפעמים גם בשם "רגישות", אך שימוש זה אינו רצוי, כי המונח "רגישות" משמש בדרך כלל כ"הגבר סטטי" (ראה קטע 4.1), וגם ב"ניתוח רגישות" (ראה קטע 4.6)).

נעבור עתה לתגובה דינמית. בציור 1-16 מתואר מכשיר או מערכת מסוימת כמלבן. **אות הכניסה** (input) (נקרא גם ה**קֶלֶט** או **אות מבוא**) מסומן ב- θ_i ו**אות היציאה** (output) (נקרא גם ה**פֶּלֶט** או **אות מוצא**) מסומן ב- θ_o. כדי לבדוק את התגובה הדינמית, יש להכניס שינוי מסוים ב- θ_i, ולרשום את התגובה המתקבלת ב- θ_o. נהוג להשתמש באחד משלושת השינויים הבאים:



א) **שינוי מדרגה** -

ב) **שינוי שיפוע** (פונקצית ריצה) -

ג) **גל סינוס** -

ציור 1-16:

נתרכז בינתיים רק בשינוי מדרגה, היות ושינוי שיפוע פחות שימושי, וגל סינוס משמש לחקירת **תגובת התדירות**, שתהיה נושא עיקרי בפרק 7.

מערכות רבות מתוארות על ידי המשוואה הדיפרנציאלית הבאה:

$$\tau\frac{d\theta_o}{dt}+\theta_o = \theta_i \qquad (1-2)$$

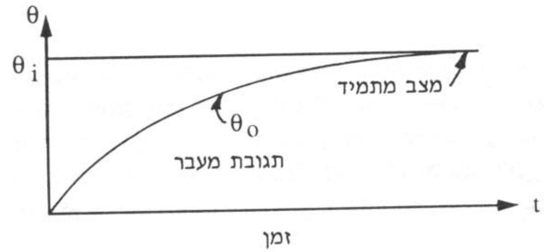
כאן, τ קבוע, θ_o אות היציאה ו- θ_i אות הכניסה, לפי ציור 1-16 . מערכת כזו נקראת מערכת מסדר ראשון, או **פיגור מסדר ראשון** (first-order lag). נבחר בשינוי מדרגה כפונקציה מאלצת ל- θ_i. **מדרגת יחידה** (unit step) מוגדרת מתמטית כך:

$$\theta_i = 0 \quad , \quad t < 0 \qquad \text{עבור}$$
$$\theta_i = 1 \quad , \quad t \geq 0$$

פתרון המשוואה לאילוץ זה הוא :

$$\theta_o = 1 - e^{-t/\tau} \qquad (1\text{-}3)$$

ותגובה אקספוננציאלית זו מתוארת בציור 1-17. כמסומן בציור, התגובה הדינמית עד קבלת מצב מתמיד, נקראת **תגובת מעבר** (transient response). כלומר, התגובה כולה מחולקת לתגובת מעבר ולמצב מתמיד.



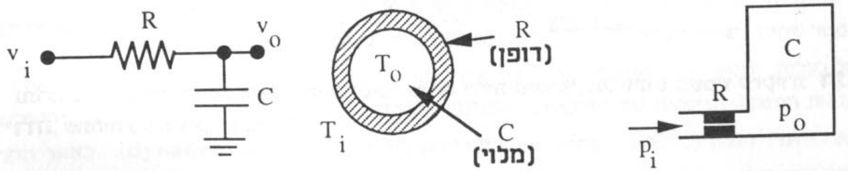
<u>ציור 1-17</u>: תגובה של פיגור מסדר ראשון לשינוי מדרגה

הקבוע τ במערכת המתוארת נקרא **קבוע הזמן** (time constant), ומאפיין את גודל הפיגור. היות ועבור $t = \tau$,

$$\theta_o = 1 - e^{-1} = 0.632$$

קבוע הזמן τ הוא הזמן הדרוש עד ש- θ_o יגיע ל- 63.2% מהערך הסופי. עובדה זו מאפשרת מדידת τ באופן נסיוני (ראה ציור 5-2).

ציור 1-18 מראה שלוש דוגמאות של פיגורים מסדר ראשון: (א) מערכת חשמלית, (ב) מערכת תרמית, ו- (ג) מערכת פנוימטית. המשוואה של מערכת (א) זהה למשוואה (1-2), אם נציב v_o במקום θ_o ו- v_i במקום θ_i. קבוע הזמן כאן שווה ל- $\tau = RC$. (נפתח משוואה זו בפרק 5).



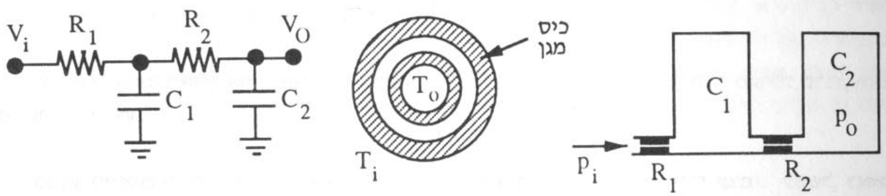
(א) (ב) (ג)

<u>ציור 1-18</u> פיגורים מסדר ראשון

פיגור מסדר ראשון בדרך כלל נובע מצירוף של התנגדות עם קיבול. למשל, המערכת (ב) בציור 1-18 מתארת חתך של גולה בתרמומטר לחץ. דופן הגולה מהווה התנגדות למעבר חום, והמלוי בתוך הגולה מהווה קיבול תרמי. הטמפרטורה T_i במקרה זה מקבילה ל- θ_i, ו- T_o ל- θ_o .

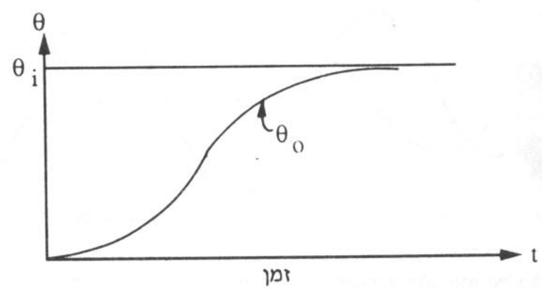
במערכת (ג) זורם אויר דחוס בלחץ p_i דרך הצרה (כמו סגר או ברז) המשמשת כהתנגדות פנוימטית, וממלא מיכל בלחץ p_o. המיכל מהווה קיבול פנוימטי (ראה קטע 5.5). גם כאן קיים צירוף של התנגדות וקיבול, ולכן - פיגור מסדר ראשון.

שני פיגורים מסדר ראשון המחוברים בטור מהווים **פיגור מסדר שני** (second-order lag). דוגמאות לכך מתוארות בציור 1-19. המערכת (ב) מתארת גולה של תרמומטר המוכנס בתוך כיס מגן. התגובה של פיגור מסדר שני לשינוי מדרגה מתוארת בציור 1-20 . תכונה חשובה לתגובה זו היא שבזמן $t = 0$, הנגזרת $d\theta_o/dt = 0$, (הדבר אין כך עבור פיגור מסדר ראשון - ראה ציור 1-17). עקום בעל צורה כזו נקרא עקום - S (בשל הדמיון לאות S). נזכיר עובדה זו שוב בפרק הבא.



(א) (ב) (ג)

<u>ציור 1-19</u>: פיגורים מסדר שני



<u>ציור 1-20</u>: תגובה של פיגור מסדר שני לשינוי מדרגה.

דיון מפורט יותר של כל הנושא נמצא בפרק 5.

1.8 משוב במערכות לא-טכנולוגיות

המשוב משפיע בתחומים רבים לא טכנולוגיים - בטבע, בפעולותיו השונות של האדם, בכלכלה ועוד. נזכיר כאן כמה דוגמאות, כדי להדגיש שתופעת המשוב היא בעלת חשיבות ראשונית ולאו דווקא רק בתורת הבקרה.

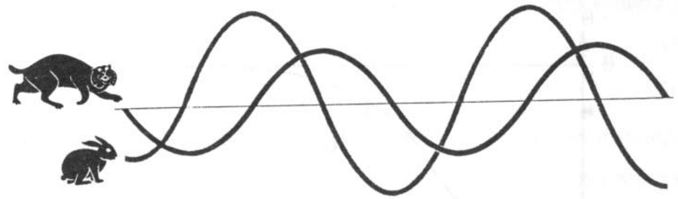
נתבונן על אחת המערכות המסובכות ביותר בעולם: גוף האדם. הגוף כולל מערכות בקרה רבות העובדות בעזרת משוב כדי לבקר טמפרטורה, קצב פעימות הלב, לחץ הדם, ריכוז של חומרים שונים בתוך הדם כמו מלח, סוכר, הורמונים וחמרים אחרים. סטיה יחסית קטנה של אחד מהמשתנים הללו (למשל, סטיית הטמפרטורה מהערך הנורמלי של $37^{o}C$), מצביעה בדרך כלל על מחלה. חלק ממערכות בקרה אלה מאד מסובכות, וחלק מהן בלתי מובנות עד היום (אחרת היה קל יותר לרפא מחלות כמו לחץ דם גבוה).

כמעט כל תהליך למידה מבוצע בעזרת משוב. כיצד לומד תינוק לדבר? בהתחלה, הוא מוציא כל מיני רעשים. בגיל שנה בערך, הוא מתחיל להשוות את דיבורו לדיבורם של המבוגרים. הוא מרגיש "סטיה", ולאט לאט מתחיל לתקן את עצמו, עד שבגיל ארבע או חמש דיבורו פחות או יותר תקין. חשיבותו של משוב בתהליך לימוד זה ברורה. הדבר מסביר גם מדוע ילד חרש ישאר בדרך כלל אילם, אלא אם יקבל חינוך מיוחד. לילד חרש, חסר "איבר המודד", ולכן אין לו משוב.

ננתח עתה פעולה פשוטה מאד, כמו הרמת עפרון מהשולחן. המוח נותן פקודה ליד להרים עפרון, אך פעולה פשוטה כזו לא תסתיים בהצלחה ללא עזרת משוב. כאשר היד מתקרבת לעפרון, העיניים בודקות את כיוון היד, והמוח משווה את הכיוון לכיוון הרצוי. אם קיימת סטיה, המוח שולח פקודת תיקון ליד, וכך מסוגלת היד להגיע ישר לעפרון בפעם הראשונה ללא צורך בנסיונות.

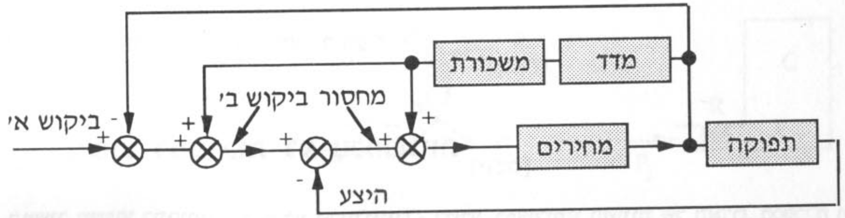
לפעמים מספק האדם את המשוב למערכת אחרת. לדוגמה, נהג ומכוניתו מהווים מערכת סרבו, והנהג עצמו סוגר את החוג.

בטבע קיימים תהליכים רבים ללא בקר (כאלמנט מוגדר נפרד) אך עם ויסות עצמי. למשל, באיזור מסוים בקנדה מצאו שמספר הארנבות ומספר חתולי-הבר משתנים באופן מחזורי, כמתואר בציור 1-21. הדבר מובן ברגע שידוע כי הארנבות הן המזון העיקרי של חתולי-הבר. השפעת המשוב ברורה: עליה במספר הארנבות גורמת לעליה במספר החתולים, דבר שגורם שוב לירידה במספר הארנבות. שים לב שהמקסימום בשני הגלים מופיע בפיגור פזה (או הזזת מופע) מסויים.



ציור 1-21: חתולי-הבר אוכלים ארנבות

נפנה לתחום הכלכלה. דיאגרמת המלבנים בציור 1-22 מתארת חלק קטן של כלכלת ארצנו, במיוחד את החוק של הצע וביקוש. למען ההסבר, נתייחס למוצר מסוים, למשל למקררים.



ציור 1-22: החוק של הצע וביקוש

נגדיר את ההפרש בין הביקוש למוצר זה וההצע כמחסור. (עודף מוגדר כמחסור שלילי.) מחסור גורם, בדרך כלל, להעלאת המחירים. עליית המחירים גורמת לעליית קצב הייצור. לייצרנים כדאי להשקיע כסף כדי לרכוש מכונות ייצור נוספות, ויתכן אפילו שייצרנים חדשים יכנסו לשוק. ייצור נוסף זה מגדיל את ההצע, ובצורה כזו מקטין את המחסור. כאן קיים משוב אשר גורם לאיזון טבעי בין ההצע והביקוש.

עד כה הדבר פשוט יחסית, אך בארצנו קיימת הצמדה בין המשכורות ומדד המחירים. עליית המחירים גורמת לעליית המדד ועליית המשכורות, וזו גורמת, לבסוף, לעליה נוספת במחירים. גם כאן קיים משוב, אך משוב זה אינו גורם לאיזון טבעי. להיפך, משוב זה יגרום לעליה מתמדת של מחירים ומשכורות. משוב כזה נקרא **משוב חיובי** (positive feedback) בניגוד ל**משוב שלילי** (negative feedback), והוא מסומן בדיאגרמה על ידי שני סימני פלוס על-יד העיגול. משוב חיובי נוטה לגרום לאי-יציבות (במקרה זה, לאינפלציה), ולכן הוא בלתי-רצוי. לעיתים רחוקות משתמשים במשוב חיובי במערכות טכניות למטרות מיוחדות (לדוגמה, במתנדים אלקטרוניים), אבל בדרך כלל יש להמנע ממנו.

המצב האמיתי כמובן הרבה יותר מסובך מאשר בתמונה הפשוטה המתוארת, ויש לקחת בחשבון גורמים נוספים רבים. למשל, הביקוש הסופי מושפע על ידי מספר גורמים שונים. אם נגדיר את הביקוש היסודי כביקוש א' (כלומר, זהו מספר המשפחות שאולי תרצנה לקנות מקרר חדש), אזי עליית המחירים תוריד מביקוש זה, על ידי משוב שלילי. לעומת זאת, עליית המשכורות תגדיל את הביקוש, וזאת דוגמה נוספת של משוב חיובי. אפשר בוודאי להוסיף שיכלולים נוספים לדיאגרמה, אך מטרת הדיאגרמה אינה לגרום לוויכוח כלכלי או פוליטי, אלא להדגים את ההבדל העקרוני בין משוב שלילי ומשוב חיובי.

1.9 קבלת משוב שלילי במערכות בקרה

נתייחס לדיאגרמת המלבנים בציור 1-11. לכל אחד מהרכיבים שבציור יכול להיות אופיין בעל שיפוע חיובי או שלילי. לדוגמה, אם איבר הבקרה הסופי הוא שסתום מהסוג "אויר פותח", אזי עליית הלחץ הנשלח מהבקר תגרום לעליית המשתנה המבקר (כלומר, הספיקה העוברת דרך השסתום). במקרה זה, יהיה לאופיין השסתום שיפוע חיובי. (לא נתייחס כאן לשאלה האם האופיין יהיה קו ישר או עקום מסוים, אלא רק לכיוון השיפוע.) אם, לעומת זאת, השסתום הוא מהסוג "אויר סוגר", אזי עליית הלחץ הפועל על הדיאפרגמה יגרום להפחתת הספיקה, ולאופיין השסתום יהיה שיפוע שלילי, כלומר, השסתום "הופך את הסימן".

כדוגמה שניה, אם שסתום הבקרה מוזים דלק לתוך תנור (התהליך), עליה בכמות הדלק תגרום לעלית הטמפרטורה בתנור, ולתהליך זה יהיה אופיין בעל שיפוע חיובי. לעומת זאת, אם המשתנה המבקר הוא ספיקת מי-קירור לתוך מנוע דיזל גדול, אזי הגדלת הספיקה תגרום לירידת הטמפרטורה, ותהליך זה "הופך את הסימן".

נשאלת השאלה האם "הפיכת הסימן" בתוך החוג הסגור אינה הופכת משוב שלילי למשוב חיובי? נבדוק את השאלה בעזרת שתי דוגמאות: **דוגמה א':** נניח שהשסתום הוא מהסוג "אויר פותח", אך התהליך מקבל מי-קירור ולכן הופך את הסימן. הגדלת הסטיה תגרום לפתיחת השסתום, ולהגברת הספיקה של מי-קירור, ולכן לירידת הטמפרטורה בתהליך (c, כלומר, המשתנה המבוקר), ולירידה באות המשוב b. היות והסטיה מוגדרת לפי $e = r - b$, ירידה ב- b תגרום לעליה נוספת ב- e, וחוזר חלילה. במקום שהסטיה תתייצב, היא תמשיך לעלות, וקל לראות שיש לנו מערכת בעלת משוב חיובי. **דוגמה ב':** אם נחליף עתה את השסתום לסוג "אויר סוגר", גם הוא יהפוך את הסימן. כעת, עליה ב- e תגרום לסגירת השסתום, להפחתת הספיקה של מי-הקירור, לעלית הטמפרטורה c, ובסוף לירידה מסוימת בסטיה e. לכן, מערכת זו פועלת במשוב שלילי.

כיצד ניתן לבדוק האם יש לנו משוב שלילי או חיובי ? ובכן, הדבר פשוט מאד: על-מנת להשיג משוב שלילי, מספר הרכיבים בחוג הסגור ההופכים את הסימן חייב להיות מספר אי-זוגי. (לצורך החישוב, גם אלמנט הסיכום הנותן את ההפרש $e = r - b$ הופך את הסימן, ולכן נכלל בספירה.) לפי חשבון זה, מספר הפיכות הסימן בדוגמה א' הנ"ל הוא 2, ולכן המשוב הוא חיובי. לעומת זאת, עבור דוגמה ב', המספר הוא 3, ולכן המשוב הוא שלילי.

כיצד ניתן להפוך משוב חיובי (כמו בדוגמה א') לשלילי ? אפשר כמובן להחליף את שסתום הבקרה מ"אויר פותח" ל"אויר סוגר", או ההיפך, אך דבר זה לעיתים אינו מעשי. (כפי שהוסבר לעיל, סוג השסתום נקבע בדרך כלל לפי שיקולי בטיחות.) הדרך המועדפת להפיכת משוב חיובי לשלילי היא על ידי הפיכת כיוון פעולת הבקר. לדוגמה, אם אות התיקון m יחסי לסטיה, לפי $m = Ke$, הפיכת כיוון הפעולה יתן $m = -Ke$, והפיכת הסימן הנוספת הזו תפתור את הבעיה. לצורך זה, היצרנים של בקרים תעשייתיים מאפשרים, בדרך כלל, ביצוע שינוי זה בקלות, או על-ידי מתג בעל שני מצבים שונים (במקרה של בקר אלקטרוני), או על-ידי כיוונון מכני (במקרה של בקר פנוימטי).

תרגילים

(1-1)

במידת האפשר, זהה את הרכיבים השונים המופיעים בדיאגרמת המלבנים של ציור 1-11, במערכת המבקרת את מפלס המים ב"ניאגרה" שבשירותים.

(1-2)

במידת האפשר, זהה את הרכיבים השונים המופיעים בדיאגרמת המלבנים של ציור 1-11, במנורת השמן של פילון (ציור 1-1).

(1-3)

זהה את הרכיבים השונים המופיעים בדיאגרמת המלבנים של ציור 1-11, במערכת נהג-מכונית-כביש.

(1-4)

באילו תנאים קיים ויסות עצמי או חוסר ויסות עצמי בדוד לחימום מים על ידי גוף חימום חשמלי, או בתנור אפיה ? האם ויסות עצמי רצוי במקרים אלה ?

(1-5)

השווה מכונת כביסה אוטומטית לאשה הכובסת ביד, מבחינת קיום משוב. איזו מערכת מתוחכמת יותר, זאת עם המשוב או זאת ללא המשוב ?

(1-6)

נניח שאנו מחליטים להחליף שסתום בקרה מסוים מהסוג "אויר פותח" בשסתום אחר מהסוג "אויר סוגר". מה צריכים לעשות כדי להבטיח שהחוג הסגור יעבד עם משוב שלילי ?

פרק 2

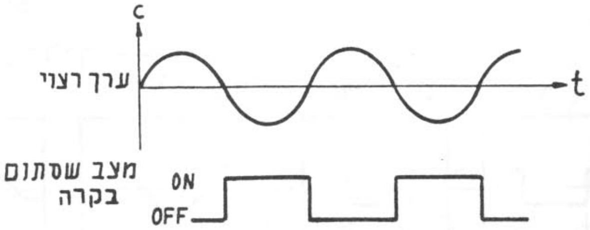
שיטות בקרה (Control Modes)

בפרק הקודם, הזכרנו שהבקר נותן אות יציאה m בהתאם לאות כניסה e (הסטיה), כאשר הקשר בין m ו- e תלוי בפונקצית הבקרה. בפרק זה, נדון בפונקציות המקובלות והנפוצות ביותר. דיון נוסף בנושא ניתן למצוא בספרות, ראה (1), (2), (3), (4), (5). בפרק זה, נתעלם בכוונה ממבנה הבקר, נושא שנדון עליו בפרק 11. כאן נתרכז רק בשיטות הבקרה השונות, כי הן אינן תלויות בסוג הבקר (כלומר, האם הבקר הוא אלקטרוני, פנוימטי או מכני).

2.1 בקרה דו-מצבית (On-Off)

בשיטה זו, אות התיקון היוצא מהבקר, (ולכן גם איבר הבקרה הסופי) נמצא באחד משני מצבים, שהם בדרך כלל קיצוניים — למשל, שסתום בקרה סגור לגמרי או פתוח לגמרי. פרט לשני מצבים אלה, אין כל אפשרות לקבל מצב ביניים אחר. לכן, בקרה זו נקראת בקרה דו-מצבית (two-position control).

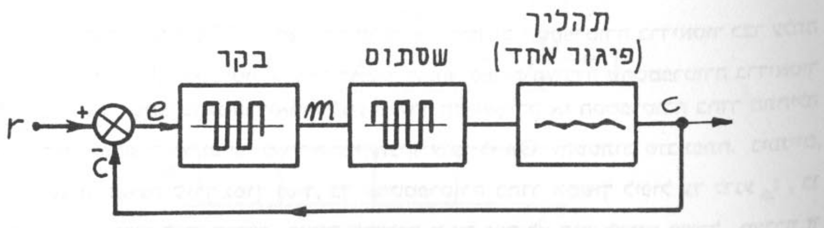
פעולת הבקר מתוארת בציור 2-1. היות והמצב On מכניס כמות גדולה מדי של אנרגיה לתוך התהליך, והמצב Off אינו מכניס דבר, הבקר אינו מסוגל להיות במצב כזה שיהיה מתאים בדיוק לדרישות התהליך. ברוב המקרים הדבר גורם לאי-יציבות, כלומר, המשתנה המבוקר מתנדנד סביב ערך ממוצע כלשהו, אך אינו מגיע לשיווי משקל, כמתואר בציור 2-1 .



ציור 2-1 : פעולת בקר On-Off

נבדוק עתה באיזה תנאים גורמת בקרה On-Off לאי-יציבות. בפרקים מאוחרים יותר, נטפל בשאלה זו גם באופן אנליטי, אך כעת נשתמש בשיטה תיאורית. שיטה זו אינה מדעית, אך בשלב זה תביא אולי ליתר תובנה (insight).

ציור 2-2 מראה מערכת עם בקר On-Off , שסתום ותהליך. נניח שהפיגור היחידי במערכת הוא פיגור מסדר ראשון בתוך התהליך. (תמונה זו היא למעשה קירוב בלבד, כי הבקר, השסתום, האיבר המודד, וכל אלמנט אחר, תורמים גם הם פיגורים למערכת, אך נניח שפיגורים נוספים אלה קטנים מאד בהשוואה לפיגור בתהליך, כך שמותר להזניח אותם.)

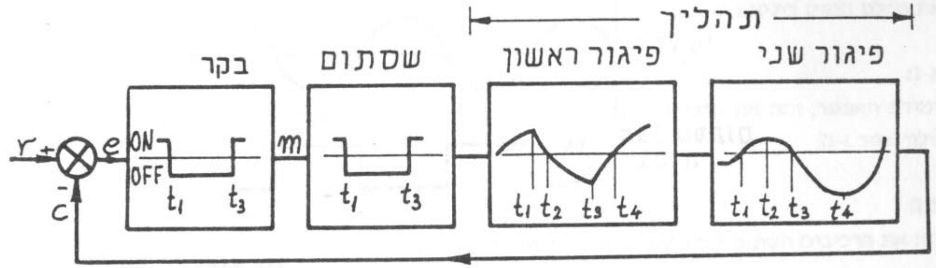


ציור 2-2 : מערכת בעלת פיגור מסדר ראשון עם בקר On-Off

כל מלבן בציור מראה את מהלך המשתנה היוצא מהמלבן כפונקציה של הזמן. הקו האמצעי במלבן "תהליך" מציין את הערך הרצוי, והקוים האמצעים במלבנים האחרים מציינים את ערך המשתנה שיהיה דרוש על מנת להחזיק את המשתנה המבוקר בערך הרצוי.

נניח שבתחילה המשתנה המבוקר נמצא במידה אפסית מתחת לערך הרצוי. הבקר (וגם השסתום) יעבור למצב On, ולכן התהליך ירגיש שינוי מדרגה בכניסה. בפרק הקודם למדנו שהתגובה של פיגור מסדר ראשון לשינוי מדרגה היא עקום אקספוננציאלי, לפי ציור 1-17. השיפוע של עקום זה בזמן $t = 0$ הוא גדול מ- 0, ולכן התגובה היא מיידית, והמשתנה המבוקר c בציור 2-2 עולה ועובר מיד את הערך הרצוי. באותו רגע, הבקר עובר למצב Off, והמשתנה המבוקר שוב נופל מתחת לערך הרצוי. תופעה זו חוזרת על עצמה בקצב מהיר מאד, ותיאורטית מקבלים תנודות בעלות תדירות אין סופית ואמפליטודה אפסית. מעשית, מקבלים תדירות גדולה מאד, ואמפליטודה קטנה מאד. ניתן לטעון שמצב זה בלתי יציב (או שאין מה שנקרא "יציבות אסימפטוטית"), כי המשתנה המבוקר אף פעם אינו מגיע לשיווי משקל, אך באופן מעשי התנודה המהירה והקטנה הזו אינה מורגשת. היינו מגדירים לכן מערכת זו כמערכת יציבה.

נעבור עכשיו למערכת הכוללת שני פיגורים מסדר ראשון (או פיגור אחד מסדר שני), לפי ציור 2-3. נניח למשל שהתהליך כאן הוא הסקה של חדר, על ידי רדיאטור עם קיטור או מים חמים. הרדיאטור עצמו כולל פיגור מסדר ראשון, וגם החדר מהווה פיגור כזה. גם כאן, הקו האמצעי בכל מלבן מציין את הערך הרצוי או הדרוש, כמו בציור הקודם.



ציור 2-3 : מערכת בעלת יותר מפיגור אחד, עם בקר On-Off

גם כאן נניח שבהתחלה המשתנה המבוקר נמצא במידה אפסית מתחת לערך הרצוי. לכן, הבקר והשסתום יהיו במצב On, והטמפרטורה ברדיאטור תעלה באופן אקספוננציאלי, לפי ציור 1-17. לעומת זאת, הטמפרטורה בחדר מייצגת את היציאה של פיגור מסדר שני, ולכן טמפרטורה זו תעלה לפי עקום-S כפי שמראה ציור 1-20 . השיפוע של עקום-S שווה ל- 0 בזמן $t = 0$. לכן, הטמפרטורה בחדר תעבור את הערך הרצוי רק אחרי זמן ניכר, ב- $t = t_1$.

באותו רגע t_1, הבקר יעבור ל- Off והשסתום ייסגר, אך בינתיים הטמפרטורה ברדיאטור כבר עלתה בהרבה מעל לערך הדרוש. לכן, הטמפרטורה בחדר תמשיך לעלות, למרות העובדה שהטמפרטורה ברדיאטור מתחילה ליפול. ברגע t_2, טמפרטורת הרדיאטור מגיעה לערך הדרוש, ורק אז הטמפרטורה בחדר מתחילה ליפול. ברגע t_3 , טמפרטורת החדר מגיעה לערך הרצוי, הבקר עובר ל- On והשסתום שוב נפתח. בינתיים, הטמפרטורה ברדיאטור הגיעה לערך נמוך מאד, כך שהטמפרטורה בחדר תמשיך ליפול עד לרגע t_4 , בו הטמפרטורה ברדיאטור מגיעה לערך הדרוש. רואים שמערכת זו אף פעם לא תגיע לשיווי משקל. מערכת זו נמצאת, תיאורטית, על "סף היציבות", כלומר, מתנדנדת באמפליטודה קבועה. אולם בפועל, בגלל פיגורים

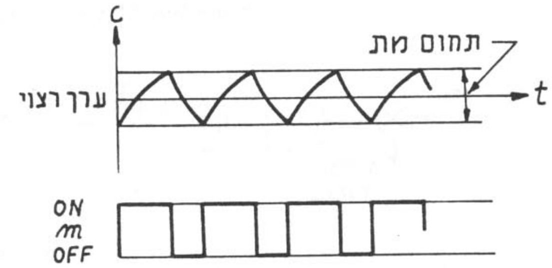
קטנים נוספים הקיימים כמעט בכל חוג סגור (ובדרך כלל מזניחים אותם), המערכת תהיה, קרוב לודאי, ממש בלתי יציבה, והאמפליטודה תמשיך לגדול עד לערך מקסימלי, הנקבע על ידי מגבלות פיזיקליות (רוויה) של האלמנטים השונים.

המסקנות מקטע זה הן שבקר On-Off גורם לאי-יציבות כאשר המערכת כוללת יותר מפיגור אחד. לכן, בקר On-Off מתאים בעיקר כאשר התהליך כולל פיגור אחד מסדר ראשון, ופיגור זה גדול מאד, כך שכל הפיגורים הנוספים במערכת הם זניחים לעומתו. דוגמה אופינית לתהליך כזה היא בקרת טמפרטורה בתוך תנור גדול, בו הקיבול התרמי של התנור מהווה פיגור גדול.

היות ובקר On-Off פשוט במבנהו וזול במחירו, משתמשים בו לעתים גם לתהליכים עם יותר מפיגור אחד, כאשר אין דרישות חמורות לגבי טיב הבקרה, ואנו מוכנים לסבול את התנודות הנובעות מכך.

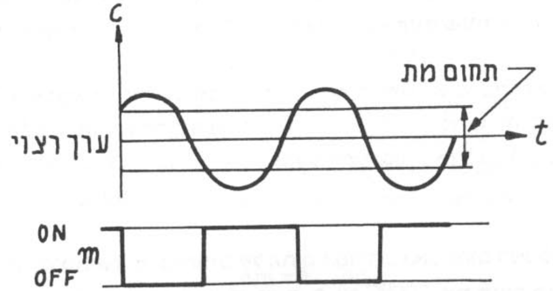
2.2 בקרה דו-מצבית (On-Off) עם תחום מת

בקטע הקודם ראינו שבקר On-Off המבקר מערכת בעלת פיגור מסדר ראשון גורם לתנודות בעלות תדירות גדולה מאד. מצב כזה גורם לבלאי חמור של כל המתקן, משום שהשסתום נפתח ונסגר כל הזמן ללא הפסקה. על מנת להקטין את תדירות התנודות, משתמשים בבקר On-Off עם **תחום מת** (dead zone) (differential gap, dead band, . כאשר המשתנה המבוקר נמצא בתוך תחום מת זה, הבקר אינו מגיב כלל. הבקר עובר ממצב On ל- Off ולהיפך רק בקצוות של התחום המת.



ציור 2-4 : מערכת בעלת פיגור מסדר ראשון עם בקר On-Off בעל תחום מת

כאשר בקר On-Off עם תחום מת מבקר מערכת שכוללת פיגור אחד מסדר ראשון, פעולת המערכת היא כפי שמתואר בציור 2-4 . האמפליטודה של התנודות שווה כאן לרוחב התחום המת. רוחב זה הוא מעין פשרה משום שרוחב גדול גורם אמנם לתדירות קטנה, אך הבקרה אינה מדויקת, כי הסטיות מהערך הרצוי הן גדולות. לעומת זאת, תחום מת קטן יגרום לבקרה מדויקת יותר, אך תדירות התנודות תהיה גדולה, והציוד יתקלקל מהר יותר.



ציור 2-5 : מערכת בעלת פיגור מסדר שני עם בקר On-Off בעל תחום מת

כאשר המערכת כוללת יותר מפיגור אחד מסדר ראשון, הפעולה היא לפי ציור 2-5. גם כאן התחום המת משפיע על התדירות ועל האמפליטודה של התנודות, אך האמפליטודה כאן גדולה יותר מהתחום המת ותלויה גם בתכונות התהליך ויתר המערכת.

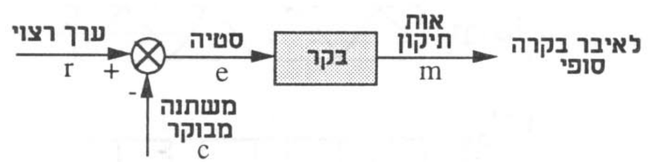
בבקרים תעשיתיים, התחום המת ניתן בדרך כלל לכיוונון לפי הצורך. לעומת זאת, בבקרים בתוך מכשירים ביתיים (כגון מקרר, מגהץ, הסקה מרכזית, וכו'), תחום מת מתאים נקבע על ידי היצרן, ובדרך כלל אינו ניתן לשינוי, על מנת שלא לבלבל את קהל הצרכנים. לדוגמה, תחום המת של הבקר (תרמוסטט) במקרר נקבע בדרך כלל כ- 1^oC או 2^oC, כך שתדירות פעולת המדחס היא בערך פעם אחת בכל רבע שעה. תדירות כזאת היא סבירה, וסטיות של 2^oC בטמפרטורה בתוך המקרר אינן מזיקות.

2.3 בקרה פרופורציונלית או בקרה יחסית (בקרה-P)

על מנת להבטיח בקרה יציבה, צריכים לעבור לבקרה שונה מ- On-Off, למשל, לבקרה פרופורציונלית. המשוואה של **בקר פרופורציונלי** - או בקיצור **בקר-P** - היא:

$$m = Ke + M \qquad (2\text{-}1)$$

m ו- e מוגדרים בציור 2-6, אך K ו- M הם קבועים.



ציור 2-6: דיאגרמת מלבנים של בקר

היחידות של m ו- M הן יחידות זרם או מתח במקרה של בקר אלקטרוני, או יחידות לחץ במקרה של בקר פנוימטי. היחידות של e הן היחידות של המשתנה המבוקר כגון: טמפרטורה, ספיקה, לחץ, מפלס וכו'.

כדי לפשט את בעיית היחידות, נהוג לבטא כל משתנה כאחוזים של התחום הכולל. לדוגמה, שסתומים פנוימטיים עובדים בדרך כלל בתחום בין 3-15 psi (או 6-30 psi), כמוסבר בפרק הקודם. לכן, היינו מגדירים

m = 3 psi (או 6 psi) כ- $m = 0\%$ (שסתום סגור או פתוח לגמרי),
ו- m = 15 psi (או 30 psi) כ- $m = 100\%$ (שסתום פתוח או סגור לגמרי).

כאשר הבקר הוא אלקטרוני, אך שסתום בקרה פנוימטי משמש כאיבר בקרה סופי, יהיה צורך במתמר זרם ללחץ (i/P) בין הבקר ושסתום הבקרה (ראה ציור 11-22). תפקיד מתמר זה להתמיר את אות היציאה מהבקר (תחום מקובל הוא, למשל, 4 - 20 mA) לאות פנוימטי בין 3 - 15 psi. כאן, m = 4 mA יוגדר כ- 0%, ו- m = 20 mA כ- 100%.

בצורה דומה, נהוג לבטא את e כאחוזים של תחום המדידה, ז.א., תחום הפעולה של המכשיר המודד. אם לדוגמא משתמשים בתרמומטר בעל תחום מדידה מ- 0 עד 200^oC, אזי סטיה בעלת מעלה אחת מייצגת 0.5%. חשוב לשים לב שהסטיה מוגדרת כערך הרצוי פחות המשתנה המבוקר. לכן, אם המשתנה המבוקר נמצא מעל הערך הרצוי, הסטיה תקבל ערך מספרי שלילי.

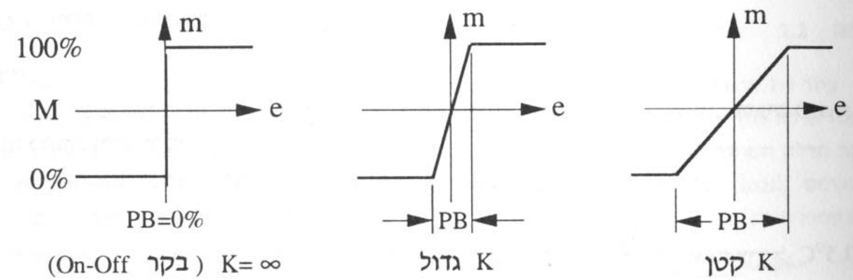
האיבר M במשוואה (2-1) הוא קבוע, וקובע את מצב השסתום (באחוזים) כאשר $e = 0$. בבקרים משוכללים יותר, M ניתן לכיוונון בהתאם לדרישות התהליך. בבקרים פשוטים, M קבוע ובדרך כלל שווה ל- 50%, כלומר, השסתום יהיה חצי פתוח כאשר אין סטיה.

המקדם K במשוואה הוא **הגבר** (gain) הבקר. גם K ניתן לכיוונון בבקרים משוכללים, והוא קבוע בבקרים היותר פשוטים. נראה בשלב מאוחר יותר שכיוונון נכון של K הוא בעל חשיבות רבה. כיוון שמבטאים את m ואת e באחוזים, K עצמו חסר ממדים. בבקרת תהליכים, קיים מושג ישן שעדיין נפוץ והוא **תחום פרופורציונלי** PB (proportional band) המוגדר לפי:

$$PB = \frac{100\%}{K} \qquad (2\text{-}2)$$

<u>הערה</u>: ההגבר K יכול להיות בעל ערך חיובי או שלילי (ראה קטע 1.9).

בבקרים אופייניים, PB ניתן לשינוי מ- 1% (ז.א., K = 100) עד ל- 500% (ז.א., K = 0.2). התחום הפרופורציונלי מוגדר כשינוי ב- e (באחוזים) הדרוש כדי להעביר את m מ- 0% ל- 100%. הגדרה זו מתוארת בציור 2-7. מתחת ל- $m = 0\%$ או מעל $m = 100\%$, השסתום ברוויה (saturation), ואינו מגיב יותר. הבקר אמנם מסוגל בדרך כלל לספק לחץ מעל 15psi (או מתחת ל- 3psi), אך המערכת אינה מגיבה לשינויים אלה, כי השסתום בין כה וכה כבר לגמרי פתוח (או סגור). אם כן, הבקר מסוגל לתת תגובה פרופורציונלית רק בין $m = 0\%$ ו- $m = 100\%$, ועובדה זו גם מסבירה את ההגדרה הנ"ל של PB.



<u>ציור 2-7</u>: פעולת בקרה - P עבור ערכים שונים בהגבר

מציור 2-7 נראה גם שכאשר $PB = 0\%$ (או $K = \infty$) מקבלים בקרה On-Off, כלומר, שניתן להתיחס לבקר On-Off כמקרה פרטי של בקר-P, עם הגבר אין סופי. במלים אחרות, בקר-P מתקרב לבקר On-Off כאשר ההגבר K גדול מאד. אם ההגבר K גדול מדי, עלולים לקבל בקרה בלתי יציבה. הערך של K הגורם לאי-יציבות תלוי בתכונות הדינמיות של התהליך ושל כל המערכת. נחזור לשאלה זו בשלב מאוחר יותר, אך ברוב המקרים אפשר להגיד שהמערכת תהיה מרוסנת יותר ככל שההגבר K קטן יותר.

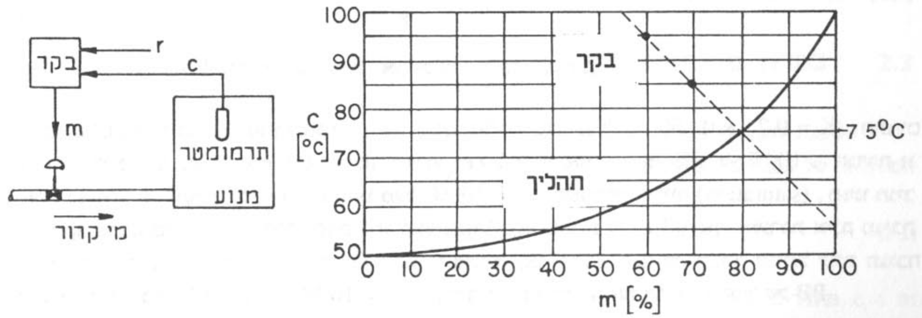
אלמלא היה קיים חסרון עקרוני לבקרה - P, היינו יכולים לסיים את כל הפרק בנקודה זו. החסרון הוא שבקר-P אינו מסוגל, בדרך כלל, לבטל לגמרי את הסטיה, אלא הוא משאיר סטיה מסוימת במצב מתמיד. לסטיה זו קוראים **הסט** (באנגלית **offset**). עקרונית, הסיבה היא שכל תיקון ב- m יהיה יחסי לסטיה e. לכן, אם אין סטיה, הבקר אינו מסוגל לתת שום שינוי ב- m. הדבר ברור יותר אם כותבים את משוואה (2-1) בצורה:

$$\Delta m = K \cdot \Delta e \qquad (2\text{-}3)$$

משוואה זו מראה שהבקר זקוק לסטיה Δe מסוימת על מנת לפעול ולספק תיקון Δm כלשהו. הדבר יהיה ברור יותר מהדוגמאות המספריות, להלן:

דוגמה 2.1

הטמפרטורה c בתוך מנוע דיזל גדול מבוקרת על ידי בקר-P, המפעיל שסתום (מהסוג "אויר סוגר"), ראה ציור 2-8. השסתום מזרים מי קירור לתוך המנוע. תלות הטמפרטורה c במצב השסתום m (עבור עומס ממוצע על המנוע) נתונה בגרף בציור 2-8 . (גרף זה התקבל על ידי בדיקה נסיונית ב"חוג פתוח", ז.א. כאשר השסתום מנותק מהבקר ומופעל ידנית.) תחום המדידה של התרמומטר הינו מ- 50^oC עד 100^oC. הערך הרצוי של הבקר $r = 85^oC$. מצא את הטמפרטורה המתקבלת במצב מתמיד אם משוואת הבקר היא $m = 0.5e + 70$.



ציור 2-8: תלות הטמפרטורה בתוך מנוע במצב השסתום

פתרון:

ברור שמשוואת הבקר מייצגת קו ישר. על מנת לצייר קו זה על גבי הגרף הנתון, מספיק למצוא שתי נקודות כלשהן, ולהעביר דרכן קו.

עבור $e = 0$ (כלומר, $c = r = 85^oC$), משוואת הבקר נותנת $m = 70\%$.

עבור $m = 60\%$, נקבל : $e = (60\text{-}70)/0.5 = -20\% = -10^oC$.

(היות והסטיה e מבוטאת באחוזים של תחום המדידה, כפי שהוסבר לעיל, כל אחוז שווה ערך ל- 0.5^oC .)

מהמשוואה הבסיסית $e = r - c$, נחשב את c כ- $c = r - e = 85^oC - (-10^oC) = 95^oC$.

נצייר את שתי הנקודות הנ"ל בגרף, ונעביר דרכן קו מרוסק ישר (אופיין הבקר).

היות ובחוג הסגור המשתנים c ו- m משותפים גם לבקר וגם לתהליך (המנוע), ברור שנקודת העבודה במצב מתמיד מוגדרת על ידי נקודת החיתוך בין שני האופיינים, כי רק נקודה זו מספקת את שני האופיינים גם יחד. לכן, במצב המתמיד נקבל $c = 75^oC$ ו- $m = 80\%$.

הסטיה במצב המתמיד (ז.א., ההסט) היא, אם כן, $e = r - c = 85^o - 75^oC = 10^oC$. הדבר אינו תוצאה משיבוש כלשהו בבקר, אלא נובע מהאופי הטבעי של בקרה פרופורציונלית. כיצד ניתן לפתור את הבעיה הזו ?

פתרון אחד הוא לשנות את הקבוע M של הבקר. הגרף הנ"ל מראה שאופיין המנוע עובר דרך $c = 85^oC$ (כלומר, $e = 0$) ב- $m = 90\%$. לכן, אם נגדיל את M מ- 70% ל- 90% , אופיין הבקר יעבור בדיוק דרך הנקודה $[m = 90\% , e = 0]$, והדבר יבטל את ההסט. (מציעים לקורא לצייר את הקו עבור $M = 90\%$ על גבי הגרף.) שינוי ידני ב- M נקרא באנגלית Manual Reset.

הפתרון הנ"ל אמנם אינו פתרון כללי. נניח שהעומס על המנוע עולה פתאום. המנוע יתחמם יותר, ואופיין המנוע יעלה בגרף הנ"ל, ויחתוך את הקו $c = 85^oC$, נניח לדוגמה, ב- $m = 70\%$ במקום $m = 90\%$. כעת נקבל שוב הסט, כי אופיין הבקר (עבור $M = 90\%$) חותך את אופיין התהליך מעל $c = r = 85^oC$. כדי לבטל את ההסט, צריך להחזיר את M לערכו הקודם $M = 70\%$.

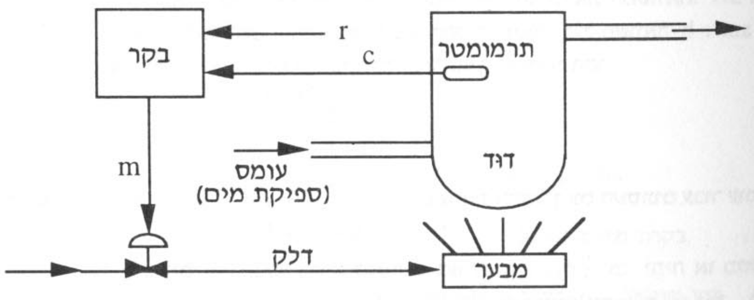
המסקנה היא שכל שינוי בעומס (או באחד מתנאי ההפעלה האחרים של המנוע) ידרוש תיקון ב- M , על מנת לבטל את ההסט . אם מחליטים לכוונן את M מחדש אחרי כל שינוי בעומס או הפרעה אחרת, הבקרה כבר אינה בקרה אוטומטית אלא בקרה ידנית. סביר לשנות את M אחרי כל שינוי גדול בעומס, ובעיקר אחרי כל שינוי ממושך, אך שינוי ב- M אחרי כל הפרעה קטנה או זמנית אינה מהווה פתרון מעשי לבעיה.

פתרון שני לבעית ההסט הוא להגדיל את ההגבר K, כך שקו הבקר חותך את אופיין התהליך בנקודה קרובה יותר ל- $e = 0$. פתרון זה אינו מבטל את ההסט , אלא רק מפחית אותו. ההסט שואף ל- 0 כאשר K מתקרב לאין-סוף , אך מצב זה נותן בקרה On-Off שעלולה לגרום לאי-יציבות. למען הדוגמה, נבדוק את הפתרון כאשר $K = 2$ (במקום 0.5). שוב, מציעים לקורא לצייר את קו הבקר עבור בקר בעל משוואה $m = 2e + 70$, ואז יתברר שהפתרון במצב מתמיד נותן $c = 82^oC$ (במקום 75^oC).

הגדלת ההגבר K אינו מהווה פתרון מושלם, משום ש- K גדול מדי גורם לאי-יציבות, ולכן אין אפשרות להגדיל את K בלי גבול. המסקנה הסופית היא שאין פתרון מושלם לבעית ההסט במסגרת בקרה-P , וצריכים לעבור לבקרה משוכללת יותר כדי לפתור בעיה זו.

דוגמה 2.2

ציור 2-9 מראה מערכת פשוטה לבקרת טמפרטורה בדוד. תרמומטר לחץ מודד את הטמפרטורה, ובקר פנוימטי שולח לחץ m (אות תיקון) לשסתום הבקרה, בהתאם לסטיה $e = r - c$. השסתום מוסת את ספיקת הדלק המוזנת למבער, ובצורה זו מבקר על הטמפרטורה c. ספיקת המים העוברת דרך הדוד מהווה את העומס (load) על התהליך. עליה בעומס דורשת כמובן עליה מתאימה בספיקת הדלק כדי לשמור על אותה טמפרטורה c.



ציור 2-9 : מערכת בקרת טמפרטורה

נניח שהבקר הוא בקר-P בעל משוואה $m = 2e + 50$. הערך הרצוי הוא $r = 80^oC$, ותחום המדידה של התרמומטר הוא $0^o - 100^oC$. השסתום הוא מהסוג "אויר פותח".

מטרתנו היא למצוא את משוואת התהליך יחד עם השסתום, ז.א., להראות את תלות הטמפרטורה c במצב השסתום m . ברור שתלות זו היא פונקציה של העומס. כאשר העומס גדול יותר, אותו ערך של m יגרום לירידה בטמפרטורה, ולכן לסטיה e יותר גדולה. אם כן, כל עומס גורם למשוואה אחרת של התהליך.

במידה ויש בידינו מספיק אינפורמציה, ניתן לחשב את משוואת התהליך. מאידך, במידה שהתהליך קיים במציאות ויש לנו גישה אליו, קל יותר למצוא את משוואתו באופן נסיוני. כדי לעשות זאת, מנתקים את הבקר מהשסתום, ושולחים לחץ m מסוים לשסתום ממקור חיצוני אחר, כלומר, בודקים את התהליך בחוג פתוח. עבור כל ערך של m, ממתינים מספיק זמן עד שהתהליך יגיע למצב מתמיד, ואז מודדים ורושמים את הטמפרטורה c במצב מתמיד. (רצוי להמיר את c ל- e לפי המשוואה $e = r-c$, כדי שגם משוואת התהליך, בדומה למשוואת הבקר, תיתן את הקשר בין m ו- e.)

למען הדוגמה, נניח שקבלנו את התוצאות הבאות: עבור עומס מסוים, שנסמן אותו כעומס I, כאשר $m = 50\%$ קבלנו $c = 80^oC$, ולכן $e = r - c = 80^oC - 80^oC = 0$. מה היה קורה לו היינו מחברים את הבקר חזרה לשסתום (כלומר, סוגרים את החוג) בעומס זה? לפי משוואת הבקר, $e = 0$ גורם ל- $m = 50\%$, ולפי הבדיקה הנ"ל $m = 50\%$ גורם ל- $e = 0$. לכן, בעומס המסוים הזה, הבקר מתאים בדיוק לדרישות התהליך, ואינו גורם לשום הסט.

נניח שהעומס עולה עתה לעומס II. אנחנו שוב בודקים את התהליך בחוג פתוח, ומקבלים את התוצאות הבאות: כאשר m נשאר $m = 50\%$ (כלומר, ללא תיקון), הטמפרטורה נופלת ל- 40^oC, כך שהסטיה תהיה $e = r - c = 80^oC - 40^oC = 40^o = 40\%$. כדי להחזיר את c ל- 80^oC, צריך להגדיל את m ל- 70%.

נשאלת עתה השאלה: מה יהיה c במצב מתמיד, עבור עומס II?

פתרון:

מצאנו כאן שתי נקודות על עקום התהליך:

עבור $m = 50\%$, $e = +40\%$

עבור $m = 70\%$, $e = 0\%$

במידה והתהליך הוא ליניארי, שתי נקודות מספיקות כדי להגדיר את המשוואה. רוב התהליכים המעשיים אינם לגמרי ליניאריים, אך למען הפשטות נניח כאן תהליך ליניארי, בעל משוואה $e = am + b$. כדי לקבוע את שני הקבועים a ו- b, נציב את שתי הנקודות הנ"ל לתוך משוואת הקו:

$$40 = 50a + b$$
$$0 = 70a + b$$

פתרון שתי המשוואות הללו נותן $a = -2$ ו- $b = 140$. לכן, משוואת התהליך עם השסתום עבור עומס II היא:

$$e = -2m + 140$$

מה קורה כאשר מחברים את הבקר חזרה לשסתום בעומס זה? הלחץ m יהיה אז משותף לבקר ולשסתום. לכן, המצב המתקבל יצטרך לספק את משוואת הבקר ומשוואת התהליך גם יחד. פתרון שתי המשוואות

בקר: $m = 2e + 50$

תהליך: $e = -2m + 140$

נותן את התוצאות:

$$e = +8\% = 8^oC$$
$$c = r - e = 80^oC - 8^oC = \underline{72^oC}$$
$$\underline{m = 66\%}$$

וזה מתאר את המצב המתקבל במצב המתמיד. הבקר אמנם משאיר הסט ניכר, אך לא ניתן לומר שהוא לא פעל כלל.

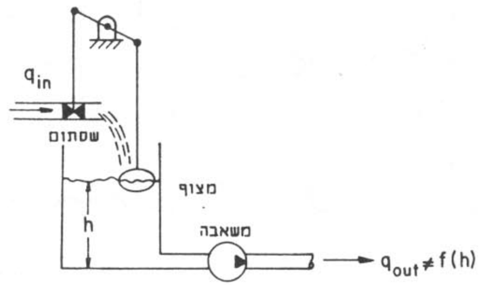
בלי בקרה:	$m = 50\%$ ו-	$t = 40^oC$
עם בקרה אידיאלית:	$m = 70\%$ ו-	$t = 80^oC$
המצב האמיתי:	$m = 66\%$ ו-	$t = 72^oC$

(כמובן, ניתן היה לפתור את הבעיה הנ"ל גם באופן גרפי, בדומה לדוגמה 2.1).

המסקנה היא שהבקר גרם לשיפור ניכר לעומת המצב ללא כל תיקון. ההסט אינו תוצאה משיבוש כלשהו בבקר, אלא נובע מהאופי הטבעי של בקרה-P. העומס החדש דורש תיקון ב- m כדי לבטל את ההסט, אך אין אפשרות לקבל תיקון Δm כלשהו ללא סטיה Δe. אם הסטיה שווה ל- 0 עבור עומס I, היא אינה יכולה להיות 0 עבור כל עומס אחר. יתר על כך, כל הפרעה אחרת, כמו שינוי בערך הרצוי או באספקה (כמו לחץ הדלק בציור 2-9) תגרום גם להסט. במילים אחרות, כל הפרעה למערכת שדורשת תיקון ב- m תגרום להסט כאשר הבקר הוא בקר-P.

דוגמה 2.3

הציור מראה תהליך בקרת מפלס המים במיכל. הבקר כאן הוא מכני. (למעשה הבקר הוא המנגנון המחבר בין המצוף לבין השסתום.) ערך הרצוי = 90 cm. משוואת הבקר $m = 2e + 40$. משוואת השסתום: $q_{in} = 0.50\ m[\%]$ (כלומר, עבור $m = 100\%$, $q_{in} = 50$ liter/min.). תחום המדידה של המצוף הוא מ- 75 cm ל- 100 cm. בתחתית המיכל נמצאת משאבה בעלת הדחק קבוע (ז.א., הספיקה שהמשאבה שואבת מהמיכל תלויה רק במהירות המשאבה, ולא במפלס h בתוך המיכל).



<u>ציור 2-10</u>: בקרת מפלס במיכל

(א) מהו העומס q_{out} במצב מתמיד שבו המפלס יהיה בערך הרצוי?

(ב) מצא את המפלס המתקבל במצב מתמיד אם $q_{out} = 30$ liter/min.

(ג) מהי הספיקה המקסימלית שניתן להעביר במצב מתמיד, ומה יהיה המפלס במצב זה?

פתרון:

התהליך הנ"ל הינו ללא ויסות עצמי (ראה הסבר בפרק 1). לכן, אין קשר אלגברי בין q_{in} ו- h במצב מתמיד. במקום משוואת התהליך, יש להשתמש במשוואת השסתום, וכמובן בעובדה שבמצב מתמיד q_{in} חייב להיות שווה ל- q_{out}.

(א) אם $h = r$, אזי $e = 0$, והבקר נותן m לפי: $m = 2e + 40 = 40\%$
לפי משוואת השסתום, זה נותן: $q_{in} = 0.50m = (0.50)\ (40) = 20$ liter/min .
לכן, נקבל $q_{out} = q_{in} = \underline{20 \text{ liter/min}}$ במצב מתמיד.

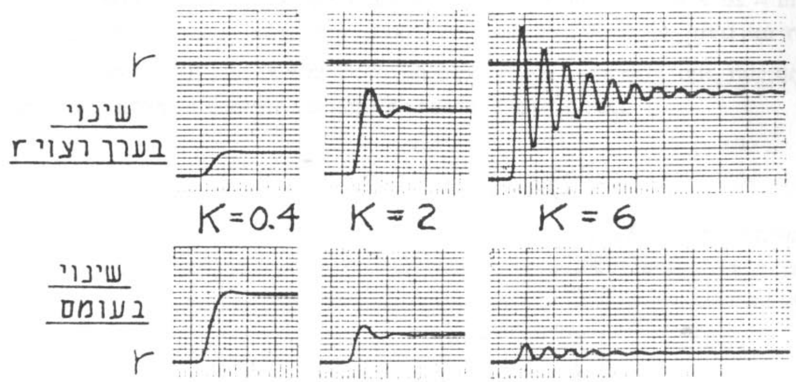
(ב) במצב מתמיד חייב להיות $q_{in} = q_{out} = 30$ liter/min . לפי משוואת השסתום, זה דורש $m = 60\%$, וממשוואת הבקר נקבל

$$e = (60\text{-}40)/2 = 10\% \equiv 2.5 \text{ cm}$$

לכן, נקבל: $h \equiv c = r - e = 90 - 2.5 = \underline{87.5 \text{ cm}}$

(ג) עבור $m = 100\%$ נקבל: $q_{max} = (0.50)\ (100) = 50$ liter/min
על מנת לקבל $m = 100\%$, צריך $100 = 2e + 40$ או $e = 30\% \equiv 7.5$ cm .
לכן: $h \equiv c = r - e = 90 - 7.5 = \underline{82.5 \text{ cm}}$

ציור 2-11 מראה את ההשפעה של K על התגובה הסטטית והתגובה הדינמית גם יחד, עבור תהליך מסוים. (העקומים בציור זה ובציורים דומים בפרק זה התקבלו במחשב אנלוגי (ראה פרק 10). התהליך מכיל שלושה פיגורים שווים, כל אחד בעל קבוע זמן של שניה אחת. כל שְׁנָת בציר האופקי מייצגת שניה.)



<u>ציור 2-11</u> : השפעה של שינויים בהגבר K בבקר-P

הציורים בשורה העליונה מראים את השינוי ב- c כפונקציה של הזמן t לאחר שינוי מדרגה בערך הרצוי, ובשורה התחתונה אחרי שינוי מדרגה בעומס (או באספקה). בשני המקרים רואים שעליה ב- K משפרת את התגובה הסטטית (כלומר, מקבלים פחות הסט), אך גורמת לתגובה דינמית פחות יציבה. בדרך כלל משתמשים ב- K הגדול ביותר שעדיין נותן תגובה דינמית מספיק יציבה.

ההגבר K המקסימלי שמותר להשתמש בו שונה עבור כל תהליך, ותלוי בתכונות הדינמיות של התהליך. מה שקובע כאן הוא מספר הפיגורים במערכת, והגודל היחסי שלהם. כאשר פיגור אחד הוא גדול מאד, וכל האחרים הם קטנים בהשוואה אליו, אזי מותר להזניח את הפיגורים הקטנים ולהשתמש ב- K גדול (אפילו בבקר On-Off). תהליך כזה מתאים לבקרה-P, כי ההסט שיתקבל יהיה קטן. מאידך, כאשר שני הפיגורים הגדולים ביותר הם מאותו סדר גודל, על ההגבר K להיות קטן יותר כדי לקבל תגובה יציבה. כאשר כל הפיגורים הם מאותו סדר גודל, K צריך להיות קטן מאד, ובקרה-P אינה מתאימה בדרך כלל.

הטבלה מראה ערכים אפיניים של הפיגורים בשלוש מערכות שונות. אין להתיחס לטבלה זו כמקור לנתונים מדוייקים. המטרה כאן רק לתת מושג כללי של סדר הגודל המצופה עבור הפיגורים השונים.

תהליך	הגבר הבקר K	פיגור מס' 1 תהליך	פיגור מס' 2 איבר מודד	פיגור מס' 3 שסתום	פיגור מס' 4 בקר
בקרת טמפרטורה של תנור גדול	גדול	100 - 10,000	1 - 50	0.5 - 1	0.5 (עבור בקר פנוימטי) או 0 (עבור בקר אלקטרוני)
בקרת טמפרטורה של מחליף חום	בינוני	10 + 10 (ז.א., שני פיגורים)	1 - 5		
בקרת ספיקה	קטן	0.1	0.1 - 1		

<u>טבלה</u> : ערכים אופיניים של הפיגורים בשלוש מערכות שונות (קבועי הזמן בשניות)

במערכת הראשונה, התהליך הוא בקרת טמפרטורה של תנור גדול. פיגור התנור יכול לכסות תחום רחב, בהתאם לגודלו של התנור, אך בדרך כלל פיגור זה יהיה גדול בהרבה מכל הפיגורים האחרים. לכן, K יכול להיות גדול, ובקרה-P מתאימה.

במערכת השניה, התהליך (מחליף חום) כולל עצמו שני פיגורים מאותו סדר גודל. המצב כאן פחות מוצלח, ו- K צריך להיות בינוני.

במערכת בקרת ספיקה, התהליך הוא צינור שדרכו זורם נוזל, עם פיגור קטן מאד. גם האיבר המודד (מד-ספיקה) מגיב יותר מהר מתרמומטר. כל הפיגורים במערכת זו הם מאותו סדר גודל, ו- K צריך להיות קטן מאד. בקרה-P אינה מומלצת למקרה זה אלא אם בקרה מדויקת אינה נחוצה, ואנו מוכנים לסבול הסט גדול, או אם יודעים מראש שהתהליך שקט מאד, ואין לצפות להפרעות גדולות.

2.4 בקרה אינטגרלית (בקרה - I)

הפתרון לבעית ההסט הוא שימוש בבקר אינטגרלי. בבקרה אינטגרלית, מהירות השסתום dm/dt היא יחסית לסטיה e. (בבקר-P , m עצמו יחסי ל- e.) לכן מקבלים :

$$\frac{dm}{dt} = Re$$

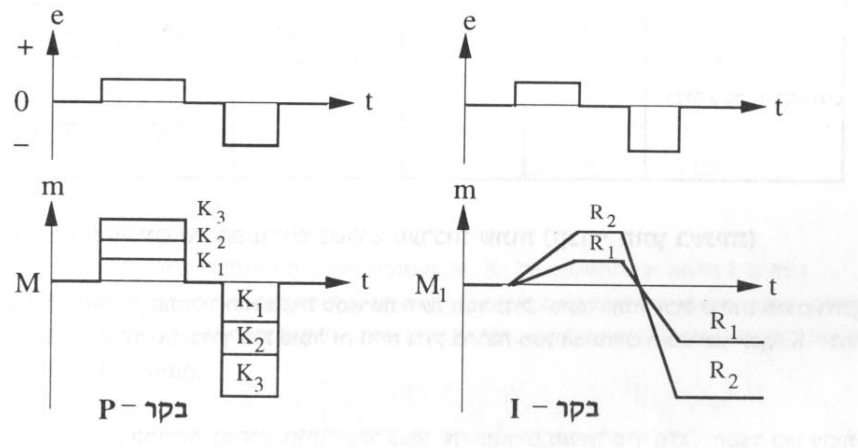
ולאחר אינטגרציה :

$$m = R \int e dt + M_1 \qquad \text{(2-4)}$$

משוואה זו מסבירה את השם "בקרה אינטגרלית". המקדם R במשוואה הוא קבוע (שבדרך כלל ניתן לכיוונן) ומייצג את מהירות האינטגרציה. M_1 הוא קבוע האינטגרציה. (נקרא כאן M_1 ולא M, כדי להבדיל מהקבוע M שמופיע במשוואת הבקר-P.)

ניתן לתאר או לבדוק את פעולת הבקר על ידי בדיקת הבקר לבד בחוג פתוח (כלומר, ללא תהליך וללא משוב). בבדיקה זו מכניסים סטיה e מלאכותית לתוך הבקר, ורושמים את ה- m הנובע ממנה. ציור 2-12 מראה את התוצאות של בדיקה כזו עבור שינוי מדרגה ב- e .

כאשר הבקר הוא בקר-P , שינוי מדרגה ב- e גורם לשינוי מדרגה גם ב- m. גודל התגובה תלוי בהגבר K ושווה ל- Ke . הציור מראה תגובות שונות עבור ערכי K שונים. כאשר הסטיה e חוזרת לאפס, m תמיד חוזר לאותו ערך קבוע M .

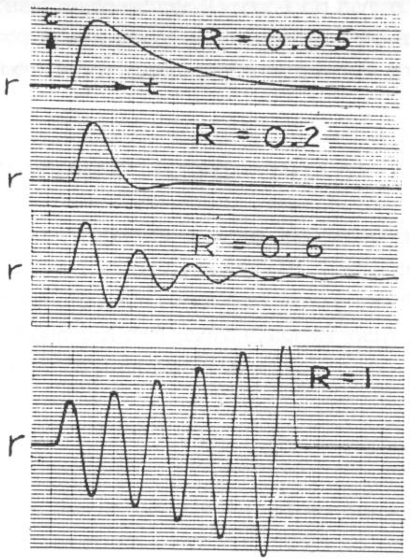


ציור 2-12 : בדיקת בקרים בחוג פתוח

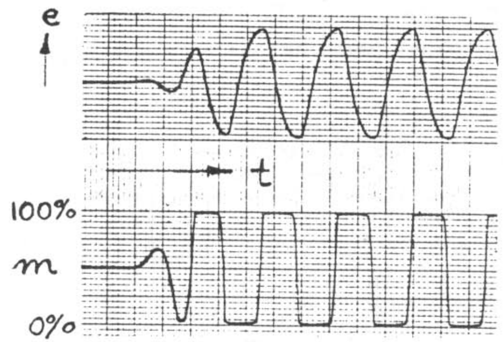
כאשר הבקר הוא בקר-I, שינוי מדרגה ב- e גורם לשינוי שיפוע ב- m , ומידת השיפוע תלויה במהירות האינטגרציה R. כאשר e חוזרת לאפס, m אינו חוזר לערך הקודם, כלומר, M_1 אינו נשאר קבוע, אלא "צף" ותלוי בהיסטוריה הקודמת של הבקר. לכן, בקרה-I נקראת לפעמים באנגלית floating control (בקרה צפה).

היות והבקר ממשיך לשנות את m כל עוד קיימת סטיה e כלשהי, m ישאר קבוע אך ורק כאשר $e = 0$. לכן, בקר-I מבטל את ההסט לחלוטין כאשר הוא עובד בחוג סגור.

התגובה הדינמית של מערכת עם בקרה-I בחוג סגור תלויה במידה ניכרת בבחירה של R . ציור 2-13 מראה את תגובת התהליך לשינויי מדרגה בעומס עבור ערכים שונים של R. למען השוואה, התהליך והשינוי בעומס זהים כאן ובציור 2-11 . כאשר R קטן מדי, הסטיה e אמנם חוזרת לאפס, אבל לאט מאד. לעומת זאת, R גדול מדי גורם לאי-יציבות (כמו K גדול מדי בבקר-P). כדי לקבל בקרה מהירה ככל האפשר, משתמשים ב-R הגדול ביותר שעדיין נותן בקרה מספיק יציבה, (למשל $R = 0.2$ בציור 2-13), וערך זה תלוי במהירות התגובה של התהליך. תהליך מהיר (כגון בקרת ספיקה) יכול לסבול R גדול. מאידך, תהליך איטי (ז.א. , תהליך עם פיגורים גדולים , כגון בקרת טמפרטורה, מפלס, ריכוז, או pH) דורש R קטן מאד, כי אחרת הבקר ישנה את m במהירות כזו שאינה נותנת לתהליך אפשרות לעקוב אחריו, והתוצאה תהיה אי-יציבות. מצב זה מתואר בציור 2-14 . סטיה קטנה גורמת לעליה מהירה מאד של m, ולפני שהתהליך הספיק להגיב לשינוי זה, m כבר הגיע לרוויה (ז.א., 100%). אחרי זמן רב, התהליך מתחיל להגיב, והסטיה e יורדת. ברגע שהסטיה מתחילה להיות שלילית, m יורד מהר מאד, ואחרי זמן קצר שוב מגיע לרוויה, הפעם ב- 0% . מהלך זה חוזר על עצמו וגורם לאי-יציבות המערכת.

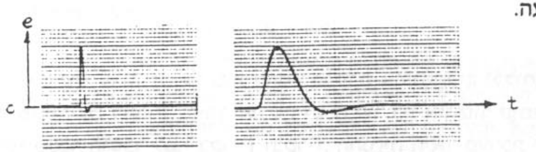


ציור 2-13 : תגובת תהליך עם בקר-I לשינויי מדרגה בעומס (חוג סגור)



ציור 2-14 : אי-יציבות של תהליך איטי מבוקר על ידי בקר-I עם R גדול מדי

אם כן, בקרה-I מהווה פתרון טוב רק עבור תהליכים מהירים. מספר הפיגורים במערכת אינו חשוב כאן, אלא גודלם. בתנאי שכולם קטנים, התהליך יהיה מהיר, ומותר להשתמש ב- R גדול. הצירוף של תהליך מהיר ו- R גדול נותן תגובה דינמית מהירה, כמתואר בציור 2-15 . לעומת זאת כאשר התהליך איטי (אפילו כשהוא כולל רק פיגור גדול אחד), בקרה-I אינה מתאימה, כי R צריך להיות קטן מאד, והתגובה הדינמית תהיה איטית וגרועה.



תהליך איטי $R = 0.2$ תהליך מהיר $R = 0.02$

ציור 2-15 : תגובה של תהליך מהיר ותהליך איטי עם בקר-I

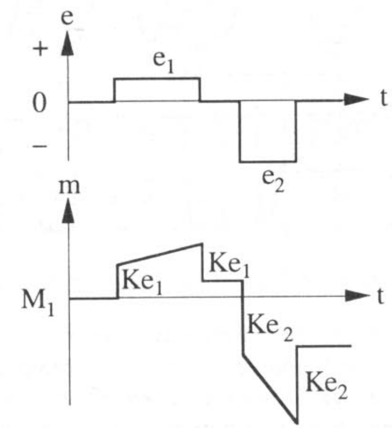
לסיכום, נראה שהתנאים לניצול מוצלח של בקר-P ובקר-I הם הפוכים. אם נחזור לטבלה בקטע הקודם על בקרה-P , נראה שהתהליך הראשון בטבלה (בקרת טמפרטורה של תנור גדול) מתאים לבקר-P, אך לא לבקר-I. לעומת זאת, התהליך האחרון בטבלה (בקרת ספיקה) אינו מתאים לבקר-P, אך בקר-I יצליח כאן.

2.5 בקר פרופורציונלי-אינטגרלי (בקרה - PI)

כפי שהוסבר לעיל, בקרה-I תצליח רק עם תהליכים מעטים. כדי לנצל את היתרונות של בקרה-I עם כל סוגי תהליכים, נהוג לצרף בקרה-P לבקרה-I. התוצאה היא **בקר-PI** , המסוגל לבטל את ההסט (כיוון שהוא מבצע אינטגרציה של הסטיה), ובכל זאת נותן תגובה דינמית טובה, אפילו כאשר R מוכרח להיות קטן (כיוון שתהליכים הדורשים R קטן מרשים לעיתים K גדול). בצורה זו, בקר-PI מצרף את כל היתרונות של בקר-P ובקר-I , אבל בלי חסרונותיהם. משוואת בקר-PI היא :

$$m = K(e + R\int edt) + M_1 \qquad (2\text{-}5)$$

כמו קודם, K הוא הגבר הבקר, ו- R מהירות האינטגרציה (באנגלית: reset rate). ציור 2-16 מראה את תגובת בקר-PI בחוג פתוח לשנוי מדרגה בסטיה e . (ציור זה משלים את ציור 2-12.) כאשר הסטיה e קבועה, השיפוע ב- m תלוי ב- e , R וב- K . כאשר הסטיה e חוזרת לאפס, התגובה הפרופורציונלית הקודמת מתבטלת, אך תוצאות האינטגרציה נשארות. לכן, m אינו חוזר לאותו ערך, וכמו עם בקר-I , גם כאן M_1 "צף". עובדה זו מסבירה שם נפוץ באנגלית לבקרה-PI : automatic reset (כיוונון חוזר אוטומטי), מכיוון שהבקר מכוונן את הקבוע M_1 באופן אוטומטי על מנת להתאים אותו לדרישות התהליך.

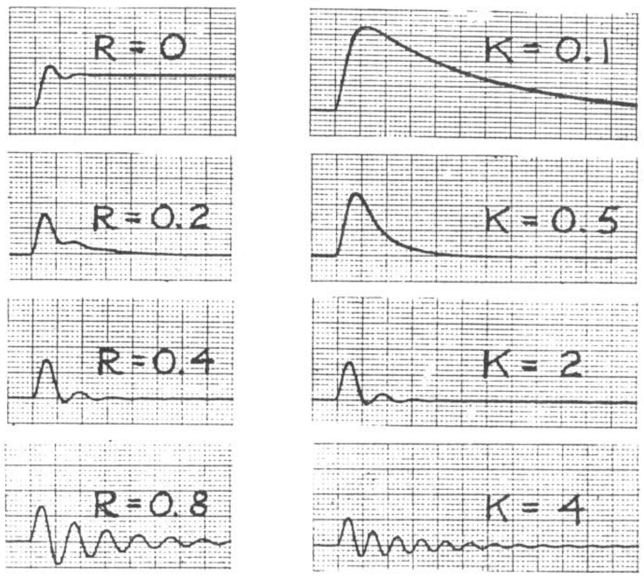


ציור 2-16 : בדיקת בקר-PI בחוג פתוח

כל תהליך דורש כיוונון אחר של K ו- R על מנת להגיע לבקרה אופטימלית (כלומר, תגובה דינמית טובה). הבעיה מסובכת יותר מאשר עם בקר-P , כיוון שעכשיו יש לבחור בין אין-סוף קומבינציות אפשריות של K ו- R . באופן כללי, כפי שכבר הוסבר לגבי בקר-P ובקר-I, ההנחיה היא: מערכת עם פיגורים רבים דורשת K קטן (ולהפך). מערכת עם פיגורים גדולים דורשת R קטן (ולהפך). ציור 2-17 מראה באופן כללי כיצד שינויים ב- K וב- R משפיעים על התגובה הדינמית. (גם כאן, למען ההשוואה, התהליך וההפרעה הם כמו בציורים (2-11) ו- (2-13), וניתן לראות שיפור רב לעומת בקר-I.) העמודה השמאלית בציור מראה את

השפעת השינויים ב- R , כאשר K מוחזק קבוע (בערכו האופטימלי עבור אותו התהליך). נראה כי R קטן מדי נותן תגובת מעבר עם "זנב", כלומר, הסטיה חוזרת לאפס, אבל בצורה איטית מאד. העמודה הימנית מראה את השפעת שינויים ב- K, כאשר R מוחזק קבוע בערכו האופטימלי.

מהציור רואים ש- K גדול מדי וגם R גדול מדי עלולים, כל אחד בנפרד, לגרום לאי-יציבות. ההבדל הוא בכך שהתנודות בגלל R גדול מדי הן בעלות תדירות קטנה יותר. הסיבה היא שבקרה-I מוסיפה פיגור משלה למערכת, ולכן גורמת לתגובה איטית . (הסבר אנליטי לעובדה זו יתנן בפרק 7 על תגובת תדירות.) אם כן, בקרה-I משפרת את התגובה הסטטית (על ידי ביטול ההסט), אך גורמת לתגובה דינמית יותר גרועה.

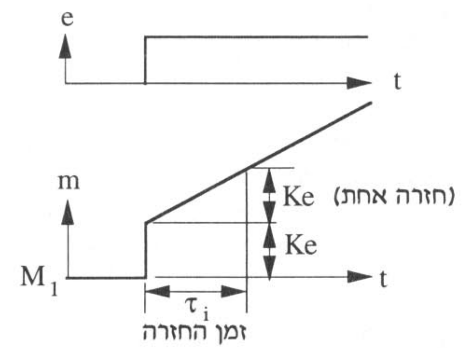


ציור 2-17 : תגובת תהליך עם בקר-PI לשינויי מדרגה בעומס (חוג סגור)

נהוג לכנות את מהירות האינטגרציה R בשם reset rate (מהירות החזרה) ולמדוד אותה ביחידות של repeats/minute (חזרות לדקה). הסבר הענין נמצא בציור 2-18 . ציור זה מראה את התגובה של בקר- PI (בחוג פתוח) לשינוי מדרגה ב- e , וחוזר על חלק מציור 2-16. השינוי ב- e גורם לתגובה פרופורציונלית $\Delta m = Ke$. אחר כך, m יעלה במהירות קבועה עקב התגובה האינטגרלית. כאשר תגובה זו נתנה עליה השווה ל- Ke , היא נתנה "חזרה" אחת, כמסומן בציור. מספר החזרות בדקה יהיה שווה ל- R . דבר זה קל להוכיח. אם נציב e קבוע ו- t = 1 במשוואה (2-5), נקבל :

$$\Delta m = K(e + Re)$$

ז.א., אחרי דקה אחת, הבקר נתן תגובה פרופורציונלית בשעור של Ke , ועל ידי האינטגרציה RKe , כלומר R חזרות על Ke . כדאי לשים לב שעליה ב- K מגדילה את השיפוע של m , אך בכל זאת אינה משנה את R , כיוון שכל חזרה Ke תהיה גם היא יותר גדולה, לפי אותו היחס.



ציור 2-18 : הגדרה של "חזרה" בבקר-PI

הכפתור בבקר שמכוונן את R מכויל בדרך כלל לפי Repeats/minute. אמנם יצרנים מסוימים מעדיפים להשתמש ב- reset time (זמן החזרה), שמוגדר כזמן הדרוש לבצע חזרה אחת. אם זמן זה מסומן באות τ_i, אז ברור ש-

$$\text{Reset Time } \tau_i = 1/R \text{ [minutes]} \tag{2-6}$$

2.6 בקרה לפי נגזרת (בקרה - D)

בקרה לפי נגזרת (rate control או derivative control) משנה את m לפי

$$m = T\frac{de}{dt}$$

מקדם הנגזרת T נקרא (rate time או derivative time) ונמדד בדקות.

בקרה-D לבד אינה מועילה, ולכן מנוצלת תמיד יחד עם בקרה-P (כלומר, בקר - PD), או יחד עם בקרה-P ובקרה-I (כלומר, בקר - PID). הסיבה היא שבקר-D לא מבצע אף תיקון ב- m אפילו כאשר הסטיה e גדולה מאד, כל זמן שהסטיה קבועה ($de/dt = 0$). לכן, בקר-D לא היה יכול להקטין את e אף פעם.

המשוואה של **בקר - PD** היא:

$$m = K(e + T\frac{de}{dt}) + M \tag{2-7}$$

ושל **בקר - PID**:

$$m = K(e + R\int edt + T\frac{de}{dt}) + M_1 \tag{2-8}$$

בקר-PD אינו נפוץ, כיוון שאם נחוץ השיכלול של בקרה-D, אזי הבעיה בדרך כלל דורשת גם בקרה-I. לכן, בקרה-D מופיעה כמעט תמיד בצורה של **בקר - PID** (באנגלית: **Three-mode controller**).

לעיתים, בקר-PID בנוי כיחידת -PI ויחידת -PD מחוברים בטור (במיוחד במקרה של בקר פנומטי). משוואת בקר כזה תהיה:

$$m = K(1+RT)\left[\frac{T}{1+RT}\cdot\frac{de}{dt} + e + \frac{R}{1+RT}\int edt\right] \tag{2-9}$$

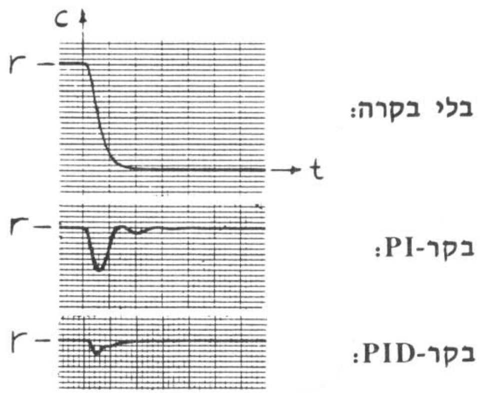
(על-מנת להבין את הפיתוח של משוואה זו, ראה את הקטעים 3.1 ו- 3.2 בפרק 3.) ברור ממשוואה (2-9) שלבקר כזה יהיה השפעה הדדית בין R, K ו- T ; כלומר, שינוי של R או של T (לפי הסקאלה המודפסת על הכפתור) למעשה משנה את הערכים האפקטיביים של R, K ו- T גם יחד, לפי המשוואות הבאות. (הדבר מוצא ביטוי בתהליך כיוונון הבקר, כפי שנראה בקטע 8 של פרק זה.)

$$K_{EFF} = K(1+RT) \tag{2-10 A}$$

$$T_{EFF} = T/(1+RT) \tag{2-10 B}$$

$$R_{EFF} = R/(1+RT) \tag{2-10 C}$$

כדי להמחיש את היתרון של בקרה-D, נתיחס לשלוש הדיאגרמות בציור 2-19. הציור מראה את התגובה של תהליך מסוים (למשל, הטמפרטורה בתנור) לשינוי מדרגה בעומס (למשל, פתיחה פתאומית של דלת התנור), כאשר משתמשים בשיטות בקרה שונות. בדיאגרמה הראשונה, אין בכלל בקרה. כאשר פותחים את הדלת, הטמפרטורה נופלת במידה ניכרת, אך מתיצבת לבסוף בערך נמוך יותר עקב היויסות העצמי של התהליך. לעומת זאת, בקר-PI (דיאגרמה שניה) מסוגל לבטל את ההסט, אך הסטיה המקסימלית בתגובת המעבר תהיה גדולה. הסיבה לכך היא שהתיקון ב- m הוא יחסי ל- e. בהתחלה, הסטייה e עדיין קטנה, ולכן גם התיקון יהיה קטן מאד ובלתי-יעיל. כאשר e גדלה, הבקר נותן סוף סוף תיקון בהתאם לצורך, אך אז כבר מאוחר מדי למנוע סטיה גדולה. המצב שונה עם בקר-PID. בקר זה מתחיל לבצע תיקון כבר בהתחלה, ברגע שהטמפרטורה מתחילה ליפול, כי הבקר מגיב לנגזרת de/dt שהיא כבר גדולה כאשר הסטיה e עצמה עדיין קטנה. לכן, בקר זה נותן תיקון מוקדם יותר, ומונע התפתחות של סטיה גדולה.



ציור 2-19 : תגובה של מערכת לשינוי בעומס

בקרה-D גורמת גם לתגובה דינמית מהירה יותר, כיוון שהיא מבטלת חלק מהפיגור בתהליך. הוכחה אנליטית לכך תנתן בפרק 7 על תגובת תדירות. לסיכום, מטרת בקרה-I היא לשפר את התגובה הסטטית, בזמן שבקרה-D משפרת את התגובה הדינמית.

למרבית הצער קיימים מספר חסרונות לבקרה-PD או PID, והם:

(א) בקר-PID פנומטי מסובך יותר ויקר יותר מבקר-PI. (בבקר אלקטרוני, לעומת זאת, הוספת בקרה-D כמעט ואינה משפיעה על העלות.)

(ב) בעיית כיוונון הבקר הרבה יותר קשה, כיון שקיימים שלושה קבועים (K , R ו- T) אותם יש לכוונן. כל תהליך דורש קומבינציה אחרת כדי לתת בקרה אופטימלית או אפילו בקרה טובה. אם T גדול מדי, המערכת תהיה בלתי-יציבה (כמו עבור K או R גדולים מדי), ותדירות התנודות תהיה גדולה יותר. באופן כללי, ניתן לומר שככל שהתהליך איטי יותר, T יכול להיות גדול יותר בלי לגרום לאי-יציבות.

(ג) בקרה-PID מגבירה את ה"רעש" באות המדידה. אותות רבים כוללים רעש (או ריפרוף) עקב תנודות מכניות בסביבת המכשירים, טורבולנציה בזרימה, או הפרעות חשמליות. אמפליטודת הרעש היא, בדרך כלל, קטנה מאד, אך התדירות גדולה, ולכן גם הנגזרת תהיה גדולה. היות ובקר-PID רגיש לנגזרת de/dt, הוא יגביר רעש זה במידה ניכרת, כך ש- m (ומצב השסתום) יתנדנד כל הזמן בתדירות גדולה מאד. לכן, בקר- PID מנוצל רק בתהליכים איטיים ושקטים, כמו בקרת טמפרטורה. בתהליכים מהירים כגון בקרת ספיקה, הרעש חזק מדי, ובקר-PID היה גורם ליותר נזק מאשר תועלת.

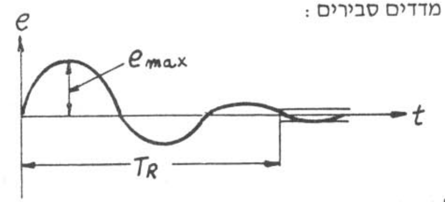
על מנת להפחית את בעיית הרעש, משתמשים לעתים קרובות בבקר-PID עם קיזוז מסוים (ראה ציור 10-28). בקר כזה כולל מעין מסנן החוסם את התדירויות הגבוהות. הדבר מקטין את הרגישות לרעש, אך גם את התועלת שניתן להפיק מבקרה-D.

עקב החסרונות הנ"ל, משתמשים בבקר-PID בדרך כלל רק כאשר הבעיה דורשת בקרה מהירה ומדויקת מאד. כאשר הבקר הוא בקר-PID אלקטרוני אך לא רוצים בבקרה-D, מכוונים את הבקר לתת $T = 0$, והדבר הופך אותו לבקר-PI.

באופן תיאורטי, נגזרות גבוהות יותר במשוואת הבקר, כמו d^2e/dt^2 , היו גורמות לשיפור נוסף בתגובה הדינמית. למרות זאת, הנגזרת השניה אינה מנוצלת באף בקר תעשייתי, משום ששלושת החסרונות שהוזכרו לעיל היו בולטים עוד יותר בבקר מעין זה.

2.7 כיוונון אופטימלי של בקרים

על מנת לכוונן את הבקר באופן אופטימלי, צריך ראשית להגדיר את הביטוי "בקרה אופטימלית". קיימים קריטריונים שונים להערכה כמותית של טיב הבקרה, ואנו חופשיים לבחור ביניהם לפי טעמנו או לפי דרישות הבעיה. לדוגמא: נניח שתגובת המעבר של מערכת בקרה להפרעה מסוימת מתוארת בציור 2-20 . נרשום כאן כמה קריטריונים או מדדים סבירים :



ציור 2-20 : תגובת מעבר להפרעה מסוימת

(א) היות ומטרת הבקרה היא להקטין ולבטל את הסטיה e במידה האפשרית, אנו מעוניינים שהסטיה המקסימלית , e_{max} בציור, תהיה קטנה ככל האפשר. אם כן, הגודל של e_{max} יכול לשמש כמדד סביר להערכת טיב הבקרה. אלא שבמקרים רבים מדד זה אינו שמושי, כיוון שבקר המכוונן לפי מדד זה יהיה בעל הגבר K גדול מאד, והדבר יגורם לתנודות עם ריסון מועט. ניתן לראות תופעה זו מציור 2-17, בו e_{max} יורדת כאשר K עולה. תגובה מתנדנדת היא, בדרך כלל, בלתי רצויה, כיוון שהזמן הדרוש כדי להגיע למצב מתמיד יהיה גדול מדי.

(ב) כמדד אחר, ניתן לקחת את הזמן הדרוש כדי להגיע למצב המתמיד. זמן זה נקרא "זמן הרגיעה" T_R (recovery time). היות והסטיה e מגיעה לאפס רק בזמן אין-סופי, צריך להגדיר את T_R לפי גודל מסוים של e , כלומר, T_R מוגדר כהזמן הדרוש עד שהסטיה e תגיע לערך מסוים (למשל, 1% של תחום המדידה), ולא תעלה על ערך זה לאחר מכן. שימוש במדד זה גורם בדרך כלל להגבר K קטן מדי ולסטיה e_{max} גדולה, ולכן גם מדד זה אינו נפוץ בשימוש.

(ג) כצירוף של שני המדדים הקודמים, ניתן להשתמש באינטגרל $\int_0^\infty |e|\,dt$ כמדד, ולדרוש שאינטגרל זה יהיה בעל ערך מינימלי. אינטגרל זה מביא בחשבון את e_{max} ואת T_R גם יחד, ולכן הוא נותן, בדרך כלל, תוצאות סבירות. יש להשתמש בערך המוחלט של e , כי אחרת חצי גל של כל תנודה יבטל את חצי הגל הקודם. מדד זה נקרא בספרות **IAE** (Integral Absolute Error) . (ברור שמותר להשתמש בו רק כאשר הבקר כולל בקרה-I , כיוון שאחרת האינטגרל יהיה אין-סופי בגלל ה- offset .)

(ד) לפעמים משתמשים באינטגרל $\int_0^\infty e^2dt$. מדד זה נותן משקל רב יותר לסטיות גדולות, והעקרון כאן הוא שסטיות גדולות גורמות לנזק רב יותר לטיב המוצר. מדד זה נקרא **ISE** (Integral Squared Error) ובדרך כלל הוא גורם להגבר K גדול מדי, ולכן ל- T_R גדול. יתרונו הוא בכך שקל יותר לחשב את ערך האינטגרל באופן אנליטי מאשר בשיטת IAE .

(ה) מדד נפוץ מאוד הוא האינטגרל $\int_0^\infty t|e|dt$ שנקרא **ITAE** (Integral Time Absolute Error). מדד זה דוחה תגובה עם תנודות ממושכות, משום שהערך של t גדל כל הזמן, כך שהאינטגרל "מעניש" תגובות עם T_R גדול מדי. אינטגרל זה קשה יותר לחישוב, אך מדד זה נותן כמעט תמיד תוצאות טובות.

ברור שכל מדד ידרוש צירוף שונה בין K , R ו- T . השוואה בין המדדים השונים ניתן למצוא בספרות במקומות שונים , למשל ב- (6) ו- (7) .

נניח שהסכמנו כבר על מדד מסוים לטיב הבקרה . עדיין אין באפשרותנו לקבוע את כיוונון הבקר באופן חד-משמעי, כי הדבר תלוי גם בסוג ההפרעה. הפרעות שונות גורמות לתגובות שונות, ובקר שמכוונן לספק את הדרישות של מדד מסוים להפרעה מסוימת שוב לא יספק את אותן הדרישות עבור הפרעה מסוג אחר. ניתן לסווג את ההפרעות לפי :

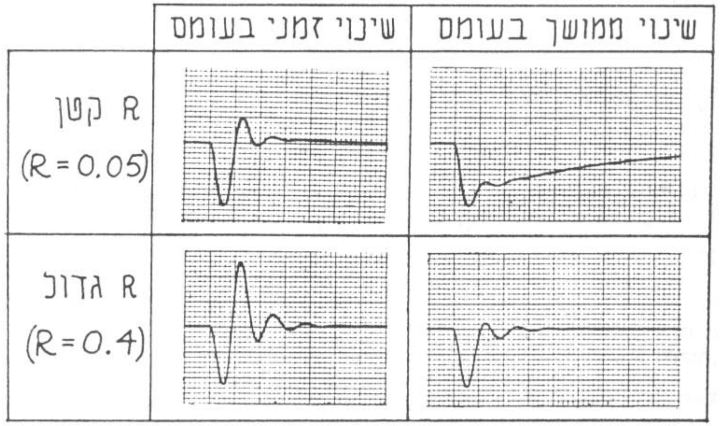
(א) **מקום** : בערך הרצוי, בעומס, או באספקה.

(ב) **זמן** : זמנית או ממושכת.

(ג) **צורה** : שינוי מדרגה, שיפוע, או אחרת.

לדוגמה: שינוי בערך הרצוי מגיע קודם כל לבקר, והבקר יגיב ויתן תיקון מסוים עוד לפני שהשפעת השינוי מגיעה לתהליך. לעומת זאת, שינוי בעומס מגיע קודם כל לתהליך ויגרום להפרעה במשתנה המבוקר עוד לפני שהבקר יספיק לבצע תיקון כלשהו. לכן, ברור שכל אחד משינויים הנ"ל משפיע בצורה אחרת על תגובת המעבר, וידרוש כיוונון אחר של הבקר על מנת לתת בקרה אופטימלית לפי אותו מדד.

ציור 2-21 ממחיש ששינוי זמני בעומס דורש מהירות האינטגרציה R קטנה מאשר שינוי ממושך. שינוי זמני בעומס דורש R קטן (למעשה אפשר היה להשתמש ב- R = 0 , כלומר, בקרה-P) משום ש- R גדול גורם ל**תגובת יתר** (overshoot) גדולה כאשר ההפרעה נעלמת. לעומת זאת, הפרעה ממושכת דורשת R גדול יותר, כי R קטן יגרום לתגובה איטית עם "זנב".



<u>ציור 2-21</u> : השפעת משך ההפרעה על R אופטימלי

אם נביא בחשבון את כל האמור לעיל, ברור שכיוונון הבקר מוכרח להיות לפי פשרה בין שיקולים שונים. במידה ויודעים מראש שהפרעה מסוג מסוים מופיעה בתדירות גבוהה במיוחד, כדאי לכוונן את הבקר כך שיתן בקרה אופטימלית עבור הפרעה זו. אמנם בדרך כלל דבר זה הוא בלתי אפשרי, וצריכים לכוונן את הבקר כך, שיתן בקרה סבירה לכל סוג של הפרעה. ברור מכאן שהבקרה לא תהיה אופטימלית באופן כללי.

2.8 שיטת Ziegler-Nichols לכיוונון בקרים

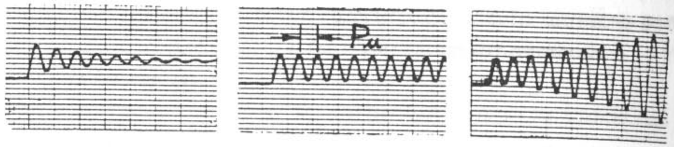
במידה ומשוואות התהליך ידועות לנו, והחלטנו על מדד מתאים למדידת טיב הבקרה, ויודעים מה בדיוק תהיה צורת ההפרעה, אזי ניתן לחשב באופן אנליטי את הכיוונון האופטימלי של הבקר לגבי מקרים פשוטים מאד בלבד. קל יותר להשיג פתרון מקורב באופן גרפי, אך הדבר דורש עבודה רבה, ואינו מעשי לעבודה יום יומית בתעשיה.

במקומות רבים בתעשיה, נוהגים לכוונן את הבקר על ידי ניסוי וטעיה (trial-and-error), ז.א., משחקים עם הכפתורים השונים עד שמוצאים צירוף הנותן תוצאות פחות או יותר סבירות. שיטה זו מצליחה עם בקר-P, ולעיתים גם עם בקר-PI. מאידך, עם בקר-PID, מספר הצירופים האפשריים הוא גדול מדי, וקשה מאד להגיע לתוצאות טובות (שלא לדבר על המצב האופטימלי) ללא תהליך שיטתי יותר. שיטת Ziegler-Nichols, ראה מקור (8), היא נסיון לפתח תהליך כגון זה, ומבוסס על תוצאות נסיוניות בלבד. השיטה אינה דורשת חישובים מסובכים, ולכן היא מתאימה ליישום בתעשיה, וגם על ידי עובדים ללא ידע רב בבקרה.

השיטה מחולקת לשני שלבים. השלב הראשון דורש בדיקה נסיונית של התהליך יחד עם הבקר, כדי למצוא שני פרמטרים אשר מגדירים את התכונות הדינמיות של התהליך. בשלב השני, מציבים את הערכים המספריים של הפרמטרים הללו לתוך משוואות אמפיריות על מנת לקבל את הכיוונון המומלץ של הבקר.

כדי לבצע את השלב הראשון, בודקים את התהליך בחוג סגור יחד עם בקר-P. במידה והבקר הקיים במערכת הוא בקר-PI או בקר-PID, יש לכוונן R=0 ו- T=0 כדי להשיג בקרה-P. (בבקרים פנוימטיים

מסוימים, קשה להוריד את T לגמרי לאפס, ודבר זה עלול לגרום לשגיאות רציניות בתוצאות.) משנים את הגבר הבקר K עד שמוצאים את ההגבר הקריטי K_u (ultimate gain) שנותן את סף אי-היציבות, כלומר, תנודות ממושכות ללא ריסון ובעלות אמפליטודה קבועה.



$K < K_u$ $K = K_u$ $K > K_u$

<u>ציור 2-22</u> : מציאת הגבר הקריטי K_u ותקופה הקריטית P_u

המצב הנ"ל מתואר בציור 2-22 . כדי לבדוק את היציבות, צריכים לעורר את המערכת על ידי הפרעה כלשהי, כמו למשל שינוי מדרגה בערך הרצוי או בעומס. בלי ההפרעה, התהליך היה נשאר שקט למרות שההגבר גדול מאד. המקום או צורת ההפרעה אינם חשובים כאן, ואינם משפיעים על התוצאות. כל הפרעה שמוציאה את המערכת משיווי המשקל תיתן מידע על מצב היציבות. אם תגובת התהליך היא תנודות מתרסנות, אזי יודעים ש- $K < K_u$. יש להגדיל את K במקצת ולהכניס הפרעה חדשה. לעומת זאת, אם האמפליטודה של התנודות גדלה, אזי $K > K_u$. חוזרים על הבדיקות עד מציאת $K = K_u$, בו האמפליטודה נשארת קבועה. באותו מצב מודדים גם את תקופת המחזור P_u של התנודות, אשר נקראת "תקופה קריטית" (ultimate period). הערכים של K_u ו- P_u משמשים כפרמטרים שמאפיינים את התכונות הדינמיות של התהליך. (במידה וכפתור הבקר מכויל לפי PB במקום K , משתמשים ב- $PB_u = 100/K_u$.)

בשלב השני, מציבים את הערכים הנ"ל של K_u ו- P_u במשוואות הבאות :

<u>עבור בקר-P</u> :

(2-11) $K = 0.5\,K_u$ (או $PB = PB_u/0.5$)

<u>עבור בקר-PI</u>:

(2-12) $K = 0.45K_u$ (או $PB = PB_u/0.45$)
$R = 1.2/P_u$ (או $\tau_i = P_u/1.2$)

<u>עבור בקר-PID לפי משוואה (2-8)</u>:

(2-13) $K = 0.7K_u$ (או $PB = 1.43PB_u$)
$R = 2.5/P_u$ (או $\tau_i = P_u/2.5$)
$T = P_u/6.7$

<u>עבור בקר-PID לפי משוואה (2-9)</u>:

(2-14) $K = 0.35K_u$ (או $PB = 3PB_u$)
$R = 4/P_u$ (או $\tau_i = P_u/4$)
$T = P_u/4$

עבור בקר-P, השיטה אינה מביאה תועלת רבה, כיוון שאין כל בעיה לכוונן כפתור אחד בלבד. עבור בקר-PI או בקר-PID, השיטה נחוצה יותר. כדאי להבהיר שעבור בקר-P ובקר-PI, ההמלצות הנ"ל של Ziegler-Nichols נותנות K שהוא קצת גדול מדי, דבר שגורם לתנודות ללא ריסון מספיק. לכן, משתמשים לעתים קרובות בערכים של K הקטנים ב- 20% עד 30% מהערכים הנ"ל. עבור בקר-PID, המקדמים המקוריים של Ziegler-Nichols אינם מתאימים לבקרים מודרניים, כי הם אינם מתחשבים בכלל במבנה הבקר, ראה (14). לכן ההמלצות הכתובות לעיל ב- (2-13) ו- (2-14) אינן לפי המאמר המקורי של Ziegler-Nichols, אלא לקוחות ממאמר (9).

ניתן לחלוק על המקדמים האופטימליים במשוואות הנ"ל, אך הצורה הכללית של המשוואות מצביעה על כמה עובדות: מהירות האינטגרציה R היא ביחס הפוך לתקופה P_u. דבר זה מתאים לעובדה שכבר צוינה: תהליך איטי (כלומר, עם P_u גדול) דורש R קטן, ולהפך. לעומת זאת, T יחסי ל- P_u, כי תהליך איטי סובל T יותר גדול. אם נשווה את המשוואות עבור בקר-P ובקר-PI, רואים שתוספת בקרה-I דורשת הורדה מסוימת בהגבר הבקר K עבור אותה דרגה של יציבות. דבר זה נובע מהעובדה שכבר הוזכרה: בקרה-I מוסיפה פיגור משלה, ולכן מורידה את יציבות המערכת.

נציין כאן מספר מגבלות של השיטה:

(א) ההמלצות לפי משוואות (2-11) עד (2-14) אינן מתאימות כלל לתהליכים בעלי זמן מת ניכר. בקר-PID אינו מתאים לתהליכים כאלה, וכדי להשיג בקרה יציבה, מומלץ להשתמש בבקר-PI בלבד, מכוונן לפי המשוואה (2-15), ראה מאמר (9).

$$K = 0.25\,K_u \qquad R = 6/P_u \tag{2-15}$$

(ב) השיטה משתמשת בשני פרמטרים בלבד כדי לאפיין את התהליך, ודבר זה כבר מהווה שגיאה עקרונית. מספר הפרמטרים הדרוש שווה לסדר המשוואה הדיפרנציאלית של התהליך, ולכן שני פרמטרים מספיקים רק לפיגור מסדר שני. כאשר המערכת כוללת יותר משני פיגורים מסדר ראשון, השימוש בשני פרמטרים בלבד אינו מדויק ומהווה רק קירוב.

(ג) בבדיקה למדידת K_u ו- P_u, יש לפעול בזהירות רבה, ולעבוד עם אמפליטודות קטנות מאד. כאשר $K = K_u$, האמפליטודה של התנודות נשארת קבועה והיא נקבעת בעיקר על ידי גודל ההפרעה שהכנסנו כדי להתחיל את התנודות. קיימות שתי סיבות לשימוש בהפרעות קטנות: ראשית, הפרעה גדולה והתנודות הגדולות הנובעות ממנה עלולות לגרום נזק לתוצרת התהליך, ולהוריד את טיבה. שנית, כאשר התהליך מתנדנד באמפליטודה גבוהה, הוא עלול להכנס לתחום לא-ליניארי, ומדידת K_u ו- P_u לא תהיה מדויקת. (בתוך התחום הליניארי K_u ו- P_u אינם תלויים באמפליטודה.) דוגמה קיצונית של אי-ליניאריות היא רוויה. כאשר האמפליטודה גדולה מדי, המערכת עלולה להיות במצב רוויה. במצב זה, האמפליטודה תשאר קבועה אפילו כאשר $K > K_u$. יש להזהר לא לראות מצב זה כסף אי-היציבות ולהניח שההגבר K הקיים הוא K_u. ההבחנה בין מצב רוויה ומצב בו $K = K_u$ היא פשוטה מאד: כאשר $K = K_u$, השינוי הקטן ביותר ב- K יגרום מיד לעליה או ירידה באמפליטודה. לעומת זו, כאשר $K > K_u$, והאמפליטודה נשארת קבועה עקב רוויה, אזי שינוי קטן ב- K אינו משפיע כלל על האמפליטודה. ראה גם מקור (15).

(ד) לפעמים המערכת מתנדנדת באמפליטודה קטנה מאד, למרות ש- $K < K_u$, עקב חיכוך יתר בשסתום או באלמנט אחר. גם זו תופעה לא-ליניארית, וקל לטעות ולהניח שה- K הקיים הוא ה- K_u. ההבחנה היא זהה לזו במקרה הקודם: כאשר $K = K_u$, האמפליטודה של התנודות רגישה מאד לשינויים קטנים ב- K. לעומת זאת, כאשר המערכת מתנדנדת באמפליטודה קטנה מאד עקב חיכוך יתר, שינוי קטן ב- K לא ישפיע על המצב.

על מנת להתגבר על הקשיים הנ"ל במציאת K_u, ממליץ המאמר (10) למצוא את ההגבר $K_{25\%}$, המוגדר כהגבר הגורם למערכת להתרסן כך, שהאמפליטודה במחזור מסוים תדעך ל- 25% של גודלה במחזור הקודם, ולחשב את K_u לפי היחס המקורב:

$$K_u = 2K_{25\%} \tag{2-16}$$

אפילו ללא כל המגבלות הנ"ל, אין אפשרות לפרט משוואות שתבטחנה בקרה אופטימלית עבור כל מקרה. כפי שהוסבר לעיל, כיוונון הבקר תלוי במדד שנבחר, במקום ובצורת ההפרעה. אפילו כאשר הבקר כוונן פעם לבקרה אופטימלית עבור הפרעה מסוימת, אין כל בטחון שהתהליך עצמו לא ישתנה. למשל, אי-ליניאריות בתהליך או בשסתום, שינוי בעומס או בכל דבר אחר, עלולים להביא את המערכת לתחום עבודה אחר, בו היינו מקבלים K_u ו- P_u אחרים. ברור כי הבקר שהיה מכוונן לתת בקרה אופטימלית בתחום העבודה הקודם כבר לא יתן בקרה אופטימלית בתנאים החדשים.

דוגמה קיצונית למערכת לא-ליניארית היא בקרת pH (חומציות). ה- pH מוגדר כמינוס הלוגריתם העשרוני של ריכוז יוני מימן. נוזל חומצי נותן $0 < pH < 7$, ונוזל בסיסי - $7 < pH < 14$. נוזל נויטרלי, כגון מים מזוקקים, נותן $pH = 7$. החיישנים המודדים pH עובדים לפי אופיין לוגריתמי, ורגישות החיישן באיזור סביב $pH = 7$ יכולה להיות פי עשרה מאשר הרגישות באיזור קרוב ל- $pH = 14$ או $pH = 0$. בנוסף לכך, גם קבוע הזמן של פיגור המדידה אינו נשאר קבוע. לאור כל זה, מערכת בקרת pH שמכוונת לתת בקרה אופטימלית סביב $pH = 12$ עלולה להיות לגמרי בלתי יציבה סביב $pH = 8$.

לאור כל האמור לעיל, אין לראות בכל שיטה, כדוגמת שיטת Ziegler-Nichols, שיטה הנותנת בקרה אופטימלית. השיטה מהווה פשרה בין דרישות שונות, והיא נותנת בדרך כלל תוצאות מתקבלות על הדעת. צריך להתיחס לכיוונון המומלץ על ידי השיטה כנקודת מוצא, שרק לפעמים מספקת אותנו. במידה ורוצים תוצאות טובות יותר, אפשר לצאת מנקודת מוצא זו ולשנות בנפרד כל אחד מהמשתנים K, R ו- T על מנת לראות האם ניתן להשיג שיפור נוסף. בלי השיטה, לא היינו יודעים איפה להתחיל לחפש. לכן, השיטה בעלת ערך מעשי רב, אם ומנצלים אותה בצורה הנכונה.

ניתן למצוא דיון מפורט יותר של הבעיה ב- (1) ו- (9) עד (15).

ראוי לציין כאן שניתן לרכוש כיום בקרים אלקטרוניים (מבוססים על מיקרו-מחשב) המסוגלים לבצע כיוונון עצמי (Self-Tuning) באופן אוטומטי — ראה גם קטע 11.6.4.

ספרות

(1) F.G. Shinskey, *Process-Control Systems* , 3rd ed., McGraw-Hill, 1988, Chapters 1 & 4.

(2) D.R. Coughanowr and L.B. Koppel, *Process Systems Analysis and Control* , McGraw-Hill, 1965, Chapter 1.

(3) T.A. Hughes, *Measurement and Control Basics* , Instrument Society of America, 1988, Chapters 1 and 2.

(4) D.M. Considine, *Process Instruments and Controls Handbook* , 2nd ed., McGraw-Hill, 1974, Chapter 18.

(5) R.N. Baleson, *Introduction to Control System Technology*, 4th ed., Merrill-Macmillan, 1993, Chapter 14.

(6) J. D'Azzo and C. Houpis, *Linear Control System Analysis and Design,* 3rd ed., McGraw-Hill, 1988, Chapter 16.

(7) P.W. Murrill, *Automatic Control of Processes* , International Textbook Company, 1967, Chapter 17.

(8) J. Ziegler and N. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. ASME, Vol. 64, (1942), pp. 759-765.

(9) D.W. Pessen, "A New Look at PID-Controller Tuning", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 116, Sept. 1994, pp. 553-557.

(10) C.L. Smith, "Controller Tuning that Works", Instruments & Control Systems, Sept. 1976, pp. 43-46 .

(11) Miller, Lopez, Smith and Murrill, "A Comparison of Controller Tuning Techniques", Control Engineering, December 1967, pp. 72-75.

(12) Chiu, Corripio and Smith, "Process Models for Controller Tuning", Instruments & Control Systems, January 1972, pp. 84-88.

(13) C.L. Chen, "A Simple Method for On-Line Identification and Controller Tuning", AIChE Journal, Vol. 35, No. 12, 1989, pp. 2037-2039.

(14) A. Kaya and T.J. Scheib, "Tuning of PID Controls of Different Structures", Control Engineering, July 1988, pp. 62-65.

(15) D.W. St.Clair and P.S. Fruehauf, "PID Tuning: It's the Method, Not the Rules", InTech, Dec. 1994, pp. 26-30.

(16) P.W. Murrill, *Fundamentals of Process Control Theory* , 2nd ed., Instrument Society of America (ISA), 1991, Chapters 5 and 8.

תרגילים

<u>הערה כללית</u>: בתרגילים (2-1) עד (2-9), מימוש הבקר (כלומר, אלקטרוני או פנוימטי) אינו מוגדר. אם הבקר אלקטרוני, יהיה צורך להוסיף מתמר זרם ללחץ (i/P) בין בקר ושסתום, כפי שהוסבר כבר בקטע 2.3. מתמר זה אינו מצויר בציורים הבאים, למען הפשטות, וממילא דרך מימוש של הבקר אינה משפיעה על הפתרונות, כי בכל התרגילים, אות התיקון m מנורמל ומבוטא באחוזים.

(2-1)

נתוני המערכת המתוארת בציור 2-9 הם כדלקמן:

תחום המדידה: $100^o - 300^oC$ ערך רצוי $= 250^oC$ משוואת הבקר: $m = 10e + 60$

עבור עומס I: $e = 0$, $m = 60\%$

עבור עומס II: כאשר m נשאר 60% (כלומר, בלי בקרה), הטמפרטורה עולה ל- 300^oC. כדי להחזיק את הטמפרטורה ב- 250^oC, צריך להוריד את m ל- 50%.

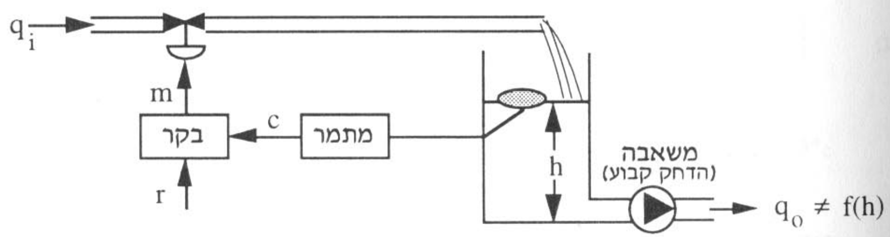
א. מצא את הסטיה במצב המתמיד (הסט) עבור עומס II.

ב. בכמה צריך להגדיל את K כדי להחזיק את $|e| < 1^oC$?

ג. כאשר K=10 (כמו בהתחלה), מצא את ההסט עבור עומס II אם מגדילים את הערך הרצוי ל- 260^oC.

(2-2)

הציור מתאר תהליך בקרת מפלס.



תחום המדידה: 5 - 7 m ערך רצוי = 6 m בקר פרופורציונלי עם הגבר K = 2.

<u>תכונות השסתום</u>: כאשר $m = 0$, $q_i = 0$, וכאשר $m = 100\%$, $q_i = 6m^3/min$

מותר להניח שהשסתום ליניארי, כלומר, q_i יחסי ל- m.

<u>עבור עומס I</u>: $q_o = 3m^3/min$ ו- $e = 0$. <u>עבור עומס II</u>: $q_o = 4m^3/min$

א. מצא את ה- h שמתקבל במצב-מתמיד בעומס II.

ב. בכמה צריך להגדיל את K כדי להחזיק את $|e| < 0.10$ m ?

ג. בהנחה שאין אפשרות להגדיל את K מעל K = 2 בגלל אי-יציבות המערכת, מה העומס q_o המקסימלי המותר, כדי להחזיק את $|e| < 0.10$ m ?

ד. <u>עבור עומס I</u>, מצא את ה- h , שמתקבל במצב-מתמיד, כאשר מגדילים את הערך הרצוי ל- 7 m .

<u>רמז</u>: התהליך הנ"ל בלי ויסות עצמי. לכן, אין קשר אלגבראי בין q_i ו- h במצב מתמיד. במקום משוואת התהליך, יש להשתמש בתכונות השסתום הרשומות לעיל, וכמו כן בעובדה שבמצב מתמיד q_i חייב להיות שווה ל- q_o .