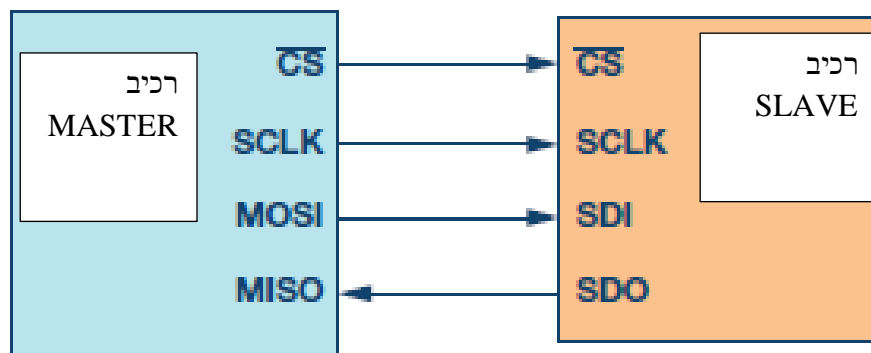


# תקשורת טורית SPI

## 1. מבוא לתקשורת SPI

התקשורת נוצרה על ידי חברת מוטורולה ב 1979 עם יציאת המיקרו פרוססור של חברת מוטורולה שנקרא 68000 .  
 השם SPI הוא – Serial Peripheral Interface - ממשק טורי היקפי . זוהי תקשורת טורית סינכרונית כי יש בה שעון שמסנכרן את הכנסת/הוצאת הנתונים.  
 דוגמאות לרכיבי SPI הם מתגים, זיכרונות, רכיבי שמע להקלטה/השמעה , ממירים למיניהם ( ADC ) תצוגות לד, TFT ועוד.  
 באיור הבא מתואר חיבור של תקשורת טורית SPI בין רכיב MASTER (אדון) ורכיב SLAVE (עבד).



איור 1 : חיבור MASTER ו SLAVE בתקשורת SPI .

באיור רואים שבתקשורת SPI יש 4 קווים :

- MOSI – Master Out Slave In** - קו הנתון מהמסטר ( המיקרו בקר ) אל העבד . (ברכיב העבד השם הוא SDO - Serial Data In).
- MISO – Master In Slave Out** - קו הנתון הטורי מהעבד אל המסטר . ברכיב העבד השם הוא SDO - Serial Fata Out ).
- SCLK - Seial CLoCK** - שעון טורי . שני האותות MOSI ו MISO מסונכרנים בעזרת קו השעון הטורי .
- קו נוסף נקרא **SS – Slave Select** - בחירת עבד . בעזרת קו זה המיקרו בקר מודיע לאיזה עבד הוא פונה. הקו פעיל בנמוך – **ACTIVE LOW** . שמות נוספים לקו הם CS – בחירת רכיב, Enable – אפשר ועוד.

תהליך התקשורת מתבצע בשלבים הבאים :

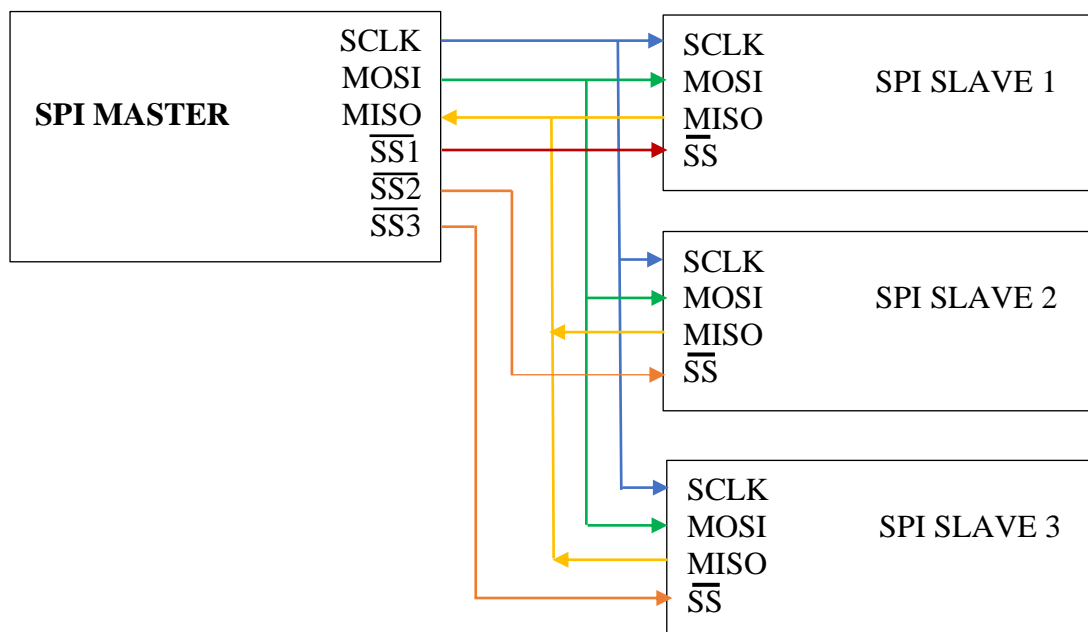
- כאשר ה MASTER מתחיל תקשורת עם ה SLAVE הוא מוריד את קו בחירת הרכיב  $\overline{SS}$  ל 0 .
- ה MASTER שולח בקו ה MOSI ביט אחרי ביט, כאשר כל ביט מסונכרן בעזרת פולס שעון - SCLK – שמייצר ה MASTER לתוך ה SLAVE .
- הביטים הנשלחים נכנסים לרגיסטר הזזה הנמצא ב SLAVE .
- הסנכרון לתוך ה SLAVE יכול להיות בעליית פולס השעון או בירידה שלו ( נתאר את האפשרויות השונות בהמשך ) .
- תוך כדי שליחה של כל ביט מה MASTER אל ה SLAVE גם ה SLAVE מוציא ביט אחרי ביט נתון אל קו ה MISO.

- גם הביטים מה SLAVE מסונכרנים בעזרת פולסי השעון ב SCLK והם נכנסים לרגיסטר הזזה ב MASTER..
- בסיום שליחת הביטים ה MASTER מעלה את קו בחירת הרכיב  $\overline{SS}$  ל 1 ומסיים את התקשורת.
- בסיום התקשורת ה MASTER לא מייצר פולסי שעון והקו של פולסי השעון SCLK נמצא במצב IDLE - סרק. הוא יכול להיות ב 0 או ב 1 (נתאר את האפשרויות השונות בהמשך).

## 2. חיבור מספר SLAVES אל MASTER

ניתן לחבר אל MASTER אחד מספר SLAVES. הקווים המשותפים לכל ה SLAVES הם SCLK MOSI MISO. הקו שנבדל הוא קו ה  $\overline{SS}$ . כל ה SLAVES מקבלים במקביל את פולסי השעון ואת קווי ה MOSI וה MISO. קו ה  $\overline{SS}$  של כל רכיב יהיה ב 1 (כלומר הרכיב לא נבחר) וה MASTER יוריד את קו בחירת הרכיב ל 0 רק לאותו ה SLAVE שהוא רוצה להתקשר איתו.

האיור הבא מתאר חיבור בין MASTER אחד ל 3 SLAVES.



איור 2: חיבור MASTER אחד ל 3 SLAVES בתקשורת טורית SPI.

באיור רואים שלכל עבד יש קו  $\overline{SS}$  משלו. במסטר יש מספר קווים לפי מספר העבדים. לכל רכיב עבד יתחבר קו מהמסטר. באיור הם נקראים  $\overline{SS1}$ ,  $\overline{SS2}$ ,  $\overline{SS3}$ . הם מסומנים עם גג מעליהם לציין שהקו פעיל בנמוך Active Low. לדוגמה המסטר מוריד את הקו  $\overline{SS1}$  ל 0 ואז רק רכיב העבד הראשון (SPI SLAVE 1) יודע שהמסטר מתקשר איתו. שאר העבדים יודעים שהמיקרו בקר איננו מתקשר איתם.

כמות ה SLAVES שניתן לחבר אל ה MASTER תלויה בכמות ההדקים "הפנויים" שיש לו במערכת שבה הוא נמצא ובכוח דחיפת הזרם שלו. אפשרויות מתקדמות יותר כדי לחסוך בהדקים של המיקרו בקר – ה MASTER - הן להתחבר אל הדקי  $\overline{SS}$  של כל רכיב SPI בעזרת מפענח – DECODER או מפלג DEMUX. לדוגמה: בעזרת מפענח מ 3 ל 8 ניתן להתחבר אל 8 רכיבי SPI עם 3 הדקים של ה MASTER. פעולה דומה ניתן לקבל בעזרת חיבור DEMUX עם כניסה אחת, 3 הדקי בחירה ו 8 יציאות.

### 3. אפשרויות העבודה בתקשורת SPI

במערכת ה SPI (גם במסטר וגם בעבד) יש 2 רגיסטרים. האחד הוא רגיסטר הזזה המקבל את הדגימות ומזיז את הנתון ועוד רגיסטר נתון שבסיום ההעברה הנתון שהתקבל נמצא בו.

בפולס שעון יש 2 מעברים (מגבוה לנמוך ולהפך) הכוללים גם עלייה וגם ירידה ויש לעשות 2 דברים :

א. במעבר מ 0 ל 1 (או מ 1 ל 0 – יוסבר בהמשך) גם המסטר וגם העבד מוציאים את ביט הנתון לקו הנתון (MOSI במסטר MISO בעבד).

ב. במעבר השני מתבצעת הזזה של הנתון ברגיסטר ההזזה שנמצא גם במסטר וגם בעבד.

שני פרמטרים/מאפיינים חשובים בתקשורת SPI :

א. **CPOL** (Clock POLarity - קוטביות השעון) הקובעת מה מצב הקו (נמוך או גבוה) במצב סרק - IDLE - כאשר אין פולסי שעון (לפני התחלת תקשורת ובסיומה). כאשר CPOL=0 בקו יש '0' כאשר CPOL=1 בקו יש '1'.

ב. **CPHA** (Clock PHase – פאזה השעון) הקובעת באיזה מעבר (האם מ 0 ל 1 או מ 1 ל 0) יוצא ביט הנתון בקו ה MOSI ובקו ה MISO ובאיזה מעבר הוא מוזז ברגיסטרי ההזזה גם במסטר וגם בעבד.

בעזרת 2 הפרמטרים אלו ניתן לקבוע אחד מ 4 אופני עבודה (מאופן 0 ועד אופן 3) שנתאר בהרחבה בהמשך.

פרמטר נוסף חשוב הוא באיזה מצב נמצא קו השעון SCLK בסיום התקשורת (האם ב 0 או ב 1).

### 4. תבנית (פורמט) העברה של נתון עבור CPHA=0

הקו  $\overline{SS}$  פעיל בנמוך ובחלק מהמאמרים באינטרנט הוא נקרא גם NSS כדי שלא נצטרך לשים קו מעל ה SS.

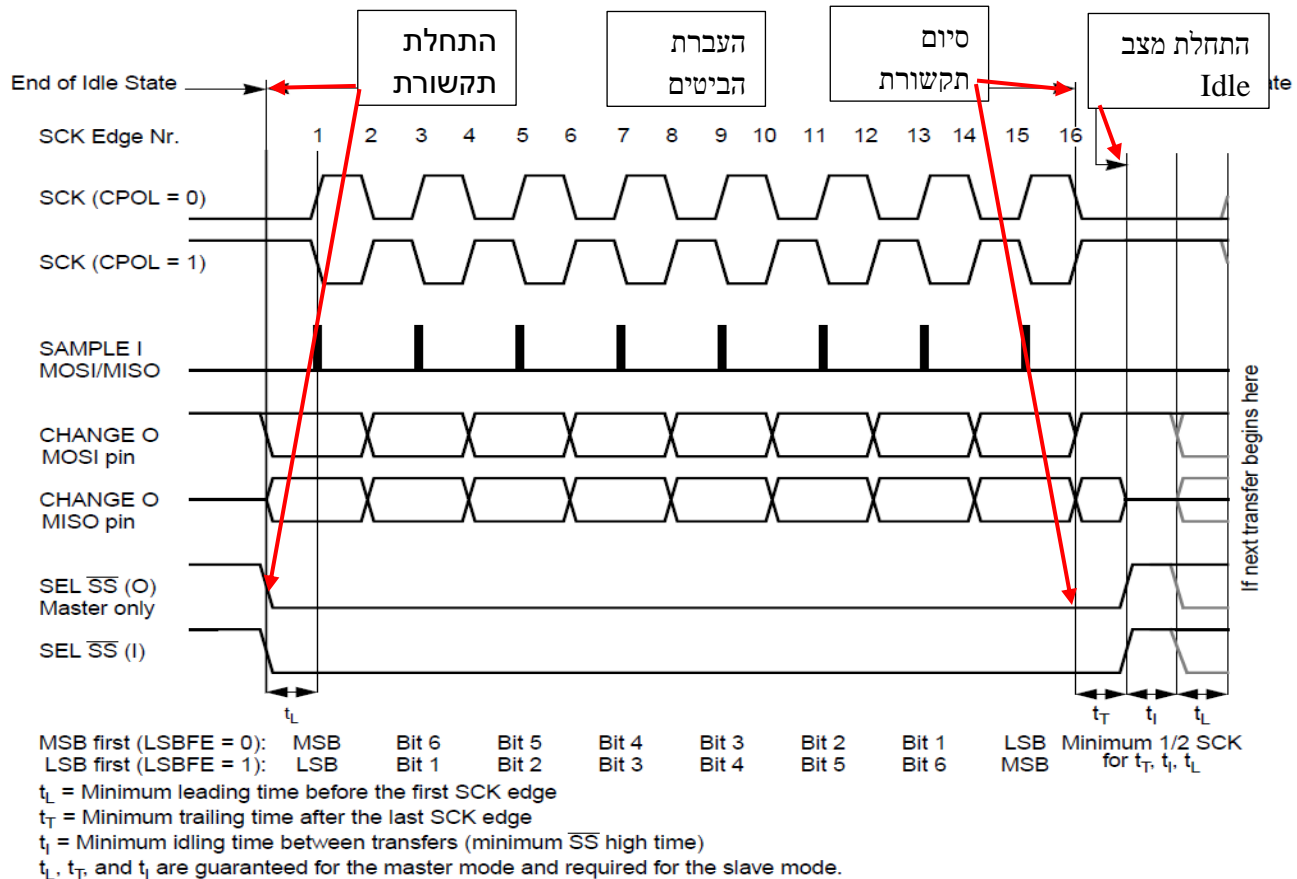
האיור הבא מתאר את תבנית העברה עם צורות הגל של תקשורת SPI כאשר CPHA=0 ועם פרמטרים של זמן אופייניים.

בחלק התחתון רואים את התחלת התקשורת כאשר קו  $\overline{SS}$  יורד ל 0 ואת סיומה כאשר הקו  $\overline{SS}$  עולה ל 1.

קו השעון SCK מתואר על ידי 2 צורות גלים. העליונה ביותר מתארת את פולסי השעון כאשר CPOL=0 (כאשר אין תקשורת יש 0 בקו פולסי השעון) והפולס הראשון הוא עלייה וצורת הגל שמתחתיה כאשר CPOL=1 ואז יש '1' בקו פולסי השעון והפולס הראשון הוא ירידה.

במקום הרשום באיור O הכוונה Output (יציאה) ובמקום שרשום I הכוונה Input (כניסה).

הביטים של הנתון הטורי בהדקי MOSI ו MISO נדגמים ומתבצעת הזזה ברגיסטרים של ההזזה באחת מ 2 אפשרויות. או בעליית השעון או בירידת פולסי השעון ואת זה נקבע לפי נתוני הרכיב שאליו מתחברים.



איור 3 : צורות גל בתקשורת SPI כאשר CPHA=0.

המעבר הראשון של קו SCK (מ 0 ל 1 או מ 1 ל 0 תלוי ב CPOL) משמש להכנסת ביט הנתון הראשון של העבד אל המסטר (בקו MISO) ואת ביט הנתון הראשון של המסטר אל העבד (בקו MOSI). באיור 3 במרכז רואים את הקו נקרא SAMPLE והוא כניסה (מסומן באיור ב I) גם למסטר בקו ה MISO וגם לעבד בקו ה MOSI.

במעבר השני, בחצי המחזור הבא, מופיע מעבר נוסף בקו SCK ואז הערך שנדגם מהעבד בקו MISO נכנס לתוך רגיסטר ההזזה שבמסטר. אחרי המעבר הזה משודר הביט הבא של המסטר על קו ה MOSI. התהליך נמשך עד 16 מעברים בקו SCK כאשר נתון ננעל אל המסטר במעברים אי זוגיים ומועבר אל העבד במעברים זוגיים.

אחרי מעבר מספר 16 הנתון שהיה ברגיסטר ה SPI של המסטר צריך להיות ברגיסטר הנתון של העבד והנתון שהיה ברגיסטר הנתון של העבד צריך להיות במסטר.

באיור מופיעים זמנים כמו :

$t_L$  המראה מה הזמן המינימאלי מרגע הורדת קו  $\overline{SS}$  ל 0 ועד להתחלת פולסי השעון.

$t_T$  הוא הזמן המינימאלי בין פולס השעון האחרון והעלאת קו  $\overline{SS}$  ל 1.

$T_I$  הוא זמן הסרק - IDLE - בין העלאת קו ה  $\overline{SS}$  ל 1 ועד שידור נתון חדש על ידי הורדת  $\overline{SS}$  ל 0.

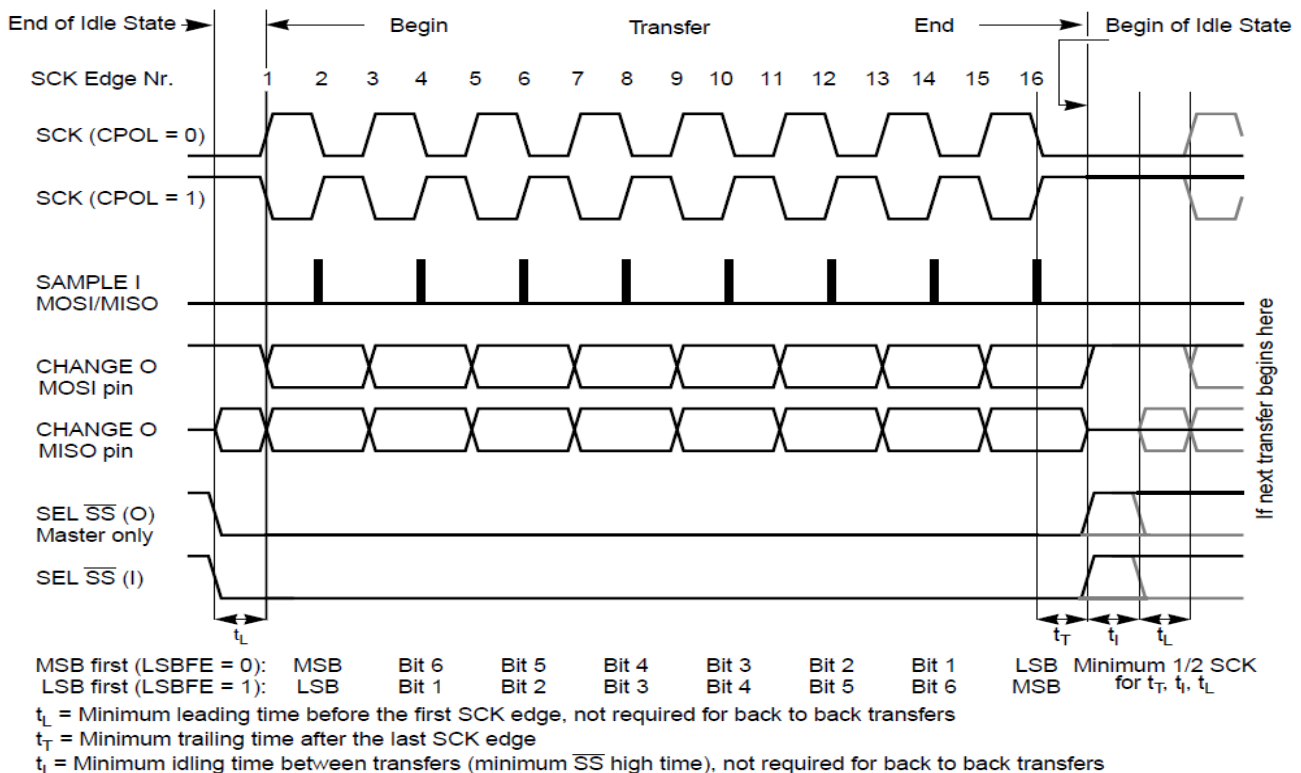
מתחת לצורות הגלים ניתן לראות שאפשר לשדר את הנתון מביט ה LSB אל ה MSB או להיפך. קיים ביט LSBFE ( LSB ) First Enable – אפשר לראות ( שקובע מי נכנס ראשון ). כאשר הוא 0 נכנס ביט ה MSB ראשון וכאשר הוא 1 נכנס ה LSB ראשון.

קבלת הנתון היא בשני שלבים. היא מוזנת לרגיסטר ההזה של ה SPI בזמן ההעברה ומועברת לרגיסטר הנתון של ה SPI כאשר הביט האחרון הוזן פנימה.

## 5. תבנית (פורמט) העברה של נתון עבור CPHA=1

קיימים רכיבים שצריכים את המעבר של פולס השעון הראשון לפני שניתן יהיה לגשת לביט הנתון הראשון בקו היציאה של הנתון. המעבר השני מכניס את הנתון למערכת. פורמט זה מתקבל על ידי השמה של CPHA ל 1 .

איור 4 מתאר את התקשורת עבור CPHA=1 . בהמשך נראה צורות גל "צבעוניות" יותר ל 4 האפשרויות השונות של העבודה.



איור 4 : צורות גל בתקשורת SPI כאשר CPHA = 1 .

באיור רואים שהמעבר הראשון משמש כהשהית סנכרון ואומר לעבד להוציא נתון בקו ה MISO . בחצי המחזור הבא, במעבר השני, יש נעילה של ביט הנתון גם במסטר וגם בעבד. כאשר מגיע המעבר השלישי מועבר הביט שננעל במעבר השני לתוך ה LSB או ה MSB של רגיסטר ההזה (כתלות בביט LSBFE ). אחרי מעבר זה יוצא ביט הנתון הבא של המסטר בקו ה MOSI . התהליך חוזר על עצמו עבור כל 16 המעברים, כאשר הנתון ננעל במעברים הזוגיים וההזה קוראת במעברים האי זוגיים.

בדומה להעברה עבור  $CPHA=0$ , גם כאן קבלת הנתון היא בשני שלבים. היא מוזזת לרגיסטר ההזזה של ה SPI בזמן ההעברה ומועברת לרגיסטר הנתון של ה SPI כאשר הביט האחרון הוזז פנימה.

## 6. - עוד על 4 אופני העבודה בתקשורת SPI

4 אופני העבודה של תקשורת SPI המתוארים בטבלה הבאה מגדירים 3 פרמטרים :

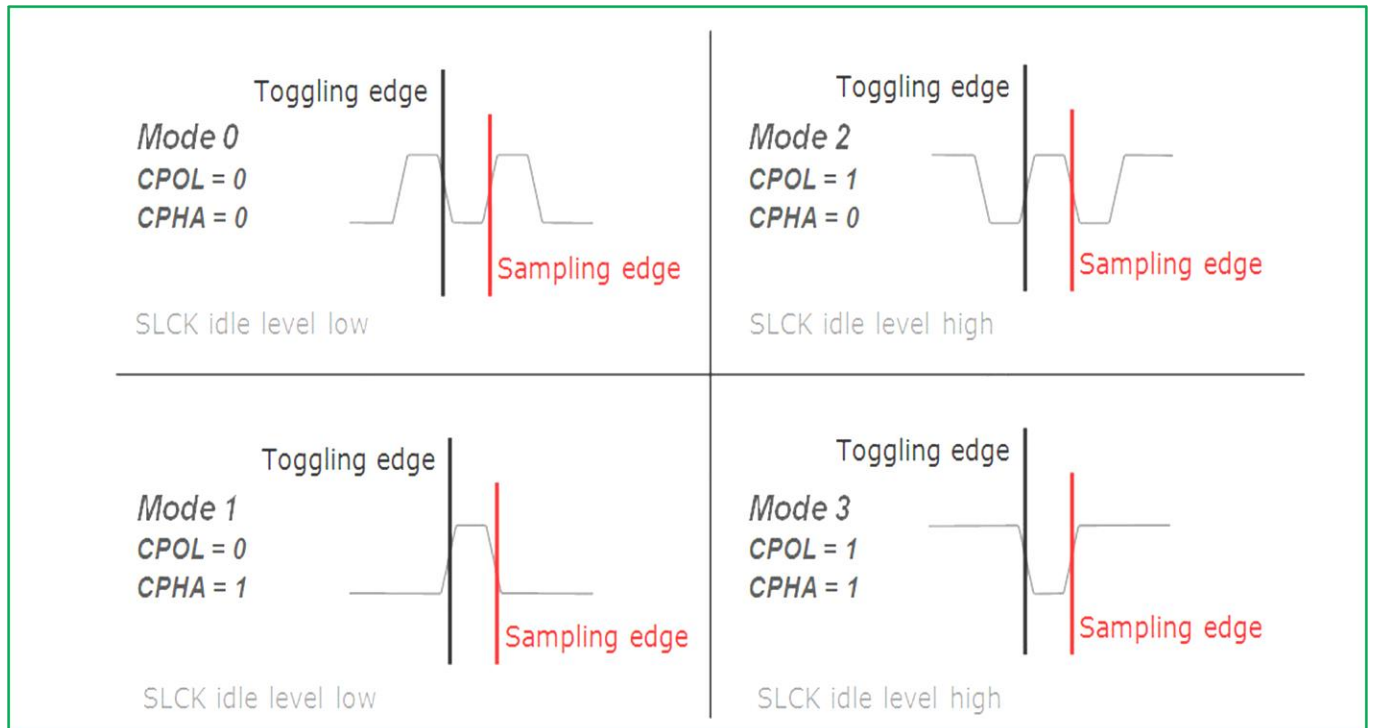
- את המעבר (שפה EDGE) – של ביט הנתון אל קו הנתון (גם במסטר וגם בעבד) מתואר על ידי הקו השחור בכל אחד מהאיורים.
  - את המעבר של דגימת הנתון וההזזה בתוך רגיסטר ההזזה (גם במסטר וגם בעבד) המתוארת על ידי הקו האדום בכל אחד מהאיורים.
  - את מצב השעון במצב סרק - IDLE - שבו אין תקשורת ולכן אין פולסי שעון.
- האופנים מוגדרים בעזרת הפרמטרים CPOL - Clock POLarity – קוטביות השעון ו CPHA - Clock PHAse – פאזה השעון.

פאזה פולס השעון המשמשת לדגום ו/או להזזת הנתון	קוטביות השעון במצב Idle	CPHA	CPOL	אופן עבודה
הנתון נדגם בעליית השעון ומוזז החוצה בירידת השעון	Logic low	0	0	0
הנתון נדגם בירידת השעון ומוזז החוצה בעליית השעון	Logic low	1	0	1
הנתון נדגם בירידת השעון ומוזז החוצה בעליית השעון	Logic high	0	1	2
הנתון נדגם בעליית השעון ומוזז החוצה בירידת השעון	Logic high	1	1	3

טבלה 1 : 4 אופני העבודה של התקשורת

מהטבלה רואים שמצבי העבודה 0 ו 3 וגם מצבי העבודה 1 ו 2 דומים מבחינת פאזה השעון אבל הם שונים במצב Idle – סרק - שהוא המצב שבו לא מתקיימת תקשורת .

באיור הבא רואים את 4 אופני העבודה של התקשורת SPI בצורה גרפית.



איור 5 : 4 אופני העבודה בתקשורת SPI

**אופן 0 :** CPOL=CPHA=0

הוצאת ביט הנתון לקו הנתון (MISO או MOSI) מתבצע בירידת השעון. הדגימה וההזזה של הביט לתוך רגיסטר ההזזה ברכיב (גם במסטר וגם בעבד) מתבצעת בעליית השעון. כשאין תקשורת קו השעון ב 0.

**אופן 1 :** CPOL=0 CPHA=1

ההעברת הנתון בעליית השעון והדגימה וההזזה של הנתון ברגיסטר ההזזה - בירידת השעון. כשאין תקשורת הקו ב 0.

**אופן 2 :** CPOL=1 CPHA=0

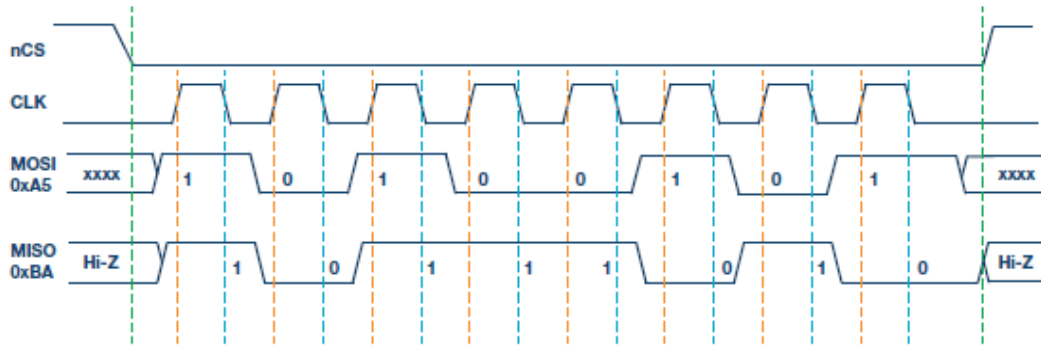
ההעברה בעליית שעון, דגימה והזזה מתבצעת בירידת השעון. באין תקשורת הקו ב 1.

**אופן 3 :** CPOL=1 COHA=1

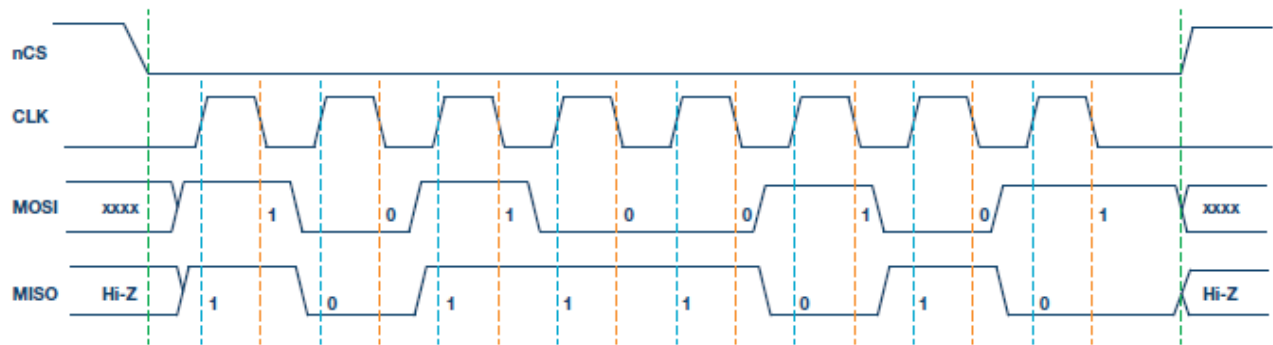
ההעברה בירידת שעון, הדגימה וההזזה בעליית השעון. כשאין תקשורת הקו ב 1.

האיור הבא מתאר את 4 אופני העבודה עבור תקשורת של בית . nCS מתאר את הדק בחירת הרכיב עבור רכיב מספר n.

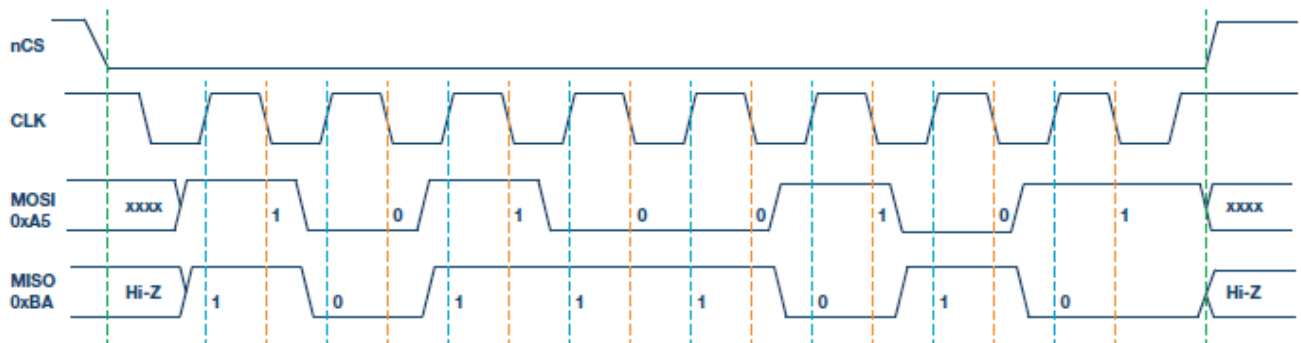
באיור רואים דוגמה לתקשורת בארבעה מצבי SPI. בדוגמאות אלה, הנתונים מוצגים בשורה MOSI ו-MISO. התחלה וסיום השידור מסומנים בקו הירוק המקווקו, קצה הדגימה מסומן בכתום והקצה המשתנה מסומן בכחול. יש לשים לב כי נתונים אלה הם דוגמה בלבד ונועדו לצורך המחשה. עבור תקשורת SPI מוצלחת, יש לעיין בגיליון נתוני הרכיב ולוודא כי מפרטי התזמון עבור הרכיב מתקיימים.



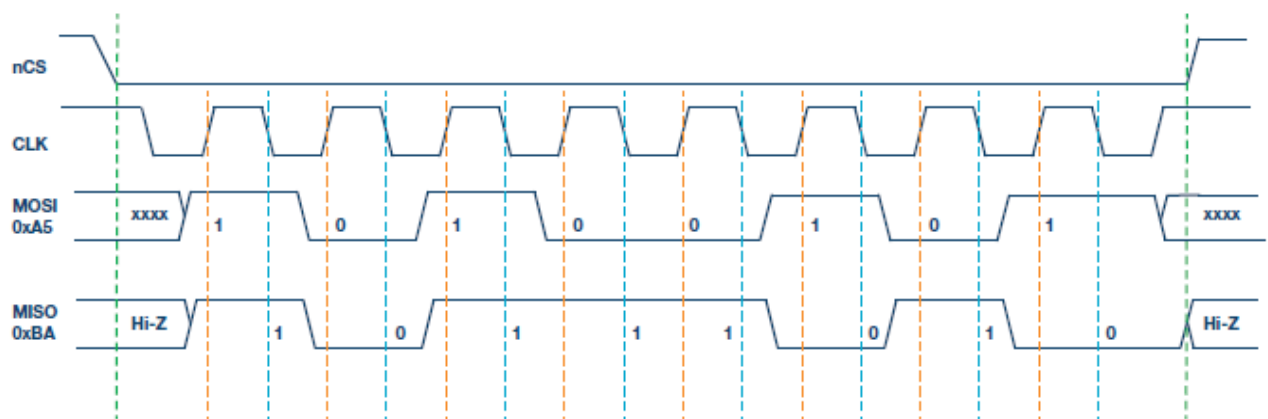
*SPI Mode 0, CPOL = 0, CPHA = 0: CLK idle state = low, data sampled on rising edge and shifted on falling edge.*



*SPI Mode 1, CPOL = 0, CPHA = 1: CLK idle state = low, data sampled on the falling edge and shifted on the rising edge.*



*SPI Mode 2, CPOL = 1, CPHA = 0: CLK idle state = high, data sampled on the falling edge and shifted on the rising edge.*



*SPI Mode 3, CPOL = 1, CPHA = 1: CLK idle state = high, data sampled on the rising edge and shifted on the falling edge.*

איור 6 : 4 אופני העבודה בתקשורת SPI עבור שידור של בייט .

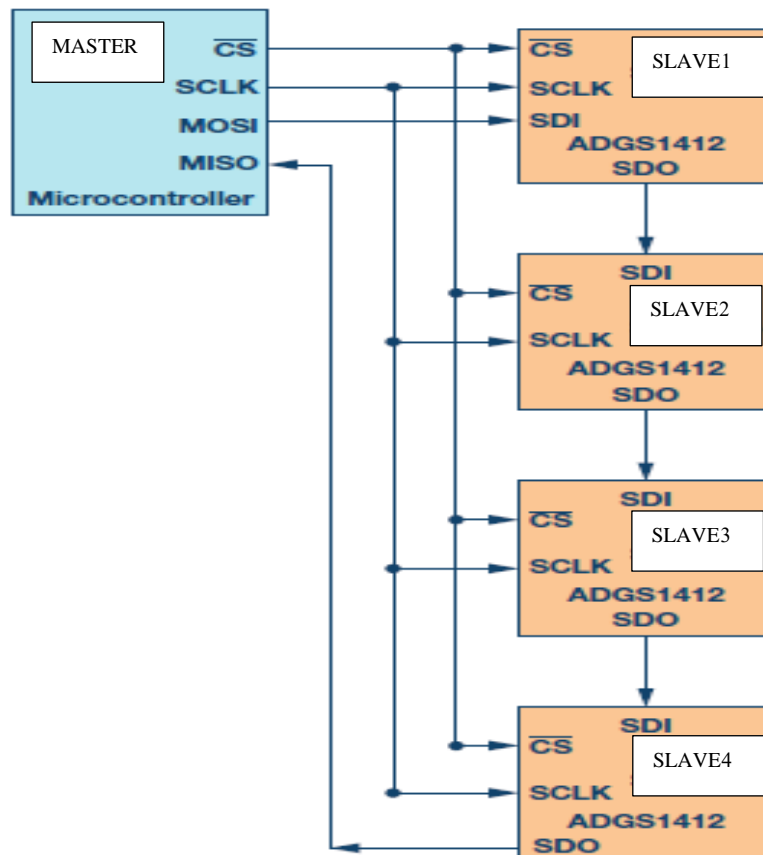


צמד של אדון/עבד חייבים להשתמש באותם פרמטרים – תדר השעון, ה CPOL וה CPOH חייבים להיות זהים. אם יש מספר עבדים שהתצורה-קונפיגורציה - שלהם שונה (CPOL CPOH שונים), על המסטר להתאים את עצמו בכל פנייה לעבד לקונפיגורציה המתאימה.

תקשורת SPI איננה מגדירה קצב נתונים מרבי וגם לא עוסקת בכתובות כלשהן. אין ל SPI אפשרות לדעת האם המסטר או העבד קיבלו נתון כלומר, אין אישור קבלת נתונים מצד לצד. למעשה, למאסטר SPI אין שום ידע אם קיים עבד, אלא אם כן ' משהו ' נוסף נעשה מחוץ לפרוטוקול ה SPI ( כמו בדיקה בתוכנה מה התקבל מהעבד ב MISO ).

## 7. חיבור בשרשרת – חיבור טורי

אחת הדרכים לחסוך בהדקים של המיקרו בקר – ה MASTER היא לחבר את הדקי רכיבי ה SPI בשרשרת הנקראת DAISY CHAIN . במצב זה יציאה טורית של רכיב SLAVE אחד הנקראת SDO מתחברת אל כניסת ה SDI של רכיב SPI הבא וכך הלאה. האיור הבא מתאר חיבור בשרשרת של 4 רכיבי SPI בטור. ( רכיב ADGS1412 שבאיור הוא רכיב של חברת ANALOG DEVICES שבו יש 4 מתגים מסוג SPST שבעזרת תקשורת SPI ניתן לקבוע מי יהיה פתוח ומי סגור והוא לא משמעותי להסבר והבנת חיבור בשרשרת). האיור הבא הוא מתאר חיבור של 4 רכיבי SLAVE אל MASTER בחיבור שרשרת.



איור 7 : חיבור בשרשרת Daisy Chain של 4 רכיבי SLAVE אל רכיב MASTER

באיור רואים שקו בחירת הרכיב מתחבר אל כל 4 הרכיבים במקביל. במקרה זה מורידים את קו ה  $\overline{SS}$  ל 0, שולחים נתון בן 32 ביטים בקו ה MOSI מסונכרנים עם קו ה SCLK ובסיום מעלים את קו ה  $\overline{SS}$  ל 1. 8 הביטים הראשונים שהכנסנו הגיעו לרכיב SLAVE4. 8 הביטים השניים ל SLAVE3, 8 הביטים הבאים ל SLAVE2 ו 8 הביטים האחרונים יהיו ב SLAVE1. יציאת SDO של SLAVE4 מתחברת אל קו ה MISO של ה MASTER. ה MASTER צריך לדעת ש 8 הביטים הראשונים שקיבל הם מ MASTER4, 8 הביטים הבאים מ MASTER3, 8 הביטים הבאים מ MASTER2 ו 8 הביטים האחרונים מ MASTER1.

## 8. ביבליוגרפיה:

1. <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/introduction-to-spi-interface.html>
2. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1248.pdf>
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface)
- 4.