

עיבוד אותות ספרתי

פרויקט מטוטלת

SCE

מנחה

ד"ר דמיטרי בחובסקי

קבוצת הפרויקט

עבד מאדי - 207670621

עבד דיק - 318768264

מוחמד משעל - 206365777

וסים ותד - 206359424

תאריך:

15 ינואר 2023

תוכן העניינים

1	תקציר הפרויקט	3
2	מבוא	4
3	שלבי ביצוע	5
3.1	קליטת נתונים והצגתם	5
3.1.1	אופן ביצוע	5
3.1.2	תוצאות	5
3.1.3	ניתוח תוצאות	7
3.1.4	מסקנות	7
3.2	אינטרפולציה ושינוי תדר דגימה	8
3.2.1	אופן ביצוע	8
3.2.2	תוצאות	9
3.2.3	ניתוח תוצאות	11
3.2.4	מסקנות	11
3.3	התמרת פורייה בדידה והצגת ספקטרום האות	12
3.3.1	אופן ביצוע	12
3.3.2	תוצאות	13
3.3.3	ניתוח תוצאות	14
3.3.4	מסקנות	17
3.4	סינון אותות	18
3.4.1	אופן ביצוע	18
3.4.2	תוצאות	21
3.4.3	ניתוח תוצאות	24
3.4.4	מסקנות	24
3.5	השוואה בין ערכים נמדדים למחושבים	25
3.5.1	אופן ביצוע	25
3.5.2	תוצאות	27
3.5.3	ניתוח תוצאות	28
3.5.4	מסקנות	28
4	סיכום ומסקנות כלליות	29
5	מקורות	30

1. תקציר הפרויקט

בפרויקט היה שילוב בין החומרה לתוכנה כדי לבצע כל מיני משימות אשר קשורות לעיבוד אותות ספרתי, השתמשנו בתוכנה שמותקנת במכשיר החכם MATLAB Mobile שבעזרתה ניתן להשתמש בחיישנים כמו תאוצה, שדה מגנטי וכו' ומכאן בחרנו לעבוד עם חיישן התאוצה אשר תדר הדגימה שלו הוא 50 Hz לפי ההנחיות וכדי לבצע את הקלטת הנתונים על תאוצת המכשיר בזמן שהוא מתנדנד תלינו את המכשיר בחוט באורך מסוים ושחררנו אותו מזווית מסוימת ונתנו לו להתנדנד עד עצירה מוחלטת בזמן שחיישן התאוצה אוסף את המידע הרצוי ופעולה זו בוצעה על שלושה חוטים עם אורכים שונים 52cm, 77cm, 108cm על מנת לראות את השפעת אורך החוט על תדר התנודות.

ולאחר העברת הנתונים בצורה אוטומטית דרך MATLAB Drive לתוכנת MATLAB במחשב כדי לבצע פעולות שונות על האות המתקבל כמו העלאת הנתונים ובחירת ציר התאוצה שנבצע עליו את כל הניתוחים, הצגת האות, שינוי תדר דגימה של האות מ- 50Hz ל- 100Hz עם מרווחי זמן אחד, ביצוע התמרת פורייה הצגת ספקטרום וזיהוי התדר הרצוי, סינון האות מרעשים ועוד כמה תתי שלבים שנרחיב עליהם בהמשך ובסוף נשווה את התדר המתקבל נומרית של תדר התנודות לערך התאורטי שניתן לחשב אותו לפי הנוסחה המקורבת (1) וגם נשווה בין האורך הנמדד של מטוטלת לבין האורך מתקבל ע"י חישוב התאורטי מתוך אותה המשוואה (1) תוך השימוש בתדר שהתקבל נומרית.

$$f \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} [\text{Hz}]$$

(1) : נוסחה לחישוב תדר התנודות

התוצאות שמצפים לקבל בסוף הפרויקט

תדרי התנודות:

- עבור מדידה עם אורך חוט 40.5 ס"מ $F_1 = 0.7828(\text{Hz})$
- עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ $F_2 = 0.5677(\text{Hz})$
- עבור מדידה עם אורך חוט 108 ס"מ $F_3 = 0.4794(\text{Hz})$

אורכי חוטים:

- $L_1 = 40.5 (\text{cm})$
- $L_2 = 77 (\text{cm})$
- $L_3 = 108 (\text{cm})$

2. מבוא

באמצעות הכלים הנתונים בתוכנת MATLAB ניתן לבצע את כל הניתוחים המבוקשים על האות כדי לקבל את התוצאות הרצויות.

לאחר קליטת הנתונים מהמכשיר והעברתם לתוכנת MATLAB במחשב הצגנו את האות המתקבל שהוא התאוצה בשלושה צירים Z, Y, X ובחרנו אחד מהם האות המתקבל מהקלטת החיישן במכשיר נדגם בתדר 50 Hz אבל מרווחי זמן דגימה אינו אחיד ולכן ע"י אינטרפולציה מסדר שלישי נהפוך את האות לדגום במרווחי דגימות אחיד ביחד עם זאת נעלה תדר הדגימה של האות ל-100Hz, לאחר מכן נחשב התמרת פורייה לאות ונציג הספקטרום שלו, עשינו זאת באמצעות אלגוריתם מובנה ב-MATLAB וכאשר הצגנו את הספקטרום של האות ניתן לראות את התדר הדומיננטי שהוא מהווה תדר התנודות שלו ובאמצעות המסנן המתאים עם הפרמטרים המתאימים ניתן לסנן אותו ונציג אותו לפני ואחרי סינון במישור הזמן וגם בתדר.

3. שלבי ביצוע

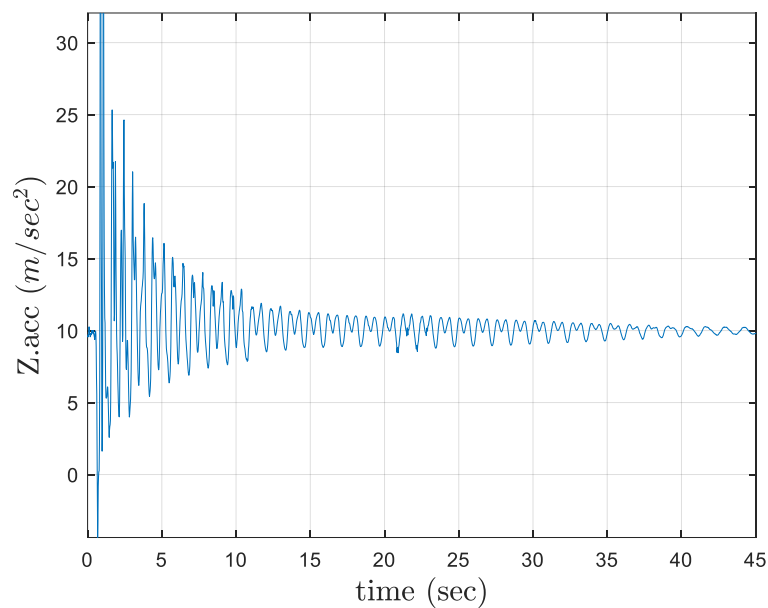
3.1. קליטת נתונים והצגתם

3.1.1. אופן ביצוע

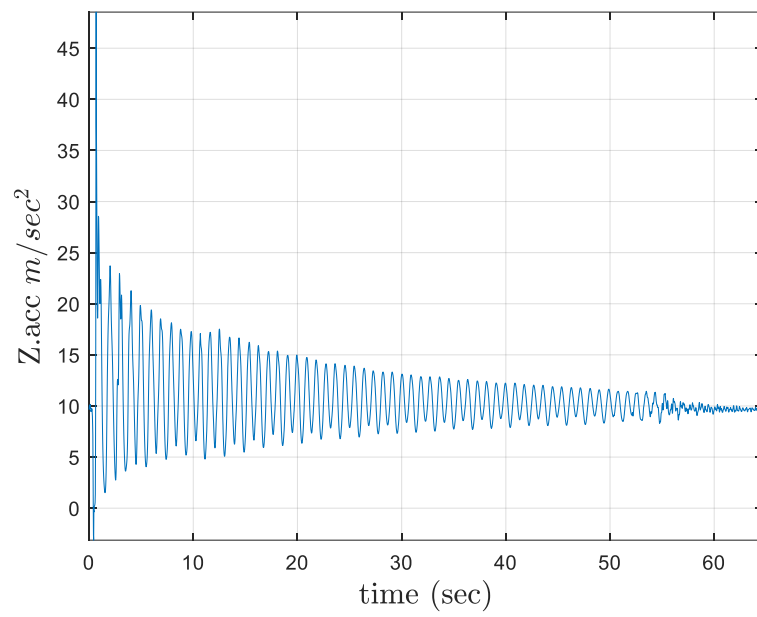
כמו שהזכרנו לפני, הקלטת הנתונים בוצעה בזמן שהמכשיר תלוי בחוט ומשוחרר מזווית מסוימת ומתנדנד עד עצירה מוחלטת ולפי הנחיות הפרויקט ביצענו הקלטת חיישן התאוצה בתדר דגימה של 50 (Hz) כלומר כל 0.02 (sec) החיישן דוגם ומחזיר את המיקום של המכשיר וזה בעזרת חיישן שמוקן בתוך המכשיר הנייד שנקרא IMU, חיישן זה מחזיר את המיקום של המכשיר בכל רגע ורגע.

לאחר מכאן העברנו את ההקלטה ל-MATLAB חילצנו את התאוצה בשלושת הצירים וגם כן חילצנו את הזמן כאשר היה נתון בווקטור עמודה ובאמצעות פונקציה שבנינו וגם בעזרת פקודות מוכנות יצרנו את וקטור הזמן שמתאר את משך הזמן מאז שהמכשיר התחיל להתנדנד ועד לעצירתו ולאחר מכן הצגנו את התאוצה בשלושת הצירים X,Y,Z ובחרנו בתאוצה בציר Z ובחירה זו הייתה בשלושת המדידות השונות עבור אורכי חוטים שונים ונציג גרפים רק עבור התאוצה בציר שבחרנו.

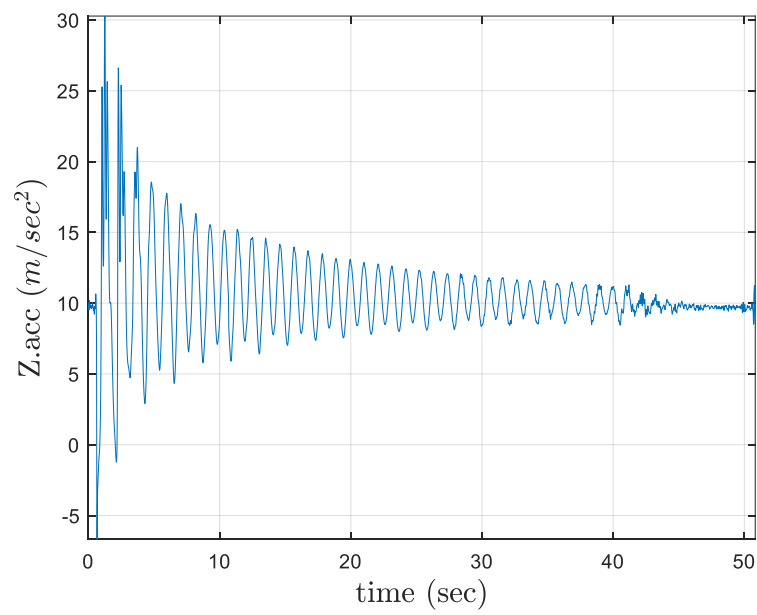
3.1.2. תוצאות



איור 1 : תאוצה בציר Z עבור חוט באורך 40.5 ס"מ



איור 2 : תאוצה בציר Z עבור חוט באורך 77 ס"מ



איור 3 : תאוצה בציר Z עבור חוט באורך 108 ס"מ

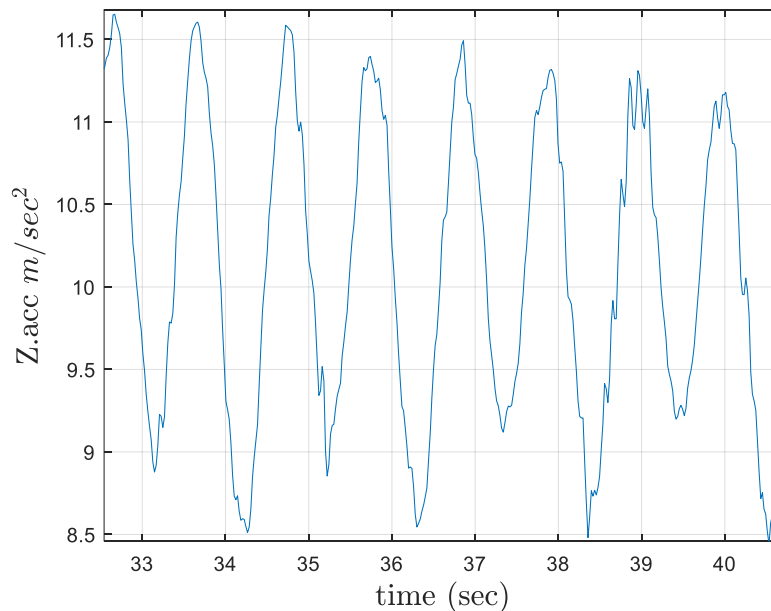
3.1.3. ניתוח תוצאות

בחרנו בתאוצה בציר Z כי הוא נראה יותר טוב לעין משאר הצירים ונראה קל יותר לפעולות שנבצע עליו בהמשך, ובגלל שבחרנו בציר זה באחד המדידות לכן נצמדנו לבחירה זאת גם בשאר המדידות על מנת לראות את ההבדל ביניהם.

אורך זמן המדידות לא שווה בגלל שזמן ההתרסנות של המכשיר שונה, צריך להדגיש שהזווית ששחררנו ממנה את המכשיר כאשר הוא תלוי בחוט שונה ממדידה אחת לאחרת וגם כן אנו יודעים שזמן דגימה של החיישן אינו אחיד מה שיכול לגרום לעיוותים באות.

לפי מה שניתן לראות ב-איור 1, אנו רואים שבחלק של האות מ בזמן $10 \text{ (sec)} < t < 40 \text{ (sec)}$ האות לא משלים את התנודות שלו כמו

רואים שבשלושת התוצאות התנודות הן סביב 10 בערך ואם נקרב יותר לגרף נראה שזה סביב 9.8 שערך זה הוא מהווה תאוצת הכובד בגלל כוח המשיכה שפועל על המכשיר וזה מה שרואים ב-



איור 4 : התאוצה בציר Z עבור חוט באורך 108cm לאחר הגדלה לחלק מהאות.

3.1.4. מסקנות

- מרווחי זמן דגימה לא אחיד יכול לגרום לעיוותים באות ועלול גם לאבד אינפורמציה על האות.
- תדר דגימה 50 Hz יחסית קטן לכן נוצרו עיוותים באות ואת זה רואים בבירור ב- איור 1.

3.2. אינטרפולציה ושינוי תדר דגימה

3.2.1. אופן ביצוע

אנו נתקלים כאן בבעיה שנוצרת עקב זמני דגימה לא אחידים של במדידה של החיישן ולכן לא נקבל את האות בדיוק המבוקש לכן נטפל בבעיה זו ע"י פקודה שנקראת spline שהופכת את האות לדגום במרווחי זמנים אחידים, וגם בשלב זה בוקש להעלות תדר הדגימה מ- 50 (Hz) ל- 100 (Hz) שגם פקודה זו יכולה לעשות באותו זמן.

כדי להשתמש בפקודה יצרנו וקטור זמן חדש שזמן ההתחלה והסיום שלו זהים לווקטור הזמן המקורי והשונה כאן הוא שקבענו מרווחי זמן אחידים כך שבין כל "דגימה ודגימה" יש 0.01 שניות כמו שרואים ב, וכך יצרנו וקטור זמן חדש שנדגם ב 100H.

```
n_sample_rate = 100;  
m = n_sample_rate/sample_rate;  
new_t = 0:sample_time/m:t(end);
```

t - מהווה וקטור זמן מקורי

new_t - וקטור זמן חדש

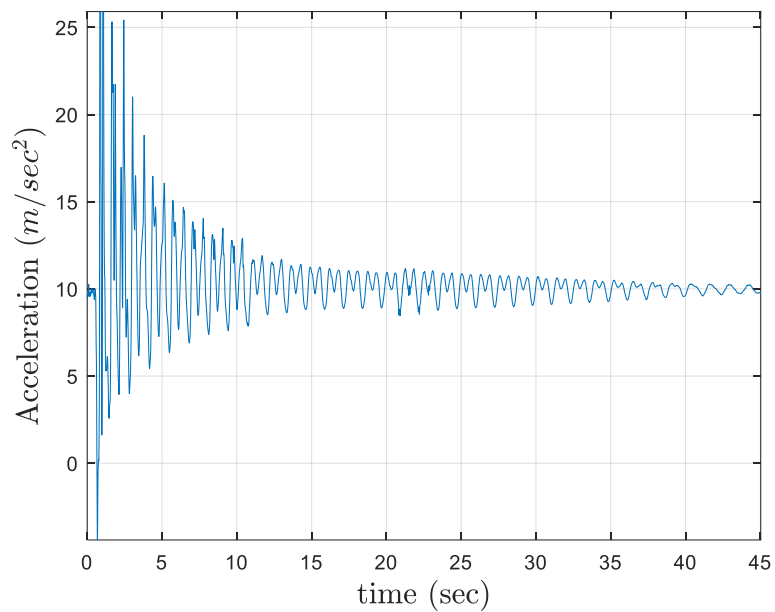
```
The original Sampling frequency : 50.11 HZ  
The New Sampling Frequency is : 100 HZ
```

התוצאה המתקבלת:

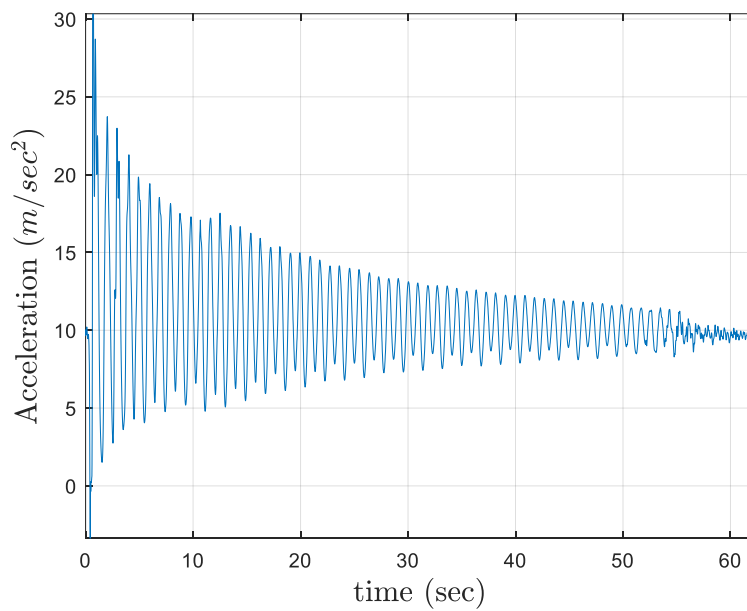
קוד 1 : חישוב תדר דגימה של האות לפני ואחרי השינוי

$$f(x) = a(x - x_1)^3 + b(x - x_1)^2 + c(x - x_1) + d$$

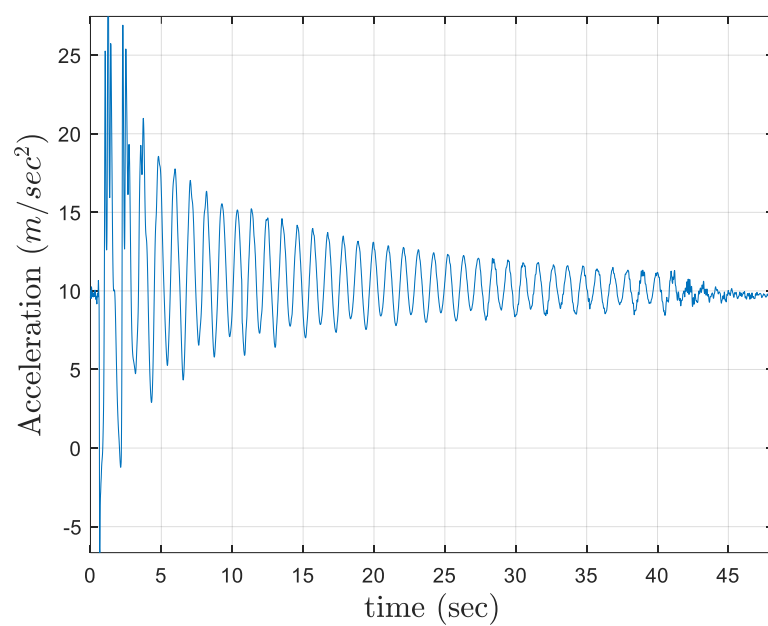
(2) נוסחה לאינטרפולציה מסדר שלישי



איור 5 : תאוצה בציר Z עבור חוט באורך 40.5 ס"מ
אחרי איטרפולציה ושינוי תדר דגימה ל 100 Hz



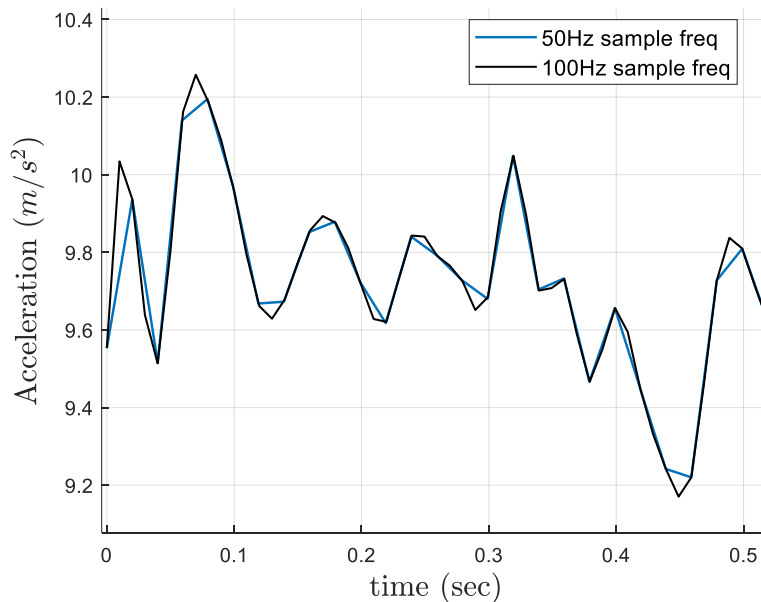
איור 6 : תאוצה בציר Z עבור חוט באורך 77 ס"מ
אחרי איטרפולציה ושינוי תדר דגימה ל 100 Hz



איור 7 : תאוצה בציר Z עבור חוט באורך 108 ס"מ
אחרי איטרפולציה ושינוי תדר דגימה ל 100 Hz

3.2.3. ניתוח תוצאות

כמובן ולפי הגרפים שצורפו (איור 5, איור 6, איור 7) לא ניתן להבחין בהבדל בין האותות לפני ואחרי אינטרפולציה ושינוי תדר דגימה ולכן נציג גרף תאוצה של אחת המדידות עם הגדלה על חלק מסוים מהגרף כדי לראות את השוני שנוצר ונראה את זה ב- איור 8.



איור 8 : גרף התאוצה עם הגדלה לקטע מסוים, הגרף שייך למדידה עם אורך חוט של 108 ס"מ

הערה : בכל הגרפים צריך לעשות הגדלה כדי לראות את ההבדל בין שני המצבים.

עכשיו ניתן לראות ב- איור 8, את ההבדל בין שני המצבים לפני ואחרי שינוי תדר דגימה מ- 50 Hz ל- 100 Hz עם מרווחי דגימה אחידים, מה שמתרחש כאן שבעתם התווסף לנו עוד דגימות וגל ידי שימוש באינטרפולציה שמשתמשת בקירוב מסדר שלישי ניתן ליצור אות יותר חלק מהאות המקורי, גם במקרה זה ההבדל לא כזה משמעותי והסיבה גם שתדר הדגימה המקורי הוא נחשב כגדול יחסית ולו היינו מעלים תדר הדגימה מתדר שהוא נמוך יחסית כמו לדוגמה 10 Hz במקרה זה נוכל לראות הבדל עצום בין שני המצבים.

3.2.4. מסקנות

- מרווחי דגימה לא אחידים יכולים להוביל לשגיאות בעיבוד האות. כאשר המרווחים בין הדגימות אינם קבועים, יכול להיות קשה לשחזר במדויק את האות המקורי באמצעות טכניקות אינטרפולציה ובמקרה שלנו השתמשנו באינטרפולציה מקירוב סדר שלישי. בנוסף, דגימה לא אחידה עלולה להוביל לאובדן מידע ויכולה להקשות על ניתוח האות באמצעות טכניקות במישור התדר.
- ע"י פקודה spline הצלחנו לקבל אות יותר "חלק" מהאות המקורי בגלל הדגימות שהתווספו.
- אינטרפולציה מסדר שלישי מדויקת במידה טובה ועוזרת לשפר את התוצאות.

3.3. התמרת פורייה בדידה והצגת ספקטרום האות

3.3.1. אופן ביצוע

לאחר שסיימנו עם האינטרפולציה ובעיקר תיקנו בעיית מרווחי זמן לא אחידים, היינו צריכים להעביר את האות שלנו למישור התדר על מנת לראות את התדרים שמרכיבים את האות.

ביצענו התמרת DFT בעזרת אלגוריתם מובנה ב MATLAB שנקרא FFT ואת זה היינו צריכים לבצע כמה וכמה פעמים על מדידות שונות וכדי לשמור על הסדר בקוד בנינו פונקציה אשר מקבלת נתונים כמו האות שרוצים לחשב לו התמרת פורייה ותדר הדגימה שלו וחזירה לנו שלושה וקטורים שהם

האות לאחר התמרה, האות שמוכפל בחלון Hamming ולאחר התמרה ולביצוע פעולה זו יש סיבה שנסביר בהמשך והפלט האחרון הוא ציר התדר אשר תיאמנו אותו שיהיה ביחידות של Hz.

בביצוע ההתמרה החלטנו שנציג רק את התדרים החיוביים ומכיוון וגם ריבדנו באפסים כך שהספקטרום יראה בקירוב כמו התמרת DTFT ויהיה חלק יותר וקטע קוד זה רואים באיור קוד 2, פעולה זו לא תפגע באות שלנו ובתדרים שלו הדבר היחיד שמשתנה כאן זה הרזולוציה בספקטרום של האות.

```
function [x,z,y] = DFT(Fs,func)

N = length(func);
Nfft = length(func);% detect the length of the vector
Nfft = 2^nextpow2(Nfft*4);% zero padding
Zz1 = fft(func,Nfft);% DFT using fft algorithm
Zz1 = Zz1(1:Nfft/2);% taking a one side of the DFT vector
Zz1 = abs(Zz1);% calc the abs values of the DTF to plot the spectrum
```

קוד 2: שלבי ביצוע התמרת DFT לאות התאוצה בציר Z

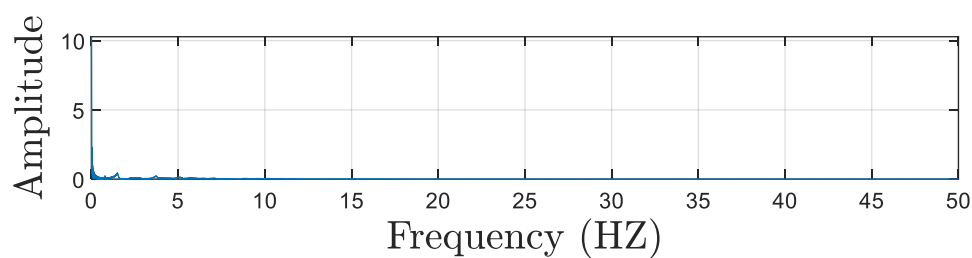
כמו שניתן לראות בקוד חישבנו את אורך ווקטור התאוצה בציר Z על מנת לבצע את של ריפוד באפסים הנ"ל

בסוף ולאחר סידור אורכי הווקטורים לקחנו את האות המותמר בערך מוחלט כדי להציג את הספקטרום וזה היה עבור שלוש מדידות שונות באורכי חוטים שונים.

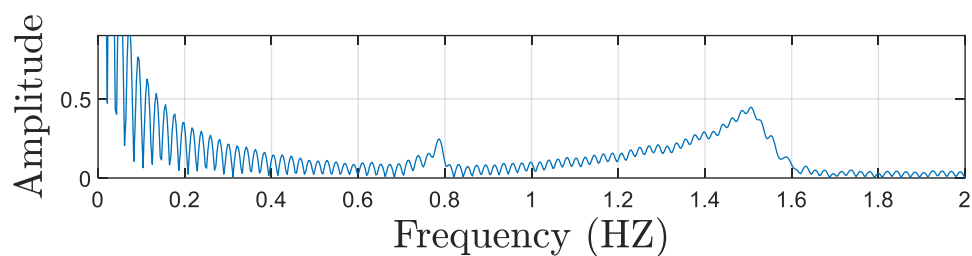
3.3.2. תוצאות

הערה : האמפליטודה מנורמלת בכל הספקטרומים .

1. עבור אורך חוט 40.5 ס"מ :

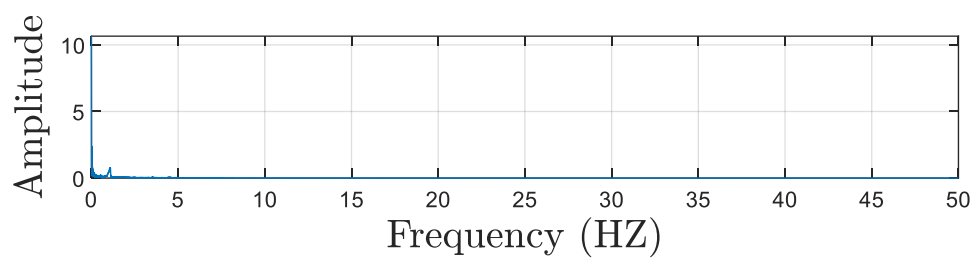


איור 9 : סקטרום אות התאוצה

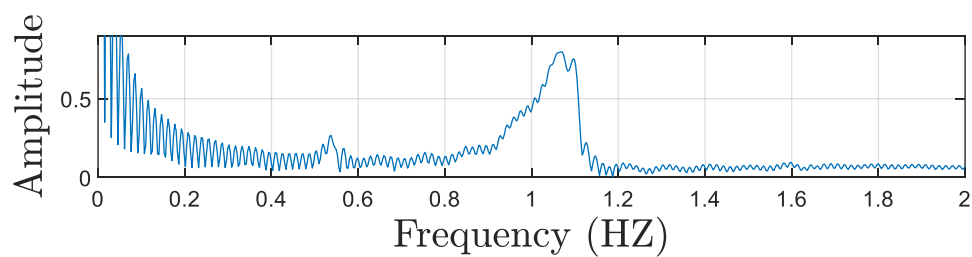


איור 10 : ספקטרום אות התאוצה אחרי הגדלה

2. עבור אורך חוט 77 ס"מ :

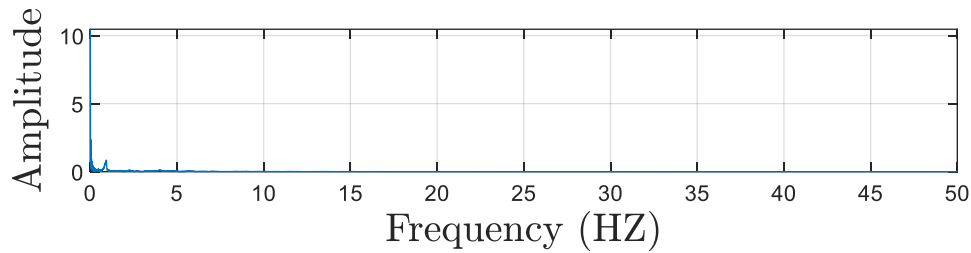


איור 11 : סקטרום אות התאוצה

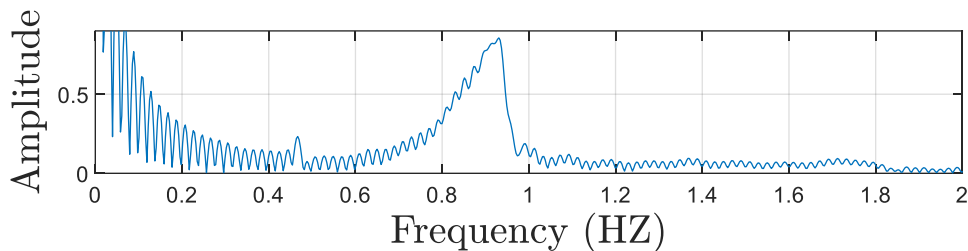


איור 12 : ספקטרום אות התאוצה אחרי הגדלה

3. עבור אורך חוט 108 ס"מ :



איור 13 : ספקטרום אות התאוצה



איור 14 : ספקטרום אות התאוצה אחרי הגדלה

3.3.3 ניתוח תוצאות

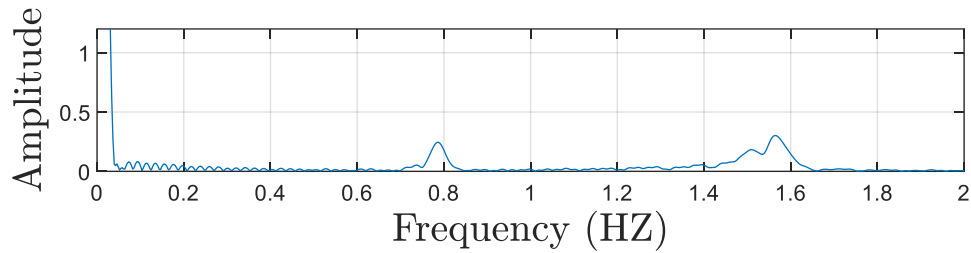
התוצאות שהתקבלו הן לאחר נרמול אמפליטודה ע"י חילוק באורך הווקטור, ובכל זאת היינו צריכים לעשות הגדלה על מנת שנוכל לראות את הפיקים אשר יכולים להוות את התדר שאנו מחפשים .

לאחר שביצענו הגדלה כמו שרואים לדוגמה איור 12 : ספקטרום אות התאוצה אחרי הגדלה, נתקלנו בבעיה והיא הגליות שיש לנו בספקטרום שנוצרת בגלל שהאות שלנו הוא אות סופי בזמן ואות סופי בזמן הוא אות שמוכל בחולון מלבני וסוג זה של חלונות יוצר המון גליות ועם היווצרותה לא יכלנו להבחין בין הפיקים ומי מהם מהווה את תדר התנודות הרלוונטי ובשביל זה הלכנו לפי הדרך הזאת , על מנת להקטין את הגליות הכפלנו את האות שלנו בזמן בחלון hamming כמו שרואים ב- קוד 2.

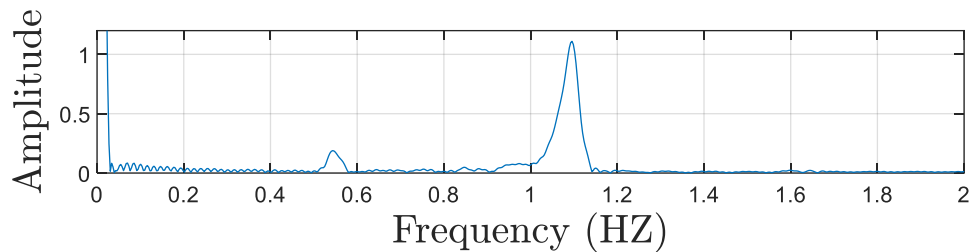
```
% We multiplied by the Hamming window to reduce the undulations
% and after that we divided the result after the DFT
% by the sum of the length of the window in order to keep the amplitude
Zz2_hamming = fft(func.*hamming(N)',Nfft)/sum(hamming(N));
Zz2_hamming = Zz2_hamming(1:Nfft/2);
Zz2_hamming = abs(Zz2_hamming);
xfft = Fs*(0:Nfft/2-1)/Nfft;
```

קוד 3 : הכפלה בחלון Hamming לפני ביצוע התמרת DFT

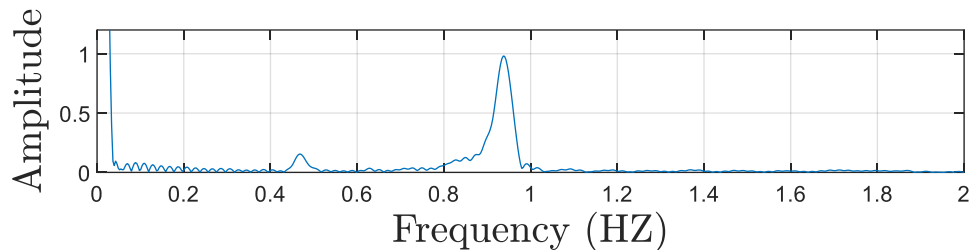
לאחר הכפלה בחלון hamming :



איור 15 : ספקטרום אות התאוצה עבור מדידה באורך חוט של 40.5 ס"מ ולאחר הכפלה בחלון hamming



איור 16 : ספקטרום אות התאוצה עבור מדידה באורך חוט של 77 ס"מ ולאחר הכפלה בחלון hamming



איור 17 : ספקטרום אות התאוצה עבור מדידה באורך חוט של 108 ס"מ ולאחר הכפלה בחלון hamming

כעת אנו רואים שהגליות בשלושת הספקטרומים קטנה בצורה משמעותית ויכולים להבחין בצורה יותר ברורה בפיק הדומיננטי (הלא DC) איור 15, איור 16, איור 17, חשוב להדגיש שהכפלה בחלון וריפוד באפסים לא פגעו באות ולא גרמו להזזות בתדר וכל השוני הוא רזולוציה יותר טובה ופחות גליות, חשוב להדגיש שאחרי שהתגברנו על הבעיה זאת נשאר בספקטרום "רעשים" שצריך לטפל בהם ואת זה נשארי לשלב של הסינון .

אנו רואים גם שבשלושת הספקטרומים (איור 15, איור 16, איור 17), שתדר DC עם אמפליטודה הגבוהה ביותר וכמו שהראינו בגרפים של התאוצה בזמן איור 4 ראינו שתנודות הן סביב ערך קבוע שבערך

9.8 ואנו יודעים שערך קבוע, התדר שלו הוא אפס ולכן קיבלנו אותו כתדר הכי דומיננטי בכל הספקטרומים, וכמובן שאנו יכולים להתעלם ממנו כי אנחנו יודעים שתדר התנודות של המכשיר שונה מאפס.

נדון כעת בתדרים של שלושת המדידות שמהווים תדרי התנודות, התדרים שקיבלנו לפי הספקטרום הם:

הערה: כמו שהזכרנו לפני, תיאמנו את ציר התדר כך שיהיה ביחידות של Hz

- עבור מדידה עם אורך חוט 40.5 ס"מ $F_1 = 1.5594(\text{Hz})$
- עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ $F_2 = 1.09252(\text{Hz})$
- עבור מדידה עם אורך חוט 108 ס"מ $F_2 = 0.93384(\text{Hz})$

התדר שמתקבל בספקטרום אות התאוצה גדול פי-2 מתדר התנודות של המטוטלת כיוון שמחזור אחד של אות התאוצה הוא בעצם כולל שתי תנודות של המטוטלת ולכן על מנת לקבל את התדרים הנכונים צריך לחלק ב-2 את התדרים שהתקבלו.

התדרים לאחר שחילקנו ב-2:

- עבור מדידה עם אורך חוט 40.5 ס"מ $F_1 = 0.7797(\text{Hz})$
- עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ $F_2 = 0.54626(\text{Hz})$
- עבור מדידה עם אורך חוט 108 ס"מ $F_3 = 0.46692(\text{Hz})$

השוואה עם התדר שמתקבל מהנוסחה (1) המקורבת:

- עבור מדידה עם אורך חוט 40.5 ס"מ

$$F_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9.8 \left[\frac{m}{s^2}\right]}{0.405 [m]}} = 0.7828(\text{Hz})$$

- עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ

$$F_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9.8 \left[\frac{m}{s^2}\right]}{0.77 [m]}} = 0.5677 (\text{Hz})$$

- עבור מדידה עם אורך חוט 108 ס"מ

$$F_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9.8 \left[\frac{m}{s^2}\right]}{1.08 [m]}} = 0.4794 (\text{Hz})$$

הערה: הסטייה בין הערכים התאורטיים לנומריים היא צפויה בגלל שאי אפשר להתפטר בצורה מליאה מהשגיאות במדידה או בחישוב וגם בגלל כל מיני קירובים שנעשים תוך כדי עיבוד האות.

3.3.4. מסקנות

- ע"י האלגוריתם המובנה FFT ב-MATLAB שמבצע התמרת DFT על האות ניתן לקבל את הספקטרום ולראות את התדרים שמרכיבים את האות, ועל מנת לקבל רזולוציה יותר טובה ניתן לרפד באפסים וכך גם נוכל לקבל בקירוב התמרת DTFT אבל כאן הסתפקנו להציג את הספקטרום בצידו החיובי ועם מחזור אחד בלבד ותיאמנו ציר תדרים שיהיה ב-Hz.
- ריפוד באפסים גם נותן רזולוציה יותר טובה לספקטרום האות, והכפלה בחלון hamming לפני ביצוע התמרה עוזר להפחית את הגליות בספקטרום ונותן מה שנותן דיוק יותר טוב לתדרים הרלוונטיים ועוזר לזהות אותם מתוך "הפיקים" האחרים שצמודים שאינם קשורים לאות.
- הסטייה בין ערכים נמדדים לתאורטיים תמיד צפויה מחוסר אידאליות במדידות, חישובים וכל מיני ניתוחים שיכולים להשפיע על התוצאות.

3.4. סינון אותות

3.4.1. אופן ביצוע

במשימה הקודמת עשינו התמרה לאות התאוצה בשלושת המדידות ועשינו כל מיני פעולות על האות על מנת לקבל את הספקטרום שלו ולזהות את תדר הרלוונטי, לפי איור 15, איור 16, איור 17, ניתן לראות שמסביב לתדר שרוצים לסנן יש עוד תדרים עם אמפליטודה גבוהה יחסית, תדרים אלו נחשבים כרעשים והמטרה בשלב זה המטרה היא להנחית אותם ככל האפשר על מנת לקבל בסוף אות תאוצה נקי.

כעת אנו מעוניינים לסנן האות בצורה ככל האפשר משאר התדרים, כמובן שלא יהיה סינון מושלם ותמיד אפשר לשפר את הכלים ולקבל תוצאות יותר טובות ובשביל זה בחרנו להשתמש במסנן מעביר פס אשר נממש אותו בשיטת החלונות ובחרנו בחלון Hann ולמימושם השתמשנו בפונקציה `designfilt`.

פונקציה זו נותנת לנו את האפשרות לבנות מסננים בכל הסוגים האפשריים ובשיטות השונות ולקבוע את הפרמטרים לפי הדרישה.

ישנם כמה פרמטרים שניתן לקבוע ואילו הם הפרמטרים שהשתמשנו על מנת לבנות שלושת המסננים שבאמצעותם נסנן את האותות שלנו.

הפרמטרים הם:

- סוג המסנן (LPF,HPF,BPF,BSF)
- תגובת ההלם של המסנן (IIR,FIR)
- סדר המסנן (Order)
- תדר קיטעון ראשון ושני F_{C1}, F_{C2}
- תדר דגימה של האות F_s
- שיטת סינון (Window,...)
- סוג החלון (במידה וממשים את המסנן בשיטת חלונות) כמו (Hamming, Hann, kaiser,...)

לאחר שבחרים את הפרמטרים שצריכים הפונקציה תיתן לנו קוד מוכן ולאחר מכאן ועל מנת לסנן את האות נשתמש בפונקציה `filter` אשר מכניסים לה את האות שרוצים לסנן והמסנן המתאים ותחזיר אות מסונן, ובשביל לבצע את כל הפעולות שהזכרנו יצרנו פונקציה אשר מקבלת את האות שרוצים לסנן, ובעזרת משתנה גלובלי שנותן את אורך החוט נתאים כל מסנן לאות.

שלושת המדידות הן באורך זמן שונה ולכן יצרנו עוד פונקציה שמחשבת את אורך החוט לפי אורך ווקטור הזמן שלה ודבר זה קבוע עבור שלושת המדידות שנשתמש ובסוף נשמור את התוצאה במשתנה הגלובלי.

```
% Designing a filter
hd1 = designfilt('bandpassfir','FilterOrder',500,'CutoffFrequency1'...
    ,0.88,'CutoffFrequency2',0.94,'SampleRate',100,'window','hann');
% filtering the signal
FilteredSignal = filter(hd1, signal2filt);
```

קוד 4: דוגמה לאופן יצירת מסנן וביצוע הסינון

הערה: קביעת הפרמטרים של התדר ב `designfilt` ניתן לעשות גם ביחידות של Hz.

כעת נפרט יותר על הפרמטרים שבחרנו לכל מסנן, ישנם פרמטרים שמשותפים בשלושת המסננים נרחיב עליהם בהמשך והסיבה לבחירתם.

I. מסנן ראשון עבור מדידה עם אורך חוט 40.5 ס"מ:

- סוג המנן : BPF
- תגובת הלם שלו : FIR
- תדר קיטעון ראשון ושני $F_{C_1} = 1.53 \text{ Hz}$, $F_{C_2} = 1.6 \text{ Hz}$
- במקרה כאן בחרנו ברוחב פס רחב יחסית אבל היינו צריכים לזה כדי למנוע את העיוותים שנוצרו לנו מרוחב הפס הקטן.
- תדר דגימה של האות $F_s = 100 \text{ Hz}$
- שיטת סינון : Window
- סוג החלון : Hann
- סדר המסנן (Order) : 500

II. מסנן ראשון עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ:

- סוג המנן : BPF
- תגובת הלם שלו : FIR
- תדר קיטעון ראשון ושני $F_{C_1} = 0.8 \text{ Hz}$, $F_{C_2} = 1.4 \text{ Hz}$
- במקרה כאן בחרנו במסנן עם רוחב פס רחב יחסית והינו זקוקים לזה על מנת למנוע מעיוותים שנוצרו באות.
- תדר דגימה של האות $F_s = 100 \text{ Hz}$
- שיטת סינון : Window
- סוג החלון : Hann
- סדר המסנן (Order) : 500

III. מסנן ראשון עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ:

- סוג המנן : BPF
- תגובת הלם שלו : FIR
- תדר קיטעון ראשון ושני $F_{C_1} = 0.88 \text{ Hz}$, $F_{C_2} = 0.94 \text{ Hz}$
- תדר דגימה של האות $F_s = 100 \text{ Hz}$
- שיטת סינון : Window
- סוג החלון : Hann
- סדר המסנן (Order) : 500

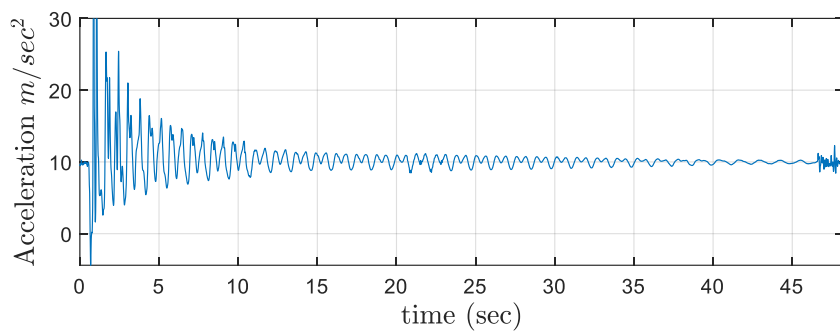
נסביר את הבחירה שלנו לפרמטרים המשותפים בשלושת המסננים :

- סוג החלון : BPF
לפי האיורים איור 15, איור 16, איור 17, הדרך היחידה לסנן את התדר שרוצים היא רק ע"י BPF ולו היינו משתמשים במסנן מעביר נמוכים יכנס לנו רעשים לאות המסונן ולזה אין תועלת ואותו הדבר אם נשתמש במסנן במעביר גבוהים , לכן בחרנו בו על מנת לסנן פס מסוים וקטן ככל האפשר ומבלי לפגוע באמפליטודה של התדר שצריכים , כמובן שרוחב פס זה יכניס רעשים כלומר תדרים שאינם קשורים אבל הבעיה היא , לו היינו לוקחים פס צר יותר סיכוי גדול שנפגע במידה גדולה בתדר שלנו ולכן לא נוכל לשחזר את אות התאוצה.
- תגובה להלם : FIR
מה שמבדיל את מסנני FIR זה תגובתם הסופית להם ויציבותם וגם הפאזה הלינארית שלהם כלומר השהיית הפאזה קבועה בכל התדרים .
- תדר דגימה של האות $F_s = 100 \text{ Hz}$
לקחנו כאן תדר הדגימה החדש ולא המקורי שהיה שווה ל- 50 Hz והסיבה לכך היא בכל השלבים אחרי שעשינו אינטרפולציה והעלינו תדר הדגימה לאות התאוצה היה עדיף לעבוד עם אות אשר דגום במרווחי זמן אחידים ותדר הדגימה לא משפיע על תדר התנודות.
- שיטת סינון : Window
בשיטה זו יש יותר גמישות במימוש המסנן ויש המון סוגים של חלונות עם פרמטרים שונים שניתן לממש אותם לפי הדרישה , כמו אם נצרך הנחתה חזקה, קבועה וכו' וכמובן זה בא על חשבון דברים אחרים כמו כמות החישובים רוחב העונה ראשית.
- סוג החלון : Hann
לחלון זה כי יש את ההנחתה החזקה מאוד לתדרים מסביב תדר התנודות אבל זה בה על חשבון כמות החישובים אבל בגלל שהתדר שרוצים לחלץ קרוב מאוד מרעשים ומתדר DC השתמשנו בו על מנת למנוע מתדרים אלו לעבור במסנן.
- סדר המסנן : 500
לאחר כמה וכמה ניסויים ושינויים לסדר המסנן היינו צריכים להשתמש בסדר גדול על מנת שתהייה הנחתה חזקה ככל האפשר לרעשים וסדר מסנן זה ספק לנו את הדרישה ועזר להנחית את הרעשים בצורה טובה אבל לא מושלמת.

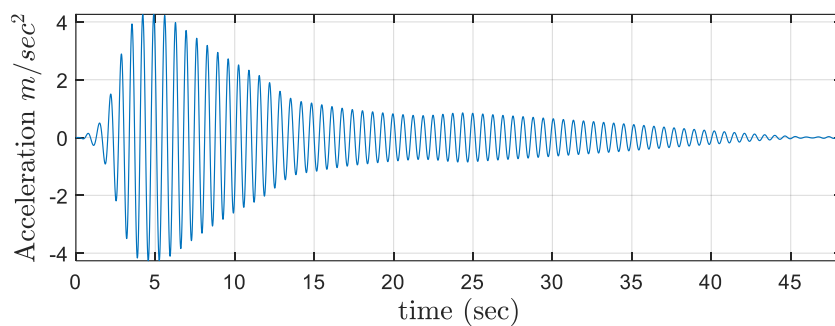
3.4.2. תוצאות

נציג עבור כל מדידה את האות לפני ואחרי סינון ובתדר.

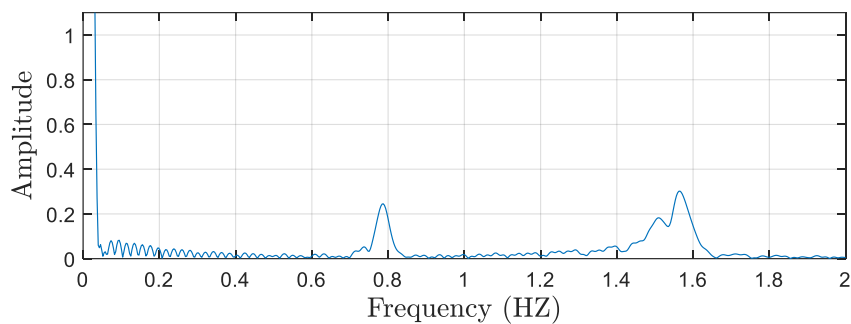
1. עבור מדידה באורך חוט 40.5 ס"מ:



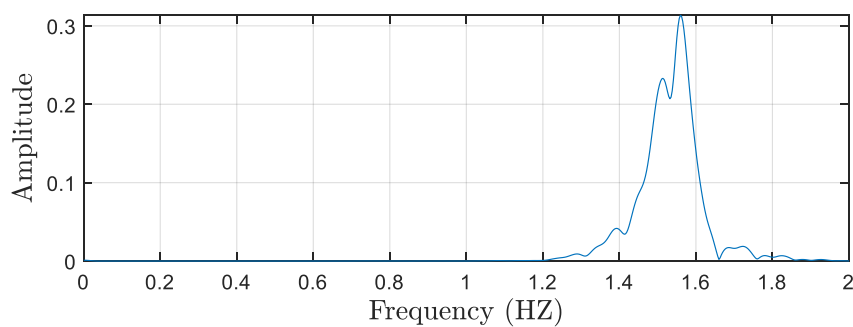
איור 18 : אות התאוצה לפני סינון



איור 19 : אות התאוצה אחרי סינון

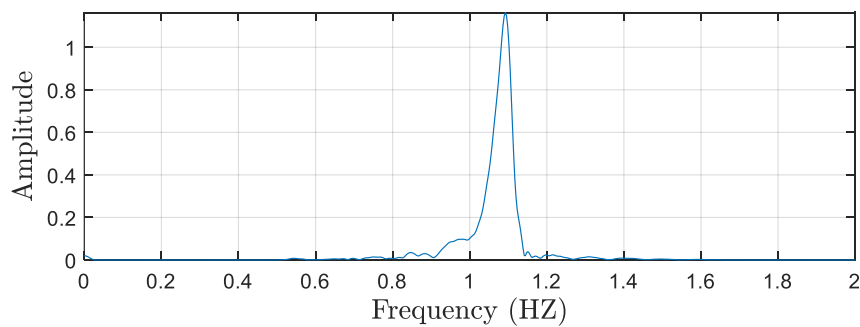
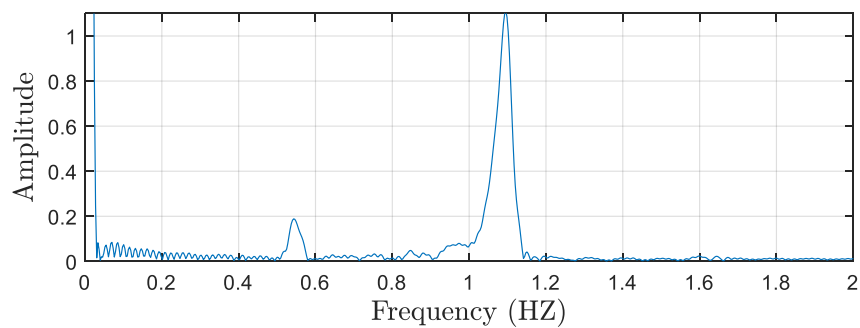
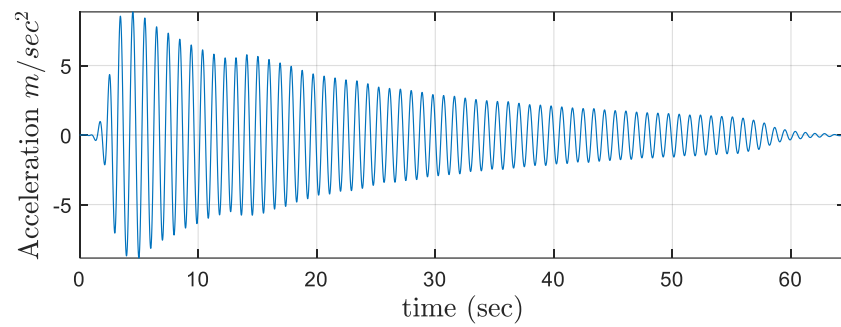
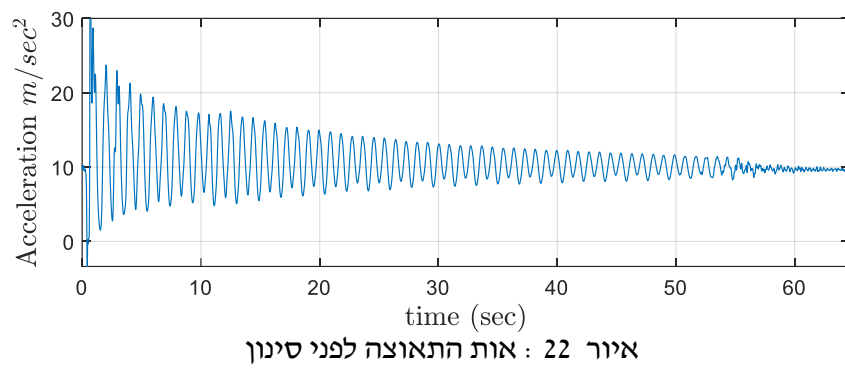


איור 20 : ספקטרום אות התאוצה לפני סינון

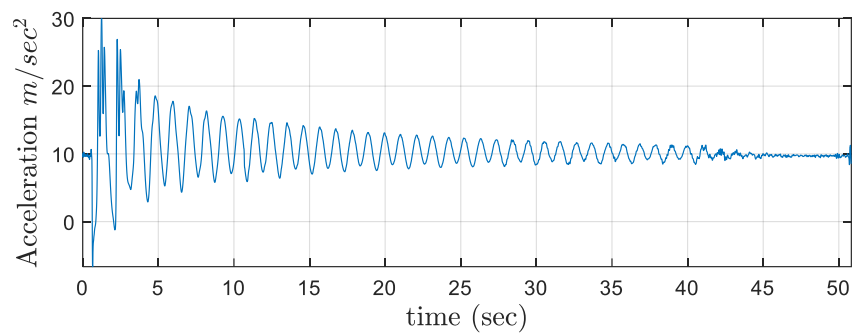


איור 21 : ספקטרום אות התאוצה אחרי סינון

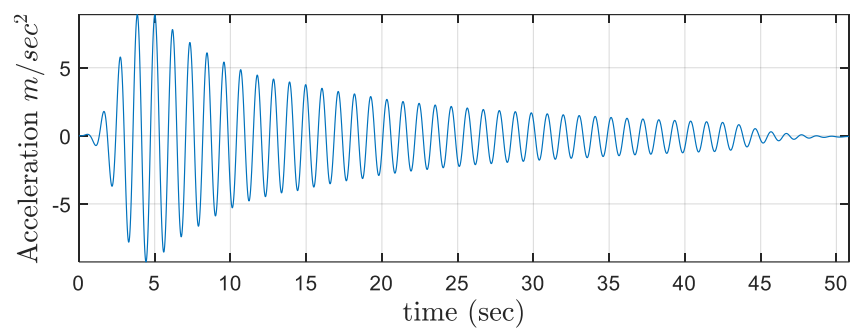
2. עבור מדידה באורך חוט 77 ס"מ:



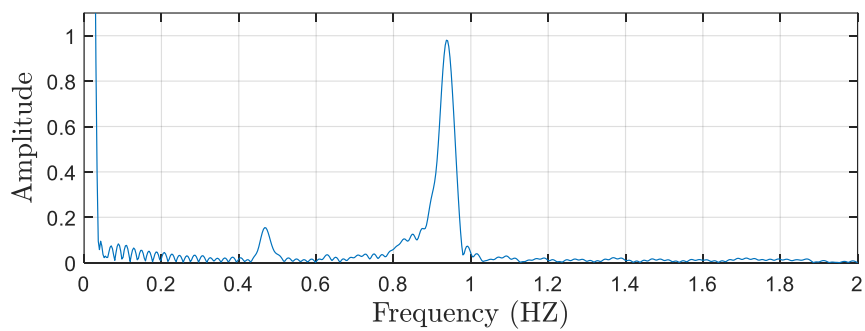
3. עבור מדידה באורך חוט 108 ס"מ :



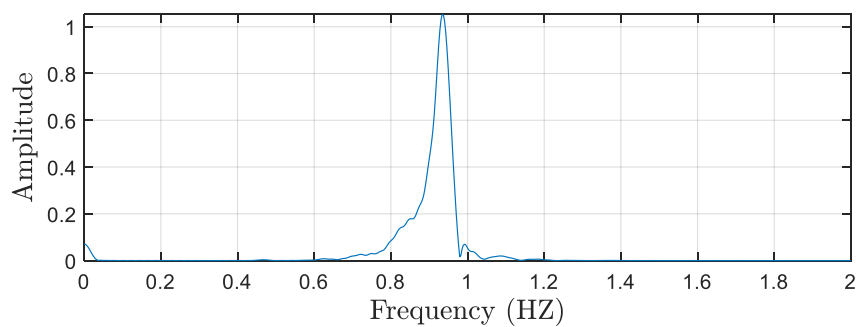
איור 26 : אות התאוצה לפני סינון



איור 27 : אות התאוצה אחרי סינון



איור 28 : ספקטרום אות התאוצה לפני סינון



איור 29 : ספקטרום אות התאוצה אחרי סינון

3.4.3. ניתוח תוצאות

ניתן לראות שהצלחנו במידה טובה להוריד את הרעש מאות התאוצה בשלושת המדידות, הסינון לא הכי מושלם ונשארו קצת רעשים שצמודים לאות לדוגמה איור 21, נשאר עוד פיק קטן שלא יכלנו לסנן בגלל המוגבליות ברוחב הפס של המסנן שבמידה והיינו מקטינים אותו יותר היה עלול להנחית בצורה משמעותית את התדר הרלוונטי. לאחר שסיננו גם תדר DC התנודות של אות התאוצה בשלושת המדידות הפך להיות סביב האפס לדוגמה רואים איור 27.

לדעתנו הסינון המוצלח ביותר היה עבור המדידה האחרונה איור 27, האות סונן בלי עיוותים ורואים את התאוצה במדידה זו דועכת בצורה חלקה יותר משאר המדידות.

רוב הסיכוי שבעיה זו נוצרת בגלל החוט הקצר יחסית וככל שהחוט קצר תדר התנודות גדל וניתן להסיק את זה מהנוסחה המקורבת (1), מה שגורם לריבוד אינפורמציה על האות וליצור את העיוותים שהזכרנו.

האמפליטודה של תדר התנודות נשמר ולא הושפע כי רוחב הפס שבחרנו בשלושתם היה מספיק טוב כדי לסנן רעשים ולא לפגוע באמפליטודה של תדר זה.

3.4.4. מסקנות

- בעזרת התמרת פורייה ניתן לנתח את האות לפי התדרים שמרכיבים אותו וזה מקל את ביצוע הסינון כאשר יודעים את התדרים שצריך לסנן.
- לא יתכן סינון מושלם בגלל המוגבלות ברוחב פס, וסוג המסנן שמשמשים.
- ככל שאורך החוט קטן נוצרו עיוותים באות מה שגורם לאי דיוק בשחזור מושלם.
- השימוש בחלון מסוג Hann עזר להנחית בצורה משמעותית את הרעשים שקרובים מאוד לתדר התנודות מבלי לפגוע באמפליטודה וכמובן שזה גם תלוי בבחירת פרמטרים נכונים למסנן.

3.5. השוואה בין ערכים נמדדים למחושבים

3.5.1. אופן ביצוע

התחלנו את המשימה בחישוב האורכים של החוטים ע"י הנוסחה המקורבת (1) במקרה כאן חילצנו את המשתנה L שמהווה האורך, החישובים בוצעו לפי התדרים שקיבלנו משלבים קודמים כלומר הערכים הנומריים ולאחר מכאן יצרנו גרף אשר ציר X שלו הוא הערך הנמדד של החוטים וציר Y הערך המחושב ויצרנו קו יחוס $Y = X$ וגם ביצענו השוואה זו על התדרים שהתקבלו אנליטית ונומרית כאשר ציר X הערך המחושב אנליטית ו Y הערך המחושב נומרית וגם כן הוספנו קו יחוס על מנת לראות את הסטייה.

$$L = \frac{g}{(2 \cdot \pi \cdot F)^2} [m]$$

3. נוסחה לחישוב אורך החוט.

התדרים שקיבלנו ע"י חישוב אנליטי לפי הנוסחה (1)

- עבור מדידה עם אורך חוט 40.5 ס"מ $F_1 = 0.7828 \text{ (Hz)}$
- עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ $F_2 = 0.5677 \text{ (Hz)}$
- עבור מדידה עם אורך חוט 108 ס"מ $F_3 = 0.4794 \text{ (Hz)}$

התדרים שקיבלנו נומרית ואותם נציב בנוסחה (3)

- עבור מדידה עם אורך חוט 40.5 ס"מ $F_1 = 0.7797 \text{ (Hz)}$
- עבור מדידה עם אורך חוט 77 ס"מ $F_2 = 0.54626 \text{ (Hz)}$
- עבור מדידה עם אורך חוט 108 ס"מ $F_3 = 0.46692 \text{ (Hz)}$

ערכים נמדדים של אורכי החוטים :

$$L_1 = 40.5 \text{ (cm)} \quad \bullet$$

$$L_2 = 77 \text{ (cm)} \quad \bullet$$

$$L_3 = 108 \text{ (cm)} \quad \bullet$$

ערכים מחושבים של אורכי החוטים :

•

$$L_1 = \frac{9.8}{(2 \cdot \pi \cdot 0.7797)^2} = 40.83 \text{ (cm)}$$

•

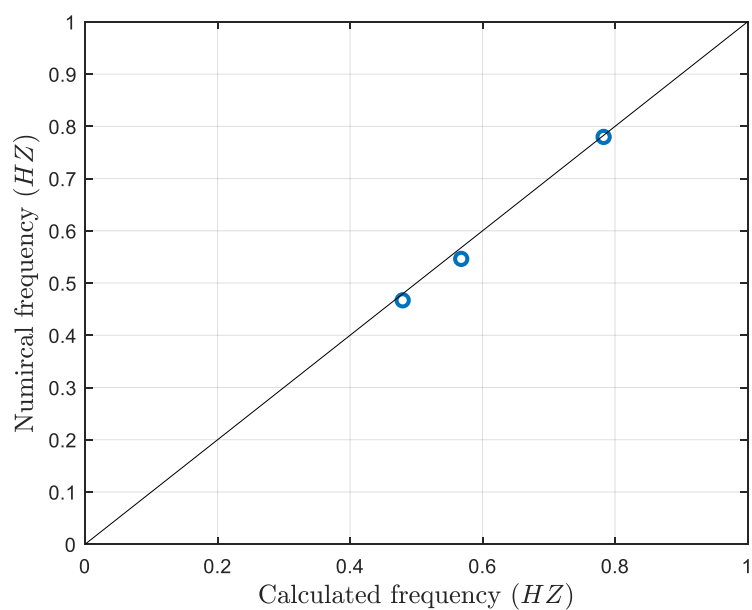
$$L_2 = \frac{9.8}{(2 \cdot \pi \cdot 0.54626)^2} = 83.189 \text{ (cm)}$$

•

$$L_3 = \frac{9.8}{(2 \cdot \pi \cdot 0.46692)^2} = 113.8626 \text{ (cm)}$$

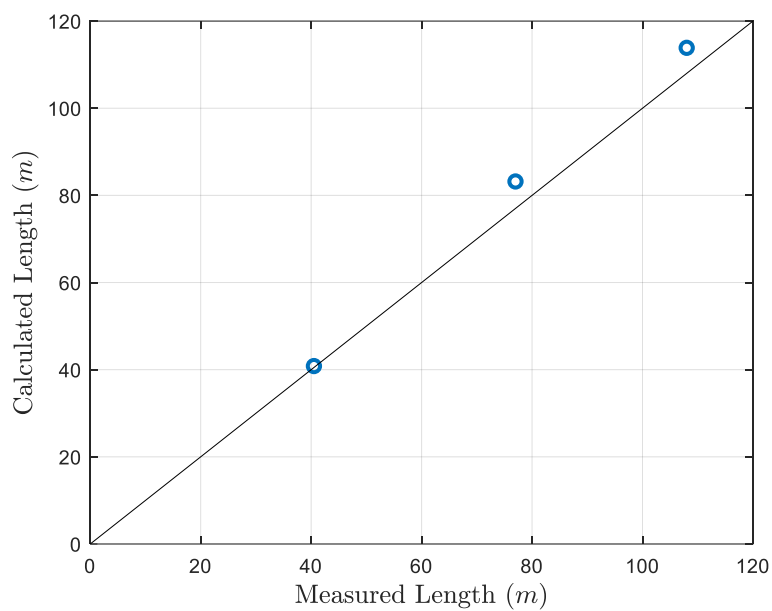
3.5.2. תוצאות

גרף שהתקבל עבור התדרים



איור 30 : גרף שמשווה בין הערכים התאורטיים
לנומרים של תדרי התנודות שהתקבלו

גרף שהתקבל עבור אורכי החוטים :



איור 31 : גרף שמשווה בין הערכים הנמדדים
למחושבים של אורכי החוטים

3.5.3. ניתוח תוצאות

קיבלנו סטייה קטנה בין הערך הנמדד למחושב של אורכי החוטים וגם בתדרים ואת זה רואים לפי קו הייחוס וזו תוצאה צפויה כי גם ייתכן ויש שגיאה במדידה עצמה וגם מחוסר דיוק בחישובים וגם כן התוצאות הנומריות שאנו מקבלים לא אמורים להיות הכי מדויקות, וזו המטרה מכל הקירובים שאנו מבצעים ע"י החישובים הנומריים כך שבסוף אנו צריכים התוצאה במדויקת ביותר ולא המושלמת.

3.5.4. מסקנות

- הסטייה בין ערכים נמדדים למחושים קטנה יחסית שיכולה לנבוע מאי דיוק במדידות או בחישובים.
- אנו רואים לפי התוצאות שהתקבלו ולפי הנוסחה (1) שתדר התנודות תלוי רק באורך החוט.
- לא יכלנו להסיק את המיקום של החיישן במכשיר מתוך התוצאות שהתקבלו.

4. סיכום ומסקנות כלליות

סיכום

במשימה אחרונה שלנו שסיכמה את מטרת הפרויקט ואת כל שלבי העיבוד שעבר האות והכלים שהתמשנו הן חומרה והן תוכנה, קיבלנו את התוצאות הצפויות ברמת דיוק טובה ולכל שלב ושלב בפרויקט היתה לו חשיבות באותו מידה, תחילה באופן ביצוע הפרויקט וחלוקת המשימות בין חברי הקבוצה, בחירת אורכי החוטים שהתמשנו בהם על מנת לתלות את המכשיר הנייד ולתת לו להתנדנד עד עצירה מליאה, למקורות שהשתמשנו בהם ובנקודה זו חוברת ההקורס לקחה את הגדול בהבנת החומר והפעולות שאנו מבצעים על האות ולאחר מכן בחירת החיישן שקלטנו ממנו את התונים שבוצעו באפליקצית מטלב במכשיר הנייד ומאחר מכן העברתם לתוכנת מטלב במחשב ומכאן התחלנו בחלק של התוכנה נטו.

התחלנו אותו בחילוץ המידע שאנו צריכים מתוך קובץ המדידות הצגת האותות שהתקבלו כמו התאוצה בשלושת הצירים, ובחירת ציר מסוים כדי לבצע עליו את כל המשימות כמו איחוד מרווחי זמן דגימה והעלאת תדר הדגימה ע"י הפקודה spline והצגת האות לפני ואחרי איטרפולציה, חישוב התמרת פורייה בדידה דרך האלגוריתם המובנה fft והצגת ספקטרום האות, הפחתת הגליות בספקטרום ע"י הכפלת האות שלנו שהוא סופי בזמן בחלון hamming והשוואת הספקטרום המתקבל עם הקודם, ונקודה זו עזרה לנו להבחין בתדר שמחפשים ולאחר מכן בניית מסנן שיענה על הדרישה לסינון האות מרעש, וגם השווינו בין הספקטרום לפני ואחרי סינון ובסוף הגענו למשימה אחרונה שהזכרנו אותה בתחילת הסיכום ובשלב זה השווינו בין הערכים המחושבים לנמדדים, גם תדרי התנודות וגם אורכי החוטים שהתקבלו וכמו הנ"ל קיבלנו סטייה קטנה שיכולה לנבוע מאי דיוק בחישובים או במדידות, וגם כן ייתכן ובחירתנו לפרמטרי המננים שהשתמשנו גרמה לסטייה זו ובגדול קיבלנו תוצאות טובות.

מסקנות

- דגימה במרווחי זמן לא אחיד יכול לגרום לעיוותים באות ולאבד אינפורמציה עליו.
- בעזרת איטרפולציה מסדר שלישי ניתן לתקן את השגיאות שנגרמו ממרווחי זמן דגימה לא אחיד ולקבל תוצאות מדויקות במידה טובה.
- ע"י העברת האות ממישור הזמן למידור התדר, ניתן לראות את התדרים שמרכיבים את האות ולנתח אותו לפי הדרישה שלנו וגם כן לראות את הרעשים שנכללים בו.
- אות סופי בזמן מוכפל בחלון מה שיוצר לנו בעיית הגליות בתדר, אשר תפריע לנו בניתוח במישור התדר.
- ככל שכמות הגליות גדלה מספר החישובים גדל בהתאם וכמות החישובים של גליות קבועה קטן מגליות משתנה, ואת זה רואים כאשר בוחריים לדוגמה במסנן עם הנחתה חזקה באיזור שרוצים לסנן.
- הכפלה בחלון לא מלבני יכול לעזור בהפחתת הגליות ולשפר את היכולת בהבחנה בין אות המידע לגליות ורעשים מסביב.
- בחירת סוג המסנן, שיטת הסינון ופרמטרי המסנן הינו חלק חשוב בהצלחת הניסוי ולקבלת התוצאות הצפויות.
- התוצאות שמתקבלות לאחר כל המדידות, פעולות, חישובים וקירובים שבוצעו לא בהכרח מדויקות המאה אחוז אלה תהייה סטייה וככל שנדייק בביצועם נקבל תוצאות מדויקות יותר.

5. מקורות

מחברת הקורס : https://bykhov.github.io/dsp/DSP_Book.pdf

אתר Mathworks : [/https://www.mathworks.com](https://www.mathworks.com)