

**אוניברסיטת בן גוריון בנגב**  
**הפקולטה למדעי ההנדסה**  
**בית הספר להנדסת חשמל ומחשבים**

**תרגיל MATLAB מס' 1**

**בקורס "מבוא לעיבוד אותות"**

**סמסטר א' התשפ"ב**

## מבוא

### מטרות

לעבודה זו, שתי מטרות עיקריות:

1. המחשת החומר התיאורטי הנלמד בהרצאות ובתרגילים.
  2. התנסות בפתרון בעיות בסיסיות בעיבוד אותות באמצעות הכלים לניתוח אותות שנלמדו בהרצאות.
- על מנת להשיג מטרות אלו, נדרשים הסטודנטים בקורס לפתור בעיות בסיסיות בעיבוד אותות באמצעות כתיבת סימולציות בתוכנת MATLAB.
- עם זאת, ניתן להשתמש גם בתוכנות אחרות בעלות יכולת דומה.
- שימו לב כי במקרה כזה תצטרכו להתאים בעצמיכם את הפונקציה המצורפת לתוכנה שבה תשתמשו.

### פרטי הגשה והערות

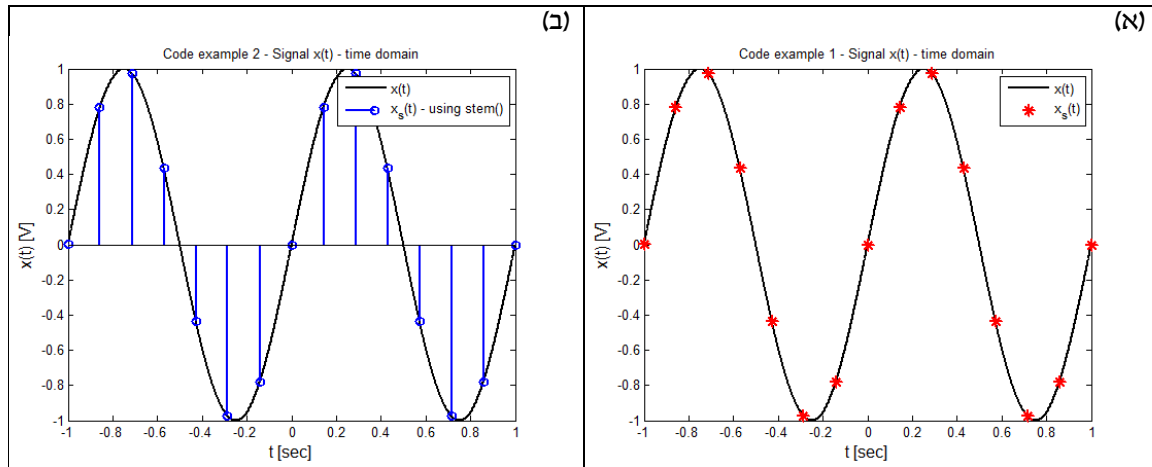
1. את העבודות יש להגיש עד ה-28/11/2021 בשעה 23:00 לאתר המודל.
2. יש להגיש את העבודה מוקלדת כולל תשובות מילוליות הכוללות הסברים וחישובים אנליטיים כקובץ pdf.
3. נא להקפיד על שם קובץ בצורה הבאה: HW1\_ID1\_ID2.pdf, כאשר במקום ID1, ID2 הנכם מתבקשים לרשום את מספרי ת.ז. של המגישים. זאת על מנת למנוע טעויות במתן הציונים.
4. יש להגיש את העבודה בזוגות.
5. יש לצרף את קוד ה-MATLAB עם הערות רלוונטיות כקבצי \*.m.
6. את כל הגרפים יש ליצור בעזרת MATLAB או תוכנות דומות.
7. מתרגלת אחראית: אורטל.

### אופן ביצוע העבודה

1. במהלך העבודה נדרש לייצג ולבצע חישובים על אותות "רציפים" ו"בדידים" או "דגומים" באמצעות MATLAB. אות "רציף" מיוצג ב-MATLAB כווקטור ערכים של הפונקציה שמתארת את האות בנקודות זמן צפופות באופן יחסי. אות "בדיד" או "דגום" יוצג כווקטור שכולל מספר מועט יותר של ערכים בהתאם לתדר הדגימה.
2. על מנת לחשב את הווקטור שמכיל את ערכי הפונקציה בנקודות זמן שונות, נדרש ראשית להגדיר וקטור זמן (למשל  $t = [0 : 0.01 : 1]$ ) ולאחר מכן להשתמש בפונקציות הרצויות לחישוב ערכה בכל אחת מנקודות הזמן שבווקטור (למשל  $x = \sin(2 * \pi * 1000 * t)$ ).
3. גרף שמציג אות "רציף" יוצג של ידי שימוש בפונקציה `plot()` (למשל `plot(t,x)`) וגרף שמציג אות "בדיד" או "דגום" יוצג על ידי שימוש בפונקציה `stem()` או `plot()` עם פרמטרים מתאימים כפי שמתואר בדוגמא באיור 1.
4. הגרפים הנדרשים, חייבים להיות מפורטים ולכלול את שם הגרף ושמות הצירים כולל יחידות. ניתן להיעזר בפונקציות: `title()`; `xlabel()`; `ylabel()`.
5. כאשר נדרש להציג מספר אותות באותו הגרף, יש להשתמש בסימון צבע ו/או עובי ו/או סגנון שונה להצגת כל אות. כמו כן חשוב להוסיף מקרא לגרף. ניתן להיעזר בפונקציות: `hold on`; `legend()` ובפרמטרים של `plot` כגון: 'LineWidth'; 'LineStyle'; 'Marker'; 'Color'.
6. לדוגמא: נתון האות  $x(t) = \sin(2\pi t)$  ביחידות וולט [V] כפונקציה של הזמן בשניות [sec]. האות  $x(t)$  נדגם בתדר דגימה  $F_s = \frac{1}{T_s} = 7 [Hz]$  לקבלת אות דגום  $x_s[n]$ . נדרש להציג בגרף אחד את האות  $x(t)$  ה"רציף" ואת האות  $x_s[n]$  ה"דגום".

והאות "הדגום"  $x_s[n]$ . הגרף צריך להיראות כפי שמתואר באיור 1 (א) או (ב) כולל הקפדה על כל הפירוט הנדרש. גרפים ללא פירוט ייפסלו.

7. כאשר נדרש לבצע חישוב אנליטי יש לכתוב פתרון מלא (מוקלד ולא סרוק). תשובות חלקיות יפסלו.



איור 1. אות סינוס בתדר 1 [Hz] דגום בתדר 7[Hz].  
(א) אות דגום מוצג כ\* (ב) אות דגום מוצג עם stem()

קוד למימוש הגרף מצורף באתר המודל בקובץ Code\_Example.m :

```
clc;
clear all;
close all;

% ---- Code example
T=1;           %[sec] signal period time
W0=2*pi/T;
A=1;
t=-1:1/1000:1; %continuous time vector
x=A*sin(W0*t); %continuous signal

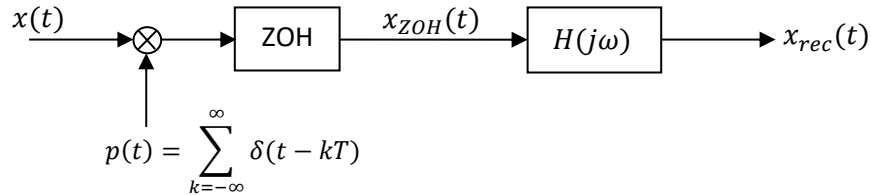
Ws=7*2*pi;    %[rad/sec] sampling angular frequency
Ts=2*pi/Ws;   %[sec] sampling time period
ts=-1:Ts:1;   %sampling time vector
xs=A*sin(W0*ts); %discrete signal

%showing two signals over the same figure
figure;
plot(t,x,'k','LineWidth',2); %draw the continuous signal graph - plot(t,x,'LineStyle','-
','Color','k','LineWidth',2);
hold on; %retain current graph in figure, to allow several graphs over the same
figure
plot(ts,xs,'*r','LineWidth',1.5,'MarkerSize',10); %draw the continuous signal graph -
%other form to write the above command:
plot(ts,xs,'LineStyle','*','Color','r','LineWidth',1.5,'MarkerSize',10);
title('Code example 1 - Signal x(t) - time domain'); xlabel('t [sec]','FontSize',12); ylabel('x(t)
[V]','FontSize',12);
legend(['x(t)';{'x_s(t)'}]);

%showing two signals over the same figure - using "stem()" for discrete signal
figure;
plot(t,x,'k','LineWidth',2); %draw the continuous signal graph
hold on; %retain current graph in figure, to allow several graphs over the same
figure
stem(ts,xs,'b','LineWidth',1.5); %draw the continuous signal graph using "stem()"
title('Code example 2 - Signal x(t) - time domain'); xlabel('t [sec]','FontSize',12); ylabel('x(t)
[V]','FontSize',12);
legend(['x(t)';{'x_s(t) - using stem()'}]);
```

## שאלה 1. דגימה ושחזור (40 נק')

באיור 2 מוצגת מערכת המבצעת דגימה של אות הכניסה בעזרת רכבת הלמים ושחזור בעזרת תהליך ZOH ומסנן מעביר  $H^F(\omega)$  נמוכים.



איור 2. מערכת דגימה ושחזור

נתון האות הרציף הבא:  $\omega_m = 3\pi$ ,  $x(t) = \frac{4}{\omega_m \pi t^2} \cdot \sin^2(\omega_m t) \cos(\omega_m t) \sin(2\omega_m t)$  [V],

א. (5 נק') ציירי את  $x(t)$  בעזרת MATLAB בתחום  $t \in [0.2, 3]$  [sec]. לצורך כך היעזרי בשלבים הבאים:

- יש ליצור וקטור שורה של נקודות הזמן בהן יוצג האות:  $t = 0.2: 1/100: 3$ .
- חשבי את האות בנקודות הזמן שיצרת:  $x = 4./(\omega_m * \pi * t.^2) .* (\sin(\omega_m * t)).^2 .* (\cos(\omega_m * t)) .* (\sin(2 * \omega_m * t))$
- הצגי את הערך המוחלט של תוצאות החישוב:  $\text{plot}(t, x)$ .
- השתמשי בפונקציות  $\text{xlabel}$ ,  $\text{ylabel}$ ,  $\text{title}$  לצורך הוספת כותרת ושמות לצירים.

ב. (10 נק') יש לפתח ביטוי ל  $X^F(\omega) = \mathcal{F}\{x(t)\}$ , התמרת פורייה של האות  $x(t)$ . הצגי גרף של  $|X^F(\omega)|$ , כאשר

$$\omega \in [-17\pi, 17\pi] \left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$$

הערה: בפיתוח כדאי לפשט תחילה את האות כך שיהיה מורכב מפונקציות בעלות התמרות מוכרות:  $\exp()$ ,  $\text{sinc}()$ ,  $\sin()$ . וכי.

ג. (5 נק')

- מהו התדר המקסימלי  $\omega_{max}$  של האות  $x(t)$ ? (עבור התדר המקסימלי מתקיים  $X^F(\omega) = 0 \forall |\omega| \geq \omega_{max}$ )
- הצעני זמן מחזור לדגימה,  $T_s$ , שיאפשר שחזור ללא שגיאות.
- דגמו את האות בנקודות  $t_n = nT_s$ . מהדגימות יש לייצר אות מדרגות מסוג ZOH, שיסומן ב- $x_{ZOH}(t)$ . הצגי את האותות  $x_{ZOH}(t)$  ו- $x(t)$  בגרף אחד.

ד. (10 נק') יש לפתח ביטוי ל  $X_{ZOH}^F(\omega) = \mathcal{F}\{x_{ZOH}(t)\}$ , התמרת פורייה של האות  $x_{ZOH}(t)$ . הצגי גרף של  $|X_{ZOH}^F(\omega)|$ , כאשר

$$\omega \in [-17\pi, 17\pi] \left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$$

ה. (5 נק') ספקטרום המסנן המשחזר האידיאלי נתון על ידי הפונקציה

$$H(\omega) = \begin{cases} \frac{e^{j\pi\omega/\omega_s}}{\text{sinc}(\omega/\omega_s)} & |\omega| \leq \omega_s/2 \\ 0 & |\omega| > \omega_s/2 \end{cases}$$

יש להפעיל את המסנן האידיאלי במישור התדר על  $X_{ZOH}^F(\omega)$  לקבלת ביטוי ל  $X_{rec}^F(\omega)$ . השתמשו ב  $\text{trapz}()$  על מנת לחשב את האות המשוחזר,  $x_{rec}(t)$ , על ידי אינטגרל התמרת פורייה. הציגו את האותות  $x_{rec}(t)$  ו- $x(t)$  בגרף אחד. האם התקבל שחזור מדויק של  $x(t)$ ? הסברו.

ו. (5 נק'). כעת הנח/י כי האות  $x(t)$  נדגם בתדר  $\left[\frac{rad}{sec}\right]$   $\omega_s = 9\omega_m$ , האם במקרה זה ניתן לקבל שחזור מדויק? הסברו. חזור על סעיף ה' ו-וודא שתוצאותיך מתיישבות עם המסקנה מסעיף זה.

## שאלה 2. דגימה לא אחידה של אות מחזורי (30 נק')

נתון אות מחזורי מוגבל סרט:  $\omega_A = 7\pi$ ,  $\omega_B = 4\pi$ ;  $x(t) = 5 \cos(\omega_A t) - 3 \sin(\omega_B t)$

א. (10 נק'). מה זמן המחזור של הפונקציה  $x(t)$ ? דיגמו את האות בצורה אחידה על פני מחזור אחד בעזרת 15 נק' דגימה. הצגי את האות ה"דגום"  $x_s$  יחד עם האות המקורי ה"רציף"  $x(t)$ , על פני מחזור אחד. מדוע נדרשות לפחות 15 נקודות דגימה? הערה: שימו לב שנקודות הדגימה ה-15 של האות ה"דגום" לא ממוקמת בתחילת המחזור השני של האות ה"רציף". הערה: שימו לב כי וקטור הדגימות  $x_s$  אינו אות רציף ויש להציג את הדגימות בלבד. לצורך כך השתמשו בתכונות הקו של פונקציית  $\text{plot}()$  כפי שהוצג בתחילת העבודה.

ב. (10 נק'). כפי שהוצג בשיעור, ניתן להשתמש בדגימות מסעיף א' על מנת למצוא את מקדמי טור פורייה ע"י כתיבת מערכת משוואות מהצורה  $x = Fa$ , כאשר הוקטור  $x$  מכיל את ערכי הפונקציה ב  $N$  נקודות הדגימה והוקטור  $a$  מכיל את  $2M+1$  מקדמי טור פורייה.

כתבו/י בצורה מפורשת את מטריצת האקספוננטים  $F$  (מספיק לכתוב ביטוי לאיבר כללי). יש לפתח ביטוי למציאת הוקטור  $a$  מתוך מערכת המשוואות. התייחסו/י למקרים:  $N=2M+1$ ,  $N>2M+1$ . עבור  $N$  נקודות הדגימה מסעיף א', חשבו/י באמצעות MATLAB את וקטור מקדמי טור פורייה. הצגי את ערכי המקדמים בטבלה.

ג. (10 נק'). שחזרו את האות מתוך וקטור מקדמי טור פורייה והציגו את האות המשוחזר והאות המקורי בגרף אחד. הערה: האות המשוחזר יוצג כאות רציף ולכן כולל כמות נקודות גבוהה מכמות הדגימות בסעיף א'.

ד. (6 נק'). חיזרו על סעיפים א', ב' וג' כאשר 15 נקודות הדגימה מפורזות בצורה אקראית על פני מחזור אחד של האות. לצורך דגימה אקראית השתמשו בפונקציית  $\text{rand}$ . ממה יש להיזהר במקרה זה אם ברצוננו לשחזר את האות?

ה. (8 נק'). חזרו על סעיפים א'-ד' כאשר יש אי-ודאות במיקום הדגימות, כלומר כאשר בונים את המטריצה  $F$ , במקום להכניס את זמן הדגימה האמיתי,  $t_n$ , יש להכניס  $t_n + 0.01 * \text{rand}(1)$  (שימו לב- לכל  $n$  מגרילים מספר רנדומלי אחר). חשבו את ה- $\text{condition number}$  של מטריצה  $F$  בשני המקרים (דגימה אחידה ולא אחידה) ע"י פונקציית  $\text{cond}$ . הסבירו את ההבדלים בין האותות המשוחזרים בשני המקרים.

ו. (6 נק'). חזרו על סעיף ה' כאשר דוגמים את האות ב-40 נק' על פני מחזור אחד, עבור המקרה של דגימה לא אחידה (שימו לב שמספר המקדמים שמחפשים נשאר זהה). הסבירו את ההבדלים שהתקבלו.

### שאלה 3 - דגימה ואנליזה פונקציונאלית (30 נק')

נתונים שני סטים של פונקציות בסיס מחזוריות:

- $\phi_n(t) = \exp(j \frac{2\pi}{T} nt)$ , כאשר  $n$  מספר שלם.
- $\psi_n(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Pi\left(\frac{t}{T/20} - (n + 0.5) - 20k\right)$  אשר מייצגת גל ריבועי, אשר מקבל ערכים בתחום  $[0,1]$  בעל זמן מחזור  $T$  ו-duty cycle של 5%.  $n \in [0,19]$  מספר שלם.

נתונים שני אותות בעלי זמן מחזור  $T = 10$  [sec]:

- $f(t) = 4\cos\left(\frac{4\pi}{T}t\right) + \sin\left(\frac{10\pi}{T}t\right)$
- $g(t)$  פונקציה מחזורית עם זמן מחזור  $T$  כך שמחזור אחד מקיים:  
 $g(t) = 2\text{sign}\left(\sin\left(\frac{6\pi}{T}t\right)\right) - 4\text{sign}\left(\sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right)\right), t \in [0, T]$

א. (5 נק') כתבו פונקציה ב-MATLAB המקבלת שלושה ארגומנטים:

- וקטור עמודה המכיל ערכים ממחזור אחד של האות בזמן "רציף".
- מטריצה בעלת  $N$  עמודות המכילה בכל עמודה פונקציית בסיס אחת (ערכים של פונקציית הבסיס), כך שהמטריצה תייצג סט אחד של פונקציות. הערה: שימו לב שמספר השורות במטריצה ובוקטור צריכים להתאים.
- סקלר השווה לזמן המחזור  $T$ .

הפונקציה מחזירה וקטור באורך  $N$ , המכיל את מקדמי ההטלה של האות על כל אחת מפונקציות הבסיס. מקדמי ההטלה עבור פונקציות בסיס ואותות מחזוריים יחושבו כך:

$$c_n = \frac{\langle x(t), \phi_n(t) \rangle}{\|\phi_n(t)\|^2} = \frac{\int_0^T x(t) \phi_n^*(t) dt}{\int_0^T |\phi_n(t)|^2 dt}$$

(השתמשו בפונקציה trapz על מנת לחשב את האינטגרלים)

ב. (10 נק') בעזרת הפונקציה מסעיף א' חשבו את מקדמי ההטלה  $c_n$  של כל אחד משני האותות על כל אחד משני הסטים של פונקציית הבסיס הנתונים. עבור  $\phi_n(t)$  חשבו את המקדמים  $c_{-20}, \dots, c_{20}$ , ועבור  $\psi_n(t)$  חשבו את המקדמים  $c_0, \dots, c_{19}$ . הציגו בטבלה את המקדמים שקיבלתם והסבירו את התוצאה.

הערה: נסו להגדיר את מטריצת פונקציות הבסיס בשורה אחת, ללא שימוש בלולאה.

ג. (10 נק') שחזרו את האותות מתוך מקדמי ההטלה שחישבתם בסעיף ב', על ידי נוסחת השחזור:

$$\hat{x}(t) = \sum_{n=-N}^N c_n \phi_n(t)$$

הציגו את האות המקורי ואת האותות ששחזרתם בגרף אחד עבור  $f(t)$  ובגרף נוסף עבור  $g(t)$ , עבור מחזור אחד.

- האם מתקבל שחזור מדויק בכל אחד מהמקרים?

- בשחזור האות  $g(t)$  מתוך מקדמי ההטלה על  $\phi_n(t)$ , האם ניתן לקבל שיחזור מדויק (ללא שגיאה) על ידי הוספת מקדמים מעבר לאלו שחושבו? כיצד ניתן לשפר את דיוק השחזור?
- בשחזור האות  $f(t)$  מתוך מקדמי ההטלה על  $\psi_n(t)$ , האם ניתן לקבל שיחזור מדויק (ללא שגיאה) על ידי הוספת מקדמים מעבר לאלו שחושבו? כיצד ניתן לשפר את דיוק השחזור?

ד. (5 נק'). הסבר/י :

- באיזה בסיס עדיף להשתמש עבור כל אחד מהאותות הנתונים?
- מהם היתרונות והחסרונות בכל אחד מהבסיסים?
- האם השימוש בבסיס  $\psi_n(t)$  זהה לשחזור ZOH?

בהצלחה!