

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסת חשמל



מעבדה 1,1 ח'

מגברי שרת 2

מעגלים מתקדמים עם מגברי שרת

חומר רקע

גרסה 2.2

אביב 2017

מחבר:

אברהם קפלן, דודי בר-און

על פי חוברת של יאן לרון מ 2009

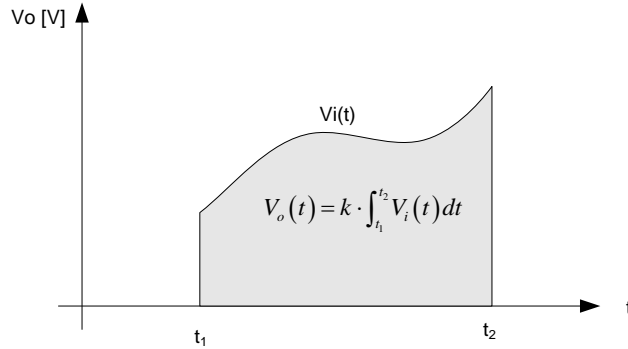
תוכן עניינים

4	אינטגרטור אנלוגי	1
4	מבוא	1.1
4	ניתוח המעגל	1.2
6	אינטגרטור משופר	1.3
8	איפוס תקופתי של האינטגרטור	1.4
9	משווים אנלוגיים	2
9	מבוא	2.1
9	מעגלי משווים פשוטים	3
9	משווה רמת 0 שומר מופע	3.1
10	משווה רמת 0 הופך מופע	3.2
12	משווה שומר מופע	3.3
13	משווה הופך מופע	3.4
15	מעגלי משווים מתקדמים	4
15	משווים עם היסטרזיס (עקום חשל)	4.1
18	משווה שומר מופע עם היסטרזיס	4.2
20	משווה הופך מופע עם היסטרזיס	4.3
22	מחולל גל ריבועי ומשולש עם מגברי שרת/משווים אנלוגיים	5
22	מחולל גל מרובע בסיסי	5.1
25	מחולל גל ריבועי ומשולש	6
27	שינוי גורם מחזור DUTY CYCLE	6.1

1 אינטגרטור אנלוגי

1.1 מבוא

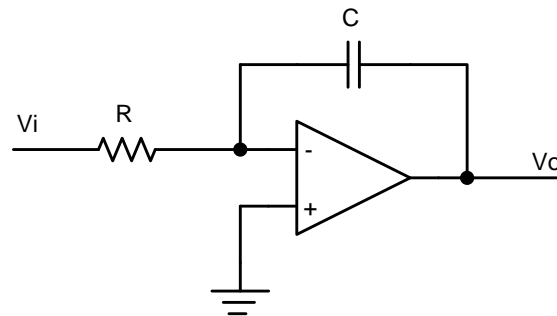
פעולת אינטגרציה לפונקציה מסוימת היא מציאת השטח המוגבל בין עקום הפונקציה לבין הציר האופקי. במעגל אינטגרטור אלקטרוני מתח המוצא $V_o(t)$ יחסי לאינטגרל לפי הזמן של מתח המבוא $V_i(t)$. מתח המוצא $V_o(t)$ יחסי לשטח המוגבל בין עקום מתח המבוא $V_i(t)$ לבין ציר הזמן כמתואר באיור 1-א:



איור 1-א תיאור פעולת אינטגרציה על מתח המבוא

מעגלי אינטגרציה נפוצים מאוד במעגלי חישוב שונים, מעגלי עיבוד אותות, הפיכת אות חילופין לאות ישר, מחוללים של גל משולש, מסננים ועוד.

מעגל אינטגרטור אלקטרוני בסיסי מבוסס מגבר שרת מתואר באיור 1-ב:



איור 1-ב מעגל אינטגרטור בסיסי

1.2 ניתוח המעגל

את ניתוח המעגל שאיור 1-ב נבצע תוך הנחת מגבר שרת אידיאלי. מתח בכניסה הופכת של המגבר שווה לאפס (אדמה וירטואלית) בגלל משוב שלילי המאלץ שיוויון בין מתחי המבוא.

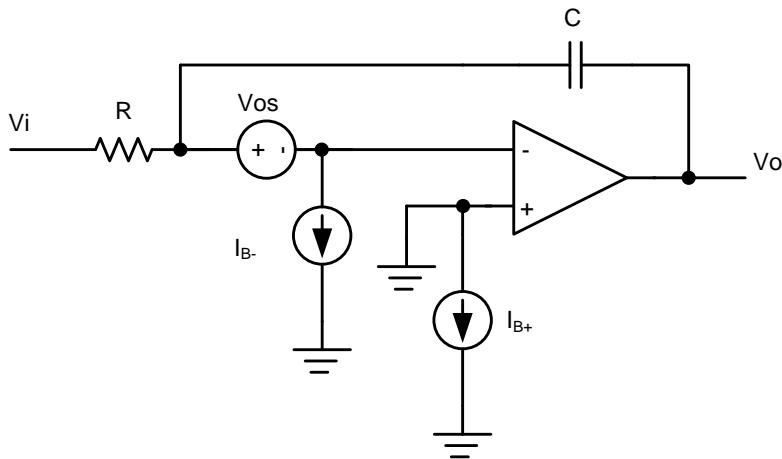
$$\frac{0 - V_i(t)}{R} + C \frac{d(0 - V_o(t))}{dt} = 0$$

$$-\frac{V_i(t)}{R} - C \frac{dV_o(t)}{dt} = 0, \quad \frac{dV_o(t)}{dt} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot V_i(t)$$

ע"י אינטגרציה של המשוואה האחרונה נקבל:

$$V_o(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t V_i(t) dt$$

בפועל הפעלת המעגל המתואר באיור 1-ב גורמת לרוויה מיידית של המגבר. הרוויה נגרמת עקב הפרמטרים המעשיים של המגבר שהשפעתם מאוד דומיננטית במקרה של אינטגרטור. ננתח את פעולת מעגל האינטגרטור פעם נוספת תוך התחשבות בפרמטרי DC של מגבר שרת: מתח היסט Offset Voltage וזרמי ממתח Bias Current. מעגל אינטגרטור עם מגבר מעשי מתואר באיור 1-ג:



איור 1-ג מעגל אינטגרטור עם מגבר מעשי

ניתוח המעגל בשיטת סופרפוזיציה מביא לקשר הבא:

$$V_o(t) = V_o(0) - \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t V_i(t) dt + \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t V_{os} dt + \frac{1}{C} \int_0^t I_{B-} dt$$

מתח V_{os} וזרם I_{B-} הם גדלים קבועים ולכן נקבל נוסחה פשוטה יותר:

$$Q = CV$$

$$I \cdot T = CV$$

$$(I_{B-} + V_{os}/R)T = CV$$

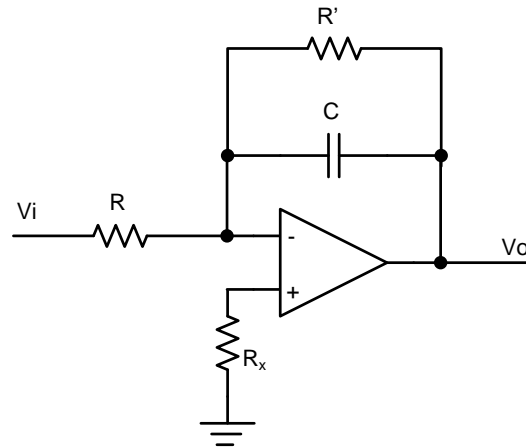
קיבלנו פונקציה ליניארית שגדלה עם הזמן. זאת הסיבה שהמגבר נכנס לרוויה (חיובית או שלילית) מיד עם הפעלת מתחי אספקה.

ניתן למנוע את כניסת המגבר לרוויה באמצעות שלוש השיטות הבאות:

1. הוספת נגד במקביל לקבל.
2. איפוס תקופתי של הקבל.
3. שימוש במגברים בעלי מתחי היסט נמוכים מאוד וזרמי ממתח זניחים.

1.3 אינטגרטור משופר

באיור 1-7 מתואר אינטגרטור עם נגד משוב R' ונגד R_x בין כניסה לא הופכת לאדמה.



איור 1-7 אינטגרטור משופר עם נגד משוב R' ונגד קיזוז R_x

הוספת נגד R_x שערכו שווה ל- $(R \parallel R')$ מצמצמת את הביטוי $\frac{1}{C} \cdot \int_0^t I_{B-} dt$ לביטוי $\frac{1}{C} \cdot \int_0^t I_{os} dt$. זרם היסט I_{os} קטן יותר מזרם ממתח I_{B-} .

הוספת נגד משוב R' מקטינה את הגבר מתח ההיסט מהגבר $\rightarrow \infty \left(1 + \frac{Z_c}{R}\right)$ להגבר $\left(1 + \frac{R'}{R}\right)$.

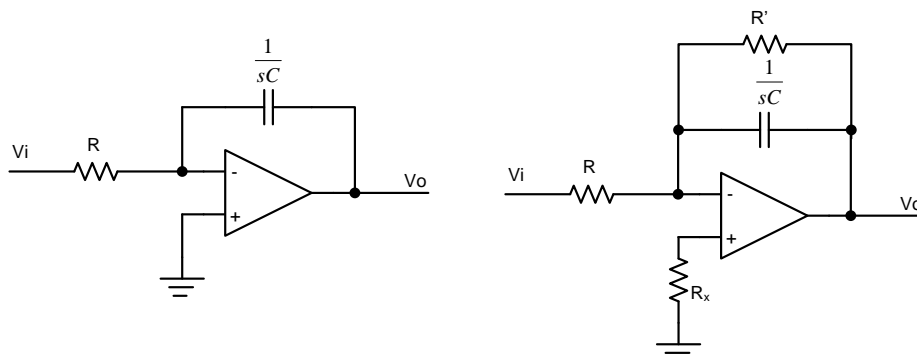
בפועל ההגבר מוגבל ע"י הגבר חוג פתוח $A_{OL}(0)$ שערכו הטיפוסי נע בין 50000 לבין 10^6 .

הוספת נגד R' גורמת להגבר סופי של מתח ההיסט ולכן מגבר שרת לא יכנס לרוויה. זרם ממתח I_{B-} יזרום במצב מתמיד דרך נגד R' ולכן מתח המוצא שווה ל:

$$V_o(t) = V_o(0) - \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t V_i(t) dt + \left(1 + \frac{R'}{R}\right) \cdot V_{os} + R' \cdot I_{os}$$

הוספת הנגד R' מונעת את רווית המגבר אך מאידך (אין ארוחות חינם!) רוחב הסרט (תחום תדרים בהם המעגל משמש כאינטגרטור) קטן.

כדי להשוות את תגובת התדר של המעגלים, נבצע ניתוח של אינטגרטור אידיאלי ואינטגרטור משופר במישור s (מישור לפלס). העכבה של הקבל היא $\frac{1}{sC}$. באיור 1-ה מתוארים שני אינטגרטורים: בסיסי ומשופר במישור s:



איור 1-ה תיאור אינטגרטורים במישור s

שני המעגלים הם מסוג מגבר הופך בעל הגבר מתח כללי $A_v = -\frac{Z_F}{Z_i}$.

הגבר האינטגרטור הפשוט:

$$A_v = -\frac{1}{s \cdot C} = -\frac{1}{R \cdot C \cdot s}$$

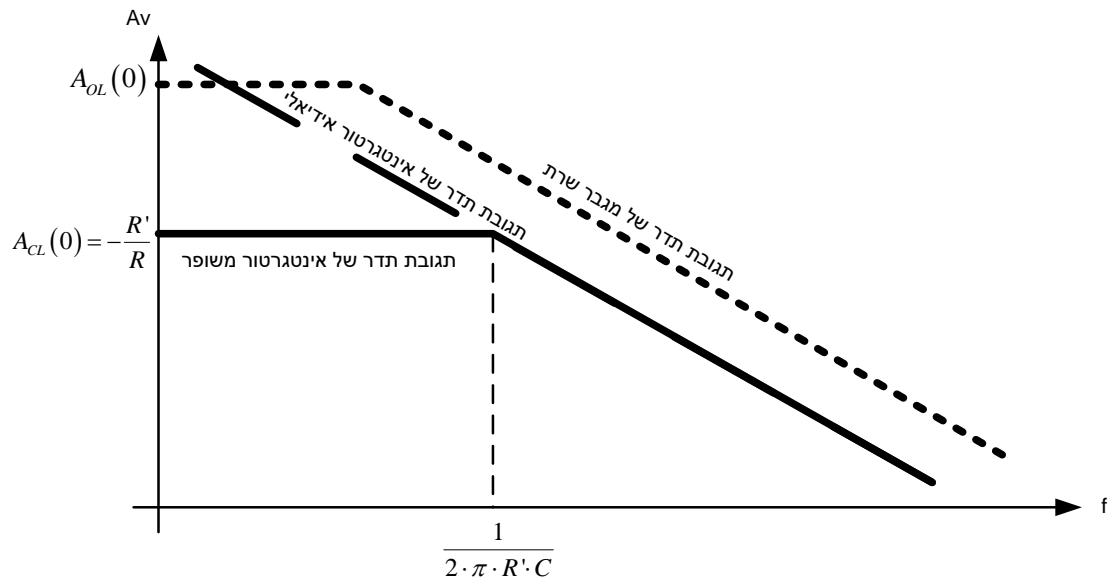
ההגבר שואף לאינסוף כאשר אות מבוא הוא DC ויורד עם התדר (בקצב של 20 dB/dec).

תמסורת של האינטגרטור המשופר:

$$A_v = -\frac{R' \parallel \frac{1}{s \cdot C}}{R} = -\frac{R'}{R \cdot C \cdot s + 1} = -\frac{R'}{R} \cdot \frac{1}{1 + R' \cdot C \cdot s}$$

כאשר התדר נמוך מאוד (DC), ההגבר של המעגל שווה ל- $-\frac{R'}{R}$. קוטב בתדר $\omega = \frac{1}{R' \cdot C}$ גורם לירידת ההגבר בתדרים גבוהים.

באיור 1-1 מתוארות תגובות תדר של מגבר שרת, אינטגרטור אידיאלי ואינטגרטור משופר:



איור 1-1 תגובות תדר של מגבר שרת, אינטגרטור אידיאלי ואינטגרטור משופר

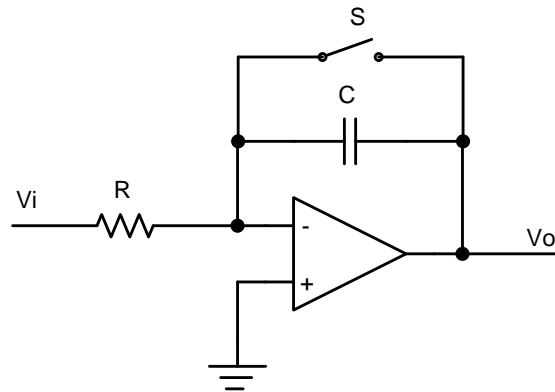
מתוך איור 1-1 רואים שאינטגרטור משופר מבצע פעולת אינטגרציה רק בתדרים הגדולים מ-

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R' \cdot C}$$

אם נגביל את פעולת המעגל לתדרים $f \geq \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot R' \cdot C}$, השגיאה שתיווצר תהיה קטנה מ-5%. ככל שהתדר עולה השגיאה הולכת וקטנה.

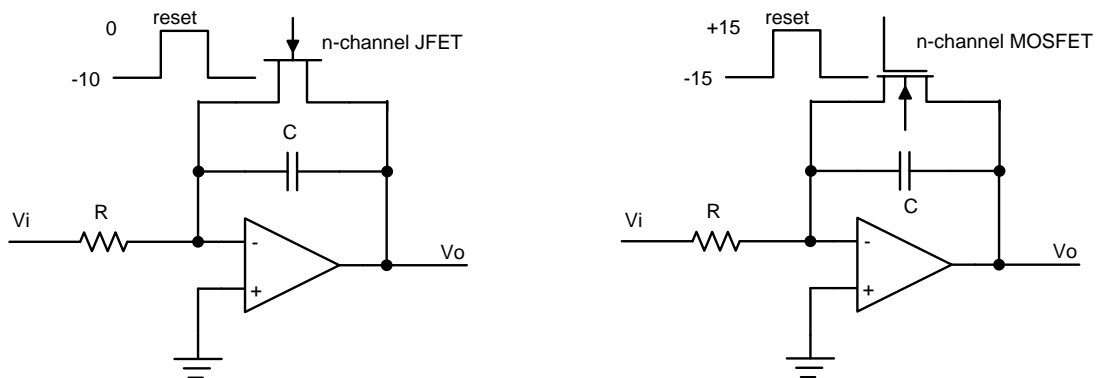
1.4 איפוס תקופתי של האינטגרטור

פתרון נוסף לבעיית כניסת מגבר לרוויה הוא איפוס תקופתי של האינטגרטור. פתרון זה מתאפשר כאשר זמני האינטגרציה קצרים והמערכת פועלת באופן מחזורי (כגון ממירי A/D במכשירי מדידה). אינטגרטור עם מעגל איפוס עקרוני מתואר באיור 1-1:



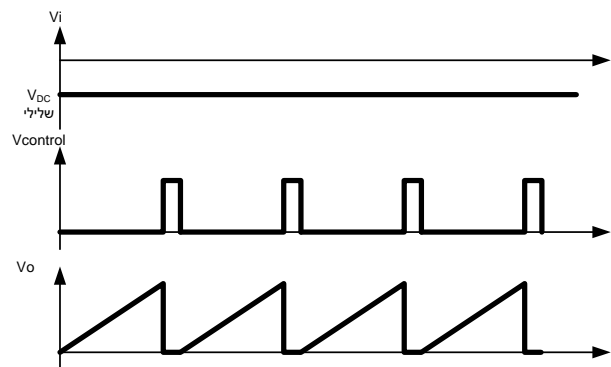
איור 1-1 איפוס אינטגרטור ע"י מתג

במעגלים מעשיים מתג S מוחלף במתג אלקטרוני. בדרך כלל תפקיד זה ממלא טרנזיסטור JFET או MOSFET. מעגלים עם איפוס המשלב טרנזיסטורי FET מתוארים באיור 1-1:



איור 1-1 איפוס קבל באינטגרטור ע"י טרנזיסטורי מיתוג

צורות גלים אופייניות באינטגרטור בעל איפוס מחזורי מבוקר מתג אנלוגי, מתוארות באיור 1-1. מתח מבוא הוא מתח ישר שלילי.



איור 1-1 צורת גלים באינטגרטור בעל איפוס מחזורי

2 משווים אנלוגיים

2.1 מבוא

משווה אנלוגי (Voltage Comparator) הוא רכיב בעל 2 כניסות ויציאה אחת. הרכיב משווה אות מבוא המחובר לכניסה אחת עם אות ייחוס המחובר לכניסה השנייה. יציאת המשווה היא יציאה ספרתית בעלת 2 מצבים בלבד V_L ו- V_H . ניתן להתייחס למשווה אנלוגי כממיר A/D (ממיר אות אנלוגי לאות ספרתי) בעל סיבית אחת.

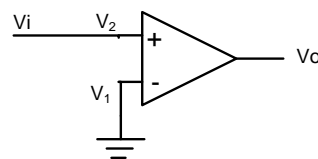
כאשר משתמשים במגברי שרת כמשווים, מתחי היציאה V_L ו- V_H הם מתחי רוויה V_{sat}^+ , V_{sat}^- . מתחי הרוויה מוכתבים ע"י מתחי האספקה V_{CC} , V_{EE} .

3 מעגלי משווים פשוטים

בניתוח משווים נניח שמתחי המוצא נמצאים באחד משני מצבים: V_L או- V_H

3.1 משווה רמת 0 שומר מופע

יציאת המשווה רמת 0 שומר מופע תהיה ברוויה חיובית כל עוד מתח המבוא חיובי. המעגל מתואר באיור 3-א:

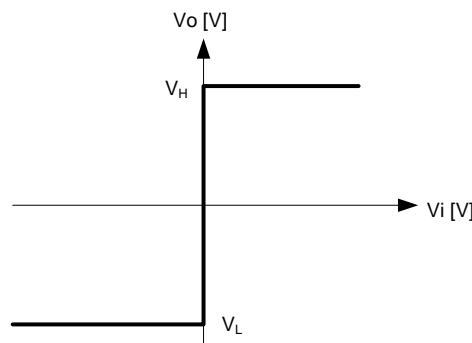


איור 3-א משווה רמת 0 שומר מופע

כאשר מתח המבוא V_i חיובי, המתח בכניסה הלא הופכת גבוה מהמתח בכניסה ההופכת ומתח המוצא שווה ל- V_H .

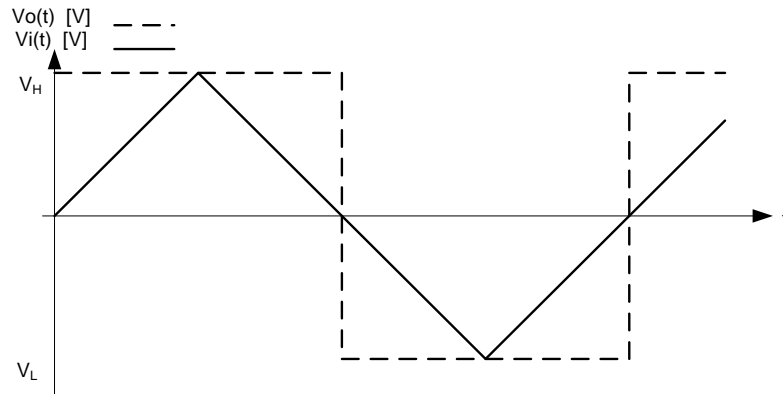
כאשר מתח המבוא V_i שלילי, המתח בכניסה הלא הופכת נמוך מהמתח בכניסה ההופכת ומתח המוצא שווה ל- V_L .

אופיין מעבר של משווה רמת 0 שומר מופע מתואר באיור 3-ב הבא:



איור 3-ב אופיין מעבר של משווה רמת 0 שומר מופע

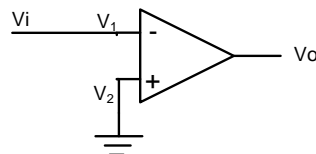
באיור 3-ג מתואר מתח המוצא ומתח המבוא (גל משולש) כפונקציה של זמן:



איור 3-ג צורת מתח מבוא ומתח מוצא במשווה רמת 0 שומר מופע

3.2 משווה רמת 0 הופך מופע

יציאת המשווה רמת 0 הופך מופע תהיה ברוויה חיובית כל עוד מתח המבוא שלילי. המעגל מתואר באיור 3-ד:

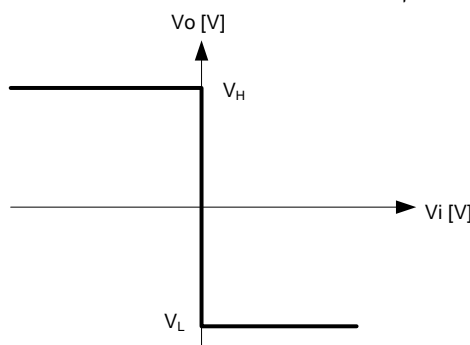


איור 3-ד משווה רמת 0 הופך מופע

כאשר מתח מבוא V_i חיובי, המתח בכניסה הלא הופכת נמוך מהמתח בכניסה הופכת ויציאת המגבר תהיה ברוויה שלילית.

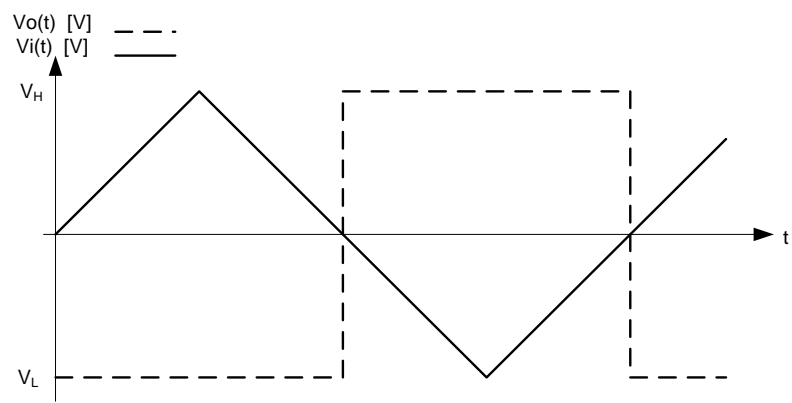
כאשר מתח מבוא V_i שלילי, המתח בכניסה הלא הופכת גבוה מהמתח בכניסה הופכת ויציאת המגבר תהיה ברוויה חיובית.

אופיין מעבר של המשווה רמת 0 הופך מופע מתואר באיור 3-ה:



איור 3-ה אופיין מעבר של המשווה רמת 0 הופך מופע

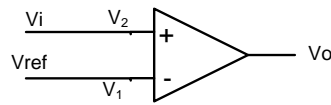
באיור 3-ו מתואר מתח המוצא ומתח המבוא (גל משולש) כפונקציה של זמן:



איור 3-1 צורת מתח מבוא ומתח מוצא במשווה רמת 0 הופך מופע

3.3 משווה שומר מופע

יציאת המשווה שומר מופע תהיה ברוויה חיובית כל עוד מתח המבוא גדול יותר ממתח הייחוס V_{ref} . המעגל מתואר באיור 3-2:

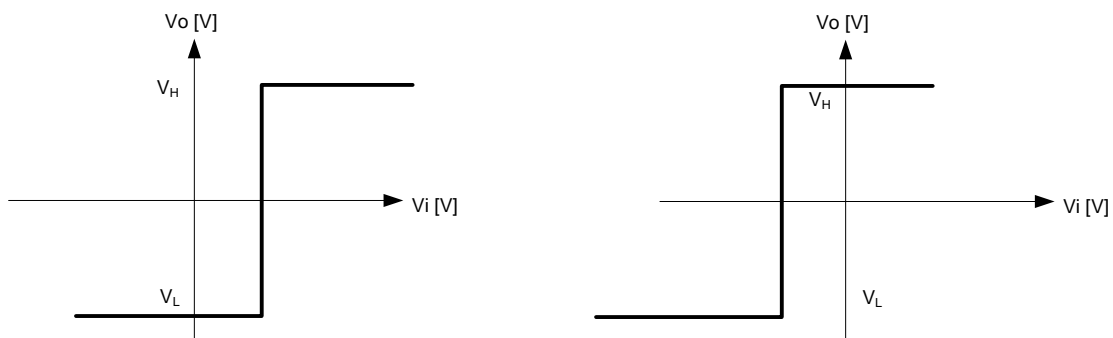


איור 3-2 משווה שומר מופע

כאשר מתח מבוא V_i גדול יותר ממתח הייחוס V_{ref} , המתח בכניסה הלא הופכת גבוה מהמתח בכניסה הופכת ויציאת המגבר תהיה ברוויה חיובית.

כאשר מתח מבוא V_i קטן יותר ממתח הייחוס V_{ref} , המתח בכניסה הלא הופכת נמוך מהמתח בכניסה הופכת ויציאת המגבר תהיה ברוויה שלילית.

אופיין מעבר של המשווה שומר מופע מתואר ב איור 7 מח עבור מתח V_{ref} חיובי ומתח V_{ref} שלילי:

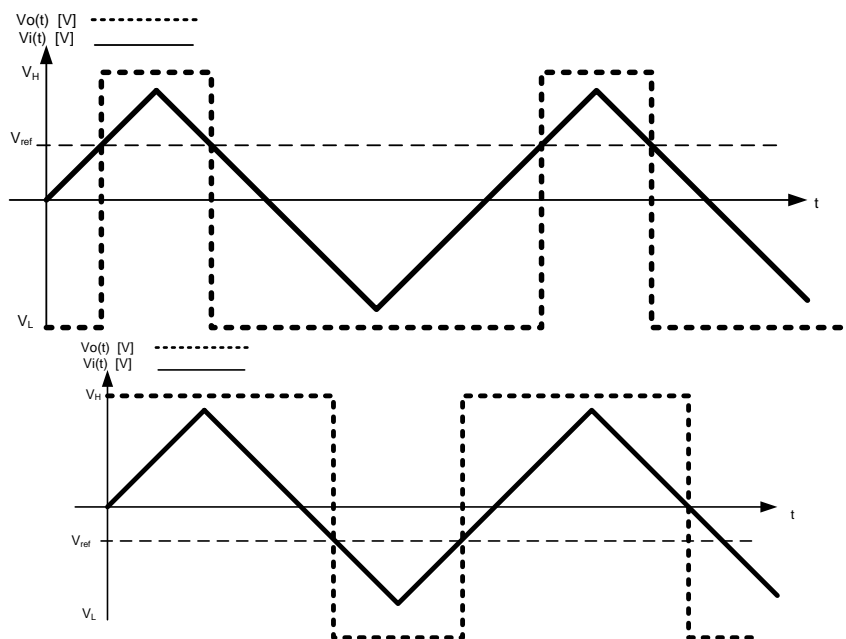


מתח ייחוס חיובי

מתח ייחוס שלילי

איור 3-7 אופיין מעבר של המשווה שומר מופע

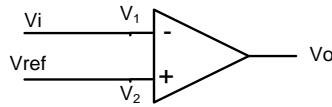
באיור 3-8 מתואר מתח המוצא ומתח המבוא (גל משולש) כפונקציה של זמן עבור שני ערכים של מתח הייחוס V_{ref} :



איור 3-8 צורת מתח מבוא ומתח מוצא במשווה שומר מופע

3.4 משווה הופך מופע

יציאת המשווה הופך מופע תהיה ברוויה חיובית כל עוד מתח המבוא קטן יותר ממתח הייחוס V_{ref} . המעגל מתואר באיור 3-י:

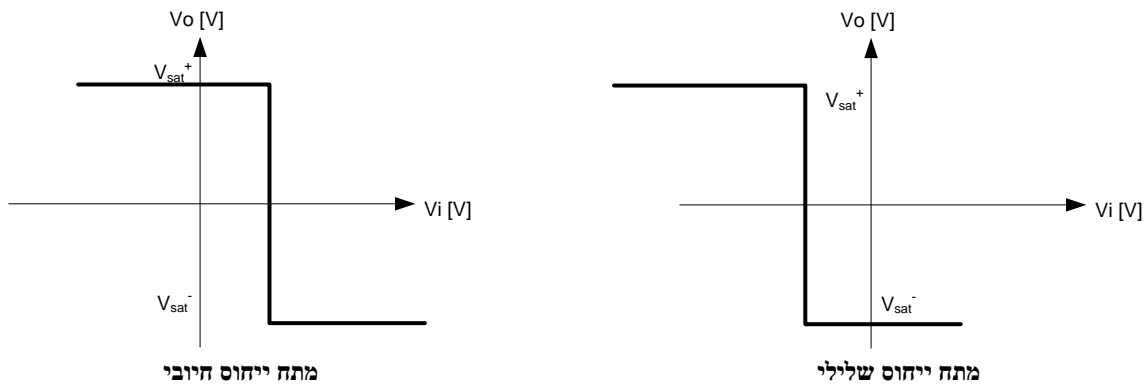


איור 3-י משווה הופך מופע

כאשר מתח מבוא V_i גדול יותר ממתח הייחוס V_{ref} , המתח בכניסה הלא הופכת קטן מהמתח בכניסה הופכת ויציאת המגבר תהיה ברוויה שלילית.

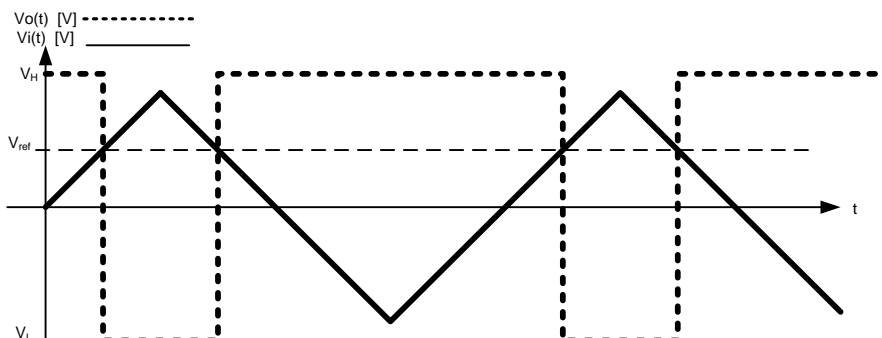
כאשר מתח מבוא V_i קטן יותר ממתח הייחוס V_{ref} , המתח בכניסה הלא הופכת גבוה מהמתח בכניסה הופכת ויציאת המגבר תהיה ברוויה חיובית.

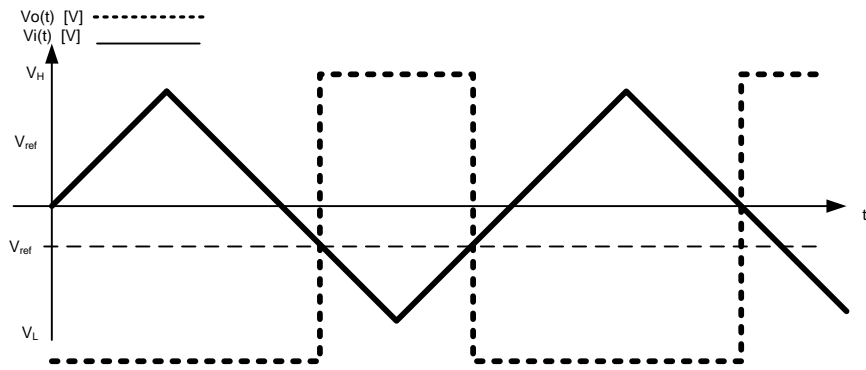
אופיין מעבר של המשווה הופך מופע במתח ייחוס שלילי ובמתח ייחוס חיובי מתואר ב איורים הבאים:



איור 3-יא אופיין מעבר של המשווה הופך מופע

באיור 3-יב מתואר מתח המוצא ומתח המבוא (גל משולש) כפונקציה של זמן עבור שני ערכים של מתח הייחוס V_{ref} :





איור 3-יב צורת מתח מבוא ומתח מוצא במשווה הופך מופע

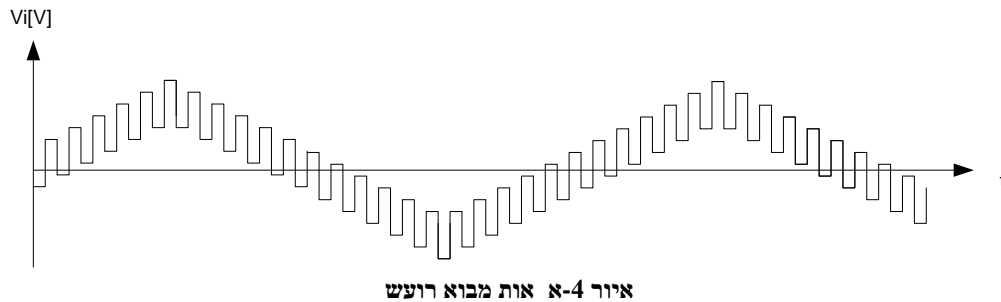
כפי שניתן לראות בשני המעגלים האחרונים, שינוי מתח הייחוס משנה את גורם המחזור Duty Cycle של הגל הריבועי במוצא. ניתן לנצל תכונה זו לבניית מעגל מאפן בשיטת רוחב פולס Pulse Width Modulation. כאשר בכניסה ההופכת נחבר גל משולש בתדר גבוה ובכניסה הלא הופכת נחבר גל מאפן בתדר נמוך יותר במוצא המעגל נקבל גל ריבועי עם Duty Cycle משתנה כפונקציה של אמפליטודה של גל מאפן.

4 מעגלי משוויים מתקדמים

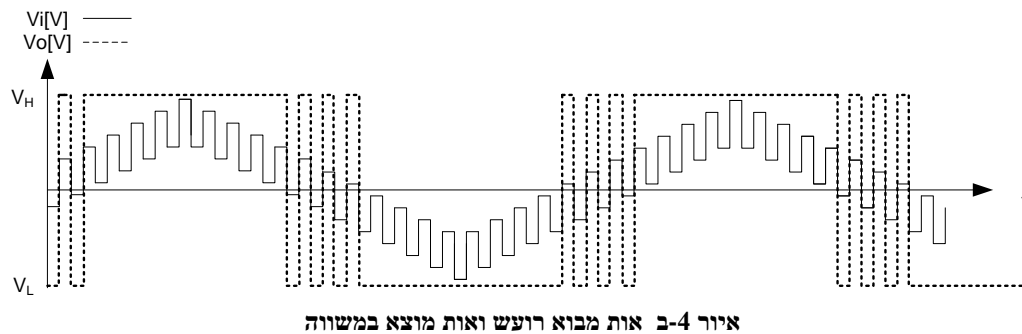
4.1 משוויים עם היסטריזיס (עקום חשל)

כל ארבעת המשוויים שתיארנו עד כה נכשלים בפעולתם כאשר אות מבוא הוא אות רועש. מכיוון וכל אות מעשי מכיל בתוכו רעש, עלינו לתת את הדעת על המגבלות של המשוויים הפשוטים שתיארנו עד כה. בהמשך נראה איך ניתן להתגבר על בעיית הרעשים בעזרת משוויים בעלי משוב חיובי.

תחילה נראה מדוע המשוויים הרגילים אינם יעילים כאשר נוסף רעש לאות המבוא. לשם פשטות נדגים את הבעיה במשווה גלאי רמת 0 שומר מופע. נניח שאות מבוא למשווה זה הוא גל משולש עליו רוכב גל ריבועי בתדר גבוה המייצג את אות הרעש. אות מבוא מתואר באיור 4-א:



כפי שרואים, האות עובר דרך 0 V יותר מפעם אחת. בעקבות זאת סביב מעבר דרך אפס יהיו ריטוטים באות המוצא, כפי שמתואר באיור 4-ב:

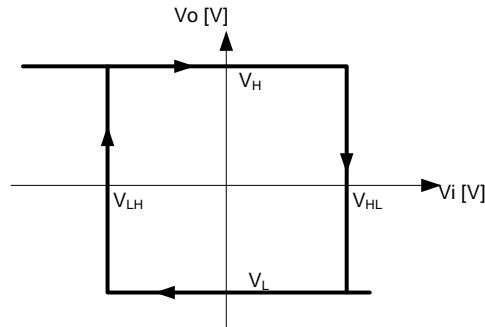


במבט ראשון נראה שישינה הגזמה רבה בגודל הרעש המתלווה לאות המבוא. עלינו לזכור שהמגבר בחוג פתוח ייצא ברוויה חיובית כאשר מתח המבוא גדול מ- $\frac{V_H \cdot V_L}{A_{OL}}$. מספיק אות רעש קטן ביותר על מנת להפר את הפעולה התקינה של המשווה. מכיוון ורעש הוא תופעה אקראית איננו יכולים לפתור את הבעיה ע"י ביטולו.

השיטה המקובלת היא ליצור מעגל אשר מתח המבוא גורם למעבר מרוויה שלילית לרוויה חיובית יהיה שונה ממתח מבוא אשר גורם למעבר מרוויה חיובית לשלילית. במילים אחרות מתח מעבר יהיה פונקציה לא רק של מתח הייחוס אלא גם של מצב המוצא הנוכחי (רוויה חיובית או שלילית).

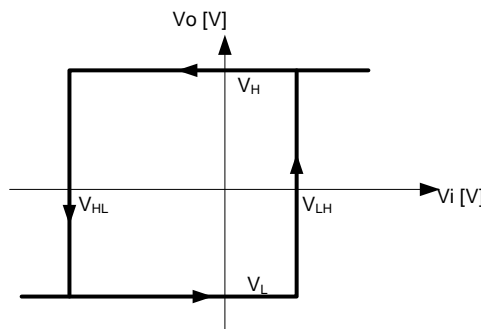
נסמן מתח מבוא הגורם למעבר מרוויה שלילית לחיובית כ- V_{LH} ומתח מבוא הגורם למעבר מרוויה חיובית לשלילית כ- V_{HL} .

אופיין מעבר של משווה בו מתח V_{LH} קטן ממח V_{HL} מתואר באיור 4-ג:



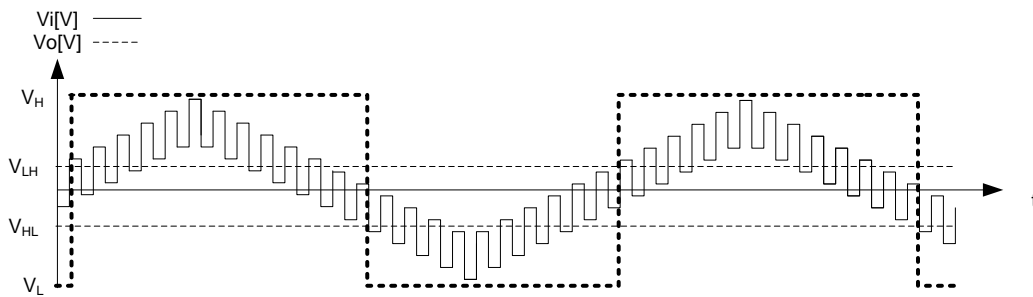
איור 4-ג אופיין מעבר של משווה – $V_{HL} > V_{LH}$

אופיין מעבר של משווה בו מתח V_{LH} גדול ממח V_{HL} מתואר באיור 4-ד:



איור 4-ד אופיין מעבר של משווה – $V_{LH} > V_{HL}$

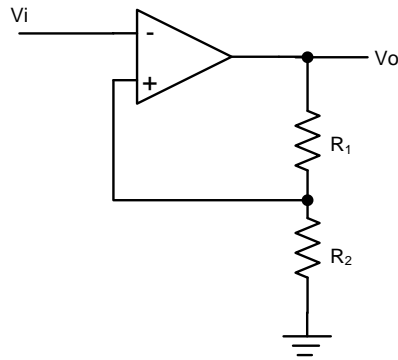
האופייניים המתוארים באיור 4-ג ואיור 4-ד מזכירים לנו את האופיין המגנטי $B=f(H)$. לאופייניים מסוג זה קוראים אופייניים עם עקומת חשל או עקומת היסטריזיס. אם נעביר את האות הרועש (איור 4-ב) דרך משווה בעל אופיין המתואר באיור 4-ג נקבל מעברים חלקים ביציאת המשווה. כמובן שכעת המעברים לא יתרחשו במצב בו $V_i = 0V$ אלא במצב $V_i = V_{LH}$ ו- $V_i = V_{HL}$ כמתואר באיור 4-ה:



איור 4-ה צורת גלים במשווה עם היסטריזיס

אפשר להשוות את פעולת המשווה עם היסטריזיס לפעולת תרמוסטט במקרר אשר מנתק את המנוע (מדחס) בטמפרטורה נמוכה יותר מהטמפרטורה בה הוא מחבר אותו. אם ההפעלה/ניתוק של המדחס היה מכוון לאותה טמפרטורה, המדחס היה נכנס לעבודה ויוצא בתדירות גבוהה – דבר שיגרום לבלאי כמעט מיידי של המדחס.

את המעגל המשווה עם עקומת היסטריזיס נבנה ע"י הוספת משוב חיובי למעגל המשווה. משוב חיובי פירושו לדגום את מתח המוצא ולהחזירו לכניסה הלא הופכת של המגבר. מעגל משווה סביב אפס עם היסטריזיס מתואר באיור 4-ו:



איור 4-1 משווה סביב אפס עם היסטריזיס

מתח מוצא של המשווה יכול לקבל ערכים V_L, V_H . נניח מתח מוצא חיובי:

$$V_o = V_H$$

מתח הייחוס שנוצר בכניסה הלא הופכת שווה ל:

$$V_{(+)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_H$$

כל עוד מתח המבוא קטן ממתח הייחוס, ישמר מצב $V_o = V_H$. ברגע בו מתח המבוא יעלה מעל מתח $V_{(+)}$, מתח המוצא של המשווה יעבור לערך $V_o = V_L$. מתח המבוא גורם למעבר ממתח V_H למתח V_L הוא אם כן:

$$V_{HL} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_H$$

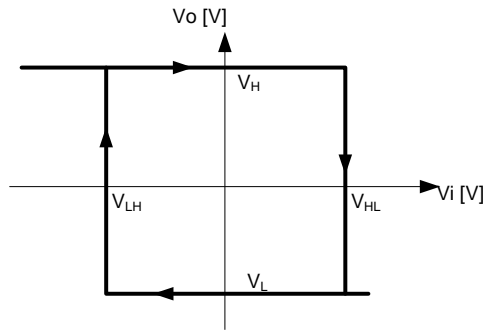
כעת מתח המוצא של המגבר שווה ל- $V_o = V_L$. מתח הייחוס משתנה בצורה אוטומטית ל:

$$V_{(+)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_L$$

מצב זה יישמר עד אשר מתח המבוא ירד מתחת לערך $V_L \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$. נוכל לרשום אם כן כי מתח מבוא הגורם למעבר מרוויה שלילית לחיובית יהיה:

$$V_{LH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_L$$

אופייין מעבר של המעגל נתון באיור 4-ז:



איור 4-ז אופייין מעבר של משוואה היסטריזיס בסיסי

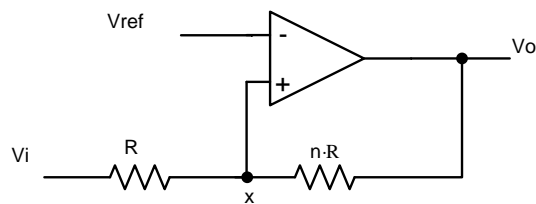
למעגל 3 חסרונות:

1. אפשר להשתמש בו רק כאשר מתחי V_L, V_H הם דו קוטביים.
2. ניתן לקבל במעגל זה רק אופייין הופך מופע (עבור מתח מבוא חיובי מאוד, המגבר נמצא ברוויה שלילית).
3. המעגל משווה סביב 0 וולט בלבד.

נכיר עכשיו שני מעגלים המתגברים על הבעיות של המעגל הקודם.

4.2 משווה שומר מופע עם היסטריזיס

מעגל שומר מופע מתואר באיור 4-ח:



איור 4-ח משווה שומר מופע

לניתוח המעגל נניח תחילה כי מתח המוצא חיובי כלומר:

$$V_o = V_H$$

על מנת לגרום להפיכת מצב, המתח בנקודה x חייב להיות שווה למתח ייחוס V_{ref} .

נרשום את משוואת הזרמים בנקודה x. מתח בנקודה זו יקרא V_x . נרשום משוואת זרמים יוצאים מצומת x:

$$\frac{V_x - V_i}{R} + \frac{V_x - V_o}{n \cdot R} = 0$$

אם נציב $V_x = V_{ref}$ (תנאי למעבר מרוויה חיובית לשלילית) ו- $V_o = V_H$ וכן $V_i = V_{HL}$ נוכל נחליץ את מתח המבוא שגורם למעבר מרוויה חיובית לרוויה שלילית כלומר מתח V_{HL} :

$$\frac{V_{ref} - V_{HL}}{R} + \frac{V_{ref} - V_H}{n \cdot R} = 0; \frac{V_{ref} - V_{HL}}{1} + \frac{V_{ref} - V_H}{n} = 0; n \cdot (V_{ref} - V_{HL}) + V_{ref} - V_H = 0$$

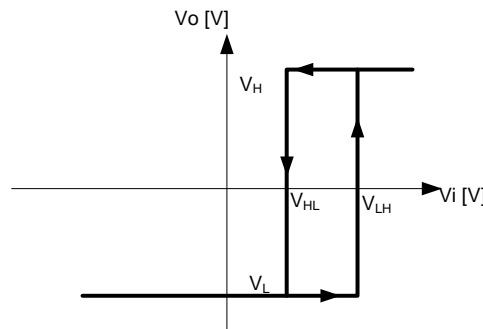
$$n \cdot V_{ref} - n \cdot V_{HL} + V_{ref} - V_H = 0; (n+1) \cdot V_{ref} - V_H = n \cdot V_{HL}$$

$$V_{HL} = \frac{n+1}{n} \cdot V_{ref} - \frac{V_H}{n}$$

אם נניח מתח מוצא שלילי $V_o = V_L$ נמצא באותה דרך שמתח המבוא הגורם למעבר מרוויה שלילית לרוויה חיובית שווה ל:

$$V_{LH} = \frac{n+1}{n} \cdot V_{ref} - \frac{V_L}{n}$$

מכיוון והכניסה מחוברת לכניסה הלא הופכת, אופיין המגבר הוא אופיין שומר כפי שמתואר באיור 4-ט:



איור 4-ט אופיין מעבר של מעגל היסטריזיס שומר מופע

בדרך כלל מציינים שתי גדלים אופייניים של משווה:

א. רוחב חלון היסטריזיס - $V_{hysteresis}$

$$V_{hysteresis} = |V_{LH} - V_{HL}|$$

ב. מתח מרכזי - V_{ctr}

$$V_{ctr} = \frac{V_{HL} + V_{LH}}{2}$$

נציב את מתחי המעבר ונקבל:

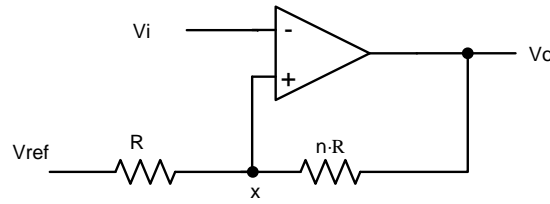
$$V_{hysteresis} = \left| \frac{n+1}{n} \cdot V_{ref} - \frac{V_L}{n} - \frac{n+1}{n} \cdot V_{ref} + \frac{V_H}{n} \right| = \left| \frac{V_H - V_L}{n} \right|$$

$$V_{ctr} = \frac{\left(\frac{n+1}{n} \cdot V_{ref} - \frac{V_L}{n} + \frac{n+1}{n} \cdot V_{ref} - \frac{V_H}{n} \right)}{2} = 2 \cdot \frac{n+1}{2 \cdot n} \cdot V_{ref} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_L}{n} - \frac{V_H}{n} \right)$$

$$V_{ctr} = \frac{n+1}{n} \cdot V_{ref} - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot (V_L - V_H)$$

4.3 משווה הופך מופע עם היסטריזיס

מעגל משווה הופך מופע מתואר באיור 4-4:



איור 4-4 משווה הופך מופע

לניתוח המעגל נבחר תחילה כי מתח מוצא המשווה שווה ל- V_H , כלומר:

$$V_o = V_H$$

על מנת לגרום להפיכת מצב, המתח בנקודה x חייב להיות שווה למתח ייחוס V_{ref} .

נרשום את משוואת הזרמים בנקודה x. מתח בנקודה זו יקרא V_x . נרשום משוואת זרמים יוצאים מצומת x:

$$\frac{V_x - V_{ref}}{R} + \frac{V_x - V_o}{n \cdot R} = 0$$

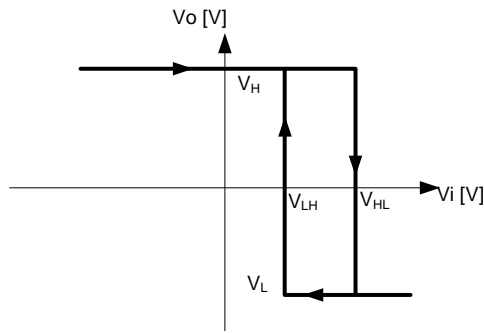
אם נציב $V_x = V_i = V_{HL}$ (תנאי למעבר מרוויה חיובית לשלילית) ו- $V_o = V_H$ נוכל נחליף את מתח המבוא שגורם למעבר מרוויה חיובית לרוויה שלילית כלומר מתח V_{HL} :

$$\begin{aligned} \frac{V_{HL} - V_{ref}}{R} + \frac{V_{HL} - V_{sat}^+}{n \cdot R} &= 0 ; \quad \frac{V_{HL} - V_{ref}}{1} + \frac{V_{HL} - V_H}{n} = 0 ; \quad n \cdot (V_{HL} - V_{ref}) + V_{HL} - V_H = 0 \\ n \cdot V_{HL} - n \cdot V_{ref} + V_{HL} - V_H &= 0 ; \quad (n+1) \cdot V_{HL} = n \cdot V_{ref} + V_H \\ V_{HL} &= \frac{n}{n+1} \cdot V_{ref} + \frac{V_H}{n+1} \end{aligned}$$

באופן דומה, כאשר יציאת המשווה ברוויה שלילית, מתח מבוא הגורם למעבר מרוויה שלילית לחיובית שווה ל:

$$V_{LH} = \frac{n}{n+1} \cdot V_{ref} + \frac{V_L}{n+1}$$

מכוון ומתח V_{HL} גדול ממתח V_{LH} מתקבל אופיין היסטריזיס הופך מופע כמתואר באיור 4-4א:



איור 4-יא אופיין היסטריזיס הופך מופע

חישוב מתח מרכזי ומתח היסטריזיס:

$$V_{hystersis} = \left| \frac{n}{n+1} \cdot V_{ref} - \frac{V_L}{n+1} - \frac{n}{n+1} \cdot V_{ref} + \frac{V_H}{n+1} \right| = \left| \frac{V_H - V_L}{n+1} \right|$$

$$V_{ctr} = \frac{\left(\frac{n}{n+1} \cdot V_{ref} + \frac{V_L}{n+1} + \frac{n}{n+1} \cdot V_{ref} + \frac{V_H}{n+1} \right)}{2} = 2 \cdot \frac{n}{2 \cdot (n+1)} \cdot V_{ref} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_L}{n+1} + \frac{V_H}{n+1} \right)$$

$$V_{ctr} = \frac{n}{n+1} \cdot V_{ref} + \frac{1}{2 \cdot (n+1)} \cdot (V_L - V_H)$$

בשני המעגלים האחרונים קיימת תלות בין המתח המרכזי V_{ctr} ורוחב היסטריזיס $V_{hystersis}$. שינוי המתח המרכזי ישפיע על רוחב ההיסטריזיס ולהפך.

$$V_o \approx V_{CEsat}$$

5 מחוללי גל ריבועי ומשולש עם מגברי שרת/משוויים אנלוגיים

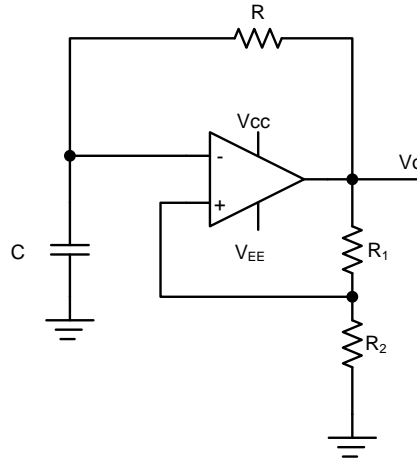
5.1 מחולל גל מרובע בסיסי

בעזרת מגברי שרת/משוויים אנלוגיים ניתן לבנות מחוללי גל ריבועי ומשולש. מחולל הפשוט ביותר הוא מחולל גל ריבועי המורכב

ממגבר שרת/משווה עם משוב

חיובי ומעגל טעינה RC

כמתואר באיור 5-א:



איור 5-א מחולל גל ריבועי פשוט

יציאת המגבר יכולה להימצא באחד משני מצבים: רוויה חיובית V_{sat}^+ ורוויה שלילית V_{sat}^- . נניח שיציאת המגבר נמצאת ברוויה חיובית V_{sat}^+ . המתח בכניסה לא הופכת של המגבר מוכתב ע"י מחלק מתח הבנוי משני נגדים R_1 ו- R_2 . ערכו של המתח בכניסה הלא הופכת שווה ל:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+$$

הקבל C מתחיל להיטען ממתח $0V$ לכוון מתח רוויה חיובי V_{sat}^+ . כאשר מתח הקבל V_c עובר את מתח

הייחוס $V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+$, המתח בכניסה הופכת של המגבר גבוה מהמתח בכניסה לא הופכת והמגבר

עובר לרוויה שלילית. המתח במוצא המגבר שווה ל- V_{sat}^- .

המתח בכניסה לא הופכת משנה את ערכו ל- $V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-$. הקבל מתחיל להתפרק לכוון מתח

רוויה שלילי V_{sat}^- . כאשר מתח הקבל V_c עובר את מתח הייחוס $V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-$, המתח בכניסה

הופכת של המגבר נמוך מהמתח בכניסה לא הופכת והמגבר עובר לרוויה חיובית ומתח הייחוס בכניסה

לא הופכת של המגבר עולה ל- $V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+$. הקבל C מתחיל להיטען לכוון מתח רוויה חיובי

V_{sat}^+ . כאשר מתח הקבל V_c עובר את מתח הייחוס $V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+$, המתח בכניסה הופכת של

המגבר גבוה מהמתח בכניסה לא הופכת והמגבר עובר לרוויה שלילית.

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+ \text{ למתח } V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^- \text{ נטען ממתח}$$

$$\text{ומתפרק ממתח } V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+ \text{ למתח } V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-$$

חישוב זמן טעינה (מצב מתמיד)

$$V_c(0) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-, V_c(\infty) = V_{sat}^+, V_c(t_c) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+, \tau = R \cdot C$$

$$t_c = \tau \cdot \ln \frac{V_\infty - V_0}{V_\infty - V_t} = R \cdot C \cdot \ln \frac{V_{sat}^+ - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-}{V_{sat}^+ - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+}$$

נניח מתחי רוויה סימטריים: $V_{sat}^+ = V_{sat}, V_{sat}^- = -V_{sat}$

$$t_c = R \cdot C \cdot \ln \frac{V_{sat}^+ - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-}{V_{sat}^+ - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+} = R \cdot C \cdot \ln \frac{V_{sat} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}}{V_{sat} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}} =$$

$$= R \cdot C \cdot \ln \frac{V_{sat} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)}{V_{sat} \cdot \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)} = R \cdot C \cdot \ln \frac{2 \cdot R_2 + R_1}{R_1}$$

חישוב זמן פריקה:

$$V_c(0) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+, V_c(\infty) = V_{sat}^-, V_c(t_d) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-, \tau = R \cdot C$$

$$t_c = \tau \cdot \ln \frac{V_\infty - V_0}{V_\infty - V_t} = R \cdot C \cdot \ln \frac{V_{sat}^- - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+}{V_{sat}^- - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-}$$

נניח מתחי רוויה סימטריים: $V_{sat}^+ = V_{sat}, V_{sat}^- = -V_{sat}$

$$t_c = R \cdot C \cdot \ln \frac{V_{sat}^- - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^+}{V_{sat}^- - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}^-} = R \cdot C \cdot \ln \frac{-V_{sat} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}}{-V_{sat} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{sat}} =$$

$$= R \cdot C \cdot \ln \frac{V_{sat} \cdot \left(-1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)}{V_{sat} \cdot \left(-1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)} = R \cdot C \cdot \ln \frac{2 \cdot R_2 + R_1}{R_1}$$

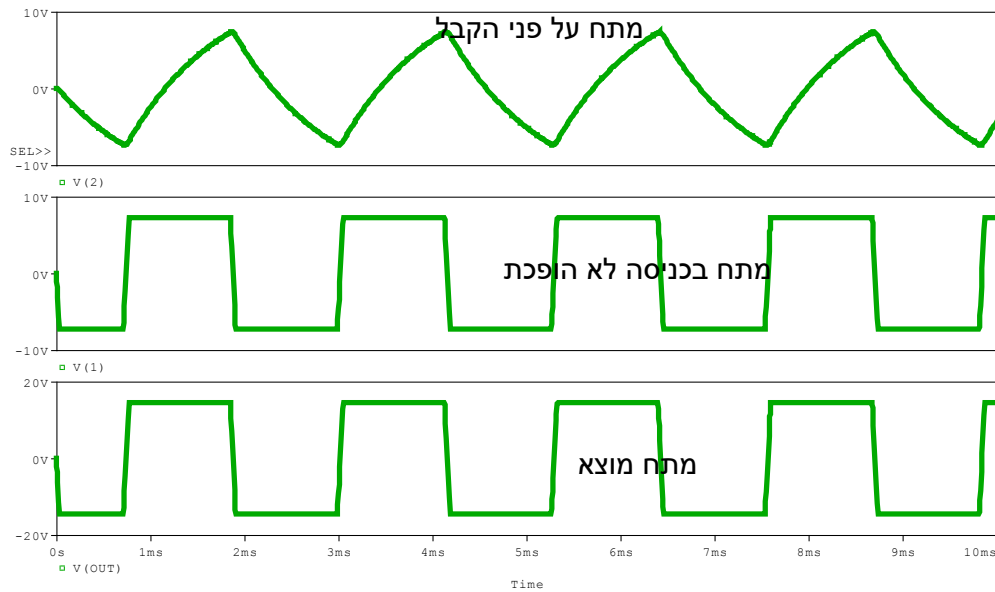
זמן מחזור שווה ל:

$$T = t_c + t_d = R \cdot C \cdot \ln \frac{2 \cdot R_2 + R_1}{R_1} + R \cdot C \cdot \ln \frac{2 \cdot R_2 + R_1}{R_1} = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln \frac{2 \cdot R_2 + R_1}{R_1}$$

תדר תנודות שווה ל:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C \cdot \ln \frac{2 \cdot R_2 + R_1}{R_1}}$$

צורות גלים במתנד גל ריבועי מתוארות באיור 5-ב:

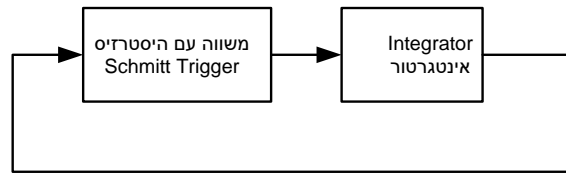


איור 5-ב צורות גלים: מתח מוצא $V_o(t)$, מתח הקבל $V_c(t)$ ומתח הייחוס $V_+(t)$

$$\text{Duty Cycle} = \alpha$$

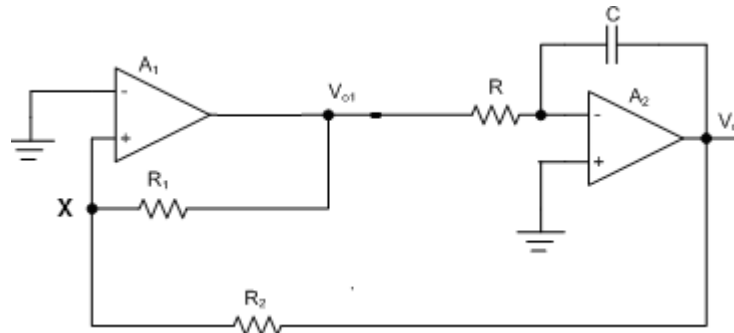
6 מחולל גל ריבועי ומשולש

בעזרת שני מגברי שרת (או מגבר שרת ומשווה) ניתן לבנות מחולל גל ריבועי וגל משולש בו זמנית. החלק הראשון של המעגל מורכב ממשווא בעל משוב חיובי המפיק גל ריבועי. החלק השני של המעגל הוא אינטגרטור ההופך את הגל הריבועי לגל משולש. תרשים מלבנים של המתנד מתואר באיור 6-א:



איור 6-א תרשים מלבנים של מתנד גל ריבועי ומשולש

מחולל גל ריבועי ומשולש מתואר באיור 6-ב:



איור 6-ב מחולל גל משולש וריבועי

המתח במוצא המגבר השמאלי מחליף מצב (מעבר מרוויה חיובית לרוויה שלילית) כל פעם שהמתח בכניסה לא הופכת של המגבר השמאלי עובר דרך 0 וולט. נניח שבזמן $t = 0^-$ יציאת המגבר V_{o1} , נמצאת ברוויה חיובית, V_{sat} . ברגע שלפני החלפת המצב נוכל לרשום משוואת זרמים בצומת x:

$$\frac{0 - V_{sat}}{R_1} + \frac{0 - V_{o2}}{R_2} = 0, V_{o2} = -V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

באופן דומה, אם נניח שמוצא המגבר השמאלי נמצאת ברוויה שלילית, $-V_{sat}$. ברגע שלפני החלפת המצב נוכל לרשום משוואת זרמים בצומת x:

$$\frac{0 + V_{sat}}{R_1} + \frac{0 - V_{o2}}{R_2} = 0, V_{o2} = V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

כאשר מוצא המגבר השמאלי עולה מ- $-V_{sat}$ ל- $+V_{sat}$. המתח במוצא האינטגרטור נתון ע"י המשוואה הבאה:

$$\begin{aligned} V_{o2}(t) &= V_{o2}(0^-) - \frac{1}{R \cdot C} \int_0^t V_{o1}(t) dt = -V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{R \cdot C} \int_0^t -V_{sat} dt = \\ &= -V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot V_{sat} \cdot t = V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

זמן העלייה שווה ל:

$$-V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot V_{sat} \cdot t = V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{1}{R \cdot C} \cdot V_{sat} \cdot t = 2 \cdot V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1}, \quad t = \frac{2 \cdot (R \cdot C) \cdot R_2}{R_1}$$

כאשר מוצא המגבר השמאלי נמצא ברוויה שלילית, מתח V_{o1} יורד מ- $+V_{sat}$ למתח $-V_{sat}$. המתח במוצא האינטגרטור נתון ע"י המשוואה הבאה:

$$V_{o2}(t) = V_{o2}(0^-) - \frac{1}{R \cdot C} \int_0^t -V_{o1} dt = V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{R \cdot C} \int_0^t V_{sat} dt =$$

$$= V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{R \cdot C} \cdot V_{sat} \cdot t = V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

זמן הירידה שווה ל:

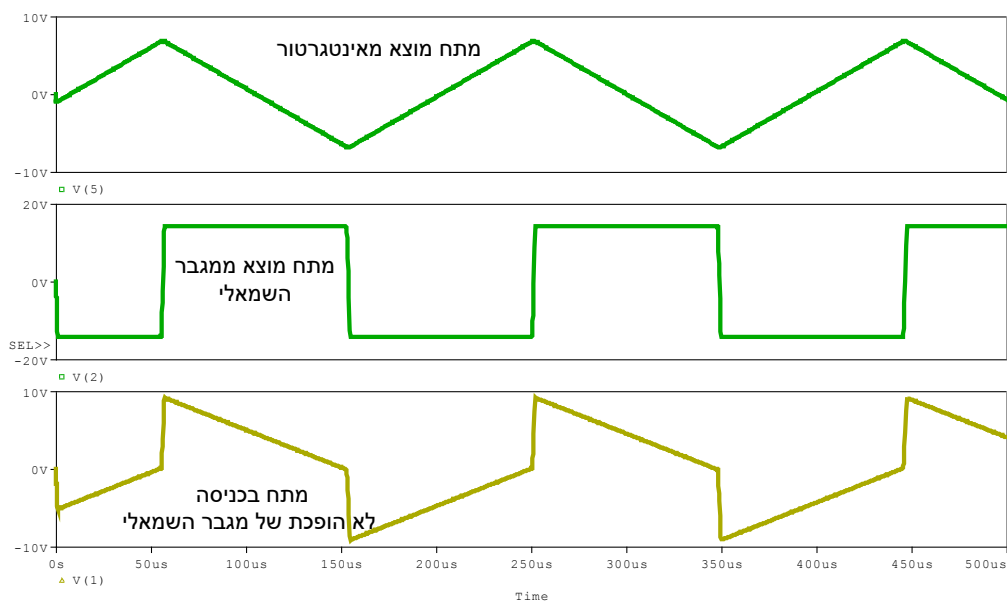
$$V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{R \cdot C} \cdot V_{sat} \cdot t = -V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{1}{R \cdot C} \cdot V_{sat} \cdot t = 2 \cdot V_{sat} \cdot \frac{R_2}{R_1}, \quad t = \frac{2 \cdot (R \cdot C) \cdot R_2}{R_1}$$

זמן המחזור ותדר התנודות במתנד שווים ל:

$$T = t_r + t_f = \frac{4 \cdot R_2}{R_1} \cdot R \cdot C, \quad f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\frac{4 \cdot R_2}{R_1} \cdot R \cdot C},$$

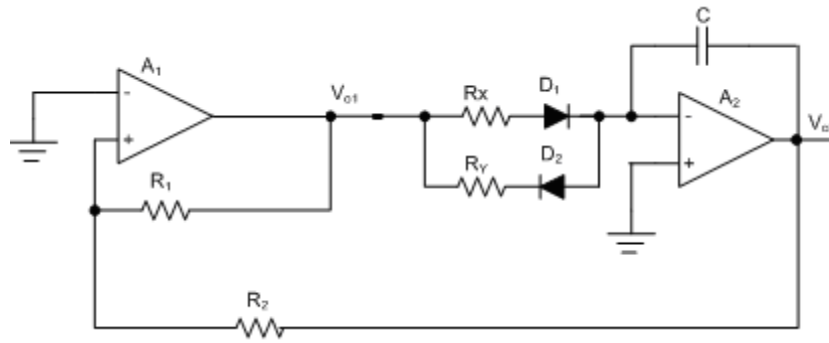
צורות הגלים במעגל מתוארות באיור 6-ג:



איור 6-ג צורות גלים במתנד גל משולש/ריבועי

6.1 שינוי גורם מחזור DUTY CYCLE

להפקת גל משולש/ריבועי עם גורם מחזור שונה מ- 50% ניתן להחליף את נגד האינטגרטור בשני מסלולי זרימה (בדומה לפעולה שבצענו במחולל גל ריבועי) כמתואר באיור 6-ד:

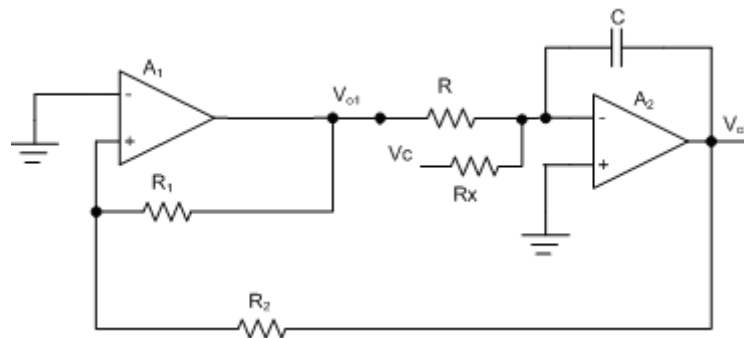


איור 6-ד מעגל מחולל אותות עם גורם מחזור שונה מ- 50%

טעינת הקבל תתבצע דרך נגד R_y ודיודה D_2 . פריקת הקבל תתבצע דרך נגד R_x ודיודה D_1 . זמני טעינה ופריקה (בהזנחת מפלי מתח על הדיודות) שווים ל:

$$t_c = \frac{2 \cdot R_2}{R_1} \cdot (R_y \cdot C), t_d = \frac{2 \cdot R_2}{R_1} \cdot (R_x \cdot C), D.C. = \frac{t_c}{T} \cdot 100 = \frac{R_x}{R_x + R_y} \cdot 100 [\%]$$

ניתן לשלוט על גורם המחזור ע"י מתח בקרה $V_{control}$ כמתואר באיור 6-ה:



איור 6-ה מחולל גלים עם מתח בקרה

בהנחה ש- $R = R_x$ נקבל:

$$t_{1'} = \frac{2 \cdot V_{sat}}{V_{sat} + V_{control}} \cdot \frac{R_2 \cdot R \cdot C}{R_1}, t_{0'} = \frac{2 \cdot V_{sat}}{V_{sat} - V_{control}} \cdot \frac{R_2 \cdot R \cdot C}{R_1}$$

תנאי להפעלה תקינה של המעגל הוא:

$$|V_{sat}| > |V_{control}|$$