

The Systems Engineering process must begin by discovering the real problem that needs to be solved; the biggest failure that can be made in systems engineering is finding an elegant solution to the wrong problem.

INCOSE Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)²

מבוא להנדסת מערכות

בשנות ה-60 של המאה ה-20 הוחלט בשבדיה על פיתוח של מטוס קרב חדש. החשש אז היה, בין היתר, מפני מתקפה של הרוסים שתשתק את שדות התעופה. כדי להתמודד מול תרחיש זה הוחלט להכשיר כמה קטעי כביש שיוכלו לשמש בשעת חירום מסלולי המראה חלופיים. לצורך התאמה לקטעי הכביש הקצרים נקבעה למטוס דרישה מאתגרת ביותר לאותם זמנים: יכולת המראה ונחיתה ממסלול באורך של 500 מ' לכל היותר. כדי לעמוד בדרישה זו, מהנדסי חברת סאאב (SAAB) תכננו למטוס מנוע ייחודי וחסר תקדים בעולם בזמנו. המנוע כלל מנגנון הגברת האצה (After Burner) ומנגנון היפוך דחף (Thrust Reversal). המטוס קיבל את השם Viggen, ולמרות האתגר ההנדסי העצום, הפרויקט עמד בציפיות ובסך הכול נחשב להצלחה גדולה. לכאורה, ההשקעה האדירה במחקר ופיתוח, בניסויים ובהמשך לאורך מחזור החיים של המטוסים השתלמה.



מטוס ה-Viggen

באחד הכנסים הבינלאומיים להנדסת מערכות הגיעה אליי עדות על מהנדס צעיר שהחל את עבודתו בחברת סאאב (SAAB) בשנות ה-80. אותו מהנדס התעניין בשאלה הבאה: מה היה קורה אילו המטוס היה נבנה ללא מנגנוני הגברת האצה והיפוך דחף, מבלי לשנות את שאר פרמטרי המנוע. לפי החישובים שלו מטוס עם מנוע דומה ללא מנגנוני הגברת האצה והיפוך דחף היה יכול להמריא ולנחות ממסלול של 550 מ', מול הדרישה המקורית של 500 מ'. נראה לכן, שבדיעבד ההשקעה במנוע מתקדם ומורכב

² BKCASE Editorial Board. 2019. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*, v. 2.0, R.J. Cloutier (Editor in Chief), Hoboken, NJ: The Trustees of the Stevens Institute of Technology. Accessed September 1 2019. www.sebokwiki.org. BKCASE is managed and maintained by the Stevens Institute of Technology Systems Engineering Research Center, the International Council on Systems Engineering, and the Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.

הביאה לקיצור מרחק ההמראה והנחיתה ב־50 מ' בלבד...

הדוגמה של המנוע מטוס ה־Viggen ממחישה את ההבדל בין "לבנות את המערכת הנכונה" לבין "לבנות את המערכת נכון". לאחר שערך היעד של המראה ונחיתה ממסלול של 500 מ' נקבע כדרישה, כל שנותר הוא לבצע את הנדסת המערכות המיטבית, ואין ליצרן את מרחב התמרון והיכולת לבחון שוב את ההנחות המבצעיות הרלוונטיות.

הנדסת מערכות איננה רק תהליך של מימוש דרישות ועמידה בלוחות זמנים, בתקציב ובביצועים, כמו שנהוג להגדיר ולמדוד פרויקט. יש דוגמאות רבות לפרויקטים שעמדו בכל היעדים מבחינת עלות, ביצועים ולוח זמנים, ולמרות זאת הם לא הצליחו להביא את הערך שציפו לו מבחינת הלקוח. הערך של המערכת היא המהות והתכלית של פעולתה מעבר לביצועים, לתקציב וללוחות הזמנים בפרויקט. שאלת הערך של המערכת, המוצר או השירות היא השאלה שנמצאת בלב ליבה של אמנות הנדסת המערכות. אנו נפגוש שאלה זו ונתבונן בה מזוויות שונות לאורך הפרקים השונים של הספר. אך תחילה נפנה לכמה הגדרות בסיסיות בעולמות הנדסת המערכות.

הנדסת מערכות - מהי?

בעולם של ימינו המערכות נעשות מורכבות יותר ויותר ומשלבות עולמות תוכן שונים. מטרת מהנדס המערכות היא להגיע לאפיון ולבחירה נכונה של החלופות בהתאם לביצועים הנדרשים. מהנדס המערכות נדרש לעמידה ביעדי עלות המוצר ולוחות הזמנים לפיתוח תוך התחשבות בתפעול ואחזקה לאורך חיי המוצר. על כן העיסוק האופייני של מהנדסי המערכות איננו מחקר ופיתוח עצמאי, אלא הגדרת דרישות, אפיון, חקר ביצועים הנדסי וניהול פרויקטים.

"מערכת היא מבנה או אוסף של מרכיבים שונים שמביאים לתוצאות שאינן ניתנות להשגה על־ידי המרכיבים בנפרד"³. מערכות בכלל ומערכות מורכבות בפרט כוללות תכונות מתהוות (emergent properties) - תכונות של המערכת אשר אינן קיימות במרכיבים שלה. במערכת של גוף האדם קל להבחין בתכונות של הגוף השלם שאינן קיימות באיברים לעצמם. דוגמה נוספת היא עוצבה (=אוגדה) בצה"ל. עוצבה היא יחידה צבאית המכילה את כל המרכיבים שנדרשים כדי לאפשר לה לפעול באופן עצמאי ולנהל מערכה, ותכונה זו אינה קיימת באף מיחידות המשנה שמהן מורכבת העוצבה, כמו חטיבות שריון, חיל רגלים ויחידות לוחמות ולוגיסטיות נוספות.

נהוג להבחין במבנה, בהתנהגות ובפונקציה של מערכות. מבנה המערכת הוא אוסף המרכיבים הנכללים בה: מודולי חומרה, תוכנה, מתקנים מכניים ואמצעים נוספים. התנהגות המערכת היא האופן שבו המערכת פועלת לאורך זמן ובהתאם לאינטראקציה עם סביבתה. הפונקציה של המערכת היא אוסף המשימות שהמערכת אמורה לבצע ולשמן נוצרה.

בשנים האחרונות נפוץ המונח מערכת של מערכות (System of systems). הכוונה היא לאוסף גדול של מערכות הקשורות זו בזו או המשתפות פעולה לצורך ביצוע משימה מסוימת וקבלת יכולות שאינן אפשריות במערכת אחת. דוגמה למערכת של מערכות היא שדה תעופה שבו מטוסים, מערכות בידוק, מערכות לוגיסטיות ומערכות תחבורה עובדות יחד כדי לספק שירות לנוסע. כל אחד מאלו הוא מערכת בפני עצמה המורכבת

³ תורגם בידי המחבר על־פי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות - INCOSE International Council on Systems Engineering :www.incose.org

ממכלולים שונים.

"הנדסת מערכות היא גישה בִּינתחומית ואמצעים שמאפשרים מימוש של מערכות מוצלחות"⁴. הנדסת מערכות עוסקת בהגדרת צורכי הלקוח והפונקציונליות הנדרשת בשלבים המוקדמים של תהליך הפיתוח, תיעוד הדרישות ולאחר מכן תיכון ואימות בראיית כלל ההיבטים של הבעיה השלמה: אופן הפעולה, ביצועים, בחינה, ייצור, עלות ולוחות זמנים, אימון ותמיכה, גריטה.

הנדסת מערכות משלבת את כלל עולמות התוכן (דיסציפלינות) וקבוצות ההתמחות למאמץ צוותי משולב. מאמץ זה יוצר תהליך פיתוח מובנה שמתקדם מקונספט לפיתוח והפעלה. ההתייחסות של מהנדס המערכות היא לכלל ההיבטים העסקיים והטכניים של הלקוחות במטרה לספק מוצר איכותי שמתאים לצורכי המשתמש.

תפקיד מהנדס המערכות

מהנדס מערכות הוא "המנכ"ל של המהנדסים". מדוע מנכ"ל - מנהל כללי - נקרא כך? מכיוון שהוא אינו שייך לאף אחת מהיחידות המקצועיות ה"לא-כלליות" בחברה, כמו שיווק, פיתוח או ייצור. ברמות זוטרות יותר תיאור תפקיד העובדים ביחידות אלו הוא מוגדר וממוקד: נציג שירות לקוחות, ראש צוות שירות לקוחות ואפילו סמנכ"ל שירות לקוחות. המנכ"ל, לעומת זאת, מתאם את הגופים המקצועיים כולם, אינו שייך לאף אחד מהם ולכן הוא מכונה - "כללי".

בדומה למנכ"ל בארגון, מהנדס המערכות נדרש לנהל ולהנחות את עבודת צוותי ההנדסה בפרויקט או בחברה. לעיתים קרובות מהנדס המערכות מגיע מאחד התחומים המקצועיים המשתתפים בפרויקט. למרות זאת וככלל, הוא איננו עוסק עוד בביצוע משימות פיתוח בתחומי השכלתו. תפקידו בפרויקט כולל הקצאת דרישות מערכתיות וניהול מימוש של המשימות על-ידי מהנדסי הפיתוח.

בעולם מקובל להשתמש בהמחשה גרפית המכונה "מודל ה-T" להצגת היחס בין תחומי הידע והמקצועיות של מהנדס מערכות. המלבן האנכי המרכיב את בסיס האות T הוא עולם התוכן ההנדסי שממנו הגיע מהנדס המערכות. הגובה של המלבן האנכי - ה"רגל" של האות T - מייצג את עומק הידע והניסיון המעשי שיש למהנדס בתחום המקצועי שלו. הממד הצר של המלבן האנכי מייצג את התחום המצומצם יחסית שבו אותו מהנדס שולט שליטה מלאה.

המלבן האופקי העליון הוא הידע הרחב שמהנדס המערכות נדרש לו לצורך עבודה והנחיה של כלל המהנדסים מעולמות תוכן אחרים. כשם שמלבן זה ממוקם מעל ה"רגל" של האות T, המייצגת את המקצועיות הבסיסית, כך היכולת של מהנדס המערכות להבין ולהנחות מהנדסים מעולמות תוכן אחרים נסמכת על הידע והניסיון בתחום שלו.

כדי להמחיש את תחומי האחריות של מהנדס מערכות מול תחומי האחריות של מהנדס פיתוח, נשתמש בדוגמה מעולם הסלולר. נתבונן במהנדס מחשבים העובד על תכן של מסך טלפון חכם חדיש. בהתאם לחברה שבה הוא עובד, המהנדס עשוי לעסוק בכתיבת תוכנה למעבד בקרת מסך, ביצוע סימולציות תכן חומרה להגדלת קצב ריענון המסך, בדיקות תאימות והפעלה מול תקני וידיאו שונים, תכנון מארז פלסטיק חדשני וכדומה.

לעומת מהנדס הפיתוח, מהנדס מערכות של הטלפון החכם מנהל צוות של מהנדסים ומומחים. כל אחד מהם

⁴ תורגם בידי המחבר על-פי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות - INCOSSE: <http://www.incose.org/AboutSE/WhatIsSE>

אחראי על אחד מהתחומים המקצועיים: חומרה, תוכנה, זיוד, עיצוב מוצר ועוד. מהנדס המערכות מבצע הקצאת דרישות, הגדרה של המוצר, אופטימיזציה מערכתית ותיעוד בין פרמטרים. לדוגמה, הוא עשוי להחליט על הורדת רזולוציה של המסך כדי לשפר את ביצועי הסוללה של המכשיר. כך הוא עשוי להעלות את הערך הכללי של המוצר ולו גם במחיר של ויתור על ערך מיטבי של אחד הפרמטרים.

התוצרים של עבודת מהנדס המערכות יכולים להיות ניתוח דרישות, הגדרת משימה, ניתוח חלופות לאורך מחזור החיים, ארכיטקטורה של המערכת, תוכנית בדיקות ותוצרים רבים נוספים. לסיכום, מהנדס הפיתוח עוסק בתכנון ופיתוח של רכיבי הפתרון: אלגוריתם, פתרון טכנולוגי ועוד. לעומת זאת, מהנדס המערכות עוסק ברמה הטכנית הרחבה של הגדרת מאפייני הפתרון, המוצר או השירות.

רמת המומחיות הטכנית הנדרשת ממהנדס הפיתוח היא גבוהה מאוד. בה בעת המומחיות הטכנית של מהנדס המערכות היא רחבה ומקיפה תחומים רבים, אך לעיתים היא אינה ברמת ההעמקה של מהנדס הפיתוח. רמת השפעה מערכתית של מהנדס הפיתוח בדרך כלל מצומצמת לכדי מילוי דרישות מפרט ועמידה ביעדים. לעומת מהנדס הפיתוח, רמת ההשפעה של מהנדס המערכות היא גבוהה יותר.

החשיפה של מהנדס הפיתוח ללקוחות ולצרכיהם היא בדרך כלל מצומצמת יחסית ונעשית בעיקר באמצעות ראשי צוותים ומפרטים כתובים. העבודה של מהנדס המערכות מול הלקוחות היא משמעותית ולעיתים קרובות ישירה.

הכניסה לתפקיד מהנדסי מערכות יכולה להתרחש תוך זמן קצר ובכמה אופנים. הרחבה נוספת בנושא כניסה לתפקיד מהנדס מערכות ניתנת בהמשך פרק זה.

כניסה לתפקיד מהנדס מערכות

הכניסה לתפקיד הנדסת מערכות יכולה להיות מהירה מאוד. הדבר יכול לקרות בצורה של קבלת משימות מערכתיות במקום העבודה הנוכחי, קידום או מעבר למקום עבודה חדש בתפקיד בכיר יותר. לעומת זאת, הידע והניסיון הדרושים לביצוע תפקיד מהנדס המערכות נצברים לאורך שנים רבות.

תפקיד הוא נשיאה באחריות לתחום מסוים ואוסף המשימות והפעילויות שנדרש לבצע לצורך כך, אם הוגדרו מראש ובאופן מפורש, ואם לאו.

תפיסת תפקיד היא האופן שבו העובד מבין את המצופה ממנו ויחסו לפעולות הנדרשות ממנו.

תפקיד מהנדס המערכות כולל מרכיבי ניהול, תכנון ובקרה עצמית. לעיתים אין הגדרה ברורה של מרכיבי התפקיד והמשימות הנדרשות ממהנדס המערכות. האתגרים בכניסה לתפקיד ראשון בהנדסת מערכות דומים במקצת לאתגרים בכניסה לתפקיד ראשון אחרי קורס קצינים. אם הקידום לתחום הנדסת מערכות נעשה בחברה שעבדת בה לפני כן, מתעורר אתגר בהטלת משימות ועבודה מול עובדים שהיו עמיתך עד לא מזמן. אם הקידום הוא בחברה חדשה - אזי נדרש להתמודד עם עובדים ותיקים ולהוכיח ידע מקצועי שאינו בהכרח קיים עדיין. כך או כך, קיימים אתגרים רבים בהפנמה של היעדים הנדרשים ושל ההיכרות עם המסגרת בכניסה לתפקיד.

כדי להקל על המעבר לתפקיד הנדסת מערכות נביא להלן מובאות דוגמאות לכמה אירועים אפשריים בכניסה לתפקיד. כן יוצגו ניתוחי גורמים אפשריים והצעות לכיווני התמודדות.

היעדר חניכה או הגדרה מדויקת של תחומי אחריות

כניסה למקום עבודה או תפקיד חדש במצב שבו אין מוגדרות הגדרות ברורות של ציפיות ומדדי הצלחה,

עשויה להתרחש אם נדרשת תחילת עבודה "תוך אפס זמן", למשל כחלק מפרויקט קיים ומתפקיד הדורש להציג תפוקות שוטפות.

המצב עשוי להיווצר גם על-ידי מנהל פרויקט שמפזר מטלות הנראות אקראיות ואינן ממוקדות. בעבודה של מהנדס מערכות קיים קשר מול עמיתים ובעלי עניין רבים, ויכולה להיווצר סיטואציה שבה כל אחד מהם אומר לעשות משהו אחר, בלי להגדיר תיעדוף או הירארכיה ברורה.

גורם אפשרי למצב זה הוא לחץ בעבודת המנהל או הממונה שאינו מתיר לו זמן וקשב לחניכה. גורם אפשרי נוסף הוא מנהלים עם תפיסת עולם של "לזרוק למים" הנמנעים מחניכה באופן מכוון ומצפים שהעובד ילמד הכול לבד. יש גם מצבים של חוסר תיאום בארגון, אם אין עבודה מוגדרת, ויש תרבות שבה "כולם עושים הכול".

כיווני התמודדות אפשריים למצב זה:

1. **"חתימה למגע" ובקשה אקטיבית של חניכה.** אומנם זה נשמע טריוויאלי, אבל פעמים רבות עובדים נוקטים בשיטה של המתנה להנחיה, בקרה וחניכה. להבנתם הן צריכות להגיע מתוקף העובדה שהם חדשים, "מישהו" צריך להראות להם מה עושים ועוד.

ההנחה שלפיה צריכה לבוא חניכה, אינה מתקיימת בהכרח מסיבות שונות. לכן כדאי למצוא את הדרך הנכונה ליזום ו"לרדוף" אחר תשומת הלב וההכוונה. לגיטימי לחלוטין לבקש לקבוע מועדים מוגדרים עבור מסגרת חפיפה ביומן הממונים. השורשים להצלחה מקצועית ניטעים במידה רבה בתקופה הראשונה, ויהיה קשה עד בלתי אפשרי להשלים פערים מקצועיים שנוצרו בשבועות ובחודשים של המתנה, שלא לדבר על הרושם הפאסיבי והנבון העלול להיווצר.

2. **פנייה לחניכה ועזרה במעגל רחב.** כבר ציינו למעלה שיש מצבים שבהם הממונה הישיר או החונך האידיאלי לא יהיו זמינים. זו אינה סיבה לוותר - אפשר להרחיב את מעגל המקורות לקבלת מידע רלוונטי לתפקיד ולכלול בו לא רק את הממונים אלא גם מוקדי ידע, מומחים ותיקים, עמיתים ועוד. אנשים אלו יוכלו להאיר את הסביבה המקצועית מזוויות שונות ואולי לכוון לאפיקי עשייה יעילים יותר.

3. **לימוד עצמי.** כשם שאנשים מסוימים מתקשים מטבעם בלימוד עצמי, כך גם יש אחרים הנמנעים מהשקעת זמן מרובה במעבר על תיעוד שהוא "משעמם", "ארוך", "מסורבל" ועוד. עם זאת, בכניסה לתפקיד חדש הרבה פעמים אין מנוס מעבודה רבה בהשלמת פערי ידע - קריאת מסמכים, לימוד מפרטים ועוד. לא תמיד חייבים "לשבור את הראש לבד" - מותר ואף רצוי לשתף ולבקש עזרה מעמיתים או אפילו מחברים מחוץ לארגון, אם הדבר אפשרי ורלוונטי. בכל מקרה, אם אין מקבלים רקע טוב ויסודי בתקופה הראשונה - אולי אף פעם לא ימצא לזה זמן. בסיס מקצועי חלש או היכרות שטחית עם חומרים ועם אמצעים זמינים עשויים להשפיע על הביצועים ועל התחושות לאורך שנים רבות בתפקיד.

מהנדס צעיר מול עמית בעל ניסיון

"אורח לרגע רואה כל פגע" - אדם המצטרף לצוות או לפרויקט קיים נוטה לשאול שאלות או להטיל ספק בנורמות קיימות. עובד חדש עשוי גם להציע פתרונות חדשניים על סמך חשיבה שאינה מקובעת לכללים הנהוגים או על סמך ידע טרי מהאוניברסיטה. יחד עם זאת, לעיתים קיימת מגמה של הצעת רעיונות בלי להכיר לעומק את הבעיה ואת הפתרונות שכבר נוסו ונדחו. מצב כזה הוא מתכון לקונפליקט "קלאסי" בין עובד צעיר, שאפתן ויצירתי ובין עובד "שמרן" ובעל ניסיון.

מה עושים כדי לקדם בכל זאת את השינוי? אם הרעיון, ההצעה או היוזמה יוצרים התנגדות או רתיעה של עובדים ותיקים ומנוסים, כדאי ללמוד לעומק את הנושא ואת המצב הקיים. כדי להקטין את ההתנגדות בכל מקרה רצוי לא לפסול מראש "את מה שיש" אלא להגיש פתרונות חלופיים בתור הצעות לבחינה. את הפנייה להצעת השינוי כדאי לעשות בנועם ובנחת וגם לבקש "תסביר לי את הפתרון הקיים" כדי לדעת להתמודד טוב יותר עם טענות נגדיות. לבוגר לימודים טרי קשה לעיתים להתבסס על ניסיון מקצועי בהצעת השינוי, אך ידע מעודכן מהאקדמיה יכול לשמש בסיס טוב לא פחות. כמובן, ניתן במידת הצורך ועם הזהירות המתבקשת לפנות לבעלי עניין נוספים ולממונים כדי לקדם את הנושא.

"מבחן רצינות": קבלת משימות קשות או משימות שאינן מקצועיות

יש מנהלים הנוקטים בגישה של הצבת אתגרים והטלת משימות קשות לעובד חדש כדי "לבדוק מה הוא שווה". אחרים נוהגים להטיל משימות שאינן רלוונטיות לעיסוק המקצועי המרכזי, כדי "לחבר למסגרת", להציג תמונה רחבה של עיסוקי החברה או פשוט לנסות את העובד החדש במילוי משימות באופן כללי ולהתרשם מהיכולות. סיבה נוספת לעומס משימות מסוגים שונים או שינויים תכופים במשימות ויעדים היא הרצון לבדוק אלו משימות מתאימות לעובד החדש, ומה הוא מבצע הכי טוב. תרגול כזה יכול להיות גם חלק מהכשרה טכנית או בחינת התאמה לנהלי הארגון.

בכניסה לתפקיד אין מנוס מתקופה שבה העובד החדש נדרש להוכיח את עצמו, בין היתר, תוך השקעה מרובה ולימוד עצמי. יחד עם זאת, כמו בדילמה הראשונה שהוצגה לעיל, אפשר וגם רצוי "לחתור למגע", להעלות את הנושא מול הממונים ולבקש באופן אקטיבי מטלות משמעותיות ורלוונטיות יותר. כדאי שתהליך החניכה יעבור לא בדרך חד-צדדית של קבלת משימות ומילוי, אלא תוך דיאלוג עם הממונים, קביעה של מסגרות זמנים ויעדים בתהליך החפיפה.

בעבודת הנדסת מערכות יש להיזהר מהשקעה של זמן ומשאבים במשימות מיותרות. כדי להבין במה דברים אמורים, ניזכר בכך שפרויקט מוגדר באמצעות לוח זמנים, ביצועים ותקציב. מכאן אפשר לדעת מתי אין פרויקט - אם אחד מהשלושה איננו.

נושא התקציב הוא ברור יחסית, בהנחה שהפרויקט מיועד להשגת מוצר או שירות ממשי שהוא בר קיימא ולא דו"ח, סקירת ספרות וכדומה. אם משימה נמשכת זמן רב ללא העמדת תקציב מתאים - סימן שהמשימה איננה צפויה לצאת אל הפועל.

נושא לוחות הזמנים הוא מורכב יותר אם לפרויקט אין לוחות זמנים או אין אדם הבודק אותו, סימן שהפרויקט איננו נחוץ יתר על המידה. בדרך כלל השאיפה היא לקבל את הפרויקט או המוצר "אתמול", או לכל הפחות מהר ככל האפשר (כמו בפיתוח מכשיר סלולרי חדש שצריך להגיע לשוק כמה שיותר מהר, פיתוח טיל שמיועד להסיר איום משודרג של האויב ועוד). נדיר המצב שבו יש זמן מוגדר מראש להכנה, לתכנון ולביצוע הפרויקט (כמו למשל בהיערכות לאולימפיאדה שמתוכננת להתקיים בעוד כמה שנים).

בתחום הביצועים - מצב שבו אין הגדרה מפורשת או משתמעת של התכולות הוא נדיר, אבל אם אין הגדרה מפורטת מספיק שמתאימה לבעל העניין המיועד - מדובר, שוב, בסימן שהפרויקט איננו נחוץ.

לא פשוט לזהות מצב של משימה המתבצעת בחוסר של אחד מהמרכיבים שהוזכרו: לוח זמנים, ביצועים ותקציב, בוודאי לא בשלבי ייזום שממילא כוללים רמה גבוהה של אי ודאות. אך אם מצב כזה בכל זאת נוצר, והוא נמשך מעבר לזמן סביר כלשהו ללא התקדמות, חשוב לפתור זאת כדי לא לבזבז זמן ומשאבים.

הרחבה: הנדסת מערכות בעולם של מערכים/סרגיי טוזיק⁵

טיל מודרני הוא מערכת לחימה מורכבת ביותר. הטיל כולל תתי מערכות רבות, רכיבים אלקטרוניים ומכניים וחומרים מיוחדים, אמצעי הנחיה וביות, ממשקים ועוד. פיתוח של טיל חדש הוא משימה מורכבת הדורשת משאבים רבים ועבודה של עשרות ומאות אנשים.

אלא שטיל הוא רק חלק ממערך גדול יותר. מערך זה כולל את המפעילים, כלי הרכב, השיט או הטיס הנושאים את הטיל, אמצעי אחזקה, אמצעי הדרכה ומרכיבים רבים נוספים. כדי שיכולות הטיל יבואו לידי ביטוי בשדה הקרב, יש לשלב ביחידה צבאית המפעילה מגוון כוחות ואמצעים לביצוע משימותיה והשגת המטרות המבצעיות.

כל מערך מיועד לספק יכולת מבצעית, ובמקרה של הטיל היכולות הן יכולות תקיפה או יירוט, גם אם לעיתים עובר זמן רב מקבלת מערכת או אמצעי טכנולוגי אחר מהחברה המפתחת ועד השגת כשירות מבצעית מוכחת ביחידות הקולטות. למהנדס הניגש לפרויקט של מערכת או אמצעי יש משימה חשובה - להבטיח את השילוב של המערכת בתוך התמונה הגדולה - המערך שכחלק ממנו היא עתידה לפעול.

על בעיות בתכנון משלמים באינטגרציה

באחד מהפרויקטים הראשונים שלי כקצין צעיר, הגדרתי את המפרט למכרז רכש מערכת להקלטת וידיאו עבור תחקור טיסות כלי טיס מאוישים מרחוק (כטמ"מ) של חיל האוויר. הוגדרו כל הפרמטרים הנדרשים, מלבד הגודל והמשקל. הסיבה לכך הייתה כי מערכות של היצרנים המובילים היו דומות מאוד מבחינת מאפיינים אלו, ולכאורה נתון זה לא היה שיקול למכרז.

מה רבה הייתה הפתעתי כאשר ספק לא מוכר זכה במכרז עם הצעה זולה מאוד. הבעיה הייתה, כמובן, המשקל והממדים של המכשיר שהיו גבוהים בכ־30 אחוזים מהמוצרים המקבילים. שילוב המוצר הזוכה בתחנות כטמ"מ דרש תכנון וייצור מגרות חדשות במסדי התחנה. בנוסף, המשקל הכבד של המכשיר העיקר רבות על הטכנאים שהיו רגילים למכשירים קטנים וקלים יותר שהתקין היצרן המקורי של מערכת כטמ"מ אחרת, חדשה יותר.

במקרה אחר נדרשה החלפת מערכת תקשורת במערך כטמ"מ, ללא מעורבותו של היצרן המקורי של מערך הכטמ"מ עצמה. הקליטה של מערכת התקשורת החדשה ארכה כמעט שנתיים וכללה פתרון בעיות ממשקים עם התחנה הקרקעית, התאמת התשתיות באתרי הפריסה, שילוב על גבי נגרר ועריכת ניסויי דרך, כתיבת נוהלי אחזקה, הדרכת טכנאים ומפעילים ועדכון תורת ההפעלה. במבט לאחור ברור, שמדובר היה באינטגרציה מערך טיפוסית שלא תוכננה מראש ככזאת!

מערכות, מערכים ויכולות

כבר באמצע שנות ה־70 הבחין מנכ"ל רפאל דאז ד"ר זאב בונן בשוני מהותי בין מערכות טכנולוגיות לבין מערכים צבאיים. ההבדל המהותי מתבטא בתהליכי ההתפתחות השונים שלהם. במאמרו בכתב העת מערכות, ⁶ ד"ר בונן מגדיר כך:

מערכת ברמה מסוימת, המורכבת מתת-מערכות (מכלולים), מהווה בעצם תת-מערכת של מערכת ברמה גבוהה יותר (וחוזר חלילה). [...] מערכת מתפתחת, בעיקר על-ידי "התחלפות" הדורות. דהיינו, אם לנושא

⁵ סרגיי טוזיק הוא בעלי חברת Scioint להכשרה ואימון אינטגרטורים מערכתיים; מהנדס מערכות המתמחה באינטגרציה ובדיקות מערכתיות, בעל ניסיון של יותר מ־20 שנים. בוגר תואר שני בפיסיקה שימושית במכון ויצמן למדע ותואר שני בהנדסת המערכות בטכניון, חבר פעיל ב-INCOSE_IL ובלשכה לטכנולוגיות המידע בישראל.

⁶ ד"ר זאב בונן (1975), "בעיות בהתפתחות מערכים צבאיים", מערכות, גיליון 245, עמ' 2-6, יולי 1975.

מסוים יש אורך חיים סופי, נקרא לו "מערכת". כל "מערכת", לאחר שפותחה ויוצרה ביחידה אחת או בכמויות, עוברת בדרך כלל במהלך חייה שיפורים, שיפוצים, והסבות. אולם לאחר שהתיישנה, היא "עוברת" מן העולם ומחליף אותה הדור הבא שפותח בינתיים, ושכולל תכונות חדשות בתכלית. לדוגמה: מטוס, טיל, תותח.

ד"ר בונן ממשיך וקובע:

מערך - לעומת זאת - כולל מספר רב של מערכות מסוגים שונים, המופעלות על-ידי אנשים רבים בצורה משולבת. המערך מתפתח באופן הדרגתי על-ידי שינויים חלקיים, תוספות, צירוף ולעתים גם "כריתת" חלקים. מערכים כמעט שאינם "מתים" ועוברים מן העולם, משום שבכל עת יימצאו בהם מרכיבים בעלי גילים ורמות פיתוח שונות, שצירופם יחד נראה, לעתים, מוזר. לדוגמה: מערך-קשר, רשת-רכבות, מערך חי"ר מחופר, ועוד.

המונח העברי "מערך" הקדים ביותר משני עשורים את המונח הלועזי System-of-Systems שהחל להשתרש בשיח ההנדסי והניהולי החל מאמצע שנות ה-90 כמענה להתפתחות מערכות מורכבות מבוססות טכנולוגיות מידע. ד"ר בונן⁷ זיהה שוני בתפקידי המפתחים והצבא בפיתוח מערכים לעומת פיתוח אמצעי לחימה. עיקר הפעילות המעשית בפיתוח אמצעי לחימה מתנהלת אצל המפתחים - החל ביצירת הרעיונות וכלה בביצוע הפיתוח עצמו - ואילו הצבא מגדיר את הצורך, מאשר את המפרטים, עוקב אחרי הפיתוח ומפקח עליו. לעומת זאת, בפיתוח מערכים הצבא ממלא את התפקיד העיקרי, הן ביצירת הרעיונות והן בתהליך פיתוח המערך, ואילו המפתח תורם להבנת הפרטים הטכניים, היכולות והביצועים של אמצעים החדשים ובהצעת עזרים משלימים למערך.

בעשורים האחרונים התגבשה במערכות הביטחון המערביות התובנה שיש להעביר את המיקוד מפיתוח מערכות ואמצעי לפיתוח יכולות מבצעיות (mission capabilities). כל מדינה מגדירה באופן שונה את המרכיבים שמהם מורכבות היכולות המבצעיות,⁸ אך אין שוני מהותי בין ההגדרות האלו. כך, לפי משרד ההגנה הבריטי היכולות נוצרות בשילוב של אימון, ציוד, כוח-אדם, מידע, תפיסות ודוקטרינה, ארגון, תשתית ולוגיסטיקה. משרד ההגנה של ארה"ב מגדיר את מרכיבי היכולת בניסוח שונה: דוקטרינה, ארגון, אימון, אמצעים, הכשרת מנהיגים, כוח-אדם ותשתיות. בצה"ל מקובל לדבר בהקשר זה על חמשת אבני בניין הכוח: תורת לחימה, אמצעים, כוח-אדם, אימון והכשרה ותשתיות.

מערכת ליכולת מבצעית: תהליכי שילוב אמצעי לחימה במערך

קליטת אמצעי לחימה חדשים בצה"ל מתמקדת ביצירת היכולת להוציא לפועל משימות מבצעיות מסוג מסוים ושמירת היכולת הזאת לאורך הזמן. לקראת כל משימה מתארגן מערך משימתי זמני המשלב את כלל האמצעים (אמצעי לחימה, אנשים, מידע ועוד) הנדרשים כדי לבצע את המשימה. כך, משימת תקיפה קרקעית באמצעות מטוסי קרב משלבת את הטילים המיועדים לתקיפה, מטוסי קרב שיובילו את הטילים, צוותי אוויר שיבצעו את המשימה, צוותי קרקע והציוד שלהם הנדרש להכנת הטילים והמטוסים, המידע המודיעיני, תכנון המשימה הכולל הגדרת מטרות לתקיפה ומרכיבים רבים נוספים.

הוצאת המשימה לפועל תלויה בזמינות מרכיבי המערך המשימתי וביכולת מוכחת של היחידה הצבאית

⁷ בונן (1985), עמ' 41-44.

⁸ Anteroinen, Jukka, (2012) "Integration of existing military capability models into the comprehensive capability meta-model", 2012 IEEE International Systems Conference SysCon 2012, 1-7: doi:10.1109/SysCon.2012.6189479

להתארגן למשימות בזמן ובאיכות הנדרשים. שני אלה הם התנאים לאישור כשירות משימתית של היחידה. שמירת הכשירות לאורך הזמן מחייבת קיום שני מערכים נוספים וקבועים - המערך התחזוקתי הלוגיסטי המיועד לשימור זמינות הציוד והמערך ההדרכתי המשמר את הידע של האנשים. המערכים התומכים האלה משלבים מרכיבים שונים מאלה של המערך המבצעי - מחסנים, ציוד בדיקה, טכנאים, מדריכים, חומרי הדרכה, כיתות, סימולטורים ואמצעים נוספים.

סיום הפיתוח ובדיקות המערכת רק מתחיל את המסע ליצירת היכולת המבצעית הניתנת להפעלה בשדה הקרב. ניתן לראות את תהליך מבצוע המערכת כסדרה של אירועי אינטגרציה, וכל אחד מהם מוסיף למערכת אלמנטים חדשים הנדרשים לשילובה במערך המבצעי. כל אחד מאירועים אלו מחייב למידה - גם צבירת הידע והניסיון על-ידי המשתמשים במערכת, גם למידה ארגונית המתבטאת בשינוי התהליכים הארגוניים והנהלים, וגם שינויים והתאמות במערכת עצמה ובמערכות האחרות.

מהצלחת המערכת להצלחת המערך

הצלחת כל פרויקט מערכתי נמדדת בסופו של דבר בהקמה של יכולת מבצעית חדשה או משופרת, קרי בשילוב ובהטמעה של האמצעים הטכנולוגיים החדשים בתוך המערך המבצעי, התחזוקתי וההדרכתי. באופן מפתיע למעורבות של מהנדסי המערכות הצבאיים בפיתוח של המערכות יש משקל נמוך יחסית בהצלחת שילוב המערכת במערך, על אף אחריותם כמפקחים על הפיתוח, על בקרת עמידה בדרישות וייצוג צורכי הלקוח מול המפתח לצד ממשקים של המערכת המפותחת עם מערכות אחרות ועם המשתמשים העתידיים שלה.

מסתבר כי המהנדסים הצבאיים תורמים הרבה יותר להצלחה המבצעית אם הם מתמקדים בהתאמה הדדית בין המערכת הנקלטת לבין המערך הקולט, באינטגרציה של המערכת המפותחת עם מערכות האחרות, עם התשתיות ועם המשתמשים והמאחזקים העתידיים שלה.

מהנדסי המערכות הצבאיים מתפקדים כ"מהנדסי מערכים". משימתו של מהנדס המערכים היא לתרגם היטב את צורכי המערך למאפייני המערכת בשלב הגדרת המערכת, כולל צורכי שימור הכשירות של הציוד והידע (אחזקה, תיעוד, הדרכה והכשרה).

חשוב לא פחות להתייחס להטמעת המערכת כפרויקט לכל דבר שמתקיים במקביל לפרויקט פיתוח המערכת, ולהקצות משאבים וזמן לאינטגרציה נאותה בשלבי הקליטה כולל הקצאת המשאבים להכנת המערך הקולט לשינויים הכרוכים בקליטת המערכת החדשה. כחלק מתפקידו, על מהנדס המערכים לתווך באופן רצוף בין מפתחי המערכת לבין המערך הקולט מהשלבים המוקדמים ביותר, לטובת התיאום ובשילוב בין פרויקט הפיתוח ופרויקט ההטמעה, בדרך להקמה והוכחת היכולת המבצעית המיוחלת.

מנקודת המבט של המפתח, מערכת מוצלחת עונה היטב על דרישות המפרט. עם זאת, מנקודת המבט של הלקוח המבצעי, מערכת מוצלחת היא המערכת שמשתלבת היטב במערך הקולט ומקדמת את יכולותיו. מהנדסי המערכות מטעם הלקוח צריכים לפעול כמהנדסי המערכים האחראיים על בניית המערכים העוטפים את המערכות ואת אמצעי הלחימה הנרכשים, ובכך יוצרים את היכולות המבצעיות המיוחלות.