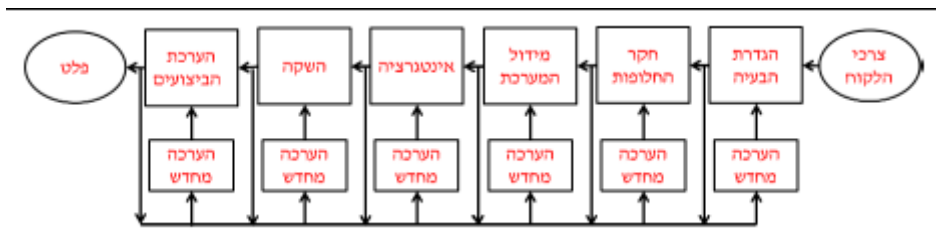


תהליך הנדסת מערכות

הנדסת מערכות מבוססת על חשיבה מערכתית - "ראיית השלם" שהוא מעבר לאוסף חלקים והיבטים. חשיבה מערכתית עוסקת בתפקוד המערכת לאורך זמן בסביבתה תוך אינטראקציה עם מערכות חיצוניות. ההתייחסות למכלולים המרכיבים את המערכת והאינטראקציות ביניהם היא בראייה של התכונות המתהוות של המערכת כולה.

תהליך הנדסת מערכות⁹ הוא תהליך בינתחומי שמיועד להבטיח כי הצרכים של הלקוח ובעלי העניין מתמלאים בדרך איכותית, אמינה, יעילה מבחינת העלות ותואמת ללוח הזמנים לאורך כל מחזור החיים של המערכת. התהליך העקרוני של הנדסת מערכות¹⁰ כולל שבעה שלבים: הגדרת הבעיה, חקר החלופות, מידול המערכת, אינטגרציה, השקת המערכת, הערכת הביצועים ובחינה והערכה מחדש. שמות השלבים באנגלית יוצרים את ראשי התיבות SIMILAR: State the problem, Investigate alternatives, Model the system, Integrate, Launch the system, Assess performance, and Re-evaluate.¹¹ מוצעות באופן מקבילי ואיטרטיבי:



תהליך SIMILAR להנדסת מערכות

בשלב הגדרת הבעיה נדרש להגדיר מתוך צרכי הלקוחות את הפונקציות ואת ההתנהגויות המרכזיות של המערכת ברמת-על ובמונחים של מה נדרש לבצע, ולא איך לבצע זאת. הגדרת הבעיה צריכה לבטא את דרישות הלקוח במונחי תפקוד או התנהגות הנדרשים מהמערכת, הגדרת תפיסת תפעול או תיאור של פער הנדרש לטיפול. ההגדרות מתבססות על מידע המגיע ממשתמשי קצה, מפעילים, מתכננים, ספקים, קונים, בעלים, סוכנויות רגולטוריות, נותני חסות, יצרנים ובעלי עניין אחרים המשפיעים או המושפעים מהמערכת. הגדרת הבעיה כוללת בדרך כלל דרישות חובה שהמערכת מחויבת לעמוד בהן ודרישות רצויות שהעלות מול התועלת של העמידה בהן תיבחן בהמשך בתהליך איתור החלופות המועדפות.

בשלב חקר החלופות נדרש להעריך גישות שונות לפתרון הבעיה מול הדרישות ובהתאם לקריטריונים של עלות, ביצועים, לוח זמנים וערך ללקוח. בדרך כלל אין חלופה שהיא הטובה ביותר בכל הפרמטרים, ולכן יש להשתמש בשיטות ניתוח ושקלול מול מספר רב של משתנים כדי להגיע אל החלופות המועדפות. הערכת החלופות היא תהליך מתמשך שנדרש לבצע באופן מתמיד ובכל עת שמתקבל מידע חדש על המערכת במהלך האפיון, התכן והייצור. מידע זה עשוי להגיע מנתוני מידול וסימולציה, מבחינת אב הטיפוס המערכתי ומבחינה של המערכת האמיתית בסביבתה.

בשלב מידול המערכת נדרש לגבש אוסף מודלים של התהליך והמוצר שיבטא את מבנה המערכת, את

⁹ מבוסס על חומרי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות.

¹⁰ על-פי המועצה הבינלאומית להנדסת מערכות.

¹¹ From A. T. Bahill and B. Gissing, Re-evaluating systems engineering concepts using systems thinking, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 28 (4), 516-527, 1998

התנהגותה, ממשקים עם מערכות בסביבה וכדומה. קיימים מודלים מסוגים שונים, כמו תרשימי בלוקים, תרשימי זרימה, מודלים מונחי עצמים, תרשימי מצבים ועוד. המודלים של החלופה הנבחרת יורחבו וישמשו לאורך כל מחזור החיים הן עבור התכנן ההנדסי והן עבור השוואה מול חלופות אפשריות בכל עת שמתגלה מידע חדש לאורך הפרויקט.

בשלב האינטגרציה נדרש לשלב את תתי-המערכות למערכת אחת תוך בדיקת הממשקים בין המרכיבים ובין המערכת לסביבתה. בסיום שלב האינטגרציה המערכת משלבת אנשים ותהליכים עסקיים ומוכנה לשימוש בסביבה האמיתית.

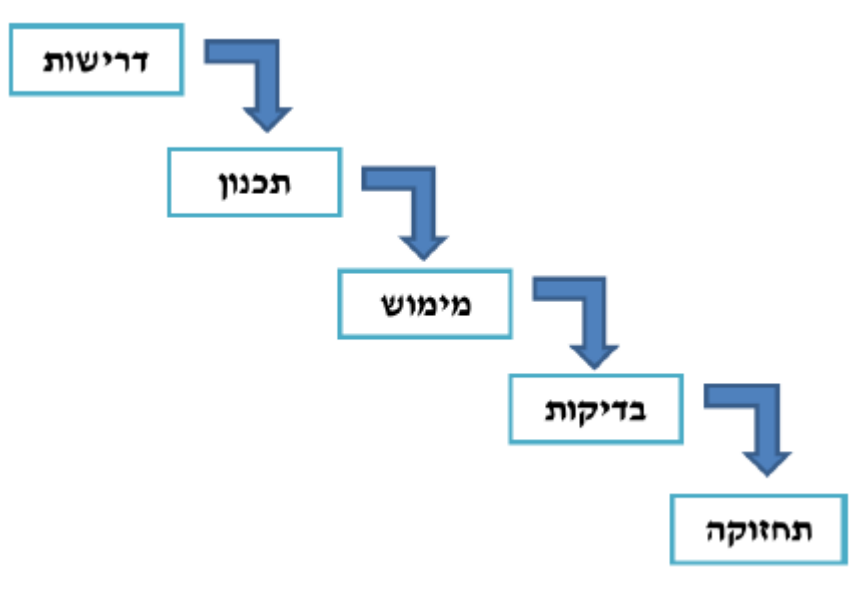
בשלב השקת המערכת - המערכת מופעלת בשלמותה ומבצעת את המשימה שלשמה נוצרה. בשלב הערכת הביצועים המערכת נבחנת לאורך זמן מול הדרישות ומול הציפיות של הלקוח בתחומים טכניים, כלכליים ואחרים. הערכת הביצועים כוללת פרמטרים טכניים (נפח, משקל, צריכת אנרגיה ועוד) לצד פרמטרים של שביעות רצון משתמשים, סוגי פניות לתמיכה ודיווחי תקלה ועוד. תהליך הבחינה וההערכה מחדש הוא אולי הפעולה החשובה ביותר מבין כל השלבים בתהליך הנדסת המערכות. הבחינה וההערכה מחדש מלווה את תהליך הנדסת המערכות לכל אורכו ומאפשרת שיפור ושינוי של המערכת על בסיס משוב והערכה.

מודלים לתהליך הנדסת מערכות

תהליך הנדסת המערכות כולל שלבים של ייזום, תכנון, פיתוח, ייצור ותפעול המערכת. המודלים לתהליכי מחזור החיים בפיתוח מערכות התפתחו לאורך השנים, וכיום מקובל להבחין בשלוש גישות עקרוניות לתהליך הנדסת מערכות ולתהליך הפרויקט בכלל:

1. **תהליכים סדרתיים** (Sequential): תהליכים שבהם הפעולות מבוצעות בסדר עוקב מייזום לייצור ותפעול; מודל מפל המים ומודל V הם דוגמאות לתהליכים סדרתיים;
2. **תהליכים מחזוריים** (Iterative): תהליכים שבהם מבוצעים מספר מחזורי תכן ומימוש, ובכל מחזור נוסף מבוצעת התאמה של המערכת להערות של הלקוחות והמשתמשים;
3. **תהליכים זריזים וגמישים** (Agile): תהליכים שבהם שלבי התכנון מצומצמים והדרישות מתפתחות יחד עם תכן המערכת או המוצר לאורך הפרויקט; בפיתוח זריז התכולות מחולקות לחבילות עבודה קטנות, והצוותים מגיעים מהר יחסית למוצר ראשוני.

אחד המודלים הוותיקים והנפוצים ביותר לתהליך פיתוח סדרתי הוא מודל מפל המים. המודל הגיע מתחום התוכנה, אך רלוונטי גם למערכות כלליות. במודל זה מתקיים תהליך פיתוח אחד רצוף שבו הדרישות, התכנון, המימוש, הבדיקות והתחזוקה מתבצעים באופן טורי. מודל מפל המים מחייב איסוף פרטני של כל הדרישות לפני המעבר לשלב התכן וביצוע תכן מפורט ומלא לפני תחילת הייצור. התארכות שלבי אפיון ותכן הם סיכון בולט בניהול פרויקטים לפי מודל מפל המים. חיסרון נוסף של תהליכים המתבצעים על-פי מודל מפל המים הוא ששינויים בתהליך התכן מתגלות בשלב מאוחר מאוד. שלב הבדיקות מגיע רק אחרי שלב המימוש, ואם נמצא שהמוצר אינו מתאים למפרט או לייצור - נדרש לשנות את המערכת שכבר יוצרה.

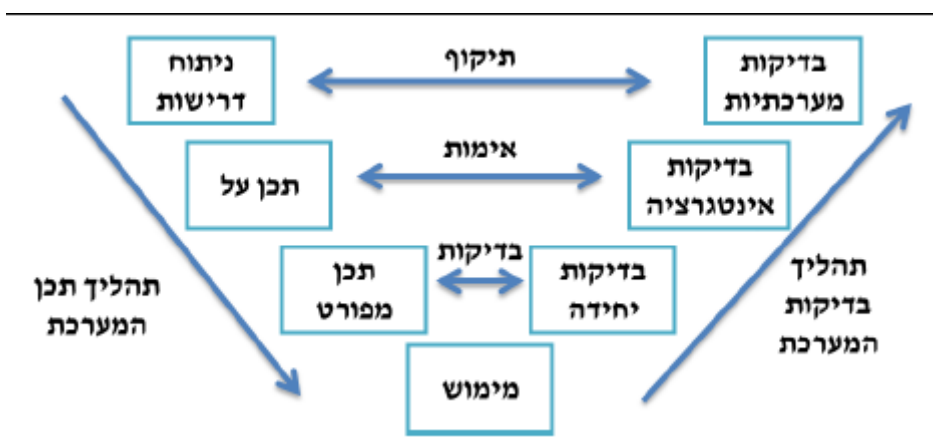


מודל מפל המים לתכן מערכות

מודל פיתוח סדרתי מאוחר יותר המבוסס על מודל מפל המים הוא "מודל ה-V". הכינוי ניתן למודל על-פי צורתו הגרפית.

תהליכי ניתוח הדרישות, התכן והמימוש במודל זה דומים למודל מפל המים. לאחר שלב המימוש מתחילים שלבי הבדיקות לאימות ותיקוף ביצועים ברמת יחידה, מכלול ומערכת מול התכן והדרישות המקבילים בכל רמה. לדוגמה, ברכב בדיקות ברמת היחידה יכולות להיות אימות ביצועים של מד הדלק במכל שיבוצעו במעבדה. בדיקות אינטגרציה יכולות להיות בדיקות הרצה של מנוע כמכלול שלם.

בדיקות מערכתיות עשויות להתבצע בצורה של נסיעת מבחן של הרכב המורכב כולו. כמו במודל מפל המים, גם כאן מוצג תהליך סדרתי אחד. לעומת מודל מפל המים, מודל V מוסיף הדגש לביצוע הבדיקות ברמות מימוש שונות, והדבר מיועד לאפשר תהליך מובנה לגילוי מוקדם יותר של תקלות אפשריות.

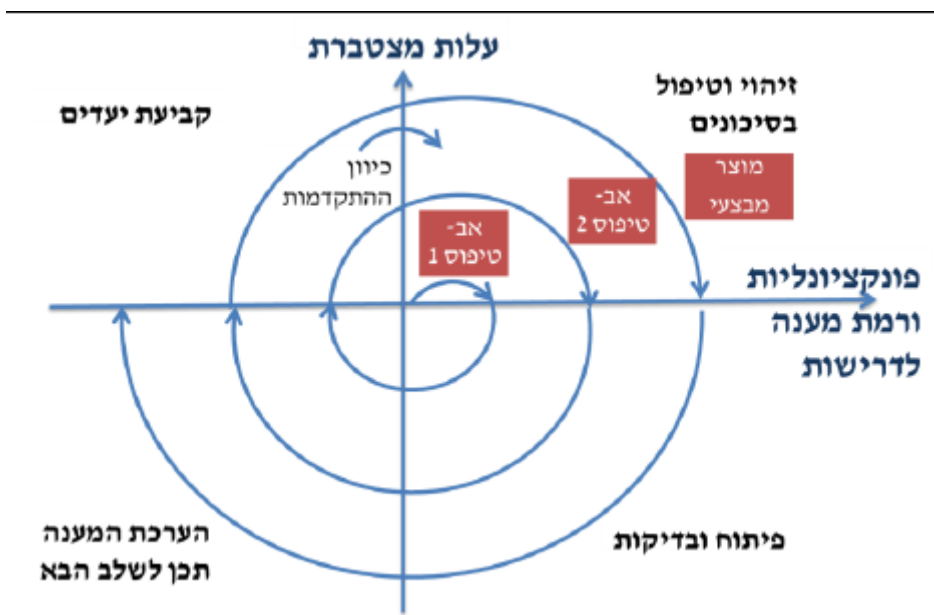


מודל ה-V לתכן מערכות

התהליכים הסדרתיים מחייבים תכנון מלא כתנאי להתקדמות לפיתוח וייצור. היתרון של שיטה זו הוא הדיוק בהגדרת המאפיינים הנדרשים והתאמה מלאה של המערכת הסופית למפרט המקור. החיסרון הגדול של השיטה הוא הזמן שנדרש לצורך ביצוע התכן, אייודאות בהגדרת הצורך שלעיתים אינה מאפשרת להכיר את

כלל הדרישות מראש, ואי-היכולת להגיב לדרישות שייווצרו כתוצאה מהכנסת המערכת לשימוש. גישה שנייה לתהליכי הנדסת מערכות היא תהליך מחזורי או איטרטיבי. בגישה זו מבוצע תכנון חלקי לפי הידוע בשלב זה והעברה לשימוש, גם אם מדובר במוצר חלקי שאינו מספק את מלוא הפונקציונליות. על בסיס הלקחים והתובנות של המשתמשים מבוצעת התאמה ותוספות. היתרון של שיטה זו הוא המהירות למבצוע והיכולת לצבור התייחסות באופן מהיר. החיסרון הוא הצורך בפיתוח חוזר והתאמה של פיתוחים לדרישות חדשות.

אחד המודלים הראשונים לתהליך פיתוח איטרטיבי הוא המודל הספירלי לתהליכי פיתוח. המודל שהציע בואהם (B. Boehm) בשנת 1986¹² משנה את ההסתכלות על תהליך הפיתוח כעל תהליך אחד ורצוף. במקרים רבים בשלב ההתחלתי של הפרויקט אין ודאות בנוגע לדרישות המדויקות של המשתמשים או באשר לאופן שבו המערכת תשתלב בסביבתה. העיקרון המנחה במודל הספירלי הוא ביצוע תהליך של כמה סבבי פיתוח מהירים בדרגות עומק הולכות וגדלות. התוצר של איטרציות ראשונות הוא מערכת שבתחילה אינה ממלאת את כלל הדרישות, אך היא מאפשרת להתרשם מהתצורה והביצועים העתידיים. החשיפה המוקדמת של המערכת למשתמש מאפשרת גמישות בהגדרת הדרישות ותורמת להורדת סיכוני הפיתוח. סבבי המימוש העוקבים מיועדים להשלים את הפונקציונליות המלאה ואת העדכונים שנדרשים לאורך הדרך. המודל הספירלי מובא באופן סכמתי באיור הבא. הציר האנכי באיור הוא עלות מצטברת של הפרויקט הגדלה עם כל איטרציה, והציר האופקי הוא הפונקציונליות ורמת מענה לדרישות. זיהוי וטיפול בסיכונים מוצר מבצעי מוצר אב-טיפוס 2 אב-טיפוס 1 קביעת יעדים כיוון ההתקדמות הערכת המענה תכנן לשלב הבא פיתוח ובדיקות



המודל הספירלי לתכנן מערכות (עלפי Boehm)

בשנים האחרונות יותר ויותר חברות עושות שימוש במודל פיתוח "זריז וגמיש" (Agile). הגישה החלה בתחומי הנדסת תוכנה ועברה במהרה לתחומים נוספים ובהם הנדסת מערכות. התפיסה היסודית במודלים אלו היא ביצוע מהיר של אבות טיפוס לצורך הצגתם ללקוח וקבלת משוב. השיטה מובילה לצמצום שלבי האפיון עד

¹² Boehm B, "A Spiral Model of Software Development and Enhancement", ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, ACM, 11(4):14-24, August 1986.

כדי ביטולם לחלוטין. עבודה משותפת עם הלקוח בסבבים קצרים מצמצמת את אי-הוודאות, משפרת את הסיכויים להצלחת הפרויקט ומקצרת זמנים. עם זאת, מימוש מהיר מחייב לעיתים עבודה במספר סבבים על אותו נושא, אם יש צורך לשכתב קוד שנכתב במהירות לצורך הצגה במעבר למערכת הסופית. כל שלושת סוגי המודלים (תהליכים סדרתיים, איטרטיביים וזריזים) נמצאים היום בשימוש בתעשייה. הבחירה בין המודלים מתבצעת בהתאם לצוות, ללוחות הזמנים ולמשימה. מיזוג והתאמה של מודלי הפיתוח מול הצרכים והאילוץ הוא חלק ממשימות הנדסת המערכות שיש בהן כדי ליצור השפעה גדולה על הפרויקט.

אחד המודלים המשולבים לתהליך הנדסת מערכות שפותח בארץ הוא מודל שיטת תכן קונספטואלי משולב מוכוון לקוח - Integrated, Customer Driven, Conceptual Design Method (ICDM). את התהליך פיתחו עמי הרי, מנחם וייס ואביגדור זוננשיין, והוא עוסק בפיתוח מובנה וכמותי של הקונספט המערכתי. התהליך כולל עשרה שלבים החל מזיהוי הלקוחות וצורכיהם ועד לבחירת הקונספט הסופי. השיטה הוצגה לראשונה בכנס הנדסת מערכות בשנת 1996,¹³ ומאז היא יושמה בעשרות פרויקטים.

משימות מרכזיות בתהליך הנדסת מערכות

אחד הנהלים שמציגים היטב את התהליך העקרוני להנדסת מערכות הוא הוראה של צה"ל בנושא ייזום, פיתוח הצטיידות וקליטה של אמצעים ומערכות.¹⁴ השלבים בהוראה זו מפורטים בראייה מערכתית כללית, והם רלוונטיים לפרויקטים המנוהלים בכל תחום. התהליך המוצג הוא תהליך סדרתי היכול לשמש בסיס למודלי פיתוח מחזוריים וזריזים. חלק מהמונחים הכלולים בנוהל, כמו תורת לחימה או דרישה מבצעית, מגיעים מעולם התוכן הצבאי, אך אלו שקולים למושגים מקבילים בעולם האזרחי והעסקי, כמו תפיסת ההפעלה או צורך עסקי.

מודל מחזור החיים של הפרויקט בצה"ל הוא מודל רחב הכולל נושאים רבים מלבד שלב הפיתוח, שבו מתרכזים חלק מהמודלים האחרים. המודל מפרט נושאים הקודמים לשלב הפיתוח, כמו ניתוח הצורך, גיבוש חלופות שונות למענה, הערכתן ובחירה של החלופה הנבחרת. המודל של צה"ל כולל גם תהליכים המתרחשים לאחר סיום הפיתוח, כמו תהליכי הייצור, הקליטה וההטמעה - השימוש המעשי במערכת ובדיקת ביצועיה בסביבה הטבעית לאורך זמן. תהליך הפרויקט בצה"ל מורכב משלושה שלבים מרכזיים: ייזום והתארגנות למימוש הפרויקט; מימוש הפרויקט - פיתוח, ייצור והצטיידות; קליטה והטמעה.

ייזום והתארגנות למימוש הפרויקט

תחילת שלב הייזום וההתארגנות למימוש הפרויקט היא בהגדרת הצורך המבצעי. צורך מבצעי הוא יכולת, כושר, תפוקה מבצעית, אמצעי או משאב שגורם מוסמך קבע כנחוצים כדי לעמוד בהישג הנדרש בלחימה. בעוד שכל גוף (אזרחי או צבאי) או חייל רשאי להצביע על קיום פער מבצעי, הגורם שהוסמך לכך בזרוע או באגף יבחן וישקול את מהות הפער המבצעי שהובא בפניו, ויחליט אם להגדירו כצורך מבצעי. הגדרת הצורך המבצעי נובעת מתוך תפיסה מבצעית ומראייה שלמה של יכולת.

לאחר אישור הצורך המבצעי מתקיים 'אישור רעיון מרכזי' לפרויקט. זהו אישור ראשוני של המרכיבים

¹³ M. P. Weiss, A. Hari, A. Zonnenshain, *Design of the concept of a new system using Integrated, Customer Driven, Conceptual Design Method (ICDM)*, Proc. of the 12th Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering (INCOSE), August 1996.

¹⁴ הוראת קבע אגף התכנון 10/1, ייזום, פיתוח הצטיידות וקליטה של אמצעים ומערכות, צה"ל 2016.

העיקריים בתוכנית או בפרויקט שהם אלה: תפיסה, כיווני מענה אפשריים, כיוון המענה המומלץ ומשמעויות ראשוניות.

הצגת 'אישור רעיון מרכזי' לפרויקט תכלול את הנושאים האלה:

1. תפיסה מבצעית;
 2. כיווני מענה אפשריים: תוכניות קיימות וחדשות, מענה בתפיסת הפעלה ועוד;
 3. תפיסת הפעלה ראשונית, לרבות הערכת התפוקה מהפרויקט;
 4. הערכת עלויות ראשונית, לרבות כיווני מקורות תקציב אפשריים;
 5. הערכת לוחות זמנים למימוש;
 6. התייחסות משפטית ראשונית במידת הנדרש;
 7. נושאים נוספים עקרוניים רלוונטיים, אם יש, אשר יש להם פוטנציאל להשפיע על אחד ממרכיבי מימוש המענה (עלויות, לוחות זמנים, כוח-אדם ועוד).
- כחלק מייזום הפרויקט ולאחר 'אישור רעיון מרכזי' תבוצע בדיקת מערכת. בדיקת מערכת היא בחינה של מרכיבים בפרויקט בהסתמך, בין היתר, על התפיסות הראשוניות שגובשו. בדיקה זו נועדה לצמצם את פערי הידע לקראת החלטה על אישור הפרויקט.
- ניתן למקד את בדיקת המערכת לנושאי בחינה על-פי רלוונטיות ופערי הידע על הפרויקט. את עיקרי תוצרי בדיקת המערכת יש להציג בהמשך תהליך אישור הפרויקט. להלן חלק מנושאים מרכזיים לבחינה בבדיקת מערכת:

1. הצורך המבצעי, ההישג הנדרש, משמעויות מבצעיות והתפיסה המבצעית;
 2. היתכנות טכנולוגית והנדסית, חלופות למענה ואפקטיביות על פני ציר הזמן;
 3. משמעויות בהיבטי תשתית ופריסה, לרבות שמירה על רציפות התפקוד;
 4. משמעויות כוח-אדם (לרבות כוח-אדם לפיתוח, להצטיידות, לתפעול ולאחזקה);
 5. היבטי תקינה, תאימות, קישוריות וארכיטקטורת התקשוב;
 6. לוחות זמנים;
 7. עלויות פיתוח והצטיידות, ניתוח ראשוני של עלות מחזור חיים (Life Cycle Cost - LCC);
 8. אפשרויות רכש או פיתוח, כולל אפשרויות לפיתוח בתוך צה"ל ולפיתוח בתעשייה;
 9. הערכת סיכונים משלב הפיתוח ועד להשגת יכולת מבצעית;
 10. משמעויות בהיבטי אימונים והדרכה, משמעויות לוגיסטיות ומשמעויות ארגוניות;
 11. היבטים נוספים, כמו הגנת הסביבה, יעילות אנרגטית ונושאים נוספים בהתאם לצורך.
- אישור עקרוני הוא אישור הפרויקט על כלל מרכיביו, תיאום עם כלל הגורמים הרלוונטיים, תקצוב הפרויקט ומתן אישור לנהל משא ומתן מול התעשייה. הצגת הפרויקט לאישור עקרוני כוללת תכנון מלא של החלופה הנבחרת בהתאם לנושאים שנבחנו בבדיקת מערכת ונושאים נוספים בהתאם לאופי הפרויקט, לרבות נושאים כמו עיקרי הצורך המבצעי, תכולת הפרויקט הנדרשת והמתוכננת, פירוט עלויות הפרויקט ואילוצים. להלן פירוט של נושאים אלו:

1. עיקרי הצורך המבצעי, המענה הקיים כיום בצה"ל לצורך המבצעי המוצג (סדר הכוחות, תפיסת

הפעלה, ארגון, פריסה ועוד), הפער המבצעי, עיקרי המסקנות וההמלצות מבדיקת המערכת (החלופות שנבחנו, המענה המועדף והפער הנותר), עיקרי הלקחים שהופקו בפרויקטים דומים או קודמים המיושמים בפרויקט.

2. **תכולת הפרויקט הנדרשת והמתוכננת**, לרבות היקף ההצטיידות באמצעי המפותח, ביצועים עיקריים של האמצעי, בינוי ותשתיות, לרבות שמירה על הציפות התפקוד, מרכיבי תמיכה לוגיסטית כוללת (ILS - Integrated Logistic Support) ומידת הכיסוי לפער המבצעי.

3. **פירוט עלויות הפרויקט**, לרבות השקעות קודמות בפרויקט, ניתוח עלויות משוערות לפיתוח, הצטיידות וקליטה, כולל השקעות נדרשות בחלקי חילוף, ציוד בדיקה, מדמים, אמצעי הדרכה, ספרות טכנית, תשתית, פריסה ובינוי, פילוח עלויות לפי עלויות חדפעמיות ועלויות לכל פריט (NRE - Non Recurrent Expenses, RE - Recurrent Expenses). פירוט העלויות יכלול ניתוח מלא של עלות מחזור החיים (LCC) של הפרויקט והשלכות הפרויקט על עלויות הקיום השוטף.

4. **אילוצים, התניות ומגבלות שיידרשו בחוזה**, לרבות נקודות יציאה מהפרויקט וקנסות, אופציות המתוכננות בחוזה להמשך פיתוח והצטיידות (מהות ותכולת האופציה, כמויות וזמני הספקה), משמעויותיהן התקציביות, מועד תקפותן ומשמעויות אי-מימושן.

לאחר אישור עקרוני לפרויקט מתחילה כתיבת האופיון הטכני ותקני בחינה של האמצעים הנגזרים משימת הפרויקט. הגורמים המקצועיים הרלוונטיים לפרויקט יבאו לידי ביטוי במסמך האופיון הטכני ובמסמך תקני הבחינה את ההנחיות או המדיניות בתחומי הרכב, ביטחון המידע, התחמושת, החשמל, התאימות האלקטרומגנטית, הבטיחות והבריאות ובתחומים נוספים בהתאם לצורך.

אישור סופי של הפרויקט מתבצע עם סיום משא ומתן וסיכום כלל ההיבטים של היציאה לפרויקט. בשלב זה מוצגים למקבלי ההחלטות הסיכומים במשא ומתן ושינויים עיקריים, אם היו, מהאישור העקרוני. עם חתימת החוזה מול הספק מתחיל שלב מימוש הפרויקט.

מימוש הפרויקט: פיתוח, ייצור והצטיידות

לכל פרויקט יש תוכנית פיתוח המתאימה לאופי הפרויקט, סוג, הסיכונים בו ומאפיינים נוספים. באופן כללי תוכנית הפיתוח כוללת פיתוח אב-טיפוס, ניסויי מפתח, הקפאת תצורת דגם לניסויים, יציאה לרכש פריטים בעלי זמן רכש ארוך (LLI - Long Lead Items), פיתוח וייצור דגמים הנדסיים, כתיבת תקני ניסויים, ניסויי בטיחות וגהות, ניסויים טכניים ומבצעיים ואישור דגם.

כחלק מבקרת הפרויקט יבצע קצין הפרויקט, על בסיס מסמך תכולת העבודה וכפי שסוכם בחוזה עם היצרן, סקרים, בהתאם לצורך. בין סקרים אלו עשויים להופיע סקר דרישות מערכת (SRR - System Requirements Review), סקר תיכון ראשוני (PDR - Preliminary Design Review), סקר תיכון קריטי (CDR - Critical Design Review), סקר בטיחות ובריאות ועוד.

ניהול סיכונים יתבצע במקביל לתהליך הפיתוח מתחילתו ועד סיום הפרויקט. תיכתב תוכנית ניהול סיכונים לפרויקט, והיא תעודכן מעת לעת על-פי הצורך והתקדמות הפרויקט.

ניסויי מפתח - המפתח או היצרן יבצע ניסויי מפתח להוכחת הביצועים הנדרשים מהאמצעי, בהנחיית נציג צה"ל ובהתאם לתנאי החוזה. המפתח או היצרן יישם את לקחי הניסויים באמצעי המפותח עד לעמידתו בביצועים הנדרשים.

הקפאת תצורת דגם לניסויים - לאחר עמידת האמצעי בניסויי המפתח תבוצע הקפאת תצורת דגם האמצעי לקראת הניסויים הטכניים והמבצעיים שיבוצעו בהמשך.

פיתוח וייצור של דגמים הנדסיים - המפתח או היצרן ייצר, במידת הצורך ובהתאם לתנאי החוזה שנחתם, דגמים הנדסיים לשם ביצוע הניסויים המבצעיים והטכניים.

עריכת ניסויי בטיחות, בריאות והגנת הסביבה - יבוצעו ניסויי בטיחות, בריאות והגנת הסביבה בהתאם לתקני הניסויים שנכתבו. לאחר שהאמצעי עמד בדרישות הבטיחות, הבריאות והגנת הסביבה, יפרסמו נציגי צה"ל אישור על בטיחות, בריאות והגנת הסביבה (לאחר קבלת אישורי הגופים הרלוונטיים). האישור הוא תנאי לעריכת ניסויים טכניים ומבצעיים.

עריכת ניסויים טכניים ומבצעיים - תקני הניסויים הטכניים והמבצעיים יכללו את הניסויים שיש לבצע על מנת לוודא את עמידת האמצעי בדרישות האופיון הטכני והאופיון המבצעי. בהתאם לדוחות הניסויים ישם המפתח או היצרן את לקחי הניסויים בהתאם לתנאי החוזה שנחתם, ובמידת הצורך יבוצעו ניסויים חוזרים. **אישור דגם** - בהתאם לתוצאות הבדיקות תינתן המלצה לאשר את דגם האמצעי. ההמלצות תתייחסנה גם למוצרי התמיכה הכוללת ולמאמנים. אישור דגם, המשמש אישור לשימוש באמצעי, יגדיר את תצורת הדגם המאושר וכן תנאים ומגבלות להפעלת האמצעי, לעמידתו בתנאי הסביבה ולתאימותו האלקטרוניקה, במידת הצורך.

ייצור והצטיידות

שלב הייצור וההצטיידות כולל את הקמת קו הייצור לייצור סדרתי של האמצעי (לאחר אישור הדגם) על-פי החוזה והספקתו לצה"ל. השלב מתחיל עם היערכות לייצור ולהקמה של קו ייצור ואישור קו ייצור על-ידי צה"ל. לא עמד קו הייצור בבחינה - ההסתייגויות ממתן אישור יועברו ליצרן שיפעל להתאמת קו הייצור לדרישות ויזמן את נציגי צה"ל לבחינה חוזרת. בקו הייצור שהוקם ואושר, ייוצרו ראשי סדרה שהם הפריטים הראשונים המופקים מקו הייצור על בסיס הדגם שתצורתו הוקפאה במסגרת אישור הדגם.

נהוג לבצע בחינת קבלה מורחבת (בק"ם) לראשי הסדרה שיוצרו, כדי לוודא את התאמת ראשי הסדרה לדגם שיוצרו, ואת עמידתם בביצועים הנדרשים מהאמצעי. לא עמדו ראשי הסדרה בבק"ם - יבחנו היצרן ונציגי צה"ל את הסיבות לכך ויבצעו פעילות מתקנת בהתאם, לרבות ביצוע בק"ם חוזרת, חלקית או מלאה, או יתנו אישורי חריגה במידת הצורך.

ייצור סדרתי - לאחר עמידה בבק"ם יעבור היצרן לייצור סדרתי בהיקפים ובלוחות הזמנים שנקבעו בחוזה. תבוצע בחינה לאמצעים שיוצרו, ובמסגרתה יבוצעו בדיקות שמטרתן בחינת התאמת האמצעים לדגם שיוצרו. לא עמדו האמצעים בבחינה - יבחנו היצרן ונציגי צה"ל את הסיבות לכך ויבצעו פעילות מתקנת בהתאם, לרבות ביצוע בחינה חוזרת, חלקית או מלאה, או יתנו אישורי חריגה במידת הצורך.

הספקה סדרתית והספקת מוצרי תמיכה היא התהליך הסופי של העברת האמצעים שיוצרו, לרבות אמצעי התמיכה הכוללת, לצה"ל, בהתאם לכמויות, ללוחות הזמנים ולאופן ההספקה שנקבעו בחוזה.

קליטה והטמעה

תוכנית הקליטה וההטמעה כוללת שני היבטים מרכזיים: קליטה מבצעית וקליטה לוגיסטית. עבודת מטה בנושא משמעויות הקליטה המבצעית תשמש בסיס להוראת קליטה מבצעית העוסקת, בין היתר, בעניינים אלה:

1. תורת לחימה והוראות - הוראות רלוונטיות, תפיסת הפעלה, ארגון ושיטות, ספרות מבצעית, תפעול האמצעי, הוראות בטיחות, הוראות הפעלה, כולל תנאים ומגבלות משפטיים, מודיעין ושליטה ובקרה;

2. תכנון משאבים (ארגון, תקינה ותשתיות) - ארגון, תקינת כוח־אדם, תקינת אמצעים, בינוי, פריסה והקצאת אמצעים;
3. כוח־אדם, הדרכות ואימונים - קורסי הדרכה, מארזי הדרכה, מאמנים ואמצעי הדרכה, סיוע וחניכה, אימונים, תיקי תרגיל, משאבים ושמירת כשירות;
4. חסינות הפרויקט, ניטור ובקרה - הוראות הגנת מידע, היבטי ביטחון מידע וחשיפת האמצעי, סיווג הפרויקט, הרשאות שימוש.
הוראת קליטה לוגיסטית תעסוק, בין היתר, בעניינים האלה:
1. תורה והוראות - תפיסת אחזקה, הוראות אחזקה רלוונטיות, שגרת טיפולים, דרגי תיקון, הוראות שינוע ואחסנה, הוראות בטיחות, פריסה, הפעלת ריתוק משקי, ביצוע אחזקת חוץ (במידת הצורך);
2. תכנון משאבים (ארגון, תקינה ותשתיות), ארגון, תקינת כוח־אדם, תקינת אמצעים, חוזה אחזקת חוץ, טבלאות תקינה, תשתית לוגיסטית לאחזקה בכלל הדרגים, בינוי, אמצעי שינוע, אמצעי בטיחות ובריאות, תשתית להחסנה יבשה, חלקי חילוף, כלי עבודה, זיוד, הנחיות לעיתוד, אריזות, ציוד בדיקה (צב"ד), קטלוג, הובלה, ציוד תוכנה ותשתית;
3. הדרכות ואימונים הגדרת מקצועות, הדרכה והכשרה, ספרות טכנית לכל דרגי האחזקה, מארזי הדרכה, מאמנים, תוכנית חניכה ותוכנית אימונים.

ניהול משקי

תהליך הקליטה וההטמעה מסתיים במעבר של האמצעים לניהול משקי. ניהול משק הוא מכלול הפעילויות הטכניות והניהוליות שנועדו לשמר, לפתח ולשפר את המשקים בראיית מחזור חיים ומתוך מגמה להביא לאפקטיביות המבצעית הנדרשת במינימום עלות.

מטרת הניהול המשקי היא הגברת האפקטיביות המבצעית של הצבא ומוכנותו לביצוע משימותיו השונות. הכוונה במוכנות ליכולת של כוחות ושל יחידות לעמוד בהישגים נדרשים כדי למלא משימות שלשמן אומנו, או להיערך לפעולה בלא עיכובים. יכולת זו כוללת גם הפעלת מערכות נשק וציוד כדי להפיק מהם ביצועים ותפוקות שלצרכיהם נועדו ויוצרו.

במרכז הפעילות קיים הרצון להגיע למצב של איזון המשק לאורך זמן. מצב זה יאפשר קבלת החלטות מושכלות ומובנות בפעולות מתקנות ומתונות שיבטיחו איזון בטווח הארוך תוך חלוקת המשאבים על־פי סדרי עדיפויות.

ניהול המשק מונע מהמענה לבעיה מבצעית, תפעולית או לוגיסטית, ועשוי לדרוש לבצע בתאם לצורך את הפעילויות האלה, חלקן או כולן:

1. חידוש - פיתוח והתעצמות באמצעות רכש פריטים חדשים שונים מהקיימים במשק או רכש פריטים דומים לצרכים חדשים;
2. הצערה והשבחה - שינויים ושיפורים באמצעים קיימים;
3. קביעת מדיניות העיתוד - הצטיידות בחלקי חילוף;
4. שימור ואחזקה - ביצוע שגרת הטיפולים והאחסנה בסדיר ובחירום;
5. גריטה - מכירה או השמדה של הפריטים המרכיבים את המשק בסוף חייהם או עם ירידה באפקטיביות.

ניהול המשק דורש מיפוי של תמונת המצב הכוללת לשם ניתוח הערכת מצב תוך הגדרת נקודת עבודה מבצעית תחת אילוצי תקציב. זהו תהליך שבו נבנית תמונת מצב משקית במטרה לחזות לטווח של 5-10 שנים מגמות בתחום השימוש, הטכנולוגיה, האמינות הטכנית והיציבות הלוגיסטית שישפיעו על מתן מענה לצורך המבצעי, לבטיחות, לזמינות ולעלות האחזקה והמלאי וינחו את תהליכי העבודה והקצאת המשאבים לניהול המשק בעתיד.

תוצאת הערכת המצב היא בסיס לזיהוי הפרה באיזון המשקי מראש, וכך תתאפשר מציאת פתרונות רלוונטיים. דוגמאות להפרה באיזון המשקי:

1. חוסר התאמה של האמצעי לייעודו או ירידה באפקטיביות האמצעי עד פגיעה בתפקוד מבצעי או לוגיסטי;

2. עלייה בעלות הקיום, לרבות עלויות פיתוח, רכש, שינויים ושיפורים (שו"שים), אחזקה שוטפת, הוצאה משימוש ועוד.

תוצאת הערכת המצב היא חלופות לביצוע בתחומי הפיתוח, ההצטיידות, ההשבחה והגריטה. באחריות מנהל המשק להביא לידי ביטוי את מכלול הגורמים המשפיעים על החלטות המתקבלות בנושא מרכיבי המשק, ולא רק המענה המשקי המידי עבור פעילות. כמויות ומגוון האמצעים לרכש ושיקום נקבעים על סמך הערכת המצב המשקית ובהתאם לסדר העדיפות המבצעי.

הרחבה: הנדסת מערכות בפרויקט שדרוג בלוני תצפית/אנדריי בסין¹⁵

בלון תצפית הוא מערכת מתוחכמת ומורכבת. הבלון מעוגן עם כבל ליחידה קרקעית ונושא מערכת צילום מתקדמת. אם הבלון מתנתק, הוא עולה במהירות לגובה רב בגלל כוח העילוי של הליום הממלא אותו. לאחר מכן הבלון מתפוצץ בגובה בגלל הפרשי לחץ אוויר. כמובן שבמקרה כזה המטען הייעודי (המטע"ד) שנושא הבלון מתרסק מגובה רב, והדבר מוביל לאובדן ציוד יקר וגם מסכן חיי אדם.

הבלונים הראשונים נכנסו לשירות במהלך שנות ה-2000. מאז, במהלך השימוש המבצעי, אירעו כמה תקלות, ובעקבותיהן בוצעו שינויים ושיפורים במערכת. כל אירוע כזה, בייחוד אם מדובר באובדן הבלון והמטע"ד, הוא מקור ללמידה והפקת לקחים, שכמה מהם נראה בהמשך.

בלון מס' 1: חסינות התכן

במהלך הפיתוח ולאורך כל חיי הפרויקט נבחנו חלופות רבות להתמודדות עם הסיכון של הינתקות כבל העגינה. שיקול תכן מרכזי בבלוני הליום הוא משקל המערכת שעולה לאוויר, כיוון שנתון זה גוזר את כמות ההליום הנדרשת להפרחה.

נבחן פתרון של הכפלת כבל העגינה, אך פתרון זה לא יושם בשל משקל רב שמוסיף הכבל הנוסף, וסיבוכיות גדולה בהפרחה עם שני כבלים. כיוון פתרון נוסף שנבחן היה הנחתת הבלון, אם והכבל התנתק, באמצעות שחרור מבוקר של הליום. בסופו של דבר חלופות אלו לא יושמו בגלל מורכבות הנדסית, הערכת עלות מול תועלת גבוהה ושיקולי בטיחות של מנגנונים אלו.

¹⁵ רס"ן אנדריי בסין הוא ראש מדור בחטיבה הטכנולוגית ליבשה בצה"ל. בעבר שימש ראש מדור מערכות איסוף מיוחדות האחראי על תחום הבלונים. בעל תואר שני בהנדסת מערכות ותואר ראשון בהנדסת חשמל.



בלון תצפית

הבלון הראשון פרח, ומטוס ריסוס שטס בגובה נמוך ושלא הבחין במערכת, חתך את כבל הבלון. אומנם מקרה זה הוא דוגמה לטעות אנוש מובהקת של הטייס, אך אפשר ללמוד ממנו לקח הנדסי: התכנון הכולל של הבלון מבוסס על נקודת כשל בודדת - פגיעה של המטוס בכבל הביאה להינתקות הבלון והתרסקות המטע"ד.

בלון מס' 2: לא לשכוח את המפעיל.

כבל העגינה יורד מהבלון ומלוּפף על הגלגלת. הכבל נושא גידים המשמשים להזנת מתח לבלון ושידור וידיאו לאחור. למעשה, קצה הכבל אינו קשור לגלגלת אלא מחובר לקרון השליטה. חיבור זה חלש מכנית יותר מהכבל עצמו, ובוודאי שהוא אינו עומד בכוח העילוי של בלון הליום ובמשבי רוחות. לכן לכבל יש יתירות אורך גדולה, ו-50 המטרים האחרונים של הכבל אינם אמורים בשום מקרה לצאת מתוף האיסוף. כך מלמדים בקורס המפעילים ומדגישים ברענונים תקופתיים. אתם כבר יכולים לנחש מה קרה לבלון השני. אחד המפעילים שחרר את הכבל - את כולו... זה קרה באחת ההפרחות הראשונות שלו לאחר שהגיע ליחידה. למפעיל לא הפריעה העובדה ש-100 המטרים האחרונים של הכבל מסומנים בדיוק כדי שמפעילים ישימו לב לנעשה... כך פרח לו עוד בלון בעלות של מיליוני שקלים.

בלון מס' 3: על המפעיל כבר דיברנו?

בניגוד למפעיל הקודם, המפעיל של הבלון השלישי היה מיומן ומנוסה. הוא ידע שעוברות דקות מספר עד שהבלון עולה לגובה המבצעי. הוא גם הכיר את מנגנון הבטיחות של ידית ההפעלה. המנגנון מפסיק את העלאת הבלון ונועל את הכבל ברגע שעוזבים את הידית. בכוונה תחילה, כדי שהבלון יעלה או ירד צריך להפעיל כוח קבוע ללא הפסקה, אחרת הפעולה נפסקת. המפעיל היה כאמור מתוחכם ומצא שדרוג מעניין למנגנון: הוא קשר לבנה לידיית ההפרחה, כדי שהוא לא יצטרך להפעיל כוח ולהימצא ליד יחידת השליטה באותן דקות שבהן הבלון עולה לאוויר. גם כאן לא קשה לנחש את המשך הסיפור: כשהמפעיל נזכר לחזור לעמדה, נותר לו רק לראות את הבלון שלו עף לשמיים...

לפעמים רק תאונות מראות באופן מובהק ומוחשי שהמערכת היא הרבה יותר מהאמצעי עצמו. הצלחת

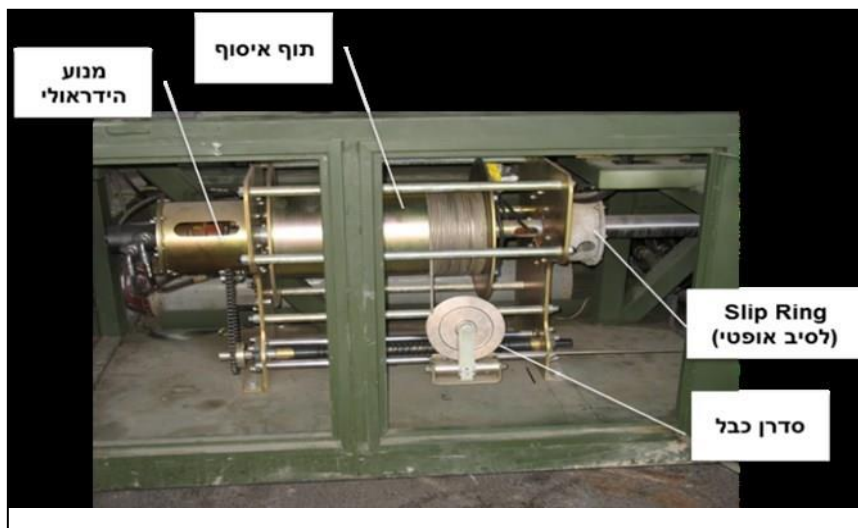
המשימה כוללת את המפעילים. לפעמים כל ההוראות, האזהרות, ההדרכות והסימונים אינם יעילים, ואם משאירים בידי המפעיל סיכון או אפשרות כלשהי לתקלה - הם עשויים להתממש.

ש"שים (שינויים ושיפורים)

לאחר כמה שנים בשירות הבלונים עברו שדרוג לצורך שיפור ביצועי המערכת והגדלת גובה הפרחה. הגדלת הגובה תוך שמירה על איכות התמונה חייבה שינוי במבנה הכבל: הוחלט להחליף שני גידי מתכת ששימשו להעברת האותות בכבל, לסיבים אופטיים. גידי המתכת ששימשו להעברת מתח למטע"ד נותרו ללא שינוי. השינוי יצר בעיה במקום לא צפוי: מתברר שכבל עם סיבי זכוכית הוא חלש יותר מכנית מכבל עם גידי מתכת. כתוצאה מכך עצם החביקה של הסיב על הגלגל, המתרחשת בגלל מתיחות משתנה של הכבל בכל רגע בגלל רוחות הנושאות את הבלון, גרמה למעיכה של הסיבים האופטיים ולפגיעה באיכות התמונה עד ניתוק מלא וקריעה של הסיבים האופטיים.

כדי להתמודד עם הבעיה הוכנסו שני ש"שים מכניים נוספים:

1. מנגנון סידור של הכבל על הגלגל - המנגנון עורך באופן סדור את הכבל על הגלגל כדי שלא תהיינה כליבות של הכבל ולא תהיה אפשרות לעיוות ושבירה של הסיבים;
2. מנגנון כננת חיכוך - קפסטיין - לשמירה על מתיחות קבועה של הכבל; המנגנון מורכב מכמה גלגלות שנמצאות בין הבלון לגלגל ומונע אפשרות של שינוי מתיחות בעקבות משב רוח פתאומי.



מנגנון משודרג - לאחר ש"ש

תהליך בדיקת התצורה החדשה

לטובת אישור תצורת המערכת החדשה בוצעו בדיקות טכניות רבות.

1. בדיקה מכנית למערכת הפרחה
 - א. בקרת איכות - בדיקת התאמת תיק שרטוטים ודוחות לתתי-מכלולים (לאחר ייצור);
 - ב. בדיקות הרכבת מכלולים ותפעול פונקציונלי;
 - ג. בדיקה בטיחותית לכננת הראשית - בדיקת עומסים סטטית ודינמית;
 - ד. בדיקה בטיחותית לכננות העזר - בדיקת עומסים סטטית ודינמית;
 - ה. בדיקת אוזני הרמה של תחנת העגינה.

2. בדיקת מערכת החשמל.

3. מערכת ההידראוליקה.

4. כשירות סידור כבל ההפרחה על גבי תוף האיסוף.

5. בדיקות אחזקתיות (יכולת אחזקה) ושילוט.

כל הבדיקות בוצעו לפי הנוהל לאישור המערכת בדומה למערכת הישנה. לא נלקחו בחשבון התאמה של הבדיקות לתכן החדש, אלא ההסתכלות על המערכת הייתה כעל מערכת דומה מאוד למערכת הישנה. לדוגמה, בוצעה בדיקה לירידה בכוח קריעה של הכבל כתוצאה ממחזורי עבודה, והכבל עבר 1000 מחזורים, אבל דרך שתי גלגלות בלבד ולא דרך מנגנון קפסטיין.

בלון מס' 4

השינויים והשיפורים פתרו את בעיית החביקה של הסיבים. הבלונים עלו לגובה רב יותר וסיפקו מידע חשוב למפעילים. אלא שלאחר כחצי שנה של עבודה אירעו בהפרש של שבוע שני מקרים של קריעת כבל ופיצוץ הבלון.

המקרה הראשון העמיד את המומחים בבעיה: כיוון שנבדק כוח הקריעה של הכבל ונמצא תקין, לא הייתה שום סיבה נראית לעין לבריחת הבלון.

אחרי סריקה של תחנת העגינה של אחד הבלונים שאבדו נמצא מפתח שבדי מעוקם בתא הגלגלת. נצפתה גם מעיכה תואמת לצורת המפתח על אחת הגלגלות. לאור זאת הועלת השערה שהמפתח שנשכח בטעות באזור הגלגלת, נכנס לאזור מהלך הכבל, פגע בחוזק הכבל ובגלל הסיבה הזו הכבל נחתך. אלא שאז, תוך כשבוע, עף עוד בלון...

בלון מס' 5

לאחר התקלה השנייה ברצף בוצע קרקוע של כל המערך וחקר תקלה מעמיק שממנו עלה כי הכבל החדש, עם הסיבים האופטיים, נחלש משמעותית אחרי שלושה חודשים ולא עמד בכוחות שפועלים עליו.

לפי הנוהל השגרתי, לפני שינוי המערכת, כל שלושה חודשים ניטלו שלושה מטרים מהקצה של הכבל של כל בלון. קצה הכבל נשלח לבדיקת חוזק הכבל על בסיס קריעת הכבל. התוצאה בכל הבדיקות הייתה תקינה. בדיקה של הקצה מהכבל הקרוע העלתה גם היא ערכים תקינים.

הנקודה שלא נלקחה בחשבון בבדיקות, היא שחלקי הכבל שנבדקו נלקחו מהחלק הצמוד לבלון עצמו. אומנם אותם שלושה מטרים מהקצה של הכבל עומדים בכוח הקריעה הנדרש, אך חלק זה אינו עובר בגלגלת ואינו מקבל מאמצים רדיאליים שהם הרסניים עבור כבל מהסוג הזה. כאשר בדקו את חלקי הכבל שעבר בגלגלות, התברר שעומס הקריעה ירד משמעותית אל מתחת לסף הלחצים הנגרמים מעילוי הבלון עצמו וממשבי רוח בעוצמה בינונית, וזה גרם לקריעת הכבל.

ראייה מערכתית מהי?

הנדסת מערכות מחייבת חשיבה כוללת בכל שלבי הפרויקט. שינוי של מרכיב אחד במערכת עלול לגרום לתקלות מערכתיות, אם בתהליך הבדיקות מסתכלים על אותו רכיב ולא על המערכת כולה. למעשה, לאורך פרויקט שדרוג בלוני תצפית אירעו כמה תקלות המדגימות את האופן שבו ראייה מערכתית צריכה לבוא לידי ביטוי בתהליך הבדיקות, בתהליכי האחזקה ובמנגנוני בטיחות, ומה קורה אם עקרונות אלו אינם מיושמים.

מהנדס המערכות הוא האחראי לבניית מערכות מוצלחות. ההצלחה כוללת הסתכלות על כל המערכת ועל מרכיביה, כמו על המפעיל ותחומים רבים נוספים. אומנם מהנדס מערכות אינו בעל ידע מעמיק בחלק מהתחומים, ולשם כך הוא מפעיל מומחים, אך עם זאת מהנדס המערכות הוא לפעמים היחיד הרואה את התמונה השלמה של פעולת המערכת בסביבתה.

במקרה של שדרוג הבלון כשהחליפו את גידי הנחושת לסיב אופטי, לא התחשבו בהשפעה על מרכיבים אחרים במערכת. כדי שבעיה זו תיפתר נדרש היה להוסיף מנגנונים מכניים מורכבים שלא תוכננו קודם לכן. ולאחר שמרכיבים אלו נוספו, אף אחד לא יכול היה לנחש שהדבר יביא לפגיעה בחוזק הכבל - תחום שגם שנבדק היטב בבדיקות תקופתיות.

לקח חשוב קשור לנקודת המבט של האמצעי הנבדק וסביבתו. בדיעבד, תהליך הבדיקה של הכבל היה תהליך שלא התחשב בפרופיל הפעולה ובתהליך שבו משתמשים בכבל. אילו בחנו את המערכת בראייה שלמה, היה אפשר לראות שחלקים שונים של הכבל עוברים עומסים מסוגים שונים: החלק הקטן והצמוד לבלון עובר עומסים אורכיים, ואילו רוב הכבל מלוּפף על הגלגלות ועובר עומסים רדיאליים. לכן רצוי היה לבחון את הכבל בשני חלקים אלו.

ראייה מערכתית נדרשת להתבטא בכמה מישורים. לדוגמה, במקרה הנתון המישורים הם תכנון נכון של תהליך הבדיקות, תהליכי האחזקה ומנגנוני בטיחות.

תכנון נכון של תהליך הבדיקות - כחלק מניסוי החזרה לכשירות בוצעה בדיקה מערכתית של כל מערכת הבלון. הבדיקה כללה 100 מחזורים של הפרחה וקרצוע של הבלון במתאר השימוש המבצעי. לאחר בדיקה כזו אפשר היה להגיד בוודאות שהאמצעי כמערכת יעמוד בפרופיל המשימה הנדרש, לפחות למשך הזמן הנבדק.

בתהליכי האחזקה בוצע שינוי בנוהלי האחזקה התקופתיים של הבלון, והוראת האחזקה שונתה מבדיקה של שלושה מטרים מהכבל לבדיקה של עשרה מטרים.

במנגנוני בטיחות אל מול הגדלת סיבוכיות - נוספו מדידים נוספים המשביתים את המערכת אם נכנס עצם זר לגלגלות ההפרחה.