

# הנדסה ביו רפואית

## מעבדה בעיבוד אותות

### פזיולוגיים

מגישים:

דן טורצקי  
סול אמרה

תאריך:

22.11.2022

## תוכן עניינים:

1	תקציר:	3
2	ניסויים:	4
2.1	ניסוי 1 : הכרת ציוד המעבדה	4
2.1.1	היפותזה :	4
2.1.2	מתודולוגיה :	4
2.1.3	תוצאות :	4
2.1.4	מסקנות :	6
2.2	ניסוי 2 :	7
2.2.1	היפותזה :	7
2.2.2	מתודולוגיה :	7
2.2.3	תוצאות :	7
2.2.4	מסקנות :	10
2.3	ניסוי 3 :	11
2.3.1	היפותזה :	11
2.3.2	מתודולוגיה :	11
2.3.3	תוצאות :	11
2.3.4	מסקנות :	15
2.4	ניסוי 4 :	16
2.4.1	היפותזה :	16
2.4.2	מתודולוגיה :	16
2.4.3	תוצאות :	16
2.4.4	מסקנות :	18
2.5	ניסוי 5 :	19
2.5.1	היפותזה :	19
2.5.2	מתודולוגיה :	19
2.5.3	תוצאות :	19
2.5.4	מסקנות :	29
2.6	ניסוי 6 :	30
2.6.1	היפותזה :	30
2.6.2	מתודולוגיה :	30
2.6.3	תוצאות :	30
2.6.4	מסקנות :	32
3	מסקנות כלליות	33
4	מקורות	33
5	נספחים	35

## 1 תקציר:

במעבדה זו השתמשנו בתאוריה שלמדנו על דגימה ושחזור באופן מעשי, דבר שעזר מאוד להעמקה של ההבנה שלנו בנושאים. בניסוי הראשון השונו בין שני דרכים למציאת הערכים הרצויים- הן באמצעות הסמנים והן באמצעות חישוב במטלאב והופתענו לראות כי תוצאות הסמנים היו מדויקות יותר מהמטלב. בניסוי השני הכרנו את מערכת הדגימה. ראינו כי כאשר אנו דוגמים בתדר הנמוך מתדר נייקויסט באמצעות הדוגם יש אלייסינג של האות הגורם לעיוות של האות אותו דגמנו. בנוסף, למדנו לעשות הצגה של FFT של האות ולהשתמש בו לחישובים. בניסוי השלישי שינינו את התדירות בטווח ערכים מסוים וכך קיבלנו את התגובה להלם. ראינו כיצד ניתן לחשב מהגרף הנוצר את תדר הקטעון וסדר המסנן בו השתמשנו. בנוסף, בדקנו את השפעת שינוי תדר הקטעון של מסנן מסוג Butterworth LPF על התוצאות. ראינו כי ללא המסנן קיבלנו את התוצאה הטובה וככל שהורדנו את תדר הקטעון של המסנן, איבדנו יותר רכיבי תדר ולכן התוצאה הייתה פחות קרובה לאות הרצוי והכילה התפלגות יותר אחידה של ערכים. בניסוי הרביעי למדנו לבצע שחזור של אות, וראינו שימוש בדוגם לצורך שחזור מסוג ZOH. בניסוי החמישי למדנו כיצד ניתן לייצר בתוכנת המטלאב את המסנן שלמדנו, והשתמשנו בהם על מנת לסנן אות שסונתז וגם את אות ה-ECG שרכשנו בניסוי 2. ראינו כי המסננים לא היו אידאליים ושיערנו שניתן לשפר את התוצאות על ידי העלאת סדר המסנן. לאחר מכן, בחנו השערה זו על מסנן מסוג Butterworth ואיששנו את השערתנו. בניסוי השישי למדנו לעשות כימות של אות כפי שלמדנו באופן תאורטי וראינו כיצד סוג הכימות משפיע על השגיאה. בנוסף, מימשנו את אלגוריתם מיקס לויד ו- $\mu$  low דבר שעזר מאוד בהבנתם.

## 2 ניסויים:

### 2.1 ניסוי 1: הכרת ציוד המעבדה

#### 2.1.1 היפותזה:

בניסוי זה נשווה בין מציאת ערכים על ידי הסמנים באוסילוסקופ לבין חישוב באמצעות המטלב. נצפה לכך שמציאת הפיקים על ידי המטלב בצורה חישובית תהיה מדויקת יותר מבחירת הפיק על ידי הסתכלות, כיוון שבשיטת הסמנים יש יותר מקום לטעויות אנוש שישפיעו על דיוק התוצאות.

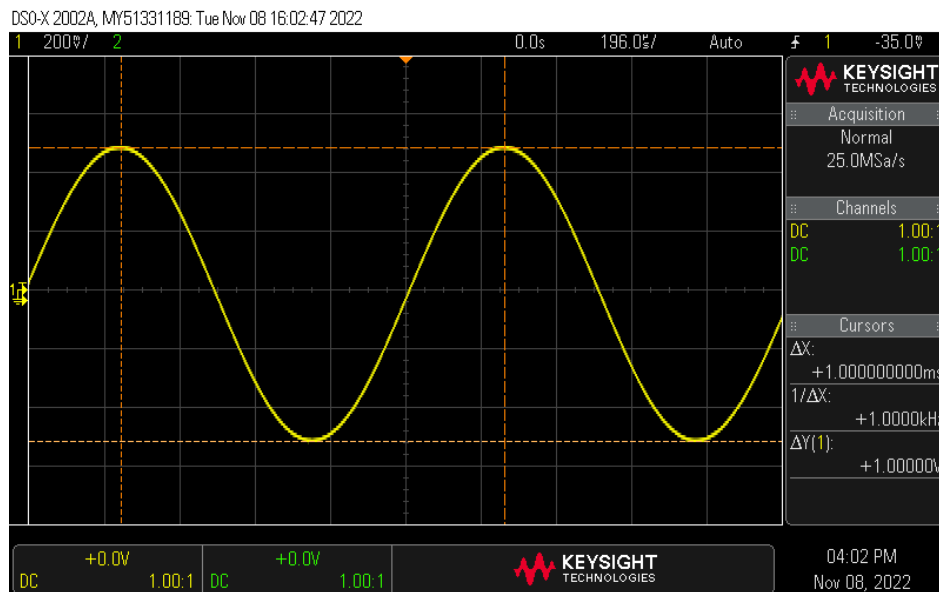
#### 2.1.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחולל אותות, אוסילוסקופ, כבל BNC-BNC

**מהלך הניסוי:** חיברנו את מוצא המחולל למפצל ואת צידו האחר אל כניסת המדידה של הסקופ. העברנו את התנגדות המוצא של המחולל ל High Z. אות סינוסי בתדר 1 kHz ובעל אמפליטודה של  $1 V_{pp}$  והצגנו אותו על הסקופ. הצבנו את הסמנים האנכיים על פיקים סמוכים חיוביים כדי למדוד את זמן המחזור, ואת הסמנים האופקיים על פיקים סמוכים בעלי סימנים הפוכים כדי למדוד את  $V_{pp}$ . רכשנו את התמונה המתקבלת עם הסמנים. לאחר מכן הצגנו סקופ 4 מחזורים של האות ויצאנו את האות לקובץ csv.

#### 2.1.3 תוצאות:

תמונת אות הסינוס מהסקופ עם הסמנים:

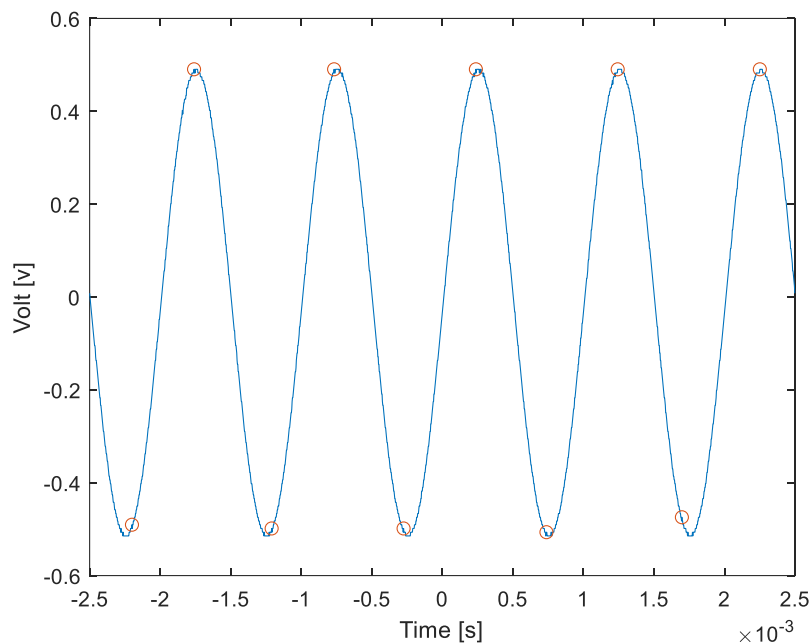


איור 1: האות הסינוסי שיצרנו עם מיקומי הסמנים

ההפרש (בערך מוחלט) בין הסמנים האופקיים מייצג את  $V_{pp}$  כלומר את ההפרש של האמפליטודה בין פיק מקסימלי למינמלי. ההפרש בין הסמנים האנכיים מייצג את הזמן שעובר בין שני פיקים חיוביים ולכן מייצג את זמן המחזור. מתוך זמן המחזור ניתן לחשב את התדירות, כלומר:

$$V_{pp} = 1 [V]$$

$$T = 1 [ms] \rightarrow f = \frac{1}{T} = 1 [kHz]$$



איור 2: הצגת התוצאות מתוך קבצי האקסל

מאיור זה ניתן לראות את התוצאות שנרשמו מהקלטת האות. בעזרת תוכנת המטלאב מצאנו את הפיקים של האות המסומנים בעיגולים אדומים באיור. נחשב באמצעותם את התדירות ו  $V_{pp}$ .

$$V_{pp} = 0.9809 [V], f = 1.0101 \cdot 10^3 [Hz]$$

נחשב שגיאה יחסית לכל אחת מהדרכים שחישבנו:

טבלה 1: חישובי השגיאה

שגיאת תדירות	$f [kHz]$	שגיאת $V_{pp}$	$V_{pp} [V]$	
$\frac{1-1}{1} \cdot 100\% = 0\%$	1	$\frac{1-1}{1} \cdot 100\% = 0\%$	1.0125	דרך 1: באמצעות הסמנים
$\frac{1.0101-1}{1} \cdot 100\% = 1.01\%$	1.0101	$\left  \frac{0.9808-1}{1} \right  \cdot 100\% = 1.91\%$	0.9809	דרך 2: באמצעות המטלאב

**תשובה לשאלה 1.4:** כפי שניתן לראות מטבלה 1 קיימים הבדלים בין השיטות כיוון שלא קיבלנו ערכים זהים. בשיטה הראשונה הצבנו את הסמנים בצורה מדויקת ולכן לא קיבלנו שגיאה כלל. הסטייה בשיטה השנייה נובעת מכך שהערכים המוקלטים של האות אינם רציפים וגם מתוך שגיאת הפונקציה "find peaks" במטלב שלעיתים לא בוחרת את נקודת הפיק המדויקת כפי שניתן לראות באיור 2. במידה ויש טעות בהצבת הסמנים בשיטה הראשונה, על מנת לשפר את התוצאות ניתן לחזור על הניסוי מספר רב של פעמים בפיקים שונים. עבור השיטה השנייה קיימים ערכים של פיקים נוספים ולכן ניתן לחשב באמצעותם את הערכים הנדרשים ולמצוא ממוצע שלהם. במידה ונרצה לבדוק האם ההבדל בין השיטות מובהק סטטיסטית על ידי חזרה מספר פעמים על הניסוי ניתן לבצע זאת באמצעות מבחן t. ראשית, נגדיר את מודל האפס שאומר שאין הבדל בין השיטות, ונבחר את  $\alpha$  (בדרי"כ 0.05). באמצעות מבחן t ניתן לחשב את p-value ובמידה והוא קטן מ  $\alpha$  ניתן לדחות את מודל האפס וכך להוכיח שיש הבדל מובהק סטטיסטית בין השיטות.

#### **2.1.4 מסקנות:**

מתוך התוצאות המוצגות בטבלה 1 ניתן לראות כי הן בחישוב התדירות והן בחישוב האמפליטודה של פיק לפיק, התוצאות שקיבלנו באמצעות המטלב הינן מדויקות פחות ובעלות שגיאה יחסית גבוהה יותר. תוצאות אלה הינן בניגוד למה שהצגנו בהיפותזה, כיוון שחשבנו שמציאת הפיקים על ידי המטלב בצורה חישובית תהיה מדויקת יותר מבחירת הפיק על ידי הסתכלות. כמו כן, נשים לב כי עבור החישוב באמצעות הסמנים גם קיבלנו שגיאה יחסית אפסית וגם ושיטה זו הינה נוחה ומיידית יותר מהשיטה השנייה. בנוסף, מתוך כך שבשתי השיטות קיבלנו שגיאה נמוכה נסיק כי ניתן להשתמש בשני הדרכים לקבלת הערכים הרצויים, כאשר לכל שיטה יש את היתרונות והחסרונות שציינו למעלה.

## **2.2 ניסוי 2: הכרת הדגימה באמצעות תוכנת המטלב**

### **2.2.1 היפותזה:**

בניסוי זה נכיר את מערכת הדגימה. תחילה נדגום אות סינוסי המיוצר ע"י מחולל אותות, כפי שיוצר בניסוי 1 ולאחר מכן נדגום אות אק"ג המיוצר באמצעות סימולטור אק"ג. נצפה כי כאשר נדגום אות בתדר הנמוך מתדר נייקויסט יתקבל אליאסינג של האות.

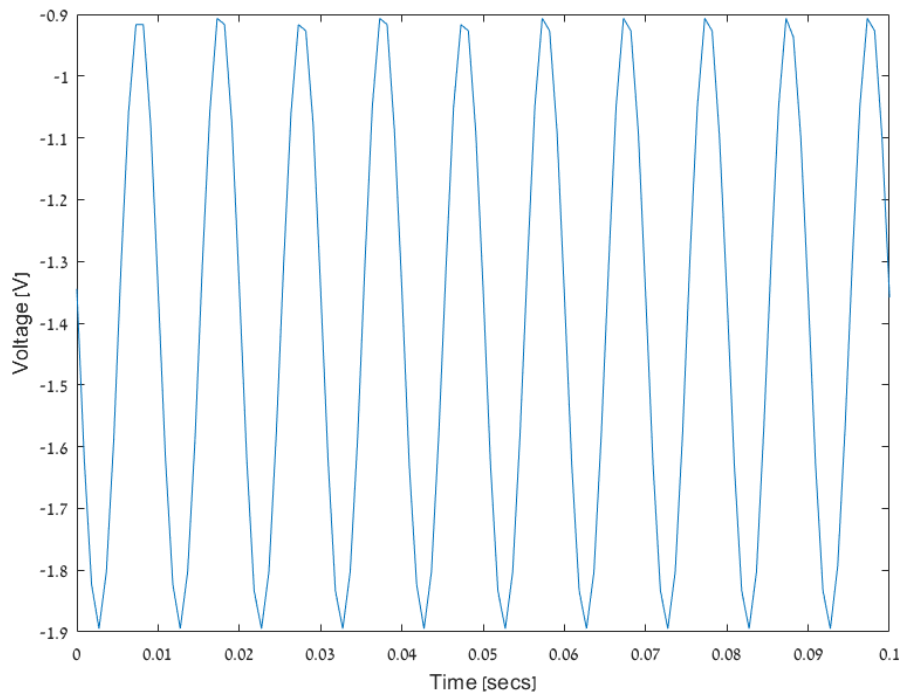
### **2.2.2 מתודולוגיה:**

**מכשור וציוד:** מחשב, דוגם USB-6008, מחולל אותות, אוסילוסקופ, סימולטור אק"ג, כבל בננה – BNC, כבל תנין – BNC.

**מהלך הניסוי:** חיברנו את הדוגם ליציאת USB של המחשב, ואת המחולל מהיציאה אל הדוגם – חיבור אחד לground והשני להדק A10. השתמשנו בקוד המטלאב המצורף לניסוי – main\_2022.m. הרצנו את הבלוק הראשון של הקוד המחובר בין הדוגם למטלאב. דגמנו את אות הסינוס שהגדרנו במחולל בניסוי הקודם באמצעות הבלוק השני, כאשר משך הדגימה הוא 2 שניות. שמרנו את הדגימה בקובץ csv ע"י שימוש בבלוק השלישי. לאחר מכן, חיברנו את סימולטור האק"ג לסקופ – חיברנו שתי חיבורי בננות ליציאות V1 ו HIGH LEVEL של הסימולטור ואת קצה ה – BNC לסקופ. כיוונו את הסקלה האופקית כך שתתאים למחזור ה – ECG. הגדרנו בסימולטור bpm של 60 וכיוונו את הסקופ כך שנראה 10 מחזורים של אות ה – ECG. רכשנו את התמונה המתקבלת במישור הזמן (הרכישה של תמונה זו נעשתה בשוגג לאחר הוספת ה – fft של האות). באמצעות כפתור ה – Math בחרנו באופרציית FFT כדי להציג את התכולה התדרית של האות, הסרנו את האות הזמני מהתצוגה, שינינו את סקלת ה – dB לגודל של 20dB ושינינו את פריסת התדרים לפי ההנחיות. עברנו לאופציה של תצוגה נשמרת כדי להציג את ה – fft של חלונות זמן שונים ביחד. הסרנו את התגובה הזמנית ורכשנו תמונה מהסקופ וקובץ csv של המידע. לבסוף, חיברנו את הסימולטור לדוגם ובאמצעות קוד המטלאב המצורף דגמנו 20 שניות של אות ה – ECG ושמרנו בקובץ csv.

### **2.2.3 תוצאות:**

אות הסינוס כפי שהוקלט באמצעות הדוגם :



איור 3: אות הסינוס כפי שהוקלט באמצעות הדגום

תדירות האות וה-  $V_{pp}$  שלו הינם:

$$V_{pp} = 0.9983$$

$$f = 100\text{Hz}$$

**תשובה לשאלה 2.3:** תוצאות הניסוי הקודם הינן בקרוב  $1V_{pp}$  ו-  $1000\text{Hz}$ . נשים לב כי תוצאות הניסוי הקודם כמעט זהות לערכים שהגדרנו במחולל, בעוד במקרה הנדון תדירות האות הדגום הינה  $100\text{Hz}$  במקום  $1000\text{Hz}$ . בניסוי זה דגמנו בתדר דגימה של  $f_s = 1100\text{Hz}$ . כיוון שהתדר המקסימלי של האות שדגמנו הינו  $f_{max} = 1000\text{Hz}$  מתרחש אליאסינג היות ותנאי נייקויסט לא מתקיים ( $f_s = 1100 < 2000 = 2 \cdot f_{max}$ ). דבר זה גורם לקיפול של הדלתא של הסינוס מ-  $1000\text{Hz}$  ל-  $-100\text{Hz}$ , וכיוון שהאות ממשי הוא סימטרי בתדר והדלתא של  $-1000\text{Hz}$  מקופלת ל-  $100\text{Hz}$  וכך מתקבל אות זמני עם תדירות של  $100\text{Hz}$ .

סימולטור אק"ג:

10 מחזורי אק"ג של דופק תקין עם  $bpm = 60$ :

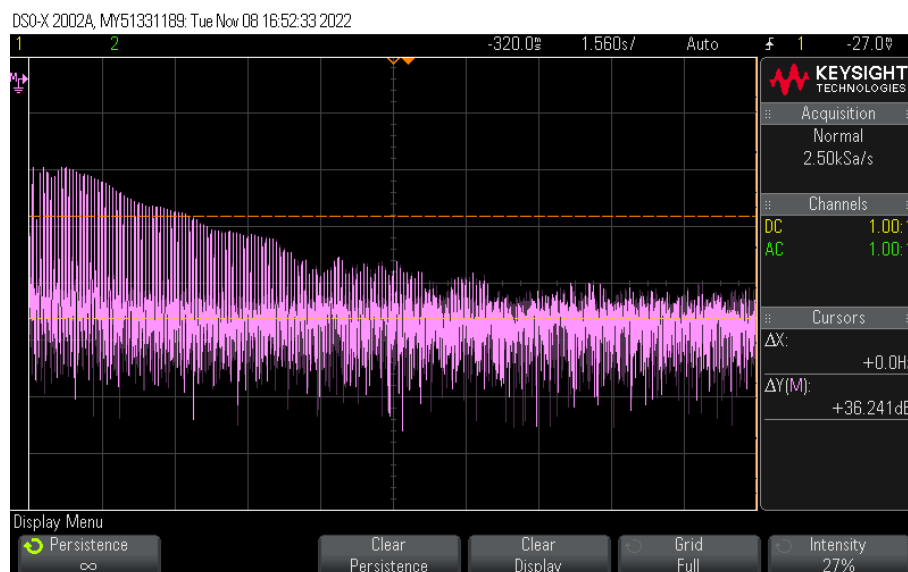




איור 4: ECG תקין עם דופק של 60 פעימות בדקה

בתמונה מוצגים 10 מחזורים של אק"ג תקין עם דופק של 60 פעימות בדקה כפי שנרכש בסקופ (כאשר ה-fft של האות גם מוצג בטעות).

FFT של מספרי חלונות זמניים של אות האק"ג הנדון:



איור 5: FFT של מספר חלונות זמניים של אות ecg

ממחזורים האות הזמני, ה-FFT על פני חלונות זמניים מרובים מוביל למספר מסוים של FFTs שונים ואין איזשהו שינוי מתמשך בזמן בספקטרום של כל חלון.

**תשובה לשאלה 2.4:** קובץ ה-csv שיוצא מדגימה של אות האק"ג הנדון באמצעות הדוגם שברשותנו מצורף בנספחים. מס' הערכים הייחודיים של אות האק"ג שנגדם באמצעות הדוגם היו 100 - זאת על פני טווח דינמי באורך של  $1V \sim$ . כיוון שהטווח הדינמי של המכמת היו  $10V \pm$  [1]

כיוון שהטווח הדינמי של האות היו  $1V$  נניח כי יש בקירוב פי 20 ערכים אפשריים מכמות הערכים שכומתו באות שלנו (תחת ההנחה כי הכימות אחיד), כלומר בערך 2000 ערכים. כיוון ש- $2^{10} <$

$2^{11} < 2000$  נעריך כי מס' רמות הכימות הינו  $2^{11} = 2048$  ומס' הביטים לכימות הוא 11. תוצאה זו מתאימה למפרט הטכני של המכמת.

#### **2.2.4 מסקנות:**

בניסוי זה הכרנו את מערכת הדגימה. תחילה רכשנו אות סינוסי באמצעות אוסילוסקופ וכן באמצעות הדוגם. ראינו כי כאשר אנו דוגמים בתדר הנמוך מתדר נייקויסט באמצעות הדוגם יש אלייסינג של האות הגורם לעיוות של האות אותו דגמנו. בחלקו השני של הניסוי רכשנו אות אק"ג המיוצא מסימולטור אק"ג. תחילה רכשנו אותו עם הסקופ, ולמדנו איך ניתן לבצע אנליזה ספקטרלית של התדר באמצעות הצגה מתמשכת של  $FFT$  של חלונות זמניים של האות. באמצעות ניתוח אות האק"ג שנדגם באמצעות הדוגם הערכנו כי מס' רמות הכימות של הדוגם הינו 2048.

## 2.3 ניסוי 3: מסננים מעשיים, חוק הדגימה, שגיאת חפיפה ספקטרלית aliasing

### 2.3.1 היפותזה:

בשלב א' וב' נרצה לבחון כי תדר הקטעון אותו נגדיר בתוכנה יהיה זהה לזה שנקבל מהסמנים. כמו כן, נרצה לחשב את סדר המסנן מתוך תגובת התדר שנקבל. נצפה כי החישובים לא יהיו מדויקים כתוצאה מהקושי בלשים את הסמנים בצורה המדויקת ולכן התוצאה תושפע מטעות אנוש. בנוסף, בשלב א' נבצע עיגול של ערכי הקבל והנגד ועיגול זה יפגע בדיוק התוצאות. בשלב ג' נעביר אות מלבני דרך מסנן ולאחר מכן דרך דוגם. נצפה כי ככל שתדר הקטעון יגדל, האות יכיל יותר מרכיבי תדר ולכן יהיה קרוב יותר לאות המקורי.

### 2.3.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** אוסילוסקופ, מחולל, מסנן butterworth, דוגם A/D, כבלי BNC-BNC, כבלי BNC - בננה, נגד עם התנגדות  $10 [k\Omega]$ , קבל עם קיבול  $28.9 [nF]$ .

#### מהלך הניסוי:

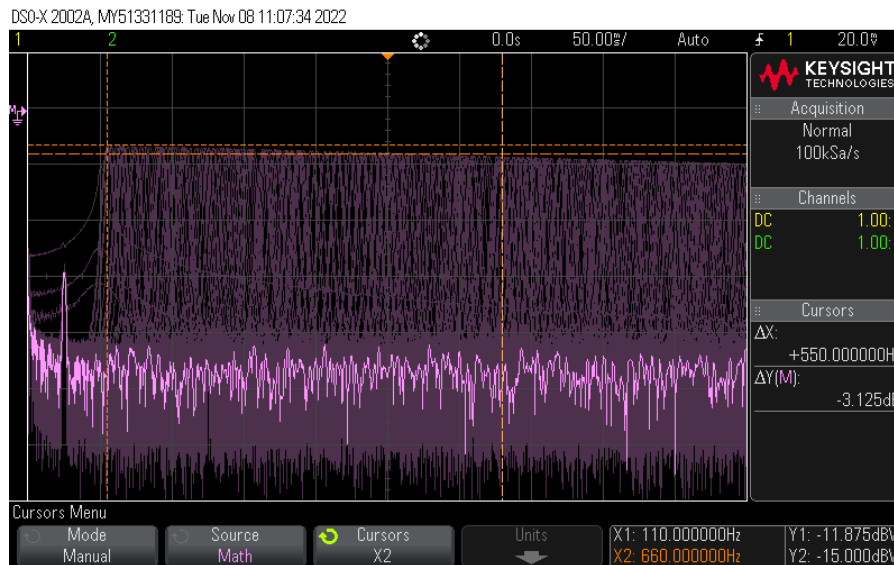
**שלב א':** בשלב זה בנינו מעגל RC טורי, כאשר הכניסה הינה מחולל האותות. המחולל הגדרנו מצב sweep כלומר שינוי התדירות בטווח  $3 [kHz] - 100 [Hz]$  למשך 90 שניות. את האוסילוסקופ חיברנו במקביל לקבל על מנת שימדוד את המתח עליו. מדדנו את תגובת התדר של המעגל על ידי פונקציית FFT באוסילוסקופ, עם הפרמטרים:  $span = 1 [kHz]$ ,  $center = 500 [Hz]$ . על מנת שנוכל למדוד את תדר הקטעון הצבנו את הסמן האופקי הראשון ב  $0 [dB]$  ואת הסמן האופקי השני כך שהפרש האמפליטודות יהיה כ  $3 [dB]$ .

**שלב ב':** חיברנו את מסנן butterworth כך שהכניסה אליו היא יציאת המחולל והיציאה ממנו היא האוסילוסקופ. הגדרנו אותו למצב של low pass filter ואת תדר הקטעון להיות  $550 [Hz]$ . השתמשנו במצב sweep של המחולל בדומה לשלב א', ומדדנו את תגובת התדר של המעגל. מדדנו את תדר הקטעון על ידי הסמנים. לאחר מכן, הצבנו את הסמן האנכי כך שיבדוק באיזה תדר הגרף חותך את הסמן האופקי השני. כמו כן, על מנת למצוא את סדר המסנן לקחנו מדדנו תדר נוסף ובעזרת הסמנים האופקיים מצאנו את ערכי האמפליטודה שלהם.

**שלב ג':** לאחר מכן, חיברנו את מחולל האותות למסנן butterworth והיציאה של המסנן אל דוגם A/D ואת הדוגם חיברנו למחשב. במחולל הגדרנו גל ריבועי בתדירות  $f_0 = 100 [Hz]$  ואמפליטודה  $V_{pp} = 1$ . כמו כן, באמצעות המחשב הגדרנו את תדירות הדגימה להיות  $f_s = 1100 [Hz]$  ואת זמן הדגימה להיות  $T = 20 [sec]$ . לאחר מכן, חזרנו על הניסוי שלוש פעמים: בפעמיים הראשונות ביצענו את הניסוי עם מסנן AAF: low pass עם תדר קטעון שונה -  $250 \setminus 550 [Hz]$ . לאחר מכן ניתקנו את המסנן וחזרנו על הניסוי.

### 2.3.3 תוצאות:

**שלב א':** את תוצאות שלב זה לקחנו מקבוצה אחרת(באישור).



איור 6: מיקומי הסמנים למציאת תדיר הברך

באיור זה ניתן לראות כי ההפרש בין הסמנים האופקיים הינו  $-3.125 [dB]$  כנדרש. הסמן השמאלי x1 מייצג את המדידה של תדר הברך ולכן נסיק כי הוא שווה ל  $660 [Hz]$ . השגיאה בין התדר ברך שהתקבל לרצוי:  $20\% = \frac{660-550}{550} \cdot 100\%$

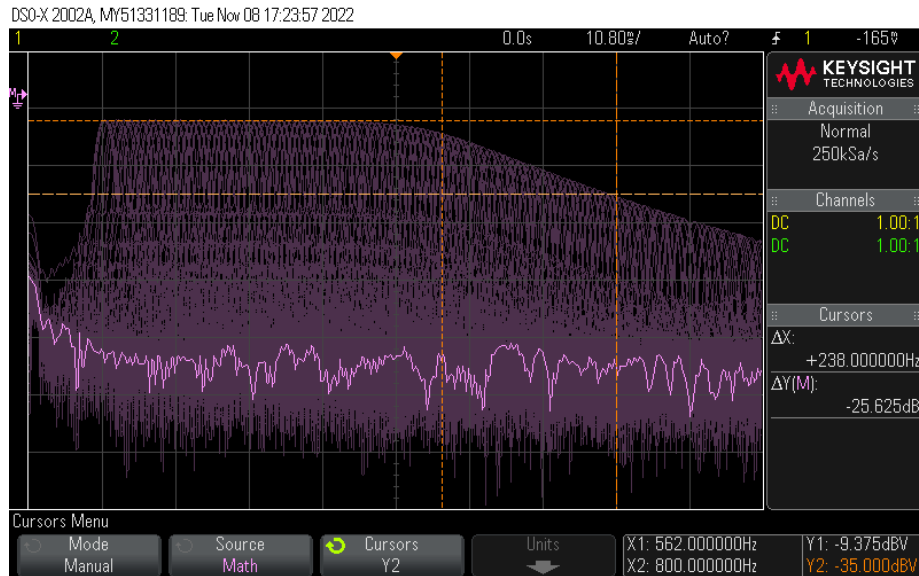
**תשובה לשאלה 3.5:** ניתן לראות כי תדר הברך לא שווה למצופה, וקיבלנו שגיאה של 20%. כפי ששיערנו, טעות זו נובעת הן מהקושי בהצבת הסמנים במיקומים המדויקים והן מעיגול ערכי הקבל והנגד שמשפיעים על תדר הברך.

שלב ב':



איור 7: מיקומי הסמנים למציאת תדר הברך

באיור זה ניתן לראות כי ההפרש בין הסמנים האופקיים הינו  $-3.125 [dB]$  כנדרש. הסמן השמאלי x1 מייצג את המדידה של תדר הברך ולכן נסיק כי הוא שווה ל  $562 [Hz]$ . השגיאה בין התדר ברך שהתקבל לרצוי:  $2.182\% = \frac{562-550}{550} \cdot 100\%$



איור 8: מיקומי הסמנים למציאת סדר המסנן

מתוך איור זה ניתן לראות כי בתדר של  $800 \text{ [Hz]}$  ההנחתה הינה  $-35 \text{ [dB]}$ . נשתמש בנוסחה **תשובה לשאלה 3.7.4**: למציאת סדר המסנן כפי שקיבלנו בדוח המכין:  
ראשית, נשים לב כי בדוח המכין הנחנו שבתדר ברך ההגברה היא לא  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  אך זה לא המצב כאן ולכן נבצע התאמה לנוסחה:

$$10 \log_{10} |H(\omega_0)|^2 = -9.375 \text{ [dB]} \rightarrow |H(\omega_0)|^2 = 0.1155$$

$$|H(\omega)|^2 = \sqrt{2} \cdot 0.1155 \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2N}} \rightarrow \frac{0.1633}{|H(\omega)|^2} = 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2N} \rightarrow \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2N} = \frac{0.1633}{|H(\omega)|^2} - 1$$

$$= \frac{0.1633 - |H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2} \rightarrow 2N = \frac{\log\left(\frac{0.1633 - |H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2}\right)}{\log\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \rightarrow$$

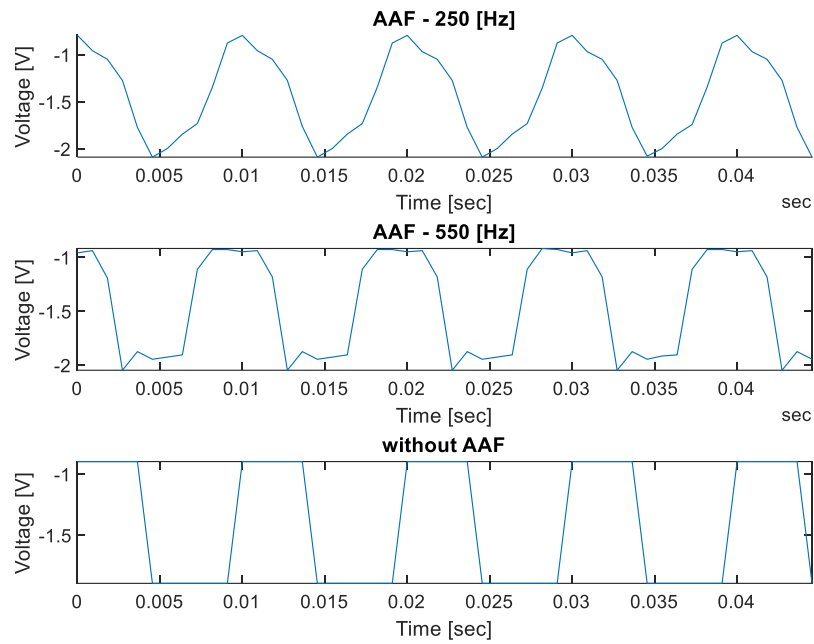
$$N = \frac{\log\left(\frac{0.1633 - |H(\omega)|^2}{|H(\omega)|^2}\right)}{2 \log\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}$$

$$10 \log_{10} |H(\omega_1)|^2 = -35 \text{ [dB]} \rightarrow |H(\omega_1)|^2 = 3.162 \cdot 10^{-4}$$

$$N = \frac{\log\left(\frac{0.1633 - |H(\omega_1)|^2}{|H(\omega_1)|^2}\right)}{2 \log\left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)} = \frac{\log\left(\frac{0.1633 - 3.162 \cdot 10^{-4}}{3.162 \cdot 10^{-4}}\right)}{2 \log\left(\frac{800}{550}\right)} = [8.33] = 9$$

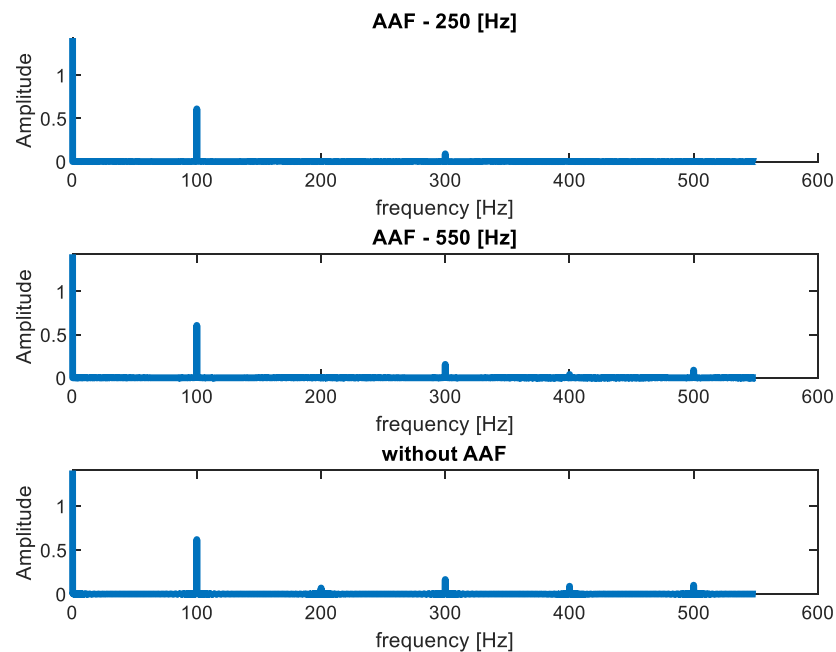
שלב ג':

**תשובה לשאלה 3.8:**



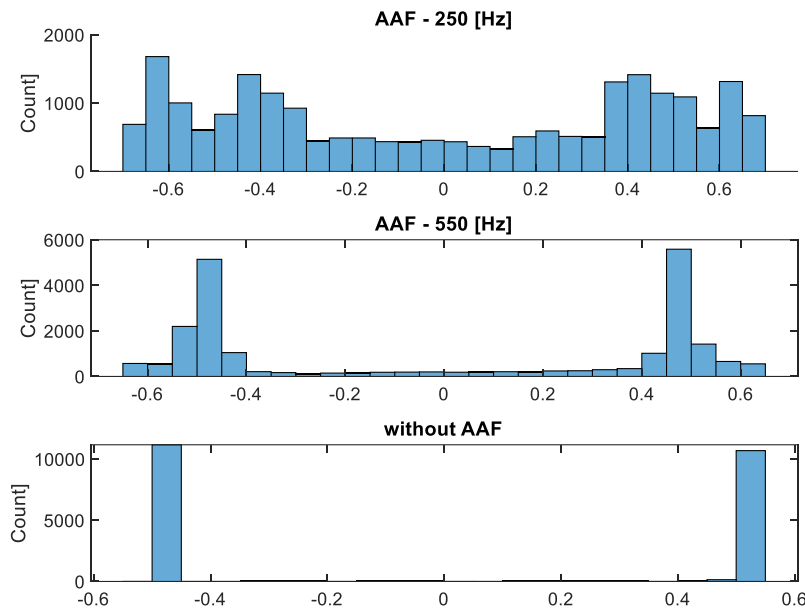
איור 9: האות הדגום לאחר מעבר במסננים שונים (או ללא)

עבור פונקציית מלבן ישנו שינוי מהיר ולכן תיאור שינוי זה נמצא בתדרים הגבוהים. כלומר, ככל שנקח יותר תדרים גבוהים נוכל לקבל תוצאה שדומה יותר למלבן כרצוי. ניתן לראות באיור 5 כי עבור תדר קטעון נמוך של  $250 [Hz]$  לא קיבלנו מלבן. תופעה זו מתרחשת בשל הורדת מרכיבי התדרים הגבוהים. כמו כן, עבור תדר קטעון גבוה יותר קיבלנו תוצאה טובה יותר וללא מסנן AAF כלל קיבלנו את האות הדומה ביותר למלבן.



איור 10: הספקטרום של האותות השונים

מאיור זה ניתן לראות את רכיבי התדר של האותות. ניתן לראות כי בהשוואה לגרף התחתון (ללא המסנן), ככל שתדר הקטעון ירד הונחתו יותר תדרים כמצופה.



איור 11: ההיסטוגרמה של האותות השונים לאחר הורדת ההיסט

באיור 7 ניתן לראות את ההיסטוגרמה של כל אחד מהאותות. נשים לב כי עבור פולס מלבני נצפה לראות בהיסטוגרמה שני ערכים בלבד וניתן לראות כי ללא מסנן AAF קיבלנו תוצאה הקרובה ביותר כפי שראינו קודם. ככל שתדר קטעון ירד קיבלנו התפלגות גדולה יותר של ערכים כתוצאה מכך.

### 2.3.4 מסקנות:

**שלב א':** ראינו כי תדר הברך לא שווה למצופה כאשר השגיאה נובעת הן מהקושי בהצבת הסמנים במיקומים המדויקים והן מעיגול ערכי הקבל והנגד שמספיעים על תדר הברך.

**שלב ב':** ניתן לראות כי קיבלנו תדר ברך שונה מהתדר ברך שהגדרנו במכשיר עם שגיאה של 2.182%. ההבדל בין התדרים נובע מטעות אנוש כלומר מכך שמיקום הסמנים נעשה על ידי הסתכלות על מסך האוסילוסקופ בו לא ניתן לראות בצורה מדויקת את מיקום החיתוך המדויק. כמו כן, את הסמן האופקי השני שמנו בהפרש של  $-3.125 [dB]$  ולא ב  $-3 [dB]$  ולכן שגיאה זו גם פגעה במיקום המדויק של תדר הברך.

**שלב ג':** בשלב זה השתמשנו באות מלבני אותו העברנו דרך מסנן AAF בעלי תדרים שונים ופעם אחת ללא מסנן כלל. ראינו כי ללא המסנן קיבלנו את התוצאה הטובה ביותר כיוון שהאות היה קרוב מאוד לאות מלבני כרצוי. לעומת זאת, ככל שהורדנו את תדר הקטעון של המסנן, איבדנו יותר רכיבי תדר ולכן התוצאה הייתה פחות קרובה לאות מלבני והכילה התפלגות יותר אחידה של ערכים.

## 2.4 ניסוי 4: שחזור אותות

### 2.4.1 היפותזה:

בניסוי זה נבצע שיחזור של אות מדגימותיו. נייצר אות סינטטי במטלאב, אותו נדגום באופן דיגיטלי בתדר דגימה של  $1100\text{Hz}$ . את דגימות אלה נכתוב בזמן אמת לדוגם. הדוגם מבצע אינטרפולציה של  $ZOH$  עם קצב דגימה/כתיבה של  $40\text{kHz}$ . פעם אחת נעביר את האות דרך מסנן  $Butterworth$  שהינו  $LPF$ , ופעם השנייה נעביר ישירות לסקופ. נצפה כי המעבר במסנן יחליק את האות שמגיע מהדוגם היות וקפיצות המדרגה מאופיינות בתדרים גבוהים וכיוון שתדר הקטעון גדול של המסנן וכן תדר הדגימה גדולים מפעמיים תדירות אות הסינוס הסינטטי נצפה כי במוצא נקבל בקירוב את אות הסינוס המקורי.

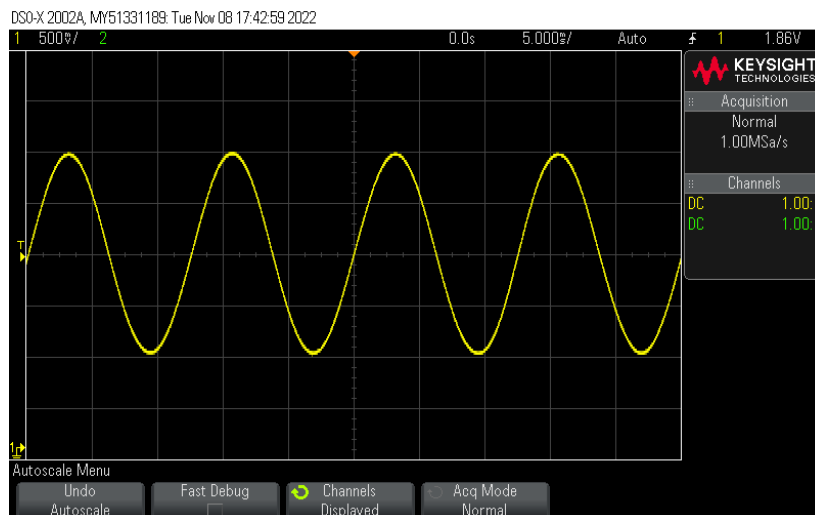
### 2.4.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחשב, דוגם USB-6008, מסנן  $Butterworth$ , אוסילוסקופ.

**מהלך הניסוי:** חיברנו את המחשב לכניסת הדוגם (המשמש פה כ-  $D/A$ ), את יציאת הדוגם למסנן  $Butterworth$  ואת יציאת המסנן לסקופ. באמצעות בלוק  $Pre - Sampling for reconstruction$  של קוד המטלאב המצורף לניסוי יצרנו חיבור בין המטלאב לדוגם. הרצנו את בלוק  $"Create a synthesized signal and write"$  בה הוגדר תדר דגימה של  $1100\text{Hz}$ , אות סינוסי בעל תדירות של  $80\text{Hz}$  והיסט  $DC$  של  $2V$ . משך הזמן שבו האות נדגם ויוצא דרך המערכת אל הסקופ הינו 100 שניות. לאחר מכן ביצענו את אותן פעולות לאחר שהסרנו את החיבור למסנן (כלומר חיברנו את הדוגם ישירות לסקופ).

### 2.4.3 תוצאות:

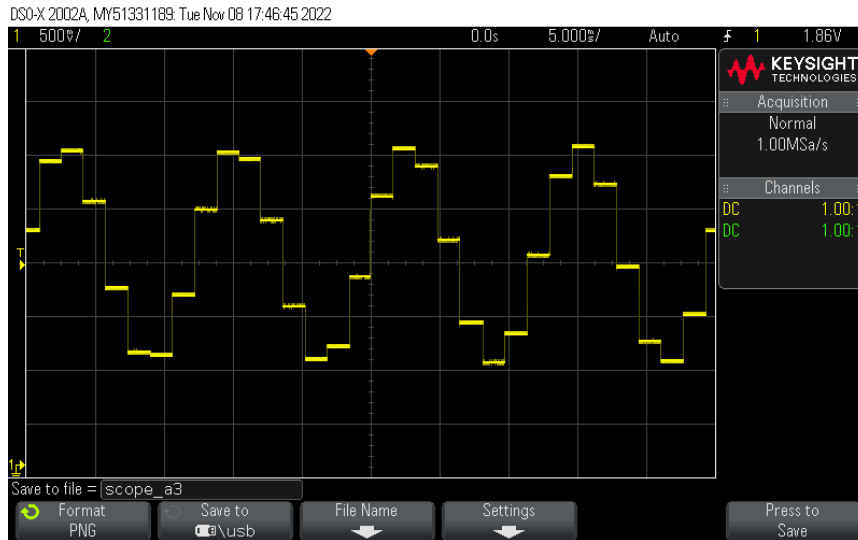
האות המשוחזר באמצעות מסנן  $Butterworth$ :



איור 12: האות המשוחזר באמצעות מסנן  $Butterworth$

האות המשוחזר ללא מעבר במסנן:



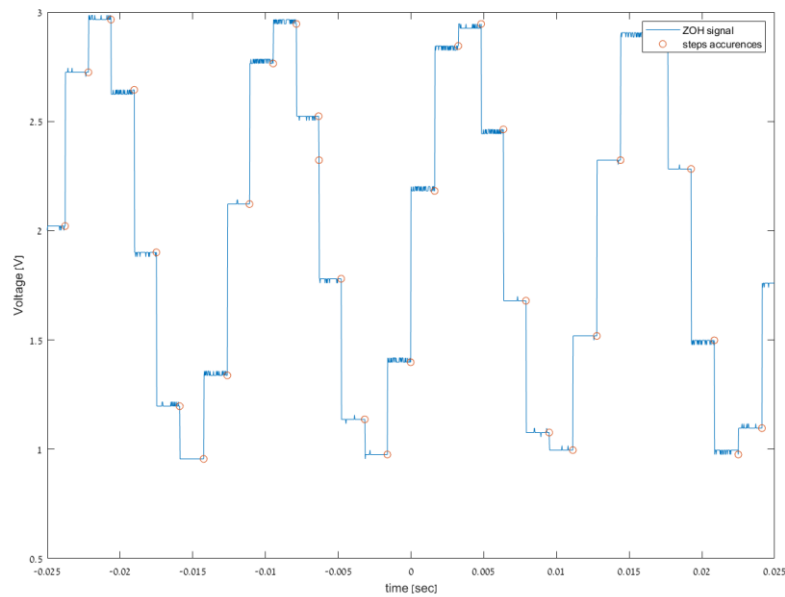


איור 13 : האות המשוחזר ללא מעבר במסנן

מאיור 13 ניתן לראות כי הדוגם, שבמקרה זה משמש כ-  $D/A$ , מבצע אינטרפולציה של האות הדגום ע"י  $ZOH$ . בהינתן כך שלא נעשתה פעולת עיבוד נוספת, זה האות המוצג בסקופ. באיור 12 אנו רואים אות סינוסי שנוצר ממעבר של האות המוצג באיור 13 במסנן  $Butterworth$ . המסנן, שהינו  $LPF$  אנלוגי עם תדר קטעון של  $250Hz$  מוריד את התדרים הגבוהים אליהם שייכות קפיצות המדרגה של ה-  $ZOH$ , וכך האות מוחלק.

**תשובה לשאלה 4.2:** באמצעות המטלאב ושימוש בקובץ ה-  $csv$  שנשמר בסעיף 4.2 תדירות האות שחושבה עבור המקרה בו מבוצע סינון הינה  $80.6452Hz$ , בעוד התדירות המקורית הינה  $80Hz$ , וזאת כיוון שגם תדר הדגימה וגם תדר הקיטעון של המסנן גדולים מפעמיים תדר הסינוס אותו אנו דוגמים וכי מסנן ה-  $LPF$  מוריד את התדרים הגבוהים של קפיצות המדרגה.

כפי שציינו, רכיב  $D/A$  מבצע אינטרפולציה  $ZOH$ . על פניו, קפיצות המדרגה אמורות להתרחש כל אחת חלקי תדר הדגימה (כל עוד תדר הדגימה קטן מהתדר בו מתבצעת האינטרפולציה של הדוגם שהינה  $40KHz$  ובמקרה הנדון זה אכן מתקיים). מצאנו את הנקודות בהן ישנן קפיצות באות הרציף (עד כדי מס' טעויות קטן):



איור 14 : האות המשוחזר ללא מעבר במסנן Butterworth עם נקודות הקפיצה מסומנות

משימוש בזמן הקפיצה הנפוץ ביותר חילצנו את תדר הדגימה להיות -  $625\text{Hz}$ . דבר זה אינו תואם את תדר הדגימה המקורי שהינו  $1100\text{Hz}$ . הסבר אפשרי לתוצאה זו הינו שלוקח לתוכנת המטלאב זמן מסוים להרצת שאר חלקי הקוד שבלולאה ובפרט כתיבת הערך הנוכחי לדוגם.

#### 2.4.4 מסקנות:

בניסוי זה ביצענו שיחזור של אות. יצרנו אות סינוס סינטטי, דגמנו אותו והכנסנו לדוגם שתפקד כרכיב  $D/A$ . מדדנו את האות המתקבל בסקופ כאשר פעם אחת העברנו אותו במסנן  $LPF$  מסוג  $Butterworth$  ובפעם השנייה לא ביצענו סינון. נוכחנו לראות כי הדוגם מבצע אינטרפולציה של  $ZOH$ . אינטרפולציה זו מוסיפה לאות האנלוגי תדרים גבוהים שנובעים מקפיצות המדרגה. כאשר משתמשים במסנן  $LPF$  כפי שהשתמשנו בניסוי זה ניתן להסיר את התדרים הגבוהים של קפיצות המדרגה, ובהינתן תדר קטעון מתאים – כזה שמוריד את תדרי האינטרפולציה אך לא מוריד את תכולתו התדרית של האות המקורי, ובתנאי שהאות המשוחזר נדגם ללא אליאסינג – ניתן לשחזר את האות במלואו.

## 2.5 ניסוי 5: מסננים מעשיים, חוק הדגימה וaliasing

### 2.5.1 היפותזה:

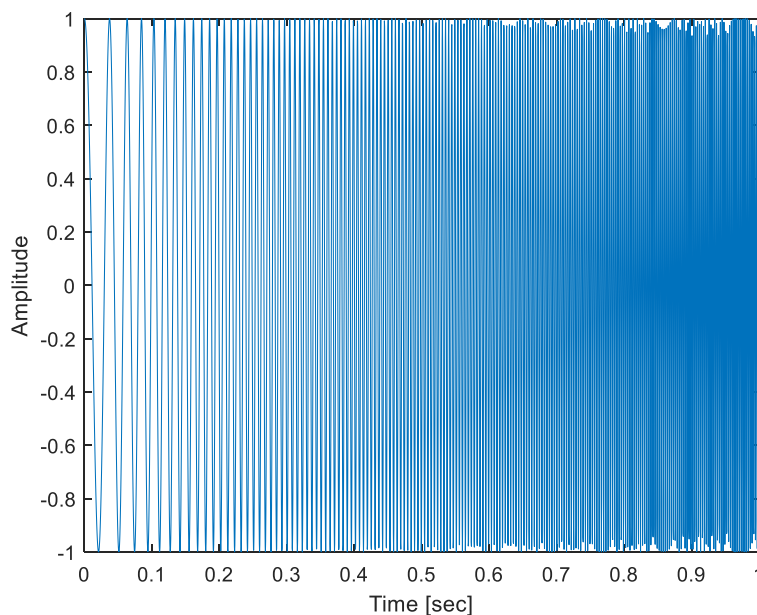
נצפה כי המסננים בהם נשתמש לא יהיו אידאליים כתוצאה משימוש בסדר מסנן נמוך ולכן השינוי בין תחום המעבר לתחום ההנחתה יכיל תדרים נוספים ולא יהיה חד כרצוי. נראה זאת בגרפים על ידי כך שנקבל הנחתה בתדרים נוספים. כמו כן, נצפה לראות זאת בבירור על ידי סינון הרעש מאות ה-ECG, כלומר נצפה כי תוצאת הסינון לא תהיה זהה לאות ללא הרעש והשפעתו תקטן אך תישאר. בנוסף, נצפה כי ככל שנעלה את סדר מסנן Butterworth הוא יהיה אידאלי יותר ונקבל תוצאת סינון יותר טובה כפי שלמדנו.

### 2.5.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחשב עם מטלוב

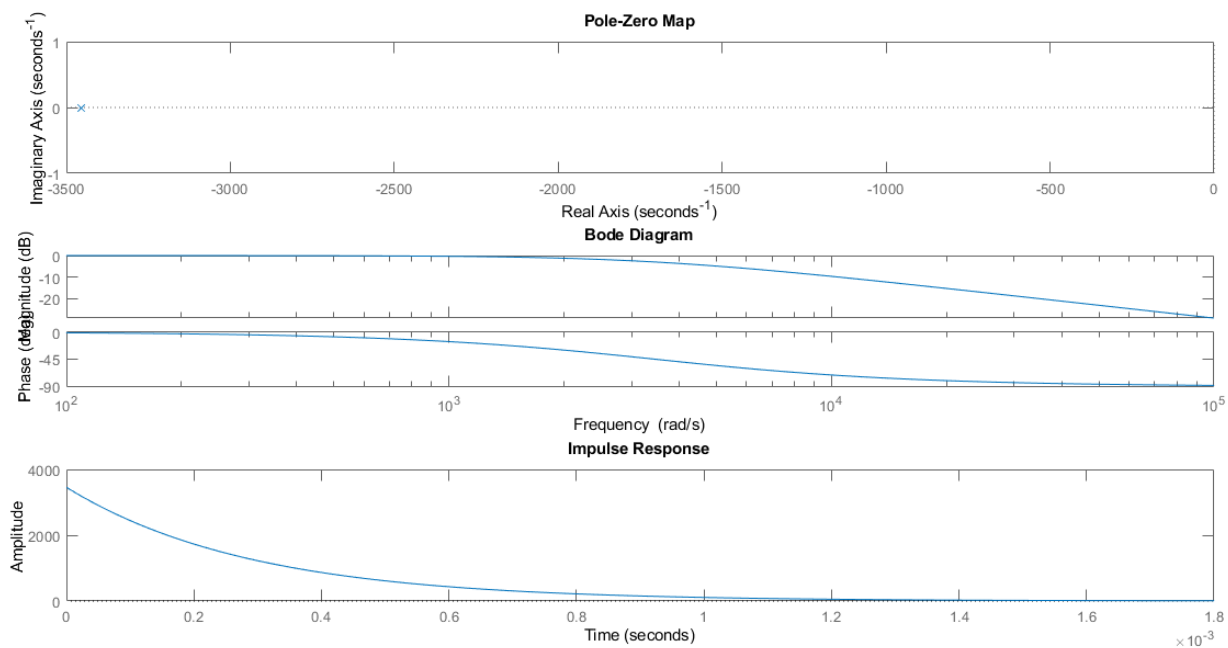
**מהלך הניסוי:** בניסוי זה ביצענו סינון לאותות באמצעות 4 סוגי מסננים: BSF, BPF, HPF, LPF באמצעות תוכנת המטלוב. ראשית, סינתזנו אות כניסה על ידי שימוש בפונקציית chirp ובחירת תדרים רנדומלית. לאחר מכן סיננו את האות בכל אחד מהמסננים ושמרנו את הגרפים שהתקבלו. כמו כן, השתמשנו באות ה-ECG שהקלטנו במעבדה, הוספנו לא רעש רשת בתדר [50 Hz] וסיננו אותו באמצעות מסנן BSF. לאחר מכן, השתמשנו בתכונות מסנן butterworth ליצירתו במטלב וסינון של אות מסוננת, הגדרנו את מספר הקטבים להיות 9 וביצענו סינון לאות הכניסה. חזרנו על פעולה זו עבור מס' קטבים שונה.

### 2.5.3 תוצאות:



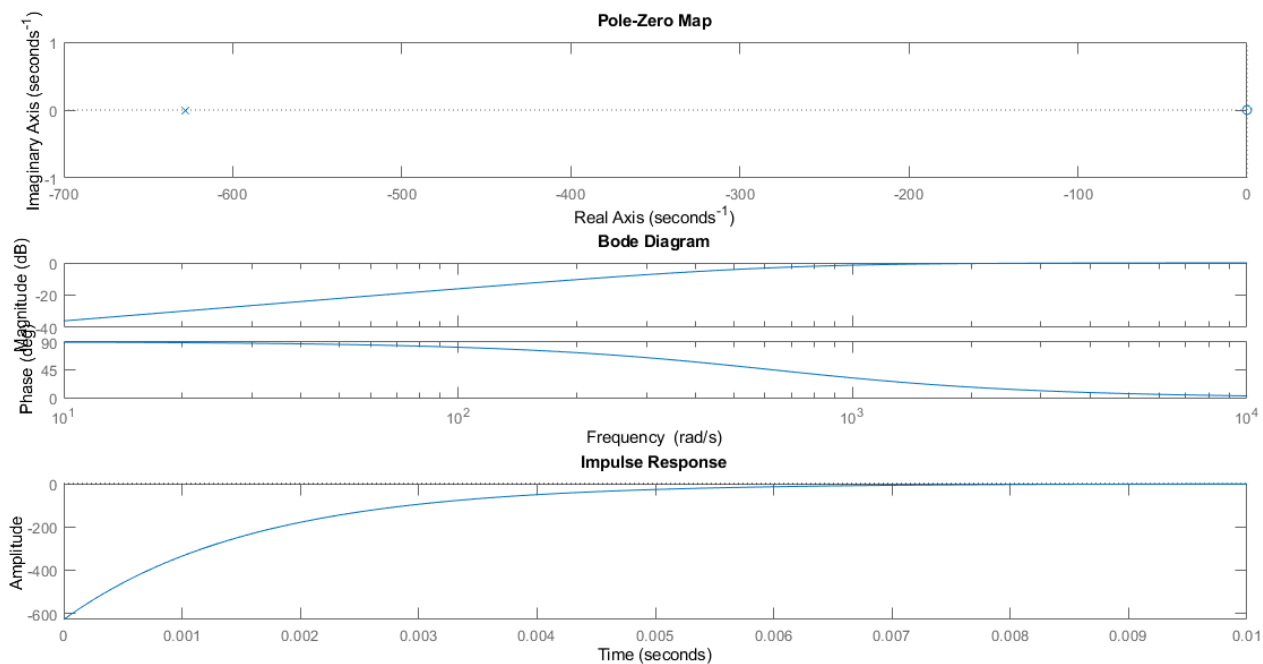
איור 15 : האות מסוננת

האות המסוננת שזרנו עם הפרמטרים הבאים:  
 $F_s = 3000 \text{ [Hz]}, f_0 = 20 \text{ [Hz]}, f_1 = 750 \text{ [Hz]}$



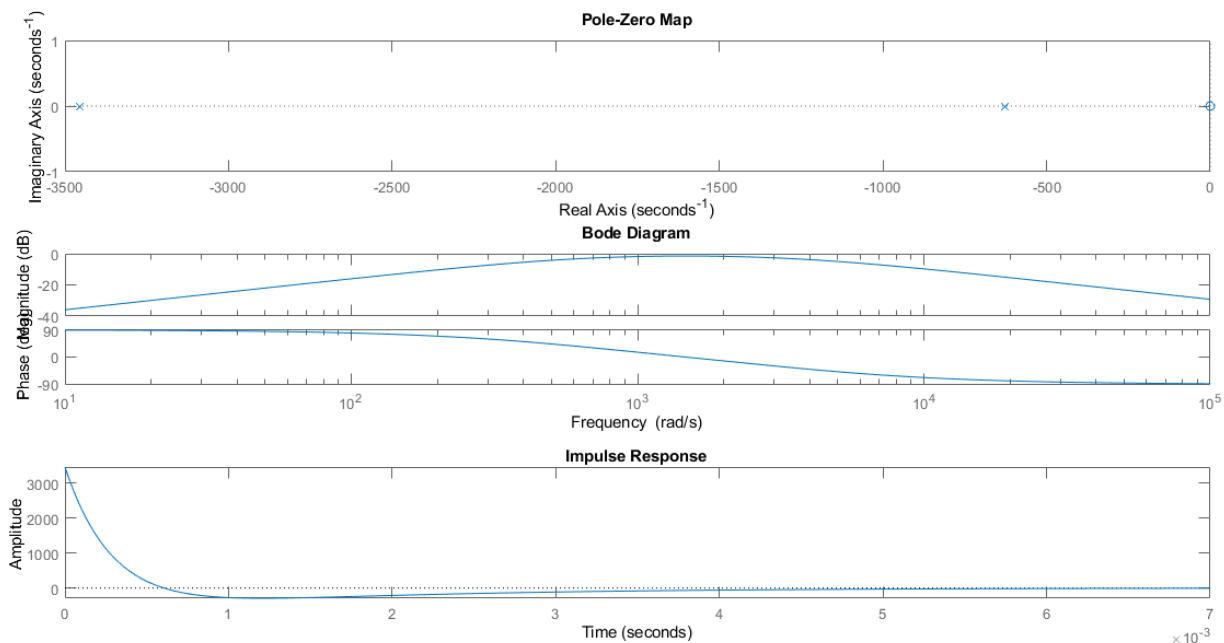
איור 16: תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים עבור מסנן LPF בעל תדר קטעון של 550 [Hz]

באיור זה ניתן לראות את מסנן ה-LPF, כאשר ניתן להבחין מדיאגרמת הבודה כי יש הנחתה של תדרים גבוהים והעברה של תדרים נמוכים כרצוי ממסנן זה. כמו כן, ישנו קוטב יחיד בתדר הרצוי כלומר:  $2\pi \cdot 550 \left[ \frac{rad}{sec} \right] = 3455.75 \left[ \frac{1}{sec} \right]$  כפי שניתן לראות בגרף העליון. בגרף התחתון ניתן לראות את התגובה להלם, כאשר התוצאה דומה להלם (באפס יש ערך גבוהה שיורד מהר מאוד ל-0), אך לא אידאלית כתוצאה מכך שהמסנן הנחית תדרים גבוהים הדרושים למעבר החד של פונקציית ההלם.



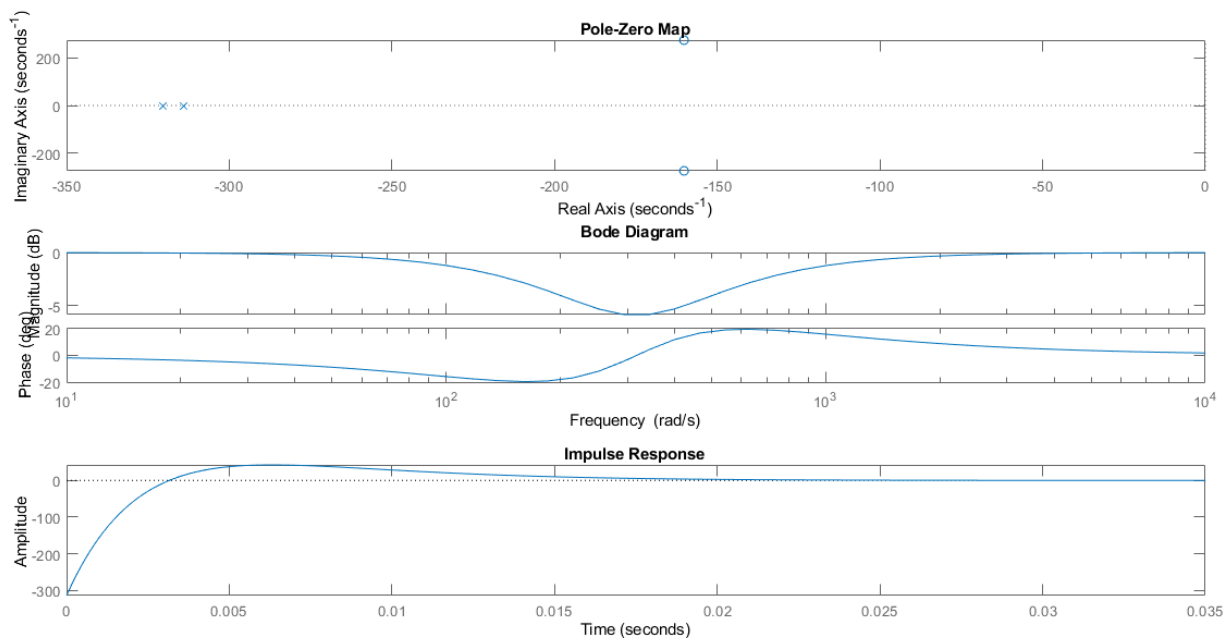
איור 17: תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים עבור מסנן HPF בעל תדר קטעון של 100 [Hz]

באיור זה ניתן לראות את מסנן ה-HPF, כאשר ניתן להבחין מדיאגרמת הבודה כי יש הנחתה של תדרים נמוכים והעברה של תדרים גבוהים כרצוי ממסנן זה. כמו כן, ישנו קוטב יחיד בתדר הרצוי כלומר:  $2\pi \cdot 100 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right] = 628.32 \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right]$  כפי שניתן לראות בגרף העליון, ואפס יחיד באפס. בגרף התחתון ניתן לראות את התגובה להלם של מסנן זה.



איור 18: תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים עבור מסנן BPF בעל תדרי קטעון של 100'550 [Hz]

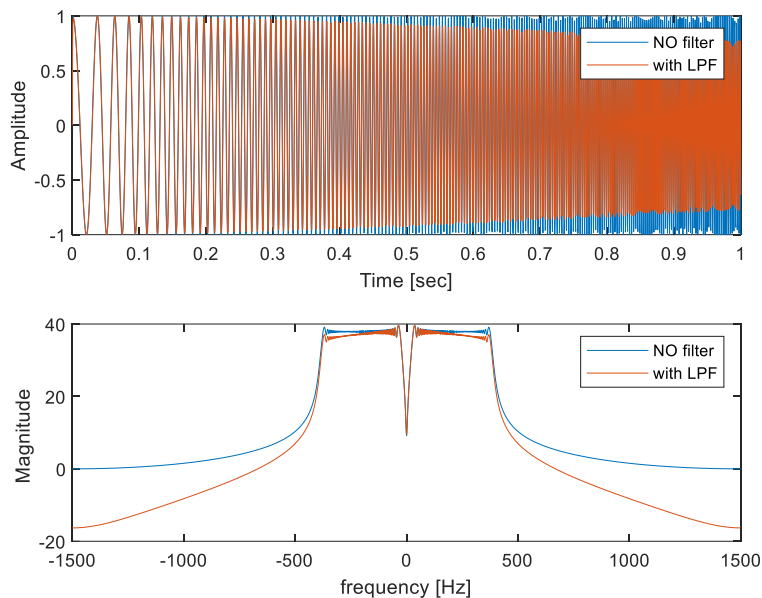
באיור זה ניתן לראות את מסנן ה-BPF, כאשר ניתן להבחין מדיאגרמת הבודה כי יש העברה של טווח תדרים מסוים והנחתה של כל התדרים האחרים כרצוי ממסנן זה. כמו כן, מתוך החישובים של התדרים עבור המסננים הקודמים נצפה לקבל קטבים ב-  $628.32 \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right]$ ,  $3455.75 \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right]$  כפי שניתן לראות בגרף העליון ואפס יחיד באפס. בגרף התחתון ניתן לראות את התגובה להלם של מסנן זה.



איור 19: תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים עבור מסנן BSF בעל תדרי קטעון של 50, 51 [Hz]

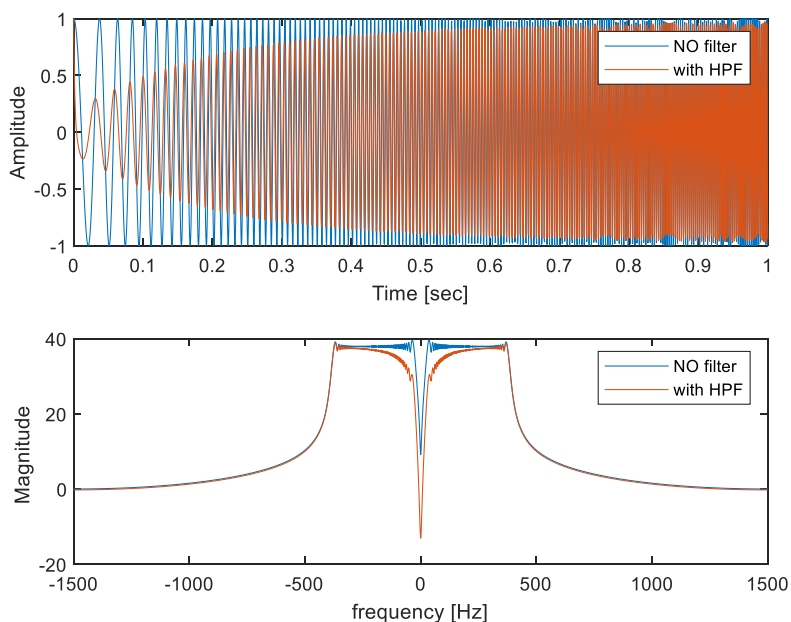
באיור זה ניתן לראות את מסנן ה-BSF, כאשר ניתן להבחין מדיאגרמת הבודה כי יש העברה של רוב התדרים מלבד להנחתה של טווח תדרים מסוים כרצוי ממסנן זה. כמו כן, נצפה לקבל קטבים ב-  $2\pi \cdot 50 = 314.16 \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right]$ ,  $2\pi \cdot 51 = 320.44 \left[ \frac{1}{\text{sec}} \right]$  כפי שניתן לראות בגרף העליון. בחרנו בתדרים אלא על מנת לקבל תחום הנחתה צר, וכך לייצר מסנן מסוג *notch* שמטרתו להנחית תדר ספציפי, במקרה זה 50 הרץ. בגרף התחתון ניתן לראות את התגובה להלם של מסנן זה.

עבור ארבעת מסננים אלה ניתן לראות כי השינוי בין תחום מעבר לתחום הנחתה איננו חד ויש הרבה תדרי ביניים. מכאן נסיק כי מסננים אלה אינם יעילים. על מנת להשיג מסננים יעילים יותר ניתן להגדיל את סדר המסנן, אבל זה יגרום למסנן מסובך בעל זמן חישוב גדול יותר. בנוסף, על מנת ליעל את מסנן ה-BSF להיות מסנן *Notch* המנחית תדר אחד בלבד ניתן לקרב בין תדרי הקטעון יותר.



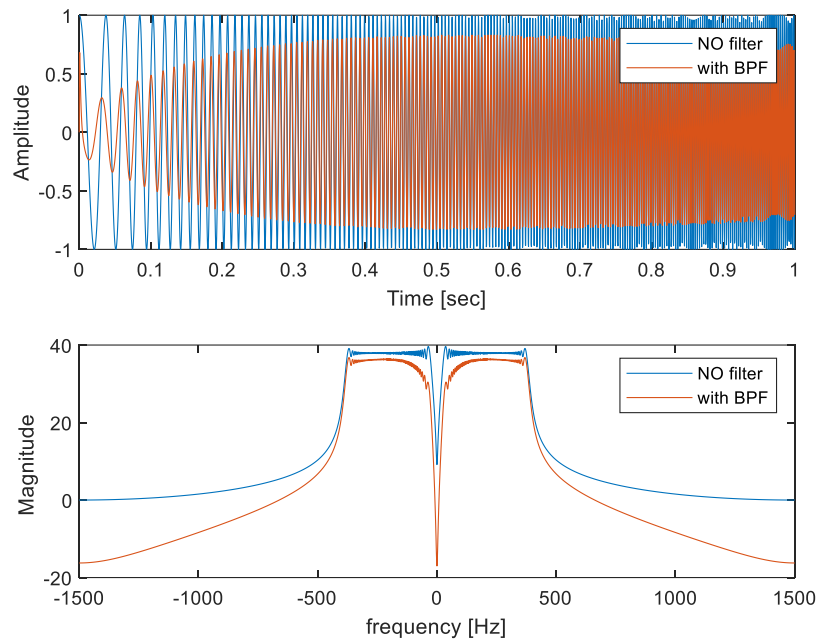
איור 20 : תוצאת הסינון עבור מסנן LPF

באיור זה ניתן לראות תוצאות הסינון לאחר שימוש במסנן מסוג LPF עם תדר קטעון [Hz] 550. מהתוצאה התדרית ניתן לראות כי עבור תדרים הגבוהים מתדר הקטעון של המסנן, ישנה הנחתה המתבטאת בכך שהגרף האדום (האות המסונן), נמוך יותר. כמו כן, במקרה זה ניתן לראות את ההנחתה גם בגרף העליון מכיוון שפונקציית ה chirp מסנתזת אות שתדירותו הולכת וגדלה. בשל כך, לאחר נקודת זמן מסוימת הגרף הכתום קטן יותר מהכחול.



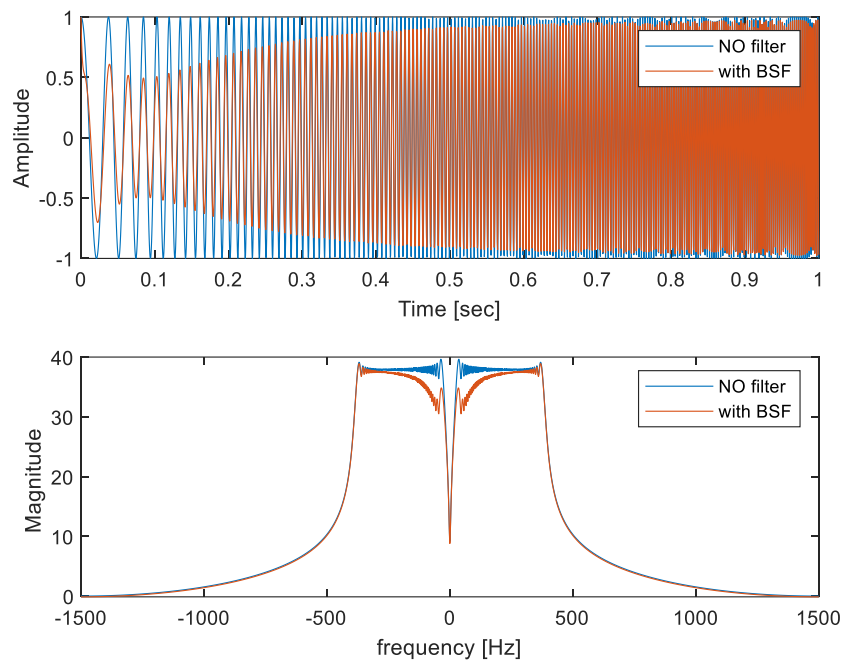
איור 21 : תוצאת הסינון עבור מסנן HPF

איור זה מציג את תוצאות הסינון לאחר שימוש במסנן מסוג HPF בעל תדר קטעון [Hz] 100. ניתן לראות כי עבור תדרים הקטנים מתדר זה ישנה הנחתה ולאחר מכן ערכי הגרפים המסונן והלא זהים. תופעה זו ניתנת לזיהוי גם מהתוצאה הזמנית בדומה למה שהסברנו קודם.



איור 22 : תוצאת הסינון עבור מסנן BPF

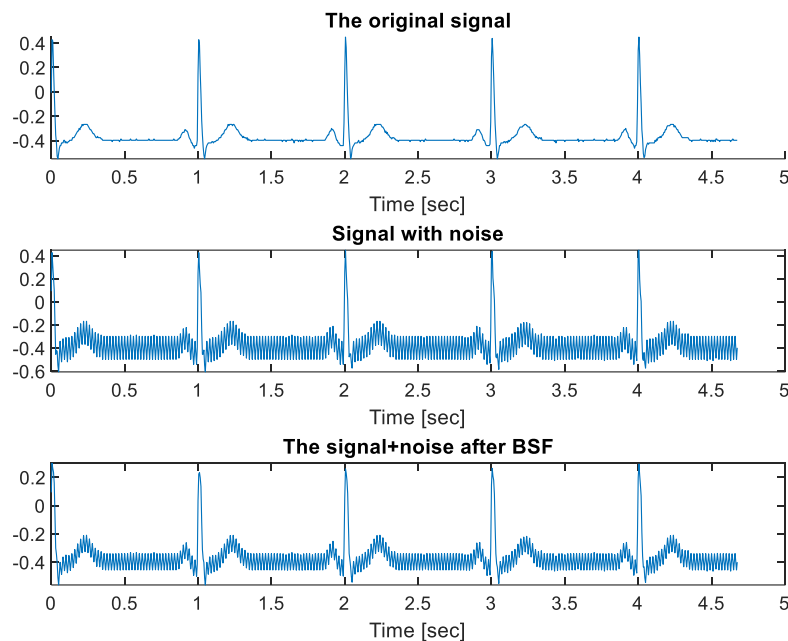
באיור זה ניתן לראות את תוצאת הסינון עבור מסנן מסוג BPD בעל תדרי קטעו  $[100, 550 \text{ Hz}]$ . ניתן להבחין כי עבור תדרים הגבוהים מ- $550 \text{ Hz}$  או נמוכים מ- $100 \text{ Hz}$  (בערך מוחלט), מתבצעת הנחתה. כמו כן, כיוון שמסנן זה לא אידיאלי תחום המעבר מונחת מעט כפי שניתן לראות בגרף התדרי.



איור 23 : תוצאת הסינון עבור מסנן BSF



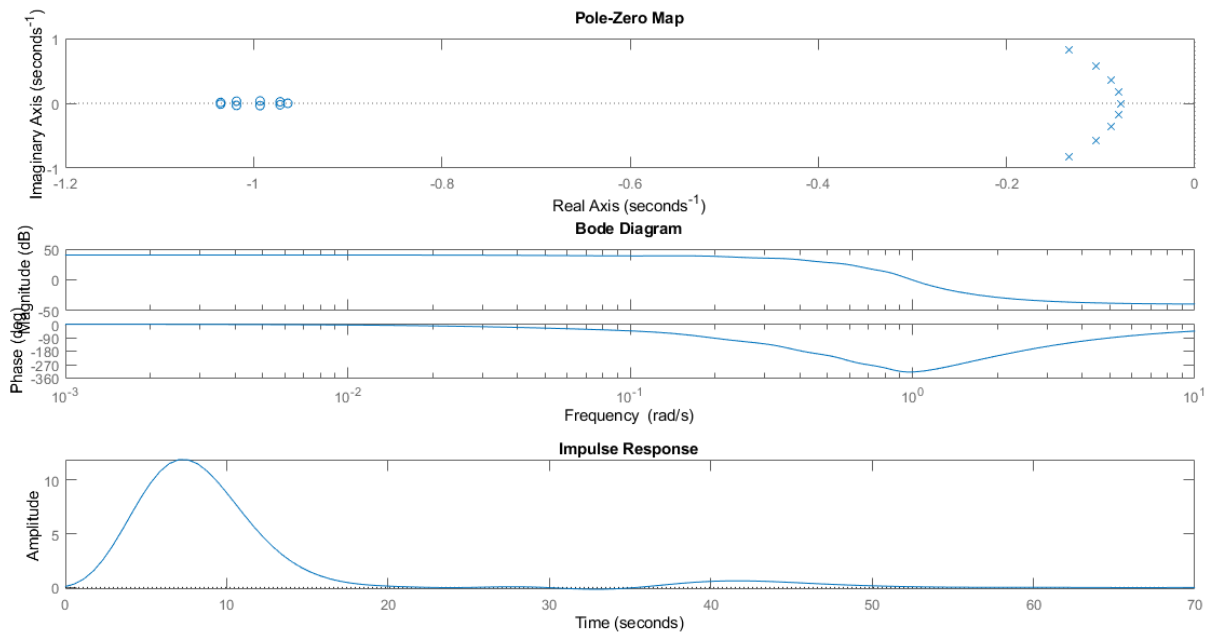
מאיור זה ניתן לראות את תוצאת הסינון עבור מסנן BSF בעל תדרי קטעון של 50,51[Hz] ואכן ניתן לראות הנחתה עבור טווח תדרים זה. בדומה לגרפים הקודמים, מסנן זה איננו אידאלי ולכן ההנחתה מתפרסת על טווח תדרים רחב יותר כפי שניתן לראות.



איור 24 : סינון אות ה-ECG

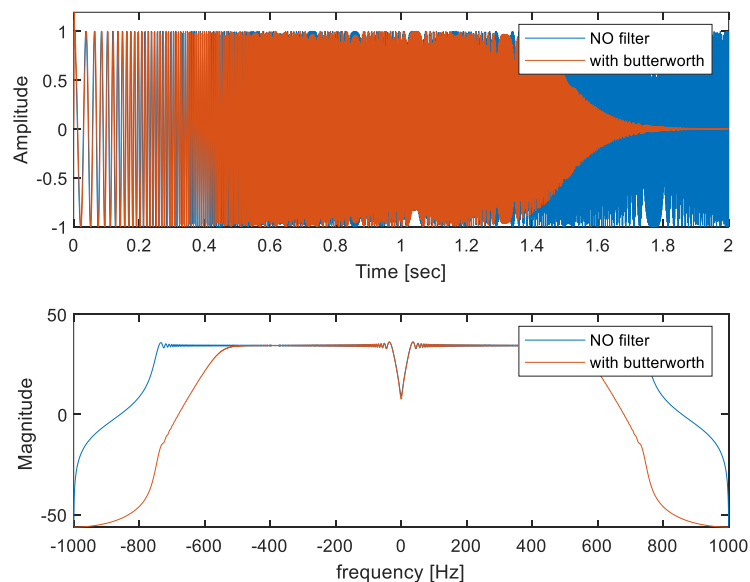
באיור זה ניתן לראות את האות המקורי שנאסף בניסוי 2, עם הרעש ולאחר הסינון. ניתן לראות כמצופה, כי המסנן BSF סינן חלק מהרעש אך לא בצורה אידאלית כלומר לא את כולו. על מנת לשפר את הסינון ניתן לשים אפס ב-50[Hz] וקטבים קרובים. כמו כן, העלאת סדר המסנן תשפר את יעילותו.

Butterworth :



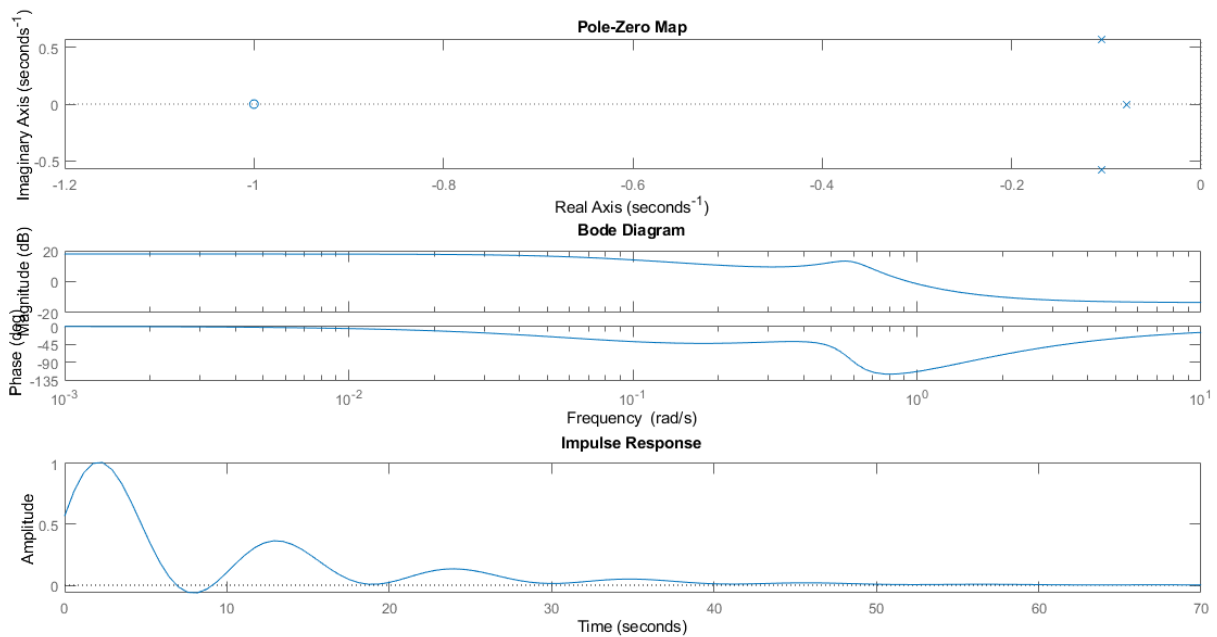
איור 25: תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים עבור מסנן butterworth מסדר 9

ניתן לראות מאיור זה את תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים של מסנן מסוג butterworth מסדר 9 כפי שמצאנו בניסוי 3. ממפת הקטבים והאפסים ניתן לראות כי כל הקטבים בצד השמאלי ולכן המערכת יציבה. מדיאגרמת הבודה ניתן לראות כי זהו מסנן מסוג LPF כלומר ישנה הנחתה של תדרים גבוהים והעברה של תדרים נמוכים.



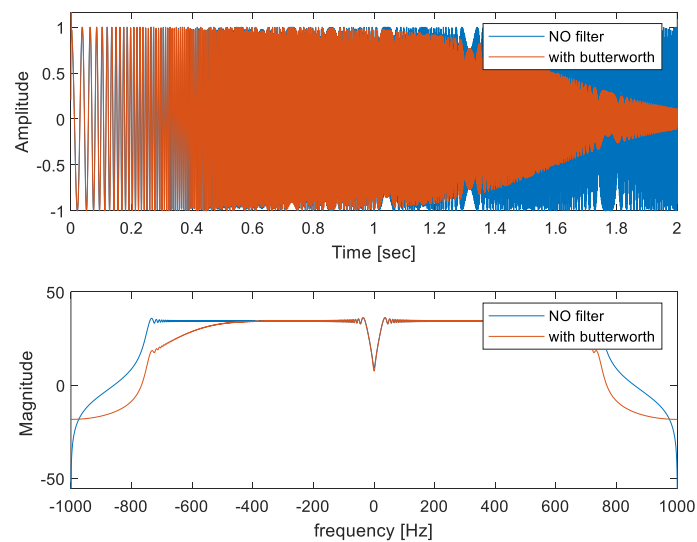
איור 26: תוצאת הסינון עבור מסנן butterworth מסדר 9

מאיור זה ניתן לראות את תוצאות הסינון עבור מסנן מסדר 9. מתחום הזמן ניתן לראות כי עבור תדרים גבוהים, המופיעים לאחר 1.4 sec יש הנחתה חדה יחסית. בתחום התדר רואים כי עם המסנן (באדום), החל מתדר מסויים של כ-550 [Hz] כנדרש, יש הנחתה.



איור 27: תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים עבור מסנן butterworth מסדר 3

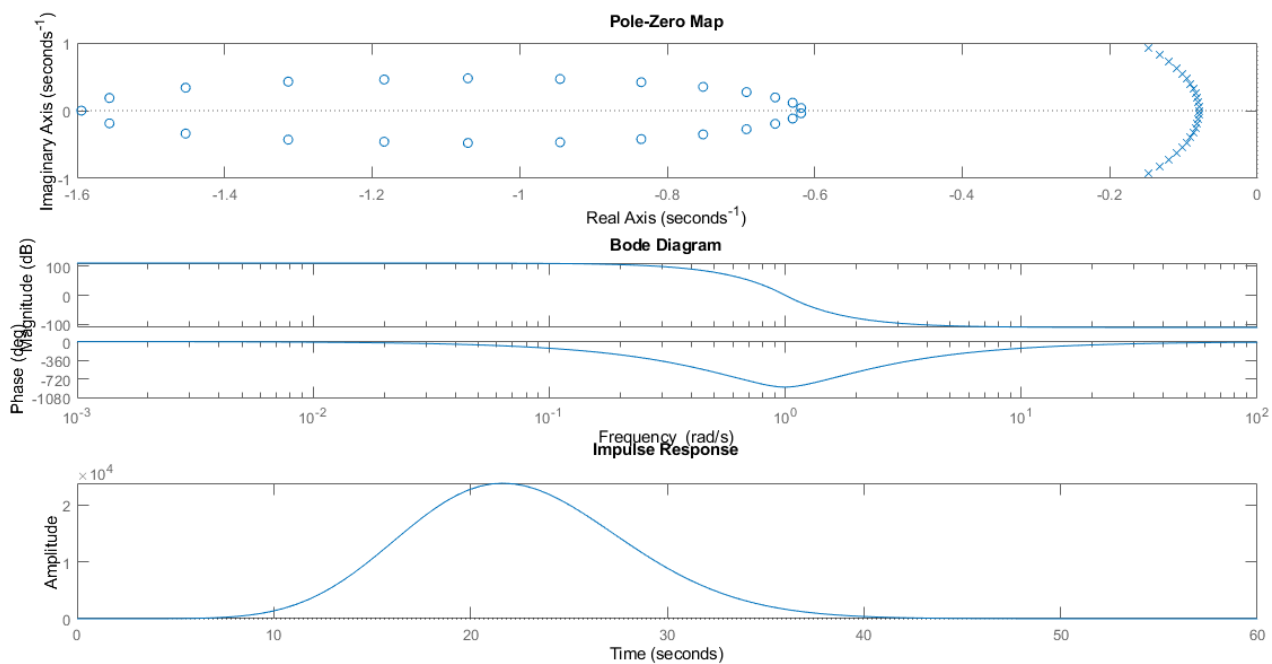
ניתן לראות מאיור זה את תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים של מסנן מסוג butterworth מסדר 3 כל הקטבים נמצאים בצד שמאל ולכן המערכת יציבה. מדיאגרמת הבודה ניתן לראות כי מסנן זה מסוג LPF אך איננו אידאלי כיוון שיש פיק קטן לפני ההנחתה וטווח התדרים בתחום המעבר רחב יותר מאשר עבור מסנן מסדר 9.



איור 28: תוצאת הסינון עבור מסנן butterworth מסדר 3

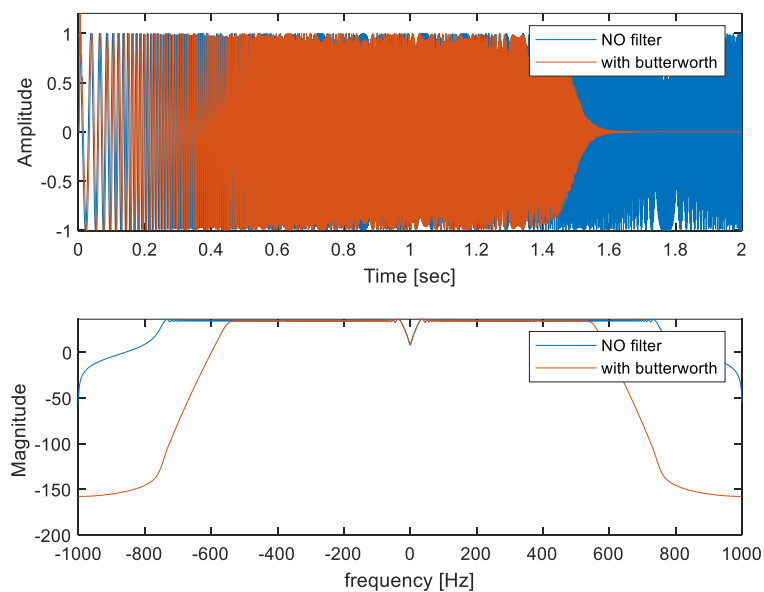
מאיור זה ניתן לראות את תוצאת הסינון עבור מסנן מסדר 3. נבחין כי עבור תדרים גבוהים ציפינו לקבל הנחתה, אך בהשוואה למסנן מסדר 9 ניתן לראות כי הן בתחום הזמן והן בתחום התדר ההנחתה עבור מסנן זה (מסדר 3) פחות טובה. בתחום התדר רואים כי גודל הנחתה נמוך יותר

ובתחום הזמן רואים כי השפיץ פחות חד (מתכונות פונקציית chirp יש הגדלה של התדרים עם הזמן ולכן ניתן לראות את התופעה בציר זה).



איור 29: תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים עבור מסנן butterworth מסדר 25

ניתן לראות מאיור זה את תגובת התדר, תגובה להלם ומפת קטבים ואפסים של מסנן מסוג butterworth מסדר 25 כל הקטבים נמצאים בצד שמאל ולכן המערכת יציבה. מדיאגרמת הבודה ניתן לראות כי מסנן זה מסוג LPF, כאשר המעבר בין תחום ההעברה לתחום ההנחתה הינו חד יותר ומכיל פחות תדרים בהשוואה למסננים מסדר 3,9.



איור 30: תוצאת הסינון עבור מסנן butterworth מסדר 25

מאיוור זה ניתן לראות את תוצאת הסינון עבור מסנן מסדר 25. מתחום הזמן ניתן לראות כי עבור תדרים גבוהים, המופיעים לאחר 1.4 sec יש הנחתה חדה יותר בהשוואה למסנן מסדר 3,9. בתחום התדר רואים כי עם המסנן (באדום), החל מתדר של כ-550 [Hz] כנדרש, יש הנחתה וגם היא גדולה ומהירה יותר מהמסננים הקודמים.

#### 2.5.4 מסקנות:

בניסוי זה יצרנו במטלאב 4 סוגי מסננים בעלי סדר מינמאלי. ראינו כי המסננים שקיבלנו עונים על הדרישות (למשל עבור LPF קיבלנו ההעברה של תדרים נמוכים והנחתה של תדרים גבוהים), אך הם לא היו אידאליים. ראינו זאת באמצעות מישור הזמן כתוצאה מתכונות פונקציית chirp וגם באמצעות מישור התדר.

עבור אות ECG השתמשנו במסנן BSF על מנת לסנן רעש רשת בתדר של 50 [Hz] וראינו כי הסינון לא היה אידאלי. ראשית, על מנת לסנן רעש רשת נרצה מסנן מסוג notch כלומר מסנן חד שמסנן תדר אחד בלבד ובעל תחום מעבר קטן ככל הניתן. במטלאב ירנו מסנן BSF בעל תדרי ברך של 50,51 [Hz] וזה פגע ביעילות המסנן כיוון שתחום ההנחתה גבוה מהרצוי ומכיל תדרים נוספים. כמו כן, גם כאן על מנת ליעל את המסנן יש להגדיל את סדר המסנן.

כצפוי, עבור מסנן Butterworth ראינו כי ככל שהגדלנו את סדר המסנן קיבלנו תגובה חדה יותר הן בתחום הזמן והן בתחום התדר ולכן קיבלנו תוצאת סינון אידאלית יותר.

## 2.6 ניסוי 6: תהליך הכימות quantization

### 2.6.1 היפותזה:

בניסוי זה נבצע כימות לאות אק"ג. נבדוק שלוש שיטות כימות שונות – כימות אחיד, כימות באמצעות אלגוריתם  $\mu$  – Law וכימות באמצעות אלגוריתם Max – Loyd. נתבונן על היסטוגרמת האות ממנה ניתן לשער את צורת הכימות המתאימה ביותר. מהכרתינו עם אות אק"ג ניתן לשער כי התפלגותו אינה אחידה ולכן כימות אחיד לא יספק את התוצאה הטובה ביותר.

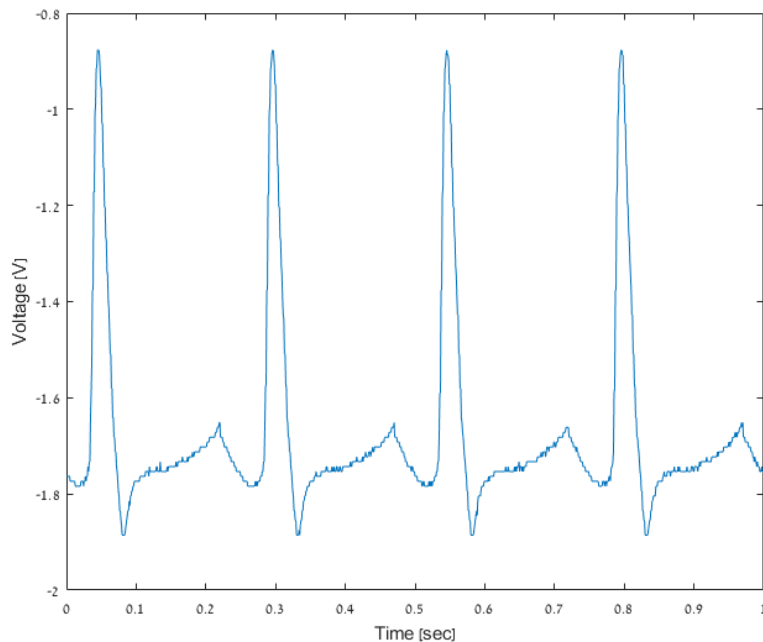
### 2.6.2 מתודולוגיה:

**מכשור וציוד:** מחשב עם מטלוב.

**מהלך הניסוי:** כתבנו במטלוב פונקציות עבור כימות אחיד, כימות באמצעות אלגוריתם  $\mu$  – Law וכימות באמצעות אלגוריתם Max – Loyd. חשבנו את שגיאת הכימות באמצעות שגיאה ריבועית.

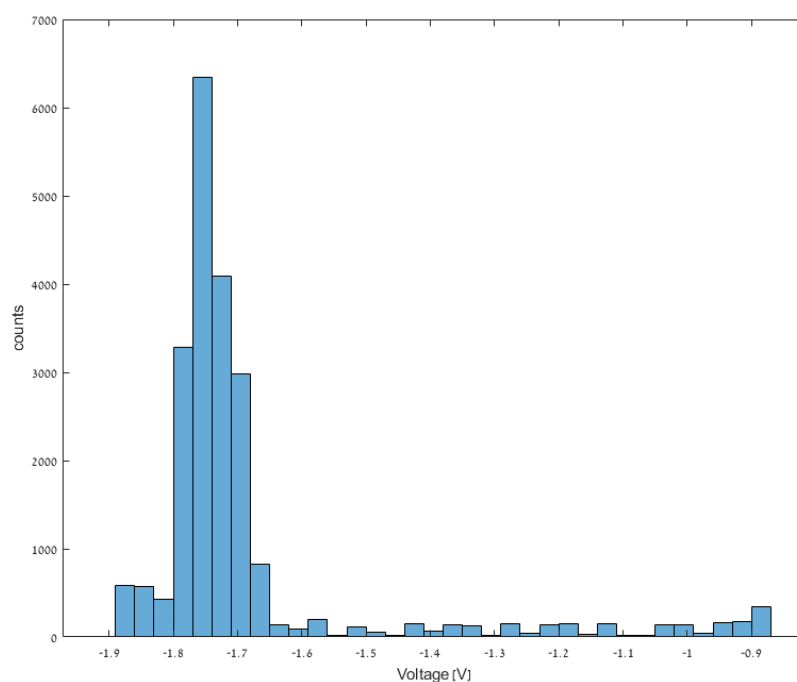
### 2.6.3 תוצאות:

אות האק"ג אותו נכמת:



איור 31: אות ECG אותו נכמת

היסטוגרמת האות:



איור 32 : היסטוגרמת האות

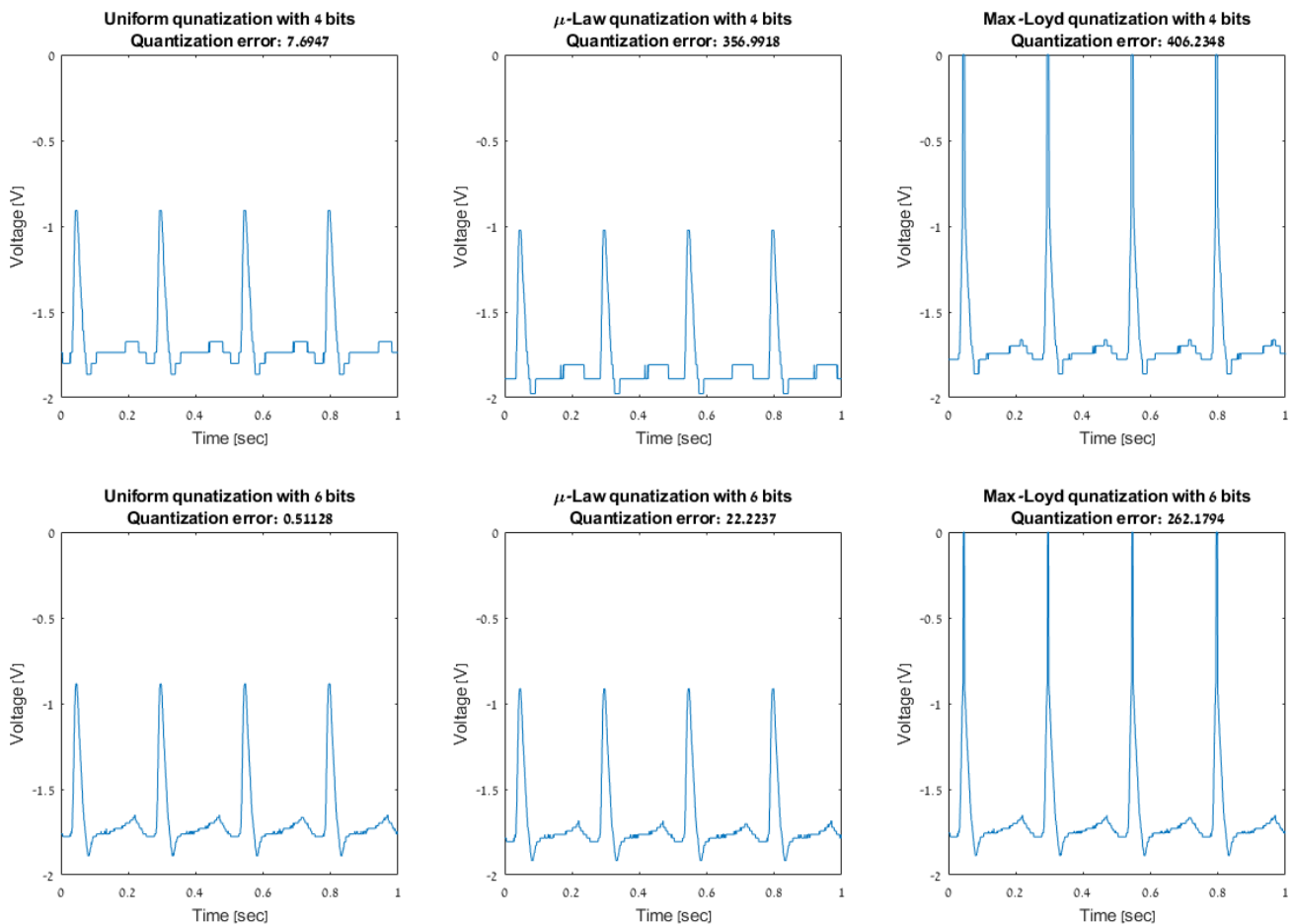
ניתן לראות כי התפלגות האות אינה אחידה ולכן נצפה כי כימות אחיד לא יניב את התוצאה הטובה ביותר. על פניו, נצפה כי אלגוריתם  $Max - Loyd$  יניב את התוצאה הטובה ביותר במובן של שגיאה ריבועית.

לאחר ביצוע כימות האות עם ארבע סיביות ושש סיביות באמצעות שלושת האלגוריתמים וחישוב השגיאה הריבועית :

$$Error = \sum (ECG_{original} - ECG_{quantized})^2$$

כלומר, האות המקורי פחות האות המכומת בריבוע וסכימה על כל ערכים אלה.

התוצאות המתקבלות הינן :



איור 33: – האות המכומת בכל אחד משלושת האלגוריתמים שצוינו עם ארבע סיביות ושש סיביות

מבחינה ויזואלית נראה כי האות המכומת באמצעות אלגורי מקס-לוייד הינו הכי חלק ודומה לאות המקורי כפי שמופיע באיור Y. ניתן לראות כי הערכים שעוברים כימות עם שגיאה גדולה הינם הערכים של פיק גל ה-  $QRS$ , מה שמוביל לשגיאת כימות גדולה יותר מהכימות האחיד. הכימות באמצעות אלגורי  $\mu$ -Law מעט פחות מדויק מהכימות האחיד. באופן מפתיע. אלגורי זה אמור לגרום לאות להתפלג בצורה יותר אחידה לפני ביצוע כימות אחיד, כך שלא ברור למה שגיאת הכימות גדולה יותר.

#### 2.6.4 מסקנות:

מהתבוננות בהיסטוגרמת האות ציפנו כי כימות אחיד יניב שגיאה ריבועית גדולה יותר משאר האלגוריתמים עקב צפיפות ערכים גבוהה בטווח מסוים של האות. בפועל התקבל כי השגיאה הקטנה ביותר התקבלה עבור כימות אחיד. ניתן לראות כי עבור אלגוריתם מקס-לוייד השגיאה הגבוהה יכולה להיות מוסברת באמצעות הכימות של ערכי הפיק של גל ה-  $QRS$  להם שגיאת כימות גדולה מאוד. כימות האות באמצעות מקס-לוייד נראה קרוב יותר לאות המקורי פרט לשגיאה זו. הכימות באמצעות אלגורי  $\mu$ -Law מעט פחות מדויק מהכימות האחיד באופן מפתיע. אלגורי זה אמור לגרום לאות להתפלג בצורה יותר אחידה לפני ביצוע כימות אחיד, כך שלא ברור למה שגיאת הכימות גדולה יותר.



בניסוי זה למדנו על דגימה ושחזור מעשיים ושימוש בסיסי בציד המעבדה לביצוע ניסויים הדורשים דגימה/שחזור. תחילה למדנו להשתמש בציד בסיסי של המעבדה – מחולל ואוסילוסקופ ליצוא של אות סינטטי מהמחולל, ניתוח בסיסי שלו באמצעות האוסילוסקופ עצמו ויצוא שלו לקבצי תמונה ודאטה לשם אנליזה/עיבוד במחשב. בניסוי השני למדנו איך לבצע דגימה באמצעות דוגם USB-6008. נוכחנו לראות כי אם דוגמים בתדר הנמוך מתדר נייקויסט מתרחש אליאסינג. כמו כן למדנו שיטות לניתוח של ספקטרום התדר בסקופ. בניסוי השלישי למדנו על שימוש במעגל  $RC$  ובמסנן  $Butterworth$  כמסנני  $AAF$ . ראינו כי כדי למנוע אליאסינג צריך להשתמש במסננים אלה, אך יש להתחשב בתכונות האות אותו אנו רוצים לדגום גם כן – שימוש ב-  $LPF$  עם תדר קטעון קטן מדי יכול לגרום גם לאיבוד של מידע חשוב על האות. בניסוי הרביעי למדנו על שחזור של אות. הדוגם בו השתמשנו, כמו דוגמים רבים אחרים מבצע אינטרפולוציה של  $ZOH$ , וראינו כי עם בחירה נכונה של מסנן ניתן לשחזר את האות המקורי ע"י הורדה של התדרים הגבוהים של קפיצות המדרגה של אינטרפולצית  $ZOH$ . בניסוי החמישי ביצענו סימולציות במטלאב המדמות מסננים כפי שהשתמשנו בהם בניסוי 3. בחנו את יעילות המסננים במצבים שונים וראינו כי ישנו tradeoff בין יעילות המסננים לפרמטרים אחרים שלהם כמו סדר המסנן (סדר גדול יותר גורר יעילות גדולה יותר אך גם זמן חישוב/פיתוח יקרים יותר). בניסוי השישי ביצענו באמצעות המטלאב כימות של אות האק"ג שדגמנו בניסוי באמצעות אלגוריתמי כימות שונים וראינו כיצד הקשר בין אופי האות לשיטת הכימות בה נשתמש משפיעים על שגיאת הכימות ועל אופי האות המכומת.

[1] "USB-6008/6009 User Guide and Specifications," p. 25.

**Main**

```

%% Exp1:
T=readtable('scope_1.csv');
time=table2array(T(:,1));
volt=table2array(T(:,2));

[p,n]=findpeaks(volt,'MinPeakDistance',100);

plot(time,volt)
hold on
scatter(time(n),p)
xlabel('Time [s]')
ylabel('Volt [v]')

Vpp=p(2)-p(1)
f=1/abs(time(n(3))-time(n(1)))

%% Exp 2
% 2.3
%importing and plotting the data
data_2_3 = readtable('exp1.2.3.csv');
t = data_2_3.Time/10;
vol = data_2_3.Voltage;
figure
plot(t,vol)
xlabel('Time [secs]'); ylabel('Voltage [V]');
xlim([0 0.1])

%extracting period time and vpp of the signal
Vpp= max(vol)-min(vol);
[~,n]=findpeaks(vol);
f=1/(t(n(2))-t(n(1)));

%2.4
ECG = readtable('ECG_scope.csv');
volt2 = ECG.Voltage;
time2 = ECG.Time;
num_vals = length(unique(volt2));
dynamic_range = max(volt2)-min(volt2);

%% Exp3:
%AAF 250 Hz
data1 = readtable('scope_9.csv');
data1.Time = seconds(data1.Time);

%AAF 550 Hz
data2 = readtable('scope_10.csv');
data2.Time = seconds(data2.Time);

%without AAF
data3 = readtable('scope_11.csv');
data3.Time = seconds(data3.Time);

a1=data1.Time(50); a2=data2.Time(50); a3=data3.Time(50);
figure

```

```

subplot(3,1,1)
hold on
plot(data1.Time, data1.Voltage);
axis tight;
xlim([0 a1]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Voltage [V]');
title('AAF - 250 [Hz]');
subplot(3,1,2)
plot(data2.Time, data2.Voltage);
axis tight;
xlim([0 a2]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Voltage [V]');
title('AAF - 550 [Hz]');
subplot(3,1,3)
plot(data3.Time, data3.Voltage);
axis tight;
xlim([0 a3]);
title('without AAF');
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Voltage [V]');

Fs=1100; L=length(data1.Voltage); f = Fs*(0:(L/2))/L;

D1=fft(data1.Voltage);
D1 = abs(D1/L); D1 =D1(1:L/2+1); D1(2:end-1) = 2*D1(2:end-1);
D2=fft(data2.Voltage);
D2 = abs(D2/L); D2 =D2(1:L/2+1); D2(2:end-1) = 2*D2(2:end-1);
D3=fft(data3.Voltage);
D3 = abs(D3/L); D3 =D3(1:L/2+1); D3(2:end-1) = 2*D3(2:end-1);
figure
subplot(3,1,1)
hold on
plot(f, D1,'LineWidth',3);
xlabel('frequency [Hz]');
ylabel('Amplitude')
title('AAF - 250 [Hz]');
subplot(3,1,2)
plot(f, D2,'LineWidth',3);
xlabel('frequency [Hz]');
ylabel('Amplitude')
title('AAF - 550 [Hz]');
subplot(3,1,3)
plot(f, D3,'LineWidth',3);
title('without AAF');
xlabel('frequency [Hz]');
ylabel('Amplitude');

d1=data1.Voltage-mean(data1.Voltage); d2=data2.Voltage-mean(data2.Voltage);
d3=data3.Voltage-mean(data3.Voltage); %%offset

figure
subplot(3,1,1)
hold on
histogram(d1)
ylabel('Count');
title('AAF - 250 [Hz]');

```

```

subplot(3,1,2)
histogram(d2)
ylabel('Count');
title('AAF - 550 [Hz]');
subplot(3,1,3)
histogram(d3)
title('without AAF');
ylabel('Count');

%% Exp4.

% frequency of filtered signal:

filt_data = table2array(readtable('exp1.4.2.csv')); %importing data
filt_data(1,:) = []; % delete first row
filt_data(1,:) = []; % delete second row (after first row deleted second
row is the first row)
time = zeros(2000,1);
volt = zeros(2000,1);
for i=1:2000
    time(i) = str2double(filt_data{i,1});
    volt(i) = str2double(filt_data{i,2});
end

[~,n_4]=findpeaks(volt, 'MinPeakDistance',150);
f_4=1/(time(n_4(3))-time(n_4(1)));

% calculating sampling frequency

data_4 = table2array(readtable('exp1.4.3.csv')); %importing data
data_4(1,:) = []; % delete first row
data_4(1,:) = []; % delete second row (after first row deleted second row
is the first row)
time_4 = zeros(2000,1);
volt_4 = zeros(2000,1);
for i=1:2000
    time_4(i) = str2double(data_4{i,1});
    volt_4(i) = str2double(data_4{i,2});
end

% finding the time (Ts4) between first change between values outputed from
the sampler
ts = find(abs(diff(volt_4))>0.05); %find index for steps accurences
Ts4 = mode(diff(time_4(ts)));
fs_4 = 1/Ts4;

figure
plot(time_4,volt_4)
hold on
scatter(time_4(ts),volt_4(ts))
xlabel('time [sec]'); ylabel('Voltage [V]')
legend('ZOH signal','steps accurences')
%% Exp5:
f0=20; f1=750;Fs=3000; %[Hz]
t = 0:1/Fs:1;
y = chirp(t,f0,2,f1);

figure
plot(t,y);

```

```

xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');

s=tf('s');
%LPF:
wc_L=2*pi*550; %[rad/sec]
H_LPF=wc_L/(s+wc_L);

figure
subplot(3,1,1)
hold on
pzmap(H_LPF);
subplot(3,1,2)
bode(H_LPF);
subplot(3,1,3)
impulse(H_LPF)

%HPF:
wc_H=2*pi*100; %[rad/sec]
H_HPF=s/(s+wc_H);

figure
subplot(3,1,1)
hold on
pzmap(H_HPF);
subplot(3,1,2)
bode(H_HPF);
subplot(3,1,3)
impulse(H_HPF)

%BPF:
H_BPF=(s*wc_L)/((s+wc_L)*(s+wc_H));

figure
subplot(3,1,1)
hold on
pzmap(H_BPF);
subplot(3,1,2)
bode(H_BPF);
subplot(3,1,3)
impulse(H_BPF)

%BSF:
w1=2*pi*50; w2=2*pi*51; %[rad/sec]
H_BSF=1-((s*w1)/((s+w1)*(s+w2)));

figure
subplot(3,1,1)
hold on
pzmap(H_BSF);
subplot(3,1,2)
bode(H_BSF);
subplot(3,1,3)
impulse(H_BSF)

%filtering:
L=length(y); f = linspace(-Fs/2,Fs/2,L);

```

```
%LPF:
[y2,t2,x2] = lsim(H_LPF,y,t);
Y2=fft(y2'); Y2=20*log10(abs(fftshift(Y2)));
Y=fft(y); Y=20*log10(abs(fftshift(Y)));
```

```
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,y)
hold on
plot(t2,y2)
legend('NO filter','with LPF')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(f,Y)
hold on
plot(f,Y2)
legend('NO filter','with LPF')
xlabel('frequency [Hz]')
ylabel('Magnitude ')
```

```
%HPF:
[y2,t2,x2] = lsim(H_HPF,y,t);
Y2=fft(y2'); Y2=20*log10(abs(fftshift(Y2)));
```

```
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,y)
hold on
plot(t2,y2)
legend('NO filter','with HPF')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(f,Y)
hold on
plot(f,Y2)
legend('NO filter','with HPF')
xlabel('frequency [Hz]')
ylabel('Magnitude ')
```

```
%BPF:
[y2,t2,x2] = lsim(H_BPF,y,t);
Y2=fft(y2'); Y2=20*log10(abs(fftshift(Y2)));
```

```
figure
subplot(2,1,1)
plot(t,y)
hold on
plot(t2,y2)
legend('NO filter','with BPF')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(f,Y)
hold on
plot(f,Y2)
```

```

legend('NO filter','with BPF')
xlabel('frequency [Hz]')
ylabel('Magnitude ')

%BSF:
[y2,t2,x2] = lsim(H_BSF,y,t);
Y2=fft(y2'); Y2=20*log10(abs(fftshift(Y2)));

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,y)
hold on
plot(t2,y2)
legend('NO filter','with BSF')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(f,Y)
hold on
plot(f,Y2)
legend('NO filter','with BSF')
xlabel('frequency [Hz]')
ylabel('Magnitude ')

%5.4:
data=readtable('scope_3.csv');
a=find(data.Var1==0);
time=data.Var1(a:end);
noise=0.1*cos(2*pi*50.*time);
newECG=data.Var2(a:end)+noise;
[ECG_bsfc,t,x] = lsim(H_BSF,newECG,time);

figure
subplot(3,1,1)
hold on
plot(time,data.Var2(a:end))
xlabel('Time [sec]')
title('The original signal')
subplot(3,1,2)
plot(time,newECG)
xlabel('Time [sec]')
title('Signal with noise')
subplot(3,1,3)
plot(t,ECG_bsfc)
xlabel('Time [sec]')
title('The signal+noise after BSF')

%5.5
n=[9,3,25];
f0=20; f1=750;Fs=2000; %[Hz]
t = 0:1/Fs:2; %[sec]
y = chirp(t,f0,2,f1);
fc=550; %[Hz]

for i=1:3

[b,a] = butter(n(i),2*fc/Fs,'low');
H_butter=tf(b,a);

```



```

figure
subplot(3,1,1)
hold on
pzmap(H_butter);
subplot(3,1,2)
bode(H_butter);
subplot(3,1,3)
impulse(H_butter)

y2 = filter(b,a,y);

Y2=fft(y2'); Y2=20*log10(abs(fftshift(Y2)));
Y=fft(y); Y=20*log10(abs(fftshift(Y)));
L=length(y); f = linspace(-Fs/2,Fs/2,L);

figure
subplot(2,1,1)
plot(t,y)
hold on
plot(t,y2)
legend('NO filter','with butterworth')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(f,Y)
hold on
plot(f,Y2)
legend('NO filter','with butterworth')
xlabel('frequency [Hz]')
ylabel('Magnitude ')

end

%% Exp6:
ECG = readtable('ECG_scope.csv');
volt6 = ECG.Voltage;
time6 = ECG.Time;

%plot of the ECG
figure; plot(time6,volt6)
xlabel('Time [sec]'); ylabel('Voltage [V]')
xlim([0 1])

%histogram of the signal
figure; histogram(volt6);
xlabel('Voltage [V]'); ylabel('counts')

%% Uniform qunatizing
[Qsignal_uni4,~] = U_quantizer(volt6,4); %4 bits qunatizing
[Qsignal_uni6,~] = U_quantizer(volt6,6); %6 bits qunatizing

%qunatization errors
u4QE = sum((Qsignal_uni4-volt6).^2);
u6QE = sum((Qsignal_uni6-volt6).^2);

%% Miu-Law algo quantizing
[Qsignal_miu4,~] = Miu_quantizer(volt6,2^4,4); %4 bits qunatizing

```

```

[Qsignal_miu6,~] = Miu_quantizer(volt6,2^6,6); %6 bits qunatizing

%qunatization errors
miu4QE = sum((Qsignal_miu4-volt6).^2);
miu6QE = sum((Qsignal_miu6-volt6).^2);

%% Max-Loyd qunatizing
[Qsignal_loyd4,~]=Mll_quantizer(volt6,4); %4 bits qunatizing
[Qsignal_loyd6,~]=Mll_quantizer(volt6,6); %6 bits qunatizing

%qunatization errors
loyd4QE = sum((Qsignal_loyd4-volt6).^2);
loyd6QE = sum((Qsignal_loyd6-volt6).^2);

%% plotting the quantizations:
figure
subplot(2,3,1)
plot(time6,Qsignal_uni4)
xlabel('Time [sec]'); ylabel('Voltage [V]'); title(['Uniform qunatization with 4 bits' , 10, ... 'Quantization error: ',num2str(u4QE)])
xlim([0 1])
ylim([-2 0])

subplot(2,3,2)
plot(time6,Qsignal_miu4)
xlabel('Time [sec]'); ylabel('Voltage [V]'); title(['\mu-Law qunatization with 4 bits' , 10, ... 'Quantization error: ', num2str(miu4QE)])
xlim([0 1])
ylim([-2 0])

subplot(2,3,3)
plot(time6,Qsignal_loyd4)
xlabel('Time [sec]'); ylabel('Voltage [V]'); title(['Max-Loyd qunatization with 4 bits' , 10, ... 'Quantization error: ',num2str(loyd4QE)])
xlim([0 1])
ylim([-2 0])

subplot(2,3,4)
plot(time6,Qsignal_uni6)
xlabel('Time [sec]'); ylabel('Voltage [V]'); title(['Uniform qunatization with 6 bits' , 10, ... 'Quantization error: ',num2str(u6QE)])
xlim([0 1])
ylim([-2 0])

subplot(2,3,5)
plot(time6,Qsignal_miu6)
xlabel('Time [sec]'); ylabel('Voltage [V]'); title(['\mu-Law qunatization with 6 bits' , 10, ... 'Quantization error: ',num2str(miu6QE)])
xlim([0 1])
ylim([-2 0])

subplot(2,3,6)
plot(time6,Qsignal_loyd6)

```

```

xlabel('Time [sec]'); ylabel('Voltage [V]'); title(['Max-Loyd qunatization  
with 6 bits' , 10, ...  
'Quantization error: ',num2str(loyd6QE)])
xlim([0 1])
ylim([-2 0])

```

### MIU quantizer

```

function [Qsignal,T]=Miu_quantizer(Signal,miu,bits)
% Inputs:
% Signal - Original signal [1 X N (line vector)]
% miu - Miu
% bits - Amount of bits for quantization
%
% Outputs:
% Qsignal - New quantized signal [line vector]
% T - Contains vector with the current miu Law
% transformation [ (qnjuantization levels) X 2 ]
%%
Trn = sign(Signal).*log(1+miu*abs(Signal))/log(1+miu);
[Qsignal,~] = U_quantizer(Trn,bits);
Qsignal = (sign(Qsignal).*(1+miu).^(abs(Qsignal))-1)/miu;

T(:,1) = linspace(min(Signal),max(Signal),length(Signal));
T(:,2) = sign(T(:,1)).*log(1+miu*abs(T(:,1)))/log(1+miu);
T(:,2) = U_quantizer(T(:,2),bits);
T(:,2) = (sign(T(:,2)).*(1+miu).^(abs(T(:,2)))-1)/miu;

```

### Mll quantizer

```

function [Qsignal,Q]=Mll_quantizer(Signal,bits)
% Inputs:
% Signal - Original signal [vector]
% bits - Amount of bits for quantization
%
% Outputs:
% Qsignal - New quantized signal [vector]
% Q - Contains vector with decision & quantization
% levels [ (quantization levels) X 2 ]
%%
levels = linspace(min(Signal),max(Signal),2^bits+1); %each level is the
range between 2 adjacent elements of the vector
initcodebook = levels(2:end) - 0.5*(levels(2)-levels(1)); % initial
quantization values
[partition,codebook] = lloyds(Signal,initcodebook); % applies lloyds
algorithm on the input Signal with initial partition of uniform partitions
Qsignal = zeros(length(Signal),1); %intialization of quantized signal
for i=1:length(Signal)
    for j=1:length(partition)
        if Signal(i) <= partition(j)
            Qsignal(i) = codebook(j);
            break
        end
    end
end

```

```

    end
    if j==length(partition) && Signal(i) <= partition(j)
        Qsignal(i) = codebook(j+1);
    end
end

Q(:,1) = linspace(min(Signal),max(Signal),length(Signal));
[partitionQ,codebookQ] = lloyds(Q(:,1),initcodebook);
for i=1:length(Signal)
    for j=1:length(partition)
        if Q(i,1) <= partitionQ(j)
            Q(i,2) = codebookQ(j);
            break
        end
    end
    if j==length(partitionQ) && Q(i,1) <= partitionQ(j)
        Q(i,2) = codebookQ(j+1);
    end
end
end

```

### **U quantizer**

```

function [Qsignal,Q]=U_quantizer(Signal,bits)
% Inputs:
% Signal - Original signal [vector]
% bits - Amount of bits for quantization
%
% Outputs:
% Qsignal - New quantized signal [vector]
% Q - Contains vector with decision & quantization
% levels [ (quantization levels) X 2 ]
%%
levels = linspace(min(Signal),max(Signal),2^bits+1); %each level is the
range between 2 adjacent elements of the vector
q_vals = levels(2:end) - 0.5*(levels(2)-levels(1)); %actual quantization
values
Qsignal = zeros(length(Signal),1); %intialization of quantized signal
for i=1:length(Signal)
    for j=2:length(levels)
        if Signal(i) <= levels(j)
            Qsignal(i) = q_vals(j-1);
            break
        end
    end
end
Q(:,1) = linspace(min(Signal),max(Signal),length(Signal));
for i=1:length(Signal)
    for j=2:length(levels)
        if Q(i,1) <= levels(j)
            Q(i,2) = q_vals(j-1);
            break
        end
    end
end
end

```