

הנדסה ביורפואית

מעבדה בחשמל

מגישים :

דן טורצקי

סול אמארה

תאריך :

31.10.2021

תוכן עניינים:

1	תקציר:	3
2	ניסויים:	4
2.1	ניסוי 1: מדידת תדר ועצמת אות בעזרת משקף	4
2.1.1	היפותזה:	4
2.1.2	מתודולוגיה:	4
2.1.3	תוצאות:	5
2.1.4	מסקנות:	8
2.2	ניסוי 2: מדידת הפרש הפאזה בין שני אותות סינוס בעזרת משקף	9
2.2.1	היפותזה:	9
2.2.2	מתודולוגיה:	9
2.2.3	תוצאות: התוצאות שהתקבלו מהמדידות שביצענו מוצגות בטבלאות הבאות:	10
2.2.4	מסקנות:	16
2.3	ניסוי 3: הכרת רב מודד ספרתי- מדידת מתח	18
2.3.1	היפותזה:	18
2.3.2	מתודולוגיה:	18
2.3.3	תוצאות:	18
2.3.4	מסקנות:	23
2.4	ניסוי 4: הכרת רב מודד ספרתי- מדידת התנגדות	24
2.4.1	היפותזה:	24
2.4.2	מתודולוגיה:	24
2.4.3	תוצאות:	24
2.4.4	מסקנות:	25
3	מסקנות כלליות	26
4	מקורות	27
5	נספחים	28

1 תקציר:

מטרת ניסוי זה הינה להכיר את המכשירים העיקריים בהם נשתמש במהלך קורס זה- רב מודד, מחולל אותות ומשקף. מטרת המחולל האותות היא לייצר אותות עם מאפיינים שניתן לשנות ולקבוע, רב המודד יכול למדוד ערכים חשמליים שונים כגון מתח, זרם, התנגדות וכו', והמשקף מציג את אותות המתח הנכנסים אליו על גבי צג ומאפשר למדוד ערכים מסוימים שנבחר. על מנת להכיר מכשירים אלו ומאפייניהם, ביצענו מספר ניסויים בהם בחנו את תכונות המכשירים לדוגמא התנגדות פנימית ודיוק מדידה של רב המודד בניסוי הרביעי ולמדנו את טכניקות השימוש הבסיסיות במכשירים. כמו כן, התנסינו בשימוש בקבלים ונגדים וחיבור בין הנוסחאות הפיזיקליות המתאימות לבין תוצאות הניסוי.

2 ניסויים:

2.1 ניסוי 1: מדידת תדר ועצמת אות בעזרת משקף

2.1.1 היפותזה:

בניסוי זה נציג אותות מתח על גבי משקף, ונמדוד בעזרתו בשתי שיטות פרמטרים של האות. נצפה כי התוצאות שמהשקף יציג יהיו מדויקות יותר מהתוצאות שנקבל משימוש במצביעים כיוון שחישובי המשקף אינם תלויים בשגיאה שיכולה לנבוע משימוש פיזי במכשיר כמו יכולת העין האנושית לזיהוי מדויק של נקודות.

2.1.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד: מחולל אותות, משקף, כבל BNC-BNC.

מהלך הניסוי: הדלקנו את מחולל האותות ואת המשקף. חיברנו קצה אחד של כבל ה-BNC-BNC אל שקע ה-output של המחולל ואת הקצה השני לשקע כניסה מס' 1 של המשקף. העברנו את התנגדות המוצא של מחולל האותות ל High Z לפי הנחיות הפרוטוקול. הגדרנו את הפרמטרים הנדרשים במחולל האותות ע"י שימוש בכפתורי בחירת סוג המוצא וב – soft keys כך שהאות היוצא יהיה אות סינוסי הזהה לאות שבאיור 3.1 בפרוטוקול הניסוי. לחצנו על כפתור ה-output על מנת ליצא את האות למשקף. לחצנו על כפתור ה-autoscale על מנת להציג את האות בזמן המתמיד. לחצנו על כפתור ה-cursor על מנת לפתוח את תפריט השליטה בסמנים, הצבנו את הסמנים האנכיים על שני פיקים סמוכים, ואת הסמנים האופקיים על נקודת מקסימום ומינימום של האות. חיברנו את הדיסק און קי לשקע המתאים ורכשנו את התמונה לפי הוראות הפרוטוקול. לאחר מכן לחצנו על כפתור ה-Meas – על כפתור ה-Acquire – בחרנו בתפריט למצע עם 256 ערכים – בחרנו ערכי מדידה של מתח שיא לשיא $P_k - P_k$, תדירות $Freq$ ורכשנו תמונה זו. חזרנו על פעולות אלה (מהגדרת הפרמטרים והלאה) לשני אותות נוספים – אות מרובע הזהה לאות שבאיור 3.3 בפרוטוקול הניסוי, ואות משולש הזהה לאות שבאיור 3.4 בפרוטוקול הניסוי. עבור אות הסינוס והאות המרובע מצב הבורר האנכי הוגדר להיות $1V$ למשבצת ומצב הבורר האופקי $500\mu s$ למשבצת ועבור אות המשולש מצב הבורר בציר האנכי היה זהה לקודמיו ומצב הבורר בציר האופקי הוגדר להיות $1ms$ למשבצת.

2.1.3 תוצאות:

עבור אות הסינוס:

טבלה מס' (1): קורדינטות המצביעים של אות הסינוס

Sinus (Cursors)	
X1	-1.490 ms
X2	510.0 μ s
Y1	2.01250 V
Y2	-2.05 V
Image Name	Scope1
$\Delta x = 2\text{ ms}$ $\Delta y = -4.0625\text{ V}$	

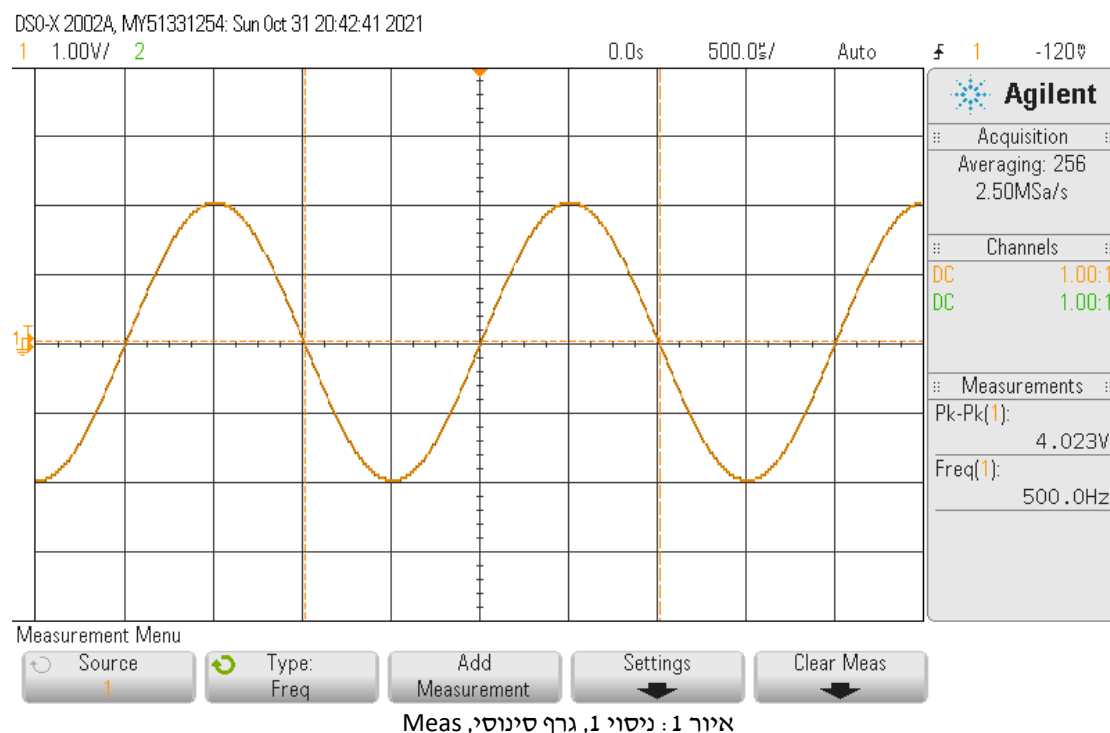
חישוב מתח שיא ודדירות של אות הסינוס ע"י שימוש במידע מהמצביעים:

$$V_{p-p, \text{sinus}} = |\Delta Y| = 4.0625[V]$$

$$(1) f_{\text{sinus}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta X} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-3}} = 500[Hz]$$

טבלה מס' (2): מדידת מתח שיא ודדירות של אות הסינוס

Sinus (Meas)	
Vpp [V]	4.023 V
Freq [Hz]	500 Hz
Image Name	Scope2



עבור האות המרובע:

טבלה מס' (3): קורדינטות המצביעים של האות המרובע

Square (Cursors)	
X1	-996.7450405 μs
X2	1.00325464 ms
Y1	1.9750 V
Y2	-2.08750 V
Image Name	Scope4
$\Delta x = 1.9999 \text{ ms}$ $\Delta y = -4.0625 \text{ V}$	

חישוב מתח שיא ודדירות של האות המרובע ע"י שימוש במידע מהמצביעים:

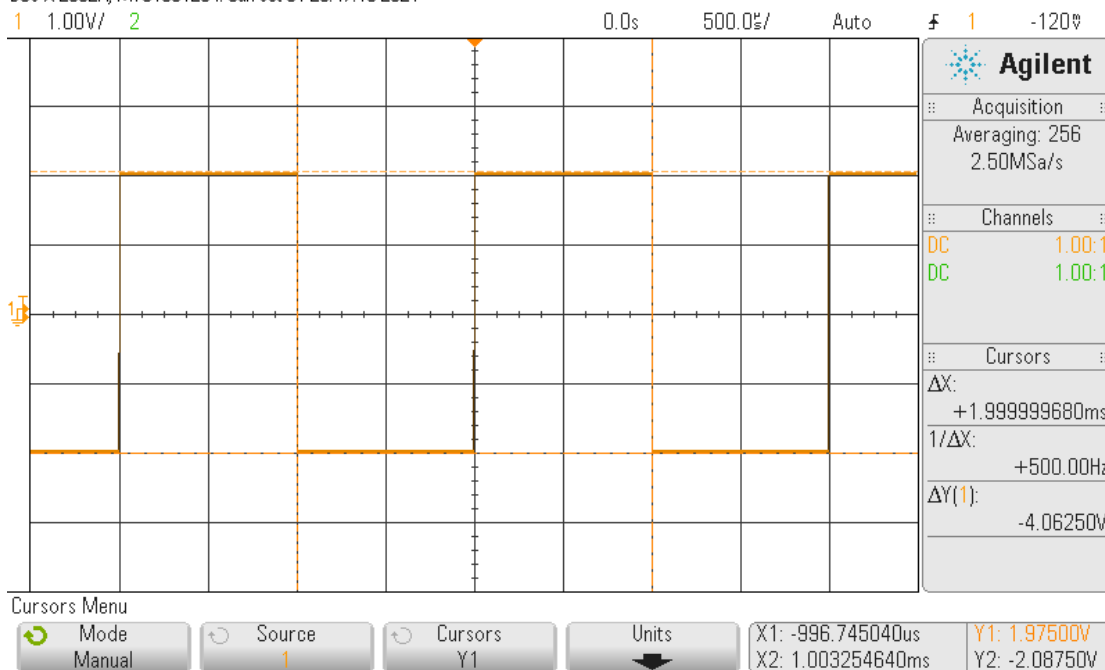
$$V_{p-p, \text{square}} = |\Delta Y| = 4.0625 [V]$$

$$f_{\text{square}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta X} = \frac{1}{1.999 \cdot 10^{-3}} = 500.25 [Hz]$$

טבלה מס' (4): מדידת מתח שיא ודדירות של האות המרובע

Square (Meas)	
Vpp [V]	4.033 V
Freq [Hz]	500 Hz
Image Name	Scope3

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 20:47:19 2021



איור 2: ניסוי 1, גרף מלבני, Meas

עבור האות המשולש :

טבלה מס' (5) : קורדינטות המצביעים של האות המשולש

Triangle (Cursors)	
X1	-2.980 ms
X2	1.04 ms
Y1	1.9750 V
Y2	-2.08750 V
Image Name	Scope5
$\Delta x = 4.02 \text{ ms}$ $\Delta y = -4.0625 \text{ V}$	

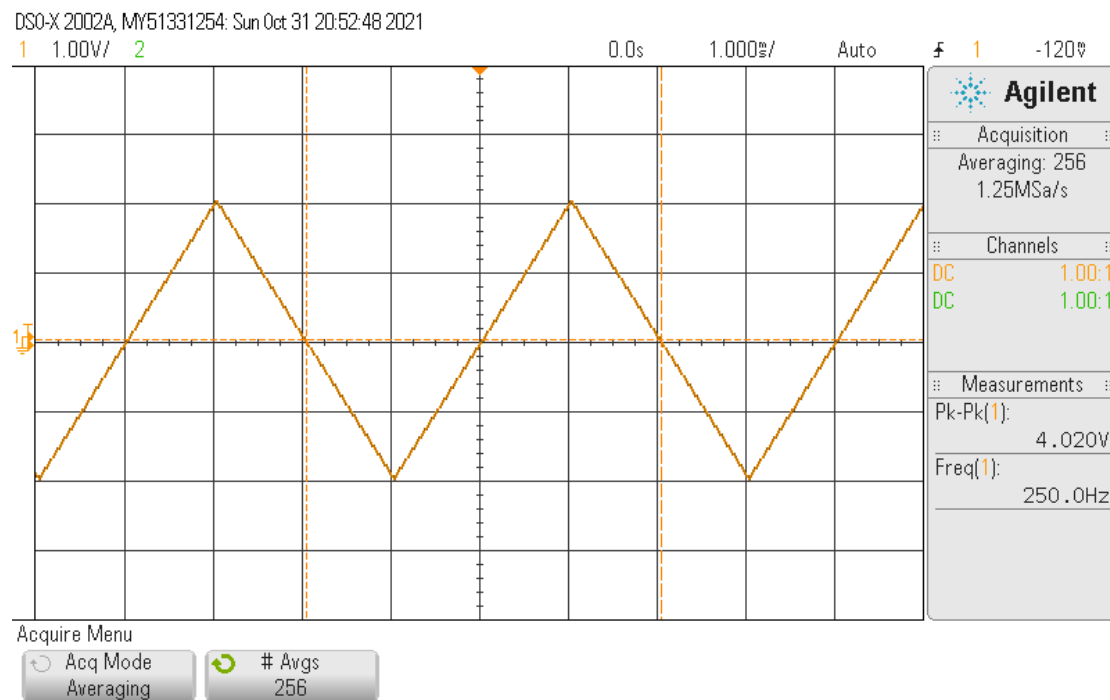
חישוב מתח שיא לשיא ותדירות של אות המשולש ע"י שימוש במידע מהמצביעים :

$$V_{p-p,ramp} = |\Delta Y| = 4.0625[V]$$

$$f_{ramp} = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta X} = \frac{1}{4.02 \cdot 10^{-3}} = 248.756[Hz]$$

טבלה מס' (6) : מדידת מתח שיא לשיא ותדירות של האות המשולש

Triangle (Meas)	
Vpp [V]	4.020 V
Freq [Hz]	250.0 Hz
Image Name	Scope6



איור 3 : ניסוי 1, גרף משולש, Meas

נערוך השוואה בין ערכי מתח שיא לשיא ותדירות של שלושת האותות כפי שהוגדרו במחולל, כפי שנמדדו באמצעות הסמנים וכפי שחושבו ע"י המשקף. נחשב את השגיאה היחסית בין נתונים אלה. תחילה נציג את אופן חישוב השגיאה היחסית:

$$(2) \eta = \frac{|measured\ value - literature\ value|}{literature\ value} \cdot 100\%$$

עבור מתח שיא לשיא:

טבלה מס' (7): השוואה בין מתח שיא לשיא כפי שהוגדר ע"י המחולל, כפי שנמדד בעזרת המצביעים, כפי שהמשקף מדד והצגת השגיאה היחסית בין נתונים אלו

סוג האות	הגדרת המחולל	מדידה באמצעות מצביעים	מדידת המשקף	שגיאה יחסית בין הגדרות המחולל למדידה באמצעות מצביעים	שגיאה יחסית בין הגדרות המחולל למדידת המשקף
	$V_{p-p}[V]$	$V_{p-p}[V]$	$V_{p-p}[V]$		
סינוס	4[V]	4.0625[V]	4.023[V]	1.56%	0.58%
מרובע	4[V]	4.0625[V]	4.033[V]	1.56%	0.83%
משולש	4[V]	4.0625[V]	4.020[V]	1.56%	0.5%

עבור התדירות:

טבלה מס' (8): השוואה בין תדירויות האותות כפי שהוגדר ע"י המחולל, כפי שנמדד בעזרת המצביעים, כפי שהמשקף מדד והצגת השגיאה היחסית בין נתונים אלו

סוג האות	הגדרת המחולל	מדידה באמצעות מצביעים	מדידת המשקף	שגיאה יחסית בין הגדרות המחולל למדידה באמצעות מצביעים	שגיאה יחסית בין הגדרות המחולל למדידת המשקף
	$f[Hz]$	$f[Hz]$	$f[Hz]$		
סינוס	500[Hz]	500[Hz]	500[Hz]	0%	0%
מרובע	500[Hz]	500.25[Hz]	500[Hz]	0.05%	0%
משולש	250[Hz]	248.756[Hz]	250[Hz]	0.5%	0%

2.1.4 מסקנות:

כפי שניתן לראות בטבלה מס' (7) וטבלה מס' (8), השימוש במשקף מאפשר מדידה מדויקת של מתח שיא לשיא ושל תדירות האותות שהגדרנו במחולל הן ע"י שימוש במצביעים והן ע"י מדידת המשקף של ערכים אלה. השגיאה המקסימלית שהופיע במדידות אלה היא 1.56%. כמו כן, ניתן להבחין כי המדידה של המשקף מדויקת יותר מהמדידה באמצעות המצביעים. ישנם מספר הסברים אפשריים להבדל זה – רגישות גלגלת המצביעים, יכולת הדיוק שלנו משתמשי המכשיר בהבחנת הנקודות הנכונות וכן העובדה שהנתון שחילצנו מהמשקף הינו מיצוע של 256 פלטים של האות לעומת חישוב על סמך נתון רגעי בודד.

2.2 ניסוי 2: מדידת הפרש הפאזה בין שני אותות סינוס בעזרת משקף

2.2.1 היפותזה:

בדו"ח המכין קיבלנו באופן תאורטי את הנוסחה הבאה עבור מתח הנגד :

$$|\tilde{V}_R| = \frac{V_0 R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 C^2}}} = \frac{4\pi f C R V_0}{\sqrt{4\pi^2 f^2 C^2 R^2 + 1}}$$

$$\lim_{f \rightarrow \infty} |\tilde{V}_R| = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{4\pi f C R V_0}{\sqrt{4\pi^2 f^2 C^2 R^2 + 1}} = \frac{4\pi C R V_0}{\sqrt{4\pi^2 C^2 R^2}} = V_0 = 2 [V]$$

בהתאם לכך, נצפה לראות באמצעות הניסוי כי ככל שהתדירות תעלה האמפליטודה של מתח הנגד תגדל ותשאף ל-2V כפי שראינו גם באיור 3 בדו"ח המכין.

כמו כן, עבור הפרש הפאזה בין מתח המקור למתח הנגד קיבלנו את הנוסחה הבאה :

$$\phi_R - \phi_{in} = -\arctan\left(\frac{-1}{2\pi f R C}\right)$$

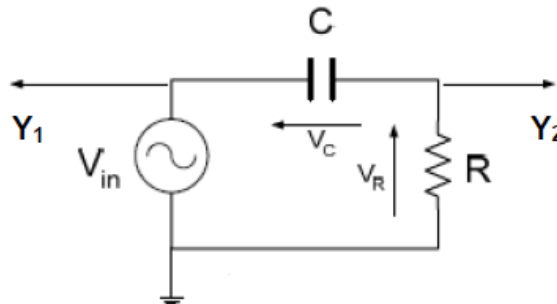
$$\lim_{f \rightarrow \infty} \phi_R - \phi_{in} = \lim_{f \rightarrow \infty} -\arctan\left(\frac{-1}{2\pi f R C}\right) = -\arctan(0) = 0$$

בהתאם לכך, נצפה לראות בניסוי שהפרש הפאזה תקטן ככל שנגדיל את התדירות ותשאף ל-0 rad.

2.2.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד: נגד, קבל, מחולל אותות, משקף, 3 כבלי BNC- בננה, כבל בננה-בננה.

מהלך הניסוי: בניסוי זה חיברנו מעגל חשמלי כפי שמוצג בתרשים הבא :



איור 4: מעגל חשמלי המורכב מקבל ונגד בניסוי 2

באיור ניתן לראות כי המעגל מורכב מנגד וקבל המחוברים בטור למקור מתח. בהתאם לכך בנינו את המעגל החשמלי המוצג באיור, וחיברנו אותו למחולל האותות והמשקף. הגדרנו את הקיבול להיות

$C = 0.03 \mu F$ ואת ההתנגדות של הנגד להיות $R = 3 k\Omega$. לאחר מכן חיברנו את המשקף כך שימדוד את מתח הנגד ומתח המקור. באמצעות מחולל האותות הגדרנו את מתח הכניסה הנדרש :

$V_{in} = 2 \sin(2\pi f t) V$ כלומר $V_{pp} = 4 V$. את תדר אות הכניסה שינינו בטווח $200 Hz$ –

$10 kHz$ ועבור כל תדר מדדנו את המתח שיא לשיא שעל הנגד, זמן המחזור של האות והפרש הזמנים בין שני נקודות מקסימום סמוכות של שני הגרפים של המתחים. את גדלים אלה מדדנו באמצעות סימון נקודות על גבי הגרפים (טבלה 9) ובאמצעות הנתונים שהמשקף נותן (טבלה 10). על מנת למדוד את המתח שיא לשיא של הנגד V_{pp} , הגדרנו שני קווים אופקיים – אחד על נקודת

המקסימום של המתח ואחד על נקודות המינימום של המתח כאשר המתח שיא לשיא הרצוי הינו ההפרש ביניהם (Δy). כמו כן, כדי למדוד את זמן המחזור של האותות (כתוצאה מכך שיש מקור סינוסי זמן המחזור של אות הכניסה ואות המתח על הנגד זהה), בחרנו את נקודות המקסימום של מתח המקור ומדדנו את הפרש הזמן ביניהם (Δx). את הפרש הפאזה בין המתחים מדדנו בשתי שיטות, הראשונה המוצגת בטבלה 10 הינה הפרש הזמן בין שני נקודות מקסימום סמוכות של שני המתחים באמצעותו נוכל לחשב את הפרש הפאזה על פי השיטה הראשונה המוצגת בפרוטוקול. בשיטה השנייה המוצגת בטבלה 11 בנינו באמצעות המשקף את עקומת לסיג'ו ממנה בדקנו מה ההפרש בין נקודות המקסימום של העקום ($b = 2C$) ומה ההפרש בין נקודות החיתוך עם ציר ה-Y (a). באמצעות נתונים אלה ושימוש בנוסחאות עבור עקום לסיג'ו נוכל לחשב את הפרש הפאזה בין הגרפים.

2.2.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות שביצענו מוצגות בטבלאות הבאות:

טבלה מס' (9) : תוצאות שהתקבלו באמצעות cursors

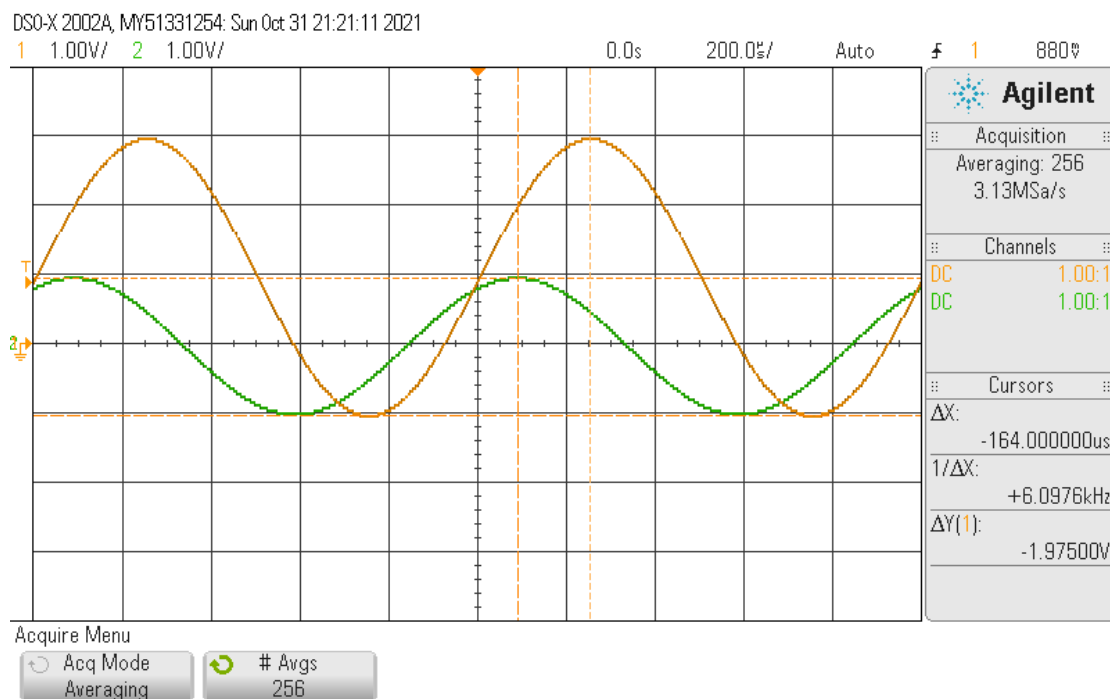
V (Cursors)			
Freq [Hz]	Vpp (Vr)	T זמן מחזור	t1 הפרש זמנים בין נקודות מקסימום סמוכות
200	-562.50 mV	5.04 ms	1.22 ms
500	-1.2250 V	-1.99 ms	-410 μs
1000	-1.9750 V	-992 μs	-164 μs
2000	-3.0375 V	-499 μs	-61.0 μs
5000	-3.7250 V	-199.5 μs	-12.0 μs
10000	3.8875 V	-99.6 μs	-2.40 μs

טבלה מס' (10) : תוצאות שהתקבלו באמצעות meas

V (Meas)			
Freq [Hz]	Vpp (Vr)	Freq (measured)	Phase [deg]
200	450 mV	200 Hz	-81.1
500	1.09 V	500 Hz	-74.0
1000	1.98 V	1 kHz	-60.3
2000	2.98 V	2 kHz	-41.0
5000	3.71 V	5 kHz	-20.0
10000	3.87 V	10 kHz	-10.0

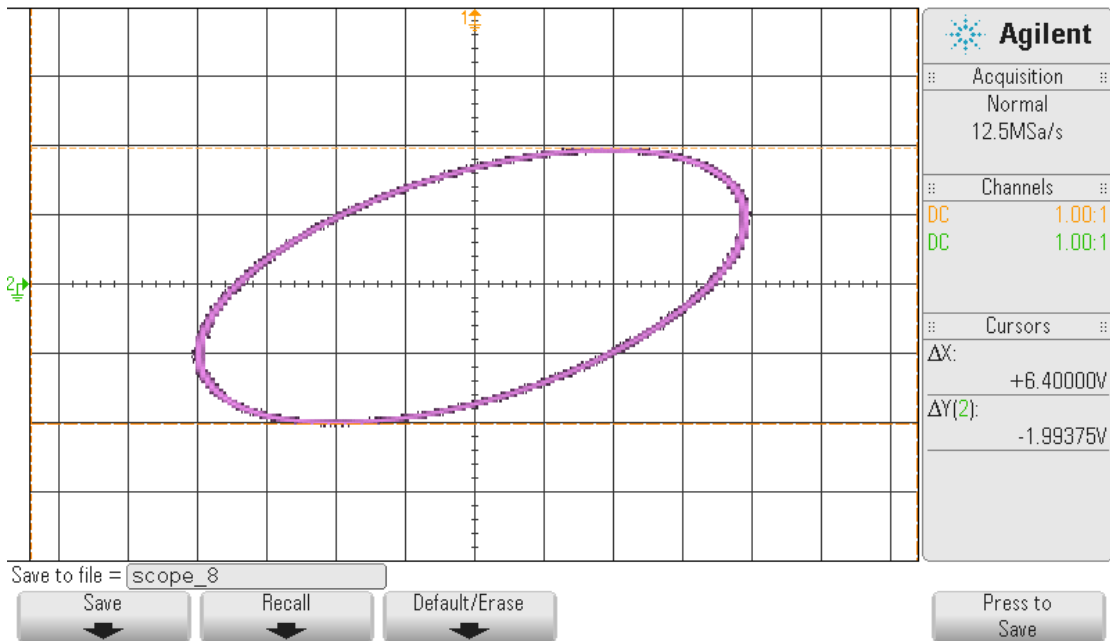
טבלה מס' (11) : תוצאות שהתקבלו מעקומת לסיגיו

Lissajous		
Freq [Hz]	a	b
200	-451.43 mV	-464.1 mV
500	-1.0458 V	-1.116 V
1000	-1.6875 V	-1.994 V
2000	-1.8625 V	-2.979 V
5000	-1.3560 V	-3.768 V
10000	-780.00 mV	-3.888 V



איור 5 : ניסוי 2, אותות המתח עבור תדירות 1kHz

1 500V/ 2 500V/



איור 6: ניסוי 2, עקומת לסיגיו עבור תדירות 1kHz

בעזרת תוצאות אלה נחשב את התדירות של האותות באמצעות נוסחה $f = \frac{1}{T}$ [Hz] (1) ולכן נשתמש בערכי זמן המחזור שמדדנו בטבלה 9 ואת השגיאה היחסית של התדירות מערכה האמיתי על פי הנוסחה: $\frac{\Delta x}{x}$ (2)

טבלה מס' (12): חישוב התדירות

V (Cursors)			
Freq [Hz]	T זמן מחזור	$f = \frac{1}{ T } \left[\frac{1}{\text{sec}} = \text{Hz} \right]$	שגיאה יחסית $\frac{\Delta f}{f} \cdot 100\%$
200	5.04 ms	$\frac{1}{5.04 \cdot 10^{-3} [\text{sec}]} = 198 \text{ Hz}$	$\frac{ 200 - 198 }{200} \cdot 100\% = 1.00\%$
500	-1.99 ms	$\frac{1}{1.99 \cdot 10^{-3} [\text{sec}]} = 503 \text{ Hz}$	$\frac{ 500 - 503 }{500} \cdot 100\% = 0.60\%$
1000	-992 μs	$\frac{1}{992 \cdot 10^{-6} [\text{sec}]} = 1010 \text{ Hz}$	$\frac{ 1000 - 1010 }{1000} \cdot 100\% = 1.00\%$
2000	-499 μs	$\frac{1}{499 \cdot 10^{-6} [\text{sec}]} = 2200 \text{ Hz}$	$\frac{ 2000 - 2200 }{2000} \cdot 100\% = 10.0\%$
5000	-199.5 μs	$\frac{1}{199 \cdot 10^{-6} [\text{sec}]} = 5013 \text{ Hz}$	$\frac{ 5000 - 5013 }{5000} \cdot 100\% = 0.260\%$
10000	-99.6 μs	$\frac{1}{99.6 \cdot 10^{-6} [\text{sec}]} = 10040 \text{ Hz}$	$\frac{ 10000 - 10040 }{10000} \cdot 100\% = 0.100\%$

ממוצע השגיאה היחסית בשיטה זו :

$$(3) \frac{\sum_{i=1}^6 x}{6} = \frac{1.00 + 0.60 + 1.00 + 10.0 + 0.260 + 0.100}{6} = 2.16\%$$

בדוח המכין קיבלנו את התוצאות הבאות עבור הפרשי הפאזה :
טבלה מס' (13) : הפרשי הפאזה שקיבלנו בדו"ח המכין

Freq [Hz]	הפרש פאזה $\phi_R - \phi_{in} [rad]$	$\alpha^\circ = \frac{\alpha_{rad} \cdot 180}{\pi}$
200	1.4582	83.549
500	1.2952	74.210
1000	1.0561	60.510
2000	0.7240	41.482
5000	0.3399	19.475
10000	0.1750	10.027

נחשב את הפרשי הפאזה באמצעות שתי השיטות :
בשיטה הראשונה נשתמש בנוסחה $\varphi = -\omega t_1$ (4) ובתוצאות שקיבלנו בטבלה 9 . בנוסף נחשב את שגיאה היחסית בהתאם לתוצאות שהתקבלו בדו"ח המכין.

טבלה מס' (14) : חישוב הפרשי הפאזה בשיטה הראשונה

Freq [Hz]	t_1 הפרש זמנים בין נקודות מקסימום סמוכות	הפרש הפאזה $\varphi = -\omega \frac{[rad]}{[sec]} \cdot t_1 [sec] = -2\pi \cdot f \cdot t_1 [rad]$ $\varphi [rad] \cdot \frac{180}{\pi} = \varphi^\circ$	שגיאה יחסית $\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \cdot 100\%$
200	1.22 ms	$-2\pi \cdot 200 \cdot 1.22 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{180}{\pi} = -87.8^\circ$	$\frac{ 83.549 - 87.8 }{83.549} \cdot 100\% = 5.09\%$
500	-410 μs	$-2\pi \cdot 500 \cdot -410 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{180}{\pi} = 73.8^\circ$	$\frac{ 74.210 - 73.8 }{74.210} \cdot 100\% = 0.552\%$
1000	-164 μs	$-2\pi \cdot 1000 \cdot -164 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{180}{\pi} = 59.0^\circ$	$\frac{ 60.510 - 59.0 }{60.510} \cdot 100\% = 2.50\%$
2000	-61.0 μs	$-2\pi \cdot 2000 \cdot -61.0 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{180}{\pi} = 43.9^\circ$	$\frac{ 41.482 - 43.9 }{41.482} \cdot 100\% = 5.83\%$
5000	-12.0 μs	$-2\pi \cdot 5000 \cdot -12.0 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{180}{\pi} = 21.6^\circ$	$\frac{ 19.475 - 21.6 }{19.475} \cdot 100\% = 10.9\%$
10000	-2.40 μs	$-2\pi \cdot 10000 \cdot -2.40 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{180}{\pi} = 8.64^\circ$	$\frac{ 10.027 - 8.64 }{10.027} \cdot 100\% = 13.8\%$

ממוצע השגיאה היחסית בשיטה זו :

$$\frac{\sum_{i=1}^6 x}{6} = \frac{5.09 + 0.552 + 2.50 + 5.83 + 10.9 + 13.8}{6} = 6.45\%$$

בשיטה השנייה נשתמש בעקום ליסגיו לפיו: $b = 2C$, $a = 2C \sin(\phi)$ (5) ובתוצאות שקיבלנו

בטבלה 11:

טבלה מס' (15): חישוב הפרשי הפאזה בשיטה השנייה

Lissajous				
Freq [Hz]	a	b	$\varphi = \arcsin\left(\frac{a}{2C}\right)$	שגיאה יחסית $\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \cdot 100\%$
200	-451.43 mV	-464.1 mV	$\arcsin\left(\frac{-451.43 \cdot 10^{-3}}{-464.1 \cdot 10^{-3}}\right) = 76.58^\circ$	$\frac{ 83.549 - 76.58 }{83.549} \cdot 100\% = 8.34\%$
500	-1.0458 V	-1.116 V	$\arcsin\left(\frac{-1.0458}{-1.116}\right) = 69.57^\circ$	$\frac{ 74.210 - 69.57 }{74.210} \cdot 100\% = 6.25\%$
1000	-1.6875 V	-1.994 V	$\arcsin\left(\frac{-1.6875}{-1.994}\right) = 57.81^\circ$	$\frac{ 60.510 - 57.81 }{60.510} \cdot 100\% = 4.46\%$
2000	-1.8625 V	-2.979 V	$\arcsin\left(\frac{-1.8625}{-2.979}\right) = 38.70^\circ$	$\frac{ 41.482 - 38.70 }{41.482} \cdot 100\% = 6.71\%$
5000	-1.3560 V	-3.768 V	$\arcsin\left(\frac{-1.3560}{-3.768}\right) = 21.09^\circ$	$\frac{ 19.475 - 21.09 }{19.475} \cdot 100\% = 8.29\%$
10000	-780.00 mV	-3.888 V	$\arcsin\left(\frac{-780.00 \cdot 10^{-3}}{-3.888}\right) = 11.57^\circ$	$\frac{ 10.027 - 11.57 }{10.027} \cdot 100\% = 15.4\%$

ממוצע השגיאה היחסית בשיטה זו:

$$\frac{\sum_{i=1}^6 x}{6} = \frac{8.34 + 6.25 + 4.46 + 6.71 + 8.29 + 15.4}{6} = 8.24\%$$

בנוסף, נחשב את השגיאה היחסית בין הפרש הפאזה הנמדדה ב-meas לבין הערכים התאורטיים

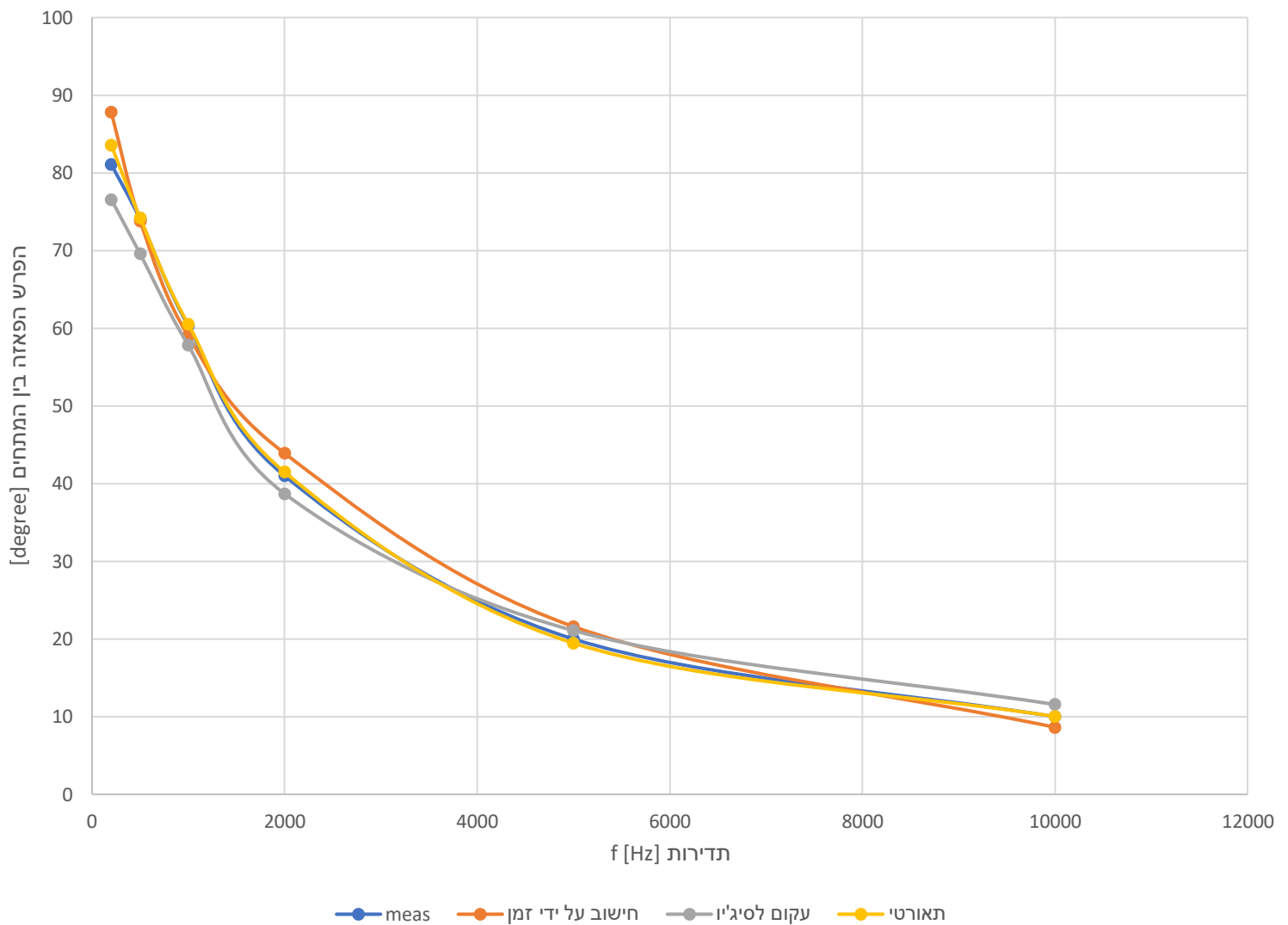
מהדו"ח המכין:

טבלה מס' (16): חישוב השגיאה היחסית של הפרש הפאזה ב-meas לעומת הדו"ח המכין

Freq [Hz]	φ_{meas}	שגיאה יחסית $\frac{ \varphi_{\text{תאורטי}} - \varphi_{meas} }{\varphi_{\text{תאורטי}}} \cdot 100\%$
200	-81.1	$\frac{ 83.549 - 81.1 }{83.549} \cdot 100\% = 2.93\%$
500	-74.0	$\frac{ 74.210 - 74.0 }{74.210} \cdot 100\% = 0.283\%$
1000	-60.3	$\frac{ 60.510 - 60.3 }{60.510} \cdot 100\% = 0.347\%$
2000	-41.0	$\frac{ 41.482 - 41.0 }{41.482} \cdot 100\% = 1.16\%$
5000	-20.0	$\frac{ 19.475 - 20.0 }{19.475} \cdot 100\% = 2.70\%$
10000	-10.0	$\frac{ 10.027 - 10.0 }{10.027} \cdot 100\% = 0.269\%$

ממוצע השגיאה היחסית בשיטה זו:

$$\frac{\sum_{i=1}^6 x}{6} = \frac{2.93 + 0.283 + 0.347 + 1.16 + 2.70 + 0.269}{6} = 1.28\%$$

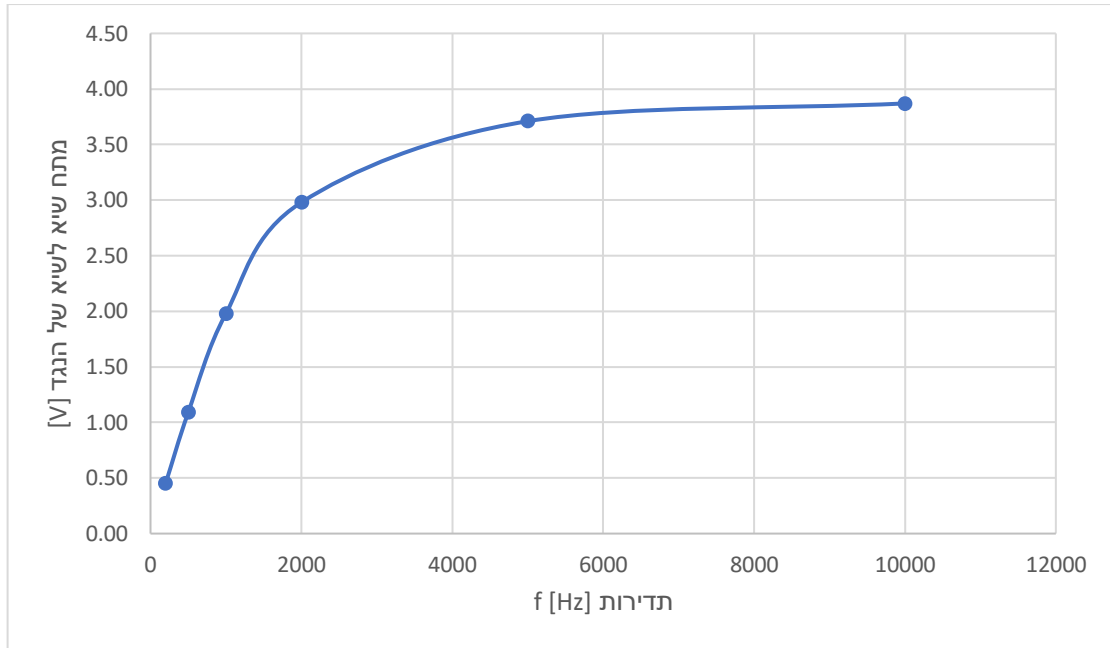


איור 7: פרשי הפאזה כתלות בתדירות

נחשב את השגיאה היחסית בין המתח שיא-לשיא הנמדד לבין המחושב meas :

טבלה מס' (17) : חישוב השגיאה היחסית של המתח שיא לשיא על הגד

Freq [Hz]	Vpp (Vr) - meas	Vpp (Vr) - cursors	שגיאה יחסית $\frac{ V_{pp,meas} - V_{pp,cursors} }{V_{pp,meas}} \cdot 100\%$
200	450 mV	-562.50 mV	$\frac{ 450 \cdot 10^{-3} - 562.5 \cdot 10^{-3} }{450 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 25\%$
500	1.09 V	-1.2250 V	$\frac{ 1.09 - 1.2250 }{1.09} \cdot 100\% = 12.4\%$
1000	1.98 V	-1.9750 V	$\frac{ 1.98 - 1.9750 }{1.98} \cdot 100\% = 0.253\%$
2000	2.98 V	-3.0375 V	$\frac{ 2.98 - 3.0375 }{2.98} \cdot 100\% = 1.93\%$
5000	3.71 V	-3.7250 V	$\frac{ 3.71 - 3.7250 }{3.71} \cdot 100\% = 0.404\%$
10000	3.87 V	3.8875 V	$\frac{ 3.87 - 3.8875 }{3.87} \cdot 100\% = 0.452\%$



איור 8 : מתח שיא לשיא של הנגד כתלות בתדירות

כמו כן, ממוצע השגיאה בערכי המתח שיא-לשיא שנמדדו הינו :

$$\frac{\sum_{i=1}^6 x}{6} = \frac{25 + 12.4 + 0.253 + 1.93 + 0.404 + 0.452}{6} = 6.74\%$$

2.2.4 מסקנות:

בהשוואה בין התדירות שקיבלנו בעזרת החישובים לבין התדירות שמחולל האותות מפק, קיבלנו שגיאה של 2.16%. מחישובים אלה ניתן לראות כי קיים אחוז נמוך של שגיאה בתוצאות שבוצעו על ידי מדידת זמן המחזור ובאמצעות חישוב התדירות. כתוצאה מכך ניתן להסיק כי התוצאות שקיבלנו בניסוי זה מדויקות ותואמות את הערכים שציפינו.

בנוסף, כתוצאה מהחישובים שבוצעו בטבלאות 14,15 ניתן לראות כי השיטה הראשונה בה מדדנו את הפרש הזמנים בין נקודות מקסימום סמוכות של שני המתחים ובאמצעות מדידות אלה חישבנו את הפרשי הפאזה, הינה שיטה מדויקת ואמינה יותר ביחס לשיטת עקומי לסיגיו מפני שטווח השגיאה של נמוך יותר וממוצעו עומד על 6.45% לעומת 8.24% בשיטה השנייה. ניתן לשער כי קיבלנו ששיטת עקומת לסיגיו פחות מדויקת מהשיטה הראשונה מפני שבשיטה זו צריך לבחור ידנית את נקודות המקסימום והחיתוך עם ציר ה־y והשינוי בעקומת האליפסה פחות חד מאשר בסינוס סביב נקודת המקסימום ולכן יותר קשה לבחור אותו במדויק. כמו כן, כיוון שקיים הפרש קטן בין ממוצעי השגיאות ניתן לומר כי שתי השיטות מדויקות ובעלות טווח נמוך (פחות מ-10% שגיאה) ולכן אין העדפה של שיטה אחת על אחרת.

אם נשווה את שיטות אלה לשיטה בה קיבלנו את הפרשי הפאזה באמצעות פונקציית *meas*, ניתן לראות כי אחוז השגיאה היחסית בשיטה זו קטן משמעותית משתי השיטות האחרות ולכן ניתן להסיק כי שיטה זו הינה המדויקת ביותר ובה נקבל את הערכים הקרובים ביותר לערכים התאורטיים.

מסקנה זו תואמת לתוצאות שקיבלנו באיור 7 בו מוצג הפרש הפאזה בין המתחים כאשר הגרף הצהוב הינו הערך התאורטי. מהגרף עולה כי באמצעות meas קיבלנו את הערכים הקרובים ביותר לערכים התאורטיים, בדומה לתוצאה שקיבלנו מחישובי השגיאה היחסית. בנוסף, ניתן לראות כי קיימת מגמת ירידה של הפרשי המתחים ככל שהתדירות עולה בהתאם לנוסחה התאורטית שקיבלנו בדו"ח המכין. כמו כן, ציפינו לראות כי הפרשי המתחים ישאפו ל0 ולא ניתן להסיק זאת מגרף זה באופן וודאי. התדירות הגבוהה ביותר שנמדדה בניסוי הינה 10000Hz ובתדירות זו קיבלנו הפרש פאזה של 10° שזה ההפרש הנמוך ביותר שמדדנו בניסוי. כיוון שערך זה רחוק מ0 ניתן לשער שזו הסיבה שלא רואים באופן ברור בגרף את השאיפה ל0 ולכן על מנת לראות זאת בגרף ניתן לחזור על הניסוי בתדירויות גבוהות יותר.

כמו כן, באיור 8 בו מוצג המתח שיא לשיא של הנגד כתלות בתדירות, ניתן לראות כי ככל שהתדירות עולה כך גם המתח שיא לשיא עולה ושואף ל4. תוצאה זו תואמת להיפותזה ולתוצאות שראינו בדוח המכין מכיוון שמשרעת הנגד קשורה למתח שיא לשיא באמצעות הקשר הבא:

$$V_{pp} = 2V_{R.amp} \quad (8)$$

כלומר משרעת המתח על הנגד בהתאם לגרף זה שואפת ל2 ככל שהתדירות גדלה ותוצאה זו תואמת לחישוב התאורטי. ערך השגיאה היחסית שהתקבלה ממדידות אלה הינה 6.74% ומערך זה ניתן גם לראות כי השגיאה בתוצאות הינה קטנה ולכן הערכים מהימנים.

2.3 ניסוי 3 : הכרת רב מודד ספרתי- מדידת מתח

2.3.1 היפותזה:

בניסוי זה נמדוד מתח של מספר אותות שונים באמצעות משקף ורב מודד ונערוך השוואה בין המדידות. נצפה כי רב מודד שתפקידו העקרי הוא למדוד ערכים כמו מתח התנגדות וכו' לספק תוצאות יותר מדויקות ממשקף, שתפקידו העקרי להציג אות נכנס על גבי צג.

2.3.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד : מחולל אותות, משקף, רב מודד ספרתי, מפצל BNC, שני כבלי BNC-BNC.
מהלך הניסוי : חיברנו את מפצל ה- BNC לשקע ה- output של מחולל האותות, למפצל חיברנו שני כבלי BNC-BNC כאשר את הקצה של כבל אחד חיברנו לשקע המבוא של המשקף ואת הקצה של הכבל השני חיברנו לשקע המבוא של רב המודד הספרתי. הגדרנו במחולל האותות אות סינוס כפי שמופיע באיור 3.1 בפרוטוקול הניסוי ולחצנו על כפתור ה- output. לחצנו במשקף על $\leftarrow \text{meas} \leftarrow \text{acquire} \leftarrow$ בתפריט זה הגדרנו את שלושת המדידות הרצויות – Average – N cycles, DC-RMS – N cycles, AC-RMS – N cycles. ברב מודד לחצנו על DCV כדי לקבל את הממוצע של האות ועל ACV כדי לקבל את ערך ה- RMS של חלק ה- AC של האות.

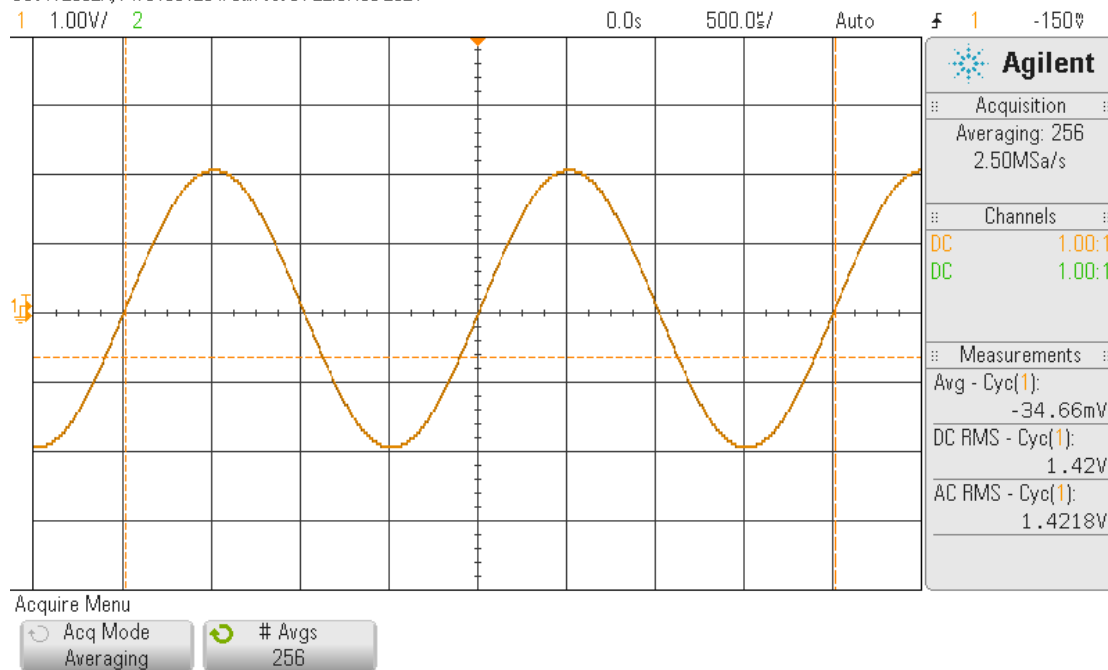
2.3.3 תוצאות:

בעזרת הקשר הבא חישבנו את ערך ה- DC RMS שמתקבל מהמדידות של הרב מודד :

$$(6) DC_{RMS} = \sqrt{AC_{RMS}^2 + V_{avg}^2}$$

טבלה מס' (18) – ערכי הממוצע, AC_{RMS} ו- DC_{RMS} כפי שנמדדו ע"י המשקף והרב-מודד עבור אות סינוס כפי שמופיע באיור 3.1 בפרוטוקול

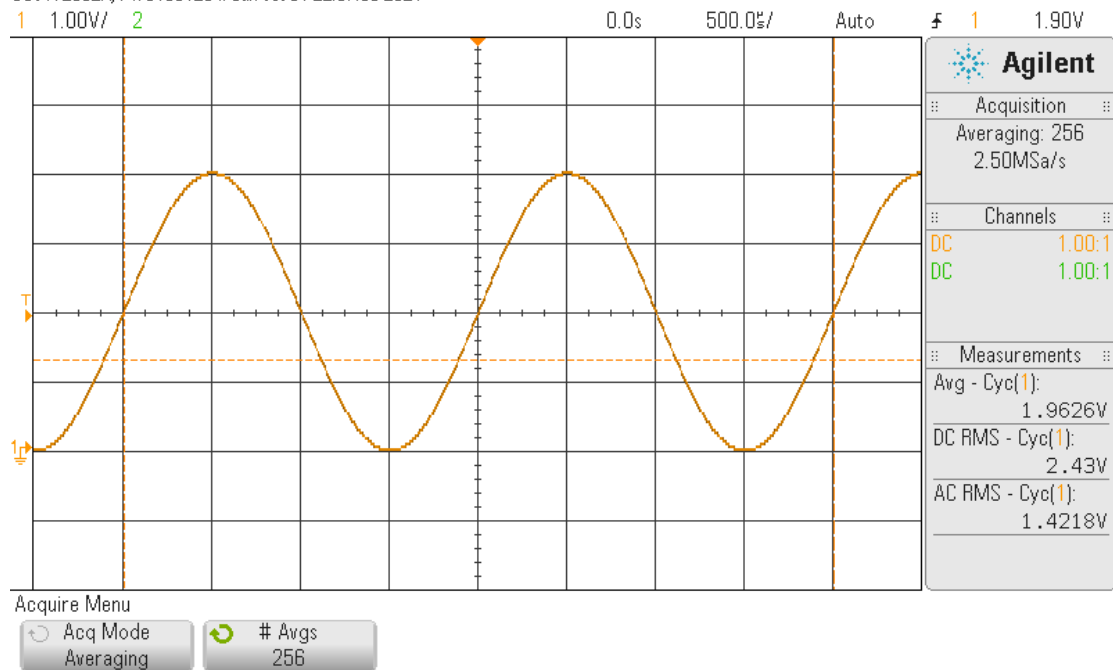
Sinus (3.1)		
סקופ	Average - N cycles	-34.66 mV
	DC RMS - N cycles	1.42 V
	AC RMS - N cycles	1.4216 V
רב- מודד	DCV	-0.00118 V
	לחשב בבית	1.41433V
	ACV	1.41433 V
Image Name	Scope20	



איור 9: ניסוי 3, אות סינוסי 3.1

טבלה מס' (19) – ערכי הממוצע, AC_{RMS} ו- DC_{RMS} כפי שנמדדו ע"י המשקף והרב-מודד עבור אות סינוס כפי שמופיע באיור 3.2 בפרוטוקול

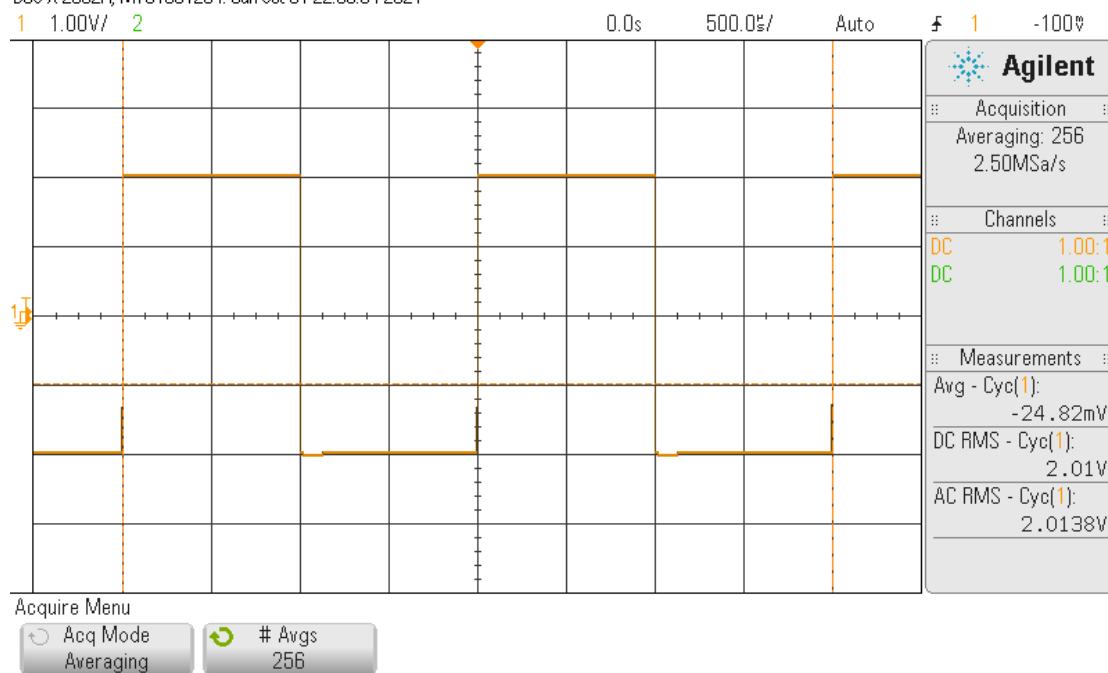
Sinus (3.2)		
סקופ	Average - N cycles	1.9651V
	DC RMS - N cycles	2.43 V
	AC RMS - N cycles	1.422 V
רב- מודד	DCV	1.99694 V
	לחשב בבית	2.447V
	ACV	1.41440 V
Image Name	Scope21	



איור 10 : ניסוי 3, אות סינוסי 3.2

טבלה מס' (20) – ערכי הממוצע, AC_{RMS} ו- DC_{RMS} כפי שנמדדו ע"י המשקף והרב-מודד עבור האות המרובע כפי שמופיע באיור 3.3 בפרוטוקול

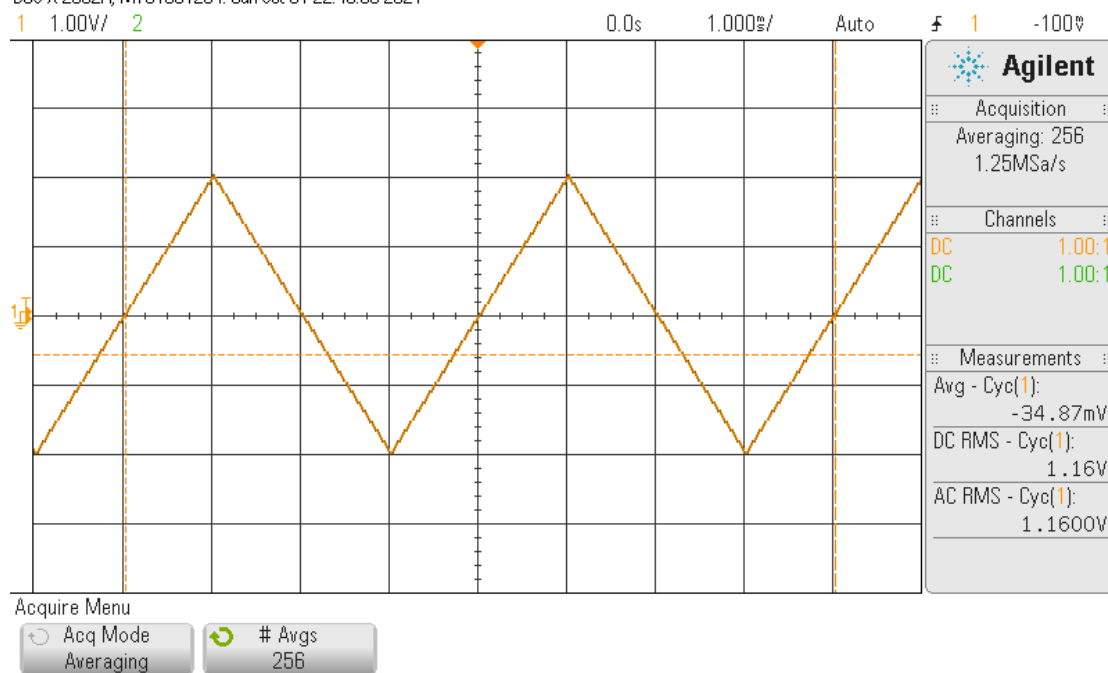
Square (3.3)		
סקופ	Average - N cycles	-27.34 mV
	DC RMS - N cycles	2.01 V
	AC RMS - N cycles	2.0142 V
רב- מודד	DCV	0.00466 V
	לחשב בבית	2.001V
	ACV	2.001 V
Image Name	Scope 22	



איור 11 : ניסוי 3, אות ריבועי 3.3

טבלה מס' (21) – ערכי הממוצע, AC_{RMS} ו- DC_{RMS} כפי שנמדדו ע"י המשקף והרב-מודד עבור האות המשולש כפי שמופיע באיור 3.4 בפרוטוקול

Triangle (3.4)		
סקופ	Average - N cycles	-34.87 mV
	DC RMS - N cycles	1.16 V
	AC RMS - N cycles	1.16 V
רב- מודד	DCV	-0.00105 V
	לחשב בבית	1.1545
	ACV	1.154525 V
Image Name	Scope 23	



איור 12: ניסוי 3, אות משולש 3.4

כעת נערוך השוואה בין ערכים אלה לערכים התאורטיים שהצגנו בדו"ח המכין:

טבלה מס' (22) – השוואה בין ערכי המתח הממוצע של האותות כפי שנמדדו ע"י המשקף והרב-מודד לבין הערכים

התאורטיים עבור ארבעת האותות שהוצגו באיורים 3.1-3.4 בפרוטוקול הניסוי

סוג האות	ערך תאורטי V_{avg} [V]	מדידת המשקף V_{avg} [V]	מדידת רב מודד V_{avg} [V]	יחסית בין הערך התאורטי לבין מדידת המשקף	יחסית בין הערך התאורטי לבין מדידת רב מודד
סינוס (3.1)	0	$-34.66 \cdot 10^{-3}$	$-1.18 \cdot 10^{-3}$	1.73%	0.06%
סינוס (3.2)	2	1.9651	1.99694	1.75%	0.15%
מרובע (3.3)	0	$-27.34 \cdot 10^{-3}$	$4.66 \cdot 10^{-3}$	1.37%	0.23%
משולש (3.4)	0	$-34.87 \cdot 10^{-3}$	$-1.05 \cdot 10^{-3}$	1.74%	0.05%

טבלה מס' (23) – השוואה בין ערכי המתח האפקטיבי של האותות כפי שנמדדו ע"י המשקף והרב-מודד לבין הערכים התאורטיים עבור ארבעת האותות שהוצגו באיורים 3.1-3.4 בפרוטוקול הניסוי

סוג האות	ערך תאורטי $DC_{RMS}[V]$	מדידת המשקף $DC_{RMS}[V]$	מדידת רב מודד $DC_{RMS}[V]$	שגיאה יחסית בין הערך התאורטי לבין מדידת המשקף	שגיאה יחסית בין הערך התאורטי לבין מדידת רב מודד
סינוס (3.1)	$\sqrt{2} = 1.414$	1.42	1.414	0.4%	0%
סינוס (3.2)	$\sqrt{6} = 2.449$	2.43	2.447	0.79%	0.1%
מרובע (3.3)	2	2.01	2.001	0.5%	0.05%
משולש (3.4)	$\frac{2}{\sqrt{3}} = 1.155$	1.16	1.1545	0.43%	0.04%

2.3.4 מסקנות:

כפי שניתן לראות מטבלאות מס' (11) ו- (12), שני המכשירים מאפשרים מדידה מדויקת של ערכי המתח הממוצע והמתח האפקטיבי של האותות. כמו כן, תוצאות מדידת הרב מודד הינן מדויקות יותר ממדידות המשקף בכל המדידות – על פי כן ניתן להסיק כי המכשיר מאפשר מדידה מדויקת יותר של ערכים אלה ואין זו תוצאה מקרית שיכולה לנבוע משימוש במכשירים במס' מועט מדי של פעמים. תוצאה זו תואמת לציפיות שלנו, הרי שתפקידו העקרי של הרב מודד הינו למדוד ערכים כדוגמת מתח, בעוד תפקידו העקרי של המשקף הוא להציג אותות על גבי מסך.

2.4 ניסוי 4: הכרת רב מודד ספרתי- מדידת התנגדות

2.4.1 היפותזה:

בניסוי זה נמדוד התנגדויות שונות באמצעות הרב מודד. נצפה שהערכים שנקבל יהיו קרובים לערך המקורי של הרכיבים אך לא שווים אליהם מכיוון שיש למכשירי המדידה התנגדויות פנימיות והם אינם אידיאליים. כמו כן, המשקף הינו רכיב שמטרתו להציג מתחים חשמליים על גבי צג. לשם כך, צריכה להיות השפעה מזערית של תכונות המשקף על המתח החשמלי, כלומר שהספק לא יתבזבז בתוכו ולכן נצפה שהתנגדות המשקף תהיה גדולה מאוד ביחס לערכים שהוא מודד ובמצב זה יזרום אל המשקף זרם נמוך מאוד מהמעגל אליו הוא מחובר. [1] בנוסף לכך, בעת מדידת ההתנגדות של קיצור הדקי המדידה נצפה להתנגדות מאוד נמוכה מכיוון שבמצב של קצר הזרם שואף לאינסוף (במצב אידיאלי). [1]

2.4.2 מתודולוגיה:

מכשור וציוד: נגד, קבל, משקף, רב מודד, כבל BNC-BNC, כבל BNC-BNC.
מהלך הניסוי: בניסוי זה הפעלנו את רב המודד והגדרנו מדידת התנגדות. ראשית חיברנו את כבל הBNC – בננה לרב מודד וקיצרנו את הדקי המדידה על ידי חיבורם אחד לשני של שתי הבננות בכבל ורשמנו את התוצאה שהתקבלה על המסך. לאחר מכן חיברנו את הרב מודד לנגד, הגדרנו את התנגדות הנגד להיות $60k\Omega$ ורשמנו את התוצאה שרב המודד הציג. חזרנו על מדידות אלה עבור קבל בעל קיבול של $10 \mu F$. במדידה האחרונה חיברנו את רב המודד לכניסה הראשונה של המשקף באמצעות כבל BNC-BNC ורשמנו את התנגדותה.

2.4.3 תוצאות:

התוצאות שהתקבלו מהמדידות שביצענו מוצגות בטבלה הבאה:

טבלה מס' (24): ההתנגדויות שנמדדו בניסוי 4

קיצור הדקי המדידה	
R	0.0678Ω
נגד של $60k\Omega$	
R	60.4680Ω
קבל של $10 \mu F$	
R	$0.286 M \Omega \rightarrow \text{Overload}$
התנגדות הכניסה של המשקף	
R	$1.00031 M \Omega$

בטבלה זו ניתן לראות את התוצאות שמדדנו בניסוי זה.

נחשב את השגיאה היחסית בהתנגדות הנגד:

$$\frac{|60 - 60.4680|}{60} \cdot 100\% = 0.78\%$$

על פי היצרן התנגדותו הפנימית של המשקף הינה $1 M\Omega$ [2] נחשב את השגיאה היחסית מהערך הנמדד :

$$\frac{|1 - 1.00031|}{1} \cdot 100\% = 0.031\%$$

2.4.4 מסקנות:

כאשר קיצרנו את הדקי המדידה קיבלנו כי ההתנגדות הינה 0.0678Ω , התנגדות נמוכה זו תואמת לכך שבעת קצר ההתנגדות תהיה קטנה מאוד (במצב אידיאלי תתאפס) כפי שהסברנו בהיפותזה. כמו כן, ניתן לראות שהתנגדות הכניסה של המשקף גדולה מאוד ותוצאה זו תואמת לכך שעבור מכשיר המודד מתח נרצה התנגדות מקסימלית למניעת השפעה על המתח הנמדד. בנוסף, כאשר חיברנו את רב המודד אל נגד בעל התנגדות של $60 k\Omega$ הוא מדד התנגדות $60.4680 k\Omega$. במקרה זה קיבלנו שגיאה של 0.78% מערך ההתנגדות האמיתי וזוהי שגיאה יחסית קטנה מאוד, לכן ניתן להסיק כי רב המודד הינו מדויק ונותן תוצאות התואמות לתכונות הרכיבים. כמו כן, במדידת ההתנגדות הפנימית של המשקף קיבלנו שגיאה של 0.031% , אחוז שגיאה נמוך זה מציג כי הערך הנמדד הינו מדויק ותואם לערכו התאורטי. השגיאה בין הערך הנמדד למקור נובעת כתוצאה מכך שהמכשירים בהם אנו משתמשים אינם אידיאליים, התנגדות המכשיר איננה יכולה להיות אינסופית אלא גדולה מאוד ביחס לרכיב, ולכן התוצאות שמתקבלות תמיד יהיו שונות במקצת מהערכים התאורטיים. ניתן לראות כי כאשר מדדנו התנגדות של קבל בעל קיבול נמוך מאוד, קיבלנו ערכי התנגדות גבוהים שעלו עד שעל הצג היה רשום over load. נסתכל על הנוסחאות הבאות עבור מעבר לפאזורים בהשוואה בין נגד לקבל :

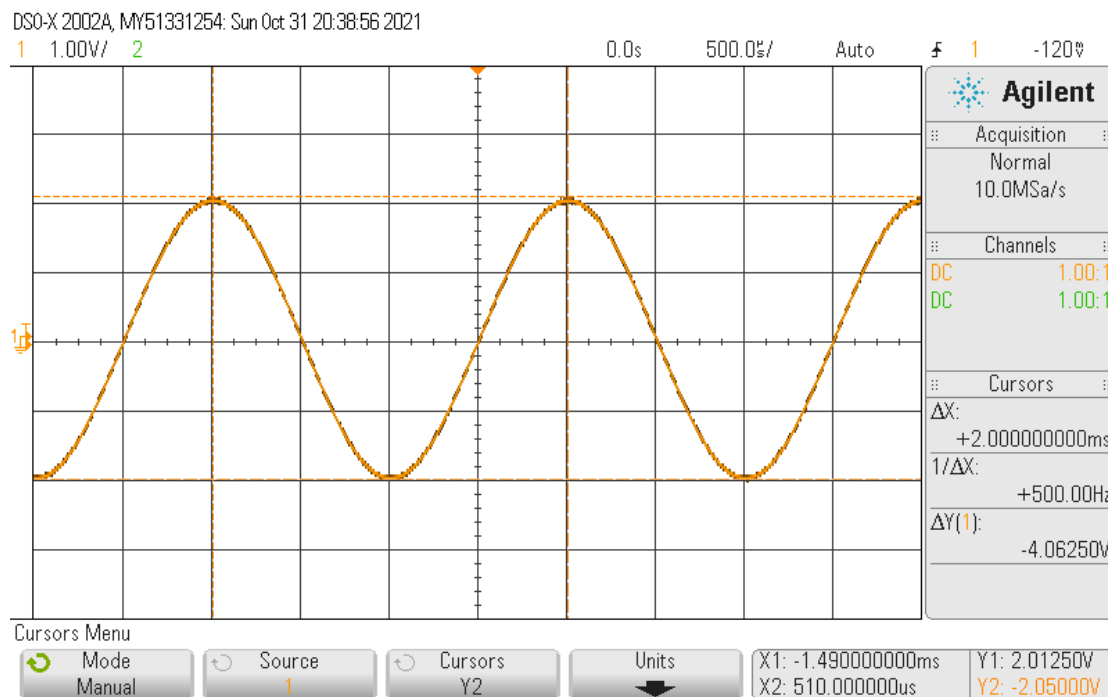
$$(7) Z_c = \frac{1}{j\omega C} = \frac{\tilde{V}_c}{\tilde{I}_c} \quad Z_c \propto \frac{1}{C}$$

$$(8) Z_R = R = \frac{\tilde{V}_R}{\tilde{I}_R} \quad Z_R \propto R$$

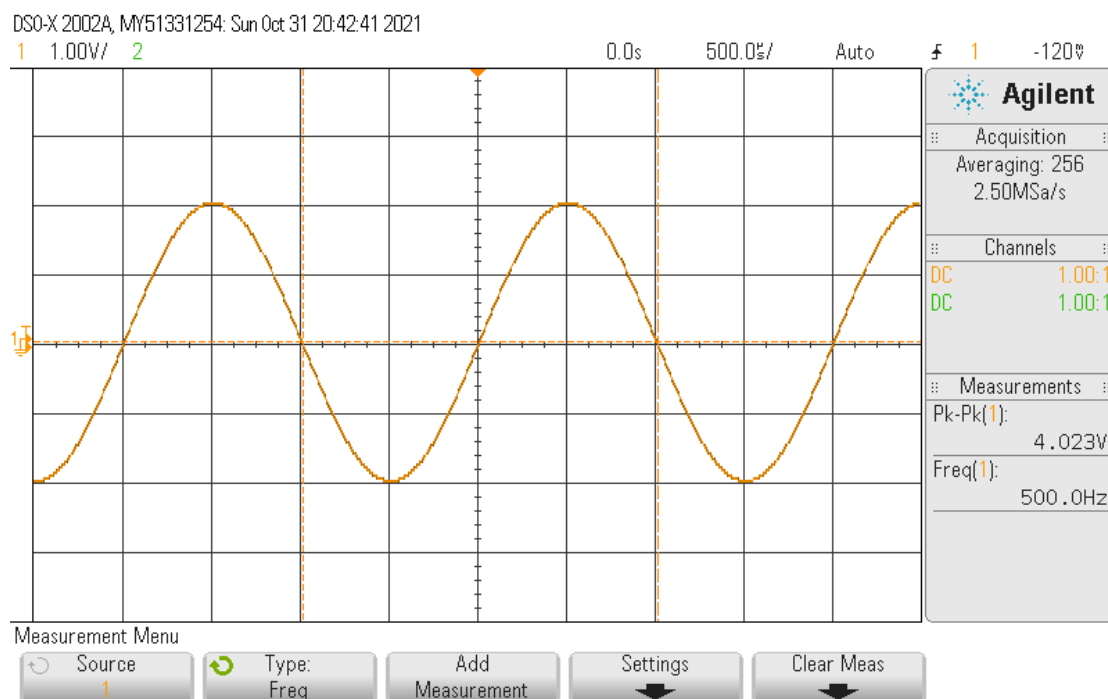
מנוסחאות אלו ניתן לראות כי קיים יחס הפוך בין הקיבול לבין המתח שעל הקבל, ויחס ישר בין התנגדות לבין המתח של הנגד. כאשר נרצה למדוד "התנגדות" של קבל בעל קיבול נמוך מאוד, כתוצאה מהשוני בין היחסים נקבל התנגדות גבוהה מאוד כפי שראינו בניסוי זה.

במעבדה זו למדנו על שימוש בסיסי במכשירים בהם נשתמש בקורס זה - התנסינו בחיבור מעגלים חשמליים, מדידת ערכי התנגדות, תדירות ומתח, חישוב הפרשי פאזה בין גרפים שונים, רכישת תמונות המוצגות על גבי המשקף ושימוש בכבלים הנכונים. בנוסף, מהניסוי הראשון הסקנו כי כאשר נרצה למדוד ערכים מתוך הגרפים המתקבלים על גבי המשקף ישנה עדיפות למדידה באמצעות פונקציית meas מאשר מדידה ידנית. כמו כן, תוצאה דומה התקבלה בניסוי השני בהשוואת שיטות שונות למדידת הפרש הפאזה בין הגרפים. בניסוי השלישי למדנו שרוב המודד מספק מדידות של ערכי מתח מדויקים יותר לעומת המשקף ולכן נעדיף להשתמש בו למדידת מתח בניסויים הבאים במעבדה. לאחר מכן, בניסוי הרביעי ראינו כי בהתאם לתאוריה התנגדות פנימית של מכשירים למדידת מתח צריכה לשאוף להיות אינסופית על מנת למנוע התערבות והשפעה של תכונות מכשיר המדידה על המתח המוצג. לעומת התאוריה תוצאות מדויקות אינן יכולות להתקבל כיוון שהמכשירים אינם אידיאליים ובעלי שגיאה מסוימת אותה חישבנו.

- [1] C. K. Alexander, "Fundamentals of electric circuits." McGraw-Hill, Boston [Mass, 2000.
- [2] "Agilent InfiniiVision 2000 X-Series Oscilloscopes User's Guide," p. 278, 2000.

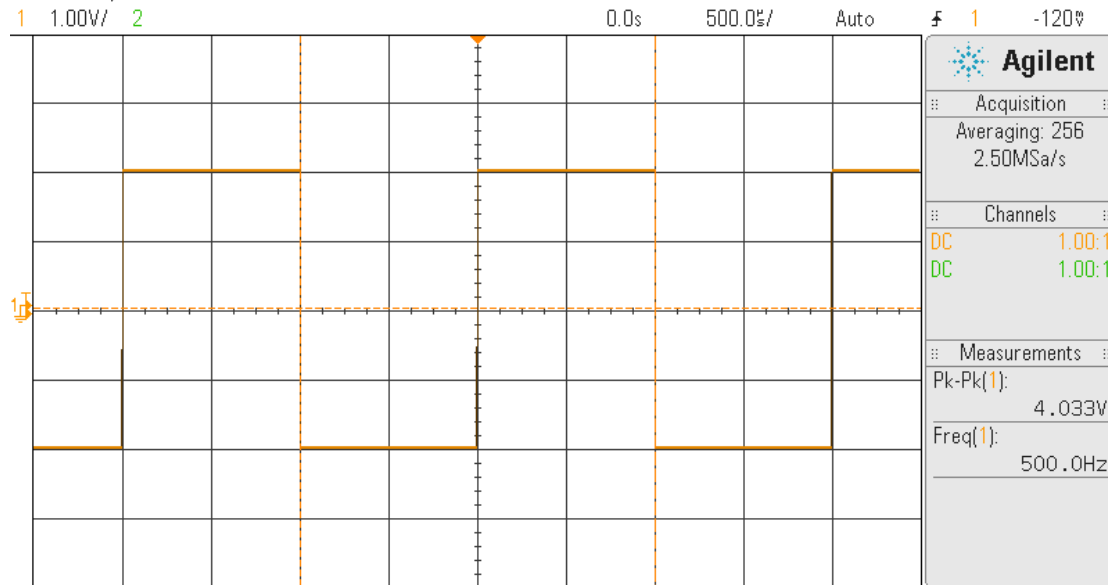


איור 13: גרף סינוסי, Cursors

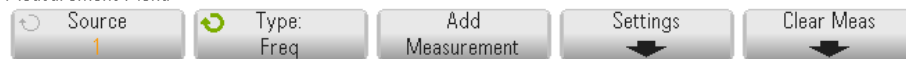


איור 14: גרף סינוסי, Meas

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 20:45:00 2021

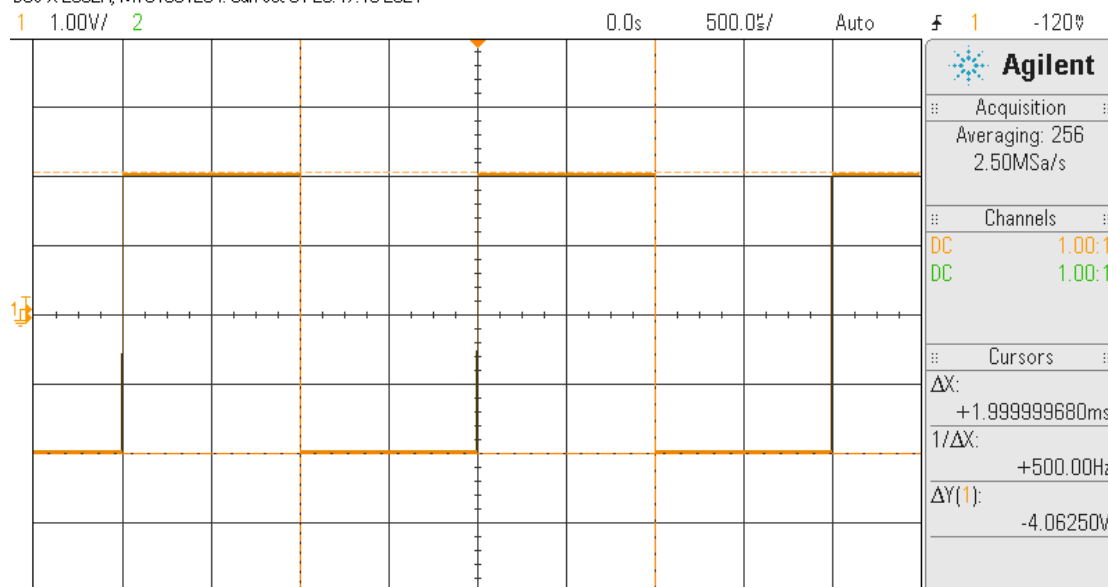


Measurement Menu



איור 15: ניווי 1, גרף מלבני, Cursors

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 20:47:19 2021

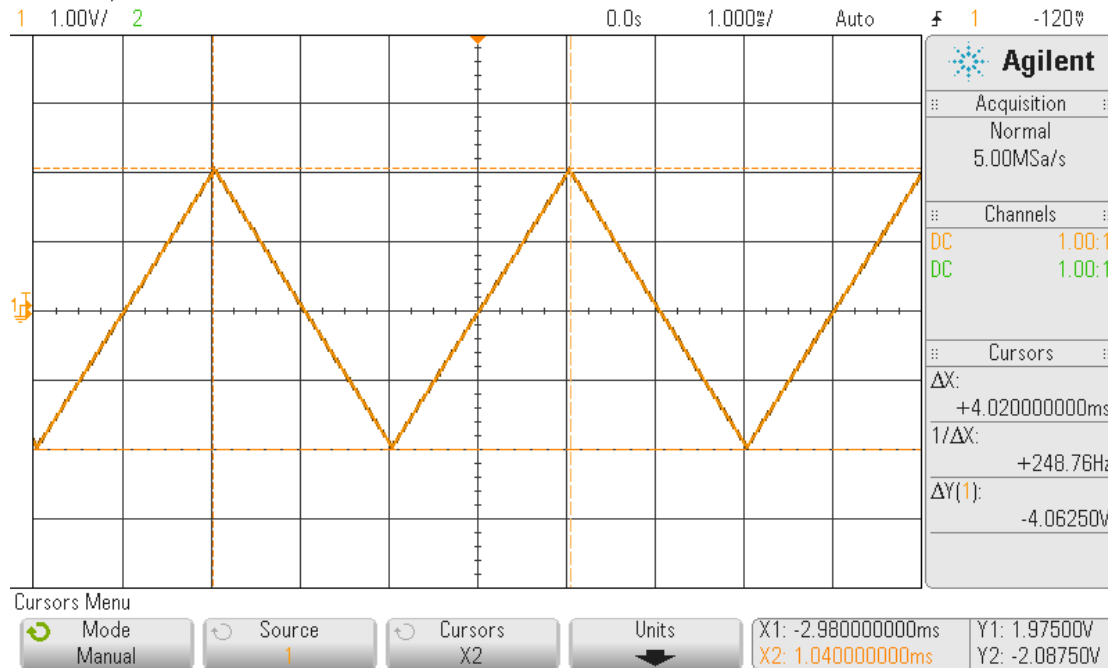


Cursors Menu



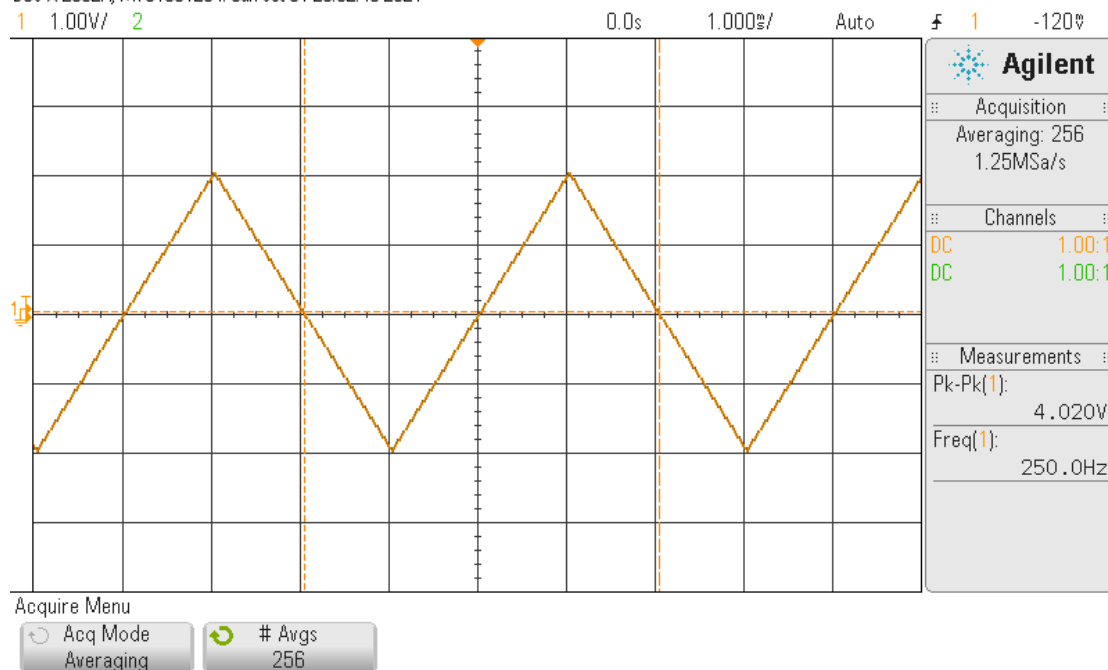
איור 16: ניווי 1, גרף מלבני, Meas

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 20:51:53 2021



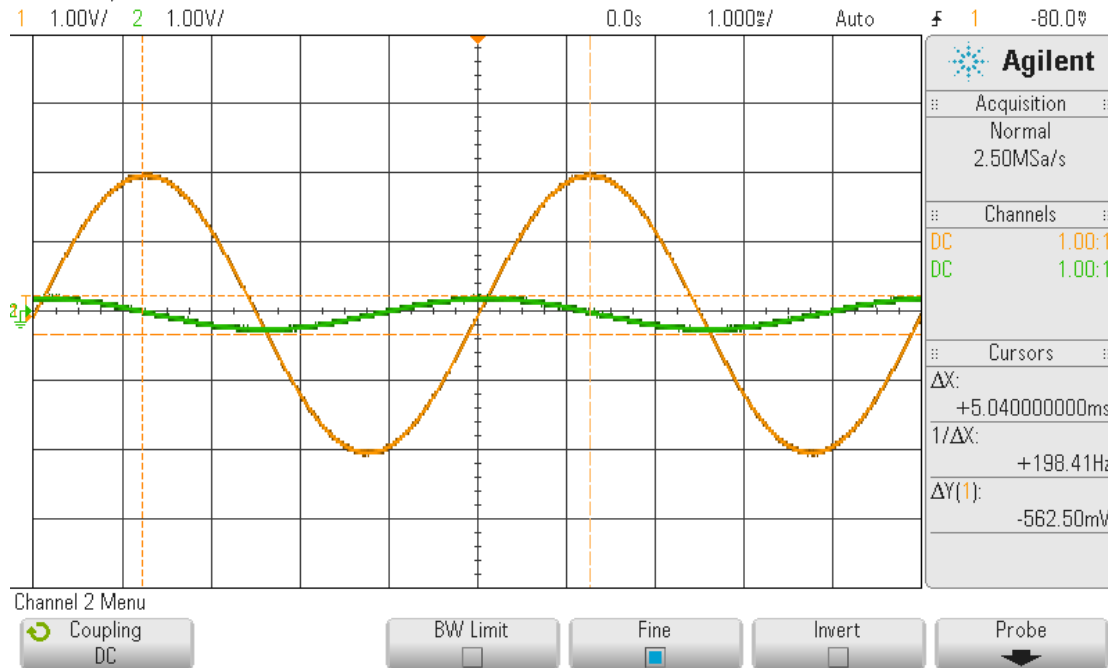
איור 17: ניסוי 1, גרף משולשי, Cursors

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 20:52:48 2021



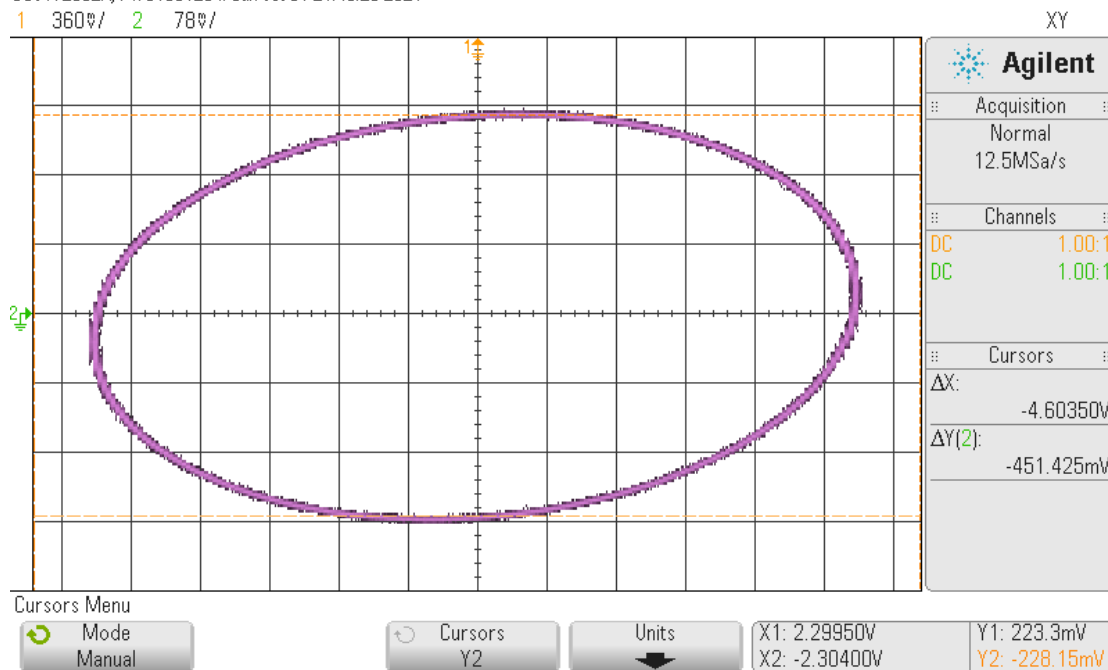
איור 18: ניסוי 1, גרף משולשי, Meas

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:37:08 2021



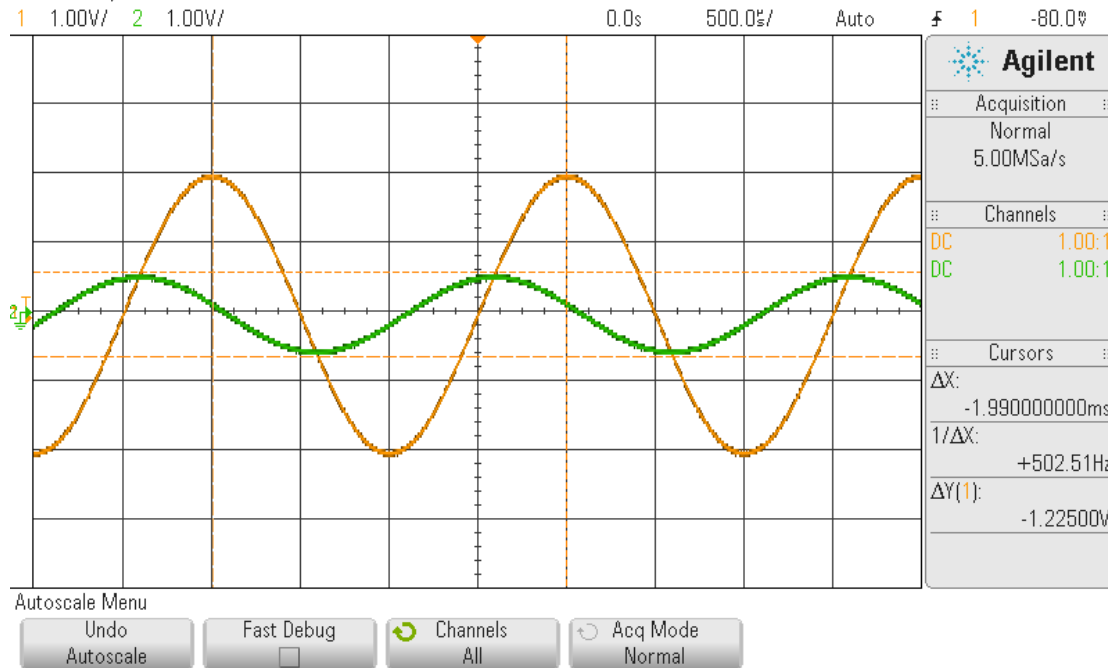
איור 19 : ניסוי 2, אותות המתח עבור תדירות 200Hz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:40:25 2021



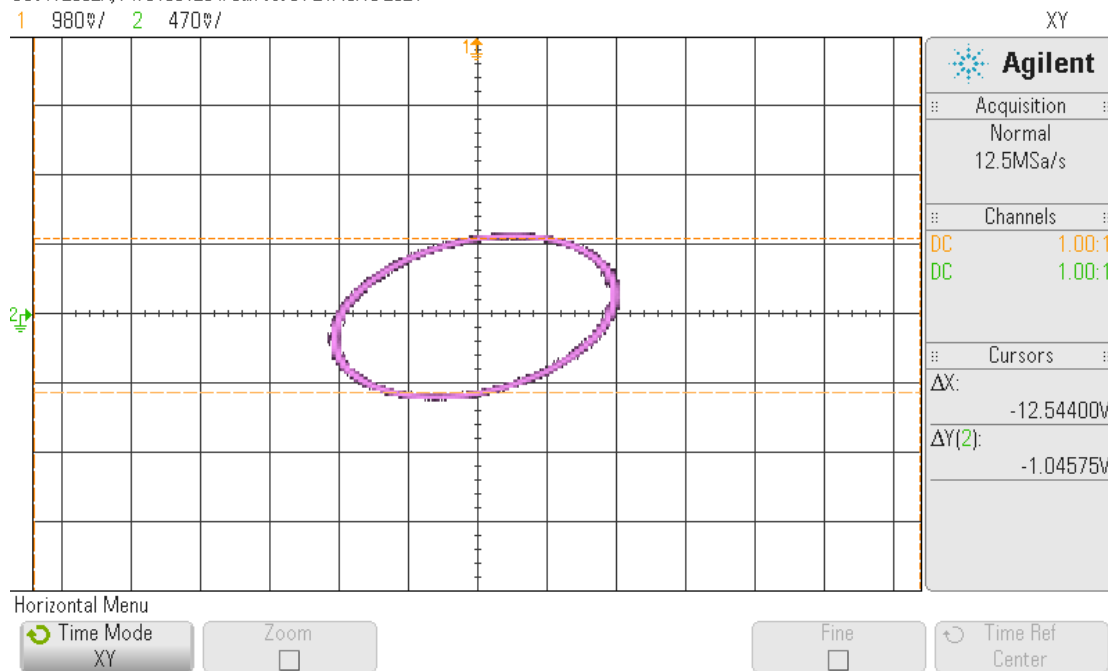
איור 20 : ניסוי 2, עקומת לסיגיו עבור תדירות 200Hz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:42:49 2021



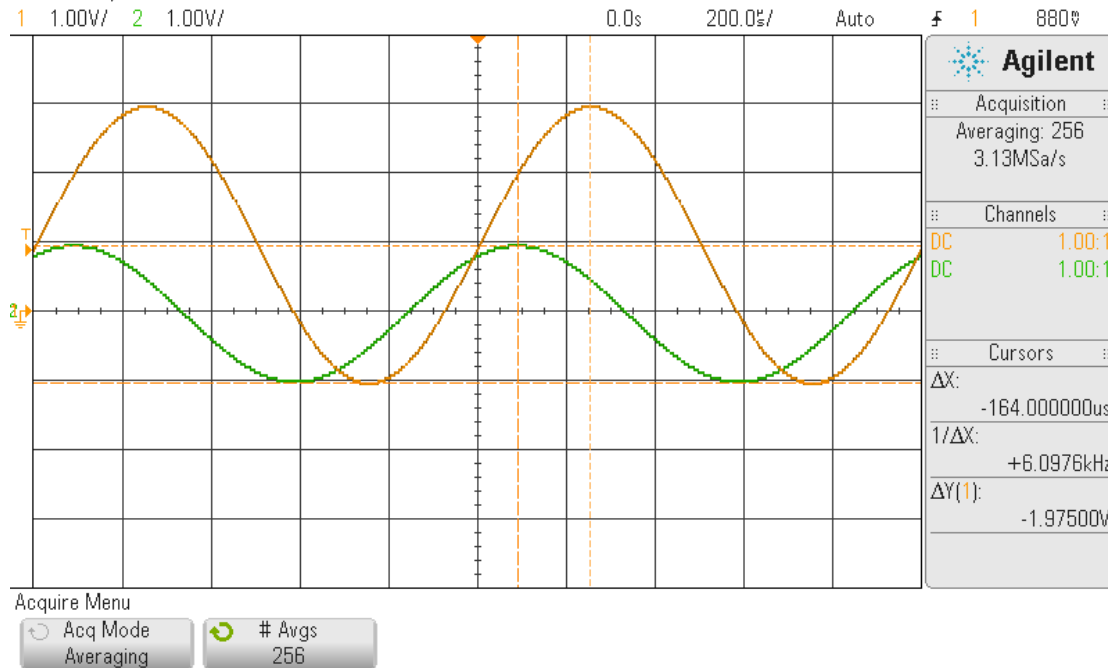
איור 21 : ניסוי 2, אותות המתח עבור תדירות 500Hz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:45:18 2021



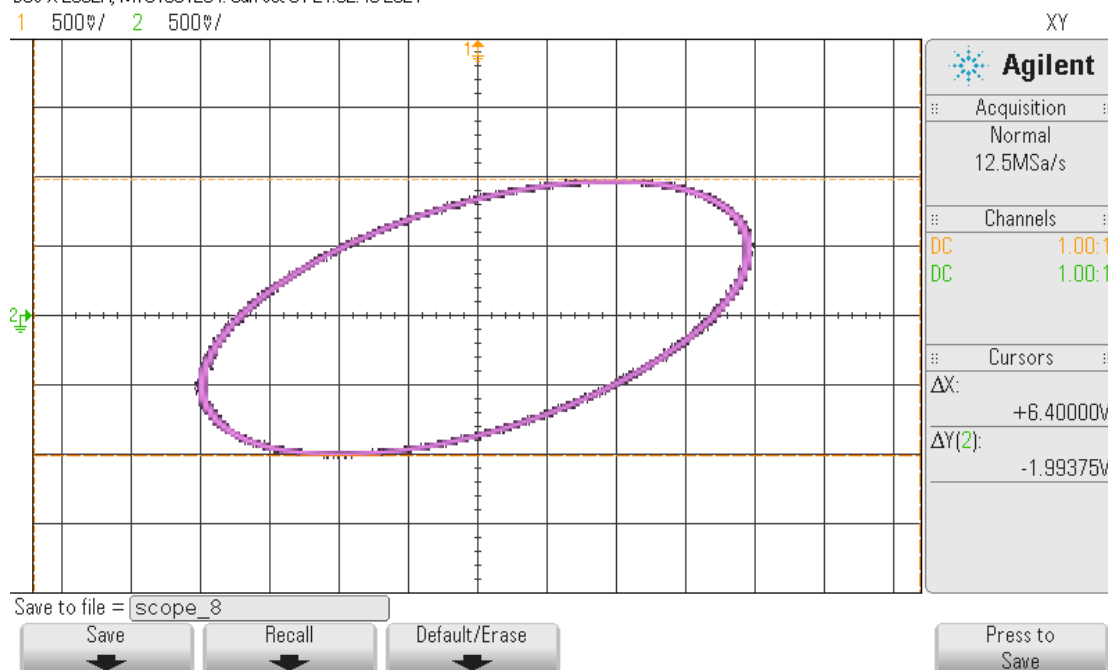
איור 22 : ניסוי 2, עקומת לסיגיו עבור תדירות 500Hz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:21:11 2021



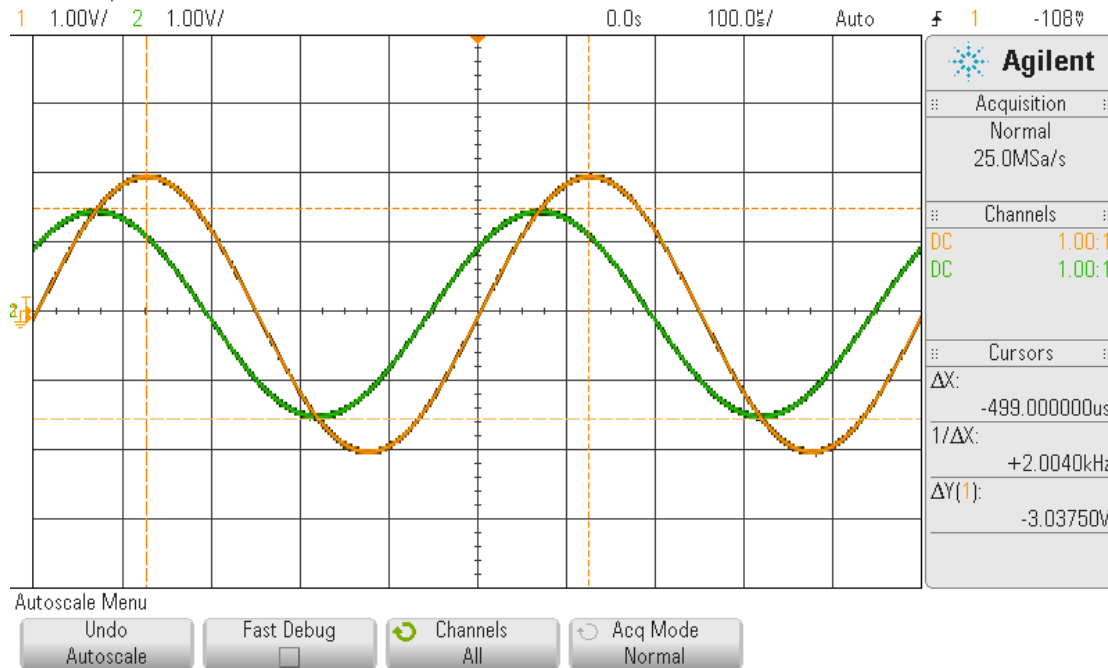
איור 23: ניסוי 2, אותות המתח עבור תדירות 1kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:32:46 2021



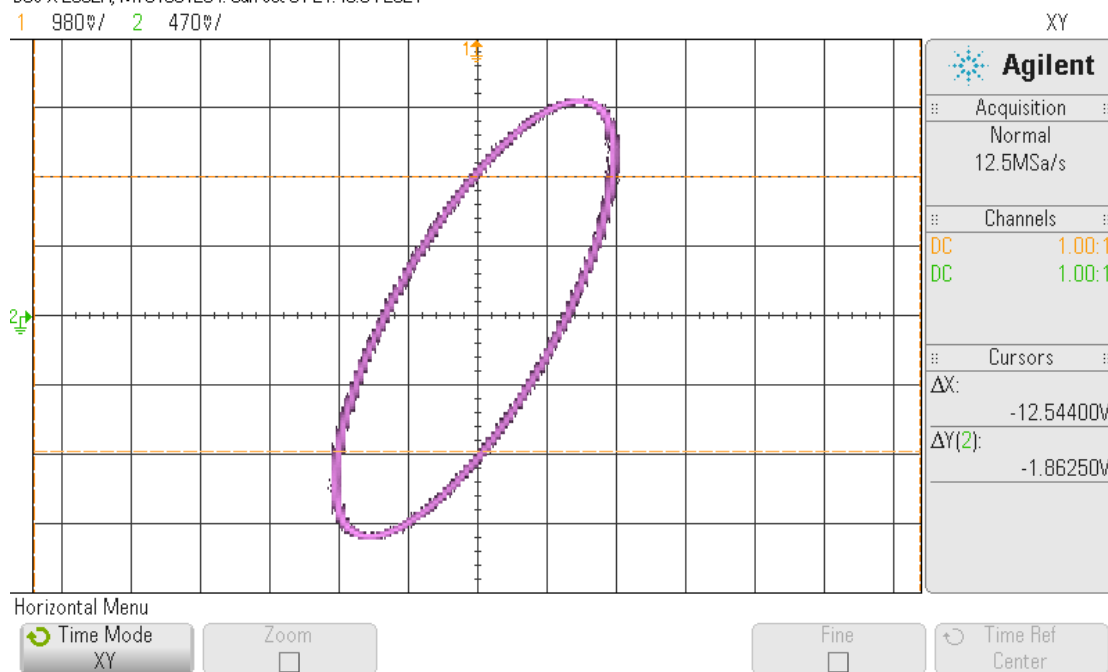
איור 24: ניסוי 2, עקומת לסיגיו עבור תדירות 1kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:47:55 2021



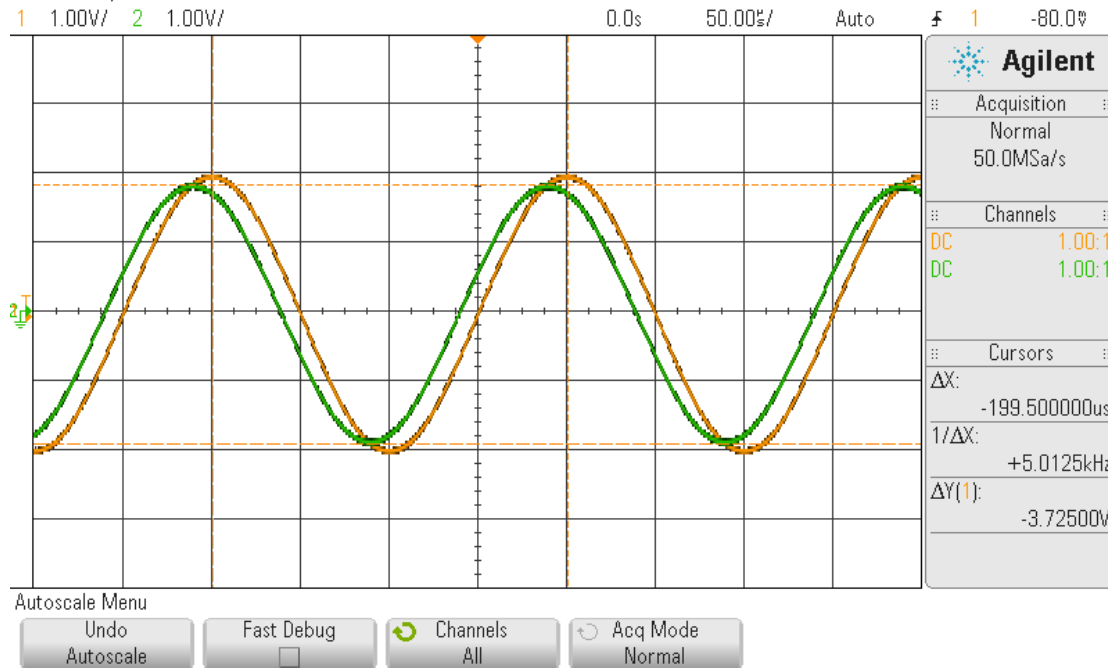
איור 25: ניסוי 2, אותות המתח עבור תדירות 2kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:46:34 2021



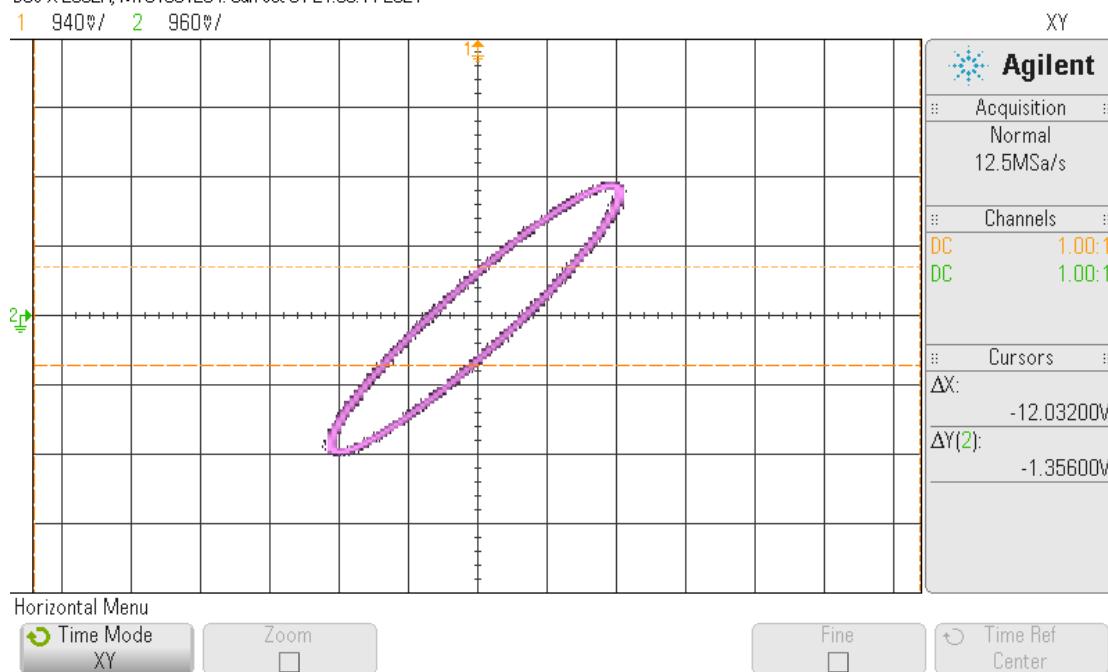
איור 26: ניסוי 2, עקומת לסיגיו עבור תדירות 2kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:51:01 2021



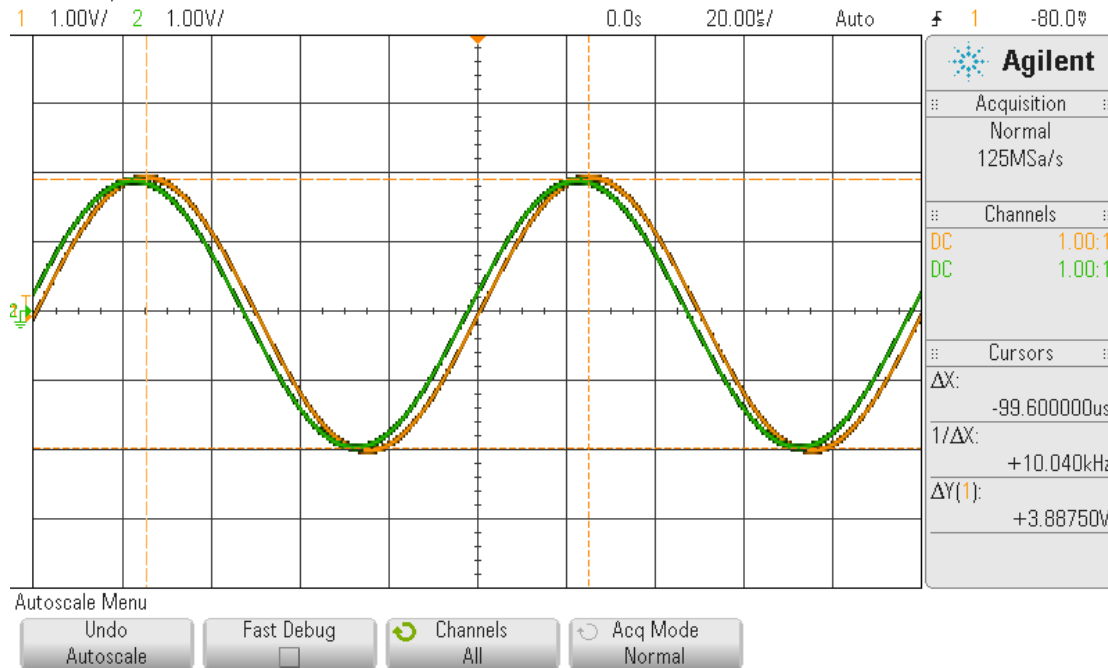
איור 27: ניסוי 2, אותות המתח עבור תדירות 5kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:53:11 2021



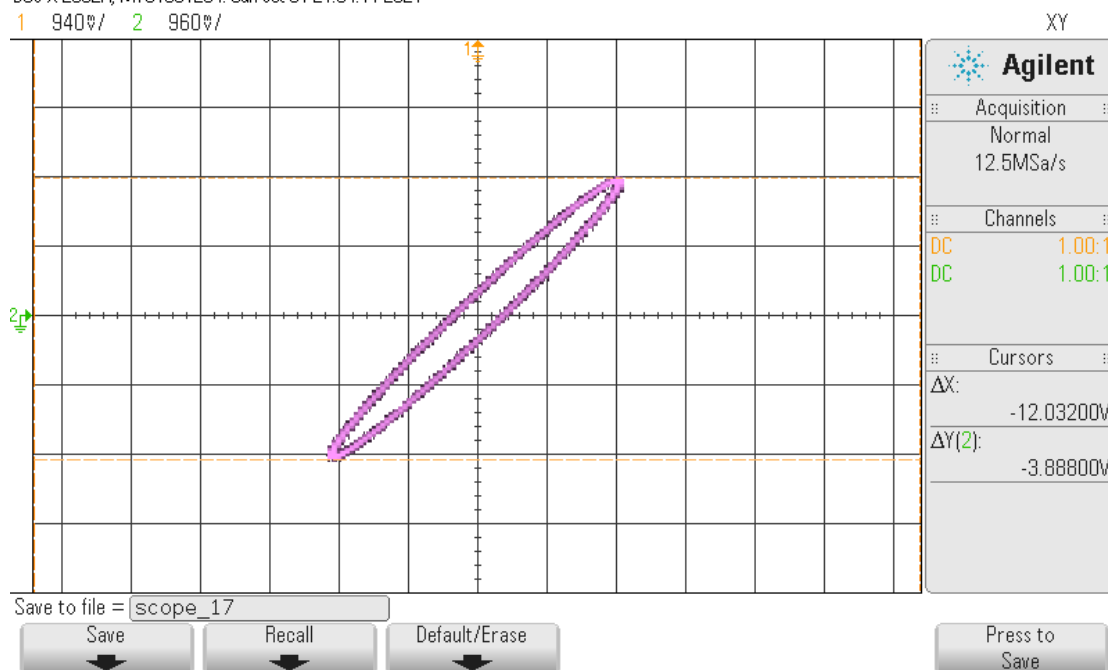
איור 28: ניסוי 2, עקומת לסיגיו עבור תדירות 5kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:55:54 2021



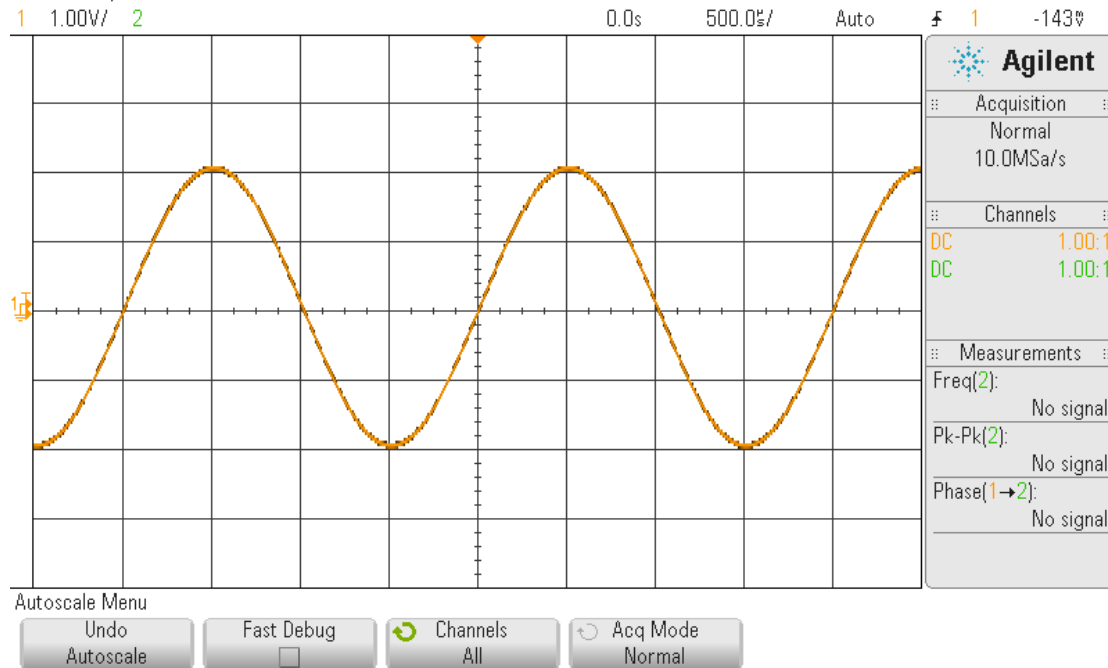
איור 29 : ניסוי 2, אותות המתח עבור תדירות 10kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 21:54:11 2021



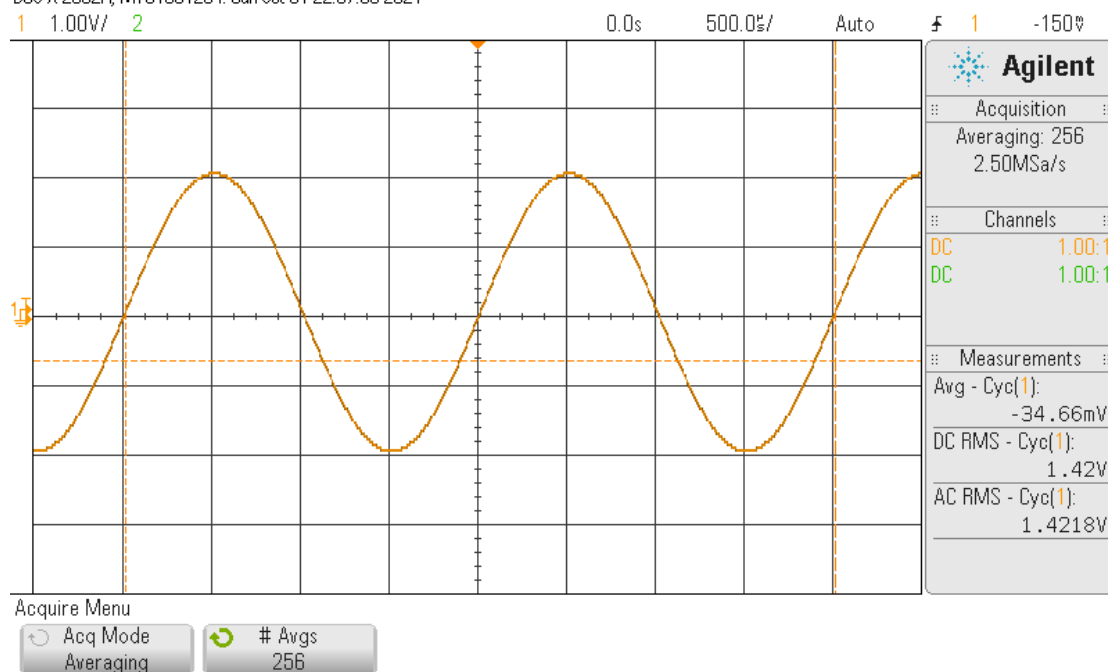
איור 30 : ניסוי 2, עקומת לסיגיו עבור תדירות 10kHz

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 22:00:12 2021



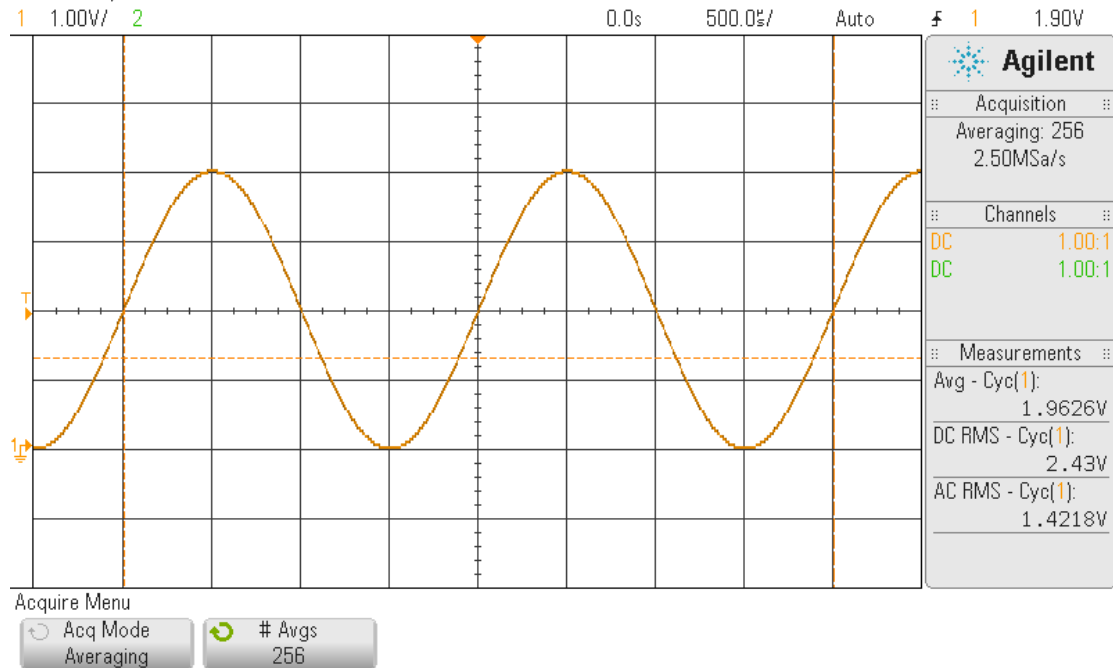
איור 31 : ניסוי 3, אות סינוסי מקורי (סעיף 5.3.1)

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 22:07:38 2021



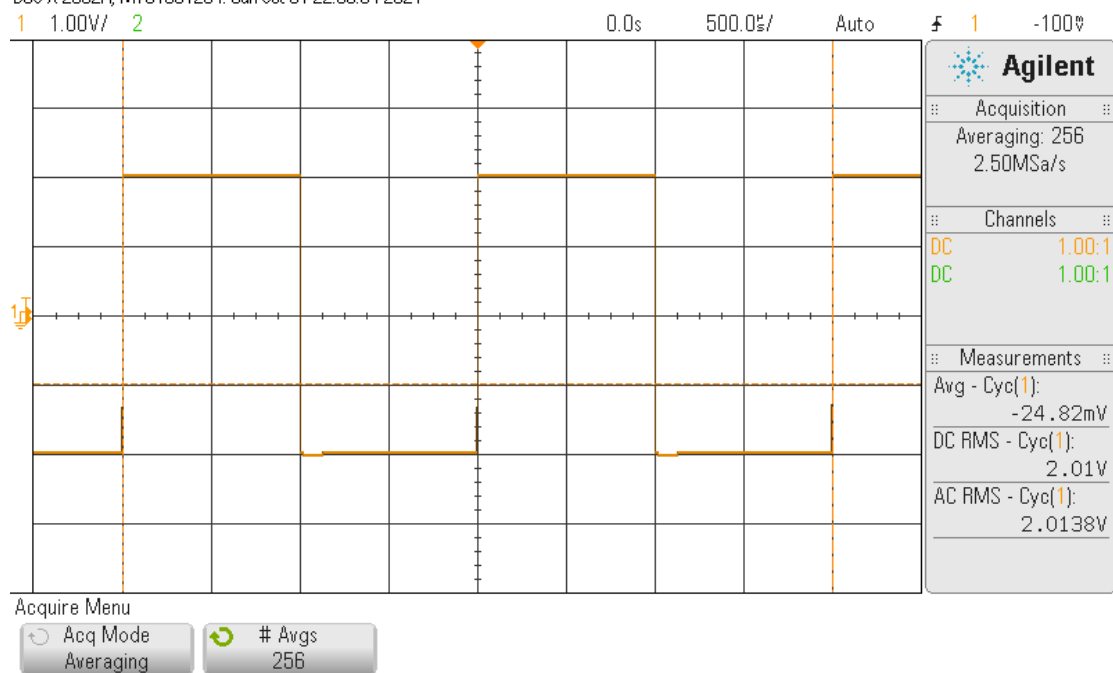
איור 32 : ניסוי 3, אות סינוסי 3.1

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 22:37:33 2021



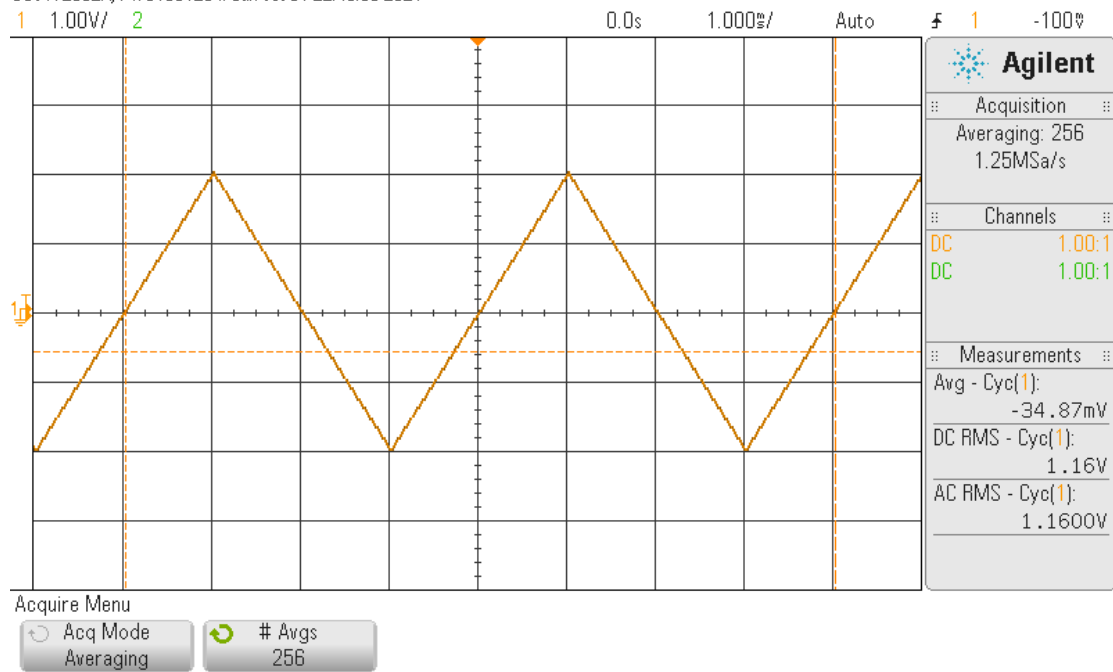
איור 33 : ניסוי 3, אות סינוסי 3.2

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 22:39:04 2021



איור 34 : ניסוי 3, אות ריבועי 3.3

DSO-X 2002A, MY51331254: Sun Oct 31 22:40:03 2021



איור 35: ניסוי 3, אות משולשי 3.4