



הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
Technion – Israel Institute of Technology

ספריות הטכניון
The Technion Libraries

בית הספר ללימודי מוסמכים ע"ש ארווין וג'ואן ג'ייקובס
Irwin and Joan Jacobs Graduate School

©

All rights reserved

*This work, in whole or in part, may not be copied (in any media), printed, translated, stored in a retrieval system, transmitted via the internet or other electronic means, except for "fair use" of brief quotations for academic instruction, criticism, or research purposes only.
Commercial use of this material is completely prohibited.*

©

כל הזכויות שמורות

אין להעתיק (במדיה כלשהי), להדפיס, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, להפיץ באינטרנט, חיבור זה או כל חלק ממנו, למעט "שימוש הוגן" בקטעים קצרים מן החיבור למטרות לימוד, הוראה, ביקורת או מחקר. שימוש מסחרי בחומר הכלול בחיבור זה אסור בהחלט.

מסננים - מסלולים למחצה

חבור על עבודה-גמר

לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת החוואר
מגיטטר למדעים
בהנדסת חשמל

מאח

אריה רייכמן

הוגש לסנט של הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
תמוז תשל"ה ח י ט ה יולי 1975

409

עבודה זאת נעשתה בהנחיית דר' ד. מלאך בפקולטה
להנדסת חשמל, הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל.

תודתי נתונה לדר' מלאך אשר הנחה אותי במשך
בצוע העבודה וכמו כן לדר' WUPPER H. אשר
עדכן אותי בתוצאות עבודתו בשטח זה.

תוכן העניינים

עמוד

1	.....	תקציר
2	.....	רשימת סמלים וקצורים
5	.....	פרק 1 - מבוא
6	.....	פרק 2 - מסנן N מסלולי
6	.....	2.1 תכונות המסנן N מסלולי
6	.....	2.2 חאור המסנן N מסלולי
8	.....	2.3 מסנן N מסלולי עם אפנון דופק
12	.....	2.4 חטרונות של מסנן N מסלולי
13	.....	פרק 3 - מסנן N מסלולי למחצה
13	.....	3.1 מבוא
15	.....	3.2 פונקציית תמסורת
18	.....	3.3 מסנן N מסלולי למחצה ממומש בעזרת רגיסטר אנלוגי
21	.....	3.4 התנהגות בלתי אידאלית של הרגיסטר האנלוגי
24	.....	3.5 הוספת מסיט פאזה במשוב המסנן
26	.....	פרק 4 - מסנן N מסלולי רבועי
26	.....	4.1 הגדרה. פונקציית תמסורת
29	.....	4.2 מסנן N- מסלולי רבועי לא אידאלי
30	.....	פרק 5 - תוצאות נסויים
30	.....	5.1 הסבר כללי
31	.....	5.2 כוון הרגיסטר האנלוגי
34	.....	5.3 מערך הבדיקה
35	.....	5.4 מסנן N- מסלולי למחצה (PNF)
38	.....	5.5 מסנן N- מסלולי למחצה עם מהפך PNF1
41	.....	5.6 מסנן N- מסלולי למחצה רבועי QPNF
44	.....	5.7 סנון אות מחזורי מתוך רעש
46	.....	5.8 מסקנות מהנסויים

תוכן העניינים (המשך)

עמוד

47 נספח א' - הקשר בין הכניסה והיציאה של מסנן N- מסלולי

..... נספח ב' - פונקציה המערכת של מסנן N- מסלולי למחצה בעל רשת בסיסית

49 שומרת על מצבה כאשר הכניסה והיציאה שלה מנוחקות

54 נספח ג' - מסנן N- מסלולי למחצה RO

56 מקורות

ת ק צ י ר

רשתות שאינן קבועות בזמן מאפשרות ממוש פונקציות תמסורה מיוחדות בעלות עקום ההענות שנחן לבקרו בצורה אלקטרונית, בעבודה, זאת מבוצעת סקירה של חכונות ומומשים של מסננים N- מסלוליים ו-N- מסלוליים למחצה אשר באמצעותם משיגים עקום ההענות מחזורי וכך מומשו מספר סוגי מסננים אלו. המסננים הנסקרים הם:

א. מסנן N- מסלולי - NF - N-PATH FILTER - מורכב מחבור במקביל של N רשתות זהות קבועות בזמן (הנקראות "רשתות בסיסיות") והנמצאות כל אחת בין מאפנן כניסה ומאפנן יציאה. במקרה הפרטי של מסנן זה הרשתות הבסיסיות נמצאות בין מפטקים הממוחברים בצורה מחזורית בתדר ω_0 . עקום ההענות של הרשת הבסיסית מועתק במחזוריות שניב תדרים מרכזיים שהם כפולות של ω_0 . החסרונות של המסנן N- מסלולי הם בכך שהערוצים חייבים להיות זהים ובעובדה שחדר המחוג ω_0 לא ניתן לסנון במקרה והוא זולג לחוץ מסלול האות.

ב. המסנן N- מסלולי למחצה - PNF - PSEUDO N - PATH FILTER - נגזר מחוץ המסנן מסלולי אך מכיל רק רשת בסיסית אחת המחליפה את הרשת הפעילה ב-NF (הרשת המחוברת לכניסה וליציאה ברגע מסויים על ידי מפטקים). הרשתות הבלתי פעילות מוחלפות ברגיסטרים אנלוגיים. הרגיסטר האנלוגי מסוגל לאגור ולהעביר מידע אנלוגי ומשמש כזכרון למחחי הקבלים של הרשת הבסיסית. זהו רכיב חדיש הפועל בשיטה של "סוללת דליים" BUCKET BRIGADE או בשיטה התקני צמוד מטען CHARGE COUPLED DEVICES ותרונות המסנן ה-N מסלולי למחצה על פני המסנן NF מתבטאים בכך שהאות כולו עובר באותו מסלול וחדר המחוג ניתן בקלות לסנון. החסרונות של PNF נובעות מהפעולה הבלתי אידאלית של הרגיסטר האנלוגי הגורמת לשינויים של אמפליטודה פסי המעבר, רוחב הסרט והחדר המרכזי שלהם.

ג. הוספת מחפך בחוג המשוב של PNF גורמת להזזת פסי המעבר של עקום ההענות ב- $\frac{\omega_0}{2}$. למסנן הזה קראנו מסנן N- מסלולי למחצה עם מחפך-PNF1 - PSEUDO N-PATH FILTER WITH INVERTER

ד. נסיון נוסף לשנות את עקום ההענות של PNF נעשה על ידי מתוג נוסף שהופך לסרוגיין את קוטביות מתח הכניסה והיציאה בתדר $\frac{\omega_0}{N}$. המסנן נקרא מסנן -N מסלולי למחצה רבועי - QPNF - QUADRATURE N-PATH FILTER מתברר שעקום ההענות המתקבל דומה לזה של PNF1 אך הממוש הוא מסורבל הרבה יותר ותכונותיו משתנות מאוד עם הזמן.

במסגרת עבודה זאת מומשו PNF, PNF1 ו-QPNF ממוש PNF ו-PNF1 הוא פשוט יחסית. את צורת עקום ההענות אפשר לבקר בצורה אלקטרונית: שנוי תדר המתוג משנה את מקום התדרים המרכזיים ושנוי הגבר החוג משנה את אמפליטודה פסי המעבר, שמוש אפשרי של המסננים הוא סנון אות מחזורי מתוך רעש והוא הודגם במסגרת העבודה.

רשימת סמלים וקיצורים

a - החלק של הזמן מתוך T/N שבו המפסק סגור

A - אמפליטודה של אות כניסה

A_n - מקדמי פרוק פוריה של $e(t)$

B_1, B_2 - סמוני עזר

C_1, \dots, C_k, C - קבלי הרשת הבסיסית

$e(t)$ - אות הכניסה

$E(s), E(j\omega)$ - החמרת לפלס ופוריה של $e(t)$

$e_n(t)$ - אחרי דחיסה בזמן $e(t)$

f_c, ω_c - חדר קטעון ותדירות זויחית קטעון

$F(k, j\omega)$ - פונקציה מתארת של NF

$h(t)$ - התגובה להלם של הרשת הבסיסית

$H(s), H(j\omega)$ - החמרת לפלס ופוריה של $h(t)$

H_1, \dots, H_N - המסננים הבסיסיים של מסנן NF

i, k, l, m, n, r, μ - אינדקסים או מספרים שלמים

$\sqrt{-1} = j$

$J(s)$ - פונקציה כל שהיא

K_0 - מקדם במשוואה $\tau(j\omega)$

N - מספר המסלולים של NF

NF - מסנן N- מסלולי

PNF - מסנן N- מסלולי למחצה

PNFI - מסנן N- מסלולי למחצה עם מהפך

p - משחנה קומפלקסים $p = j\omega$

- פונקציות המיתוג - $p(t), q(t)$
- מקדמי פרוק פוריה של פונקציות המיתוג - P_m, Q_1
- החמרות לפלס של פונקציות המיתוג - $P(s), q(s)$
- פונקציות המיתוג של ערוץ n - $p_n(t), q_n(t)$
- החמרות לפלס של פונקציות המיתוג של ערוץ n - $P_n(s), Q_n(s)$
- מסנן N -מטלולי למחצה רבועי - QPNF
- הנחתה של הרגיסטר האנלוגי ושל רשת המשוב - q
- הנחתה של הרגיסטר האנלוגי - q_1
- הנחתה של רשת המשוב פרט לרגיסטר האנלוגי - q_2
- משחנה עזר - Q_r
- פולס השעון של המסננים המעשיים - Q_1, Q_1

נגד הרשת הבסיסית - R_0

- הזנת פאזה - α
- תדירות זויחית - ω
- תדירות זויחית של מחת הכניסה - ω_s
- תדירות זויחית קטעון של המסנן - ω_c
- תדירות זויחית מרכזית של המסנן - ω_0
- $1/N$ של זמן המחזור - τ
- מתחים שאריים - E_1, E_2
- פולסי שעון לרגיסטר האנלוגי - τ_A, τ_B

1 מבוא

תכנון של מסנן אלקטרוני מתחיל בדרך כלל מפונקציה מעבר נחונה שיש לקרבה בעזרת פונקציה חמסורת של רשת שניתנת לממוש. המשתנה הוא החדירות הקומפלקסיה s . לשם ממוש נדרש בדרך כלל שהפונקציה תהיה בעלת קטבים קומפלקסיים בצד שמאל של משוב s . אם הרשת בנויה מקבלים ונגדים בלבד הקטבים של פונקציה הרשה ממשיים שליליים. אם משתמשים גם בסלילים מתאפשרת קבלת קטבים קומפלקסיים. על כן מסננים פסיביים מכילים סלילים ברוב המקרים.

היות וסלילים לא מתאימים לטכניקות של מעגלים משולבים נוצר הצורך לחפש אמצעים אחרים להזנת הקטבים מהציר הממשי השלילי. נציין כמה מהם:

- (א) מסנן אקטיבי המשתמש במגבר עם משוב לשם יצירת קטבים קומפלקסיים.
- (ב) החלפה ישירה של סלילי המסנן הפסיבי בג'ירטורים מועמסים בקבלים.
- (ג) מערכות שאינן קבועות בזמן המכילות מאפנניט. מקרה פרטי של אפנון הוא שמוש במתגים המופעלים בצורה מחזורית. במקרה זה החלק המזומה של הקטבים הקומפלקסיים שנוצרו קשור ישירות לתדר הפעלה המתגים.

(ד) מסננים מונוליטיים גבישיים.

(ה) מסננים סיפרחיים.

העבודה שלפנינו מתרכזת סביב גישה ג' ומבוססת על מספר עבודות בנושא של מסננים N - מסלוליים. העבודה הבסיסית בנושא הוא של FRANKS & SANDBERG [1] ומתארת רשת שאינה קבועה בזמן, מורכבת מחבור במקביל של N תת רשתות זהות הקבועות בזמן והנמצאות כל אחת בין מאפנן כניסה ומאפנן יציאה או, במקרה הפרטי, בין מתגים המחוברים לטרוגין ערוץ אחר בין הכניסה והיציאה. רשת זאת נקראת מסנן N - מסלולי. בגישה חדשה של WUPPER [2], [3], [4] הערוצים המקבילים מוחלפים בערוץ אחד בלבד ובזכרון המחליף את הערוצים האחרים. WUPPER קרא לרשת; מסנן N - מסלולי למחצה - PSEUDO N-PATH FILTER - PNF. כזכרון יכול לשמש רגיסטר אנלוגי מסוג "סוללת דליים" BUCKET BRIGADE [6] או מסוג החקני צמוד מטען CHARGE COUPLED DEVICES [7] ממוש של מסנן N - מסלולי למחצה המשתמש ברגיסטר אנלוגי מסוג "סוללת דליים" מחואר על ידי WUPPER במקור ספרות [3].

במסגרת עבודה זו, בפרקים 2 ו-3, אנו מציגים, לאחר דיון במסנן N - מסלולי הרגיל, את רעיון המסנן N - מסלולי למחצה ואפשרות ההזזה של עקום ההענות שלו בעזרת מזיז פאזה. בפרק 4 מתוארת השפעת מתוג נוסף בכניסה וביציאה של המסנן N - מסלולי כפי שהוצע על ידי Y. SUN [5].

בפרק 5 מובאות תוצאות של נסיונות שנערכו עם גרסאות שונות של מסננים N - מסלוליים למחצה.

2. מסנן N- מסלולי - (N - PATH FILTER)

2.1 תכונות המסנן N- מסלולי

הרשת המשתנה בזמן המתוארת ומנותחת בפרק הזה מורכבת מחבור במקביל של N תח - רשתות זהות הקבועות בזמן, והנמצאות כל אחת בין מאפנן כניסה ובין מאפנן יציאה.

התכונות המיוחדות אה המסנן הנ"ל הן:

- א. ניתן להשיג תגובה חדר מחזורית על פני תחום חדרים מוגבל. השמוש המעשי של תכונה זאת הוא מסנן מטרק לחדרים נמוכים (מ- 20 הרץ עד 10 מגהרץ).
- ב. ניתן להשיג מסננים מעבירי פס או חוסמי פס בתחום החדרים הנמוכים על ידי רשתות שאינן כוללות רכיבים מבנטיים.

- ג. החדר המרכזי של המסננים ניתן להזזה באמצעים אלקטרוניים.
- ד. ניתן להשיג העתקה מדויקת ממעביר נמוכים למעביר פס.

2.2 תאור המסנן N- מסלולי:

המסנן הנ"ל מכונה על ידי FRANKS AND SANDBERG [1] בשם

מסנן N- מסלולי ומחואר בציר 2.1, מניחים כי הכופלים הם אידאליים. תגובה כופלי הכניסה היא:

$$x_m(t) = e(t) p[t - (m-1)\tau] \quad (2.1)$$

ושל כופלי היציאה:

$$y_m(t) = y_m(t) q[t - (m-1)\tau] \quad (2.2)$$

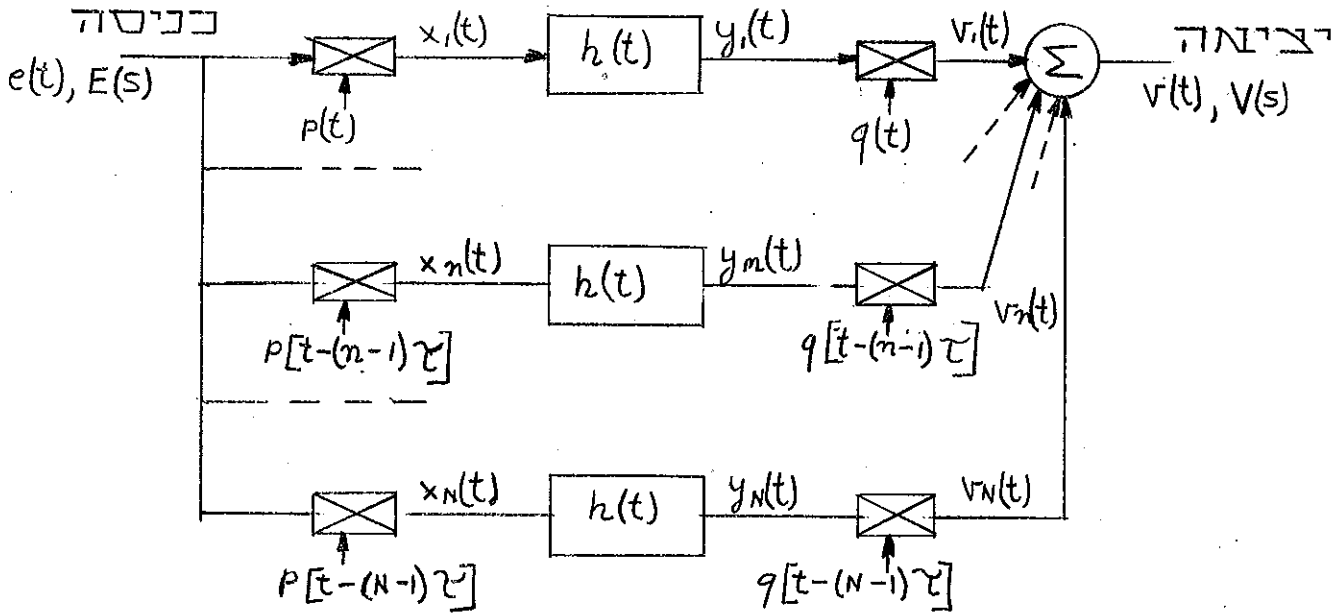
כאשר $p(t)$ ו $q(t)$ הן פונקציות מחזוריות הניתנות על כך לפרוק לפי טור פוריה קומפלכסי:

$$p(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_m e^{j\omega_0 m t} \quad (2.3)$$

$$q(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} Q_l e^{j\omega_0 l t}$$

כאשר

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{N\tau}$$



ציור 2.1: מבנה מסנן N- מסלולי. Fig. 2.1: The N- path configuration.

הנחות שבנספח א' מוביל לקשר הכללי הבא בין כניסה ויציאה:

$$V(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} F(k, j\omega) E(j\omega - jkN\omega_0) \quad (2.4)$$

כאשר

$$F(k, j\omega) = N \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} Q_l P_{kN-l} e^{-H(j\omega - j l \omega_0)} \quad (2.5)$$

$F(k, j\omega)$ מכיל את כל גורמי המערכת: $q(t), p(t), H(j\omega)$. במקרה הכללי לא ניתן לדבר על פונקציית מעבר, אך בהגבלות חדר מסוימות על אותות הכניסה והיציאה ניתן לקבל פונקציית מעבר של המערכת, אם $E(j\omega)$ מתאפס עבור $\omega > \frac{N\omega_0}{2}$, אזי בבטוי (2.4) עבור $k \neq 0$ - $\omega < \frac{N\omega_0}{2}$ הבטויים מתאפסים ועל כן אנו מקבלים אק את הבטוי עבור $k = 0$.

$$V(j\omega) = F(0, j\omega) E(j\omega) \quad \forall |\omega| < \frac{N\omega_0}{2} \quad (2.6)$$

אם גם $V(\omega)$ מתאפס עבור $\omega \gg \frac{N\omega_0}{2}$ על ידי $\omega \gg \frac{N\omega_0}{2}$ ניחן לבטא את הקשר בין הכניסה והיציאה על ידי פונקציות התמסורת:

$$T(\omega) \triangleq \frac{V(\omega)}{E(\omega)} \tag{2.7}$$

כאשר

$$T(\omega) = \begin{cases} F(0, \omega) & |\omega| < \frac{N\omega_0}{2} \\ 0 & |\omega| \gg \frac{N\omega_0}{2} \end{cases}$$

מחוך (2.5) הבטוי עבור $F(0, \omega)$ הינו:

$$F(0, \omega) = N \sum_{l=-\infty}^{l=+\infty} Q e^{P_l} H(\omega - l\omega_0) \tag{2.8}$$

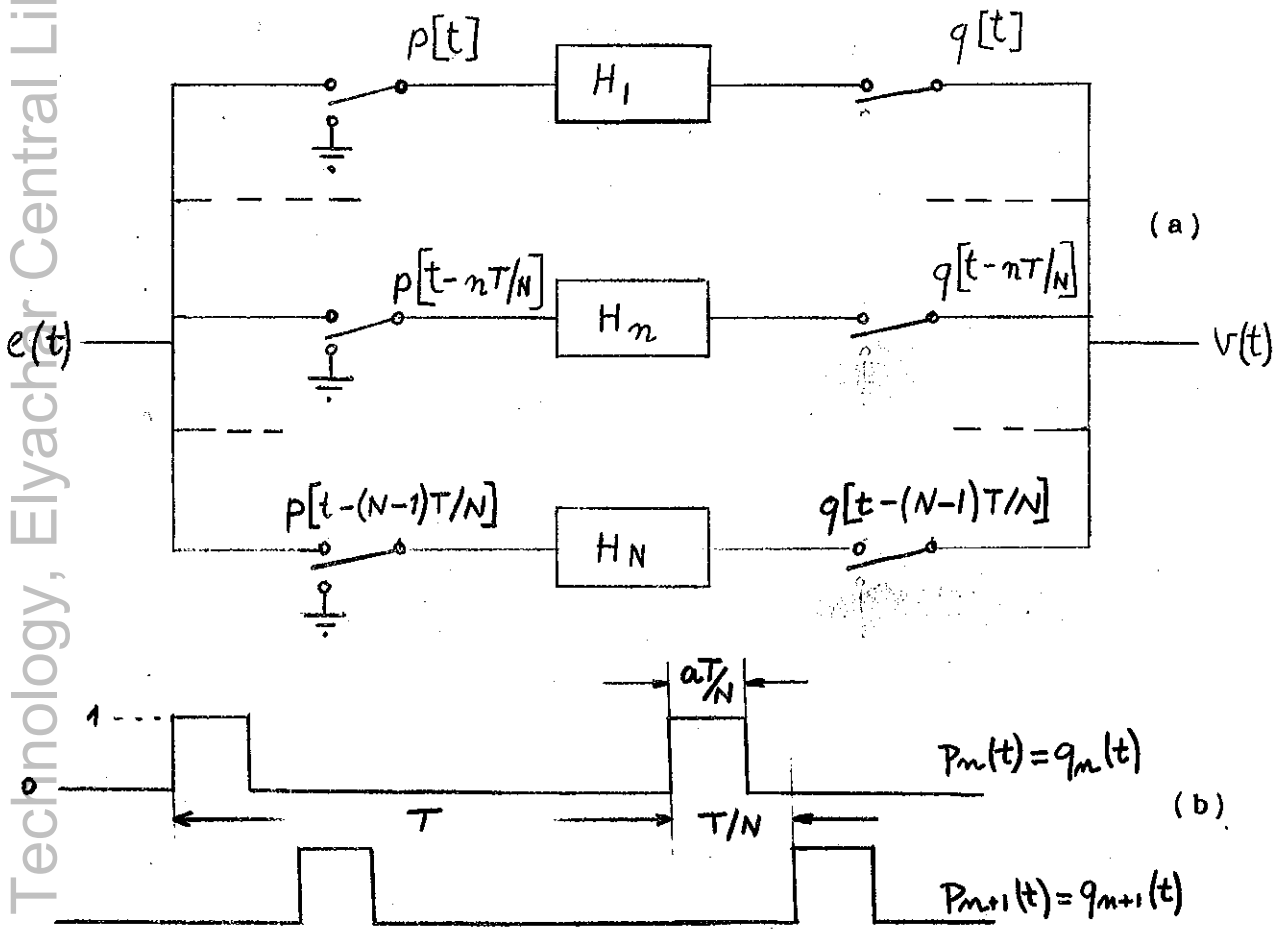
את הגבלות החדר הנ"ל ניחן לבצע על ידי הוספת מסננים מעבירי נמוכים אידיאליים בעלי חדר קטעון $\omega_c = N\omega_0/2$, הן בכניסה והן ביציאה.

2.3 מסנן N- מסלולי עם אפנון דומק

אנו נצמצם עוד יותר אם תחום הרינג ונעסוק רק בפונקציות אפנון $p(t)$, $q(t)$ שהינם דפקים מהצורה:

$$p(t) = q(t) = \begin{cases} 1 & kT \leq t < kT + aT/N \\ 0 & \text{אחרת} \end{cases} \tag{2.9}$$

הרשח הממשת פונקציות אפנון אלו מכילה מפסקים מבוקרים והיא משורטטת בציר 2.2(a).



ציור 2.2: מסנן N- מסלולי דגום

(a) סכמה כללית

(b) פונקציות האיפנון. $p_m(t), q_m(t)$ מוגדרים ב (A3).

Fig. 2.2: Sampled N- path filter.

(a) Configuration

(b) Modulation functions. p_n, q_n are defined in (A3)

פונקציות האיפנון מחבלות על ידי המפסקים p ו- q והן זהות לרשום ב- (2.9) בחנאי ש $e(t)$ הוא מקור מחא אידאלי ו- $v(t)$ נמדד על פני עומס בעל אמפדנס גבוהה. אח צורת המחא אפשר לראות בציור (b) 2.2.

מפסק הכניסה ומפסק היציאה סגורים בזמן

$$t_{m,n} < t < t_{m,n} + \frac{aT}{N} \quad (2.10)$$

$$0 < a \leq 1$$

ופתוח עבור יתר המחזור T , כאשר $t_{m,n}$ מוגדר על ידי:

$$t_{m,n} \triangleq \left(m + \frac{n-1}{N}\right) T \quad (2.11)$$

שלמים m, n

ההבדל בין מפסק הכניסה ומפסק היציאה הוא בכך שכאשר הכניסה לא מחוברת לרשת מסוימת, כניסת אותה הרשת מחוברת לאדמה בעזרת מפסק הכניסה. מסנן כזה נקרא גם מסנן N - מסלולי דגום SAMPLED N -PATH FILTER והוא קל יחסית למימוש ובעל חכונות מעניינות שיפורטו בהמשך.

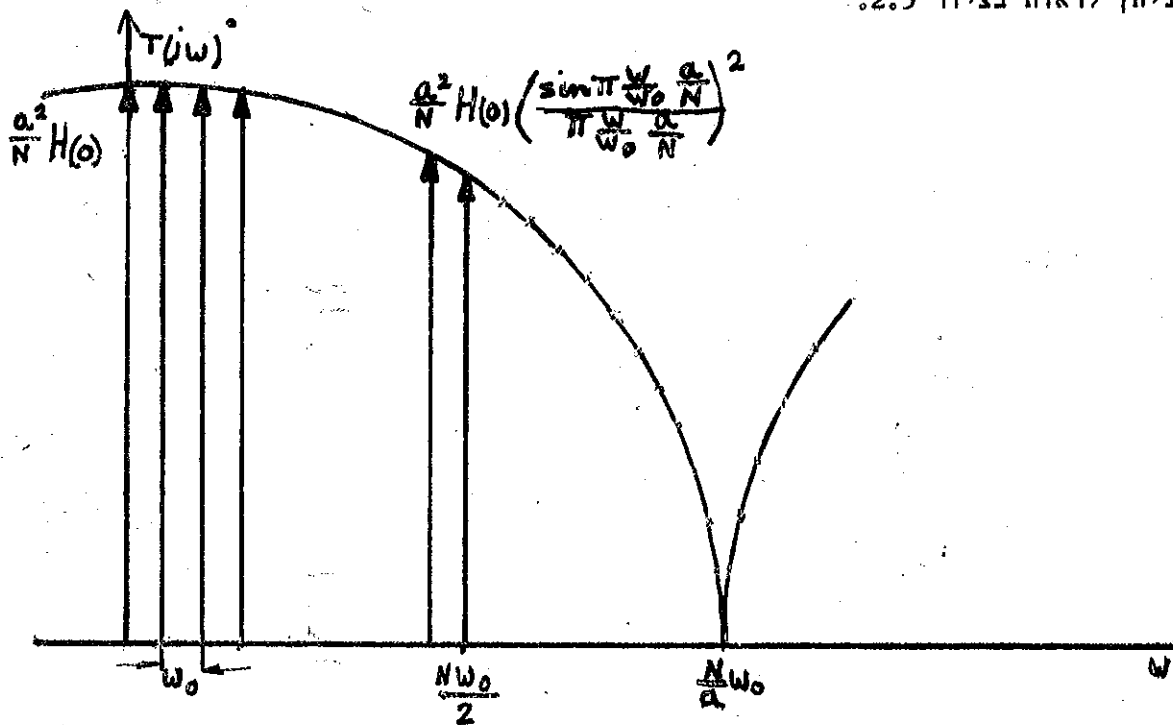
ננסה למצוא את פונקציית החמסורה של המסנן על ידי שמוש בנוסחאות (2.7), (2.8). בפרק לסדר פוריה קומפלקסי של $p(t)$ - $q(t)$ אנו מוצאים ש:

$$P_m = Q_m = \frac{1 - e^{-j2\pi m a/N}}{j2\pi m} \quad (2.12)$$

ועל כן:

$$\begin{aligned} T(s) = F(0, s) &= N \sum_{l=-\infty}^{+\infty} Q_l P_{-l} H(s - j l \omega_0) = \\ &= N \sum_{l=-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-j2\pi l a/N}}{j2\pi l} \frac{1 - e^{j2\pi l a/N}}{-j2\pi l} H(s - j l \omega_0) = \\ &= N \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sin \pi l a/N}{\pi l} \right)^2 H(s - j l \omega_0) = \\ &= \frac{a^2}{N} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sin \pi l a/N}{\pi l a/N} \right)^2 H(s - j l \omega_0) \end{aligned} \quad (2.13)$$

נוכל לסכם שאם H_1 עד H_N הם מסננים מעבירי נמוכים עם רוחב סרט הקטן יחסית ל- ω_0 , פונקציית המעבר עבור N גדול תהיה סדרה של מסננים מעבירי פס צר במרחקים קבועים בעלי צורה זהה וכמעט באותה אמפליטודה, מרוכזים בכפולות של ω_0 . מסנן כזה נקרא גם מסנן מסרק (COMB FILTER) ומשחמשים בו לגלוי אות מחזורי הנמצא בחוץ רעש רחב סרט. אם רוחב הסרט של המסנן הבסיסי הוא מספיק צר כדי להניח ש- $H(j\omega) \approx 0$ עבור $\omega \gg \omega_0$ אז אף המקום היחסי והאמפליטודה היחסית של המסננים מעבירי פס צר ניחן לראות בצירור 2.3.



ציור 2.3: תגובת החדר של המסנן מצירור 2.2 (סכמתי).

Fig. 2.3: The frequency response of the filter from fig.2.2. The arrows are instead of the band - pass filters.

2.4 חסרונות של מסנן N- מסלולי

2.4.1 הפונקציות $p(t - mT/N)$ ו- $q(t - mT/N)$ הן בעלות מחזור $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$. התדר ω_0 וכפולות שלו הם תדרים מרכזיים של מסנן המסרק, על כן הפרעות במסלול האות עלולות להגרם בגלל הפונקציות המאפננות, יופיעו ביציאה כי הם בתחום המעבר של המסנן.

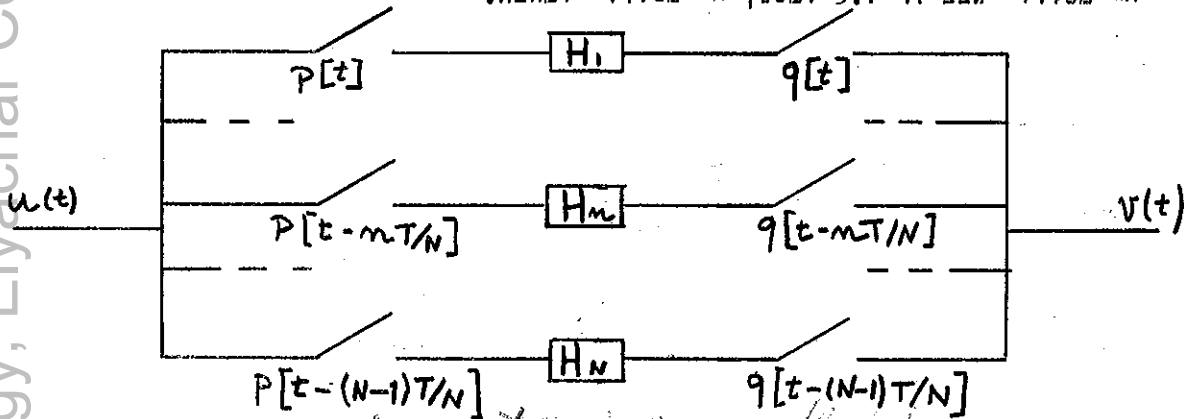
2.4.2 מלבד הפרעות הנגרמות בגלל הפונקציות המאפננות ישנם גם אותות אחרים מפריעים שמקורם בבטול הדדי בלתי מושלם של תדרי בבואה (שאינם רצויים). ניתן לראות שתדרי בבואה אינם מופיעים באות היציאה רק אם כל המסלולים הינם בעלי אותה תגובת תדר, על כן כל הרשחות $h(t)$ וכל המאפננים בציור 2.1 חייבים להיות זהים ודרישה זאת אינה מציאותית.

אנו נראה בפרק הבא שבמסנן N- מסלולי למחצה שהוא בעל תכונות מטוימות הזהות לתכונות מסנן N- מסלולי, לא קיימים אותם חסרונות שהוזכרו לעיל, יש להדגיש שלא מדובר על קצוות התופעות הללו כי אם על עקרון פעולה אחר.

3. מסנן N- מסלולי למחצה

3.1 מבוא

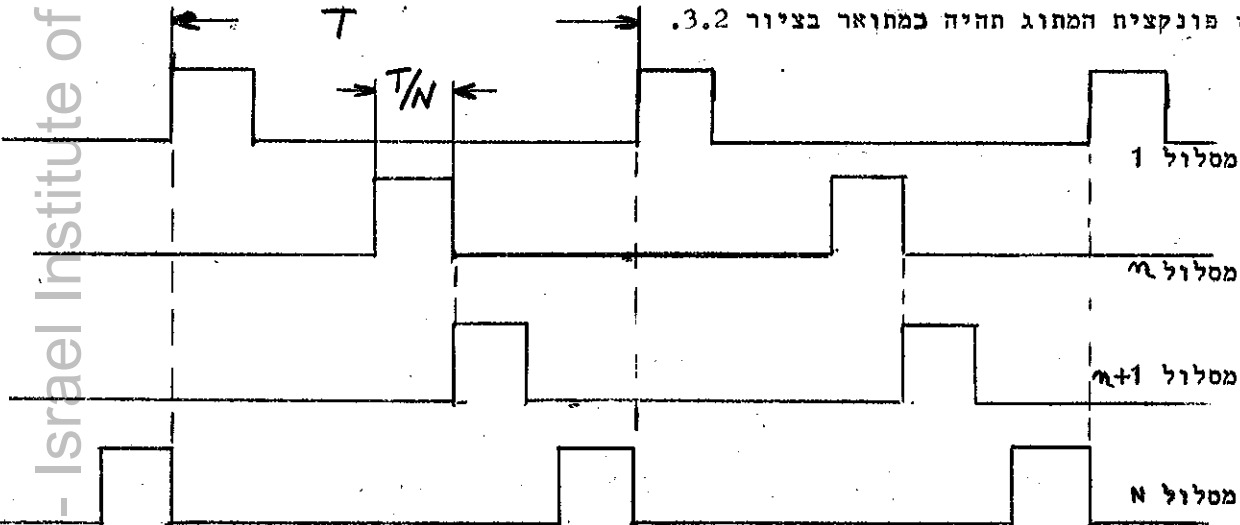
מסנן N- מסלולי למחצה הינו מסנן הזהה במקרים מסוימים ובחנאים מחאימים למסנן N- מסלולי. [2] WUPPER מסביר בעבודתו בעמוד 15 ואילך כיצד עוברים ממסנן N- מסלולי שבצורה 3.1 למסנן N- מסלולי למחצה.



ציור 3.1: מסנן N- מסלולי פשוט. Fig. 3.1: A simple N-path filter.

נניח כי מפסקי הכניסה והיציאה של כל מסלול מופעלים בעת ובעונה אחת וכי משך הזמן שבו המפסקים סגורים הוא T/N . הנחות אילו אינן הכרחיות לפעולה המסנן ה-N מסלולי אך הן נוחות מאוד למטרת השואה. אם נסמן מפסק סגור על ידי 1 ומפסק פתוח על ידי 0

אז פונקציית המתוג תהיה כמתואר בציור 3.2.



ציור 3.2: פונקציית מתוג פשוטה. Fig. 3.2: A simple gating function.

המפסק של המסלול N סגור במרוח זמן באורך T/N :

$$t_{m,m} < t < t_{m,m+1}$$

ופתוח במרוח זמן באורך $T(1-1/N)$

$$t_{m,m+1} < t < t_{m+1,m}$$

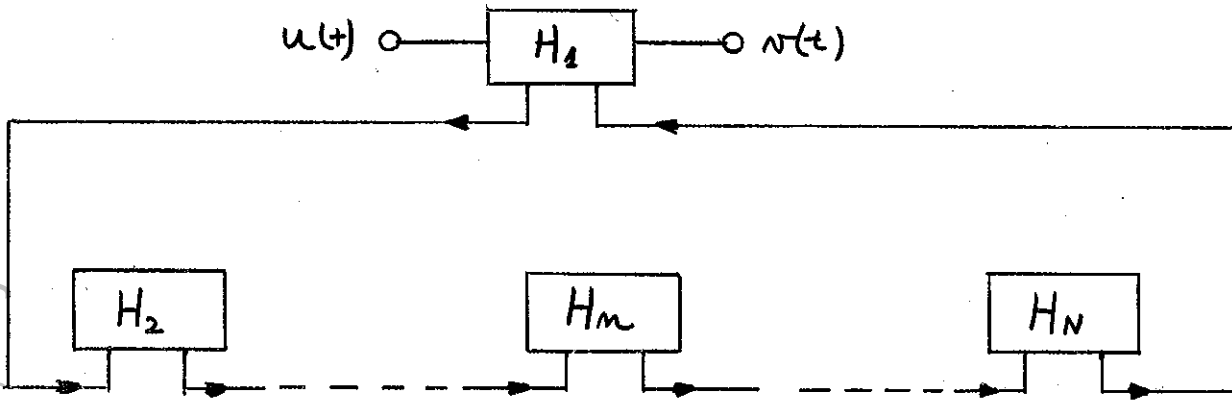
$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$m = 1, 2, \dots, N$$

עבור

כאשר $t_{m,n}$ מוגדר ב (2.11),

ברגע מסוים רק מעגל אחד מתוך N המעגלים הזהים מחובר לכניסה וליציאה ועל כן אחר הרשת שבציור 3.1 ניתן להחליף ברשת שבציור 3.3.



ציור 3.3: רשת שקולה לרשת שבציור 3.1, הקיים המסומנים בחצים הם מסלולי מעבר המצב הרגעי מרשת אחת לאחרת בזמן $\tau = t_{m,n}$

Fig. 3.3: Circuit equivalent to the circuit in fig. 3.1.

The lines with arrows are the path of the transfer of the state of one subcircuit to another at $t_{m,n}$.

הרשתות H_1 עד H_N הן זהות. הרשת H_1 מתפקדת במקום אותה רשת במסגן N מסלולי המחבורת לכניסה וליציאה (ברגע מסוים), הרשתות H_2 עד H_N הן במקום הרשתות במסגן N מסלולי שאינם מחוברות לכניסה.

אנו מגדירים מצב של רשת כמכלול המהחיים על הקבלים והזרמים דרך כל הסלילים בזמנים $t_{m,n}$ המצב הרגעי של כל רשת מועבר לרשת הבאה. בין זמני המעבר $t_{m,n}$, הרשתות H_2 עד H_N משתנות לפי תגובה לכניסה 0 (נחק).

הרשת המתוארת בציור 3.3 היא שקולה למסגן N מסלולי בו הרשת H_1 משמשת בין זמני המעבר באינטרוול $[t_{m,n}; t_{m,n+1}]$ במקום הרשת H_m בציור 3.1; מצב הרשת מועבר ברגע $t_{m,n} + 1$ (בסוף האינטרוול) לרשת H_2 ברגע $t_{m,n+1}$ לרשת H_3 וכך הלאה ומגיע שנית לרשת H_1 בזמן $t_{m,n+1}$ וכך הרשת H_1 מקבלת את תנאי ההתחלה הנכונים באינטרוול הבא שבו היא משמשת במקום הרשת H_m שבציור 3.1.

הרשת שבציור 3.3 נקראת מסגן N מסלולי למחצה ותכונות המסגן הזה בולטות במיוחד במקרה של ממוש מעשי.. כאן לא קיימים החסרונות שהוזכרו בסעיף 2.4:

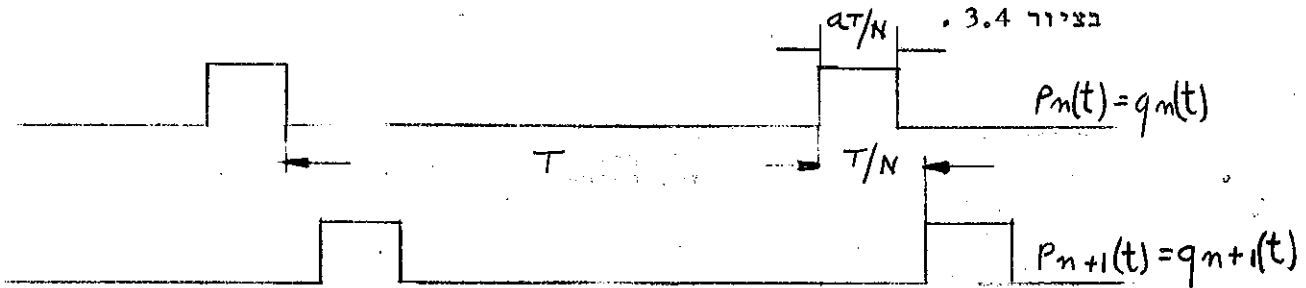
3.1.1 הרשת שבציור 3.3 משחנה בזמן במחזוריות של T/N זאת אומרת שהתדר הנושא הוא פי N מהתדר המרכזי של פס המעבר הנמוך ביותר שנוצר ועל כן הוא אינו מפריע אף אם הוא מופיע ביציאה.

3.1.2 יהרון נוסף הוא שהפעם הרשתות מחוברות בקסקדה ועל כן האות עוברת דרך כל הרשתות ללא ההפצלות, על כן, אי שוויון של הרשתות H_1 עד H_N אינו גורם לתדרי בבואה בלתי רצויים.

בסעיפים 3.2, 3.3 נצמצם את הדיון למקרה בו מצב רשת הביניים נשאר קבוע כאשר מפסקי הכניסה והיציאה מנותקים. במקרה זה הרשתות H_2 עד H_N יחד עם המעגלים המעבירים את המצב מרשת אחת לבאה אחריה נחננים להחלפה ברגיסטרים אנלוגיים (ANALOG SHIFT REGISTER). על כך נדון בפרוט רב יותר בסעיף 3.3.

3.2 פונקציית החמסורה

בהנחה לעיל נדון במסנן ה- N מסלולי שבציור 3.1 אך עם פונקציות המחוג המתוארות



ציור 3.4: פונקציות המיתוג q_n, p_n מוגדרים ב (A3).

Fig. 3.4: A gating function. p_n, q_n are defined in (A3).

המפסקים של מסלול מסגורים במרוח זמן באורך aT/N :

$$t_{m,m} < t < t_{m,m} + aT/N$$

ופחוחים במרוח זמן $T(1-a/N)$:

$$t_{m,m} + aT/N < t < t_{m+1,m}$$

ברגע מסוים רק מעגל אחד לכל היוצר מחובר לכניסה וליציאה לכל מסלול "מוקצב" זמן T/N אך המפסקים מחברים רק לחלק a ($a < 1$) של זמן זה, על כן ישנם רגעים כאשר אף מסלול אינו מחובר. כדי ליצור את המסנן ה- N מסלולי למחצה המחאים למסנן שבציור 2.1 עם פונקציית המחוג המתוארת בציור 3.5, יש להוסיף למערכת בציור 3.3 מפסקים בכניסה

$$t_{m,m} < t < t_{m,m} + aT/N$$

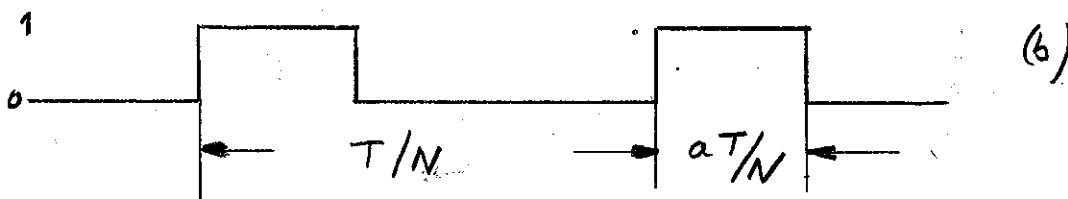
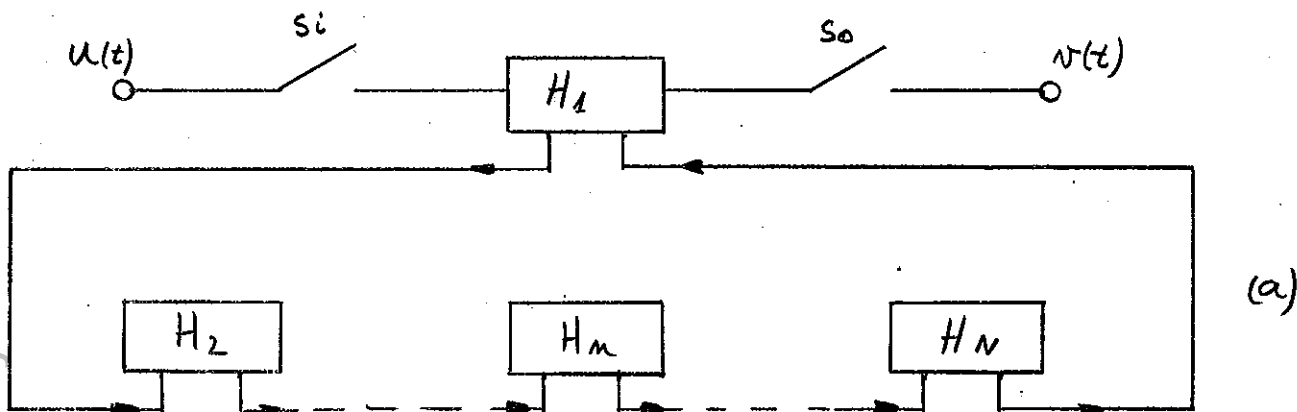
וביציאה הסגורים בזמנים

$$t_{m,m} + aT/N < t < t_{m,m+1}$$

ופחוחים בזמנים

מפסקי הכניסה והיציאה פחוחים המצב של כל רשת עובר לרשת הבאה; אין חשיבות לזמן

המדוייק של המעבר (בחנאי שהמפסקים פתוחים) מאחר והרשתות שומרות על מצבן בהעדר אוח.



ציור 3.5: מסנן N- מסלולי למחצה (סכמתי)

(a) המערכת

(b) פונקציות המיחוג S_1, S_0 .

המצב הרגעי של כל רשת מועבר לרשת הבאה בפרק הזמן שהמפסקים S_1, S_0 הם פתוחים.

Fig. 3.5: Pseudo N- path filter

(a) Circuit

(b) Gating function of S_0 and S_1 .

The state of every network is transferred to the next following one during the time S_1 and S_0 are open.

לפי הנחות שבנספח ב' הרשת שבציור 3.5 נחנה להאזר על ידי פונקציה מערכת (החלוקה בזמן) $T(j\omega_s, t)$ כך שקיים:

$$v(t) = T(j\omega_s, t) E e^{j\omega_s t} \quad (3.1)$$

כאשר ω_s הוא חדרת האוח בכניסה ופונקציה המערכת ניתנה על ידי הנוסחה:

$$T(j\omega_s, t) = a \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{(e^{-j\omega_s T(1-\alpha/N)} - 1)}{[(1-\alpha/N)\omega_s T - 2\pi m]} \times \quad (3.2)$$

$$\times \frac{(e^{j\omega_s T(1-\alpha/N) - j2\pi\alpha n} - 1)}{[(1-\alpha/N)\omega_s T - 2\pi(m+\alpha n)]} \times H\left[j\frac{N}{a}(\omega_s - m\omega_0)\right] e^{jnN\omega_s t}$$

אם המסנן ה- N מסלולי למחצה נמצא בין 2 מסננים מעבירי נמוכים כך שמחח היציאה $v(t)$ והכניסה $e(t)$ מתאפסים עבור $|\omega_s| > \frac{N\omega_0}{2}$ אזי המערכת הופכת להיות קבועה בזמן.

$$T(j\omega_s) = a \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2[(1-\alpha/N)\omega_s T/2]}{[(1-\alpha/N)\omega_s T/2 - \pi m]^2} \times H\left[j\frac{N}{a}(\omega_s - m\omega_0)\right] \quad (3.3)$$

בדרך כלל אנו מתעניינים במיוחד בתדרים סביב התדרים המרכזיים, זאת אומרת בהתנהגות עבור:

$$\omega_s \approx \mu \omega_0 \quad \mu = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

ואנו מקבלים:

$$T(j\omega_s) = a \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^2(\mu\pi\alpha/N)}{[(\mu-m)\pi - \alpha\mu\pi/N]^2} \times H\left[j\frac{N}{a}(\omega_s - m\omega_0)\right] \quad (3.4)$$

כדאי לציין שהרכיבים הראקטיביים של הרשת הבסיסית מופיעים מוגדלים פי N/α במסנן N - מסלולי למוצח.

אם רוחב הסרט של המסנן הבסיסי הוא מספיק צר כדי להניח ש:

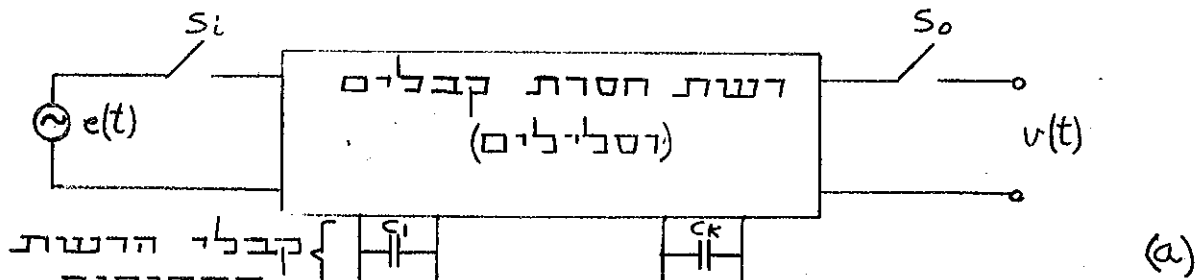
$$H\left[j\frac{N}{a}\omega\right] = 0 \quad \omega \gg \omega_0 \quad \text{אזי עקום ההענות שמחאים ל(3.4) הוא כמו}$$

בציר 2.3. יש לציין הבל עקרוני אחד: הרוחב של כל אחד מין המסננים של המטרק הוא עבור (3.4) פי N/α יותר צר מאשר עבור (2.13). הסיבה היא שהבטוי (2.13) מתאים למקרה שהרשת הבסיסית אינה שומרת על מצבה בזמן שמפסקי הכניסה והיציאה פתוחים; מפסק הכניסה מקצר את הכניסה לאדמה בזמן זה.

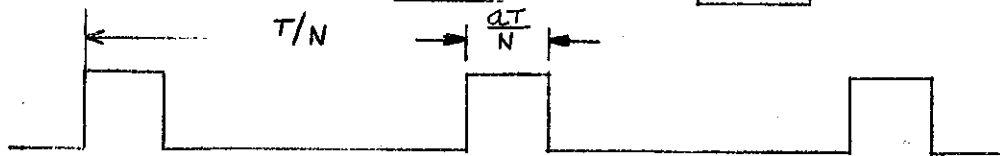
3.3 מסנן N- מסלולי למחצה ממומש בעזרת רגיסטר אנלוגי

אנו נראה ממוש מסנן N- מסלולי למחצה שבו מצב הרשת הבסיסית נשאר קבוע כאשר מפסקי הכניסה מנוחקים. אנו לא נתיחס בדיון לרשתות שיש בהן סלילים. את הסלילים ניתן להחליף בג'ירטורים מועמסים בקבלים. אז הרשתות H_2 עד H_N (ציור 3.5) יחד עם המעגלים שמעבירים את המצב מרשת אחת לבאה אחריה נחנים להחלפה ברגיסטרים אנלוגיים (ANALOG SHIFT REGISTER).

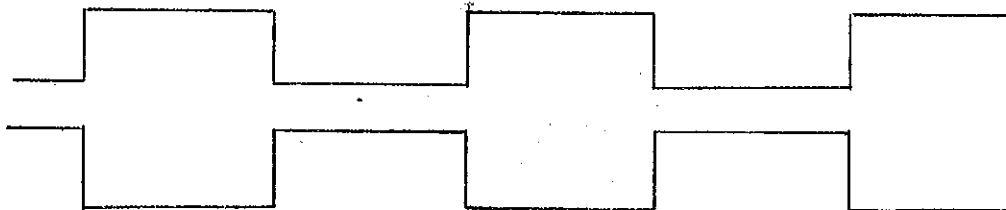
ברשת שבציור 3.6 מוסיפים במקביל לכל קבל ברשת הבסיסית רגיסטר אנלוגי בעל N תאים.



S_1, S_0



f_A
 S_n, f_B



ציור 3.6: מסנן N- מסלולי למחצה ממומש בעזרת רגיסטרים אנלוגיים.

(a) הרשת

(b) פונקציות המיחוג. $a \leq \frac{1}{2}$ בגלל הגבלות המעולה של הרגיסטרים.

Fig. 3.6: Pseudo N- path filter realized with the aid of analog shift register

(a) System

(b) Gating functions. $a \leq \frac{1}{2}$ because of the limitations of operation of the analog shift register.

המפסקים S_1, S_0 שבציר 3.6 מופעלים בקצב $\frac{N}{T}$ כאשר N הוא מספר האי הרגיטטר האנלוגי. הם נסגרים בכל מחזור של T/N למשך aT/N וזאת התקופה הפעילה של המסנן, והם פתוחים למשך $(1-a)T/N$ וזאת התקופה הלא פעילה של המסנן. הרגיטטר האנלוגי הוא הרכיב הקריטי במערכת, אך העבודה שמחבצעה בשטח של החקנים צמודי

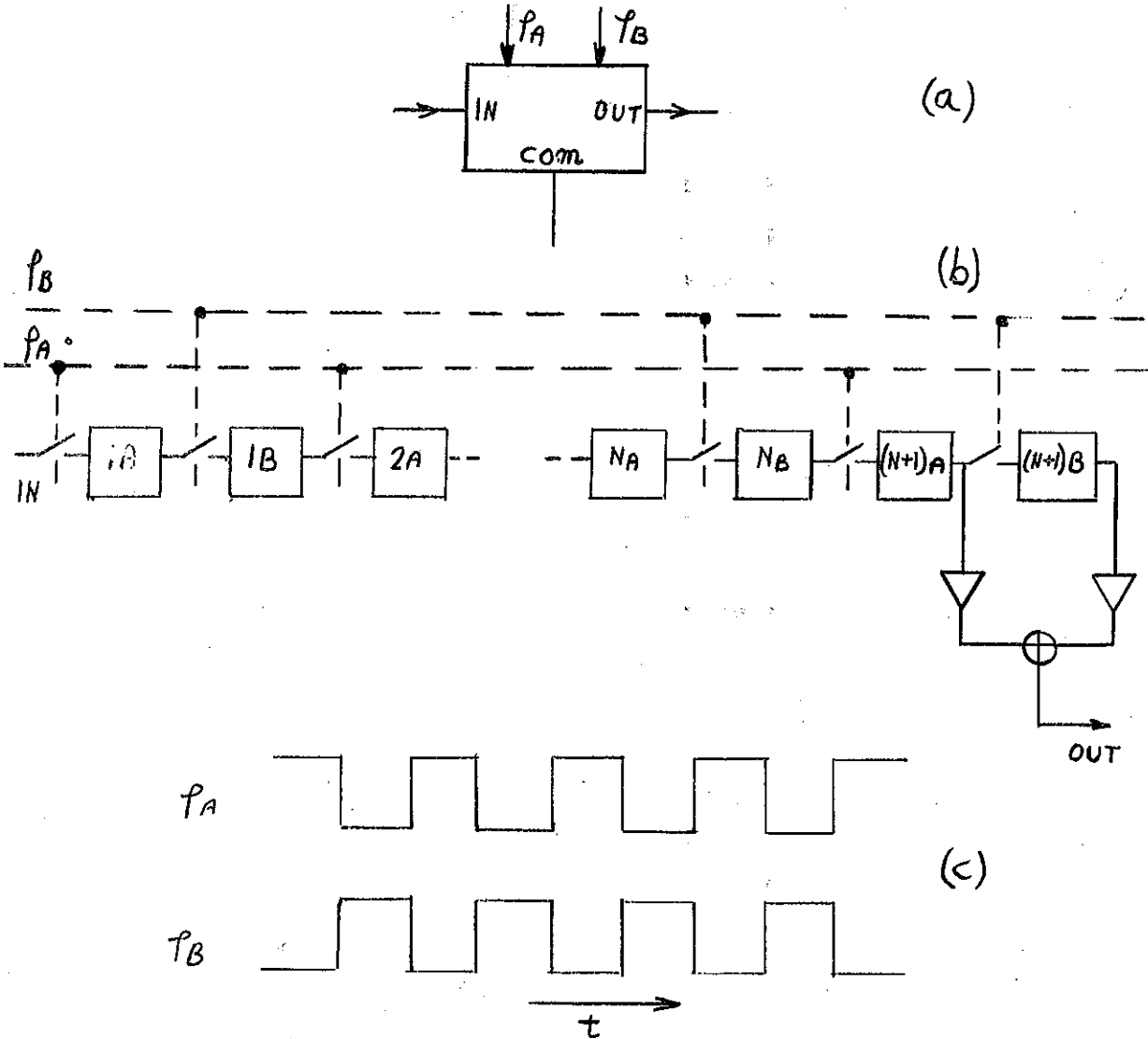


Fig. 3.7: Analog shift register.

ציור 3.7: רגיטטר אנלוגי

(a) Symbol

(a) סימון

(b) Schematic

(b) סכמה כללית

representation f_B, f_A צורת המתחים

(c) Gating functions

f_A and f_B

מטען (COO) CHARGE COUPLED DEVICES או רכיבים מסוג "סוללת דליים" BUCKET BRIGADE מצדיקה את החקוה שיגיסטרים אנלוגים יפתרו את הבעיות [7,6].

תאור סכמתו של רגיסטר בעל N תאים ובעל 2 פאזות ניהן בצירור 3.7. מתוך השרטוט הסכמתי

$$:\varphi_B=0) \varphi_A=1$$

א. המתח בכניסה עובר לחא 1_A .

ב. המתח שבחא J_B עובר לחא $(I+1)_A$ עבור $I=1,2,\dots,N$

$$:\varphi_A=0) \varphi_B=1$$

א. מתח הכניסה איננו מחובר לרגיסטר

ב. המתח שבחא 1_A עובר לחא J_B עבור $I=1,2,\dots,N,N+1$

מקבל שהמתח שהיה בכניסה בזמן t'

$$t_1 < t' < t_1 + \frac{T}{2N}$$

מופיע ביציאה בזמן t''

$$t_1 + T < t'' < t_1 + T + \frac{T}{N}$$

והמתח שהיה בכניסה בזמן t'''

$$t_1 + \frac{T}{2N} < t''' < t_1 + \frac{T}{N}$$

לא מופיע ביציאה. t_1 הוזמן התחלה מחזור כל שהוא של φ_A .

נחזור לציור 3.6 ולהסבר על המסנן ה- N מסלולי למחצה. בגלל העובדה ש $a \leq \frac{1}{2}$, הזמן שבו

φ_A הוא סגור ומתח הקבלים נכנס לרגיסטר הוא גדול או שווה לזמן התקופה הפעילה של המסנן

המתח שנשאר ברגיסטר הוא מתח של הקבלים בסוף התקופה הזאת. בזמן התקופה הלא פעילה של

המסנן שבה הוא מנותק מהכניסה והיציאה, הקבלים של הרשת נטענים דרך מפסקים s_k למתחים

ביציאות הרגיסטרים האנלוגים, הם המתחים המושהים ב N תקופות פעילות, זו בדיוק צורת

הפעולה הנדרשת מהמסנן ה- N מסלולי למחצה שתואר בסעיף 3.1.

3.4 התנהגות בלתי אידאלית של הרגיסטר האנלוגי.

עד כה דנו בהתנהגות אידאלית של המסנן ה-N מסלולי למחצה. למעשה אנו עוסקים ברכיבים שאינם אידאליים כך שמעניין לחקור את ההתנהגות של מסנן מעשי.

עלינו להבחין בין 2 סוגים של התנהגות בלתי אידאלית, הסוג הראשון הוא נובע עקב רכיבים בעלי הפסדים ברשת הבסיסית, קל לקחת הפסדים אילו בחשבון מאחר והם משפיעים בעיקר על פונקציית המעבר $H(j\omega)$ של הרשת הבסיסית. בעייה רצינית הרבה יותר קשורה בהתנהגות הבלתי אידאלית של הרגיסטר האנלוגי. ניתן לומר באופן כללי שערך המתח האנלוגי המוזן לתוך הרגיסטר האנלוגי מושפע מכך שחלק מהמטען המעביר מתח זה נשאר בכל הוא של הרגיסטר בגלל מעבר לא שלם של המטען מתא לתא. על כן המתח שבו נטען הקבל של הרשת הבסיסית על ידי הרגיסטר חלוי בכל ערכי המתח הקודמים ועל כן יהיה שונה מהמתח המקורי בנוסף ההפסדים ברגיסטר גורמים להנחתה של המתח.

בדיון נניח שהמטען השארי שנותר בכל תא הוא כה קטן שנחשב רק במטען שנותר בקבל C_i של הרשת הבסיסית ובמטען השארי בתא האחרון של הרגיסטר. נתיחס לרגע מסוים $t = mT/N$ (מספר שלם) כאשר נגמר ההליך העברת המתח בתא האחרון של הרגיסטר של הקבל C_i . המתח על פני C_i יהיה:

$$V_{c_i}(mT/N + 0) = q V_{c_i}[(m-N+a)T/N - 0] + \quad (3.5)$$
$$+ \epsilon_1 V_{c_i}[(m-N-1+a)T/N - 0] + \epsilon_2 V_{c_i}[(m-1+a)T/N - 0]$$

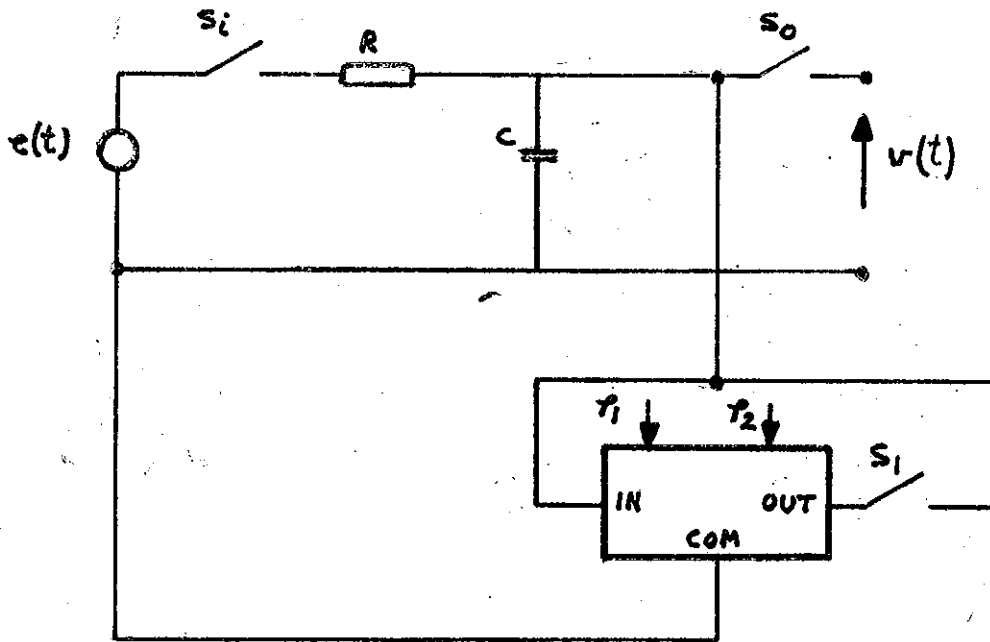
כאשר q מבטא את הנחתה ערכי המתח בעוברם דרך הרגיסטר ו- ϵ_1 ו- ϵ_2 הם גדלים היחסיים למטען השארי שנותר בתא האחרון של הרגיסטר ועל הקבל C_i בהתאמה. נתיחס למסנן ה-N מסלולי למחצה בעל רשת בסיסית RC כמתואר בצירוף 3.8. הרגיסטר האנלוגי אינו אידאלי ומקיים את (3.5).

אנו מניחים ערוך אקספוננציאלי $e(t) = A e^{pt}$ כאשר p , A הם קבועים קומפלכסיים. אזי המתח על הקבל ניתן על ידי:

$$v_c(t) = v_c(p, t) e^{pt} \quad (3.6)$$

כאשר $v_c(p, t)$ מחזורי בזמן, בעל מחזור T/N ומקיים את המשוואה הדיפרנציאלית:

$$A = RC \frac{d v_c(p, t)}{dt} + (1 + pCR) v_c(p, t) \quad (3.7)$$



ציור 3.8: מסנן N - מסלולי למחצה בעל רשת בסיסית RC . פונקציות המיחוג של S_i ,

S_0, S_1, T_1, T_2 הם כמו בציור (ב) 3.6.

Fig. 3.8: Pseudo N - path filter of type RC . The gating functions belonging to S_i, S_0, S_1, T_1, T_2 , are the same as in fig.3.6(b).

במשך הזמן S_0 ו S_1 סגורים או מקבלים את הפתרון

$$v_c(p,t) = \frac{A}{1+pCR} + K_0 e^{-(p+1/RC)(t-mT/N)} \quad (3.8)$$

$$\forall t: mT/N < T < (m+a)T/N$$

לקביעת K_0 או מצייבים את (3.8) ב (3.7) ובהשמש במחזוריות של $v_c(p,t)$ או מקבלים:

$$K_0 = \frac{A}{1+pCR} \frac{q e^{-pT(1-a)/N} + \epsilon_1 e^{-pT(N+1-a)/N} + \epsilon_2 e^{-pT(1-a)/N} - 1}{1 - q e^{-(p+a/NRC)T} - \epsilon_1 e^{-[(1+1/N)p+a/NRC]T} - \epsilon_2 e^{-(p+a/RC)T/N}} \quad (3.9)$$

את $v_c(t)$ ניקח לקבל על ידי הצבת (3.8) ב (3.6) בעזרת (3.9).
מתח היציאה יכתב:

$$v(t) = V(p,t) e^{pT} \quad (3.10)$$

כאשר גם $V(p,t)$ הוא מחזורי בעל מחזור T/N . על כן ניקח לפתחו לטור פוריה:

$$V(p,t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_n e^{jnN\omega_0 t} \quad (3.11)$$

היות ו-

$$v(t) = \begin{cases} v_c(t) & \forall mT/N < t < (m+a)T/N \\ 0 & \forall (m+a)T/N < t < (m+1)T/N \end{cases} \quad (3.12)$$

אנו מקבלים עבור מקדם פוריה בעל אינדקס n :

$$V_n = \int_{mT/N}^{(m+a)T/N} \left[\frac{A}{1+pRC} + K_0 e^{-(p+1/RC)(t-mT/N)} \right] e^{-jnN\omega_0 t} dt \quad (3.13)$$

חישוב של (3.13) נוחן (לפי WUPPER [4]):

$$V_n = \frac{A Q_n}{1+pRC} + K_0 \frac{N}{T} \frac{1 - e^{-(p+1/RC + jnN\omega_0)aT/N}}{p + jnN\omega_0 + 1/RC} \quad (3.14)$$

כאשר Q_n נחון על ידי (3.15) ו K_0 נחון על ידי (3.9).

$$Q_n = \begin{cases} a & \forall n=0 \\ \frac{1 - e^{-j2\pi n a}}{j2\pi n} & \forall n \neq 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

ניקח עתה את המקרה המעניין שבו הכניסה והיציאה הם מוגבלי סרט בעזרת מסננים מעבירי נמוכים אידאליים עם חדר קטעון $\omega_c = \frac{N\omega_0}{2}$. אנו מקבלים רק את האיבר V_0 של הטור ואז כל המסנן הינו בעל המסורת בלתי חלויה בזמן.

$$T(p) = \frac{a}{1+pRC} \left[1 + \frac{K_0 N RC}{A a T} (1 - e^{-(p+1/RC)aT/N}) \right] \quad (3.16)$$

במקורות [2] ו-[4] מתוארת ההשפעה של ϵ_1, ϵ_2 ו- q עבור מסנן בעל $N=3$, $q = 1/2$ ו- $\alpha >> 1$. מחקבל ש $\epsilon_1 \neq 0$ ו- $\epsilon_2 \neq 0$ גורמים להפסדים נוספים, רוחב סרט רחב יותר וכן להזזה של החדיריות המרכזיות, זאת אומרת שמיקום פסי הצד לא תלוי רק בתדר השעון. $q < 1$ גורם להנחתה בתדרים המרכזיים ובהגדלה רוחב הסרט, $q > 1$ גורם להקטנת ההפסדים והקטנת רוחב הסרט אך יש לשים לב שהקטבים של $T(j\omega)$ ישארו בצד שמאל של המישור הקומפלכסי, אחרת המסנן יהיה בלתי יציב. ל $q \geq 1$ ניתן להגיע בעזרת מגבר המוכנס למעגל אחרי הרגיסטר האנלוגי.

3.5 הנסחה מסיט פאזה במשוב המסנן

נדון במקרה בו

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$$

$$q = e^{-j\alpha} \quad (3.17)$$

זאת אומרת שאחרי הרגיסטר האנלוגי קיים מסנן מסיט פאזה אידיאלי. בכל החדרים המסנן הנוסף גורם להזזה פאזה α . כאשר $\alpha = \pi$ מדובר על מהפך פשוט: $q = -1$. נרשום את (3.16) עבור $P = j\omega$ ועבר התנאים ב (3.17):

$$T(j\omega) = \frac{a}{1+j\omega RC} + \frac{NRC}{(1+j\omega RC)^{-T}} \cdot \frac{(e^{-j[\omega T(1-\frac{a}{N})+\alpha]} - 1)(1 - e^{-(j\omega + \frac{1}{RC})\frac{aT}{N}})}{1 - e^{-(j\omega + a/NRC)T - j\alpha}} \quad (3.18)$$

לפי הפתוח שבנספח ג' אנו מקבלים ש (3.18) ניתן לכתוב בעזרת טור:

$$T(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{a \sin^2 \left[\frac{\omega T}{2} \left(1 - \frac{a}{N} \right) + \frac{\alpha}{2} \right]}{\left[n\pi + \frac{\omega T}{2} \left(1 - \frac{a}{N} \right) + \frac{\alpha}{2} \right]^2} \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{1 + j \left[\omega + \left(n + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \omega_0 \right] RC \frac{N}{a}}$$

נוסחה (3.19) היא זהה לנוסחה (3.3) עבור התנאים $\alpha = 0$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (3.20)$$

אם נחרוז סביב החדיריות המרכזיות:

$$\omega \approx - \left(\mu + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \omega_0 \quad (3.21)$$

נקבל:

$$T(j\omega) = a \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2 \left(M \frac{\alpha}{N} \pi \right)}{\left[M \frac{\alpha}{N} \pi - (M-n)\pi \right]^2} \frac{1}{1 + j \left[\omega + \left(n + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \omega_0 \right] RC \frac{N}{a}} \quad (3.22)$$

נוסחה (3.22) זהה לנוסחה (3.4) עבור התנאים המצוינים ב-(3.20).

אנו רואים שסטיית פאזה קבועה α במשוב גורמת להזזת החדרים המרכזיים בשעור

$\omega_0 \frac{\alpha}{2\pi}$. כאשר $\alpha = \pi$ ($q = -1$) הזזת החדר היא $\frac{\omega_0}{2}$. זאת אומרת על ידי שמוש

במהפך פשוט אנו מקבלים חגובה חדר דומה לחגובה שניתן לקבל בעזרת מסנן N - מסלולי

רבועי כפי שנראה בפרק 4.

QUADRATURE N-PATH FILTER (QNF)

4. מסנן N- מסלולי רבועי

4.1 הגדרה. פונקציית המסורה

נראה את הגדרת המסנן N- מסלולי רבועי, בהשוואה למסנן N- מסלולי רגיל:

מסנן N- מסלולי רגיל

$$p_m(t) = p_m(t+T) \quad (א) \quad (4.1)$$

$$q_m(t) = q_m(t+T)$$

$$p_m(t) = p_1\left(t - \frac{m-1}{N}T\right) \quad (ב)$$

$$q_m(t) = q_1\left(t - \frac{m-1}{N}T\right)$$

$$\forall m = 1, 2, \dots, N$$

מסנן N- מסלולי רבועי

$$p_m(t) = p_m(t+2T) \quad (א) \quad (4.2)$$

$$q_m(t) = q_m(t+2T)$$

$$p_m(t) = p_1\left(t - \frac{m-1}{N}T\right) \quad (ב)$$

$$q_m(t) = q_1\left(t - \frac{m-1}{N}T\right)$$

$$p_m(t) = -p_m(t+T) \quad (ג)$$

$$q_m(t) = -q_m(t+T)$$

$$\forall m = 1, 2, \dots, N$$

אם נדון במקרה ש $p_m(t)$ ו $q_m(t)$ הם פולסים, את החכונה (4.2) ג' ניתן ליצור על ידי הכפלת הכניסה והיציאה של המסנן N- מסלולי רגיל ב $+1$ וב -1 לסרוגין לפרקי זמן באורך T זאת אומרת בפונקציה $s(t)$ שמתוארת על ידי (4.3):

$$s(t) = \begin{cases} 1 & 2nT \leq t < (2n+1)T \\ -1 & (2n+1)T \leq t < 2(n+1)T \end{cases} \quad (4.3)$$

עבור כל n שלם.

התמרת פורייה של $s(t)$ היא $s(\omega) = \mathcal{F}[s(t)]$

$$S(\omega) = \sum_m A_m \delta(\omega - m \frac{\omega_0}{2}) \quad \forall m = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots \quad (4.4)$$

או

$$S(\omega) = \sum_k A_{2k+1} \delta(\omega - \frac{\omega_0}{2} - k\omega_0) \quad \forall k = \frac{n-1}{2} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4.5)$$

כאשר A_m הוא מקדם m של הפרוק לסדר פורייה של $s(\omega)$. על כן אם תגובת החדר של מסנן N - מסלולי (רגיל או למחצה) היא $T_{NF}(\omega)$ והכניסה היא $\epsilon(j\omega) = A \delta(\omega - \omega_s)$ אז היציאה של QNF היא:

$$\begin{aligned} V(j\omega) &= \{ [A \delta(\omega - \omega_s) * S(\omega)] T_{NF}(j\omega) \} * S(\omega) = \\ &= [A \cdot S(\omega - \omega_s) T_{NF}(j\omega)] * S(\omega) = \\ &= A \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k+1} \delta(\omega - \omega_s - \frac{\omega_0}{2} - k\omega_0) T_{NF}(j\omega) \right] * S(\omega) = \\ &= A \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k+1} T_{NF}(j\omega_s + \frac{j\omega_0}{2} + jk\omega_0) \cdot \right. \\ &\quad \left. \delta(\omega - \omega_s - \frac{\omega_0}{2} - k\omega_0) \right] * S(\omega) \end{aligned} \quad (4.6)$$

לשם המחשה נניח ש $T_{NF}(j\omega)$ הוא מסנן מסרק אידיאלי זאת אומרת תגובת החדר שלו מחזורית בעלת מחזור ω_0 :

$$T_{NF}(j\omega) = T_{NF}(j\omega + j\omega_0)$$

על כן

$$\begin{aligned} V(j\omega) &= A T_{NF}(j\omega_s + \frac{j\omega_0}{2}) \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k+1} \delta(\omega - \omega_s - \frac{\omega_0}{2} - k\omega_0) \right] * S(\omega) = \\ &= A T_{NF}(j\omega_s + \frac{j\omega_0}{2}) \delta(\omega - \omega_s) * \underbrace{S(\omega) * S(\omega)}_1 = \end{aligned}$$

(4.7)

הסיבה לכך ש $s(\omega) * s(\omega) = 1$ נעוצה בעובדה שהבטוי $s(\omega) * s(\omega)$ הוא החמרה של $\Lambda(t) * \Lambda(t) = 1$ אך הבטוי האחרון : ועל כן גם ההחמרה שלו שווה ל-1. במישור הזמן :

$$v(t) = T_{NF} \left(\Delta\omega_s + \frac{\Delta\omega_0}{2} \right) A e^{j\omega_s t} \quad (4.8)$$

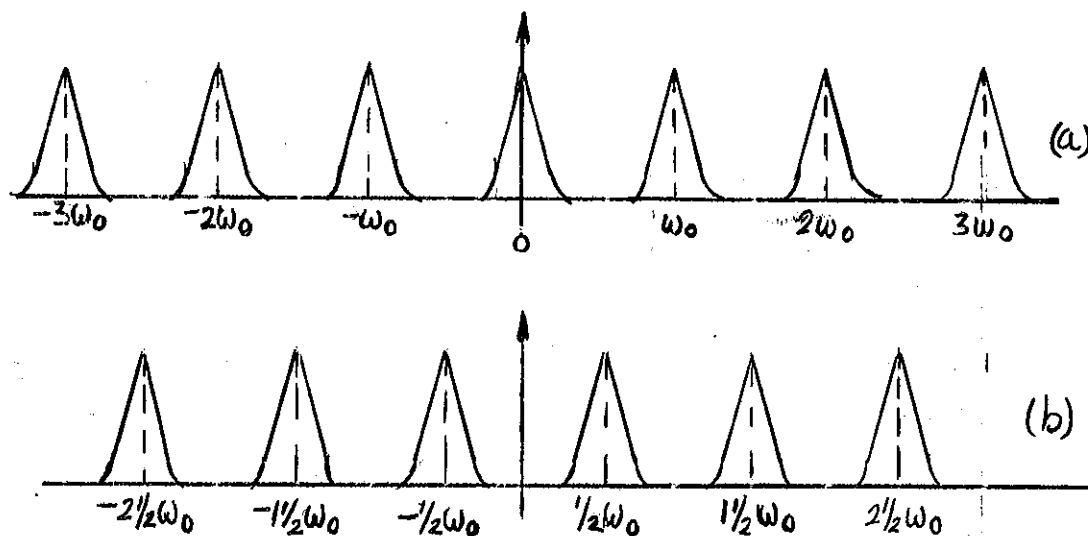
נגזיר את פונקציית המערכת של מסנן N - מסלולי רבועי T_{QNF} :

$$v(t) = T_{QNF} (\Delta\omega_s) A e^{j\omega_s t} \quad (4.9)$$

ואז מתקיים הקשר:

$$T_{QNF} (\Delta\omega_s) = T_{NF} \left(\Delta\omega_s + \frac{\Delta\omega_0}{2} \right) \quad (4.10)$$

זאת אומרת עבור מסנן N - מסלולי רבועי מקבלים אותה תגובה חדר כמו עבור מסנן N - מסלולי אך מוזזה ב $\frac{\omega_0}{2}$. זה מתואר בצירור 4.1.



צירור 4.1: (a) תגובת החדר של מסנן מסרק אידיאלי בעל מחזור $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$. (b) תגובת החדר של מסנן מסרק רבועי הנגזר מהמסנן מ- (a).

Fig. 4.1: (a) Frequency response of the ideal comb filter with period $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$. (b) Frequency response of quadrature comb filter derived from the filter in (a).

4.2 מסנן N- מסלולי רבועי לא אידאלי

נחזור לנוסחה (4.6) ונפתחה עבור מסנן מסדר לא אידאלי.

$$V(j\omega) = A \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_{2k+1} T_{NF} \left(j\omega_s + \frac{j\omega_0}{2} + jk\omega_0 \right) \cdot S \left(\omega - \omega_s - \frac{\omega_0}{2} - k\omega_0 \right) =$$

$$= A \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} A_{2k+1} A_{2\ell+1} T_{NF} \left(j\omega_s + j\frac{\omega_0}{2} + jk\omega_0 \right) \delta \left(\omega - \omega_s - \omega_0 - k\omega_0 - \ell\omega_0 \right)$$

אם נגדיר $m \triangleq 1 + \ell + k$ אז:

$$V(j\omega) = A \sum_m \sum_k A_{2k+1} A_{2m-2k-1} T_{NF} \left(j\omega_s + j\frac{\omega_0}{2} + jk\omega_0 \right) \delta \left(\omega - \omega_s - m\omega_0 \right)$$

נחזור על הפתוח עבור אות בכניסה $e(t)$ כל שהוא שהחמרה פוריה שלו היא $E(j\omega)$.

$$V(j\omega) = \left[E(j\omega) * S(\omega) \cdot T_{NF}(j\omega) \right] * S(\omega) =$$

$$= \left[\sum_k A_{2k+1} \delta \left(\omega - \frac{\omega_0}{2} - k\omega_0 \right) * E(j\omega) T_{NF}(j\omega) \right] * S(\omega) =$$

$$= \left[\sum_k A_{2k+1} E \left(j\omega - j\frac{\omega_0}{2} - jk\omega_0 \right) T_{NF}(j\omega) \right] * \sum_{\ell} A_{2\ell+1} \delta \left(\omega - \frac{\omega_0}{2} - \ell\omega_0 \right) =$$

$$V(j\omega) = \sum_k \sum_{\ell} A_{2k+1} A_{2\ell+1} E \left(j\omega - j\omega_0 - jk\omega_0 - j\ell\omega_0 \right) T_{NF} \left(j\omega - j\frac{\omega_0}{2} - j\ell\omega_0 \right)$$

נרשום את (4.14) בצורה שונה אם $m \triangleq 1 + \ell + k$ ונקבל:

$$V(j\omega) = \sum_m \sum_{\ell} A_{2m-2\ell-1} A_{2\ell+1} E \left(j\omega - jm\omega_0 \right) T_{NF} \left(j\omega - j\frac{\omega_0}{2} - j\ell\omega_0 \right)$$

אם נציב $E(j\omega) = A \delta(\omega - \omega_s)$ ב (4.14) או (4.15) נקבל אותה תוצאה כמו ב (4.12).
אנו לא נרחיב את הדבור על החשובים שנעשו בסעיף 4.2 במסגרת העבודה נחייסם לתוצאה (4.10) בלבד.

5. תוצאות ניסויים

5.1. הסבר כללי

במסגרת העבודה נבנו שלושה מסננים N- מסלוליים למחצה:

א. רגיל - PNF

ב. רבועי - QPNF

ג. עם תוספת של מהפך במשוב החוג של המסנן הרגיל - PNF1.

שלושת המסננים נבנו על סמך אותו מעגל יסודי על כן התכנון לא מיועד למינמום רכיבים אלא להחאמה לשלושת המסננים. אפשר לעבור ממסנן אחד לשני בעזרת שנייים מעטים. השרטוטים הסכמתיים של שלושת המסננים נתנים בציורים 5.5 ו- 5.10, והשרטוטים המלאים בציורים 5.6, 5.8, 5.11 (מצורפים לסוף העבודה).

הרכיב העקרי במעגלים הללו הוא הרגיסטר האנלוגי N449 של חברת פילפס. הנתונים שלו מצורפים בנספח ד'. הרגיסטר האנלוגי הוא בעל 256 תאים ולהפעלותו דרוש מתח של כ- 15V בין v^+ ובין v^- . לקבלת העברה אופטימלית של האות דרוש שהממוצע של מתח הכניסה יהיה $v^+ - 6V$ ורמתו המקסימלית היא $1V_{RMS}$. כדי שממוצע המתח בכניסה יהיה 0V נבחרו $v^+ = 46V$ ו- $v^- = -9V$.

הרשת הבסיסית של המסנן N- מסלולי למחצה היא מסנן נגד-קבל מעביר נמוכים. ערכי הרכיבים האלו הם קבועים במשך הניסוי:

$$R_0 = 10K$$

$$C_0 = 5000PF$$

ערכים אלה קבועים רוחב סרט למסנן ה- R_0 של :

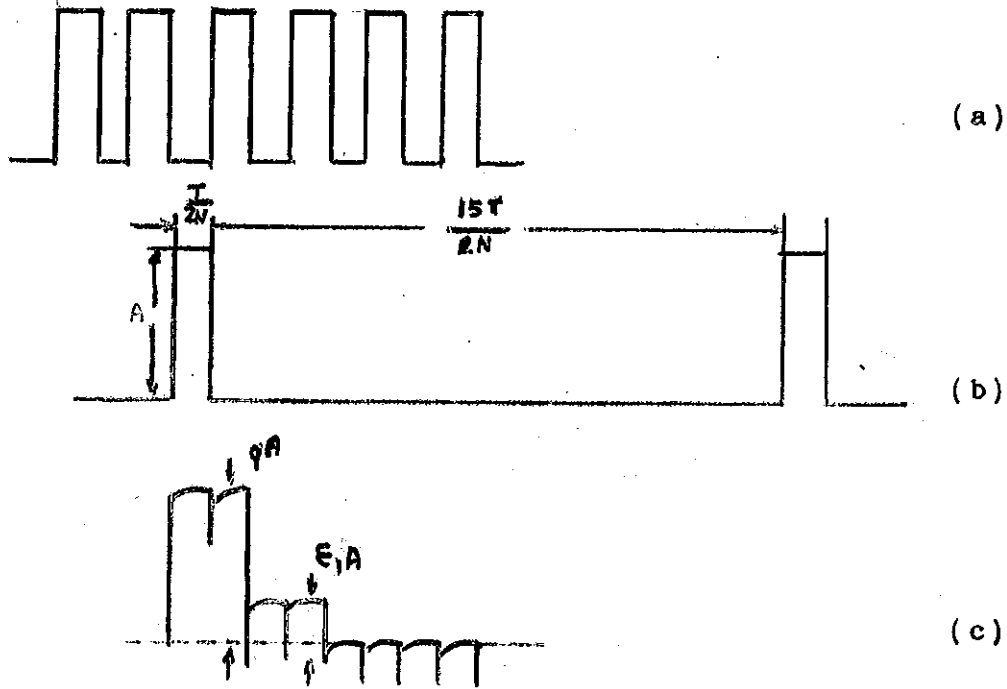
$$f_c = \frac{1}{2\pi R_0 C_0} = 3183Hz$$

למעבר ומחוג האות משתמשים במולטיפלקסרים מסוג 0M08 : 0D4053A, 0D4016A שנתונים מצורפים בנספח ד'. 0D4053A דרוש רק עבור המסנן ה- N- מסלולי למחצה הרבועי אך בגלל שקולי תכנון שצוינו הוא מופיע גם בשרטוטים האחרים.

לשם מחוג המולטיפלקסרים ולשם הפעלת הרגיסטר האנלוגי ישנה מערכת סולסי שעון שיוצרת סדרות פולסים q_1 ו- \bar{q}_1 לשם הפעלת הרגיסטר (q_1 ו- \bar{q}_1 חוברים ל P_B ו- P_A בהחאמה) ולשם חסימת הכניסה והיציאה בזמן מעבירי המטען, נכמו כן q_2 סדרה שהחדר שלו 2-9 מחדר q_1 .

5.2. כוון הרגיסטה האנלוגי

לשם העברת האות בצורה אופטימלית דרוש לכוון את הרגיסטר האנלוגי. לשם כך
 אנו משתמשים בפולס כוון המתואר בציור 5.1 (b).



ציור 5.1: (a) Q_1 (לשם יחוס)

(b) פולס הבדיקה

(c) מחח היציאה עבור פולס הכניסה (b).

Fig. 5.1: (a) Q_1 (for reference)

(b) The waveform of calibration pulse

(c) Output voltage for the input pulse in (b).

כדאי לציין שפולס הכיול הוצר קיים בזמן $\rightarrow q_1=0$; אם הוא היה קיים בזמן

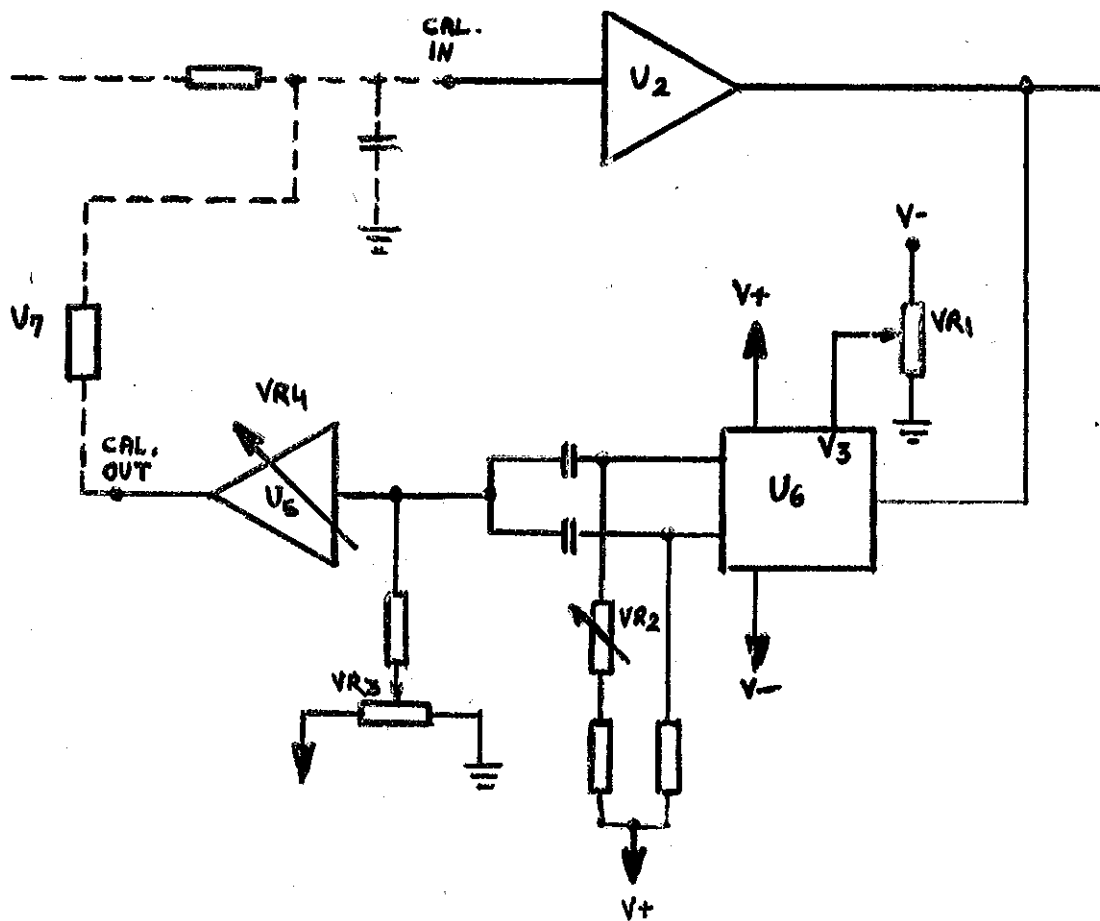
$\leftarrow q_1=1$ הוא לא היה מופיע כלל ביציאה. מחח היציאה מתואר בציור 5.1 (c).

בגלל שהיציאה של הרגיסטר היא מ-2 תאים סמוכים פולס היציאה רחב פי 2

מהכניסה.

במקרה של מסנן N - מסלולי רבועי למחצה, המגבר U_5 מהפך, על כן מתח היציאה הפוך מאשר בציור 5.1 (o).

את פולס הכיול אנו מכניסים במערכת לפני המגבר U_2 כאשר המסנן R_0 , 0 מנוחק מ- U_2 ; את היציאה מודדים אחרי המגבר U_5 כאשר U_7 הוצא מתוך המערכת, נחאר את החבורים הנ"ל בציור 5.2.



ציור 5.2: חיבור פולס הכיול.

Fig 5.2: The connection of calibration pulse.

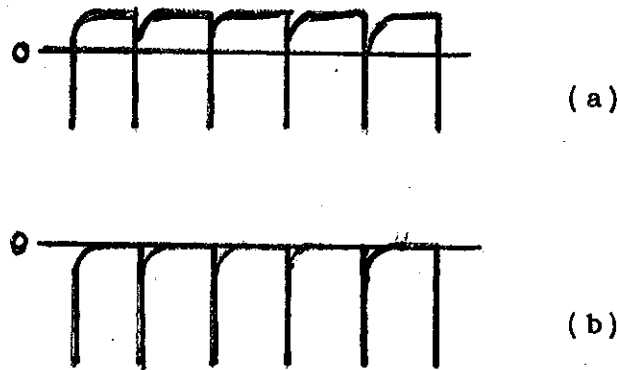
בתהליך הכוון:

א. משנים את $V+$, $V-$ ואת V_3 לקבלת \mathcal{E}_1 קטן ככל האפשר ו- q גדול ככל האפשר. הערות: הגדלים \mathcal{E}_1 ו- q הוגדרו בנוסחה (3.5). במקרה שלנו q , ההנחתה של המשוב, מורכבת משני גורמים: הרגיסטר האנלוגי שתורם q_1 והמגבר שתורם q_2 . ההנחתה הכוללת היא $q = q_1 \cdot q_2$. אנו מעוניינים בדרך כלל ב- $q=1$. למרות שמומלץ ש- $V_3=6V$, $V+=9V$, ו- $V_3=V+-1V$ יש לכוון מתחים אלה לחגובה אומטימלית.

ב. יש לכוון את הנגד המשתנה VR_2 לקבלת מתחים שווים בזמן ש- $q_1=0$ ובזמן ש- $q_1=1$. הערות: היות ומחח יציאה הרגיסטר האנלוגי מתקבל מחבור מתחים מ-2 תאים עוקבים יתכן ומתחים אלו אינם שווים בדיוק, על כן אנו משתמשים בנגד VR_2 לקבלת הגברים שונים של 2 דרגות של הרגיסטר.

ג. כוון הפוטנציומטר VR_3 לקבלת מחח אפס ביציאה כאשר הכניסה מקוצרת לאדמה, ראה ציור 5.3 (b).

הסבר: היציאה של הרגיסטר האנלוגי היא בצמוד A0, על כן המחח הממוצע ביציאה הרגיסטר הוא אפס. בזמן שינוי q_1 יש חופעות מעבר שמחבטאות בדופק מחח שלילי ביציאה, כאשר חופעת המעבר נגמרת המחח מתיצב עד למעבר הבא של q_1 , על כן כאשר מקצרים את הכניסה מתקבל ביציאה מחח ממוצע אפס אך המחח היציב שיחסי לכניסה נמצא ברמת מחח חיובית המחואר בציור 5.3 (a) כדי לבטל מחח חיובי זה וגם את ה-OFFSET המצטבר של המגברים VR_3 . במסנן הרבועי התפקיד של VR_3 הוא שונה במקצה בגלל שהצמוד הוא 00, על כן נדון בטעיף 5.5.



ציור 5.3: מחח היציאה כאשר הכניסה מקוצרת

(a) ללא קזוז.

(b) אחרי קזוז וכוון.

Fig. 5.3: The output voltage with zero input voltage

(a) without compensation.

(b) with compensation, after calibration.

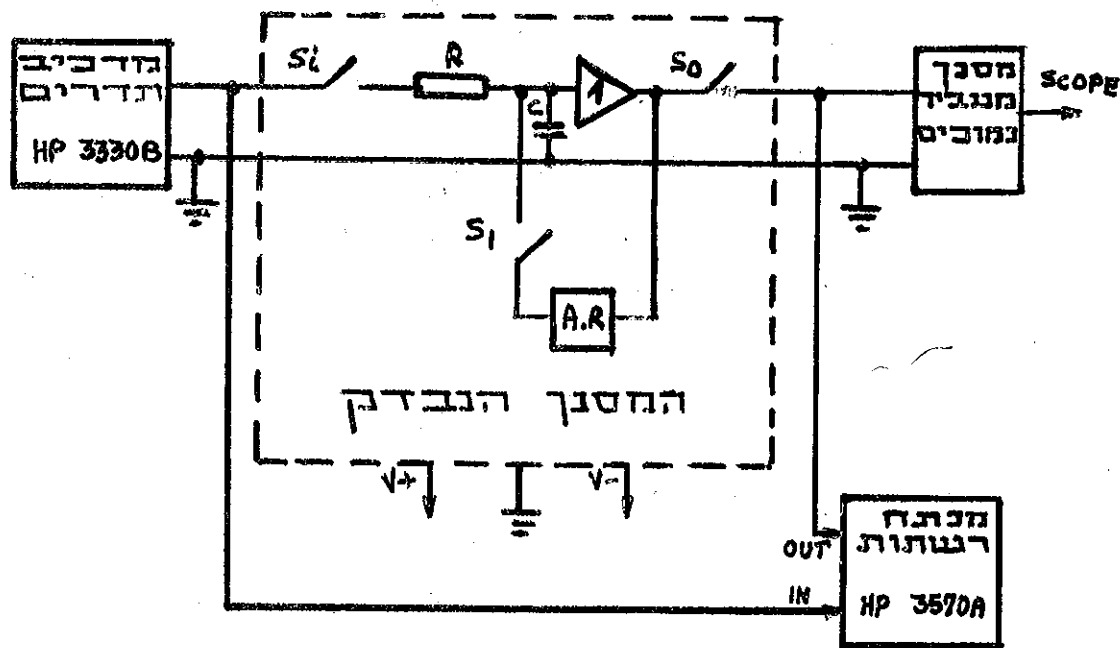
ד. כוון את הגבר המגבר U_5 בעזרת VR_4 לקבלת $q = 1$ (או $q = -1$) במקרה של מסנן רבועי למחצה).

5.3 מערך הבדיקה

מערך הבדיקה של המסננים מכיל את המכשירים:

- א. 2 ספקי כוח POWER SUPPLY HP6216A
- ב. מרכיב תדרים אוטומטי AUTOMATIC SYNTHESIZER HP3330B
- ג. מנתח רשתות NETWORK ANALYZER HP3570A

מנתח הרשתות מודד את היחס ביץ מתח הכניסה והיציאה ואת הפרש הפאזה ביניהם. המדידה נעשה בתוך קבוע שנקבע על ידי מרכיב התדרים. כדאי לציין שמתח היציאה נמדד אחרי מעבר דרך מסנן צר סרט הנמצא בתוך מנתח הרשתות ורוחבו 10,100 או 3000 הרץ. על כן מערך המדידה כמעט אינו רגיש לרעש או לאותות בתדר שונה מתדר הבדיקה. מערך המדידה השלם מתואר בציור 5.4.



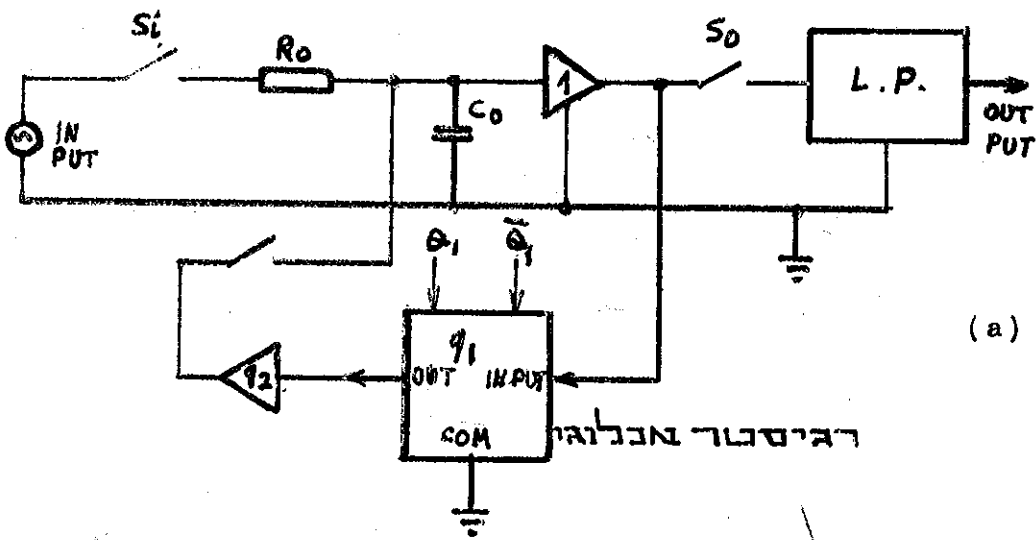
ציור 5.4: מערך המדידה של המסנן N- מסלולי למחצה ושל המסנן N- מסלולי רבועי למחצה.

Fig. 5.4: Test set to measure the response of the PNF and PQNF.

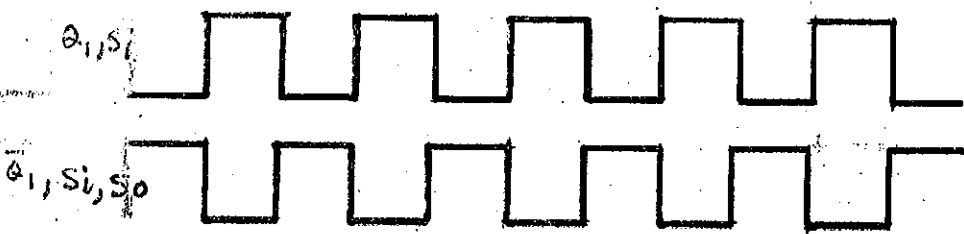
האוסצילוסקופ מיועד למדידה איכותית של אות היציאה. מרכיב התדירים שמשמש כאות כניסה הוא מאורק לאדמה ועל כן במקרה של בדיקה מסנן N - מסלולי למחצה רבועי היה צורך בהוספת שנאי בכניסה.

5.4 מסנן N - מסלולי למחצה (PNF)

הדיאגרמה של המסנן PNF מתוארת בציור 5.5 והמעגל כולו מתואר בציור 5.6 (מצורף לסוף העבודה).



(a)



(b)

ציור 5.5: מסנן N - מסלולי למחצה.

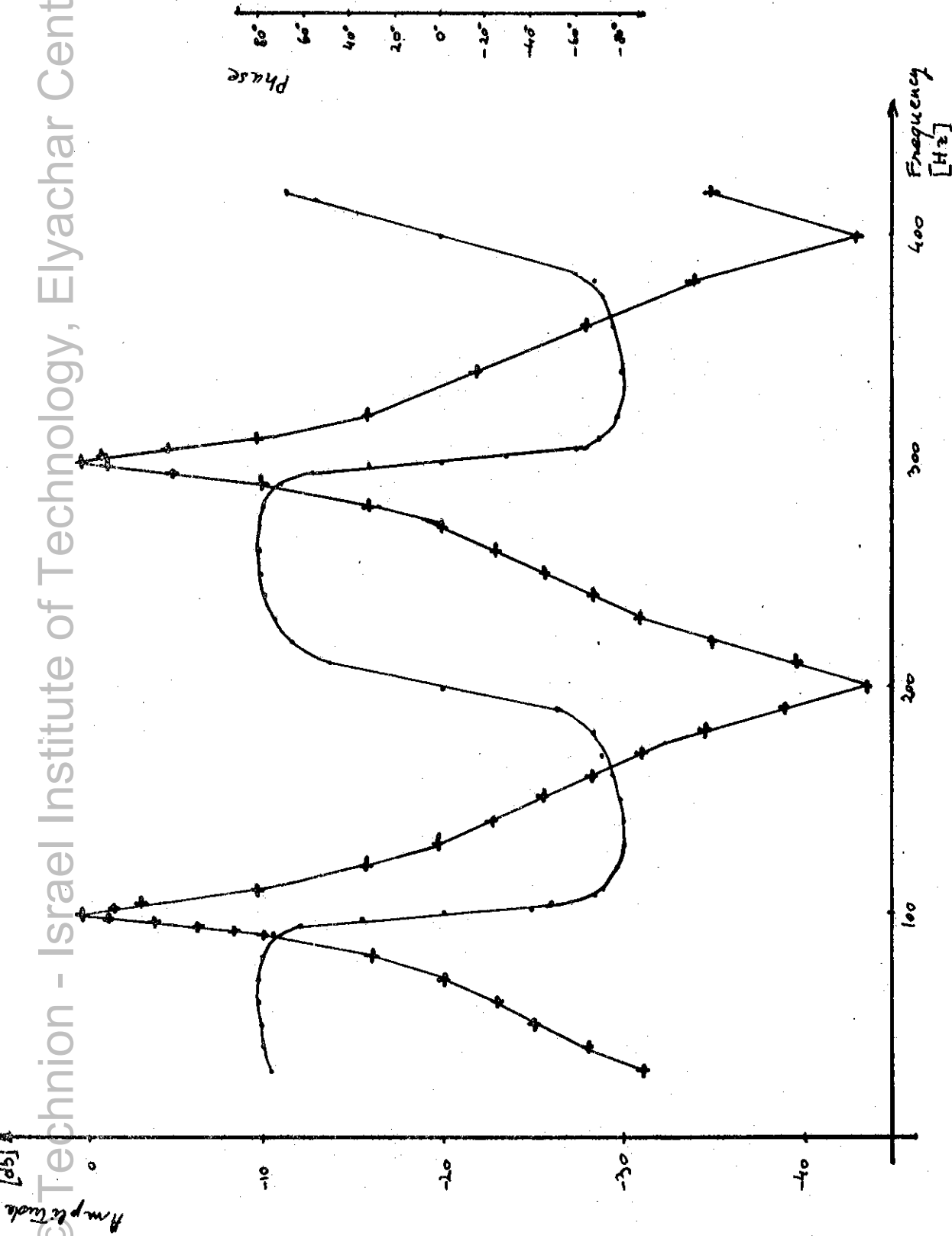
(a) דיאגרמה כללית

(b) צורות גלים

Fig. 5.5: Pseudo N-path filter

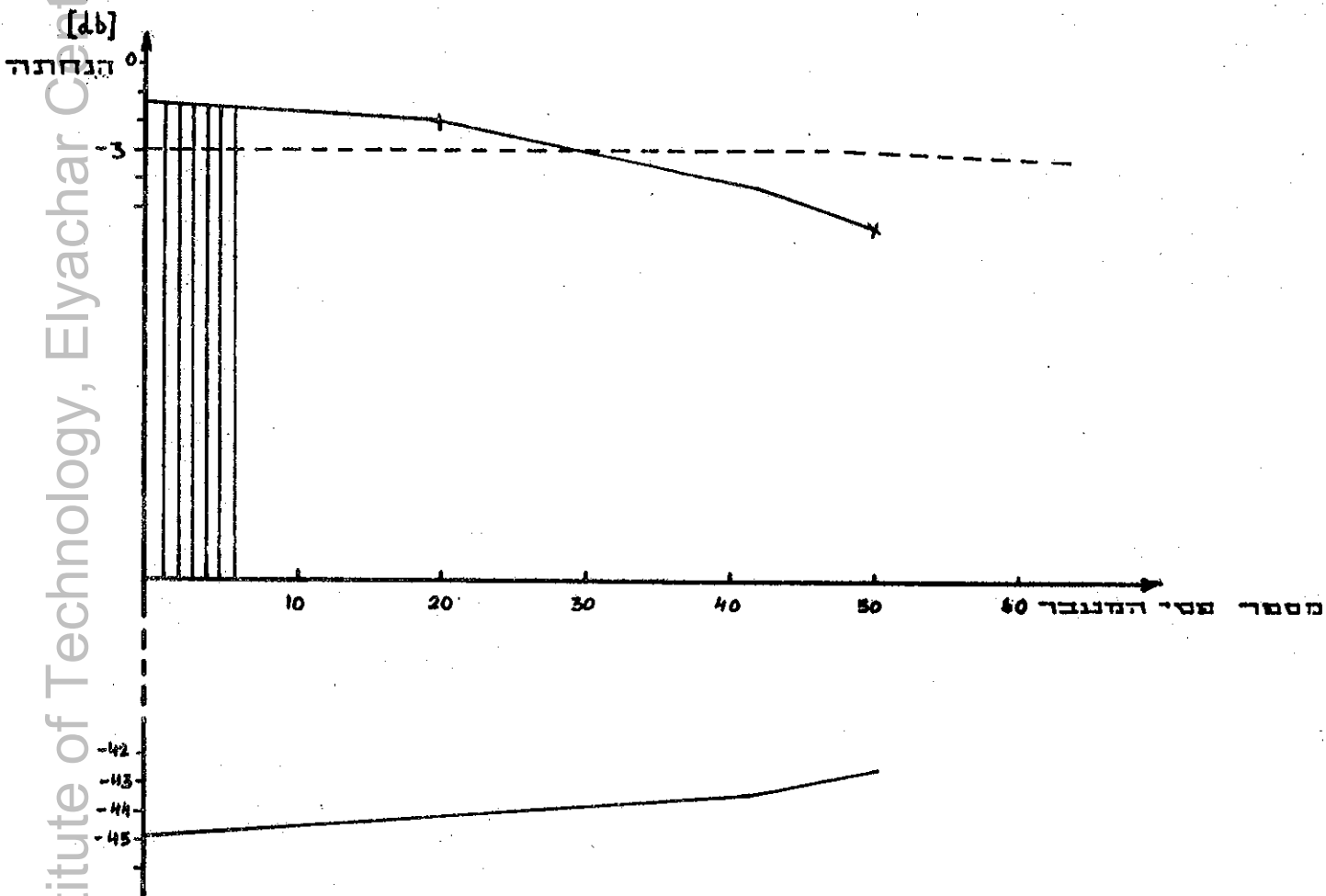
(a) System

(b) Gating functions waveforms



• • • • • עקום האמפליטודה בסולם 2 ו עקום המזהה בסולם 20 .

Fig. 5.7 (a): Frequency response of the PNF. Amplitude is marked with + and the phase with o.



ציור 5.7(b): המלוח הגאומטרי של נקודות המקסימום והמינימום של עסום ההענות של הממנן PNF. בלו מקווקו העסום החאורטי לל נקודות המקסימום.

Fig.5.7 (b): The geometric locus of the extremum points of the PNF. The theoretical curve is given by the dotted line.

העקום שהתקבל מתואר בציור 5.7 והוא בעל התכונות הבאות:

א. מתקבל מסנן מסרק. אמפליטודה של פסי המעבר השונים של המסרק הולכת וקטנה עבר דורים גבוהים. בציור 5.7 מצויר גם המקום הגאומטרי של נקודות השיא כפי שמתקבל מתוך הנוסחה (3.4) אם מציבים במקום m, m את $m = n = \frac{\omega_s}{\omega_0}$. אנו רואים שהסטייה בין העקום התיאורטי והנמדד היא בקרוב 1.5 db עבור פס המעבר הראשון.

ב. הפרש התדר בין שני פסי מעבר סמוכים של המסנן הוא 200 הרץ זאת אומרת $1/256$ מהתדר של ω_1 ($N=256$).

ג. רוחב הסרט של כל אחד מפסי המעבר של המסנן הוא 7.6 הרץ. הנתוח התיאורטי נותן רוחב סרט של:

$$\text{BW} = \frac{2fa}{N} = \frac{2 \cdot 3183}{2.256} = 12.4 \text{ Hz}$$

הגורם a/N נובע מהעובדה שערך הקבל מופיע מוכפל בגורם זה כמתואר בנוסחה (3.4) והגורם 2 נובע מהעובדה שמסנן צר סרט מכיל את שני הצדדים סביב התדר המרכזי.

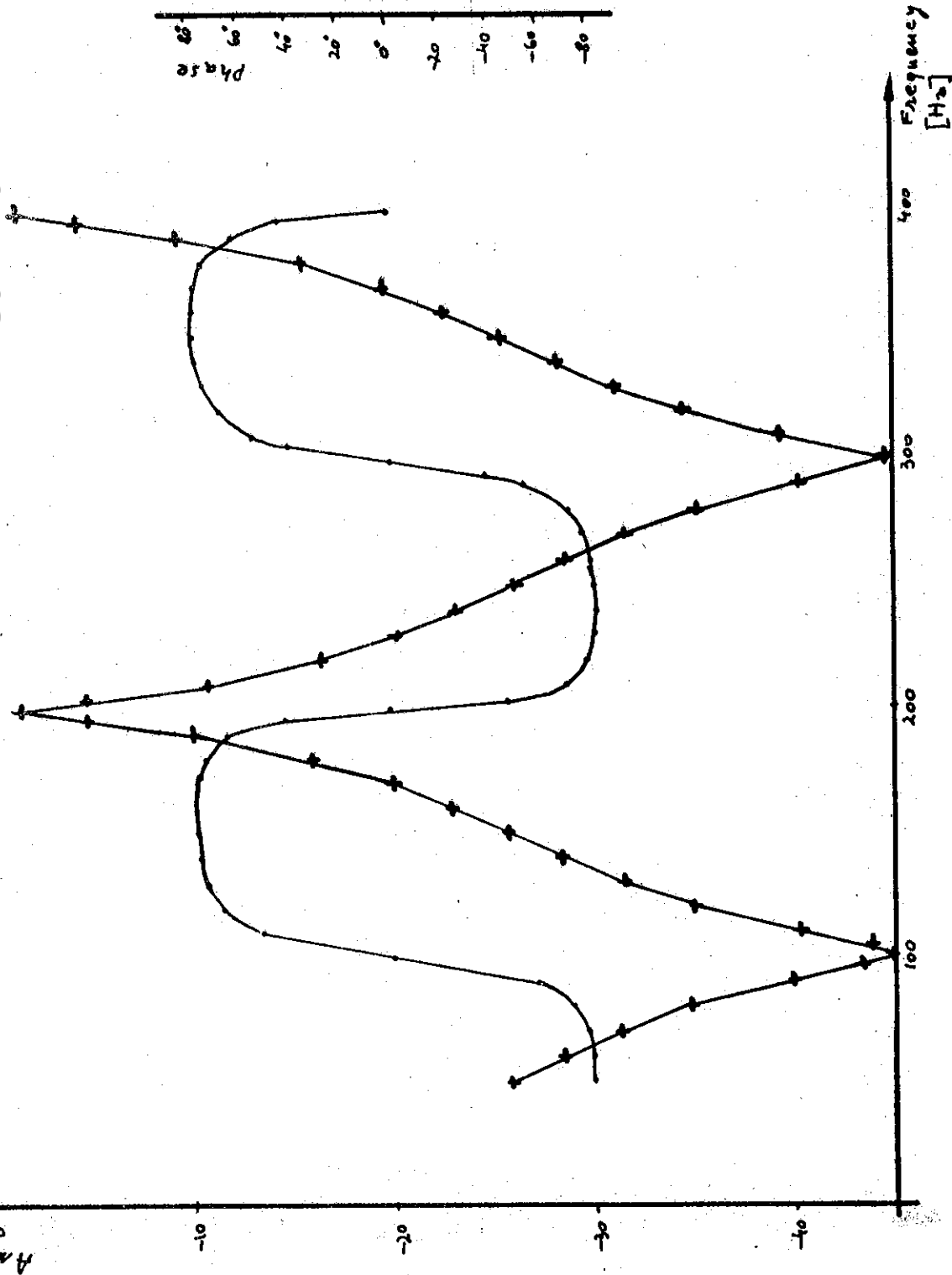
הסבר השינוי בין האמפליטודה ורוחב הסרט של פסי הצד במדידה ובתאוריה נובע בגלל העובדה ששנוי קטן (אחוזים בודדים) ב- q גורם לשנוי גדלים אלו. הגדלת q גורמת להידוד של הפסים.

5.5 מסנן N- מסלולי למחצה עם מהפך (PNFI)

הדיאגרמה של המסנן PNFI זהה לזו של המסנן PNF שמתוארת בציור 5.5 אך $q = -1$ והמעגל כולו מתואר בציור 5.8 (מצורף לטוף העבודה). את המסנן הזה קיבלנו מתוך PNF שתואר בסעיף 5.4 על ידי הפיכת המגבר U5 שבמשו, למתפרך. עקום ההענות שהתקבל מתאים למסנן מסרק ומתואר בציור 5.9 והוא בעל התכונות הבאות:

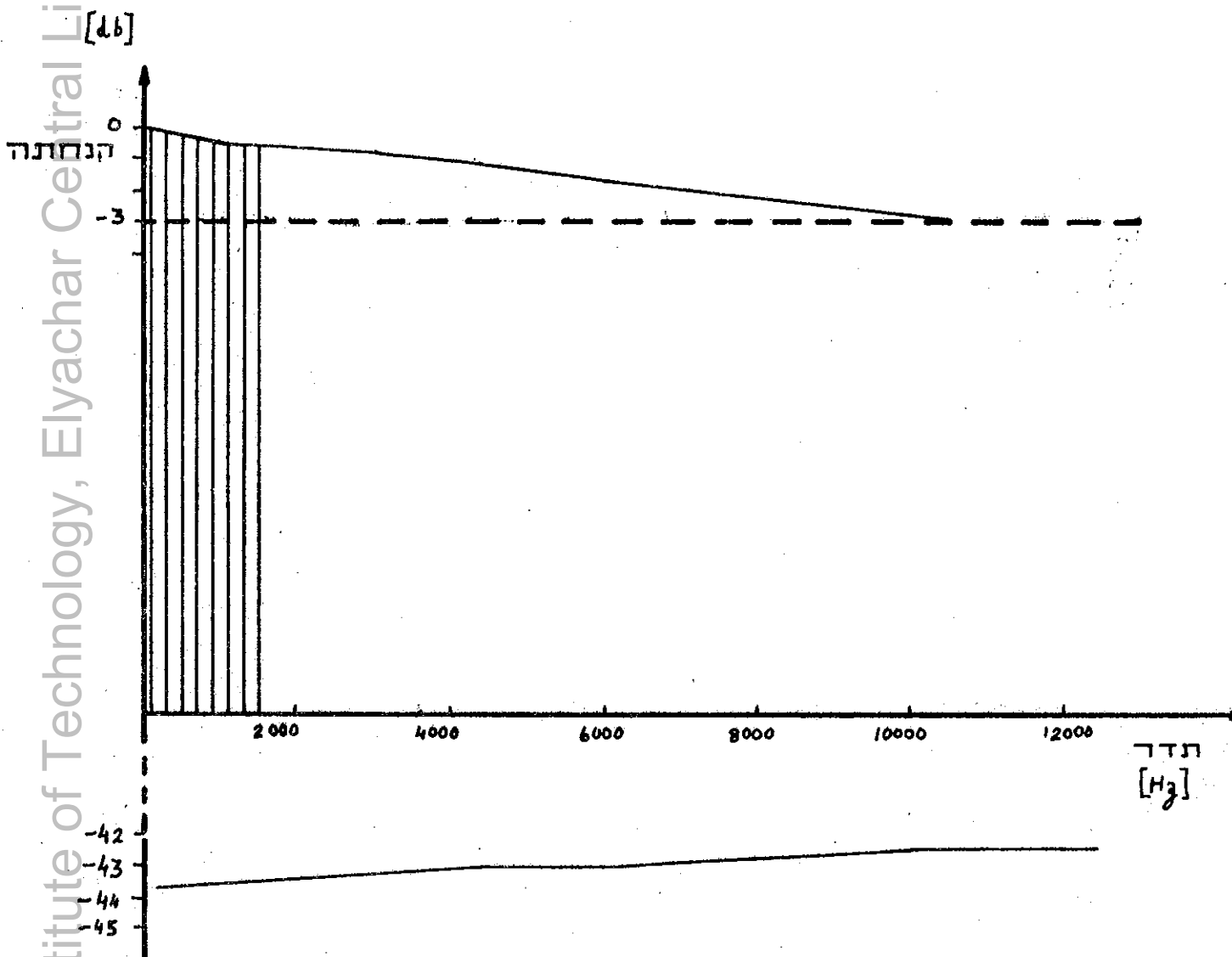
א. המרחק בין שני פסי מעבר של המסנן הוא 200 הרץ, זאת אומרת $1/N$ מהתדר של ω_1 . אך התדר המרכזי של הפס הראשון נמצא ב- 100 הרץ כלומר קיבלנו הזזה ב- 100 הרץ בעקום ההענות של המסנן הקודם.

ב. האמפליטודה של נקודות השיא בפסי המעבר הולכת וקטנה. המקום הגאומטרי של נקודות השיא, התיאורטי והמעשי משורטט בציור 5.9(b). ההפרש בניהם שווה ל- 3 db עבור פס המעבר הראשון.



• • 2 תנאים תחת תנאי + 2 תנאים תחת תנאי PNFI תחת תנאי תחת תנאי (a) 5.9 תחת

Fig. 5.9 (a): Frequency response of the PNFI. Amplitude is marked with + and the phase with •.



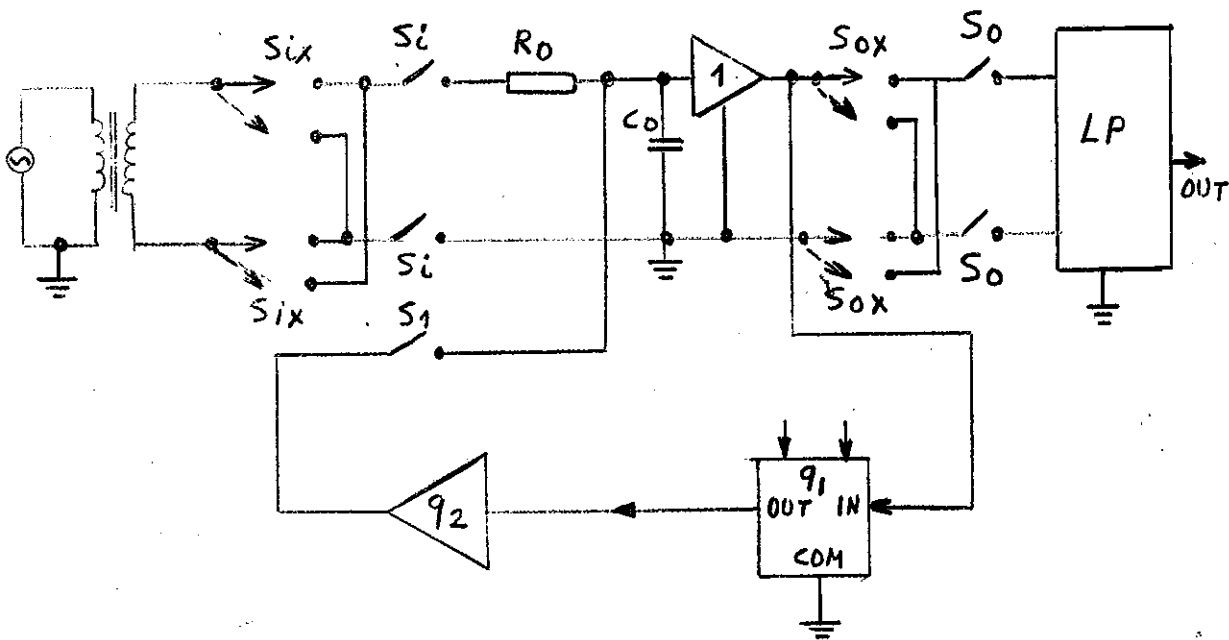
ציור 5.9(b): המקום הגאומטרי של נקודות המקסימום והמינימום של עקום ההענות של המסנן PNFI. בקו מקווקו העקום התאורטי של נקודות המקסימום.

Fig.5.9 (b): The geometric locus of the extremum points of the PNFI. the theoretical curve is given by the dotted line.

ג. רוחב הסרט של כל אחד מפסי המעבר של המסנן הוא 7.2 הרץ. לפי הנחות התיאורטי שתואר בסעיף 5.4 רוחב הסרט הוא 12.4 הרץ. ההבדלים שבין התאוריה ובין תוצאות הנסויים באמפליטודה ורוחב סרט הוסברו בסוף סעיף 5.4.

5.6 מסנן N- מסלולי למחצה רבועי (QPNF)

דיאגרמה של המסנן QPNF מתוארת בציור 5.10 והמעגל השלם בציור 5.11 (מצורף בסוף העבודה). במעגל זה הוספנו מחגים נוספים בכניסה וביציאה, בעזרתם אוחזת הכניסה והיציאה מתהפכים לסרוגין בחדר של 100 הרץ.



ציור 5.10: דיאגרמה מסנן N- מסלולי למחצה רבועי.

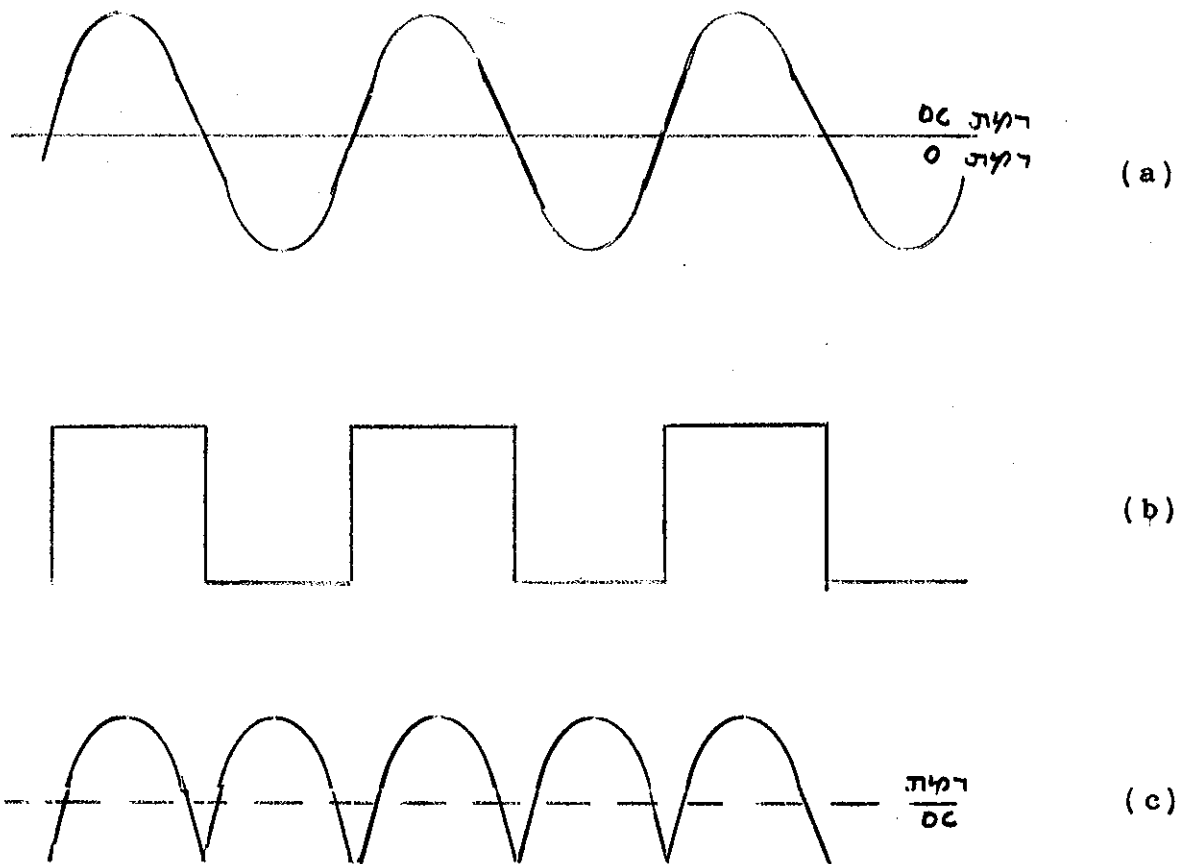
המיחוג של $Q_1, Q_1, S_1, S_0, S_1, S_0$ מתואר בציור 5.5 (b). S_{1x} ו- S_{0x} הם מוחגים בחדר שהוא $2^{-9} Q_1$. הרגיסטר האנלוגי מוחאם למעבר 100.

Fig 5.10: Schematic representation of QPNF. Waveforms of Q_1, Q_1, S_1, S_0 are shown in fig. 5.5 (b). S_{1x} and S_{0x} are commutated at a frequency of $2^{-9} Q_1$. The analog register is suited to DC transmission.

במעגל זה התעוררו בעיות מיוחדות שלא הופיעו במעגלים הקודמים:

א. אות הכניסה חייב להיות צף כדי לאפשר מחוגו בהצלחה. על כן עבור אות כניסה מאורק היה צורך בהוספת שנאי בכניסה, עקום ההענות של השנאי נמדד ונלקח בחשבון.

ב. מחוג מקור אות הכניסה גרם לכך שאות סינוסואידלי בעל מתח 50 אפסי הפך אחרי המחוג לאות בעל רמת 50 שונה מאפס, זאת כמתואר בציור 5.13.

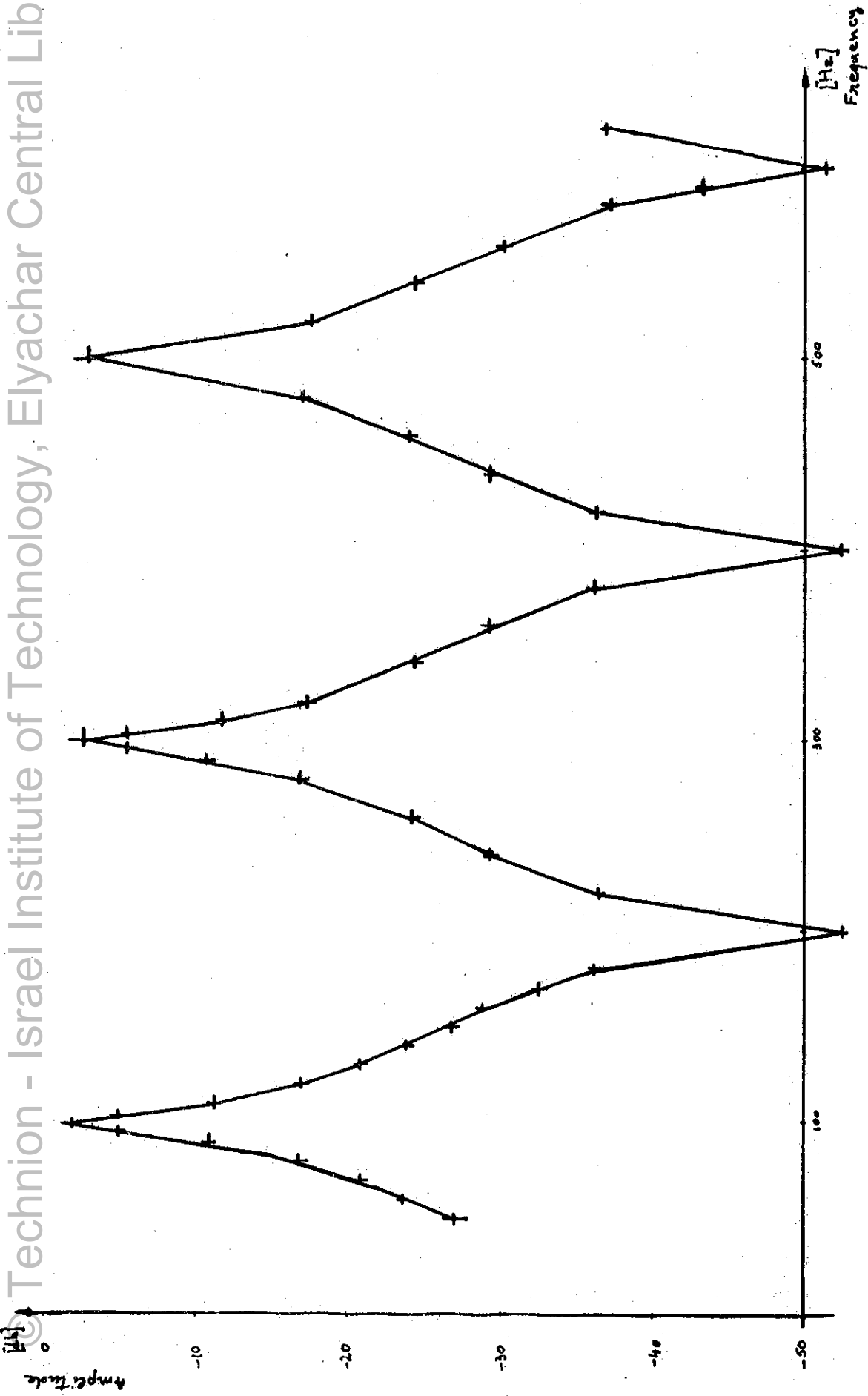


ציור 5.12: מיחוג בהצלחה של אות הכניסה:

- (a) אות הכניסה
- (b) פונקצית המיחוג Q_2 של S_{LX} , S_{OX}
- (c) האות אחרי מיחוג

Fig 5.12: Cross commutation of input signal

- (a) input signal
- (b) commutation function Q_2 of S_{LX} , S_{OX}
- (c) signal after commutation



.QMF 1300 70 81377M 81PP 55.13.2122

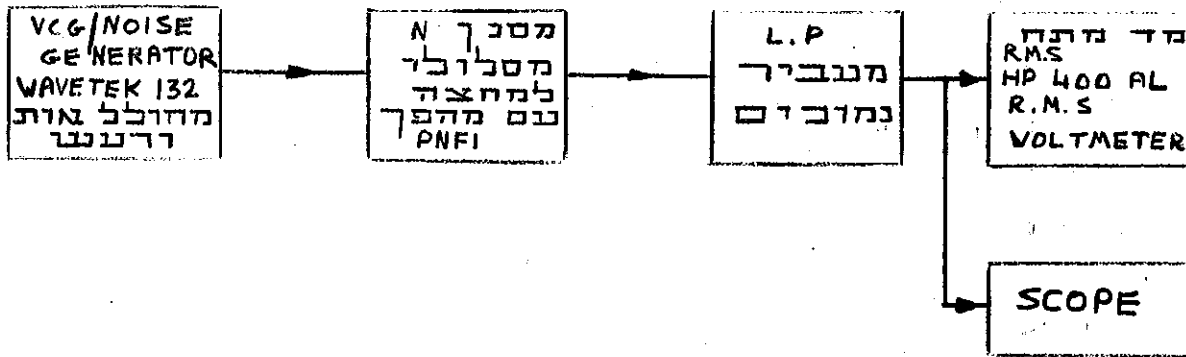
Fig 5.13: Frequency response of the QMF.

על כן יש לדאוג שהרגיסטר האנלוגי יעביר גם את רמת ה-0.00. לשם כך נעשה נסיון צמוד 00 של יציאת הרגיסטר והאות הוצאה לפני הקבלים (רגל 9). המסנן הרבועי כפי שמומש כאן רגיש מאוד לכוון המתחים V^+ ו V^- וכמו כן של נגדי הכוון המשתנים. על כן מעגל זה אינו מעשי. למרות שהתברר שאותם התוצאות ניתן להשיג בעזרת המסנן PNF1 שתואר בסעיף 5.5, הוסבר ותואר גם המסנן QPNF לשם השוואה. עקום ההענות שהתקבל מתואר בציור 5.13. בתהליך המדידה של עקום זה היה צורך בכוונים חוזרים של המסנן לפני כל מדידה. תכונות עקום ההענות של QPNF הם :

- א. ההפרש בין שני פסי מעבר סמוכים של המסנן הוא 200 הרץ זאת אומרת $1/256$ מחדר של q_1 , אך החדר היסודי הוא 100 הרץ.
- ב. רוחב הסרט של כל אחד מפסי המעבר הוא 7.3 הרץ. הסבר למהות רוחב סרט זה הובא בסעיף 5.4.

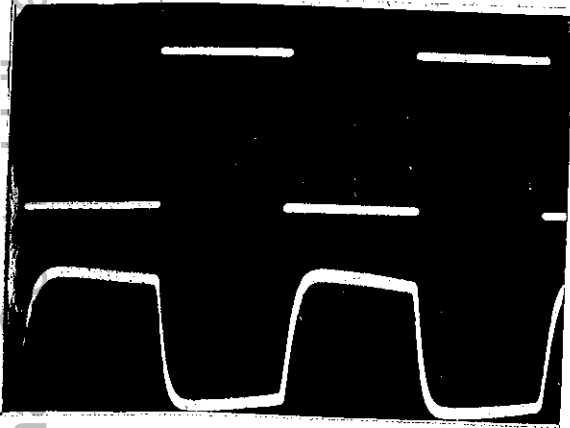
5.7 סנון אות מחזורי מחוץ רעש

שמוש אפשרי של מסנן המסרק הוא לסנון אות מחזורי מחוץ רעש. כדי להדגים שמוש זה השתמשנו במערך המדידה המשורטט בציור 5.14.

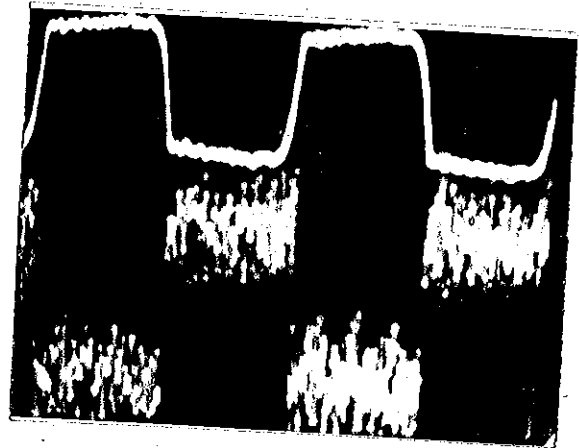


ציור 5.14 : מערך הדגמה סנון גל רבועי מחוץ רעש

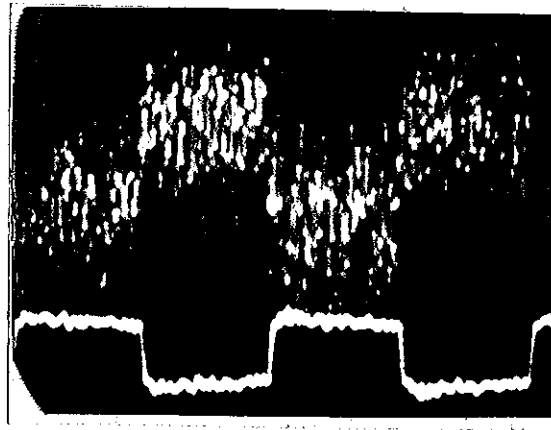
Fig 5.14: Test set to demonstrate filtering of a square wave from noise.



(a)



(b)



(c)

ציור 5.15: צורת מתח הכניסה והיציאה עבור אות כניסה מחזורי בעל יחסי אות לרעש שונים. מתח הכניסה נמצא בצד העליון של הצילום ומתח היציאה בצדם התחתון. הרגישות האופקית 2 MSE0/DIV

(a) אות כניסה בלי רעש; רגישות אנכית 0.5 v/DIV

(b) יחס אות לרעש בכניסה: $\frac{S}{N} = 10 \text{ db}$. רגישות אנכית 0.5 v/DIV

(c) יחס אות לרעש בכניסה: $\frac{S}{N} = 0 \text{ db}$. רגישות אנכית 1 v/DIV

Fig 5.15: Input and output voltage for periodical signal having different signal to noise ratios. Input voltage is shown in the upper side of photos and the output voltage in their lower side. Hor. sens. : 2 msec/div.

(a) Noiseless input signal, vert. sens. : 0.5v/div

(b) Input signal to noise ratio: $\frac{S}{N} = 10 \text{ db}$ vert. sens.: 0.5v/div.

(c) Input signal to noise ratio: $\frac{S}{N} = 0 \text{ db}$ vert. sens.: 1v/div.

המערכת משתמשת במסנן N- מסלולי למחצה עם מהפך שנבדק בסעיף 5.5. המסנן הזה מתאים כאן ביותר כי לגל רבועי יש הרמוניות אי זוגיות בלבד ומסנן PNF1 מעביר בחדרים מרכזיים שהם כפולות אי זוגיות של החדר המרכזי הנמוך ביותר. המסנן PNF1 הוא בעל מספר פסי מעבר רב מאוד ועל כן, על מנת להקטין את הרעש מוסיפים מסנן מעביר נמוכים בעל חדר קטעון של 1000 הרץ המספיק למעבר טוב של ההרמוניה השבועית. חפוקת מחולל האותות היא גל רבועי בחדר 100 הרץ הטבול ברעש. בחרנו יחס אות לרעש 0 db . בכניסה וביציאה התקבל שפור של 11 db ביחס אות לרעש.

צילומים של צורות מתח הכניסה והיציאה מובאים בצירור 5.15. יש לשים לב שהרעש הרבה יותר קטן אך ישנו עוות של הגל הרבועי. העוות נובע מהזזת הפאזה שקיימת בהרמוניות גבוהות עקב היתנהגות הבלתי אידאלית של המסנן. התבוננות בעקום ההענות של המסנן (צירור 5.12) מראה שהפאזה משתנה בפס המעבר ב- 90° לערך בין חדרי 3 db . על כן סטייה קטנה ביותר של החדר המרכזי עקב התנהגות לא אידאלית $(\epsilon_1, \epsilon_2 \neq 0)$ תגרום לסטיית פאזה. בחירת קבוע RC גדול יותר מקטין את העוות אך מקלקל את יחס אות לרעש ביציאה.

5.8 מסקנות מהנסויים

המסנן ה-N מסלולי למחצה משמש כמסנן מסרק בעל פסי מעבר בחדר יסודי ω_0 וכפולות שלו. המסנן ה-N מסלולי למחצה עם מהפך (PNF1) משמש כמסנן מסרק חדר יסודי $\frac{\omega_0}{2}$ וכפולות אי זוגיות שלו. כוון מדויק של הרגיסטר האנלוגי קובע את עקום ההענות: הנחתת מעבר ורוחב סרט. המתח המכסימלי שניתן להעביר הוא כ- 1 VOLT RMS . המסנן ה-N מסלולי למחצה (QPNF) רבועי כפי שמומש אינו מעשי עקב הקשיים בכוון יציב והמורכבות של המעגל, אך אותן החוצאות התאורטיות וחוצאות מעשיות הרבה יותר טובות מושגות בעזרת PNF1 שהינו מעגל הרבה יותר פשוט למומש.

המסננים PNF ו-PNF1 יכולים לשמש לסנון אות מחזורי מחוץ רעש יש להקפיד על כוון טוב של הרגיסטר ובחירת קבוע זמן RC מתאים כך שלא יוצרו עיוותים עקב סטיית פאזה בהרמוניות הגבוהות.

נספח א' - הקשר בין הכניסה והיציאה של מסנן N- מסלולי

אנו נתיחס למסנן שבציור 2.1 הפתוח הוא לפי FRANKS & SANDERG [1]. את הפונקציות המחזוריות $p(t)$ ו $q(t)$ ניהן לבטא בעזרת טור פוריה קומפלכסי:

$$p(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_m e^{j\omega_0 m t} \quad (A1)$$

$$q(t) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} Q_l e^{j\omega_0 l t} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{N\tau} \quad \text{כאשר}$$

החמרות לפלס של $p(t)$ ושל $q(t)$ הן $P(s)$ ו $Q(s)$.

$$P(s) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_m \frac{1}{s - j\omega_0 m} \quad (A2)$$

$$Q(s) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} Q_l \frac{1}{s - j\omega_0 l}$$

אם נגדיר את $p_m(t)$ ו $q_m(t)$ לפי

$$\begin{aligned} p_m(t) &= p[t - (m-1)\tau] \\ q_m(t) &= q[t - (m-1)\tau] \end{aligned} \quad (A3)$$

אז החמרות לפלס שלהם הם $P_m(s)$ ו $Q_m(s)$:

$$\begin{aligned} P_m(s) &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_m e^{-j\omega_0 m(m-1)\tau} \frac{1}{s - j\omega_0 m} \\ Q_m(s) &= \sum_{l=-\infty}^{+\infty} Q_l e^{-j\omega_0 l(m-1)\tau} \frac{1}{s - j\omega_0 l} \end{aligned} \quad (A4)$$

היות והכפלה במשור הזמן מתאימה לקונבולוציה במשור החדר:

$$\begin{aligned} V(s) &= \sum_{m=1}^N V_m(s) = \sum_{m=1}^N Y_m(s) * Q_m(s) = \\ &= \sum_{m=1}^N X_m(s) H(s) * \sum_{l=-\infty}^{+\infty} Q_l e^{-j\omega_0 l(m-1)\tau} \frac{1}{s - j\omega_0 l} \end{aligned} \quad (A5)$$

אם נשתמש בקשר:

$$J(s) * \frac{1}{s - \alpha} = J(s - \alpha) \quad (A6)$$

ונקבל

$$V(s) = \sum_{m=1}^N \sum_{l=-\infty}^{+\infty} Q_l e^{-j\omega_0 l(m-1)\tau} X_m(s - j\omega_0 l) H(s - j\omega_0 l) \quad (A7)$$

כדי למצוא את $X_m(s)$ נשתמש בקשר:

$$X_m(s) = E(s) * P_m(s) \quad (A8)$$

ואז:

$$X_m(s - j\ell\omega_0) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} P_m e^{-j\omega_0(m-1)m\tau} \cdot E[s - j(m+\ell)\omega_0] \quad (A9)$$

אם נציב את (A9) ב- (A7) נקבל:

$$V(s) = \sum_{\ell, m, n} Q_\ell P_m e^{-j\omega_0(m-1)(\ell+m)\tau} H(s - j\ell\omega_0) E[s - j(m+\ell)\omega_0] \quad (A10)$$

הסכום על m הוא על הטור הגאומטרי

$$\sum_{m=1}^N e^{-j\omega_0(m-1)(\ell+m)\tau} = \begin{cases} N & \ell+m = kN \\ 0 & \text{אחרת} \end{cases} \quad (A11)$$

כאשר k שלם.

אם נשתמש בקשר האחרון נקבל:

$$V(s) = N \sum_{k, \ell} Q_\ell P_{kN-\ell} H(s - j\ell\omega_0) E(s - jkN\omega_0) \quad (A12)$$

נוח לכתוב את הקשר האחרון בצורה:

$$V(s) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} F(k, s) E(s - jkN\omega_0) \quad (A13)$$

$$F(k, s) = N \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} Q_\ell P_{kN-\ell} H(s - j\ell\omega_0) \quad (A14)$$

זאת הנוסחה הכללית עבור מסנן N - מסלולי.

נספח ב' - פונקציית המערכת של מסנן N - מסלולי למחצה בעל רשת בסיסית ששומרת על מצבה כאשר הכניסה והיציאה שלה מנותקות.

הדיון שבנספח זה מתאים למערכת המתוארת בציור 3.1 (בהנחה שהרשת הבסיסית שומרת על מצבה כאשר הכניסה והיציאה שלה מנותקות), וגם למערכת המתוארת בציור 3.5, דיון זה מתבסס על עבודתן של WUPPER [2], [4]. נוח לצורך הדיון להתייחס למתח היציאה $v(t)$ כאל סכום של מתחים חלקיים.

$$v(t) = \sum_{m=1}^N v_m(t) \quad (B1)$$

כאשר $v_m(t)$ נחזק על ידי:

$$v_m(t) = \begin{cases} v(t) & t_{m,m} < t < t_{m,m} + \frac{aT}{N} \\ 0 & \text{אחרת} \end{cases} \quad (B2)$$

עבור $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$
 $m = 1, 2, \dots, N$

עבור המתחים $v_m(t)$ אנו יכולים לרשום:

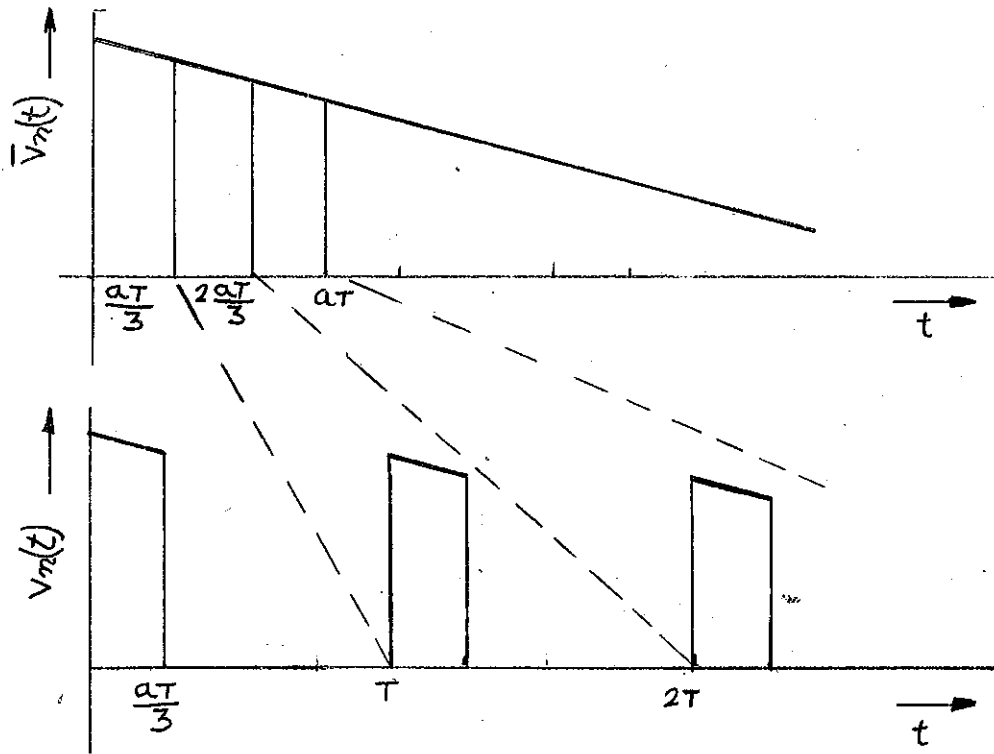
$$v_m \left[t_{m,m} + \frac{aT}{N} - 0 \right] = v_m \left[t_{m+1, m} + 0 \right] \quad (B3)$$

אנו נעבוד עם מתח $\bar{v}_m(t)$ המתקבל על ידי דחיסה בתחום הזמן של $v_m(t)$. את התחומים שבהם $v_m(t)$ אינו מתאפס מכנסים כך שנוצרת פונקציה בלי תחומים ריקים (אפס), הקשר בין $\bar{v}_m(t)$ ו- $v_m(t)$ מודגם בציור 8.1. בו נבחרו, $N=3$ ו- $m=1$ לשם פשטות.

את המתח $\bar{v}_m(t)$ ניתן למצא בעזרת המתקבל מדחיסה הכניסה האמיתית $e(t)$, על ידי הוצאתם וכנוסם של המרווחיים של $e(t)$ בהם $v_m(t)$ אינו אפס. על כן

$$\bar{v}_m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{e}_m(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (B4)$$

כאשר $h(t)$ היא תגובת ההלם של הרשת הבסיסית הקבועה בזמן.



ציור 8.1: הקשר בין $v_n(t)$ ו- $\overline{v_n(t)}$
Fig. B.1: The relation between $v_n(t)$ and $\overline{v_n(t)}$

אחרי חישוב $\overline{v_n(t)}$ נמצא את המרח $v_n(t)$ על ידי בטול דחיסת הזמן וראו המרח הכללי על ידי סיכום $v_n(t)$ על ידי שמוש ב (8.1).

עבור כניסה:

$$e(t) = A e^{j\omega_s t} \quad (8.5)$$

נקבל אחרי דחיסת בזמן

$$e_m(t) = A \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{j\omega_s [t + (m-1)T/N + (1-a/N)mT]} \times \{ u[t - maT/N] - u[t - (m+1)aT/N] \} \quad (8.6)$$

כאשר $u(t)$ היא מדרגת יחידה העולה ברגע $t=0$. החמרה פוריה של $e_m(t)$ היא $\overline{E_m(j\omega)}$ ואנו מקבלים:

$$\bar{E}_m(j\omega) = A e^{j\omega_s(m-1)T/N} \frac{1 - e^{-j(\omega - \omega_s)aT/N}}{j(\omega - \omega_s)}$$

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega - N\omega_s/a)maT/N} \quad (87)$$

אם החמרות פוריה של $\bar{v}_m(t)$, $\bar{v}_m(j\omega)$ הן $h(t)$, $H(j\omega)$ ונקבל:

$$\bar{V}_m(j\omega) = H(j\omega) \bar{E}_m(j\omega) \quad (88)$$

בעזרת הזהות:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega - N\omega_s/a)maT/N} = \frac{N\omega_s}{a} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left[\omega - \frac{N}{a}(\omega_s - m\omega_s)\right] \quad (89)$$

שבו $\delta(t)$ הוא הלם יחידה בנקודה $t=0$, אנו מקבלים את $\bar{v}_m(t)$ כחמרה הפוכה של $V_m(j\omega)$:

$$\bar{v}_m(t) = \frac{NA}{aT} e^{j\omega_s(m-1)T/N} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-j\omega_s T(1-a/N)}}{j[\omega_s(N/a-1) - mN\omega_s/a]} \cdot H\left[j\frac{N}{a}(\omega_s - m\omega_s)\right] e^{j\frac{N}{a}(\omega_s - m\omega_s)t} \quad (810)$$

כדי לבטל את דחיסת הזמן נשחמש בנוסחה:

$$\bar{v}_m(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \bar{v}_m\left[t - (m-1)T/N - (1-a/N)kT\right] \quad (811)$$

$$\cdot \left\{ u\left[t - (m-1)T/N - kT\right] - u\left[t - (m-1)T/N - kT - aT/N\right] \right\}$$

מ (811) אפשר לקבל בטוי במישור החדר שלא מכיל פונקציות מדרגה, הבטוי ניתן על ידי:

$$V_m(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{-j\omega[(1-a/N)kT + (m-1)T/N]} \int_{kaT/N}^{(k+1)aT/N} \sqrt{v_m(t)} e^{-j\omega t} dt \quad (B.12)$$

על ידי שמוש ב (B.10), (B.12) ואחרי ביצוע אינטגרציה מקבלים.

$$V_m(j\omega) = \frac{NA}{aT} e^{-j(\omega-\omega_s)(m-1)T/N} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-j\omega_s T(1-a/N)} - 1}{[\omega_s(\frac{N}{a}-1) - mN\omega_0/a]}$$

$$\frac{e^{j(\omega_s - m\omega_0 - a\omega/N)T} - 1}{[(\omega_s - m\omega_0)N/a - \omega]} H[jN/a(\omega_s - m\omega_0)] e^{-jkT(\omega - \omega_s)} \quad (B.13)$$

כדי למצא את $V_m(t)$ עלינו לבצע את ההתמרה ההפוכה של (B.13) נוה להשתמש בקשר:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{-jkT(\omega - \omega_s)} = \omega_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \omega_s + k\omega_0)$$

ונקבל

$$V_m(t) = \frac{NA}{aT^2} \sum_m \sum_k \frac{(e^{-j\omega_s T(1-a/N)} - 1) (e^{j[\omega_s(1-a/N) - (m-ka/N)\omega_0]T} - 1)}{[\omega_s(N/a-1) - mN\omega_0/a] [(N/a-1)\omega_s - (mN/a - k)\omega_0]}$$

$$\cdot H[j\frac{N}{a}(\omega_s - m\omega_0)] e^{j(m-1)2\pi/N + j(\omega_s - k\omega_0)t} \quad (B.14)$$

כדי לקבל את התגובה המלאה של מסנן N - מסלולי למחצה עלינו להציב את (B.14) ב (B.1) בחשוב הבטוי הזה אנו נשתמש בתוצאה:

$$\sum_{m=1}^N e^{j(m-1)k 2\pi/N} = \begin{cases} N & \forall k = rN \quad r = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ 0 & \text{אחרת} \end{cases}$$

ובצורה כזאת נקבל את הבטוי הסופי עבור $V(t)$

$$v(t) = \frac{N^2 A}{a T^2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-j\omega_s T(1-a/N)} - 1}{[(N/a - 1)\omega_s - m\omega_0 N/a]} \cdot \frac{e^{j\omega_s T(1-a/N) - j2\pi a r} - 1}{[(N/a - 1)\omega_s - (r + m/a)N\omega_0]} H\left[j \frac{N}{a} (\omega_s - m\omega_0)\right] e^{j(\omega_s + rN\omega_0)t} \quad (B.15)$$

אנו נגדיר את המערכת המשחנה בזמן בעזרת פונקציית המערכת $T(j\omega_s, t)$ שמוגדרת על ידי הקשר:

$$v(t) = T(j\omega_s, t) A e^{j\omega_s t}$$

כאשר

$$T(j\omega_s, t) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{(e^{-j\omega_s T(1-a/N)} - 1)(e^{j\omega_s T(1-a/N) - j2\pi a r} - 1)}{[(1-a/N)\omega_s T - 2\pi m][(1-a/N)\omega_s T - 2\pi(m+ar)]} \cdot H\left[j \frac{N}{a} (\omega_s - m\omega_0)\right] e^{j r N \omega_0 t} \quad (B.17)$$

אם את המסנן N - מסלולי למחצה נשים בין 2 מסננים מעבירי נמוכים כך ש: $v(t) = 0$ וגם $e(t) = 0$ עבור $|\omega_s| > \frac{N\omega_0}{2}$ אז המערכת הופכת להיות קבועה בזמן ופונקציית התמסורת היא:

$$T(j\omega_s) = a \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin^2 \left[\left(1 - \frac{a}{N}\right) \omega_s T / 2 \right]}{\left[\left(1 - \frac{a}{N}\right) \omega_s T / 2 - \pi m \right]^2} H\left[j \frac{N}{a} (\omega_s - m\omega_0)\right] \quad (B.18)$$

כדאי לציין שהרכיבים הראקטיביים של הרשת הבסיסית מופיעים מוגדלים פי N/a במסנן N - מסלולי למחצה.

נספח ג : מסנן N- מסלולי למחצה RC

אנו קבלנו בפרק 3 את הנוסחה (3.18):

$$T(j\omega) = \frac{\alpha}{1+j\omega RC} + \frac{NRC}{(1+j\omega RC)^2 T} \frac{(e^{-j[\omega T(1-\frac{\alpha}{N})+\alpha]} - 1) (1 - e^{-(j\omega + \frac{1}{RC})\frac{\alpha T}{N}})}{1 - e^{-(j\omega + \alpha/NRC)T - j\alpha}} \quad (0.1)$$

נעזר בגדלים המוגדרים בנוסחאות (0.2) ובנוסחאות העזר (0.3).

$$y = \frac{\omega T(1-\frac{\alpha}{N})}{2} + \frac{\alpha}{2} \quad (0.2)$$

$$z = \frac{\omega T}{2} + \frac{\alpha T}{jRC2N} + \frac{\alpha}{2}$$

$$y - z = -\frac{\omega T\alpha}{2N} - \frac{\alpha T}{jRC2N} = -\frac{\alpha T}{jRC2N} (1 + j\omega RC) \quad (0.3)$$

$$z - y = \frac{\alpha T}{jRC2N} (1 + j\omega RC)$$

ואז נקבל במקום (0.1) את :

$$T(j\omega) = \underbrace{\frac{\alpha}{1+j\omega RC}}_{B_1} + \underbrace{\frac{NRC}{(1+j\omega RC)^2 T} \frac{(e^{-j2y} - 1) [1 - e^{-j2(z-y)}]}{1 - e^{-j2z}}}_{B_2} \quad (0.4)$$

$$T(j\omega) = B_1 + B_2$$

אנו נפתח כל אחד מן האיברים של הביטוי (0.4).

$$B_1 = \frac{\alpha}{1+j\omega RC} = \frac{\alpha \sin^2 y}{1+j\omega RC} \frac{1}{\sin^2 y} = \frac{\alpha \sin^2 y}{1+j\omega RC} \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{(n+y/\pi)^2} \quad (0.5)$$

$$B_2 = \frac{NRC}{T(1+j\omega RC)^2} \frac{(e^{-j2y} - 1) [1 - e^{-j2(z-y)}]}{1 - e^{-j2z}} = \frac{NRC}{T(1+j\omega RC)^2} \cdot \frac{-2j \sin y}{e^{-jy}} \cdot \frac{2j \sin(z-y)}{e^{-j(z-y)}} \cdot \frac{e^{-jz}}{2j \sin z} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{NRC 2j}{T(1+j\omega RC)^2} \frac{-\sin y \sin(z-y)}{\sin z} = \\
 &= \frac{2jNRC}{T(1+j\omega RC)^2} \frac{-\sin y (\sin z \cos y - \sin y \cos z)}{\sin z} = \\
 &= \frac{2jNRC \sin^2 y}{T(1+j\omega RC)^2} [\cot z - \cot y] = \\
 &= \frac{2jNRC \sin^2 y}{T(1+j\omega RC)^2} \frac{1}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{n + \frac{z}{\pi}} - \frac{1}{n + \frac{y}{\pi}} \right] = \\
 &= \frac{2jNRC \sin^2 y}{\pi^2 T(1+j\omega RC)^2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{(y-z)}{\left(n + \frac{z}{\pi}\right)\left(n + \frac{y}{\pi}\right)} \quad (0.5)
 \end{aligned}$$

ובעזרה (0.3) מקבלים:

$$B_2 = \frac{-a \sin^2 y}{\pi^2 (1+j\omega RC)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\left(n + \frac{z}{\pi}\right)\left(n + \frac{y}{\pi}\right)} \quad (0.6)$$

נרשום את הביטוי השלם עבור $\tau(j\omega)$:

$$T(j\omega) = B_1 + B_2 = \frac{a \sin^2 y}{\pi^2 (1+j\omega RC)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{\left(n + \frac{y}{\pi}\right)^2} - \frac{1}{\left(n + \frac{z}{\pi}\right)\left(n + \frac{y}{\pi}\right)} \right]$$

על ידי שמוש ב(0.3) מקבלים:

$$T(j\omega) = \frac{a^2 T \sin^2 y}{12\pi^2 RC N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\left(n + \frac{y}{\pi}\right)^2 \left(n + \frac{z}{\pi}\right)} \quad (0.7)$$

נציב את (0.2) ב(0.7) ונקבל:

$$T(j\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{a \sin^2 \left[\frac{\omega T}{2} \left(1 - \frac{a}{N}\right) + \frac{\alpha}{2} \right]}{\left[n\pi + \frac{\omega T}{2} \left(1 - \frac{a}{N}\right) + \frac{\alpha}{2} \right]^2} \frac{1}{1 + j \left[\omega + \left(n + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \omega_0 \right] RC N/a} \quad (0.8)$$

References

1. L.E. Franks, I.W. Sandberg. "An Alternative Approach to the Realization of Network Transfer Functions": The N-Path Filter BSTJ, vol. XXXIX, No. 5, Sept. 1960, pp 1321 - 1350.
2. H. Wupper. on the Theory of Pseudo - N-Path Filters. and their Realization, Doctoral Dissertation, 1971, Ruhr - Univ. Bochum, Germany.
3. H.Wupper, "Low Frequency Comb Filter Containing a Novel Integrated Device" Paper Presented at the NATO Advanced Study Institute on Network and Signal Theory, Bournemouth (U.K), 1972.
4. H.Wupper. "A Modified N-Path Filter Suited for Practical Realization", IEEE Trans. Circ. & Syst, vol. CAS - 21, No. 3, May 74, pp 449 - 456.
5. Y. Sun, Network Functions of Quadrature N - Path Filters, IEEE Trans. on Circuit Theory, Nov. 70 pp 594 - 599.
6. F.L.J. Sangster and K. Teer, "Bucket Brigade Electronics - New Possibilities for Delay, Time - axis Conversion, and Scanning", IEEE J. Solid State Circuits, vol. SC - 4, June 1969, pp 131 - 136.
7. W.S. Boyle and G.E. Smith. "Charge Coupled Semiconductor Devices", Bell Syst. Tech. J., vol. 49, pp. 587 - 593, Apr. 1970.

Pseudo N- Path Filters

Final Paper

Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Science
in Electrical Engineering

by

Reichman Arie

Submitted to the Senate of Technion - Israel Institute of Technology
Tamuz 5735
Haifa

July 1975

The study was carried out under the supervision of
Dr. D. Malah at the Faculty of Electrical Engineering,
- Israel Institute of Technology.

I wish to express my sincere gratitude to Dr. Malah
for his help and devoted guidance and to Dr. H. Wupper
for sending me up to date information about his work on
the subject of N- path Filter.

TABLE OF CONTENTS

	<u>page</u>
ABSTRACT	1
NOTATION	3
CHAPTER 1 - INTRODUCTION	5
CHAPTER 2 - N-path filter	6
2.1-N-path filter features	6
2.3-N-path filter description	8
2.4-N-path filter drawbacks	12
CHAPTER 3 - PSEUDO N-PATH FILTER(PNF).....	13
3.1 Introduction.....	13
3.2 Transmission function.....	15
3.3 PNF realized by means of analog register	18
3.4 Non-ideal behaviour of the analog register.....	21
3.5 Adding a phase shift in filter's feedback.....	24
CHAPTER 4 - QUADRATURE N-PATH FILTER (QNF).....	26
4.1 Definition. Transmission function.....	26
4.2 Non-ideal QNF.....	29
CHAPTER 5 - EXPERIMENTS RESULTS.....	30
5.1 General description.....	30
5.2 Analog register calibration.....	31
5.3 Test set.....	34
5.4 Pseudo N-path filter (PNF).....	35
5.5 Pseudo N-path filter with inverter (PNFI)	38
5.6 Quadrature PNF.....	41
5.7 Square wave filtering from noise.....	44
5.8 Experiments conclusions.....	46

TABLE OF CONTENTS (Cont'd)

	<u>page</u>
APENDIX A - INPUT TO OUTPUT RELATION FOR N-PATH FILTER.....	47
APENDIX B - SYSTEM FUNCTION HAVING A BASIC CIRCUIT WHICH DOES NOT CHANGE ITS STATE WHEN DISCONNECTED.....	49
APENDIX C - PSEUDO N-PATH FILTER RC.....	54
REFERENCES.....	56

A B S T R A C T

Transfer functions, having electronically controllable characteristics, can be realized by means of time varying networks. This work describes the characteristics of N-path filters and Pseudo N-path filters with periodic frequency response and shows practical realization of some of them. The filters discussed are:

a. N-path filter (NF) is formed from a parallel connection of N circuits with the same time-constant transfer function. Each of those circuits, called basic circuits, is connected between input and output modulators. In a particular case the circuits are between periodical switches, switching at the frequency ω_0 , and the transfer function of the filter is then periodic with respect to frequency. The form of the basic circuits transfer function appears around center frequencies which are multiples of ω_0 .

The drawbacks of the NF are caused by the fact that the basic filter must be identical and the fact that the switching frequency ω_0 cannot be filtered if enters the basic filters.

b. Pseudo N-path filters (PNF) is derived from the NF. It contains only one basic circuit instead of the active circuit in NF (the circuit connected between input and output at a certain moment). The non-active circuits are replaced by analog shift registers. It can store and transfer analog information and serve as a memory for the basic circuit states. The analog shift register is a novel device having the principle of Bucket Brigade or of Charge Devices.

u

The advantage of PNF are: the whole signal gets through the same path and the switching frequency can be easily filtered. It's drawbacks result from the non-ideal operation of the analog shift register which causes changes in the amplitude of the passband, and their center frequencies and bandwidth.

c. By including an inverter in the feedback path of the PNF we obtain a shift of the frequency response by $\omega_0/2$. This filter is called Pseudo N-path filter with inverter (PNFI).

d. Another attempt to change the frequency response of PNF was done by inverting the polarity of the input and output signal at the rate of ω_0 by an additional switching. The filter is called quadrature pseudo N-path filter (QPNF). It's frequency response is similar to that of the PNFI but its realization is much more complicated and having non stable characteristics.

This paper includes the realization of PNF, PNFI and QPNF. The realization of PNF and PNFI is relatively simple. Changing the switching frequency we change the center frequency of the pass bands of the frequency response. A possible application of the filter in this paper is filtering of a noise periodic signal.