

פיתוח רכיבים אינרציאליים ברפאל

ד"ר יהודה רוזנברג, ד"ר אהוד (אודי) נצר וד"ר נפתלי ס.

כתבה 48 בסדרת כתבות על היסטוריית רפאל בעריכת ד"ר ראובן אשל¹

רכיבים אינרציאליים כוללים בדרך כלל סביבונים (ג'ירוסקופים) ומדי תאוצה. הם משמשים לצרכי ניווט או ביות ומאפשרים התייחסות לאוריינטציה המוחלטת במרחב ולכיוון אליו פונה המערכת. רכיבים אלו נחשבים מורכבים במיוחד ודורשים הנדסה ברמה הגבוהה ביותר.

בתחילת שנות השישים החלו ברפאל לפתח רכיבים אינרציאליים, אולם הקמת תמ"מ בתעשייה האווירית כמוקד מערכות הניווט בישראל בשנת 1964, הובילה לפרוק הקבוצה ב-1968.

ד"ר יהודה רוזנברג חזר משבתון וחל"ת בקיץ 1980, שבהן השלים לימודים לתואר שלישי בארה"ב. ד"ר יצחק פורת שהיה באותה תקופה מהנדס מערכת ראשי בחטיבת אווירומכניקה, סיפר ליהודה כי משוחות שהיו לו עם ראשי חטיבות וראשי פרויקטים, יש לרפאל בעיה בהשגת רכיבים ומערכות אינרציאליות, הפרויקטים לא מרוצים מהמערכות שניתן לרכוש מתמ"מ, ותעשיות בחו"ל לא מוכרות לנו. לאור המצב ביקש שיהודה יקים מוקד לדינמיקה ורכיבים אינרציאליים.

יהודה ואנשים נוספים הכינו מסמך הצדקה והציגו אותו לפני וועדה בראשות הסמנכ"ל למו"פ. במסמך ביקשו תקצוב לחמש שנות-אדם בשנה למשך שלוש שנים. בתום ההצגה, שאל אורי רכב שהיה מהנדס המערכות הראשי ברפאל: "אתם תחקרו ותכתבו דוחות במשך שלוש השנים, אך איך נדע שההשקעה השתלמה?" התשובה של יצחק הייתה: "אם בתום שלוש השנים, חצי מתקצוב הקבוצה יגיע מפרויקטים, יוכח שההשקעה הייתה כדאית". הוועדה אישרה את התכנית ויצאנו לדרך.

מדידי הגירו המדויקים באותה תקופה, ששימשו במערכות אינרציאליות, היו רכיבים מסוג Dynamically Tuned Gyro (DTG). הדינמיקה של רכיב זה מתבססת על יצירת רוטור "חופשי" באמצעות מתלה קפיצים מיוחד. אלו רכיבים מורכבים ביותר ומעטות החברות בעולם שיכולות לפתח ולבנות רכיבים מבצעיים מסוג זה.

יצחק הנחה באותו זמן מהנדס שעבד בתמ"מ לתואר שני בנושא DTG והיה לו רעיון לפתח מדיד מהסוג Magnetically Tuned Gyro. ברעיון זה יצירת הרוטור החופשי מתבססת על אנטי-קפיץ מגנטי. בשנת 1981 הצטרף אודי נצר, עם סיום לימודי התואר הראשון, והתחלנו לבדוק את הרעיון. המדיד הנ"ל מצריך בקרה בחוג סגור וגם בנושא הבקרה התחלנו לעבוד. אבל הרעיון לא הבשיל למדיד מבצעי.

במהלך פיתוח ה-MTG התברר כי כדי לעסוק ברכיבים אינרציאליים נדרשת תשתית ייעודית. בסקר מתקנים התברר שפרויקט "חמודון" רכש שולחן מסתובב מדויק לצורך בחינת רכיבים אינרציאליים. התחלנו להיעזר בשולחן שלהם ולטפל בהזמנת שולחן למוקד שלנו.

¹ בעבר מנהל חטיבת אווירומכניקה (1977 – 1981) וכיום ראש ענף היסטוריית רפאל (בדימוס)

יום אחד הגיע **ישי נצר** ליצחק ובאמתחתו רעיון למדיד ג'ירו קצב (מהירות זוויתית) דו-צירי עם מדידה בשיטה אופטית ייחודית. שיטת המדידה התבססה על נורית לד (LED) וגלאי חצוי. בעזרתם ניתן למדוד תנועות זוויתיות של רוטור מסתובב. התחלנו לפתח ג'ירו עם רוטור סימטרי, אולם התברר שג'ירו כזה מודד אמנם מהירויות זוויתיות, אולם הוא רגיש לתאוצות קוויות. כלומר, תאוצות קוויות גורמות לזיוף במדידת המהירות הזוויתית. לישי הייתה אינטואיציה הנדסית מעולה. הוא העריך שניתן יהיה לקבל מהירות זוויתית מדויקת בשני צירי מדידה מרוטור לא סימטרי, כלומר רוטור תיבתי. יצחק פיתח את משוואות התנועה עבור הרעיון של ישי והאינטואיציה התאמתה. מפתרון משוואות התנועה של הרוטור המסתובב, התמוך בציר קפיצי סימטרי, מתקבל שכאשר מופעלת על הרוטור מהירות זוויתית בכיוון ניצב לציר הסיבוב, הרוטור מבצע תנודות כפיפה בתדר כפול ממהירות סיבוב הרוטור, ואמפליטודת התנודה פרופורציונלית למהירות הזוויתית. ניתן למדוד את שני רכיבי המהירות הזוויתית על ידי בדיקת הפאזה מול הצירים הראשיים של הרוטור.

התחלנו לפתח מדיד מהסוג הנ"ל. מעבר לחוסר הניסיון בהנדסת מערכת בפיתוח רכיב אינרציאלי, היה צורך בידע במגוון תחומים טכנולוגיים, שנדרשים לפיתוח רכיב כזה, כגון:

תכן דינמי. התכן הדינמי הבסיסי של המדיד הינו ברמה הגבוהה ביותר מבחינת אנליזה. בוצעו ניתוחי רגישות רבים ופורסמו מאמרים רבים בעיתונות המקצועית ובכנסים מתאימים. בהמשך אף נרשמו פטנטים כדי להגן על הידע שהתפתח.

איזון דינמי. הפיתוח דרש גיבוש תהליכי איזון דינמיים עבור מצב בו הרוטור יושב על מערכת קפיצית שמסתובבת בתדרים מעבר לתדרים העצמיים ("על קריטי"). נדרשנו לעבודה והתמחות בגיבוש תהליך ייחודי לאיזון הדינמי.

מיסוב זעיר. בשנת 1984 הצטרף מהנדס צעיר, **פטריק בר-אבי** שנפגש עם נציגי חברות מיסבים ולמד מהם כיצד לתכנן את המיסוב. היה נדרש להתאים מחט קפיצית למיסב כדי שההרכבה תהיה בלחץ הנכון. היתה התלבטות לגבי סוג המנועים ונבחר מנוע היסטריזיס, שלא היה זמין בשוק, והיה צורך לתכננו ולמצוא דרכים ליצרו.

דיוקי יצור. ייצור המחט הקפיצית דרש דיוקים חריגים. אנשי המעבדה הטכנית נדרשו לפתח תהליכי עבודה ייחודיים, יחד עם יצרנים פנימיים וחיצוניים, כדי להגיע לדיוקים הנדרשים.

מדידת אמפליטודת התנודה. זו נמדדה עפ"י הרעיון של ישי בעזרת נורית (LED) וגלאי חצוי. מוט זעיר שהיה חלק מהציר שאליו חובר הרוטור, וביצע את התנודות בתדר כפול ממהירות סיבוב הרוטור, הטיל צל על הגלאי החצוי וגרם להבדלי תאורה בין שני חצאי הגלאי שהיו לינאריים לאמפליטודת התנודה. ההזזות שנמדדו עקב כניסת המהירות הזוויתית היו זעירות (חלקי מיקרונים). אנשי המקצוע בשטח אלקטרואופטיקה טענו שלא ניתן למדוד תזוזות כה זעירות (הזזות בסדר גודל של חלקי אורך גל). אודי, בעזרת הטכנאי **גבי מרג'י**, בנה מתקן סטטי שבו נעשה שימוש בצמד הגלאי החצוי והלד ובעזרתו הוכחנו שמערכת המדידה הזו מסוגלת למדוד תזוזות זעירות כנ"ל. את ההסבר הפיזיקלי לכושר המדידה היוצא דופן נתן הפיזיקאי **ד"ר יהודה נחשון** שהסביר שהגלאי החצוי סופר פוטונים וההבדל בספירה בין שני חצאי הגלאי מבטא את אמפליטודת התנודה.

אטימת המדיד. נושא אטימת המדיד על מנת שיעמוד בתנאי העבודה הקיצוניים, נחקר: נבדקו מספר שיטות אטימה כגון הלחמה או הדבקה ולבסוף נבחרה שיטת האטימה שהיתה קיימת במחלקת המיקרואלקטרוניקה ברפאל. להם היתה מכונה שריתה בשיטת seam sealing קופסאות אלקטרוניקה מלבניות ובהן זיווד אלקטרוני. המכונה אפשרה ריתוך באווירת חנקן. בעזרת **אריה שחם**, מתכנן של מוקד המדידים, תוכנן התקן שאפשר למכונה שהיתה במחלקת מיקרואלקטרוניקה לבצע אטימה של המדיד הדו-צירי בעל המבנה הגלילי. מאז כל המדידים שיוצרו, נאטמו ע"י אותה מכונה.

במקביל, נעשה רכש ציוד שולחן מסתובב מדויק, מכונת איזון לאיזון רכיבים זעירים, מרעד מיניאטורי, מקנור (מקרר ותנור בתא משותף) ועוד.

יום אחד פנה אודי ליהודה לאשר לעשות חור במקנור ולתכנן עבורו מבנה על גלגלים שבעזרתו נוכל להציב את המקנור מעל השולחן המסתובב ולמדוד ביצועי המדידים בטווח הטמפרטורות שנדרש במערכות צבאיות טיליות. היה חשש שהמקנור ייהרס, ותקציב למקנור חדש לא נקבל. אודי התקש ולקחנו סיכון שהצליח. מאז הייתה לנו מערכת ייחודית מפוקדת מחשב, שאפשרה לבדוק ביצועי מדידי ג'ירו בכל טווח הטמפרטורה הנדרש. בהמשך, הגיעו למוקד מדידים שנרכשו עבור פרויקטים שונים ברפאל לבדיקה, על מנת לוודא שהמדידים נותנים את הביצועים הנדרשים בכל טווח הטמפרטורות הצפוי.

בשלבם הראשונים של פיתוח המדיד הדו-צירי ניסינו להתאימו לדרישות של פרויקט "פיתון 4", שם השתמשו בשני מדידים חד ציריים קונבנציונליים מתוצרת תמ"מ – תעשייה האווירית. אולם השלבים בהם נמצא פיתוח "פיתון 4" כבר לא אפשרו להשתלב בפרויקט. יחד עם זאת, יש לציין בחיוב את המוכנות של אנשי הפרויקט לבחון את הג'ירו החדש במקביל לג'ירו הקיים. ניסויים אלו היו ניסויים מבצעיים ראשונים ונתנו לנו את הביטחון להמשך.

באותו זמן החל פיתוח טיל נגד טנקים "גיל". שם תכננו לזווד בראש הביות שני מדידים חד ציריים זהים לאלה שבפרויקט "פיתון 4". אודי שכנע את אנשי פרויקט "גיל" לבצע גם תכן של ראש הביות עם אב הטיפוס של המדיד שלנו ולבצע ניסוי שיגור ראשון של הטיל עם המדיד הדו-צירי. למדיד שלנו היו שני יתרונות- משקל מופחת, וזמן התנעה קצר בהרבה. הניסוי הצליח ובכך נקבע שהטיל יכול את המדיד שלנו, בעוד שהתכן המקורי עם 2 מדידי תמ"מ נזנח.

זו היתה פריצת דרך. בדיונים רבים התנגדו אנשי חטיבת טילים לשלב רכיב אינרציאלי מקבוצה חסרת ניסיון הן בפיתוח והן בייצור של מדידים. לפיכך, היה חשש לאבד את התמיכה בשילוב הרכיב בתוך הטיל. הצענו שאנשי חט"ל יפגשו עם עובדי המוקד ויעברו איתם על הדוחות ותהליכי הפיתוח מול אלו של תמ"מ שמוכרת כבית המדידים בישראל. **גיורא שלגי** שלח את הגמלאי **ד"ר יוסי לוי** שהיה מבכירי רפאל, בעל ניסיון רב של עבודה עם תמ"מ בפרויקט "חמודון" וייצורו. התרשמותו החיובית, עזרה להתגבר על ההתנגדויות. היה זה הישג גדול.

מבחינת איוש, אודי מונה לראש הקבוצה ב-1985 ויהודה מונה לר' תחום. במהלך התקופה השלים אודי את לימודי התואר השני בהנחייתו של יצחק. העבודה כללה ניתוח של גיירו זוויתי רוטט המבוסס על עקרון קוריוליס. פיתוח זה שימש אח"כ כבסיס לרכיבי המיקרומכניקה שיפותחו ברפאל. בשנת 1989 יצא אודי לדוקטורט בסטנפורד ופטריק מונה כמחליפו עד שיצא בעצמו ללימודי דוקטורט.

השלב הבא היה למצוא יצרן. חברת קונדור פסיפיק בקליפורניה, ארה"ב, הייתה בבעלות של יהודי שהקים סניף בירושלים בהתבסס על פורשי תמ"מ. פנינו אליהם, וסיפרנו שיש לנו מדיד דו-צירי בחוג פתוח. תגובתם היתה שאין כזה דבר בשוק המדידים בעולם. לאחר ביקור מומחי החברה במוקד ברפאל והדגמת הביצועים הם התלהבו וקישרו אותנו למפעל האם בקליפורניה.

נסענו לארה"ב עם המדיד והדגמנו בפניהם את ביצועיו. גם האמריקאים התלהבו מהביצועים והציעו להיות היצרנים. נחתם הסכם בין רפאל לקונדור פסיפיק לייצור המדיד, אך ההסכם לא התממש, כי היה צורך להשקיע בסיום פיתוח (כגון מיזעור האלקטרוניקה ואטימת המדיד) ומאידך, לא היו עדיין הזמנות לכמויות משמעותיות של מדידים מצד פרויקט "גומד". וכך קונדור פסיפיק יצאה מהתמונה.

בהמשך גם חברת בנדיקס בארה"ב התעניינה באפשרות לייצר את המדיד. גם כאן היתה תגובה מאוד טוב וחתמנו איתם על חוזה ייצור. גם בבנדיקס חיכו להפגנת רצינות והזמנת כמות ראשונית של מדידים. מאחר ולא היתה הזמנה כזו, הם יצאו מהתמונה. בשלב מסוים הצענו לתמ"מ לייצר את הרכיב אך גם הם סירבו.

בפגישה בין ראשי החטיבות הוחלט שהייצור יתבצע במיט"ל, מפעל הייצור של חטיבת הטילים. טכנאי קבוצת הייצור שלנו, **איציק אגמון ויעקוב מקל**, הדריכו את קבוצת מיט"ל בתהליכי הייצור. כאשר מיט"ל קיבלה הזמנה מפרויקט גומד ל-5 מדידי ג'ירו ראשונים, רצו במיט"ל להוציא הזמנה לעשרה מיסבים (זוג לכל מדיד וחמישה צירים). היה צורך בעבודת הסברה שהדיוקים הנדרשים להתאמות הרכיבים, ונדרש להזמין מלאי גדול יחסית של מיסבים ושל צירים. המיסבים המוזמנים מגיעים ממוינים בתחום מידה של שתי אלפיות והצירים מגיעים עם תוצאות ביקורת למידה של הציר באזור תושבת המיסב. כך מתאפשרת התאמת הציר למיסב בטולרנס של שתי אלפיות, כפי שהומלץ ע"י יצרני המיסבים.

בפרויקט הטיל "זוויתן" התעוררה בעיה: המנ"ר שהוזמן בתמ"מ נכנס לרוויה בזמן שחרור הטיל. כדי להתגבר על הבעיה, הפרויקט פנה למוקד מדידים בבקשה שנתכנן עבורם מדיד לתחום מהירויות זוויתיות גבוהות שיאפשר מדידה בזמן שחרור הטיל ויקזז את בעיית כניסת המנ"ר לרוויה (גם במחיר של פגיעה בדיוקים). הם היו זקוקים לציר מדידה אחד בלבד. המוקד בהובלתו של **נפתלי ס'** ביצע את המשימה והמדיד זווד עפ"י הדרישות בטיל. מאחר ובסה"כ נדרשו רק כמאה מדידים עבור פרויקט זה, הייצור לא הועבר למיט"ל וכל הייצור בוצע במוקד המדידים בידיהם הנאמנות של איציק ויעקוב.

לא חסרו בעיות בהעברה לייצור. כשנכשל פעם שיגור טיל "גיל", תלו אנשי הפרויקט את התקלה בכשל המדיד. נפתלי חקר את התקלה וגילה שמישהו במיט"ל החליט, בגלל צפיפות בראש הביות, שניתן לוותר על בורג אחד מבין השלושה שמחברים את המדיד לראש הביות של הטיל. החקירה העלתה, שבזמן השיגור, התאוצה המתפתחת, גרמה לתנועה זוויתית רגעית של המדיד יחסית לראש הביות ולכשל הבקרה. שני מודלים חישוביים שבוצעו ע"י יהודה ועזרא אימתו את התופעה. חיבור המדיד כפי שתוכנן היה מונע את הכשל. הנושא הובהר לאנשי הייצור, והתקלה לא חזרה. בסך הכל יוצרו במיטל במהלך השנים **עשרות אלפי מדידים דו-ציריים** עבור פרויקט "גיל" (**בשווי כולל מאות מיליוני דולר**). המדיד נרשם כפטנט רפאלי בארה"ב ובאירופה ואנשי המוקד נתנו עליו הרצאות בכנס ג'ירו המתקיים מדי שנה בגרמניה. למעשה, ההישג המרכזי הוא שהמדיד איפשר את פיתוח ראש הביות של "גיל". זהו מוצר מוביל של רפאל ונמכר למגוון לקוחות בכמות גדולות ולפרויקט לא היה פתרון זמין אחר.

מוקד מדידים שימש גם כרפרנט עבור מדידי מצב שפותחו עבור פרויקטים בחט"ל בחברת מט"ס. מדיד מצב מודד את הזווית המתפתחת במערכת אליה הוא מחובר. מדידי המצב הנ"ל הונעו בעזרת מיכל חנקן בלחץ גבוה. התברר שלרוסים יש מדיד מצב שההנעה שלו מתקבלת מייזום של חומר הדף. נעשה ניסיון לפתח מדיד כזה. חלוקת עבודה היתה כדלקמן: במוקד התבצע התכנון הדינמי בעוד שלצורך ייצור החומר הודף הוטלה המשימה על קבוצת ההודפים ברפאל. תכנון החלק הדינמי הושלם ע"י פטריק אך אנשי ההודפים לא הצליחו ליצר הודף מתאים.

במוקד המדידים התבצעה חשיבה על כיוונים להמשך התפתחות. נשקלה אפשרות להיכנס לפיתוח מדידים מהסוג של fiber optic gyro (FOG) ואפילו בוצעה על השולחן המסתובב בדיקת הוכחת רעיון מוצלחת, אבל ממפא"ת הובהר שמדידי FOG הם בתחום הפעילות של תמ"מ. לכן הוחלט להיכנס לפיתוח מדידי ג'ירו בתחום ה MEMS כלומר מדיד ג'ירו מיקרומכני. מדידים מסוג כזה כבר היו בשוק, אבל לא כאלה שעומדים בדרישות של מערכות צבאיות ושניתן לרכוש בשוק.

תחום דינמיקה ובקרה הוקם עם חזרתו של אודי מלימודי הדוקטורט. עם הקמת התחום הוחל בפיתוח מדידי ג'ירו מיקרומכניים. המוקד הגיע לשיתוף פעולה רב שנים עם המעבדה למיקרומכניקה בטכניון. בשנת 1993 הוגדר אודי על ידי משרד המדע כ"מוביל לאומי למיקרומכניקה".

בהמשך מונה נפתלי כראש תחום דינמיקה ובקרה ו**עזרא שר** מונה לר' קבוצת המדידים.

לפעילות הפיתוח של מדידי ג'ירו מיקרומכניים ניתנה תמיכה של מפא"ת ובהמשך גם תמיכה של המדען הראשי במשרד המסחר והתעשייה. נרכש ציוד שכלל חדר נקי ונקלטו עובדים שהתמקצעו בבעיות הכרוכות במיזעור. המדיד שפותח מתבסס על קורה מיקרומכנית רוטטת בתדר גבוה. במדיד הג'ירו המיקרומכני שפותח נעשה שימוש בשיטת המדידה הייחודית שפותחה במדיד הדו-צירי. כלומר בעזרת LED וגלאי חצוי, אלא שכאן נעשה שימוש ברכיבים מיקרומכניים. מדידי הג'ירו המיקרומכניים המסחריים מדדו את שינוי ההשראות.

שר המדע באותה תקופה **בני בגין**, ביקר במוקד, התרשם והבטיח לתמוך, אבל תקופה קצרה לאחר מכן, התפטר מתפקידו...

בהמשך, עם פירוק חטיבת מערכות ב-2007, הוחלט בהנהלת רפאל לאחד את כל פעילויות המיקרומכניקה ברפאל (היו באותו זמן פעילויות בשטח חומרים ותהליכים, בחטיבת מנור ובמוקד מדידים). הוקמה מחלקת מיקרומכניקה בחטיבת מנור וחלק מעובדי המוקד הצטרפו למחלקה והמשיכו שם בפיתוח מדידי ג'ירו ורכיבים מיקרומכניים אחרים. ראש תחום המדידים היה **רפי יחיאלי**. עם העברת פעילות המיקרו-מכניקה לחטיבת מנור, עברה מעבדת מדידים לחסות תחום הבקרה. ומוקד מדידים חדל מלהתקיים. על המשך פעילות פיתוח מדידי ג'ירו במסגרת מחלקת מיקרומכניקה יסופר בעתיד בסקירה נפרדת של העוסקים בנושא.