גורביץ' ולדימיר

הגנות ציודים של תחמ"ש מפני דופק אלקטרומגנטי

חברת החשמל

הגנת על ציוד חשמלי בתחנות משנה מפני דופק אלקטרומגנטית

מאת: ד"ר ו. גורביץ

הביא לתרגום: ס. בראונשטיין

חברת החשמל לישראל

2016

ISBN 978-5-9729-0104-3

הספר דן בהיבטים מעשיים של הגנת ציוד חשמלי בתחנות משנה (תחמ"ש), עבור ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבד ושנאי הספק, מפני השפעתה ההרסנית של פעימה אלקטרומגנטית הנגרמת מפיצוץ גרעיני בגובה רב וסוגים אחרים של השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות (השאה"מ) שהציוד ליצירתן מפותח ומיוצר באופן נמרץ בשנים האחרונות.

בספר מוצעים פתרונות טכניים שמבצעים ארגוניים שונים שמטרתם להעלות את רמת השרידות של תחנות משנה.

הספר מיועד למומחים העוסקים בתפעול ציוד חשמלי בתחנות משנה, למהנדסי תכנון, ליצרני ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבד. כמו כן, הספר יכול להיות שימושי למרצים, לבוגרים ולסטודנטים במוסדות להשכלה גבוהה המתמחים בתעשיית החשמל.

הקדמה

עד לפני עשרים שנה בלבד, ניתן היה למצוא אזכור קצר של פעימה אלקטרומגנטית כתוצאה מפיצוץ גרעיני רק בעלונים של הגנה אזרחית.מקובל היה לראות בפעימה זו דבר אקזוטי ולא יותר. אנו מניחים כי לעוסקים בנושא מההיבט הצבאי קיים, בוודאי, ידע רב לגבי התופעה הזאת, אם כי כל המידע בסוגיה הזו מוגדר בסיווג גבוה מאוד. בעבר היתה קיימת הצדקה לכך, בהתחשב בקשיים טכניים רבים והוצאות שליוו את תהליך השגת המידע הזה. התוצאה של ההמדיניות הזאת גרמה לכך שעד לא מזמן היה חוסר ידע בנושא אצלמומחים אזרחיים בתחומים שונים של הנדסה (גם כיום לאחדים מהם עדין אין מושג) לגבי מהות התופעה ומידת מסוכנותה.

המגמות העכשוויות בפיתוחים הטכנולוגיים מרחיבות את השימוש במיקרו-אלקטרוניקה, מיקרו-מעבדים, מחשבים, וכתוצאה מכך חל גידול מהיר ביעילות מיקרו-מעבדים שלעצמו מלווה בגידול חד בכמות מיקרו-טרנזיסטורים ליחידת נפח, ירידה במתח עבודה וברמת הבידוד בין חלקים פנימיים ושכבות הגביש. מגמות אלה הובילו, מצד אחד, לגידול חד בפגיעות הציוד המודרני מפעימה אלקטרומגנטית כתוצאה מפיצוץ גרעיני, ומצד שני, להתעניינות הולכת וגוברת של אנשי הצבא באפשרות להשתמש בפעימה אלקטרומגנטית כתוצאה מפיצוץ גרעיני בתור סוג נשק יעיל ביותר בפני עצמו. אם בעבר גורם ההרס הזה מפיצוץ גרעיני עניין את הצבא רק מנקודת מבט של הפגיעה במערכות האלקטרוניות הצבאיות, כעת ישנה הבנה שהפעימה האלקטרומגנטית היא הנשק הלא קטלני המושלם המאפשר באמצעות פיצוץ מטען גרעיני בגובה רב, להוציא מכלל השימוש את כל התשתית האזרחית של האויב, ללא שפיכות דמים המונית. עובדה זו עודדה את אנשי הצבא עד כדי כך שהם הזמינו פיתוח של מטען גרעיני מיוחד בעל אפקט מוגבר של פעימה אלקטרומגנטית, המכונה "סופר פעימה אלקטרומגנטית". במקביל, הוחל בקצב מוגבר פיתוחו של הנשק האלקטרומגנטי בפני עצמו, שבו הקרינה האלקטרומגנטית בעוצמה גדולה הפוגעת במערכות מיקרו-אלקטרוניות ובמיקרו-מעבדים, מיוצרת באמצעים לא גרעיניים.

במציאות של ימינו, העולה על כל דמיון, מייצרים מתקני פיצוץ היוצרים את הפעימה האלקטרומגנטית מיוצרים בטילים המוסעיים על גבי מערכות ניידות ואפילו קיימים בפגזים וברימונים. אפשר להצהיר בצער שהמציאות הזאת עדין אינה זוכה לתשומת לב הולמת מצדם של המומחים בתחומי ההנדסה השונים, כולל תחום תעשיית החשמל.

נכון להיום תשתיות המדינה מבוססות בעיקר על החשמל שבלעדיו אי אפשר לקיים פעילות סדירה של מערכת הספקת מים, מערכת תקשורת, ומערכות חיוניות אחרות.

במספר ספרים ומאמרים קודמים המחבר הפנה את תשומת ליבם של המומחים לאקטואליות של הסוגיה הזאת על רקע הגברת הסכנה של השמדת מערכות שונות הנסמכות על תעשיית החשמל באמצעות סוגי נשק כאלה. הספר הזה הושם דגש על המלצות מעשיות לאבטחת ציוד אלקטרוני בתחנות משנה מפני השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות, כולל פעימה אלקטרומגנטית, כתוצאה מפיצוץ גרעיני.

צריך לציין שהגנת ציוד אלקטרוני בתחנות משנה (ובאתרים אחרים של חברת החשמל) מפני השפעות כאלו אינה בעייתם בלעדית של חברת החשמל. זאת גם בעייתה של התעשייה בכללותה בה יש שימוש רב בציוד המבוסס על מיקרו-אלקטרוני ומיקרו-מעבדים..

ההמלצות בספר הזה מיועדות בנוסף לעוסקים בתפעול הציוד האלקטרוני גם ליצרני הציוד הזה, בראש ובראשונה - ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים.

לדעת המחבר הספר אמור לעניין גם מומחי הנדסה, למנהלים העוסקים בתעשיית החשמל וכן אנשי אקדמיה: מרצים, דוקטורנטים ולסטודנטים של מוסדות להשכלה גבוהה במקצועות הקשורים לתעשיית החשמל.

רק במאמץ משותף של המומחים אפשר למנוע את הסכנה ההולכת וקרבה.

המחבר

1. הקדמה הטכנולוגית והשלכותיה

1.1 פילוסופיה של הקדמה הטכנולוגית

"פיתוח טכנולוגיות המתוכנן בצורה מושכלת מוביל לעתים יותר ויותר קרובות להשלכות בלתי מושכלות, והטכנולוגיות מצטיירת בתודעתו של האדם לא כאמצעי ניטרלי הנועד לסיפוק צרכיו, אלא כמטרה בפני עצמה, כוח מנוכר".

/דר' לפילוסופיה, פרופסור פופקובה נ.ו./

מהי הקדמה הטכנולוגית? האנציקלופדיה הפילוסופית נותנת הגדרה הבאה:

"***הקדמה הטכנולוגית*** *- ההתפתחות המותנת והנמרצת באופן הדדי של המדע והטכנולוגיה. המושג הומצא במאה ה-20, במסגרת הביסוס העושה שימוש ביחס המנצל כלפי הטבע, והתמונה המדעית-הנדסית הנהוגה של העולם. מטרתה של הקדמה הטכנולוגית מוגדרת כסיפוק צרכיו של האדם הגדלים באופן מתמיד, אמצעי לסיפוק הצרכים האלה - מימוש ההישגים של מדעי טבע וטכנולוגיות*".

באמת, כפי שכותבת במאמרה "פילוסופיית הטכנולוגיות" [1.1] דר' לפילוסופיה פרופסור פופקובה נ. ו., החידושים הטכנולוגיים הונהגו כדי לשפר את חייהם של בני אדם ולספק את צרכיהם: הסביבה הטכנוגנית ממלאה את המטלה הזאת, ונותנת לאוכלוסייתו ההולכת וגדלה של כדור הארץ אפשרות לקבל את הנחות היסוד החומריות של הקיום. אולם, בשנים האחרונות מתגלות יותר ויותר השלכות אחרות של הקדמה הטכנולוגית: דיכוי הצדדים הביולוגיים וההומניטאריים של חיי האדם, החלפתם בתכונות טכנוגניות ובסדירות. הדבר מוביל להערכה אמביוולנטית של תפקיד הסביבה הטכנוגנית: החיובית שגברה בעבר והשלילית ההולכת וגדלה. הבעיה העיקרית טמונה בקשיים לנהל את הסביבה הטכנוגנית, באי היכולת לשלוט על התפתחותה או לפחות לחזות את תגובתה ליישום חידושים הבאים.
גילוי, בכל שלביה של הפעילות הטכנולוגית, של השלכותיה הבלתי צפויות והבלתי רצויות מלמד: הסביבה הטכנוגנית במידה מסוימת מאז ומתמיד הייתה מחוץ לשליטת האנושות היוצרת אותה, כלומר, הייתה לה אוטונומיות. לכן, לעתים קרובות התפתחות הטכנולוגיות אינה מיועדת ל"סיפוק צרכיו ההולכים וגדלים של האדם", ולפי הסתכלותנו, זה החל לאפיין את הקדמה הטכנולוגית רק במחצית השנייה של המאה ה-20.
בספר מדע בדיוני ישן אחד הוצג תסריט מסקרן שההשתלשלות שלו החלה מדבר די תמים: צלצול טלפון לילי מוזר לכל תושבי כדור הארץ. כך, בצלצול טלפון, השכל הגלובלי הודיע על דבר הולדתו לאנשי כדור הארץ כולו. התברר שבשלב מסוים של ההתפתחות, הגידול הכמותי של המחשבים עבר למישור חדש: מיליוני מחשבים מאוחדים ברשת אחת ושולטים על הכול על פני כדור הארץ פתאום ראו בעצמם יחידה אחת מאוחדת שמסוגלת ליצור את עצמה באמצעות מפעלים אוטומטיים ורובוטים המחוברים לאותה הרשת, ושמסוגלת גם להגן על עצמה בעזרת מערכות נשק ממוחשבות המיועדות להשמדתו של האדם. מנקודת מבטו של השכל הגלובלי האנושות הייתה לא אחרת מאשר שריד, נטל הזולל את משאבי הפלנטה. את השתלשלות האירועים בתסריט הזה הקורא מסוגל לנחש בעצמו.

המחשבים המחוברים לרשת מנהלים היום כמעט את כל קווי היצור המודרניים, מערכות להספקת מים וחשמל, מערכות תקשורת. בספרות טכנית, ולא בספרות מדע בדיוני, מופיעים מושגים כגון: "רשת חכמה" (Smart Grid), ממסר הגנה עם "בינה מלאכותית" (Artificial Intelligence). בספרות טכנית ולא בספרי מדע בדיוני דנים היום בסוגיית בנייתו של "הבית החכם" (Smart House) שבתוכו אפילו המקרר יעריך בעצמו את כמות המזון הנמצא בו, ועל בסיס הניתוח של הצריכה היומיומית יערוך הזמנה וישלח אותה ברשת לסופרמרקט הקרוב. את מיקרו מעבדים אפשר למצאו היום בכל מקום, אפילו במכסה האסלה.

האנושות מתקדמת בצעדים ענקיים אל עבר יצירתו של השכל הגלובלי הבלתי צפוי, שחזה מחברו של רומן מדע בדיוני ישן. על כן, העלילה הישנה הזאת מזמן עברה מעמודיהם של רומני מדע בדיוני אל עמודיהם של ספרים וכתבי עת מדעיים רציניים, הדנים בפילוסופיית הטכנולוגיה.

קיים תחום חדש יחסית של מחקרים פילוסופיים, המחפשים להבין את מהותה של הטכנולוגיה ולתת הערכה של השפעותיה על החברה, על התרבות, על האדם. לפי נקודת מבט אחת, פילוסופיית הטכנולוגיה אינה פילוסופיה במובן הקלאסי שלה אלא ענף ידע בינתחומי שבמסגרתו אופייני לראות את הטכנולוגיה ואת הבעיות שהיא יוצרת במובן הרחב ביותר.

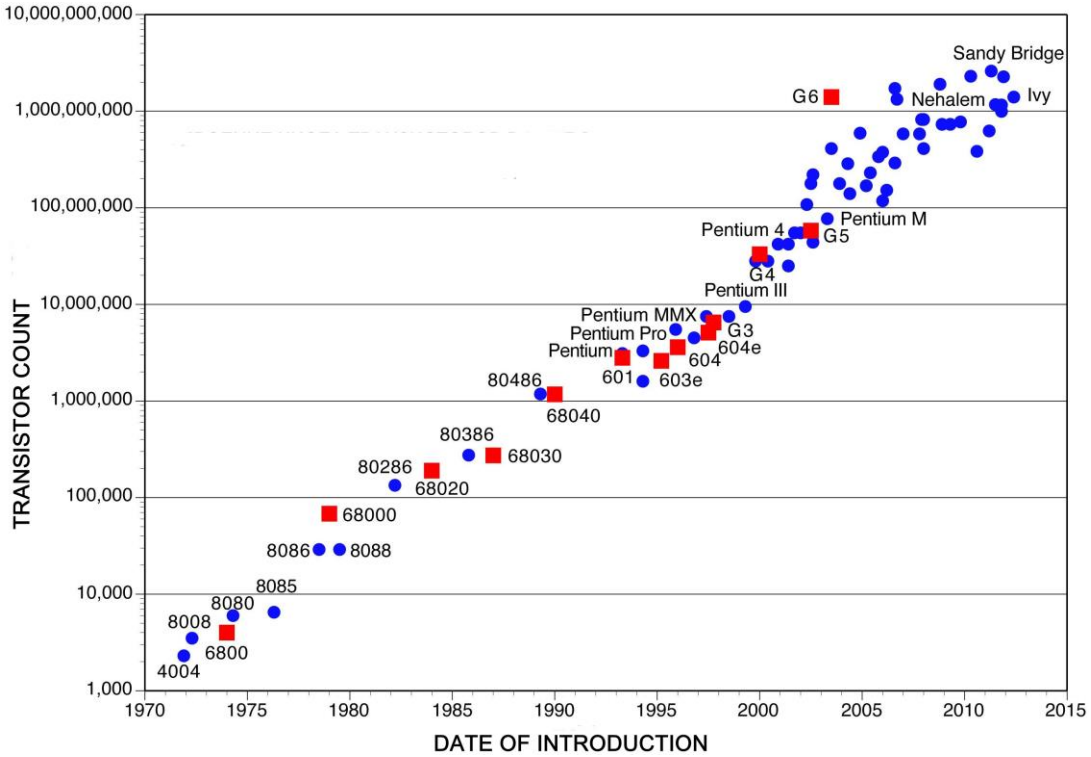
במסגרת הסימפוזיון VISION -21 שנערך בשנת 1993 בחסות המרכז לחקר החלל של נאס"א על שם לואיס והמכון לחלל והתעופה באוהיו ננאם נאומו המפורסם של המתמטיקאי הנודע פרופסור ורנור וינג' (Vernor Vinge) [1.2]: "*האצת הקדמה הטכנולוגית הינה הייחודיות העיקרית של המאה 20. אנו ניצבים לפני השינויים שניתן להשוותם להופעתו של האדם על פני כדור הארץ. הסיבה הבלעדית של השינויים האלה היא העובדה שהתפתחות הטכנולוגיה מובילה באופן בלתי נמנע ליצירתן של ישויות בעלות הבינה העולה על הבינה האנושית... רשתות מחשב גדולות (ומשתמשיהם המאוחדים) עלולים "לראות בעצמם" את הישויות הרציונאליות העל-אנושיות... אירוע כזה יבטל מחוסר תועלת את מכלול החוקים האנושיים, ויתכן שזה יקרה בצורה מידית. תגובת שרשרת בלתי נשלטת תתפתח במהירות מיריבת, בלי כל תקווה להשבת השליטה במצב*".

וינג' הציע מושג חדש לגבי התופעה הזאת:

"סינגולאריות (ייחודיות) טכנולוגית"("technological singularity")

את הסינגולאריות מפרשים בדרך כלל בתור נקודה או תחום מיוחדים כלשהם בפונקציה שהערך בהם שואף לאינסוף או מתאפיין בהתנהגות בלתי רגילה אחרת. מעין נקודה קריטית שאחריה הערך של הפונקציה הופך לבלתי מוגדר ולבלתי צפוי. דוגמאות טיפוסיות לסינגולאריות - זרם מפולת במוליכים-למחצה (breakdown avalanche), אפקט המנהרה במגעים חשמליים ובמוליכים-למחצה (tunnel effect), קטע בתרשים זרם-מתח של דיודת המנהרה (tunnel diode), וכו'. הסינגולאריות הטכנולוגית, פירושה נקודה מסוימת בהתפתחות הטכנולוגיה בכלל, ובמיוחד - בהתפתחות הטכנולוגיות הממוחשבות והבינה המלאכותית, שמעבר לנקודה הזאת המשך התפתחותן נעשה, ראשית, בלתי נמנע ובלתי תלוי באדם, ושנית, הוא נעשה בלתי צפוי.

עמדותיו של וינג' ללא ספק הושפעו על ידי החוק המכונה "**חוק מור**" [1.3] שנוסח ב-1965 בידי אחד ממייסדיה של חברת אינטל, גורדון מור (Gordon Moor). לפי החוק הזה, כמות הטרנזיסטורים במיקרו מעבדים מכפיל את עצמו פי 2 בערך כל שנתיים, והפרודוקטיביות שלהם גדלה באופן אקספוננציאלי, איור 1.1 החוק הזה פועל יותר מ-50 שנה.



<u>איור 1.1</u>
מספרם של הטרנזיסטורים על גביש המיקרו מעבד תלוי בזמן.
בציר האנכי יש סקאלה לוגריתמית, לכן התלות הזאת תואמת לחוקים אקספוננציאליים.

על-פי חוק אקספוננציאלי דומה מתפתחות, והופכות ליותר ויותר מתוחכמות, לא רק טכנולוגיות ממוחשבות ומבוססות על מיקרו מעבדים, אלא גם סוגים אחרים של טכנולוגיות, ובעקבותיהם גם החברה. הסוציולוג מ. סוחרב כותב במאמרו "פיצוץ התחכום" [1.4]:

"*בהתפתחות החברה אפשר לראות עוד כלל אחד – האצתה של הגברת התחכום עם הזמן. במשך עשרות אלפי שנים אכלסו את כדור הארץ שבטים המצוידים בקשתות וחניתות. בתוך כמה מאות שנים אנו עברנו ציביליזציה תעשייתית-טכנולוגית. כמה שנים שמורות לעידן המחשבים, אין לדעת, אך המהירות הנוכחית של אבולוציית החברה היא חסרת תקדים*".

מומחים בולטים רבים תומכים בדעה הזאת:

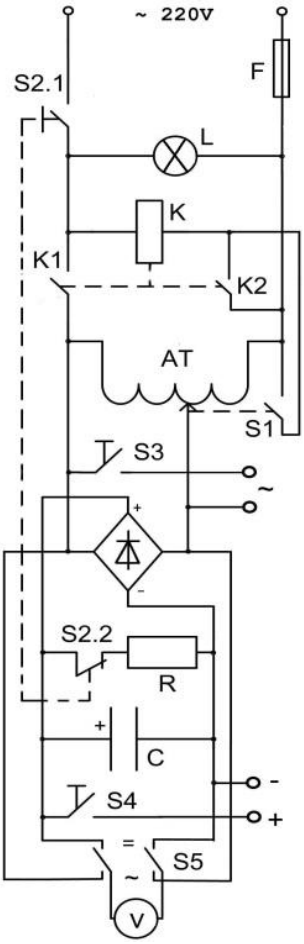
- דר' לפילוסופיה, פרופ' אי.א. נגודאייב [1.5]: "*כללה של התפתחות הטכנולוגיה הוא תחכומה ההדרגתי. התחכום הזה קורה בדרך ריבוי כמות האלמנטים הנכללים במערכת הטכנולוגית, וגם בדרך שינוי המבנה של המערכת הזאת*".
- המנהל, המהנדס הראשי של המכון המרכזי למדע, מחקר והנדסה של רובוטיקה וקיברנטיקה טכנולוגית, חבר אקדמיית המדעים של רוסיה, וו.א. לופוטה ודר' למדעים טכנולוגיים, פרופ' יא.אי. יורביץ' [1.6]: "*הכלל הרווח של ההתפתחות המדעית-טכנולוגית בכל תחומי פעילותו של האדם הינו התחכום ההולך וגובר, אינטגרציה והעצמה של הטכנולוגיות.*"
- דוקטור למדעים טכנולוגיים א.יא. בזמנוב [1.7]: "*מגמת ההתפתחות של הטכנולוגיות מתאפיינת בתחכום ההולך וגובר של מכונות, מכשירים, ומערכות. ככל שגובר תחכומם של המוצרים, רמת אמינותם (כשהתנאים האחרים שווים) יורדת*".

אם "פיצוץ התחכום" של מכשירי החשמל הביתיים קורה מול עינינו ואינו דורש הוכחות, תחכום הטכנולוגיות בתעשייה אינו כוודאי בעבור אדם מן השורה. לכן, אנו נראה כמה דוגמאות קונקרטיות הממחישות את המגמה הזאת.

החברה השוודית הנודעת Programma Electric AB שנוסדה בשנת 1976 (נרכשה ב-2001 בידי General Electric , וב-2007 נכללה בתאגיד Megger Group Ltd) מייצרת מגוון רחב של מכשירים והתקנים לבידוק הציוד בתעשיית החשמל: מקוצבי זמן מדויקים ומערכות לבדיקת ממסרי הגנה, עד לספקי זרם חזק. אחד המוצרים של החברה הוא ההתקן מסוג B10E למדידת המתח המינימאלי בהפעלת מפסקי זרם במערכות מתח גבוה

איור 1.2

מראה חיצוני של ההתקן מסוג B10E לבדיקת מתח מינימאלי בהפעלת מפסקי זרם במערכות מתח גבוה



איור 1.3

דוגמת התרשים של התקן פשוט לבדיקת מפסקי זרם, המבצע את כל הפונקציות הנדרשות

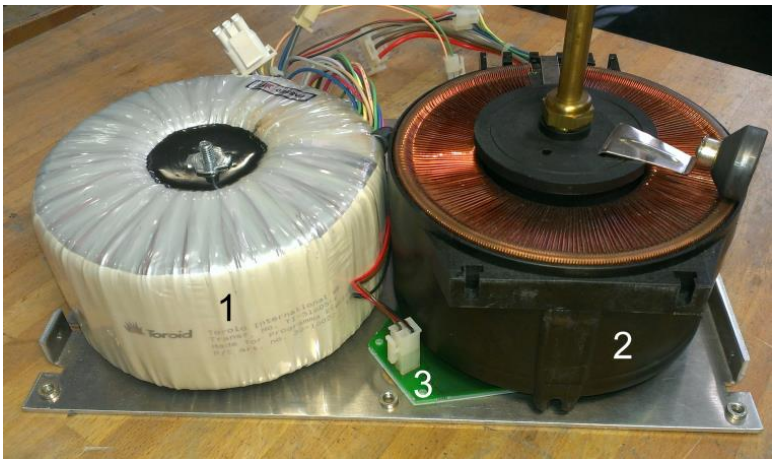
לפי תקן IEC 62271-100, מפסקים כאלה חייבים לעבור בדיקת התאמה למאפייני היצרן לפי המתח המינימאלי בהפעלתם. בסך-הכול מדובר במכשיר שתפקידו פשוט מאוד: כיוון מוקדם לרמת מתח מסוימת הנשלטת בידי מד מתח (וולטמטר), ובהמשך - אספקת המתח הזה ליציאות פלט של המכשיר. תרשים ההתקן המבצע את הפעולה הזאת אינו מסובך, איור 1.3. בהתקן הזה מתח הפלט מתכוונן בידי אוטו-שנאי AT מיושר בידי גשר דיודות, וועובר סינון ע"י קבל C בעל קיבולת גדולה (כמה אלפי מיקרו פאראד). לזוג אחד של יציאות פלט מוזרם מתח משתנה מבוקר, לזוג אחר – מתח קבוע מבוקר. וויסות מתח פלט/יציאה נעשית באמצעות מד מתח V. למניעת הזרמה מקרית של מתח גבוה (250 וולט) מההתקן לסליל של מפסק הזרם מתח נמוך (24-48 וולט) או למנוע, על האוטו-שנאי מותקן מיקרו מפסק S1 בצורה כזאת שמגעיו חסומים בידי הדוחף המותקן בגליל, רק במצב אפס של ראש ההזזה של השנאי.

בעת לחיצה על הכפתור S2 מנתקים את הנגד R מהקבל C ומתאפשרת אספקת מתח לכניסת ההתקן. לאספקת מתח שכוון מראש באמצעות מד מתח ואוטו-שנאי לסלילי המפסק, מחזיקים את הכפתור S2 ולוחצים בנוסף אחד מכפתורי S3 (יציאת מתח חילופין) או S4 (יציאת מתח ישר). אם המפסק לא פעל, מגבירים את המתח כשהכפתור S2 לחוץ

ולוחצים שוב על אחד מכפתורי S3 או S4. כעת נראה איך האלגוריתם הפשוט הזה מיושם בהתקן B10E של החברה הידועה, איור 1.4A.

<u>איור 1.4A</u>
הכרטיס האלקטרוני של ההתקן B10E. התקנים מבוססי מוליכים-למחצה המותקנים בקצוות מעגל מודפס נצמדים בעת ההרכבה לגוף קירור המשמש גוף ההתקן

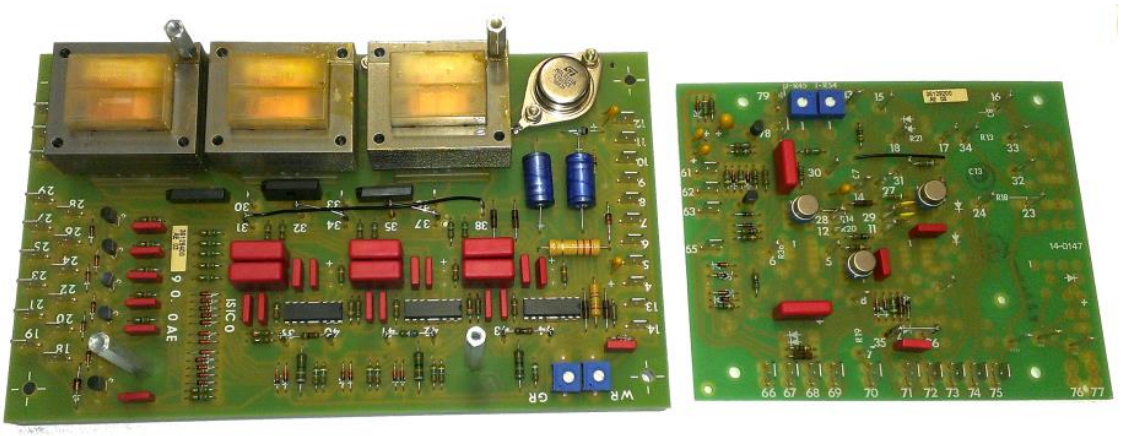
הכרטיס האלקטרוני של ההתקן, איור 1.4A, כולל 13 יח' ממסרים אלקטרומגנטיים, 14 יח' מיקרו-מעגלים משולבים שונים, 10 יח' גשרי דיודות לזרם של 1A, ושתי דיודות עוצמתיות מסוג 40EPS08 (40A, 800W), 4 יח' טריסטורים להספק גבוה מסוג BUX98AP (24A, 100W), 3 יח' טריסטורים דו כיווני (triac) מסוג VTA26 -400W (25A, 400W), 4 יח' טריסטורים עם פיקוד לסגירה - GTO (13.5A, 800W), 2 נגדים מדויקים מסוג PBV, וכן הלאה. אודה בכנות, כשפתחתי את ההתקן הזה כדי לתקנו, הייתי בתדהמה ממה שראיתי. אהבתי במיוחד את החישן האלקטרוני של זווית פניית הגליל באוטו-שנאי במקומו של מיקרו-מתג פשוט ביותר (ראה איור 1.4b).



<u>איור 1.4B</u>
כרטיס הכוח של ההתקן B10E: 1 - שנאי עם סט של מתחי פלט שונים להזנת מעגלים אלקטרוניים של ההתקן, 2 – אוטו-שנאי, 3 - לוח החישן של זווית פניית הגליל באוטו-שנאי.

אפשר לראות בוודאות את אי-ההתאמה המוחלטת שבין הפונקציות הפשוטות שההתקן מבצע למבנה הטכני שלו. מסקרן לדעת איזה תירוץ היו נותנים מפתחיו של ההתקן הזה לאוסף האלקטרוניקה הענקי הזה?

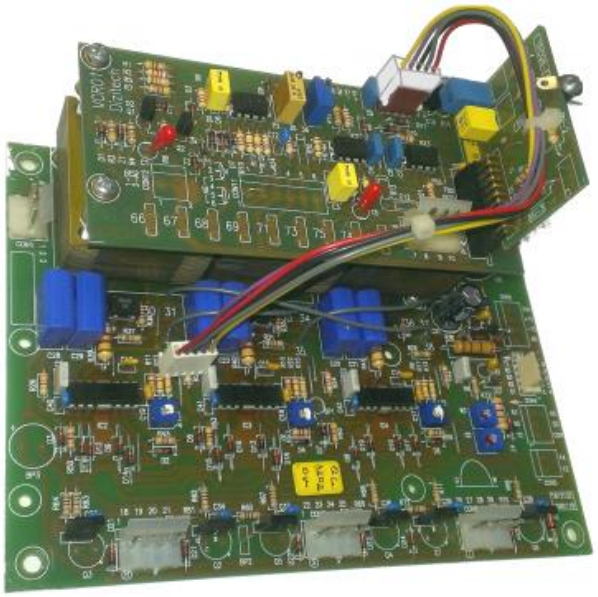
דוגמה נוספת מתחום מטענים של סוללות מצברים משתמשים בה בהרבה תחנות כוח ותחנות משנה במערכות לזרם ישר. מתקן מן הסוג הזה כולל יחידות עיקריות הבאות: שנאי כוח, כרטיס טריסטורים וכרטיס אלקטרוני לפיקוד בטריסטורים. בתחילת שנות ה-70 של המאה הקודמת, חברת AEG פיתחה כרטיס פיקוד של טריסטורים, איור 1.5, הכרטיס שפותח היה כה מוצלח שהיצרנים השונים משתמשים בו כבר יותר מארבעים שנה במודלים שונים של מטענים ומיישרי זרם.



איור 1.5

שתי יחידות של כרטיסי פיקוד עבור מטענים שחברת AEG פיתחה ויצרה בצורה מאסיבית משנות ה-70 של המאה הקודמת. מימין - יחידה אנלוגית שמעבירה אות ליחידת פולסי (משמאל) המייצרת את האימפולסים להפעלת הטריסטורים

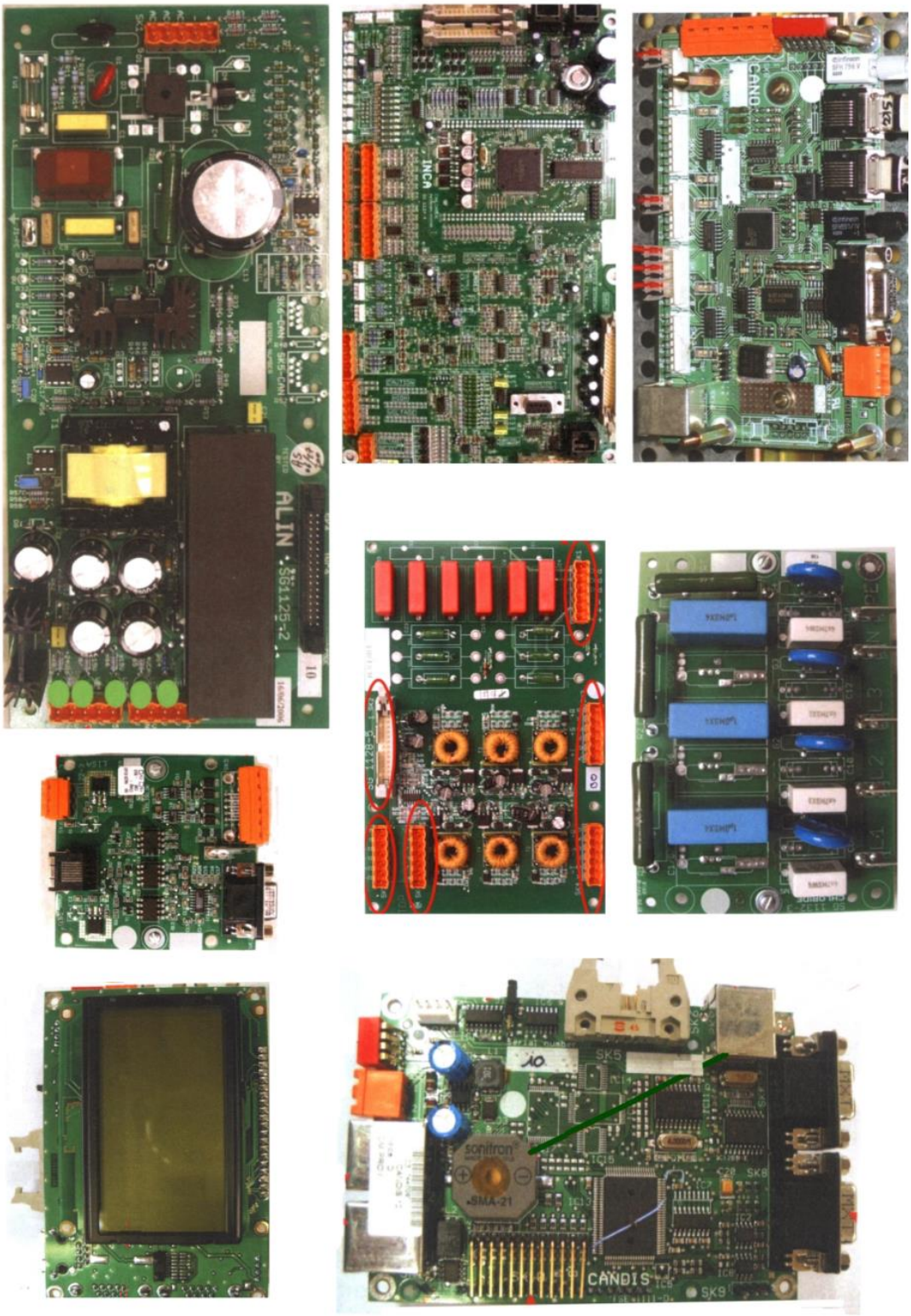
יצרנים אחדים פשוט העתיקו את הכרטיס הזה, עשו לו הסבה לרכיבי חומרה מודרניים, איור 1.6, אך הדבר אינו משנה את המהות.



איור 1.6

בלוק פיקוד של מטענים שנעשה על בסיס רכיבי חומרה מודרניים

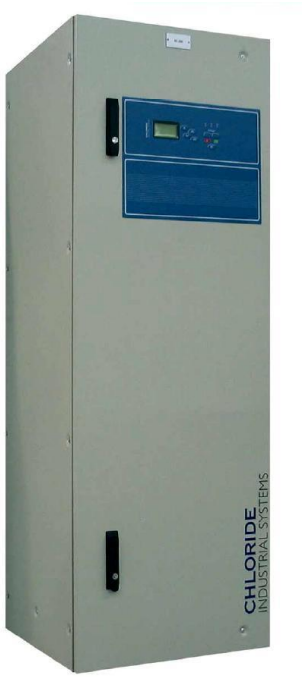
לפי התרשים שפותח בידי AEG בשנות ה 70 של המאה הקודמת



<u>איור 1.7A</u>

סט של כרטיסי פיקוד בסיסיות של מטען מבוסס מיקרו-מעבדים מסדרת Apodys של החברה Chloride France S.A

יש להודות בצער שעל אף המוניטין הטוב ביותר שממנו נהנו במשך כמעט 45 שנה הטכנולוגיות האנולוגיות במערכת מטענים של סוללות מצברים , גם מבחינת האמינות וגם מבחינת קלות התיקון, כעת אפשר להצהיר שהטכנולוגיות האלה הוחלפו כמעט כליל על ידי התקנים דיגיטליים מבוססי מיקרו-מעבדים.



<u>איור 1.7B</u>
מטען סוללות מצברים מסדרת Apodys של החברה Chloride France S.A.
שהיא חלק מתאגיד Emerson

מה הן התכונות החדשות שקיבלו מטענים המודרניים הנשלטים באמצעות מיקרו-מעבדים? איור 1.7B.

התכונות הבאות: התפריט "המסועף" שבו לא כל כך פשוט למצוא את הפעולה הדרושה במקום שלושה פוטנציומטרים פשוטים לשליטה על מתח תפוקה ומתג מצב משטר עבודה; כתובת IP וחיבור לרשת המאפשר להאקרים להתערב בפעילות המטען; קשר המודם בין היחידות הפנימיות במקום כבלי נחושת רגילים, וכו'.

<u>איור 1.8</u>
מערכת מסוג MCT1600 של חברת Megger לבדיקת משנאי זרם

אפשר להמשיך ולתאר עוד זמן רב את "פיצוץ התחכום". למשל, אפשר להזכיר את המערכת מסוג MCT1600 של חברת Megger, איור 1.8, לבדיקת התנגדות הבידוד, יחס תמסורת ונקודת הפיתול של מאפיין זרם. המערכת, בעת הפעלתו, טוען מערכת הפעלה שלמה VX Works (מערכת הפעלה בזמן אמת 64-ביט).

אפשר להזכיר גם את מדדי העמידות של אותה החברה שעברו אבולוציה ממכשיר מיניאטורי עם גנרטור המסובב באמצעות ידית, למערכות מתוחכמות ביותר על בסיס מיקרו-מעבדים, איור 1.9.

הדוגמה הטיפוסית ל"פיצוץ התחכום" בתעשיית החשמל היא Smart Grid. ידוע שתפיסת "הרשת החכמה", פירושה התקנת מיקרו-מעבדים בכל הרכיבים של מערכת הייצור, הולכה והשנא ללא יוצאי דופן, והקמת ערוצי תקשורת

ביניהם על בסיס רשתות ממוחשבות, בעיקר אלחוטיות (Wi-Fi). לדעתם של חסידי Smart Grid, מערכת החשמל של העתיד אמורה להיראות כמו משחק מחשב חדשני מתוחכם ברשת שבו אלפי משתתפים – הרכיבים של רשתות החשמל. אחד השחקנים המרכזיים של "המשחק" הזה הם ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים: בעלי בינה מלאכותית, בעלי יכולת הסתגלות עצמית, בעלי הגיון בלתי מוגדר, בעלי יכולת הרתעה, במילים אחרות, הממסרים המסוגלים לפעול באופן עצמאי ולפי שיקול דעתם [1.8].

<u>איור 1.9</u>
מכשירים לבדיקת התנגדות הבידוד מתוצרת חברת Megger: WM 6- המכשיר הפשוט ביותר בעל גנרטור וידית סיבוב; S1 -5010 - מערכת המתוחכם ביותר על בסיס מיקרו-מעבדים

עלותם הנמוכה ונגישותם של מיקרו-מעבדים, בקרים תעשייתיים, ורכיבים אלקטרוניים חדשניים בעלי יכולת הסתגלות גבוהה, המגוון הרחב וההולך ומתרחב של רכיבים כאלה בשוק, פרודוקטיביות גבוהה ביותר של הציוד המיועד להתקנה אוטומטית והלחמת הרכיבים על הלוח, מערכות אוטומטיות לבדיקת כרטיסים מודפסים מוכנים - כל אלה מבטלים את המגבלות הישנות בתחכומן של המערכות האלקטרוניות ותחום שימושן. כתוצאה מכך, את מיקרו-מעבדים אפשר למצאו היום בכל מקום. השימוש ההולך ומתרחב של המעגלים האלקטרוניים מבוססי מיקרו-מעבדים בכל התחומים, תוך הגברת תחכומם מתמדת - זאת המגמה הקובעת היום בהתפתחות הטכנולוגיות. חסידי הקדמה הטכנולוגית בצורתה הנוכחית מנסים לשכנע את כולם שהתחכום המתמיד והגובר של הטכנולוגיות הינו "הקדמה הטכנולוגית".

בוודאי יש תחומים מסוימים של הנדסה וטכנולוגיות שבהם אין ברירה אלא להשתמש במיקרו-מעבדים ובפעולות החישוב, ושבהם הטכנולוגיות מבוססות מיקרו-מעבדים באמת אפשרו זינוק טכנולוגי משמעותי. אולם, לא בכל המקרים השימוש בהתקנים על בסיס מיקרו-מעבדים מבוסס מבחינת הדרישות הטכניות למוצר, מספר מקרים כאלה גדל ככדור שלג והדוגמאות שהבאנו קודם הן רק תיאור חלקי מאוד של ההליך הזה.

אך אם התחכום של הטכנולוגיות בהרבה מקרים אינו מוצדק, כפי שהראנו זאת קודם, למה הן בכל זאת הולכות ונהיות יותר ויותר מתוחכמות, בקצב ההולך וגובר?

התשובה די פשוטה: המפתחים והיצרנים מעוניינים בתחכום הגובר בהתמדה של טכנולוגיות, כי התחכום המתמיד והמכוון הזה מאפשר להם להשיג כמה מטרות בבת אחת:

1. הגברת יעילות משא הפרסום בכך שהם מציעים לצרכן יותר ויותר פונקציות חדשות במוצרים חדשים (לא תמיד נחוצות באמת);

2. הקטנת אמינות המוצר ותוחלת חייו (התוצאה הטבעית של התחכום), כלומר, להכריח את הצרכן לרכוש תוצרת חדשה לעתים תכופות יותר;

3. הקטנת הסבירות לתיקון המוצר והגדלת תלות הצרכן ביצרן. ההתקנים האלקטרוניים החדשניים ביותר ומכשירים שהורכבו בטכנולוגיית השמה משטחית, מאפשרים תיקון אך ורק באמצעות החלפת כרטיסים שלמים המיוצרים בידי אותו היצרן. במקרים רבים עלות הבלוקים האלה גבוהה מדי, אך הצרכן נאלץ לרכוש אותם במחיר מופרז.

על כן, במקרים רבים תחכום הטכנולוגיות הינו הליך מלאכותי שלעתים קרובות אין לו בסיס אובייקטיבי. היצרנים יוזמים אותו למטרת רווח ברורה.

ואולם, האם ההליך הזה של התפתחות הטכנולוגית באמת אינו מזיק?

לטענת איש מדע רוסי נחשב, דוקטור למדעי טכנולוגיה, פרופסור, ראש המכון המרכזי למדע ולמחקר מס' 46 של משרד בטחון הרוסי, אלוף וו.מ. בורנוק [1.9]:

"*ההתפתחות הטכנולוגית טומנת בחובה כמות אדירה של איומים, שאין לחזות את המגוון ואת ההשלכות של השפעותם על גורל הציביליזציה. ... בשנים האחרונות הקדמה הטכנולוגית העניקה לעולם יתרונות טכניים רבים, אך יחד איתם גם את כאב הראש שאינו חולף. למשל: טכנולוגיות המחשב וטרור קיברנטי, מערכות תקשורת חדשניות ומלחמות מידע, מערכות מתוחכמות לשליטה באתרי תשתיות וטכנולוגיות והשלכות קשות ביותר בעת השיבושים בפעילותן, הכרת בסיס החיים ומזון מהונדס גנטית, אפשרות ליצור וירוסים מסוכנים בצורה מלאכותית, וכו'. עם זאת, רבים מן האיומים שהיכולות הטכנולוגיות החדשות חוללו, לא התגלו במיידיות ואי אפשר היה לחזותם (או שהחזאים מן הסוג הזה נחשבו למספרי סיפורים בדיוניים שאיש לא התייחס אליהם ברצינות).*

והנה דבריו של איש האקדמיה הרוסית נ.נ. מויסייב: "*... קדמה מדעית-טכנולוגית, הגברת עוצמתה של ציביליזציה, אינן מבטיחות יתרונות בלבד. בכוח שהוא נותן לאדם צריך לדעת להשתמש. האדם מוצא עצמו כעת בתפקיד גוליבר שנכנס לחנות הבדולח של הליליפוטים. תנועה בלתי זהירה אחת, וכל היופי הזוהר הזה מתנפץ והופך לערימת שברי זכוכית*".

כשיודעים מה הן הסכנות הקיימות, אפשר היה אולי לנסות למנוע אותן. ואולם, הנה מה שכותב בנידון המומחה שצוטט קודם [1.9]:

"*אפילו כשהמראה של מערכת טכנולוגית כלשהי כבר גובש, אך מופיעים איומים חדשים, לחזות את המצב לא יהיה דבר פשוט. לא רבים הם הפרשנים שיצליחו לחזות את תוצאותיה של מתקפת ההאקרים על מערכת השליטה, למשל, בתחנת כוח הידרואלקטרית או גרעינית גדולה, או על מערכת השליטה בתנועת התחבורה האווירית או זו של הרכבות. תחזיות מסוג "זה יהיה נורא", "יהיו אבדות קולוסאליות", לא יספקו אף אחד, ואת הערכות מסוג: "סבירות הזרקתם של החלקיקים הרדיו-אקטיביים לאטמוספרה בנפח של N תהייה שווה ל-p", "מספר האסונות בתחום האווירי בסבירות של p יגיע לערך K", לא יהיה קל להשיג. כדי לעשות זאת (לתת תחזית), דרוש דגם המערכת (של אתר מסוים) המשקף את המערכת האמיתית, דרוש ידע לגבי רמת ההתפתחות של מיומנות ההאקרים, דרכי חדירה אל תוך המערכת המותקפת,*

וכו'. אבל, ראשית, הדבר כמעט בלתי אפשרי, ושנית, אם הדגם הזה אכן יוצר, נפילתו בידי הפושעים (האקרים) הופכת את סיכויי הפעילות החלקה של המערכת הזאת לקלושים ממש.

האסטרופיזיקאי הנודע ל.מ. גינדיליס במאמרו הביע דעה דומה [1.10]:

"חריפות המצב היא בעובדה שהקריסה צריכה להגיע בקרוב מאוד, כבר בעשורים הראשונים של המאה 21. לכן, אפילו אם האנושות הייתה יודעת איך "לסובב" (או לפחות לבלום) את התהליך הזה, אפילו אם היו לה אמצעים ורצון כדי לעשות את המהפך כבר היום, לא היה לה מספיק זמן לעשות זאת, כי לכל ההליכים השליליים יש אינרציה מסוימת שבגללה אין לעצורם במיידית.... כלכלתו של כדור הארץ דומה לרכב עמוס מאוד שנע במהירות גדולה בכביש העפר ישירות לעבר התהום. ניראה שכבר עברנו את הנקודה שבה היה צריך לפנות כדי לא לסתות מ:"מסלול הפניה". גם לבלום איננו מספיקים. המצב חמור אף יותר מתוקף העובדה שאיש אינו יודע היכן נמצאים ההגה והבלמים. למראת זאת, הצוות והנוסעים מרגישים עצמם נוח, וחושבים בתמימות שכאשר "יהיה בכך צורך" הם יבינו את מבנה הרכב ויוכלו לבצע את התמרון הנדרש.

לסיום, נביא את דבריו של מייסד תורת הייחודיות ורנון וינג':

"אם הייחודיות הטכנולוגית עתידה לקרות, היא תקרה. אפילו אם כל מדינות העולם יבינו את"האיום" וייבהלו מאוד, הקידמה הטכנולוגית לא תעצור. היתרון התחרותי - כלכלי, צבאי, ואפילו בתחום האמנות - בהישג כלשהו באמצעי האוטומטיזציה הינו מוחץ כל כך, שאיסור הטכנולוגיות האלה פשוט מבטיח שמישהו אחר ישתלט עליהן ראשון. כבר הבעתי ספק באשר ליכולתנו למנוע את הייחודיות, כי בואה הוא תוצאה בלתי נמנעת של התחרותיות האנושית ושל היכולות הטכנולוגיות".

למעלה הראנו את הדרך הטבעית (אם אפשר להשתמש במילה הזאת כשמדובר בטכנולוגיות) של התפתחות הטכנולוגיות. ואולם, לבעיה יש עוד צד אחד, שמעולם לא הוזכר בפילוסופיית הטכנולוגיות. מדובר באמצעים להשמדת הטכנולוגיות. האמצעים המתפתחים במקביל להתפתחות הטכנולוגיות. ככל שהטכנולוגיות מתוחכמות יותר, וככל ש"האלקטרוניזציה" ו"המחשוב" שלהן גדולים יותר, כך גוברת פגיעותה מההשפעות המכוונות ההרסניות בשלט רחוק, הכוללות את ההשפעות הקיברנטיות והאלקטרומגנטיות [1.11].

על כן, מפתחי מערכות נשק מעניקים תשומת לב גוברת ליצירת סוגי נשק חדשים המיועדים לפגיעה אך ורק בטכנולוגיות ולא בבני אדם. זהו גם חלק מ"הקדמה הטכנולוגית", שבו פילוסופיית הטכנולוגיות אינה דנה כלל, וחבל שכך. שהרי, השמדה פתאומית של מערכות חשמל מתוחכמות ושל רשתות מחשב מסועפות, שעליהן מתבססת הציביליזציה המודרנית, עלולה להוביל לקריסת הציביליזציה עצמה. לכן, לא אחת אלא שתי מגמות הפוכות מסכנות את החברה המודרנית: מצד אחד, ההתפתחות הבלתי ניתנת לשליטה שמובילה לייחודיות (סינגולריות), ומצד שני, הסכנה ההולכת וגוברת של השמדה פתאומית מכוונת של הטכנולוגיות המודרניות על ידי סוגי נשק מיוחדים.

1.2. הקדמה הטכנולוגית בממסרי הגנה

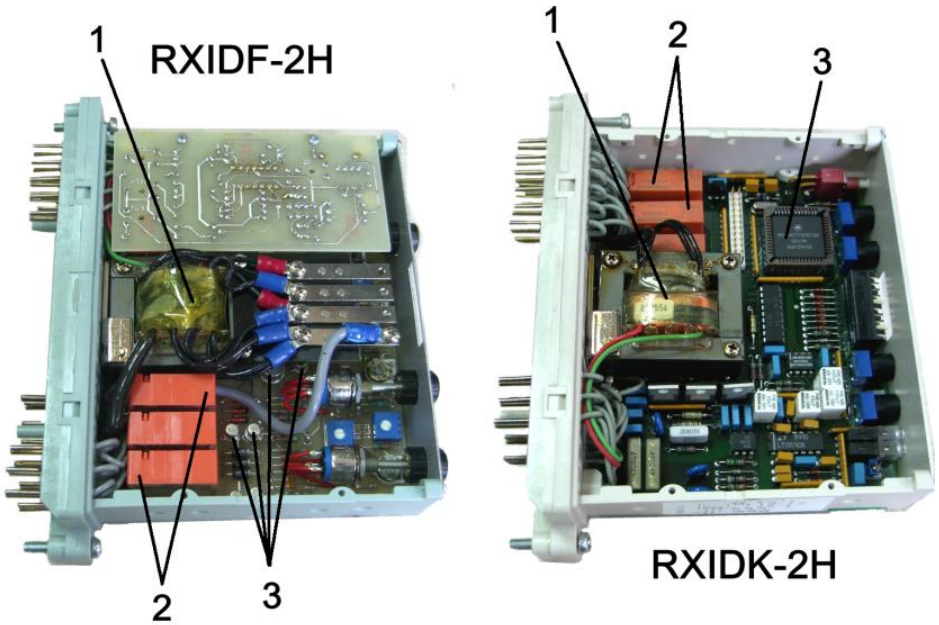
במשך מאה שנים הבטיחו ממסרי הגנה האלקטרומכניים את הפתרון לכל הבעיות המתעוררות בממסרי הגנה. ואם ניקח בחשבון שבמדינות רבות בעולם, כולל רוסיה וארצות הברית, ממסרי הגנה אלקטרומכניים הם עד עכשיו כ -70

80 אחוזים מכל הסוגים של ממסרי ההגנה הקיימים, אפשר לומר בביטחון שגם היום ממסרי הגנה אלקטרומכניים מסוגלים עקרונית לפתור את כל הבעיות שממסרי ההגנה אמורים לפתור. עם זאת, במשך 25-20 שנים האחרונות אפשר היה לראות בכל מקום את ההחלפה של ממסרי הגנה אלקטרומכניים בהתקנים מבוססי מיקרו-מעבדים. ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים ובקרים לוגיים מתוכנתים (PLC) רבים השולטים בתהליכי עבודתו של הציוד החשמלי נכנסו עמוק לתוך חיינו, ובמקרים רבים אין לספק בלעדיהם את תפקודה התקין של תעשיית החשמל. והעניין אינו ביכולות-על ייחודיות כלשהן של טכנולוגיית מיקרו-מעבדים, אלא במגמה הקיימת, המותנית בסיבות שונות, בהן גם רווחי העתק מהיצור האוטומטי לחלוטין של המעגלים המודפסים לעומת היצור המכני המדויק של ממסרי ההגנה מהדור הקודם. חיפוש אחר דרכים להורדת עלות היצור ולהעלאת תועלת היצור הוביל לכך שלפני -30 40 שנה הופסק לגמרי פיתוח סוגים חדשים של ממסרי הגנה אלקטרומכניים, וכל מאמצי המפתחים הופנו לעשיית ממסרי הגנה: סטטיים על בסיס מוליכים-למחצה תחילה, ומאוחר יותר – ממסרים מבוססי מיקרו-מעבדים. ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים בהתחלה העתיקו את כל הפונקציות והמאפיינים של הממסרים מדורות קודמים. יכולות ומאפיינים חדשים הופיעו בהם רק כעבור שנים רבות. לכן, לא ניתן לומר שהופעתם של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים הותנתה בצרכים ממשיים בתחום. כתוצאה ממדיניות כזאת של היצרנים, כל החברות המובילות בעולם הפסיקו לייצר את כל הסוגים האחרים של ממסרי הגנה מלבד הממסרים על בסיס מיקרו-מעבדים, ולא נותרה כמעט כל חלופה לממסרים האלה (מלבד יוצאי דופן בודדים).

כבר בדגמים הראשונים של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים, שהעתיקו את הפונקציות של הממסרים הסטטיים על בסיס מוליכים למחצה, איור 1.10, התגלו בעיות רציניות: התקלות בהם היו תכופות הרבה יותר, ולא ניתן היה לתקנם בגלל המיקרו-מעבד המיוחד והזיכרון הקבוע עם התוכנה המוקלטת בו. התוצאה: אם את ממסרי הגנה מסוג RXIDF - 2H שבהם שולבו טרנזיסטורים ורכיבים אחרים היה ניתן לתקן במהירות ולהחזיר לעבודה, את החלופה המבוססת על מיקרו-מעבדים - RXIDK - 2H - פשוט זרקו לפח. כתוצאה, RXIDK - 2H כבר מזמן נעלמו מהשימוש, ו-RXIDF - 2H עדיין פועלים. מגמת הירידה באמינות ממסרי הגנה, הקשורה במעבר לממסרים מבוססי מיקרו-מעבדים, שנצפתה כבר בתחילת ההליך הזה, נצפית עד היום, אף על פי שלדורות החדשים של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים כבר אין הרבה במשותף עם הדגמים הראשונים שיוצרו לפני כמה עשורים, איור 1.10.

הדבר מלמד על כך שהבעיה אינה בתקלות טכניות בודדות של הדגמים הראשונים של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים, אלא שיש לה אופי מערכתי. אך איש לא רצה להיחשב כנסוג לאחור, ואיש לא רצה לדון בבעיות גלויות לעין שליוו את הופעתם של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים, כי הושמעו לגביהם רק תגובות מתלהבות. יתרה מזאת, בגלל העובדה שמיליארדי דולרים הושקעו בשנים האחרונות בפיתוח הרעיונות והטכנולוגיות הקשורים בפיתוחם של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים, ובעבור אלפי מדענים ומהנדסים בעולם התחום הזה הפך לעסק רווחי מאוד שהזין אותם במשך כמה עשורים, כל הדיבורים על בעיות וחסרונות הממסרים האלה נמנעו מיד או נתקלו בהתנגדות עזה מצידם של היצרנים, המדענים, המפתחים, המהנדסים ושל כל המשתתפים האחרים של העסק הגרנדיוזי הזה. ניסיון המחבר להפנות תשומת לב לקיום הבעיות הקשורות בממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים בעבר רק העלתה האשמות עזות כלפיו בחוסר פרגון, בחוסר הבנה של יסודות הממסרים ואפילו בניסיון לבלום את הקדמה הטכנולוגית. צריך להודות שבשנים האחרונות יש יותר ויותר הבנה של העובדה שהבעיות אכן קיימות, אך ההליך הזה מתקדם בדומה לאנקדוטה הידועה: "זה לא יכול להיות, כי זה לא יכול להיות לעולם", ואז:

"יש בזה משהו", ולבסוף: "האם יכול להיות אחרת?", רק בלי השלב האמצעי של ההליך הזה, כלומר, בלי ההכרה בצדקתו של זה שהיה הראשון להתריע על הבעיות הקיימות.



<u>איור 1.10</u>
שני ממסרי יתרת זרם עם השהיית זמן, בעלי תכונות טכניות זהות, מאפיינים זהים, וגודל זהה, הנמצאים בתוך קופסה סטנדרטית

COMBIFLEX® והמיוצרים בידי אותה החברה (ABB). משמאל: הממסר הסטטי על בסיס מוליכים

למחצה, מסוג RXIDF -2H, מימין: הממסר המבוסס מיקרו-מעבדים RXIDK -2H

1 – משני זרם פנימי; 2 - ממסרי פלט אלקטרומגנטיים; 3 - טרנזיסטורים בממסר הסטטי, והמיקרו-מעבד המיוחד בממסר המבוסס מיקרו-מעבדים

מה קשור לנושא

1.3 מיקרו-מעבדים - יסוד השלב המודרני בקידמה הטכנולוגית

עלותם הנמוכה ונגישותם של מיקרו-מעבדים, בקרים תעשייתיים, ורכיבים אלקטרוניים חדשניים ברמת אינטגרציה גבוהה, המגוון ההולך וגדל של רכבים כאלה בשוק, פרודוקטיביות גבוהה מאוד של הציוד המיועד להתקנה אוטומטית ולהשמה משטחית במעגל מודפס, מערכות אוטומטיות לבדיקת מעגלים מודפסים מוכנים - כל אלה מבטלים את המגבלות הקודמות בכל הקשור לרמת תחכומן של המערכות האלקטרוניות ולתחום שימושם. כתוצאה מכך, את מיקרו-מעבדים אפשר היום למצאו בכל מקום, אפילו במושב אסלה שבו מיקרו-מעבד מודד את טמפרטורת הגוף של המשתמש ושולט במחמם המים בדוד המובנה בצורה כזאת שזו תהייה שווה לטמפרטורת הגוף. השימוש ההולך ומתרחב ברכיבים אלקטרוניים מבוססי מיקרו-מעבדים בכל תחומי ההנדסה, תוך הגברת רמת תחכומם, זהי המגמה הקובעת היום בהתפתחות הטכנולוגיות. את מגמה הזאת מכנים "קדמה" בהתפתחות ההנדסה והטכנולוגיות. בוודאי,

ישנם תחומים מסוימים של הנדסה וטכנולוגיות שבהם אין ברירה אלא להשתמש במיקרו-מעבדים ובפעולות החישוב, ושבהם הטכנולוגיות על בסיס מיקרו-מעבדים באמת אפשרו זינוק טכנולוגי משמעותי. אולם, לא בכל המקרים השימוש בהתקנים על בסיס מיקרו-מעבדים מבוסס מבחינת הדרישות הטכניות למוצר, ומספר מקרים כאלה גדל ככדור שלג.

עקבתי אחר המגמה הזאת מבפנים, תוך שימוש בהתקנים אלקטרוניים מתוחכמים המיועדים לתעשייה ותיקונם (התקנים כגון ממסרי הגנה, מטענים בעוצמה גבוהה, מעגלי מהפך, מקורות זרם בלתי פוסק וכו') והתחלתי לפקפק בכך שהמגמה שתוארה למעלה אינה אחרת מאשר הקדמה הטכנולוגית עצמה. מדוע? מפני שהשגשוג הנצפה היום, המותנה בהגברה חדה ברמת התחכום של המכשור ובשימוש הגובר במיקרו-מעבדים בכל תחומי הטכנולוגיות, קשור לאו דווקא לצרכים האמיתיים, אלא לשאיפת היצרנים לגבור על המתחרים בכל מחיר, ליצור משהו שאיש עד עכשיו לא יצר, כל זאת לשם הגדלת הרווחים. אפשר היה רק להצדיע לרצון ליצור משהו חדש או להוריד עלויות היצור, אם המגמה הזאת של החלפת המערכות האנלוגיות בעלות מוניטין מעולה אחרי עשרות שנים של פעילות חלקה במערכות על בסיס מיקרו-מעבדים לא הייתה גורמת להגברה משמעותית ברמת התחכום של הציוד, הפיכת תיקונו לבלתי אפשרי, הורדת רמת אמינותו, העלייה חדה בהוצאות להחזקתו, הגברה חדה במיומנות צוות השירות. לפיכך בעת הזמנת הציוד כל הבעיות האלה נותרות בצל ומתגלות רק כשמתחילים להשתמש בציוד. זהו המחיר שהצרכנים נאלצים לשלם על מה שמכונה "הקדמה", כלומר, תחכום טכנולוגיות חסר מחשבה וחסר אחריות הנעשה לעתים קרובות בלי כל בסיס ורק בגלל האופנה ורדיפתם של היצרנים אחר הרווחים.

1.4 Smart Grid - וקטור מסוכן של "הקדמה הטכנולוגית" בתעשיית החשמל

כל כלי התקשורת כאחד דיברו בהתלהבות רבה על מה שנהוג לכנות "רשתות חכמות" (Smart Grid). מתארים אותן כצעקה אחרונה של האופנה הטכנולוגית המבטיחה לנו יתרונות שלא ידענו קודם. רק העצלנים אינם מדברים כעת על תרומתם בפיתוח הענף האופנתי הזה. מתברר שלא רק מוני חשמל על בסיס מיקרו-מעבדים, אלא גם שנאים, התקנים מקדמי הספק, כבלי כוח, וכו' - כל אלה הינם רכיביה של "הרשת החכמה", שליצורם דרוש כסף.

וכבר יוזמים תוכניות מימון ממשלתיות ממוקדות, ממציאים השקעות של מיליארדים, וכך מתחיל להסתובב המנגנון הענקי של "חלוקת" האמצעים מתקציבי המדינה, המופנים לענף שאיש אינו יכול לתת לו אפילו הגדרה ברורה ומובנת [1.20]. ואולם, ידוע שהקמת "רשת חכמה" כוללת התקנת מיקרו-מעבדים בכל רכיביה של מערכת היצור בלי יוצא מן הכלל, הולכה והשנאה, והקמת ערוצי תקשורת ביניהן, על בסיס רשתות מחשב, בעיקר רשתות אלחוטיות (Wi-Fi). לדעתם של חסידי Smart Grid, מערכת החשמל של העתיד אמורה להראות כמו משחק מחשב חדשני מתוחכם ברשת שבו אלפי משתתפים – הרכיבים של רשתות החשמל. ואם נוסיף לכך מיליונים של מוני חשמל ביתיים המאוחדים ברשת ממוחשבת משותפת (כלומר, מיליוני נקודות חיבור פוטנציאליות לרשת ההאקרים), נבין בצורה טובה יותר את סדר גדול הענקי ואת המסוכנות של הרעיון הזה, המותנית בהגברה חדה של פגיעות מערכת החשמל ממתקפות ההאקרים, לוירוסים, להשפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות בשלט רחוק, שעליהן נדון בהמשך הספר. פעימה אלקטרומגנטית מפיצוץ גרעיני בגובה רב שבוצע בחלל מעל האטמוספירה הקרוב מעל

שטח המדינה נחשבת היום לסוג אפשרי של מה שמכונה "הנשק הלא קטלני" המסוגל לשתק את כל המכשור המיקרו-אלקטרוני בשטחה של מדינה שלמה, בלי לפגוע בחיי אדם.

מצערת העובדה שכל הסכנות האלה, או סתם "סיפורי אימה" כפי שמכנים אותן בזלזול חסידים אחדים של "הקדמה הטכנולוגית" בצורתו הנוכחית, אינן מדאיגות כלל את המדענים והמהנדסים המקבלים את משכורותיהם מקרנות הפיתוח של "רשתות חכמות". לעתים קרובות הם משמיעים טענות מסוג: מטרתנו היא לפתח את הקדמה הטכנולוגית, ומי שצריך להבטיח את בטיחותה של תעשיית החשמל הלאומית הם צבא ושירותי ביון, והם שצריכים לעסוק בכך. עליבות הגישה הזאת גלויה לעין ואינה דורשת הסברים.

1.5 מגמות מסוכנות בהתפתחות ממסרי הגנה

בפרסומים קודמים רבים הפנינו לא אחת את תשומת הלב של הקורא לסכנות הקיימות בכמה מן המגמות בהתפתחות ממסרי הגנה, שאותן המפתחים והיצרנים מקדמים במרץ רב. מדובר במגמות הבאות:

1. הגברה בלתי פוסקת של תחכום ממסרי הגנה, וכמו כן הגברת ריכוזן של פונקציות ההגנה בטרמינל אחד [1.21, 1.22, 1.23].
2. הוספה לממסרי הגנה של הפונקציות הלא אופייניות לממסרים, כמו למשל השגחת ציוד חשמלי [1.24, 1.25].
3. שימוש בלוגיקה דטרמיניסטית ובמה שמכונה "פעולות הרתעה", היוצרות את סכנת איבוד השליטה על פעילות ממסרי הגנה [1.24, 1.25].
4. הרחבת השימוש בלוגיקת תכנות חופשית [1.26] המלווה בעלייה משמעותית בכמות הטעויות בקרב העובדים ובכמות הפעולות הלא נכונות בקרב הממסרים.
5. הגברת תחכומן של בדיקות התקינות, ושל השימוש בממסרי הגנה באופן כללי, עקב ההצטברות בחברת חשמל אחת של סוגי ממסרים מתוצרת שונה הנרכשים במכרזים והשונים זה מזה גם במבנה, וגם בתוכנה. העדר תקנים מוסכמים לגבי המבנה והתוכנה של ממסרי הגנה מגביר את העומס האינטלקטואלי על העובדים ומוביל להפסדים גדולים מהבחינה הכלכלית [1.27]. והמצב הזה מחמיר משנה לשנה.
6. החלשה משמעותית בעמידותם האלקטרומגנטית של ממסרי הגנה, ושל מערך החשמל בכלל, עקב הרחבת השימוש בממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים [1.28-1.30].
7. עלייה בפגיעות מערך החשמל מפני מתקפות ההאקרים בעקבות הרחבת השימוש בציוד על בסיס מיקרו-מעבדים, ובעת שימוש ברשתות זולות יותר - Ethernet ו-Wi-Fi במקום כבלים אופטיים יחסית בטוחים במערכות ממסרי הגנה [1.31].

להגברת התחכום הזאת, בחומרה ובתוכנה, היו תמורות. כפי שמתואר באיורים 1.21-1.22, 1.32-1.35, המעבר לממסרי הגנה על בסיס מיקרו מעבדים מלווה כבר היום בירידה משמעותית באמינות ממסרי הגנה. למרות העובדה הזאת, חסידיהם של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים מניחים כי אין לעצור בהישגים הנוכחיים, וצריך להמשיך

ולהגביר את רמת התחכום של ממסרי הגנה, להגביר את מספר הפונקציות המבוצעות בידי טרמינל אחד, תוך שימוש בלוגיקת תכנות חופשי, בלוגיקה דטרמיניסטית על בסיס תורת רשת עצבית מלאכותית, באלגוריתמים של הרתעה, תוך מתן פונקציות של מערכות מדידה ומערכות ניטור הציוד החשמלי לממסרים, תוך שימוש בערוצי תקשורת אלחוטיים (Wi-Fi) בין הממסרים, וכו'. כל החידושים האלה הממומנים על ידי הון פרטי, אך לעתים קרובות גם מתקציב הציבורי, הפכו לעסק ענקי, ואיש אינו מעוניין היום להתנתק "מהצלחת" הזאת. שחקני העסק הזה אינם מודאגים כלל מההשלכות המרחיקות לכת של מפעלם, ושואפים אך ורק "לדחוף" את רעיונותיהם האופנתיים לשוק.

by Bernd Michael Buchholz, NTB Technoservice, Germany and Christoph Brunner, it4power, Zug, Switzerland

80

industry reports

and prosperity of the industry was clearly considered by Madame Merce Griera I Fisa from the European Commission. The SmartGrids are a prerequisite to reach the European 20-20-20 targets in 2020 (*20% improvement of energy efficiency, 20 % share of renewable energy sources to cover the demand of primary energy, 20 % reduction of carbon emissions*). Furthermore, the advanced products and system solutions partly resulting from funded projects will ensure

presented by the 12 participating project teams – beginning with the building automation "SmartHome" and the involvement of household consumers into the electricity market, the automation of distribution networks up to the erection of prospective markets for energy and reserve power. Engaged discussions followed each of the contributions.

The analysis of the consumer behavior in the environment of dynamic tariffs presented a potential

It is mandatory that the new solutions from the project are urgently applied in practice now.

One session considered the barriers for SmartGrid solutions by the current regulation and legal situation in Germany. For many

<u>איור 1.11</u>

המוטו לאחד הפרסומים בכתב העט הנודע בקרב המומחים בכל העולם,

Protection, Automation and Control Magazine - PAC World, September, 2011

(הטקסט במסגרת), שאפשר לתרגמו כך:

"היישום המיידי של הפיתוחים החדשים צריך להיות היום פרקטיקת חובה"

חוקי יסוד של העסקים פועלים באותה צורה בכל המדינות ובכל התחומים, כולל התחום הרגיש כמו ממסרי הגנה, מערכות שליטה ופיקוח בתעשיית החשמל. אינכם מאמינים? הנה, תכירו את המוטו לדוח הסימפוזיון "Distribution systems of the future: Novel ICT solutions as the backbone for smart distribution", שפורסם באותו כתב העט, "PAC World", איור 1.11 מילות מפתח במוטו הזה: "מידי" ו-"חובה", כלומר, בלי ניתוח נוקב של ההשלכות המרחיקות לכת של החידושים האלה, ובלי ביקורת חסרת תועלת. כך פעלו עד לא מכבר בכל מדינות העולם.

אולם, לאחר גל שלם של תגובות ביקורתיות לפרסומיו של המחבר והכחשה מוחלטת של ההשלכות השליליות מהמגמות שאותן תיארנו מעלה, בשנים האחרונות ניכרת בקרב מומחים רבים ההבנה של אותן הבעיות שניסחנו קודם. למשל, B. Morris, R. Moxley, C. Kusch (Schweitzer Engineering Laboratories), ארה"ב הציגו דוח: "Then Versus Now: A Comparison of Total Scheme Complexity" בעת הועידה הבינלאומית השנייה "הכיוונים העכשוויים בפיתוחן של מערכות ממסרי הגנה ואוטומציית מערכות להספקת החשמל" (מוסקבה, 7-10 בספטמבר 2009). מחברי הדוח מפקפקים בצורך להגביר את רמת תחכומם של ממסרי הגנה ומביאים כהוכחה את תוצאותיהן של הערכות ההשוואתיות לגבי אמינותן של מערכות ההגנה המבוססות על ממסרי הגנה אלקטרו-מכאניים מצד אחד, ומערכות ההגנה הרב-תפקודיות המבוססות על מיקרו-מעבדים. הם מודעים שגילו את מגמת

הירידה באמינות מערכות ההגנה המבוססות על מיקרו-מעבדים שתחכומן הולך וגובר. על האמינות הלא מספקת של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים הכריז גם וו.אי. פולייב (חברת החשמל הפדראלית של רוסיה) בעת הועידה הבינלאומית השלישית "הכיוונים העכשוויים בפיתוחן של מערכות ממסרי הגנה ואוטומציית מערכות להספקת החשמל" (סנקט-פטרבורג, 30 במאי 2011). הוא מציין בין היתר שחלקם הגדול של השיבושים במערכת ממסרי הגנה קורה בהתקנים מבוססי מיקרו-מעבדים (קרוב ל-23% מכל המקרים), על אף שהם מהווים רק כ 10% מכלל התקני ההגנה. זהו ללא ספק אחד הגורמים החשובים המלמדים על הצורך בצעדים המיוחדים להגברת אמינותם של ממסרי הגנה. אלקסי שלין המנוח (פרופסור בקתדרת תחנות החשמל באוניברסיטה הממלכתית הטכנית של נובוסיבירסק, המומחה המוביל של החברה בע"מ "פ.נ.פ. בוליד", נובוסיבירסק) כתב במאמר תגובה על אחד מפרסומנו (ראה א. שלין, "ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים: איננו פוסחים על ניתוח היעילות והאמינות", בכתב העט "חדשות באלקטרו-טכניקה", גיליון 2, 2006) שאחוז הפעולות השגויות בציוד המודרני הינו גבוה בהרבה מזה שהיה במערכות הגנה ישנות שהתבססו על ממסרים אלקטרו-מכאניים. לדבריו, הנתונים הסטטיסטיים מאשרים את העובדה שיעילותן ואמינותן של מערכות ההגנה ירדה בצורה משמעותית בעת המעבר ממסרים אלקטרו-מכאניים לטרמינלים על בסיס מיקרו-מעבדים. בבעיות אמינותן של ממסרי הגנה מודרניים דנו במאמריהם א.נ. וולדימירוב (לשכת המפקח הראשי של חברת החשמל הרוסית); D.B.Ghosh , S.Swain (Integrated Electrical Maintenance), ואחרים [1.36]. Stokoe J. ו-Gray J. בדוח שלהם:

"Development of a Strategy for the Integration of Protection & Control Equipment"

בוועידה הבינלאומית השביעית "Developments in Power Systems Protection " (אמסטרדם, 9-12 באפריל 2001) ציינו שהממסרים הישנים היו איתנים ובעלי רמת שרידות גבוהה שמשך פעילותם היה 25 שנים, כאשר משך פעילותם של הממסרים המודרניים הוא 15 שנים ופחות. את אותה הדעה מביעים J.Polimac ו A.Rahim (PB Power, בריטניה) הטוענים שבעקבות המעבר מממסרים אלקטרו-מכאניים לממסרים מבוססי מיקרו-מעבדים, משך תפקודם של ממסרי הגנה ירד מ-40 שנים (במקרה של ממסרים אלקטרו-מכאניים) ל-15-20 שנים, ולעתים אפילו לשנים ספורות בלבד אחרי תחילת השימוש (במקרה של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים) [1.36].

מנהל מדור מחשבים במכללה להנדסה וטכנולוגיה (אוניברסיטת פונה, מהרשטרה, הודו) Ashok Kumar Tiwari B.E. מציין שאיחוד פונקציות רבות בטרמינל אחד על בסיס מיקרו-מעבדים מוריד באופן דרסטי את רמת האמינות של מערכת ההגנה, כי במקרה של תקלה בטרמינל הזה, יפסיקו לפעול פונקציות רבות בבת אחת, לעומת המצב שבו הפונקציות האלה מחולקות בין כמה טרמינלים [1.36]. בצורך להגביל את כמות הפונקציות בטרמינל אחד של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים דנו בעת אותה הועידה הבינלאומית השלישית "הכיוונים העכשוויים בפיתוחן של מערכות ממסרי הגנה ואוטומציית מערכות להספקת החשמל" וו.א. ייפרמוב וס.וו.איבנוב (מרכז למחקרים "ברסלר"), וכמו כן, ד.ב. שאבנוב (חברת החשמל הפדרלית של רוסיה).

א. פדוסוב ויא. פוסנקוב (סניף חברת החשמל הרוסית בסיביר) במאמרו "הבעיות המתעוררות בעת המעבר לציוד על בסיס מיקרו-מעבדים במערכות חרום אוטומטיות" (כתב העט "תחנות כוח", גיליון 12, 2009) מדגיש את היעדרותן של דרישות נוקשות אוניברסאליות לגבי החומרה והתוכנה של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים, וכתוצאה מכך, המגוון הרחב מדי של תוכנות ואלגוריתמים בממסרים האלה שבהם משתמשים במערכת חשמל אחת. הדבר מוביל לתקלות בעת השימוש ולהגברת הסיכוי לפעילות שגויה של ההתקנים האלה. D. Rayworth ו A.Rahim (PB

Power, בריטניה) [1.36] התייחסו גם לזינוק חד ברמת הקושי של עבודת הצוות המבטיח את פעילות מערכת ההגנה, בעת המעבר מממסרים אלקטרו-מכאניים לממסרים על בסיס מיקרו-מעבדים. לדבריהם, זהי הסיבה לתאונות קשות במערכות חשמל. א. בלייב, וו. שירוקוב וא. יימליינצב (המינהל המיוחד "לנורגאנרגוגז", סנקט-פטרבורג) במאמרם "הטרמינלים הדיגיטאליים של ממסרי הגנה. ניסיון הסתגלות לתנאים רוסיים" (כתב העט "חדשות אלקטרו טכניקה", גיליון 5, 2009) כתבו על מסובכות ממשק התוכנה ועל הצורך לקלוט הגדרות רבות מדי בעת תכנות ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים.

את המצב האלקטרומגנטי הבלתי מספק ברוב תחנות משנה ישנות שתוכננו ונבנו כדי לעבוד עם הסוג הישן של ממסרי הגנה, ואת התקלות הרבות שקורות כתוצאה מכך בפעילות הממסרים על בסיס מיקרו-מעבדים, מתארים ב.אי. קובליוב ואי.יא. נאומקין (המכון למדע ולמחקר בתחום תעשיית החשמל, סיביר), וכמו כן, א.מ. בורדצ'יוב (חברת "המכון אנרגוסטפרוייקט"), מ. מטבייב ו מ. קוזנצוב (חברת "אזופ"), B. Jover , P. Montignies (Schneider Electric, צרפת), וו. נאדיין ("ארחאנרגו"), וו. לופוחוב (החברה הממלכתית "פ.א.או. טאטאנרגו"), א. יארמישקין (חברת "מוסאנרגו"), ר. בוריסוב (קרן פנסיה פרטית "אלנאפ", מוסקבה), Wiater .J , A.W. Sowa (Electrical Department, Bialystok Technical University, פולין) ומומחים אחרים. רבים מהם ציינו שהרגישות לשיבושים אלקטרומגנטיים בקרב ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים גבוהה פי כמה יותר מאשר בקרב הממסרים האלקטרו מכאניים, ולכן, כדי להבטיח את התאימות האלקטרומגנטית (EMC) של מעגלי משנה, צריך להעלות בצורה חדה את הרמה של הגנתם האלקטרומגנטית. בלי ביצוע מכלול של עבודות להבטחת הגנה אלקטרומגנטית אין להשיג מאפיינים מספקים באמינות ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים.

לבעיית עמידותם הירודה של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים בשיבושים אלקטרומגנטיים קשורה הבעיה הסבוכה והקשה יותר של השפעות הרסניות מכוונות בשלט רחוק על ממסרי הגנה על בסיס מיקרו מעבדים, שלקיומה הפנינו בפעם הראשונה את תשומת ליבם של המומחים [1.36]. במדינות רבות כבר קיים היום הציוד המסוגל לשתק ממרחק כל סוג של מערכות תעשייתיות על בסיס מיקרו-מעבדים (כולל ממסרי הגנה). לכן, הבעיה הזאת היא לא רק במרכזם של המאמרים הרבים בכתבי עט טכניים הנכתבים בידי המומחים הנחשבים כמו Manuel W. Wik (Defence Materiel Administration, שבדיה) ו-William A. Radasky (Metatech Corporation, ארה"ב), אך גם במרכז הדוחות של הועדות המיוחדות בבית הנבחרים האמריקני (ראה למשל: "Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse Attack", (2008).

עוד בעיה חדשה שלא ידעו עליה קודם היא פגיעותם הקיברנטית של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים (וכתוצאה מכך, של מערכת הספקת החשמל כולה) מפני התקפות ההאקרים. שיתוק מערכות השליטה, ניתוק רחב מימדים של מערכות שלמות להספקת החשמל, תוהו ובוהו במערכות השליטה, ניתוק מן האינטרנט ומרשת התקשורת הסלולארית - כך ניראה, בעיניהם של החסידים האמריקנים של הגישה הזאת, תסריט ההשלכות מהמתקפה הקיברנטית. ואם ניקח בחשבון את חשיבותן האסטרטגית של המערכות להספקת החשמל, אפשר להניח שהמתקפות האלה יהיו מעשה ידיהם של אגפים קיברנטיים מיוחדים בצבא (שכבר קיימים במדינות רבות), ולא של האקרים בודדים. בשנה שעברה, בסוכנות לביטחון לאומי של ארה"ב (NSA) - אחד משירותי הביון המשפיעים והסודיים ביותר בעולם בראשות הגנרל ק. אלכסנדר - הוקמה מפקדה קיברנטית נפרדת שאיחדה את כל המחלקות להגנה קיברנטית שהיו קיימות בפנטגון. חלקן יבטיחו לא רק את ביטחונן של תשתיות הצבא והמדינה, אך גם את ביטחונם של האתרים המסחריים

החשובים ביותר. מובן שהגוף בסדר גודל כזה לא יעסוק רק בהגנה מפני מתקפות ההאקרים, אלא גם בפיתוח ההתקפות עצמן (שנאמר "**ההגנה הטובה ביותר היא ההתקפה**").

המנהל הנוכחי של המפקדה הקיברנטית, ראש הסוכנות עצמו, הגנרל ק. אלכסנדר הכריז בדיון הועד לענייני צבא ארה"ב בבית הנבחרים שהתוצאה מהפעלת הנשק הקיברנטי תהייה דומה לתוצאות השימוש בנשק להשמדה המונית. הנשק הקיברנטי מתפתח במהירות גבוהה מאוד. מדינות רבות (ארה"ב, רוסיה, סין, ישראל, בריטניה, פקיסטן, הודו, קוריאה דרומית, קוריאה צפונית ואחרות) פיתחו נשק קיברנטי משוכלל המסוגל לחדור שוב ושוב לתוך רשתות המחשב ולהשמידן, כך לפחות טוענים המומחים בתחום. בשנת 2010 תקציב הסייבר של ארה"ב הסתכם בשמונה מיליארד דולרים, ובעתיד הוא רק ילך ויגדל. ב-2011 ארה"ב תכננה לאשר את הדוקטרינה החדשה בתחום הגנת סייבר. על עיקריה אפשר ללמוד מהמאמר שפרסם סגן שר ההגנה האמריקני באותה התקופה, ווילאם לין III, תחת כותרת סמלית "להגן על המרחב החדש". הרעיון המוביל במאמר: מעתה ארה"ב רואה במרחב סייבר שדה קרב פוטנציאלי לכל דבר, באותה מידה כמו יבשה, אוויר וים. במקביל, בנאט"ו גם החלו לשקוד על התפיסה המשותפת להגנת הסייבר. בפסגת נאט"ו בנובמבר 2010 הוחלט לנסח "תוכנית פעולה בתחום הגנת סייבר". המסמך אמור היה להיות מוכן לקראת אפריל 2011, וחתום - ביוני 2011. מקום חשוב בו תופס הרעיון להקים מרכז נאט"ו לתגובה על אירועי סייבר. בהתחלה תוכנן שהמרכז הזה יחל ליפעול בשנת 2015, אך לדרישת ארה"ב תאריך הפעלת המרכז הוקדם בשלוש שנים. על יעילותו של הנשק הקיברנטי מלמדת התקפת סייבר הנודעת על המרכז האיראני להעשרת אורניום ב"נתנז", באמצעות וירוס המחשבים Win32/Stuxnet שגרם להריסתן של כמאה סרכזות. עוד מתקפה רחבת היקף פגעה בספטמבר 2011 בתאגיד היפני Mitsubishi Heavy Industries המייצרת מטוסי קרב F-15, מערכות טילים Patriot, צוללות, אוניות, מנועי טילים, מערכות נ"ט ועוד. הציוד הממוחשב של התאגיד (45 שרתים סגורים וכ-50 מחשבים אישיים) היה נגוע במגוון שלם של ווירוסים שהשתלטו עליו לחלוטין. הם אפשרו לשלוט במחשבים מרחוק, להעביר את המידע השמור בהם. בווירוסים היו גם כאלה שאפשרו להפעיל את המיקרופונים ואת המצלמות שבמחשבים הנגועים. הדבר אפשר לפורצים לעיכוב ממרחק אחר המתרחש במפעלים ובמעבדות החברה. ווירוסים אחדים אף מחקו כל עקבות הפריצה, מה שמקשה במידה ניכרת להעריך את סדר גודל הנזק שנגרם. הנתונים מן המחשבים הנשלטים בידי הפורצים זלגו ל 14 אתרי האינטרנט מחוץ ליפן, בהם האתרים בסין, הונג קונג, ארה"ב והודו.

הטכנולוגיות המודרניות מאפשרות להחדיר ממרחק אל תוך המערכת הממוחשבת את הוירוסים באמצעות תדרי רדיו מהמזל"טים-השדרים. רמת הפגיעות הגבוהה ביותר למתקפות מן הסוג הזה היא בקרב המערכות האלחוטיות (Wi-Fi) שעל בסיסן מתכננים להקים את מערכות Smart Grid. ראוי לציין כי כבר היום מצוידים ממסרי הגנה מתוצרת החברות המערביות המובילות במודמים מובנים לחיבור אלחוטי.

בעבר הובחנו ניסיונות חוזרים מצידה של איראן לחדור למערך הספקת החשמל של ישראל. הבכיר בסי-איי-אי Tom Donahue עדכן במפגש של פקידי הממשל האמריקני והנציגים של ספקיות המים, החשמל, הדלק והגז האמריקניות על ניסיונות חדירה רבים אל תוך מערך הספקת האנרגיה האמריקני.

ברור וגלוי שהמגמות שתיארנו מעלה ילכו ויתחזקו במקביל להתפתחות הטכנולוגיות, אם לא יינקטו צעדים מיוחדים כדי למנוע את המגמות האלה:

1. **<u>בתחום ממסרי הגנה:</u>**

1.1 שימוש בשיטות מדויקות לחישוב אמינותם של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים [1.37] ובמדד החדש של האמינות [1.38] - נוח ויעיל, המאפשר לצרכן להגיש את תלונותיו ליצרן, במקום המדד שבו משתמשים היום ושאינו מספק מידע רב - "זמן ממוצע בין תקלות" (MTBF).

1.2 הגבלה והתייעלות של כמות הפונקציות במודול אחד של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים [1.39,1.40].

1.3 סירוב להשתמש בלוגיקה דטרמיניסטית בממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים [1.24,1.25,1.41].

1.4 הגבלה משמעותית של שימוש בלוגיקת תכנות חופשי - מקור לטעויות הצוות ולכמות גדולה של פעולות שגויות בממסרי הגנה [1.24,1.25,1.41].

1.5 איסור השימוש בממסרי הגנה למטרות שאינן קשורות ישירות לתפקידם העיקרי, למשל, השגחת מצב הציוד החשמלי או למה שמכונה "הגנת הרתעה" [1.24,1.25].

1.6 סירוב להשתמש בטכנולוגיות אלחוטיות במסגרת המערכות של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים.

1.7 לחייב את יצרני הממסרים, במסגרת החוק, להבטיח את הגנת סייבר ואת עמידות תוצרתם אל מול ההשפעות האלקטרומגנטיות ההרסניות המכוונות. לשם כך צריך לגבש תקנות ולהוסיף למפרט טכני של ממסרי הגנה את הפרקים המיוחדים המשקפים את הצעדים שננקטו את רמת ההגנה של הממסר המסוים מההשפעות האלו, ואת דבר ההתאמה לתקנות שנקבעו. להגביל בהדרגה, עד כדי איסור מוחלט, את השימוש בממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים שאינם עומדים בדרישות הבטיחות אל מול ההשפעות שפרטנו קודם.

1.8 להוציא לאור עלונים מיוחדים לחברות הנדסה העוסקים בתכנון ממסרי הגנה, הכוללים תאור מפורט של כל הסכנות הקיימות והצעדים הקיימים לאבטחת הממסרים מפני הסכנות האלה [1.11] להשתמש בהדרגה בתכנון ובהנדסת הממסרים בתקנות הידועות ובצעדי אבטחה, תחילה באתרים החדשים שנפתחים, ובהמשך - באתרים הקיימים.

1.9 להזמין מגופי מחקר מובילים את פיתוח האמצעים הקונקרטיים להגנה מפני ההשפעות שפורטו, וכמו כן, את הניסוי, את ארגון השימוש הניסיוני ובהמשך - את היצור של מכשירי אבטחה שכבר מוכרים ביעילותם ובעלותם היחסית נמוכה, כפי שהוצע ב-[1.42-1.43,1.11].

2. <u>בתחום הסטנדרטיזציה של ממסרי הגנה</u>

2.1 להנהיג, במסמכים הטכניים, את ההגדרות האחידות לגבי המושגים החשובים בממסרי הגנה, למשל אלו שהוצעו ב [1.44].

2.2 לבחון מחדש את הדרישות הטכניות הכלליות לממסרי הגנה ולאוטומציה של מערכות להספקת החשמל, על בסיס התקנים הבינלאומיים, ולהוציא לאור מסמך חדש המבוסס על הדרישות שפורטו ב [1.44] למשל.

2.3 לאחד את המבנה ואת תוכנת הבסיס של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים מתוצרת שונה. לשם כך, לגבש סדרה של תקנים הכוללים דרישות טכניות אחידות לגבי המבנה של ממסרי הגנה, לגבי הפרוטוקולים הפנימיים של התקשורת בין הממסרים, לגבי תוכנת הבסיס [1.44].

2.4 לגבש תקן לניסוי ממסרי הגנה תוך שימוש במערכות ניסוי מודרניות מתוכנתות וחבילות המודולים המוכנים של תוכנות [1.44].

הצעדים המוצעים מסוגלים, על פי הבנתנו, לעצור את המשך התפתחותן של המגמות המסוכנות בתחום ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים, ויעודדו עלייה משמעותית ברמת אמינותם של ממסרי הגנה, ואת עמידותם אל מול השפעות אלקטרומגנטיות מכוונות הרסניות שונות, וכמו כן, יובילו לירידה בהוצאות לשימוש בממסרים הללו.

ביבליוגרפיה לפרק 1

1.1 Popkova N.V. The Philosophy of Technology - the Internet-portal of the Bryansk branch of the Russian Philosophical Society (http://sphil.iipo.tu-bryansk.ru/)

1.2 Vinge V. The coming technological singularity: How to survive in the post-human era. NASA. Lewis Research Center, Vision 21: Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace pp. 11-22 (SEE N94-27358 07-12), 12/1993.

1.3 Moore G.E. Cramming More Components onto Integrated Circuits - “Electronics”, April 19, 1965, pp. 114-117.

1.4 Sukharev M. An Explosion of Complexity - ‘Computerra,” No. 43, 03 November 1988 (http://offline.computerra.ru/1998/271/1828/).

1.5 Negodayev I.A. The Philosophy of Technology: A textbook / DGTU (textbook)/Rostov on/D, 1998, 319 pp.

1.6 V.A. Lopota, E.I. Yurevich. Unified Mechatronic Microsystem Modules - the foundation of the intellectual technology of the future - Artificial Intelligence, 2002, No. 3, pp. 303-304.

1.7 Bezmenov A.E. Tolerances, Settings and Technical Metrology. A textbook for Technical Colleges. Moskva Mashinostroyenie 1969 322 pp.

1.8 Gurevich V.I. Microprocessor Based Protective Relays. Equipment, Problems, Prospects. - M.: Infra-Inzheneriya, 2011. - 336 pp.

1.9 Burenok V.M. How Can Russia’s Defensive Capabilities Be Guaranteed in the Future? - The Military Industrial Courier, No. 39 (507), 9 October 2013.

1.10 Gindiles L.M. Models of Civilisations in the SETI problem - Social Sciences and the Modern World, 2000, No. 1. pp. 115-123.

1.11 Gurevich V.I. The Vulnerabilities of microprocessor based protective relays: problems and solutions - M.: Infra-Inzheneriya, 2014. 256 pp.

1.12 Grishchuk Yu.S. Timoshenko R.F. An Analysis of the Reliability of Microprocessor Based Protective Relays // A Collection of essays “The NTU Herald” : The Problem of Improving Electrical Machinery and Apparatus, No. 16 - “The NTU Herald,” 2010.

1.13 Vnukov A.A. The Practice of Introducing Microprocessor Terminals in the Modern Context - Electro and Electrical Technology, Electrical Power Engineering, Electro-technical Industry, 2008, No. 1, pp. 40-41.

1.14 Sapa V.Yu. Electromagnetic Compatibility in Contemporary Electrical Power Engineering - Material from the Conference on “The Achievements of the Higher School.

The Technical Sciences" (the A. Baytursynov Kostanay State University), Kazakhstan, 2011.
1.15 Arynov A.K., Yunus M.E. A Comparative Analysis of Digital Protective Relays - K.I Satpayev Kazakh State University Herald, 2011, No (83).
1.16 Lint M.G. Mathison V.A., Mikhaylov, A.V. The Current State of Electro-mechanical Protective Relay Systems and their Prospects - Relay Protection and Automation, 2013, No.2 pp. 38-40.
1.17 Kolesnik S.P. The Strategic Direction of an Equipment Manufacturer Producing Power Engineering and Relay Equipment - Abstracts from a Seminar Entitled "Relay Protection Equipment and Automation, 2013", No. 2, pp. 38-40.
1.18 Grebennikov M. Defining the Right Path - Russia's Power Engineering and Industry, No. 18 (134) September 2009.
1.19 Iov A.A. and Iov I.A. The Reliability of Microprocessor Based Protective Relays: Myths and Reality - The section entitled 'The Supply of Electrical Power and Electrical Equipment Control Systems in the Mining Industry." The All-Russian Scientific and Practical Conference "The Innovative Development of the Mining and Metallurgical Sector" Irkutsk State Technical University, Irkutsk 1-2 December 2009.
1.20 Gurevich V.I. Intellectual Networks: New Prospects or New Problems? The Electro-technical Market 2010, No. 6 (part 1); 2011, No 1 (part 2).
1.21 Gurevich V.I. The Reliability of Microprocessor Based Protective Relays: Myths and Reality - Problems in Electrical Power Engineering, 2008, No. 5-6, pp. 47-62.
1.22 Gurevich V.I. Further Thoughts on the Reliability of Microprocessor Based Protective Relays, 2009 No. 3 (29) pp. 40-45.
1.23 Gurevich V.I. Is Relay Protection Safe from the Point of View of Energy Security? - Energy Security and Energy Saving, 2010, No. 2, pp. 6-8.
1.24 Gurevich V.I. "The Intellectualizations" of relay protection: Good Intentions or the Road to Hell? - Electrical Networks and Systems, 2010, No. 5, pp. 63-67.
1.25 Gurevich V.I. Sensational Discoveries in the Field of Relay Protection - Russia's Power Engineering and Industry, 2009, No. 23-24, p. 60.
1.26 Gurevich V.I. Logic in Free Flight - PRO Electricity, 2008, No. 1 (25), pp 28-31.
1.27 Gurevich V.I. Testing Microprocessor Based Protective Relays. PRO Electricity, 2011, No. 2, pp. 28-31.
1.28 Gurevich V.I. Electro-magnetic Terrorism - The New Reality of the 21st Century - The World of Technology and Engineering, 2005, N. 12. Pp. 14-15.
1.29 Gurevich V.I. The Problem of the Electromagnetic Impact on Microprocessor Based Protective Relays - Components and Technology, 2010, No. 2, pp 60-64; No. 3 pp. 91-96; No. 4, pp. 46-51.
1.30 Gurevich V.I. The Problem of the Resilience of Microprocessor Based Protective Relays and Automated Systems to Intentional Destructive Electromagnetic Threats - Components and Technology, 2011, No. 4 (part 1); 2011, No. 5 (part 2).
1.31 Gurevich V.I. The Use of Cyber Weapons Against Power Engineering - PRO Electricity, 2011, No. 1, pp. 26-29.
1.32 Gurevich V.I. Microprocessor Based Protective Relays: New Prospects or New Problems? - Electro-technical News, 2005, No. 6 (36), p. 26-29.
1.33 Gurevich V.I. On Several Evaluations of the Efficiency and Reliability of Microprocessor Based Protective Relays - The Electrical Power Engineering News, 2009, No. 5, pp. 29-32.
1.34 Gurevich V.I. Current Problems in Relay Protection: An Alternative View - The Electro-technical News, 2010, No. 3, pp. 30-43.
1.35 Gurevich V.I. Criteria For Assessing Relay Protection - Is It Worth Complicating the Situation? - The Electro-technical News, 2009, No. 6, pp. 45-48.

1.36 Problems With Microprocessor Based Protective Relays - http://digital-relay-problems.tripod.com
1.37 Gurevich V.I. Problems in Assessing the Reliability of Relay Protection - Electricity, 2011, No. 2, pp. 28-31.
1.38 Gurevich V.I. New Criteria Are Needed to Assess The Reliability of Microprocessor Based Protective Relays - The Electro-technical Market, 2011, No. 6, pp. 70-74.
1.39 Gurevich V.I. Current Problems of Standardizations in the Field of Relay Protection - The Electro-technical News, 2012, No. 6, pp. 28-38.
1.40 Gurevich V.I. On the Multifunctional Protective Relay. - "PRO Electricity," 2012, No. 42-43, pp. 45-48.
1.41 Gurevich V.I. Surrealism in Relay Protection - EnergoStyle, 2010 No. 1, pp. 5-7.
1.42 Gurevich V.I. Is Protection for Relay Protection Necessary? -Electrical Energy. Transfer and Distribution, 2013, No. 2, pp. 94-97.
1.43 Gurevich V.I. Protective Relay Protection Equipment - Components and Technology, 2013, No. 5.
1.44 Gurevich V.I. Problems of Standardisation in Relay Protection. SPB.: The Publishing House DEAN, 2015, -168 pp.

2. השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות

2.1 מבוא

שימוש בנשק המיוחד המסוגל להרוס את מערכת הספקת החשמל ומרכיבים חשובים אחרים של התשתיות הלאומיות, בלי השפעה ישירה על גוף האדם, זהו דבר מפתה ביותר כי הוא עלול להוביל לקריסתה של מדינה שלמה מבלי שמישהו יוכל להאשים איש ממקבלי ההחלטה הזאת ברצח המוני, בשל העובדה שלנשק הזה אין השפעה ישירה על בני אדם. הנשק הזה הוא המערכות היוצרות שדות אלקטרומגנטיים בעוצמת על המשתקות את המכשור האלקטרוני ואת הציוד חשמלי.

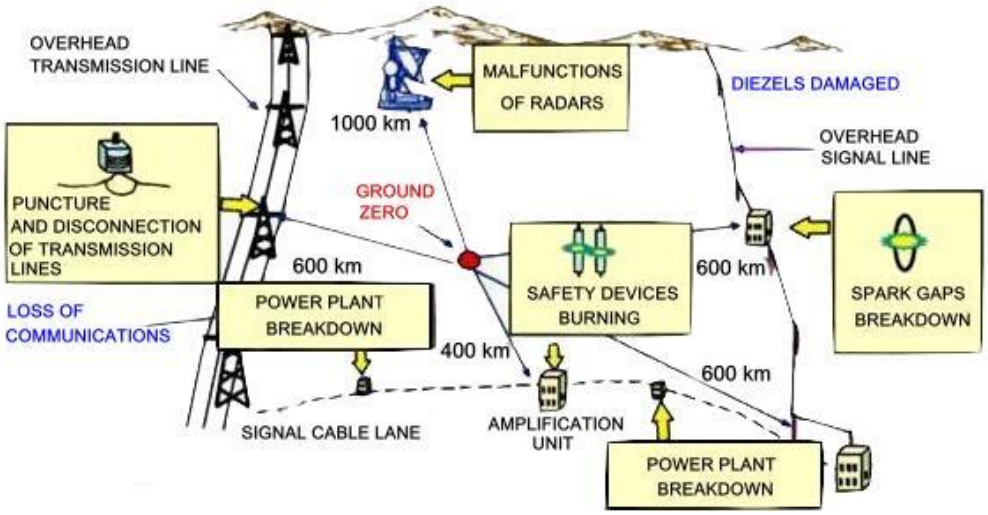
בעיית השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות (השאה"מ) על מערכות הספקת החשמל הופכת בזמן האחרון לאקטואלית יותר ויותר לאור שתי מגמות מודרניות: מצד אחד, השימוש ההולך ומתרחב במיקרו-אלקטרוניקה ובציוד על בסיס מיקרו-מעבדים בתחום תעשיית החשמל, ומצד שני, פיתוחם הנמרץ של האמצעים לפגיעה מרחוק בציוד האלקטרוני [2.1]. והבעיה הזאת לאו דווקא נוגעת לענף אזרחי כמו תעשיית החשמל, היא נוגעת גם לצבא, כי הבסיסים הצבאיים ושטחי ניסויים מקבלים את החשמל והמים ממערכות אזרחיות, ושיבושים רציניים בתפקודן של המערכות האלה בוודאי ישתקפו על יכולותיו של הצבא, על כל מערכות הנשק שלו המוגנות מפני השאה"מ.

2.2 מבט קצר להיסטוריה

השפעה הרסנית על ציוד אלקטרוני מפיצוץ גרעיני מרוחק הובחנה כבר בעת הניסויים הראשונים של סוג הנשק החדש הזה באותה התקופה. בהמשך מצאו את הביסוס התיאורטי ליצירתה של פעימה אלקטרומגנטית בעוצמה גבוהה כתוצאה מפיצוץ גרעיני בעבודותיו התיאורטיות של חתן פרס נובל בפיזיקה ארתור קומפטון (Arthur Compton) שהוא כתב עוד בשנת 1922. הצבא הבין במהירות את פרספקטיבות השימוש בתופעה הזאת בתור נשק שפוגע בתשתיות האוייב, ובראש ובראשונה, במערכות לאספקת החשמל. הניסויים הישירים הראשונים לחקר הפעימה האלקטרומגנטית מפיצוץ גרעיני (פאפ"ג) נערכו ב 9 ביולי 1962 בידי הועד לאנרגיה אטומית והסוכנות לביטחון גרעיני של משרד ההגנה האמריקני (המיזם תחת הכותרת "Starfish Prime" – "כוכב הים הראשון"). הטיל עם ראש נפץ תרמו גרעיני בעוצמה של 1.44 מגה טון שוגר משטח ניסויים של צבא ארה"ב באטול ג'ונסטון (Johnston Attol) שבין איי מרשל להוואי, בצפון האוקיינוס השקט. הטיל שוגר לגובה של כ-450 קילומטרים ופוצץ שם. הניסוי הזה היה אחד מחמשת הפיצוצים הגרעיניים בגובה רב שביצעה ארה"ב ב-1962 במטרה ללמוד את הפאפ"ג, כחלק מהמיזם הרחב יותר בשם "Operation Fishbowl" ("מבצע אקוריום"). בעת הניסויים האלה נרשמו פעימות אלקטרומגנטיות בעוצמה גדולה, בעלות השפעה הרסנית גדולה על הציוד האלקטרוני, קווי התקשורת ואספקת החשמל, תחנות מכ"ם. הן אף גרמו לניתוק החשמל ברחובות הוואי, במרחק של כ-1500 קילומטרים ממוקד הפיצוץ [2.2].

באותה השנה, 1962, (22 באוקטובר, 28 באוקטובר ו-1 בנובמבר), במסגרת המיזם בשם "פרוייקט K" בברית המועצות בוצעה סדרה של שלושת הפיצוצים הגרעינים בגובה רב, כל אחד בעוצמה של 300 קילוטון (K3-184,

K4-187, K5-195). מטרת הפיצוצים הייתה ללמוד את תופעת הפאפ"ג. טילים בעלי ראש נפץ גרעיני שוגרו מאתר הניסויים קפוסטין יאר במחוז אסטרחן ופוצצו בגבהים של 60 – 290 קילומטרים מעל השטח הצבאי בסרי-שגאן, במחוז קארגנדה שבקזחסטן (ישות מנהלית-טריטוריאלית סגורה פריאוזרסק). עבודות לחקר הפאפ"ג ולהכנות לפיצוצים הגרעיניים הניסיוניים האלה בוצעו בברה"מ בידי המכון המרכזי לפיזיקה ולהנדסה של משרד ההגנה הסובייטי (בסיס צבאי מס' 51105 או המכון המרכזי למדע ולמחקר מס' 12) בסרגייב פוסאד באזור מוסקבה (היום – המוסד הממלכתי הפדרלי "המכון המרכזי למחקר ולמדע של משרד ההגנה של הפדרציה הרוסית"). בעת אחד הניסויים (K3-184) נרשמו זרמי פעימה עד 3400 אמפר בכבלי קווי הטלפון האוויריים, וכתוצאה מהם הופעת מתח פעימה באמפליטודה של עד 28 קילו-וולט, הפעלת כל מפרצי המתח בציוד החשמלי ושריפתם של כל נתיכים, שלווו בהפסקת עבודתה של מערכת התקשורת. נרשמה גם פגיעה במערכות הקשר במרחק של 600 קילומטרים ממוקד הפיצוץ, יציאתו מכלל שימוש של המכ"ם הממוקם במרחק של 1000 קילומטרים, גרימת נזק לשנאים ולגנראטורים בתחנות כוח, פגיעה במבודדים בקווי מתח 35 קו', איור 2.1. נזק רציני של הציוד נרשם גם בקוסמודרום בייקונור. ומדובר בציוד של שנות ה-60 המבוסס על רכיבים אלקטרומכניים ועל שפופרות רדיו שעמידותם מול השאה"מ גבוהה בהרבה מזו של הציוד המודרני המבוסס על מיקרו-מעבדים.



<u>איור 2.1</u>
תרשים של הנזקים שנגרמו לציוד כתוצאה מפעימה אלקטרומגנטית מפיצוץ גרעיני מעל קזחסטן ב-1962. בפעם הראשונה התרשים הזה הוצג בשפה האנגלית על ידי ראש המכון המרכזי למדע ולמחקר מס'12, האלוף, הפרופסור וו.מ. לוברב בוועידה הבינלאומית EUROEM בצרפת ב 1994 [2.3]

נוסף על כך, בניסויים אמריקניים וסובייטיים נעשה שימוש בראשי נפץ תרמו-גרעיניים, שהפעימה האלקטרומגנטית מהם פי 3 עד 5 חלשה יותר מהפעימה הנוצרת כתוצאה מהפיצוץ הגרעיני הרגיל בעוצמה זהה.

2.3 המידע הפתוח האמין הראשון בדבר פאפ"ג ובדבר אמצעי ההגנה בתעשיית החשמל

טבעי לחלוטין שלאור מורכבותם, חשיבותם ועלותם הגבוהה של הפיצוצים הגרעיניים הניסיוניים, כל המידע בנוגע אליהם היה מסווג היטב, והראשונים שקיבלו גישה למידע הזה היו המומחים הצבאיים. אפשר היה להניח שהמידע הפתוח הראשון מן הסוג הזה היה זה שהציג בתקופת "פרסטרויקה" ראש המכון המרכזי למדע ולמחקר מס' 12,

האלוף, הפרופסור וו.מ. לובורב בוועידה הבינלאומית EUROEM בצרפת ב-1994. אך המציאות שונה לחלוטין. מתברר שהפרסומים הראשונים בעיתונות של הנתונים המפורטים והאמינים על תופעת פאפ"ג והשפעותיה על תשתיות המדינה, כולל מערכת הספקת החשמל, היו עוד בסוף שנות ה-60 תחילת שנות ה-70 של המאה הקודמת, כלומר, כל הנתונים האלה פתוחים לציבור כבר במשך 40-50 שנה [2.4 – 2.23]. נוסף על כך, בכמה מהפרסומים האלה (למשל ב [2.16, 2.18]) מוצג גם תיאור מפורט של אמצעי הגנת הציוד מפני הפאפ"ג. כפי שאפשר לראות, רוב החיבורים האלה פורסמו בארה"ב, לכן היה הגיוני להניח שבחצי המאה שחלף מאז, ארה"ב השיגה הישגים חשובים מאוד בתחום הגנת הרכיבים החשובים של התשתיות הלאומיות מפני הפאפ"ג. במיוחד בהתחשב בעובדה שהצבא צריך להיות מעוניין מאוד בכך.

2.4 המצב אמיתי בתחום הגנת מערכות אספקת החשמל מפני הפאפ"ג וסוגים אחרים של השאה"מ

"אתה יכול לרמות את כל האנשים חלק מהזמן וחלק מהאנשים כל הזמן, אבל אתה לא יכול לרמות את כל האנשים כל הזמן".
/אברהם לינקולן/

אז מה קורה באמת בארה"ב ובעולם בתחום הגנת הציוד החשמלי ומערכות חשובות אחרות שעליהן מבוססות תשתיות המדינה, מפני השאה"מ? כנראה קורה לא מעט, בהתחשב במספר ארגונים ממלכתיים ופרטיים שעוסקים בסוגיה ומקבלים מימון מתקציב המדינה, למשל בארה"ב. הנה רק כמה מארגונים כאלה:

- Metatech Corp.
- Department of Homeland Security (DHS)
- EMP Commission of Congress
- North American Electric Reliability Corp. (NERC)
- Department of Energy
- Department of Defense (DoD)
- Critical Infrastructure Partnership Advisory Council (CIPAC)
- Electric Infrastructure Security Council (EICS)
- Defense Science Board (DSB)
- US Strategic Command (USSTRATCOM)
- Defense Threat Reduction Agency (DLA)
- Air Force Weapons Laboratory
- FBI
- Sandia National Laboratories
- Lawrence Livermore National Laboratory (LINL)

- Oak Ridge National Laboratory
- Idaho National Laboratories
- Los Alamos National Laboratories
- Martin Marietta Energy Systems Inc.
- National Security Telecommunications Advisory Committee
- Federal Emergency Management Agency (FEMA)
- National Academy of Science
- Task Force of National and Homeland Security
- EMPrimus
- Neighborhood of Alternative Homes (NOAH)
- EMPact America
- Federal Energy Regulatory Commission (FERC)
- Electric Power Research Institute (EPRI)
- NASA
- U.S. Northern Command (NORTHCOM)
- SHIELD Act
- EMP Grid
- EMP Technology Holding
- Strategic National Risk Assessment (SNRA)
- Walpole Fire Department

ארגונים בינלאומיים בשיתוף עם ארה"ב:

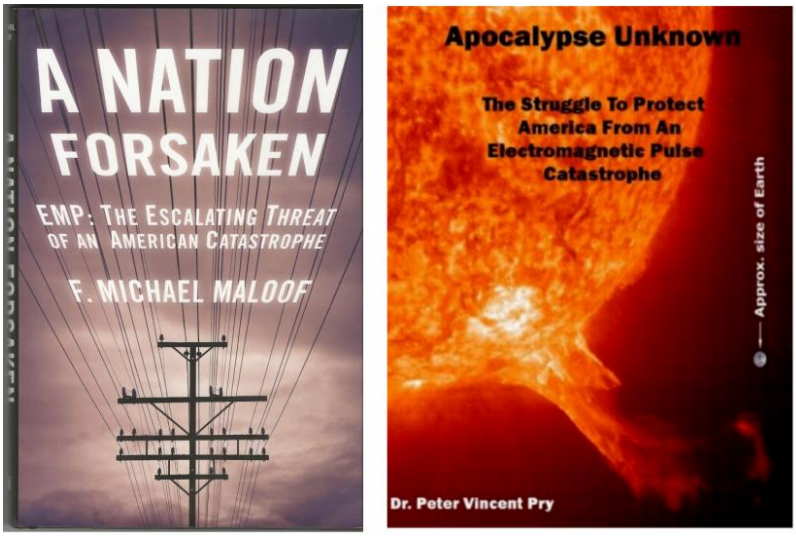
- International Electrotechnical Commission (IEC), Technical Subcommittee 77CC
- CIGRE' Working Group WG C4.206

קורא נכבד, אינך מוצא חשוד שמספר כגדול של גופים במדינה אחת עוסק בסוגיה שבדברה נכתב בכמה עשורים אחרונים הרבה מאוד חומר, ולא נותר סביבה שום "ריק" שדורש המשך מחקר?

מתברר שנושא השאה"מ, בהן פאפ"ג, אינו אלא כלי ארוך-טווח מצוין המשמש לחלוקת תקציב המדינה. ומסתבר שאיש אינו מעוניין בכך שתהליך החלוקה הזה יסתיים בסופו של דבר בפעולות קונקרטיות כאלה או אחרות שמטרתן לאבטח את המערכות לאספקת החשמל. טענתו של אשטון קרטר, הבכיר לשעבר במשרד ההגנה האמריקני, תומכת בהנחה הזאת: *"הצבא, הצי והפיקוד האסטרטגי ממשיכים לחשוב על לחשוב על הבעיה"*. דר' פיטר וינסנט פריי (Peter Vincent Pry), מנהל הארגון לביטחון לאומי (Task Force on National and Homeland Security), התבטא בצורה ברורה יותר בנידון:

"הבעיה אינה בטכנולוגיות. אנו יודעים כיצד להתגונן מזה. הבעיה אינה בכסף, המחיר של זה אינו כה גבוה. הבעיה היא במדיניות. כרגיל, ישנה מדיניות המפריעה לעניין".

בספרו הגדול שכותרתו "אפוקליפסה הלא נודעת", איור 2.2, דר' פריי מתלונן שבמדינות אחדות אחרות (ישראל, בריטניה, רוסיה) המצב טוב יותר בהרבה מאשר בארה"ב, ובמדינות האלה כבר החלו בצעדים מעשיים לאבטחת רשתות החשמל. נמהר ונרגיע את דר' פריי: אינו צריך לדאוג לגבי איחורה של ארה"ב. במציאות, המצב בתחום הזה, למשל ברוסיה, גרוע בהרבה מהמצב בארה"ב. במדינות אחרות המצב אינו טוב בהרבה. אפשר להבין למה במשך עשרות שנים בשום מקום בעולם לא נעשה שום דבר קונקרטי לאבטחת תעשיית החשמל מפני השאה"מ, והכל הסתכם רק בדוחות מחקר רבי עמודים, במאמרים, בסמינריונים, בוועידות ובסוגים אחרים של העברת זמן נעימה בחברת עמיתים. מסתבר ש"שחקני המשחק" הרבים כלל אינם מעוניינים בסיומו של תהליך המחקר המתמשך, אלא מעוניינים בשמירת הסוגיה "על פני המים" ובהמשך מימונה.



<u>איור 2.2</u>
ספרו של מייקל מלוף "האומה שהופקרה" המתאר את המשחקים הביורוקרטיים והפוליטיים בארה"ב סביב סוגיית השאה"מ (משמאל), וספרו של פיטר וינסנט פריי "אפוקליפסה הלא נודעת" (מימין)

ספר שלם הוקדש לבעיה הזאת, פרי עטו של האנליסט לשעבר בפנטגון מייקל מלוף (Michael Maloof)**:** "האומה שהופקרה", איור 2.2. על המכשולים הביורוקרטים הרבים סביב הסוגיה הזאת כותב בספרו "אפוקליפסה הלא נודעת" ("Apocalypse Unknown") גם פיטר וינסנט פריי שאותו הזכרנו קודם.

גם לאנשי התעשייה הצבאית יש חלק לא מבוטל בגרירת רגליים בכל הקשור למימוש הצעדים הידועים היטב לאבטחת המערכות להספקת החשמל מפני השאה"מ. הם עומדים על כך שאמצעי ההגנה היעיל היחיד מפני פאפ"ג הוא המערך הלאומי להגנה נגד הטילים, וחייבים להשקיע בו יותר משאבים. כדי להבין את העמדה הזאת של אנשי התעשייה הצבאית מספיק לעשות השוואה בין העלות הנמוכה יחסית של אמצעי אבטחתם מפני פאפ"ג של המערכות והמרכיבים החשובים ביותר בתשתיות הלאומיות, לבין עלות הפיתוח והיצור של מערכת נ"ט יעילה ורב שכבתי שמכסה מדינה שלמה. ובאשר לסוגי השאה"מ האחרים, הלא גרעיניים [2.1] מערכות נ"ט אינן מגנות מפניהם, אז אפשר להעלים מהם עין ולטעון שכל המידע שמתפרסם בהקשר הזה בכלי התקשורת אינו אלא בלף המיועד להפחיד את עקרות הבית.

אולם מתברר שהעניין אינו כה פשוט, וקיימות כבר מזמן מערכות הטילים שמערך נ"ט אינו מסוגל להגן מפניהם, כלומר, אינו מסוגל להגן על התשתיות הלאומיות מפני פאפ"ג. מה הן המערכות האלה?

2.5 מערכות הטילים לטווח קצר ובינוני – מקור פוטנציאלי של פאפ"ג שמולו מערך נ"ט חסר תועלת

בימינו יש מגמה להוריד את עוצמתו של ראש הנפץ הגרעיני בטילים מכל הסוגים, בעקבות הגברת רמת דיוקם. למשל, אם לטיל "טוצ'קה - או" (9M79Б2) הלא כל כך מדויק, עם סטייה מעגלית של 250 מטרים, היה ראש נפץ בעוצמה של עד 200 קילוטון (המטען מסוג AA-92), הטיל החדש והמדויק הרבה יותר "איסקנדר" (9M723) עם סטייה מעגלית עד 30 מטרים, יכול לשאת ראש נפץ גרעיני בעוצמה של 50 קילוטון בלבד, איור 2.3. אולם, כדי ליצור פאפ"ג יעיל ובעוצמה גדולה 50 קילוטון אינם מספיקים. מתברר שהמערכת הרוסית "איסקנדר" שזכתה לפרסום רחב בתור מערכת חסרת תקדים, אינה באמת כה מיוחדת. לטילים הישראלים LORA (LOng Range Artillery) יש נתונים טכניים וטקטיים דומים מאוד, מאפייני נתיב ומערכת שליטה דומים. והטילים האלה מדויקים מ "איסקנדר" (סטייה מעגלית של 10 מטרים), הנפח שלהם קטן פי שניים, והנפח של ראש הנפץ שלהם גדול יותר מזה של הטילים הרוסים ומסוגל לשאת מטען גרעיני בעוצמה גבוהה יותר. לטילים האלה מערכת שיגור אוניברסאלית שאפשר להתקינה בכלי תחבורה שונים, כולל אוניות.

איור 2.3

מערכות לשיגור טילים: מצוידת בטיל "טוצ'קה - או" (למעלה)
ובטיל "איסקנדר" (למטה)

מערכת לשיגור טילים LORA בנויה בצורה של מכולה המכילה ארבעה טילים, בדומה מאוד למכולות של המערכת הרוסית "קלוב-קיי" (Club-K) בעלות מספר זהה של טילים (3M-14КЭ, X-35УЭ), איור 2.4.

Club-K - מערך מכלי של טילים מתוצרת רוסיה שמכניסים אותו לתוך מכולה ימית סטנדרטית של 20 או 40 רגל.

<u>איור 2.4</u>
משגרים בצורת מכולות של מערכות הטילים Club-K (למעלה)
ו-LORA (למטה)

המערך מיועד לפגיעה ביעדים על פני הקרקע והים אפשר לצייד בו את קווי הגנת החופים, את כלי השיט מסוגים שונים, את משטחי רכבות ומשאיות. ניתן להפעיל את המערך הזה מעמדות שיגור בים, במשטחי רכבות ומשאיות. ניתן להשתמש בטילים נגד ספינות (3M-54КЭ, 3M-54КЭ1, X-35УЭ) וטילים לפגיעה ביעדי קרקע (3M-14КЭ, X-35УЭ). כל הטילים במערך הזה הם טילי שיוט הטסים בגובה נמוך מ-10 עד 150 מטרים, והם לא נועדו לשאת ראש קרב גרעיני. המערך הישראלי LORA מצויד בטילים בליסטיים טקטיים העולים לגובה של עד 45 קילומטרים ומסוגלים להוביל מטענים גרעיניים בעוצמה גבוהה למרחק של עד 300 קילומטרים.

למה אנו מפרטים כל כך דווקא בעניין מערכות הטילים האלו? כי דווקא הטילים הלא גדולים האלה, המותקנים במכולות סטנדרטיות על אוניות, בקרבת קו החוף או בנמלים (איור 2.5) והמסוגלים להוביל מטענים גרעיניים למרחק של מאות קילומטרים ולעלות לגובה של עשרות קילומטרים, דווקא הטילים האלה הם מקור פאפ"ג שמערכות נ"ט קיימות ועתידיות אינן מסוגלות לפגוע בו הודות ליכולתו להתקרב למטרה בצורה סמויה, בתוך זמן קצר מאוד ותוך כדי שינוי מסלול הטיסה.

מומחים בתחום הבינו מזמן את הפוטנציאל הטמון באפשרות למקם בצורה סמויה את הטילים הטקטיים לטווח קצר או בינוני, בעלי ראשי קרב גרעיניים, קרוב למטרה כדי, מצד אחד, למנוע אפשרות ירוטם בידי מערכות נ"ט, ומצד שני, להוציאם מתחום תחולתן של ההסכמים הבינלאומיים על כל מגבלותיהם. ניסיונות לייצר מערכות כאלה התחילו מיד עם הופעתם של טילים טקטיים יחסית לא גדולים בעלי ראשי קרב גרעיניים. בשנת 1961, הכוחות המוטסים של צבא ארה"ב צוידו במערכת טילים "Little John" (MGR-3) עם הטילים הבלתי נשלטים המסוגלים לשאת ראשי קרב גרעיניים. משגרים קלים של המערכת הזאת הוטסו במסוקי CH-47 "Chinook", בתא או במתלה חיצוני.

איור 2.5
מכולות, על סיפון האוניות ובנמלים, שבתוכן יכולות להימצא מערכות טילים בליסטיים טקטיים בעלי ראשי נפץ גרעיניים, חסינים מפני מערכות נ''ט

בברית המועצות העריכו מהר מאוד את הפרספקטיבות של מערכות כאלה, ובעקבות החלטתה של מועצת השרים של ברה"מ מספר 135-66cc מתאריך 5 בפברואר 1962, החלו עבודות לבניית מערך טילים טקטי "לונה – MB" (9K53) על בסיס הטילים 9M21Б בעלי ראש קרב גרעיני והטילים 9M21Б1 בעלי ראש קרב תרמו גרעיני, ומערכת השיגור 9П114 – משטח קל נייד עם מנוע קרבורטור M-407 בעוצמה של 45 כוח סוס מהמכונית "מוסקביץ'". בהמשך פותחו כמה מודלים של מערכות הטילים האלה המיועדים להטסה במסוקי מטען МИ-6 או МИ-10. ההנחה הייתה שהמסוק יכול להטיס את הטיל עם המשגר אל תוך העורף של האויב. לאחר מכן, המערכת אמורה לנסוע עד יעדה הסופי, ואז להנחית מכה פתאומית מהנקודה שבה האויב אינו מסוגל אפילו לנחש את הימצאותה של מערכת הטילים. כך הופך המערך הטילי הזה מטקטי לאסטרטגי. העבודות לבניית המערך "לונה-MB" הגיעו לשלב הניסויים של הדגמים הניסיוניים. אך בתהליך הזה היו קשיים רבים, למשל "הסט בשל רוח" של המסוק שעליו נתלה המשגר, וכתוצאה מכך, סטייה גדולה של המסוק ברוח, וגם המרחק הקטן מדי שהמסוקים עם מטען היו מסוגלים לכסות. בסופו של דבר, בשנת 1965 הופסקו העבודות לבניית המערך הזה.

הרמה המודרנית של הטכנולוגיות אפשרה לשוב לרעיון הזה ולממשו בהצלחה. היום נעות בעולם מאות מיליוני מכולות ימיות סטנדרטיות, איור 2.5. ומי יודע אילו מהן אמיתיות ואילו מכילות טילים... אף שהמערכת הישראלית LORA היא היום למעשה מערכת המכולה היחידה המסוגלת להתקרב באופן סמוי אל חוף המדינה ולהכות בשטחה בפעימה אלקטרומגנטית, עצם קיומה של מערכת כזאת מאפשר להצהיר שטענותיהם של אנשי התעשייה הצבאית על הצורך להשקיע במערכות נ"ט מתקדמות כי רק המערכות האלו מסוגלות להגן מפני פאפ"ג, הטענות האלו אינן משקפות את המציאות ולמעשה מרמות את דעת הקהל. המציאות היא שהצבא אינו מסוגל להבטיח הגנה די בטוחה של מערכות לאספקת החשמל בישובים מפני השאה"מ, לכן זהו תפקידם של אנשי תעשיית האנרגיה עצמם - לדאוג מראש להגנה כזאת.

2.6 מה דרוש כדי להבטיח הגנה אמיתית של המדינה מפני "ארמגדון אלקטרומגנטי"?

לאור העובדה שכל המחקרים היסודיים בסוגיה נעשו כבר מזמן ותוצאותיהם והמלצותיהם פורסמו במקורות פתוחים [2.24 – 2.34], וגם במדגמים רבים של International Electrotechnical Commission (IEC) [2.34 – 2.41], Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [2.42], במדגמים צבאיים של משרד ההגנה האמריקני [2.44 – 2.49], ראוי להפסיק את מימונם של גופים רבים שמנצלים את הסוגיה הזאת בתור מקור לקיומם, ואת המשאבים שישוחררו בעקבות כך צריך להפנות למימוש צעדים קונקרטיים לאבטחת המערכות לאספקת החשמל מפני השאה"מ [2.50]. למדינות שבהן עדין אין רשת כה רחבה של גופים שעוסקים בבעיה הזאת כמו בישראל אסור לבחור בדרכה של ארה"ב ולהתחיל בהקמתם של ארגונים כאלה, כי הדרך הזאת מוביל למבוי סתום. הגוף היחיד שחייב להישאר ולהנהיג את התהליך צריך לדעתנו להיות מרכז התאום הלאומי לסוגית השאה"מ שתפקידו יהיה לנתח את החומרים שפורסמו בנדון, להכין תכנית ברורה של עבודות קונקרטיות, עם ציון תאריכי יעד ושמות הארגונים האחראים לביצוע היעדים האלה, לתת לארגונים האלה משימות טכניות ברורות לאבטחת מערכות להספקת החשמל מפני השאה"מ, ובהמשך לארגן ולתאם את העבודות האלה. פרי מפעלו של המרכז הזה לא צריך להיות הדוחות והוועידות (אותם צריך פשוט לאסור!), אלא תחנות המשנה ותחנות הכוח האמיתיות המאובטחות מפני השאה"מ.

2.7 מיון ומאפיינים של השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות

בספרות טכנית בשפה האנגלית קוראים להשפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות (השאה"מ) " High Power Electromagnetic Threats (HPEM)" והן מתחלקות לשני סוגים: פעימה אלקטרומגנטית מפיצוץ גרעיני בגובה רב (פאפ"ג)-"High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)" ושיבושים אלקטרומגנטיים המופצים בכוונה (שאמ"כ) – "Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)".

פאפ"ג זהי פעימה אלקטרומגנטית בעוצמה רבה מאוד כתוצאה מפיצוץ גרעיני בגובה רב. הפעימה האלקטרומגנטית החזקה הנוצרת בעת הפיצוץ הגרעיני הייתה ידועה מזמן כאחד מגורמי ההרס של פיצוץ כזה. העובדה שפיצוץ גרעיני בוודאות יילווה בקרינה אלקטרומגנטית נחשפה עוד במחקרים התיאורטיים של השפעת הקרנת הרנטגן שביצע הפיזיקאי האמריקני ארתור קומפטון עוד בשנת 1922 (ב-1927 הוא קיבל פרס נובל על הגילוי הזה). באותה התקופה איש לא שם לב לאפקט הזה במיוחד, ונזכרו בו רק כשהחלו פיצוצי גרעין ניסיוניים. ב [2.51] מספרים על זה כך: "*בסוף יוני 1946 באזור אטול ביקיני (אי מרשל), תחת הסיווג "מבצע פרשת דרכים", נערכו פיצוצי גרעין על מנת לחקור את הפעולה ההרסנית של הנשק האטומי. בעת הפיצוצים הניסיוניים האלה נצפתה תופעה פיזית חדשה – היוצרות פעימת קרינה אלקטרומגנטית (פק"א) בעוצמה גדולה, שעוררה עניין רב. המשמעותית בין כולן הייתה הפק"א מפיצוצים בגובה רב. בקיץ 1958 נערכו פיצוצים גרעיניים בגובה רב. את הסדרה הראשונה בסיווג "הרדטק" ערכו מעל האוקינוס השקט בקרבת האי ג'ונסטון*".

טבלה 2.1. אזור הפגיעה האלקטרומגנטית מפיצוץ גרעיני בגובה רב

הקוטר המשוער של האזור הפגיע, ק"מ	גובה הפיצוץ, ק"מ
1424	40
1592	50
2.242	100
3.152	200
3.836	300
4.402	400

בעת הניסויים פוצצו שני מטענים בדרגה של מגה טון: "טק" – בגובה של 77 קילומטרים, ו "אורינדג'" – בגובה של 43 קילומטרים. בשנת 1962 פיצוצים בגובה רב התחדשו: בגובה של 450 קילומטרים, תחת הסווג "סטארפיש", נערך הפיצוץ של ראש קרב בעוצמה של 1.4 מגה טון. גם ברית המועצות ערכה סדרה של ניסויים בשנים 1961-1962, שבמהלכם חקרו את השפעת הפיצוצים בגובה רב (180-300 קילומטרים) על תפקוד ציודן של מערכות נ"ט. בעת הניסויים האלה נרשמו פעימות אלקטרומגנטיות חזקות בעלות השפעה הרסנית על ציוד אלקטרוני, על קווי קשר וקווי הספקת החשמל, תחנות קשר ומכ"ם במרחק רב.

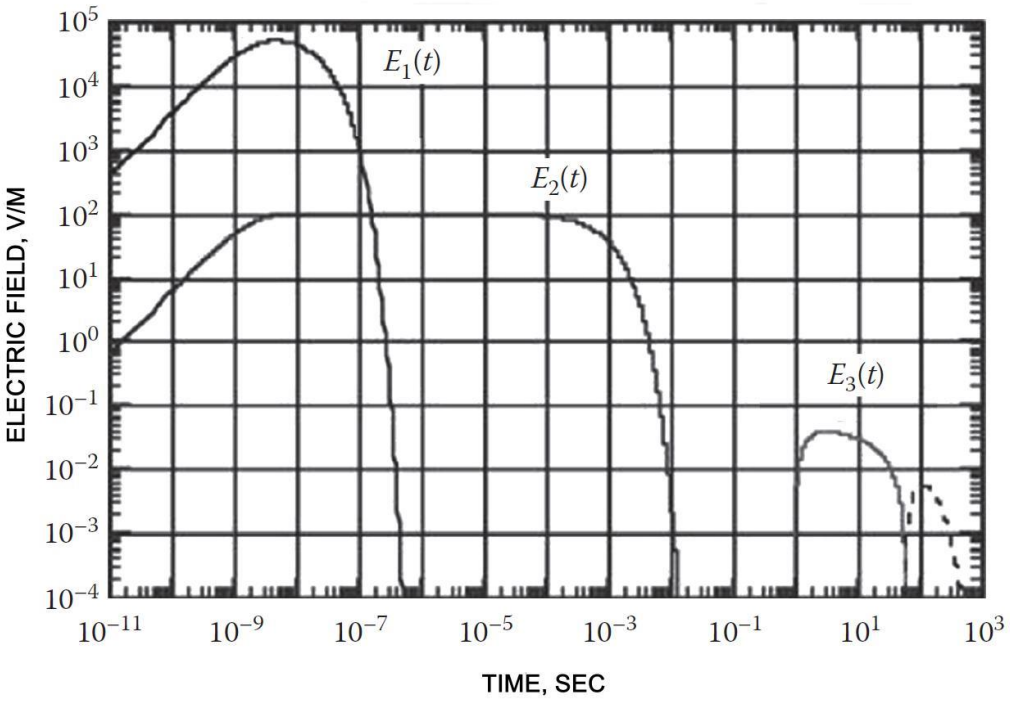
התלות שבין אזור הפגיעה בציוד האלקטרוני לבין הגובה שבו מתפוצץ המטען בעוצמה של 10 מגה טון מתוארת בטבלה 2.1.

בהתאם למיון של הנציבות הבינלאומית לאלקטרוטכניקה (IEC), מבחינים שלושה מרכיבים של פאפ"ג: E1, E2, E3, איור 2.6.

E1 – המרכיב "המהיר" ו "הקצר" ביותר של פאפ"ג המותנה בזרם עוצמתי של האלקטרונים של אפקט קומפטון בעלי רמת אנרגיה גבוהה (האלקטרונים האלה הם תוצר הפעולה המשותפת של הקוונטים γ של קרינה מיידית מפיצוץ גרעיני עם האטומים של גזי האוויר) הנעים בשדה המגנטי של כדור הארץ במהירות הקרובה למהירות האור.

משמאל - צפיפות קווי השדה החשמלי, וולט למטר

למטה - זמן, שניות



<u>איור 2.6</u>
הפרמטרים של מרכיבי הפיצוץ הגרעיני בגובה רב (IEC 61000-2-9)

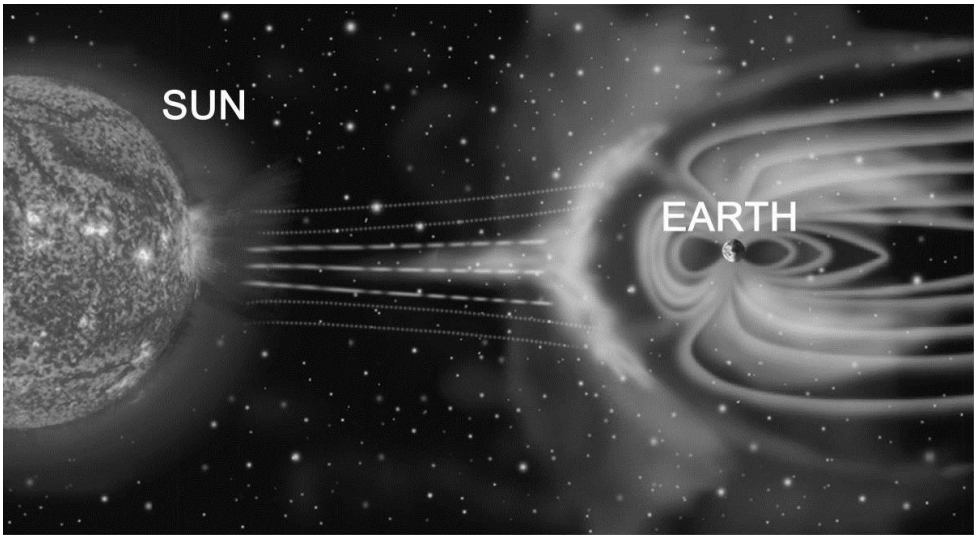
הפעולה המשותפת הזאת בין האלקטרונים עם מטען שלילי הנעים במהירות גבוהה לבין השדה המגנטי יוצרת פעימה של האנרגיה האלקטרומגנטית המרוכזת בידי השדה המגנטי של כדור הארץ והמכוונת מגובה אל עבר כדור הארץ. אמפליטודת הפעימה בדרך כלל גדלה עד ערך השיא שלה במשך 5 ננו שניות, וצונחת פי שניים במשך 200 ננו שניות. לפי הגדרת IEC, המשך המלא של פעימת E1 יכול להגיע למיקרו שנייה אחת (1000 ננו שניות). המרכיב E1 מותנה בשדה האלקטרומגנטי האינטנסיבי ביותר, הגורם למתחים גבוהים מאוד במעגלים החשמליים, הוא יוצר בקרבת פני כדור הארץ, בגובה בינוני, מתחי פעימה של עד 50 קילוווולט / מטר, בצפיפות העוצמה של 6.6 מגהוואט למטר רבוע. רוב התקלות בציוד האלקטרוני הקשורות להשפעת מתח גבוה מדי ולפריצה חשמלית בצמתים p-n של מוליכים למחצה ושל בידוד, הן תוצאה של המרכיב E1. מפרצים הרגילים, היעילים להגנה מקפיצות מתח אטמוספריות, במקרים מסוימים אינם מספיקים לפעול ולהגן על הציוד תחת השפעתו של המרכיב E1, ועוצמתם

אינה תמיד מספקת על מנת לקלוט את האנרגיה של המרכיב E1 של הפעימה, וכתוצאה מכך, מפרצים רגילים יכולים פשוט להיהרס.

E2 - הוא מרכיב "הביניים" של פעימה אלקטרומגנטית, מבחינת המהירות והמשך, ולפי הגדרת IEC הוא נמשך בערך מ-100 מיקרושניות עד מילישנייה אחת. למרכיב E2 הרבה תכונות דומות לאלו של הפעימות האלקטרומגנטיות שמקורן באטמוספרה (הברק הקרוב). מתח השדה יכול להגיע עד 100 קילוולט למטר. על רקע התכונות המשותפות למרכיב E2 ולברק, וכמו כן, לטכנולוגיות המגובשות היטב להגנה מפני הברק, נהוג לחשוב שההגנה מפני המרכיב E2 אינה מהווה בעיה גם היא. אולם, במקרה של השפעתם המשותפת של המרכיבים E1 ו-E2, מתגלה בעיה מסוג אחר: תחת השפעתו של E1 נהרסים מרכיבי ההגנה, והדבר מאפשר ל E2 לחדור לתוך הציוד בלי שום הפרעה.

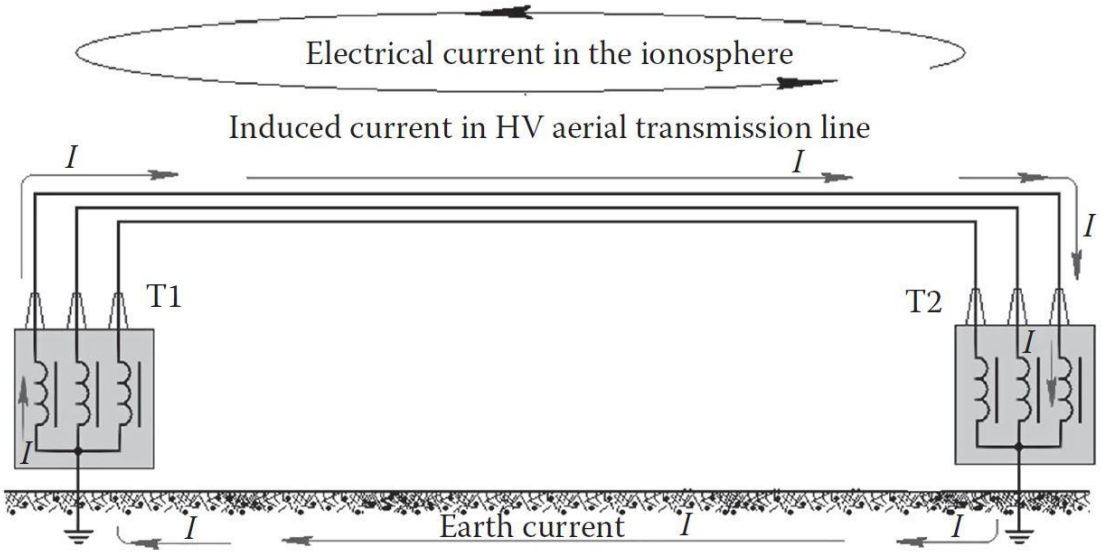
המרכיב E3 שונה מאוד משני המרכיבים הקודמים של הפעימה האלקטרומגנטית. זאת פעימה "איטית" מאוד שנמשכת עשרות ומאות שניות, והדהר מותנה בסטייתו ובחזרתו של השדה המגנטי של כדור הארץ. המרכיב E3 דומה לסערה גיאומגנטית כתוצאה מהתפרצות בשמש בעוצמה גבוהה מאוד.

זרמים גיאומגנטיים מושרים הם הזרמים הזורמים באדמה בעקבות הסערות הגיאומגנטיות במגנטו ספירה של כדור הארץ. הזרמים האלה נמצאים בחפצים מטאליים מאורכים הנמצאים באדמה, כגון צינורות גז, מסילות רכבת, כבלים. המתח בשדה המושרה יכול להגיע ל-1 וולט לקילומטר. סערות חזקות במגנטוספירה של כדור הארץ מתרחשות בעת סופות השמש המלוות בפליטת כמות אדירה של פלזמה מיוננת אל עבר כדור הארץ, איור 2.7. ביונוספרה של כדור הארץ השוכנת במרחק כמה מאות קילומטרים מפניו, תחת השפעתו של השדה המגנטי של כדור הארץ ושל תנועתו סביב צירו, תמיד זורמים הזרמים החשמליים. הם נשמרים עקב ההיווצרות התמידית של כמות גדולה של חלקיקים טעונים - יונים ואלקטרונים חופשיים ממולקולות גזי האטמוספרה המפוצלות בידי קרינת השמש. לזרמים החשמליים האלה יש השפעה משמעותית על היווצרותו של השדה המגנטי של כדור הארץ. בעת סופות השמש, הזרמים החזקים ביותר של פרוטונים ואלקטרונים של פלזמה השמש מגבירים בצורה חדה את הזרמים החשמליים הזורמים ביונוספרה.



<u>איור 2.7</u>
עיוות השדה המגנטי של כדור הארץ בהשפעת שחרור פלזמה השמש

שינויים חדים בזרמים האלה מובילים לא רק לשינויים חדים בשדה המגנטי של כדור הארץ, אלא גם להיווצרות זרמים גיאומגנטיים מושרים ולזרמים מושרים בקווי מתח ארוכים. הזרמים המושרים האלה נסגרים באמצעות הארקות של נקודות אפס של השנאים, איור 2.8. לזרמים האלה תדירות נמוכה מאוד, לכן זרימתם בתוך השנאים מובילה רוויח של ליבת מגנטית בשנאים ולירידה אימפדנס של שנשאי. כידוע, רכיב DC בזרם השנאי מופיע גם בעת הפעלתו, לכן ממסרי הגנה של השנאים בדרך כלל מופרדים מרכיב DC בזרם ואינם מגיבים עליו. מלבד זאת, הזרם הקבוע (או הזרם בתדירות נמוכה מאוד) אינו מועבר דרך משני הזרם. לכן, ממסר הגנה הרגילה לא יגיב על הזרמים המושרים המזינים את השנאי, והוא פשוט יישרף. בהיסטוריה ידועים המקרים של שריפת השנאים בהשפעת זרמים גיאומגנטיים מושרים בעת סופות השמש. למשל, ב 1989, סופת שמש לא גדולה גרם נזק לשנאי מתח גבוה, מה שהוביל לניתוק חשמל במשך 9 שעות בפרובינציית קוויבק בקנדה.



<u>איור 2.8</u>
סכמה של מעגל לזרמים המושרים שנסגרה דרך נקודת אפס מוארקת של שנאים.

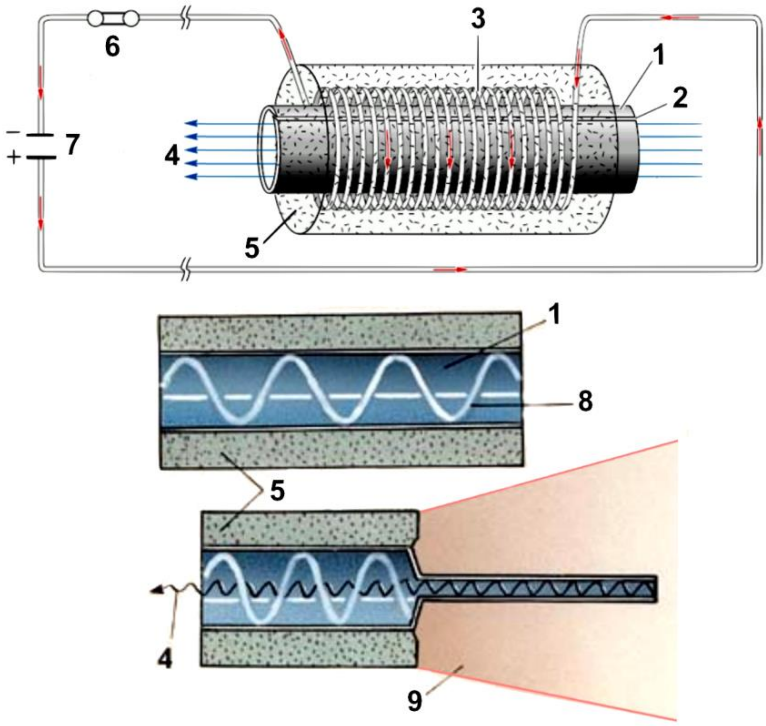
בתחנת הכוח הגרעינית Salem במדינת ניו ג'רסי בארה"ב באותו זמן יצא מכלל שימוש שנאי מתח בעוצמה גבוהה. ב-29 באפריל 1994, זמן קצר לאחר תחילתה של סערה גיאומגנטית חזקה, יצא מכלל שימוש שנאי מתח בעוצמה גבוהה בתחנת הכוח הגרעינית Maine Yankee. ב 24 במרס 1940, בעקבות הסערה הגיאומגנטית החזקה ביותר, נרשמו שיבושים זמניים בהספקת החשמל בכמה אזורים בניו אינגלנד, ניו יורק, פנסילבניה, מינסוטה, קוויבק, אונטריו, נותקו 80% מכלל רשתות הטלפון במיניאפוליס [2.52]. ב-2012 מדעני נאס"א חזו סופת שמש בלתי רגילה בעוצמתה (לפי תחזיות אחרות היא אמורה להיות ב-2013). לפי התחזיות [2.52], גם בתקופות האחרות בשנים הקרובות יתכנו סערות מגנטיות חזקות שיובילו לשיבושים במערכות להספקת החשמל. הן יימשכו מכמה שעות עד כמה חודשים (כתוצאה מהעדר של שנאים חלופיים במערכות רבות להספקת החשמל). הדבר עלול להפוך לקריסה של ממש בעבור האנושות המודרנית התלויה למדי מהטכנולוגיות המודרניות ופגיעה אל מול האסונות מן הסוג הזה.

מבחינת טבען הפיזי, השפעות דומות על שנאים יש למרכיב E3 של הפיצוץ הגרעיני [2.52]. התכונה הייחודית לשנאי כוח היא שאי אפשר להחליפם במהירות כשהם יוצאים מכלל שימוש, בניגוד להתקנים אלקטרוניים שגם הם נפגעים מאותן ההשפעות.

לאור כל הנאמר למעלה, מתבררת האקטואליות של מציאת הפתרון לבעיית הגנתם של שנאי כוח מהנזק שגורמים להם זרמים חשמליים גיאומגנטיים מושרים בתדירות נמוכה.

משנות ה-80 של המאה הקודמת בכמה מדינות בעולם שוקדים על יצירתו של מה שמכונה "סופר פעימה אלקטרומגנטית" של מטען גרעיני עם יציאה מוגברת של קרינה אלקטרומגנטית. עבודה נעשית בעיקר בשני כיוונים: באמצעות יצירתה סביב המטען של השכבה העשויה מהחומר המשחרר קרינת-γ של אנרגיה גבוהה בעת שהוא נמצא תחת קרינת נויטרונים של הפיצוץ הגרעיני, וגם באמצעות המיקוד של קרינת- γ. לפי חישוביהם של המומחים, בעזרת סופר פעימה אלקטרומגנטית אפשר יהיה ליצור שדה מתח של מאות ואפילו אלפי קילו-וולט למטר על פני כדור הארץ.

אנשי הצבא אפילו אינם מסתירים את העובדה שהמטרות העיקריות של נשק הפעימה האלקטרומגנטית הזה בסכסוכים עתידיים יהיו גופי השלטון האזרחיים והצבאיים של המדינה, והתשתיות, כולל המערכות לאספקת המים והחשמל, ומערכות התקשורת.



<u>איור 2.9</u>

גנראטור דחיסת שטף שאוב בפיצוץ (EPFCG).

1- מתנד (רזונטור) אלקטרומגנטי; 2- חתך; 3- סליל הזרם; 4- קרינה אלקטרומגנטית מכוונת; 5- חומר נפץ;

6- מפסק; 7- קבל; 8- גל עומד; 9- רסיסים מהפיצוץ

ביוני 1950, במסגרת הפיקוד הראשי מס' 12 במשרד ההגנה הסובייטי, בעיר סרגייב פוסאד-7 (מושב "החווה") הוקם המכון המרכזי למדע ולמחקר שקיבל את המספר הסידורי "בסיס צבאי 51105" (היום – המוסד הממלכתי הפדראלי "המכון המרכזי למחקר ולמדע בפיזיקה טכני של משרד ההגנה של הפדרציה הרוסית) בהנהלתו של איש האקדמיה וולדימיר לוברב (משנת 2002, מנהל המכון הוא קונטר-אדמירל, פרופסור פרצב סרגיי).

המשימה העיקרית של המכון הזה הייתה ללמוד את ההשלכות ההרסניות מהפיצוץ הגרעיני, בעיקר את אלו הנובעות מהפעימה האלקטרומגנטית, וכמו כן, את תוצאותיו ההרסניות של שימוש נשק הלייזר, נשק קרן החלקיקים, נשק אנרגיה מכוונת, קרינת רנטגן וכו'. במתקנים הניסיוניים של המכון ידועים הגנראטורים העוצמתיים של פעימות מתח גבוה; מחקי פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני; מערכות "ארטריט" ו "זניט" לניסוי תגובת הציוד להשפעת הפעימה האלקטרומגנטית, כור הפעימה הגרעיני "בארס" וכו'.

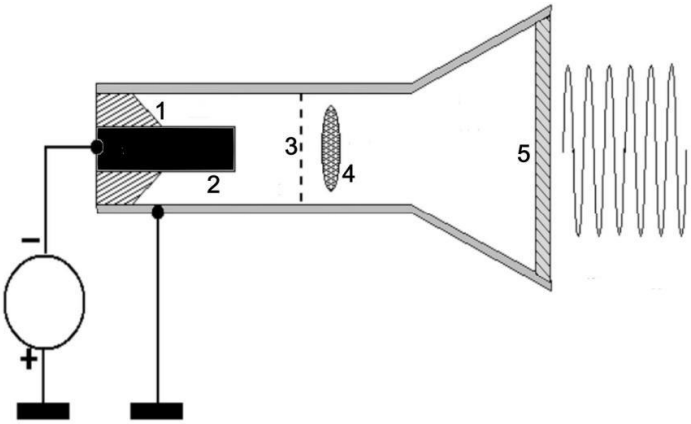
את הפעימה האלקטרומגנטית בעוצמה גבוהה אפשר ליצור לא רק באמצעות פיצוץ גרעיני. הישגים מודרניים בתחום הגנראטורים הלא גרעיניים של הפעימה האלקטרומגנטית מאפשרים לעשותם די קומפקטיים בשביל אמצעי הובלה רגילים ומדויקים. לכן, סוגיות ההגנה מפני השפעת פעימה אלקטרומגנטית יישארו במרכז תשומת ליבם של המומחים בכל מקרה, יהיה אשר יהיה עתידן של השיחות לפיקוד הנשק הגרעיני.

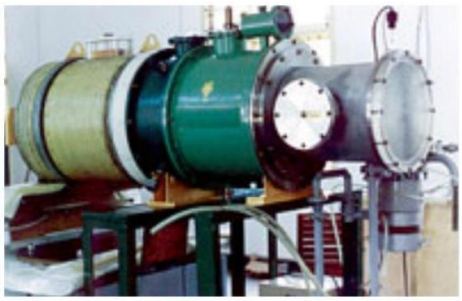
הפרעות אלקטרומגנטיות המוקרנות בכוונה (**Intentional Electromagnetic Interference**, **IEMI**) – זהו הסוג השני של השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות שאינו קשור לפיצוץ גרעיני.

רעיונות תיאורטיים ראשונים לגבי האפשרות לבנות מקרני גל לא גרעיניים של פעימות אלקטרומגנטיות בעוצמת על הושמעו עוד בשנת 1951 מפיו איש האקדמיה אנדרי סחרוב, בעת העבודה על מטען קרב גרעיני בארזמס-16 (היום - המכון הרוסי למדע ולמחקר בתחום פיזיקה ניסויית).

את הניסויים הראשונים לקבלת שדות פעימה מגנטיים בעוצמת על דרך דחיסתם באמצעות פיצוץ התחיל במכון הזה רוברט לוברב, ובשנת 1952 הוא הצליח לקבל שדות פעימה מגנטיים בעוצמה של מיליון וחצי גאוס (להשוואה - השדה המגנטי של כדור הארץ הינו 0,3 גאוס בקו-המשווה ו 0,7 גאוס באזורי הקטבים). מאוחר יותר את העבודה הזאת המשיכו אלכסנדר פבלובסקי וולדימיר צ'רנישוב, חברי אותו המכון. הצוות בראשות פבלובסקי הצליח לבנות גנראטור הפיצוץ, איור 2.9, עם זרם הפעימה של 200 מיליוני אמפר, היוצר שדה מגנטי בעוצמה של 10 מיליון גאוס.

מקרן גל של פעימות אלקטרומגנטיות בעוצמת על היה בצורה של טבעת מחומר נפץ המסובב סביב סליל נחושת. ערכת הנפצים המפוצצים בצורה סינכרונית הובילה לפיצוץ המכוון לעבר הציר. במקביל לפיצוץ נעשית פריקת המעבה בעוצמה גבוהה, והזרם שלו יוצר שדה מגנטי בתוך הסליל. הלחץ העצום (כמיליון אטמוספרות) של נחשול רב עוצמה מקמט ו"מקצר" את לולאות הסליל, הופך אותו לצינור, ואוטם בתוכו את השדה הזה. לולאת זרם מתכווצת במהירות של כמה קילומטרים לשנייה, בהתאם לסוג חומר נפץ. כידוע מחוקי הפיזיקה, עוצמת הזרם המגנטי המיוצרת על ידי הלולאה במקרה הזה פרופורציונאלית בזמן למהירות שינוי ההשראות. גודל הסליל משתנה במהירות גבוהה מאוד בעת התמוטטות הלולאה, לכן האמפליטודה של הזרם המגנטי גבוהה מאוד גם היא (עשרות מיליוני אמפר).





Inductive Power Storage VIRCATOR		Capacitive Power Storage VIRCATOR	
Voltage pulse (300 ns), kV	400	Voltage pulse (100 ns), kV	600
Current, kA	12	Current, kA	18
Power eradiation, MW	350	Power eradiation, MW	500
Duration of eradiated pulse, ns	200	Duration of eradiated pulse, ns	80
Output frequency, GHz	3.1	Output frequency, GHz	3.1

איור 2.10

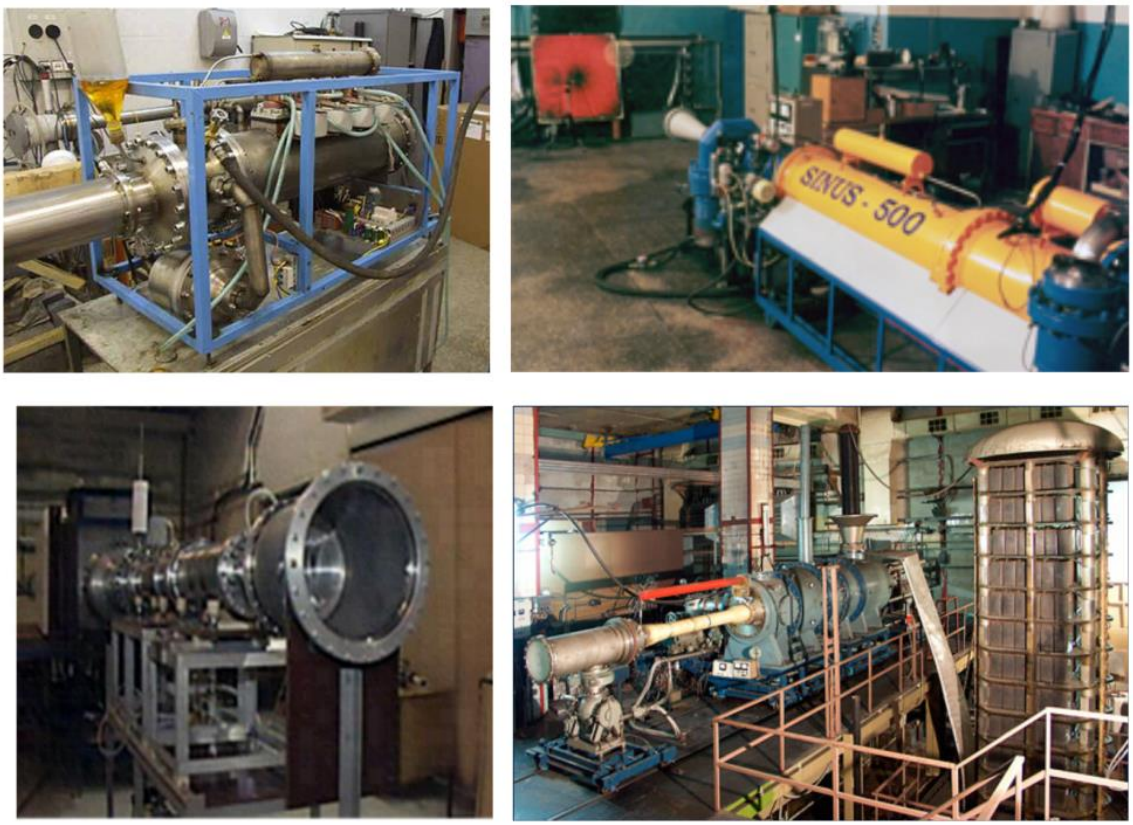
מתנדי קתודה וירטואליים בעוצמה גבוהה שפותחו במכון הפולי טכני של טומסק 1 - חומר בידוד; 2 - קתודה מטלית; 3 – אנודת רשת; 4 – קתודה וירטואלית; 5 – חלון דיאלקטרי ההודעה הרשמית הראשונה על גנראטור דחיסת שטף שאוב בפיצוץ (EPFCG-Explosively Pumped Flux Compression Generator**) כהתקן עצמאי ליצירת פעימות אלקטרומגנטיות בעוצמת על, בתור נשק, יצאה מפיו של דר' א.ב. פריש'פנקו, ראש מעבדת התחמושת המיוחדת במרכז למדע ולמחקר בכימיה ובמכניקה, אחרי ניסויו המוצלח, ב 2 במרס 1983, בשטח ניסויים של מכון המדע והמחקר "גיאודזיה" בעיר קרסנוארמייסק, באזור מוסקבה (היום -החברה הממלכתית הפדראלית, מכון המדע והמחקר "גאודזיה").**

באותו הרגע, הורסים את אחד מקצותיו של מהוד(רזונטור) באמצעות מרעום, והגל הממוקד נהדף וחוזר בחזרה, תוך שינוי השדה במכה אחת. נוסף על כך, הגל העומד הופך לגל הנע, תוך כדי פיתוח עוצמת פעימה עצומה, והדבר

מוביל ליצירת זרם פעימה של קרינת גלי רדיו אלקטרומגנטית. השדה משתנה בתוך חלקי ננו-שנייה, אך לא לפי משפט הסינוסים, בזמן השווה לזמן כיווץ-פריקה, אלא בצורה חדה יותר, וזה אומר שבפונקציה המתארת את שינויו ישנם תדרים רבים. לכן, מקור הגל הינו רחב-פס ביותר והוא מקרין בטווח של ממאות מגה הרץ עד מאות ג'יגה הרץ, כאשר משך הפעימה הזאת הינו עשרות - מאות מיקרו שניות.

בו בזמן, ובאופן עצמאי, שדות דומים נוצרו במעבדה הלאומית לוס אלמוס בארה"ב, בידי הצוות בראשות מקס פאולר (Max Fowler). בפעם הראשונה שני המדענים נפגשו בנובוסיבירסק ב-1982, בוועידה הבינלאומית בנושא שדות מגנטיים בעוצמת על, וב-1989, קבוצה של מדענים סובייטיים בראשות א. פבלובסקי הגיעה לביקור במעבדת לוס אלמוס.

ממש מתחילת העבודות האלה, לא רק המדענים בארה"ב ובברה"מ, אלא גם הפוליטיקאים הבינו שמקורות כאלה של פעימה אלקטרומגנטית מסוגלים להוות בסיס ליצירת נשק מסוג חדש. נאומיו של נ.ס. חרושצ'וב בשנות ה-60, עם אזכור "נשק מדע בדיוני" כלשהו שהמדענים הסובייטיים שוקדים עליו, הם ההוכחה לכך.



איור 2.11

גנראטורים מיקרוגל רלטיוויסטיים בעוצמה גבוהה על בסיס גירוטרונים, מתנדי קתודה וירטואליים, ושפופרות גל אחורי, אשר פותחו במכוני מדע ומחקר שונים ברוסיה

מאוחר יותר, דר' א.ב. פריש'פנקו, חבר אקדמיית המדעים הצבאיים, ניסח את העקרונות הכלליים של שימוש צבאי בתחמושת אלקטרומגנטית.

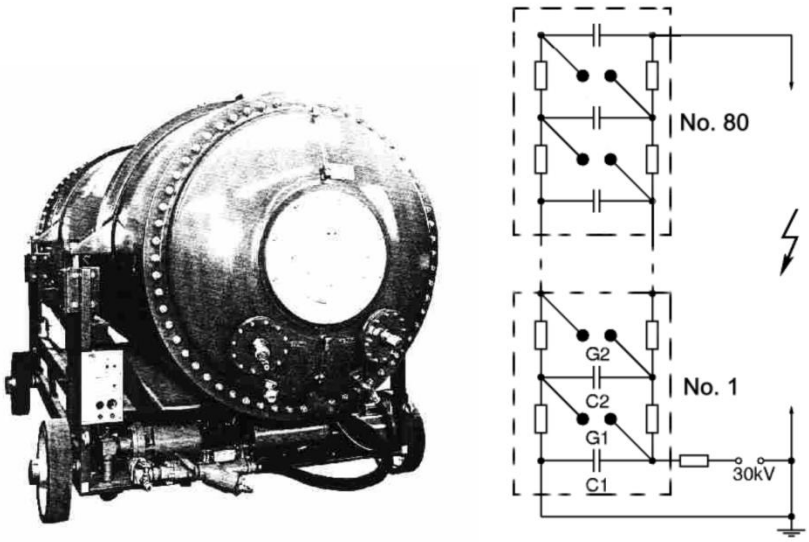
המחקרים הנמרצים בתחום שאמ"כ נערכים היום בכמה כיוונים, ו EPFCG הלא גרעיניים כבר אינם הסוג היחיד של הנשק האלקטרומגנטי הלא גרעיני. קיים מגוון רחב של התקני מיקרוגל בעוצמה גבוהה. קליסטרונים

ומגנטרונים רלטיוויסטיים, טריודות רפלקס, שפופרות גל אחורי, גירוטרונים, מתנדי קתודה וירטואליים (Virtual Cathode Oscillator- Vircator) ואחרים, איור 2.11.

מתנדי קתודה וירטואליים מסוגלים לייצר פעימות אנרגיה בודדות בעוצמה גבוהה. המבנה שלהם פשוט, גודלם קטן יחסית, הם איתנים ומסוגלים לעבוד בפס רחב יחסית של תדרים בדיאפזון מיקרוגל. הרעיון העיקרי שבבסיס מתנדי קתודה וירטואליים הוא בהאצת הזרם העוצמתי של אלקטרונים באמצאות אנודת רשת. הזרם העוצמתי הזה של אלקטרונים פורץ מתוך קתודה (צינור מטאלי בקטר של כמה סנטימטרים, איור 2.10) תחת השפעתה של פעימת מתח גבוה (מאות קילו וולט) המעניקה תכונות של חומר נפץ לפרוץ האלקטרונים. כמות אלקטרונים משמעותית עוברת דרך אנודת רשת, תוך יצירת ענן של מטען מרחבי מאחרי אנודה. בתנאים מסוימים האזור הזה של המטען המרחבי ינוד באזור אנודה.

שדה מגנטי בתדרים גבוהים מאוד שנוצר בתדירות התנודה של הענן האלקטרוני, מוקרן למרחב דרך החלון מבודד. זרמי אתחול במתנדי קתודה וירטואליים היוצרים את הגנרציה הם 1 – 10 קילואמפר. מתנדי קתודה וירטואליים, איור 2.11, משמשים בעיקר ליצירת פעימות שמשכן היא ננו שניה באזור התדרים הארוכים של דיאפזון סנטימטר. בעת הניסויים התקבלו בהם עוצמות מ-170 קילוואט עד 40 ג'יגה ואט, בתחום גלי סנטימטרים ודצימטרים. לפי הנתונים שפורסמו, ההתקן הניסיוני שמפתח עוצמת פעימה של כאחד ג'יגה ואט (265 קילוווולט, 3.5 קילואמפר) מסוגל לפגוע בציוד האלקטרוני במרחק של 1000 – 800 מטרים.

אפילו ההתקנים הידועים היטב כמו גנראטור הפעימה של מרקס, איור 2.12, שכולל בתוכו את ערכת קבלים ומפרצים (80 בלוקים זהים) יכולים לשמש כמקור עוצמתי של קרינת מיקרוגל. בהתקן הזה, כל המעבים מוטענים תחילה ממקור מתח גבוה, וברגע פריצתם הסינכרונית של מפרצים נשלטים, כל הקבלים מתגלים מחוברים בטור.



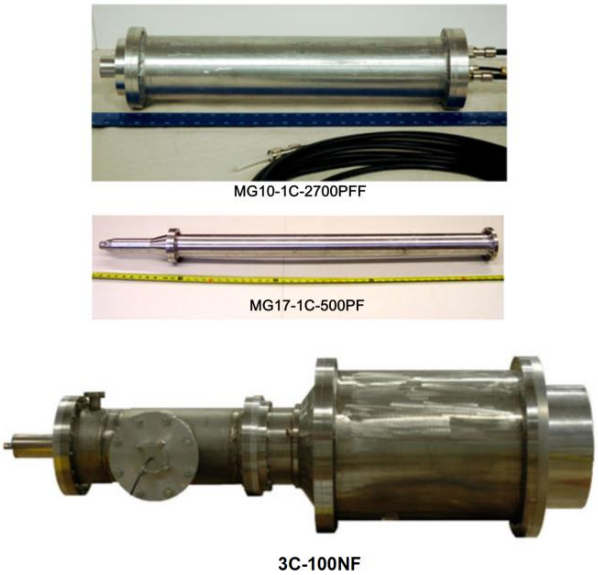
<u>איור 2.12</u>

FEBETRON-2020 תוצרת ארה"ב, המבוסס על הגנראטור של מרקס, והתרשים המופשט שלו

הגנראטור הנייד FEBETRON-2020 , איור 2.12, מייצר פעימות זרם חשמלי של 6 קילואמפר כשהמתח הוא 2.3 מגה וולט, וכתוצאה מכך נוצרות פעימות אלקטרומגנטיות בעוצמה גבוהה. על בסיס התרשים של מרקס, החברה האמריקנית Applied Physical Electronics פיתחה סדרה שלמה של גנראטורים קומפקטיים מאוד

ועוצמתיים, במתח של עד מגה וולט אחד, עם עוצמת שיא מוקרנת של עד 6 ג'יגה ואט, איור 2.13. מציידים באנטנה פרבולית, איור 2.14, ההתקנים האלה מסוגלים להקרין אנרגיה מכוונת בעוצמה גדולה מאוד, הרסנית לציוד אלקטרוני.

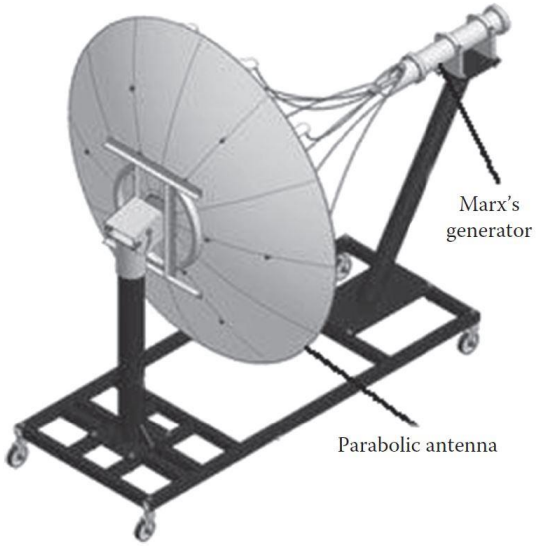
עוד כיוון בפיתוח שאמ"כ - מה שמכונה נשק קרן חלקיקים (beam weapon). הנשק הזה מבוסס על שימוש בקרנות של חלקיקים מוטענים או ניטרליים, המיוצרות בעזרת סוגים שונים של מאיצים, הממוקמים על פני האדמה או בחלל.



איור 2.13

גנראטורים קומפקטיים של מרקס בעוצמה גדולה

300 קילוולט, 1 ג'יגה ואט (MG10-1C2700PFF), 510 קילוולט, 400 מגה ואט (MG17-1C-500PF), 600 קילוולט, 6 ג'יגה ואט (MG30-3C-100NF)



איור 2.14

גנראטור קרינת מיקרוגל מכוונת בעוצמה גדולה המבוסס על הגנראטור הקומפקטי של מרקס ואנטנה פרבולית

עבודות לבניית נשק חלקיקים צברו תאוצת שיא מעט אחרי הכרזתו, בשנת 1983, של נשיא ארה"ב רונלד רייגן על תכנית "יוזמת ההגנה האסטרטגית" (SDI).

איור 2.15

מקורות קרינה קומפקטיים עוצמתיים מאוד בפס רחב, בעוצמה עד 1 ג'יגה ואט, שפותחו במכון למדע ולמחקר לאלקטרוניקה מדייקת של האקדמיה למדעים הרוסית

מרכז המחקר המדעי בצורך העניין הייתה המעבדה הלאומית לוס-אלמוס, וכמו כן, המעבדה הלאומית ליברמור, וברוסיה - המכון המרכזי למדע ולמחקר מס' 12 של משרד ההגנה. לטענת מדענים מסוימים, נעשו שם ניסיונות מוצלחים להפיק זרם אלקטרונים בעלי רמת אנרגיה גבוהה, העולה בעוצמתו במאות פעמים על הזרם המופק במאיצים מחקריים.

איור 2.16

מקור קומפקטי של קרינה מכוונת בגל אולטרה קצר (95 ג'יגה הרץ) בעוצמה גדולה שפותח במעבדה האמריקנית Sandia National Laboratories, תוך שימוש בטכנולוגיות החברה Raytheon (למעלה), וגם מקורות קרינה מכוונת בעוצמה גדולה שהורכבו בשלדת רכב שטח Hummer ובשלדת רק"מ Stryker. מתוכנן להרכיב מערך בעוצמה עוד יותר גדולה על מטוס AC-130.

באותה המעבדה, במסגרת התוכנית "אנטיגונה" נקבע תוך כדי ניסוי שהקרן החשמלית מתפשטת באופן כמעט מושלם, בלי פיזור, בערוץ יון שנוצר מראש באטמוספרה על ידי קרן לייזר.

סכנה גדולה טמונה במקורות קרינה קומפקטיים בעלי עוצמה גדולה, שניתן להרכיבם בכן המשא של המשאית ואפילו במיניבוס. במכון למדע ולמחקר לאלקטרוניקה הספק גבוה של האקדמיה למדעים של ברה"מ בטומסק, שהוקם ב-1977 במיוחד במטרה לחקור את הדרכים ליצירתן של הפעימות החשמליות בעוצמת על (ג'יגה וטרה ואט) ושבראשו עמד איש האקדמיה ג. א. מסייץ, פותחו גנראטורים די קומפקטיים היוצרים קרנות קרינה אלקטרומגנטית בעוצמה גדולה (100 – 1000 מגהואט) בפס רחב ובאורך של ננושנייה ופיקושנייה, המיועדות במיוחד להשפעה על הציוד האלקטרוני, איור 2.15.

יתרה מזאת, מקורות קרינה כאלה אפשר היום לרכוש בלי כל בעיה ישירות במכון הזה, במחיר שאינו גבוה במיוחד 40-60 אלף דולר, ולהרכיבם במיניבוס או במשאית לא גדולה. כל הפרטים הנחוצים להזמנת הציוד הזה מופיעים באתר האינטרנט הרשמי של המכון.

מקורות קרינה ניידים מן הסוג הזה מפותחים ומיוצרים גם בארה"ב, איור 2.16.

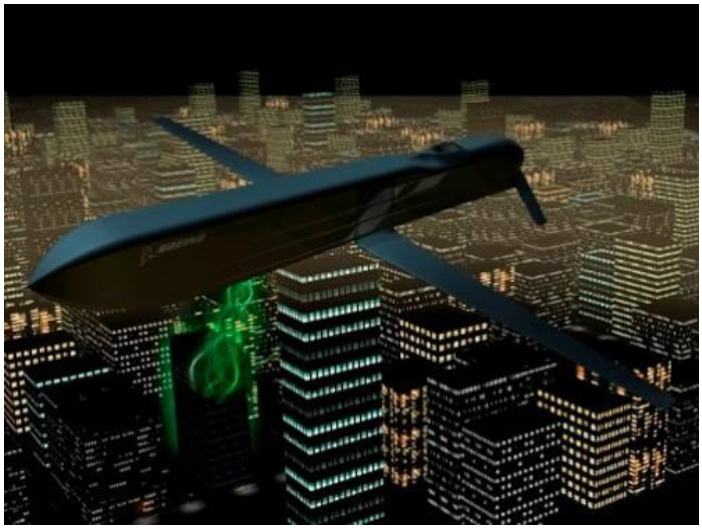
לפי הפרסומים בכלי התקשורת, באוקטובר 2012 , בבסיס ניסויים צבאי "יוטה", בתנאים המתקרבים לתנאיי השטח, ערכה חברת "בואינג" ניסוי, הטיל שנבנה במסגרת התוכנית CHAMP (מיזם הטיל המשופר בעל מקרן מיקרוגל בעוצמה גבוהה למאבק נגד אמצעים רדיו אלקטרוניים - Counter-electronics High-powered Microwave Advanced Missile Project). בעת הניסויים הטיל CHAMP שביצע את הטיסה לפי התוכנית המובנית, יצר פעימות אנרגיה בעוצמה גבוהה, תוך שיתוקן ביעילות של תת המערכות האלקטרוניות ותוך השמדת הנתונים מבלי לגרום נזק פיזי. הטיל CHAMP הראה יכולת לבצע התקפות נקודתיות ומדויקות על כמה מטרות באותה הטיסה ותוך כדי שימוש במקרן מיקרוגל בעוצמה גבוהה HPM (High-Powered Microwave). פיקוח הטיסה התבצע מבסיס חיל האוויר "היל".

CHAMP אמור להוות חלופה לא קטלנית למערכות לחימה קינטיות ולאמצעי הלחימה הקלאסיים המפוצצים את מטרות האויב המצוידות בציוד רדיו אלקטרוני. הטיל מאפשר להוציא את האתר מכלל שימוש תוך פגיעה בציוד האלקטרוני ותוך גרימת נזק לוואי פיזי מינימאלי באזור מיקומו של האתר.

להערכתו של קייט קולמן, ראש התוכנית ב "בואינג פנטום וורקס", הטכנולוגיה שפותחה מסמלת עידן חדש בלוחמה המודרנית. בעתיד הקרוב יוכלו להשתמש בה לצורך שיתוק הציוד האלקטרוני ומערכות המידע של האויב בלי שימוש בחיל האוויר ובכוחות היבשה. לפי הודעת "בואינג", המיזם הוא עיבוד טכנולוגיית האנרגיה המכוונת, שפותחה במעבדת חיל האוויר האמריקני, על מצע של הטיל שפותח בידי החברה, והוא יהווה בסיס ליצירת המשפחה החדשה של אמצעי הלחימה הלא קטלניים בעלי רמת יעילות גבוהה.

בתור הקבלן הראשי, "בואינג" יוצר את המצע האווירי ומבצע שילוב סופי של כל המערכות. חברת "רייטאון" סיפקה את מקור קרינת המיקרוגל HPM,

והמעבדה הלאומית "סנדיה" מבטיחה , במסגרת חוזה נפרד עם מעבדת המחקר של חיל האוויר האמריקני, את הספקת מערכת ההזנה.



איור 2.17

פרסומת לטיל שיוט בעל ראש קרב אלקטרומגנטי CHAMP של חברת "בואינג"

בסרטון הפרסומי של חברת "בוינג" המוקדש לתוכנית הזאת נראה טיל שיוט, איור 2.17, שטס מעל העיר ו "מכבה" את אורותיה. בין היתר, רואים את המבנה הראשי של תחנת הכוח שכל האותות עליו נכבים בעת טיסת הטיס מעליו.

לאור הרמה הגבוהה של הטכנולוגיות הדרושה לצורך העניין, רק מספר מוגבל מאוד של חברות בעולם עוסקות באמצעי לחימה אלקטרומגנטיים. המובילות הבינלאומיות בתחום הן החברות האמריקניות Northrop Grumman , Lockheed Martin, Raytheon, ITT, והחברה הבריטית Bae Systems. ברוסיה, החברה הלאומית המובילה בפיתוח ויצור אמצעי לחימה רדיו אלקטרונית היא "תאגיד הטכנולוגיות הרדיו אלקטרוניות" בע"מ.

איור 2.18

תחנה ניידת לנטרול רדיו אלקטרוני 1L269 "קרסוחה-2"

החברה שהוקמה ב-2009 איחדה תחת גג אחד 18 גופים שונים - מכוני מדע ומחקר, משרדי הנדסה, מפעלי יצור המתמחים בבניית אמצעי לחימה רדיו אלקטרונית אווירים, ימיים ויבשתיים. במסגרת יישומה של תוכנית החימוש

הממלכתית לתקופה של 2011-2020, התאגיד מגביר בהדרגה את נוכחותו בשוק אמצעי הלחימה הרדיו אלקטרונית.

בזמן האחרון נערכו בהצלחה ניסויים ממלכתיים והחל יצורן של המערכות "מוסקבה-1", "קרסוחה-2", "קרסוחה-4", "רטוט-ב'מ'" ואחרות, איור 2.18, אשר פותחו במכון המדע והמחקר "גרדיאנט" שהינו חלק מהתאגיד. מערכת מיקרוגל ניידת "רנץ-א" (שפותחה במכון הרדיו טכני של מוסקבה), עם עוצמת הפעימה המוקרנת של 500 מגה ואט, מבטיחה שיתוק וודאי של אלקטרוניקה במרחק של עד 12-14 קילומטרים, ושיבושים משמעותיים בעבודתה – במרחק של עד 40 קילומטרים, איור 2.19. למעשה, זהו תותח מיקרוגל בעוצמה גבוהה המיועד במיוחד לפגיעה בציוד אלקטרוני. החיסרון שלו הוא משקלו הגדול (מעל 5 טונות), ומה שחשוב עוד יותר - הצורך בהפסקה של כ-20 דקות בין ירייה לירייה.

לאחרונה היו פרסומים בכלי התקשורת על הפיתוח ברוסיה של הגרסה הרוסית של CHAMP האמריקנית: מערכת טילים חדשה בשם "אלאבוגה" (מערכות טילים מן הסוג הזה כבר יוצרו ברוסיה בעבר) בעלת מקרן פעימה עוצמתי במיוחד.

<u>איור 2.19</u>

מערכת ניידת לקרינה בעוצמת על בטווח ארוך "רנץ-א"

ראש הקרב של הטיל הזה, בעת פיצוצו בגובה של כ-200 מטרים, מסוגל להשמיד את כל הציוד האלקטרוני ברדיוס של 3.5 קילומטרים. ההבדל העקרוני המבדיל את "אלאבוגה" מ-CHAMP האמריקנית הוא עקרון עבודתה: "אלאבוגה" עושה שימוש במקרן גל חד-פעמי, והמערכת האמריקנית - במתנד קתודה וירטואלי המסוגל לפעול במתכונת ללא הפסקה.

בשנות ה-80 של המאה הקודמת, המדען הסובייטי הנודע פרופסור גרחוב אי.וו. מהמכון לפיזיקה ולטכנולוגיות על שם א.פ. יופה (סנט-פטרבורג) ביצע עבודות תיאורטיות וניסיוניות ליצירת שינויי מתח בעוצמה גבוהה ובאורך של ננו שניות בדיודות מוליכים למחצה רגילות בעוצמה גבוהה [2.53-2.55]. התופעה של הופעת מתח יתר בעת שינוי בחיבור דיודות מולכים למחצה מכיוון הישיר לכיוון הנגדי ידועה היטב בתחום הטכני, ונלחמים בה במספר דרכים מפני שמתח היתר הזה מוריד את רמת האמינות בעבודתן של דיודות עצמן, ושל רכיבים אחרים בסכמות אלקטרוניות. בעבודות שהחלו בראשותו של גרחוב אי.וו. ניסו, להפך, להיצעים את התופעה הזאת ולנצלה על מנת ליצור פעימות בעוצמה גבוהה ובאורך של ננו שניות, באמצעות השימוש בדיודות מתח גבוה בתור מפסיקי הזרם במערכות הפעימה העוצמתיות בעלות צובר אנרגיה אינדוקטיבי.

איור 2.20

SOS- דיודה מסוג SOS-180-12 (180 קילו וולט, 12 קילו אמפר)

מאוחר יותר נמשכו העבודות האלה בשלוחת המכון לאלקטרו-פיזיקה של האקדמיה למדעים הרוסית באורל (העיר יקטרינבורג). הניסויים שבוצעו בשנים 92-1991 בידי ליובוטין ס.ק., רוקין ס.ן. וטימושנקוב ס.פ. בדיודות רגילות של מתח גבוה הראו שבתנאי של שילוב מסוים של צפיפות הזרם הישיר וזרם הדלף, ושל זמן זרימתו דרך המוליך למחצה של דיודה, זמן הצניחה של זרם דלף מצטמצם עד עשרות – יחידות של ננו שניות. נתוני צפיפות הזרם האופייניים הם, במקרה הזה, עשרות קילו אמפר לסנטימטר רבוע, וזמן זרימת הזרם נמצא במנעד (דיאפזון) של מאות ננו שניות.

התופעה החדשה הזאת של פתיחה לננו שניות ספורות של זרמים בצפיפות גבוהה מאוד במוליכים למחצה זכתה מאוחר יותר לשם תופעת-SOS (מ- Semiconductor Opening Switch) [2.56].

בהמשך פותח מבנה מיוחד המבוסס על מוליכים למחצה, עם מתכונת קשוחה ביותר של שיקום, שעל בסיסה הצליחו ליצור מפסיקים במתח גבוה מסוג חדש – דיודות-SOS שמתח פעולתן הוא מאות קילו וולט, זרם חילופין – עשרות קילו אמפר, זמן חילופין- ננו שניות בודדות, תדירות חילופין – כמה קילו הרץ.

המבנה הטיפוסי של דיודת-SOS זאת הרכבה הדרגתית של דיודות אלמנטאריות המחוברות ביניהן בסיכות דיאלקטיות בין שתי צלחות אלקטרודה, איור 2.20 [2.57].

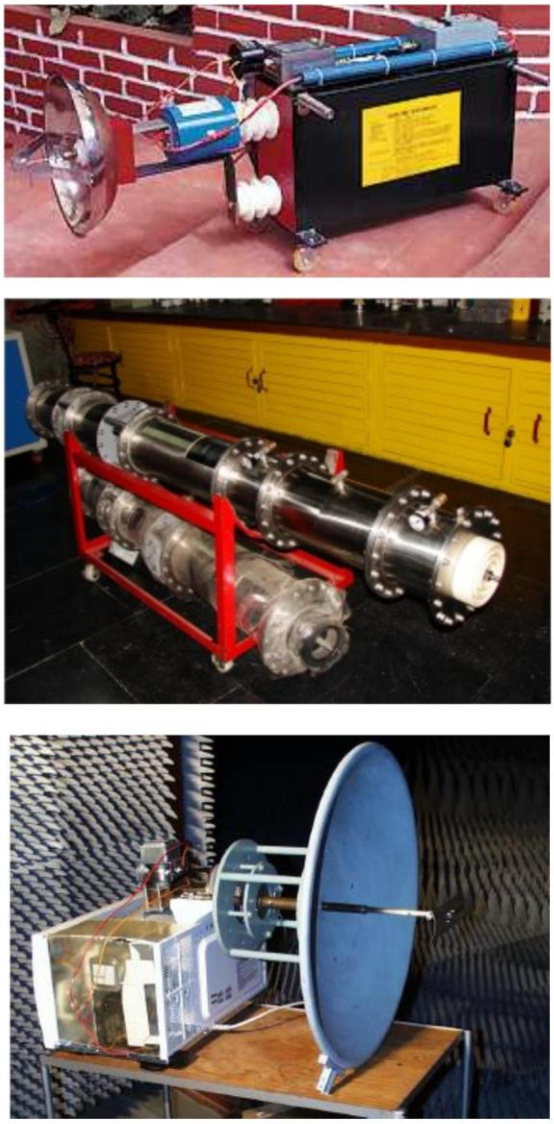
איור 2.21

SOS - גנראטורים מכמה סוגים שפותחו בשלוחת המכון לאלקטרו-פיזיקה

של האקדמיה למדעים הרוסית באורל

על בסיסן של דיודות-SOS פיתחו בשלוחת המכון לאלקטרו-פיזיקה של האקדמיה למדעים הרוסית באורל את סדרת SOS-גנראטורים של פעימות, ניידים, קומפקטיים, רב פעמיים, במנעד (דיאפזון) של ננו שניות, בעלי פרמטרים של שיא במחלפים על בסיס מוליכים למחצה, איור 2.21.

לפי הנתונים באתר האינטרנט הרשמי של שלוחת המכון לאלקטרו-פיזיקה של האקדמיה למדעים הרוסית באורל, הגנראטורים האלה מבוססים על שימוש במערכת מוצקה להחלפת אנרגיה, שבה נעשה שימוש בטיריסטורים ובטרנזיסטורים בהתקן הקלט, מפתחות מגנטיים – בהתקן הביניים לדחיסת האנרגיה, ומפסק זרם על בסיס מוליכים למחצה בדיודות-SOS - במגבר העוצמה שבקצה המערכת. לגנראטורים שפותחו יש מנעד (דיאפזון) הבא של הפרמטרים בפלט: אמפליטודה של פעימת מתח 50 קילוווולט – 1 מגהוולט, זרם הפעימה 10 – 1 קילואמפר, עוצמת שיא 100 מגה ואט – 4 ג'יגהואט, משך הפעימה 60 – 3 ננושניות, תדירות הפעימות ממאות הרץ עד קילו הרץ בודדים.



איור 2.22

גנראטורים מיקרוגל מכוונים בתוצרת עצמית שתיאוריהם מופיעים בכתבי עת טכניים פופולאריים

במספר מדינות (ארה"ב, ישראל, ועוד) נערכים פיתוחים של רובים אלקטרומגנטיים קומפקטיים בעוצמה יחסית לא גדולה שמסוגלים, עם זאת, לפגוע בציוד אלקטרוני במרחק של עד 100 מטרים. לא רק הצבא מגלה עניין להתקנים מן הסוג הזה, אלא גם המשטרה. מכונית מודרנית המלאה באלקטרוניקה מהווה מטרה לפגיעה כמו כל מערכת מודרנית אחרת. החברה האמריקנית Eureka Aerospace פיתחה והחלה לייצר את "העוצר" האלקטרומגנטי של מכוניות נעות (EMP car-stopper). פעולת הנשק הזה מבוססת על פגיעה במיקרו-מעבד, במערכת התנעה, בהזרקת הדלק, ומערכות אלקטרוניות אחרות של המכונית המודרנית. מה יקרה כשהנשק הזה יגיע לידיהם של המחבלים (במוקדם או במאוחר הדבר יקרה) והם יעשו בו שימוש על מנת לפגוע באתרים להספקת החשמל? יתר על כן, הם אפילו אינם צריכים לחפש אחר הנשק הזה. כתבי עת פופולאריים מספקים בנדיבות את התיאורים לייצור עצמי של ההתקנים מן הסוג הזה, איור 2.22.

מקורות כאלה של קרינה מכוונת בעוצמה די גדולה ובייצור עצמי, מורכבים בתוך משאית לא גדולה או אפילו בתוך מסחרית, איור 2.23, עלולים להוות סכנה גדולה לאתרים להספקת החשמל (ולא רק להם). קל לתאר לעצמך איך מסחרית כזאת עם גנראטור דלוק עוברת בקרבת תחנת כוח שבה המון התקנים על בסיס מיקרו-מעבדים לאבטחה ולשליטה. אך לא קל לחזות מה יקרה אז למערכת החשמל. ו"המסחרית" הזאת מסוגלת, בתוך שעות ספורות, "לכבות" כמה תחנות כוח בבת אחת. ואם יהיו כמה "מסחריות" כאלו?

התעשייה תורמת גם היא את חלקה ל"עניין המשותף", בכך שהיא מייצרת התקנים כאלה, המורכבים בתוך מזוודה לא גדולה, איור 2.24, כאילו נועדו במיוחד לצורכי המחבלים. לא במקרה הוזכר התקן כזה בדוח של אחד מאנשי הקונגרס האמריקניים.

<u>איור 2.23</u>

מקור קרינה מכוונת שהורכב בתוך רכב מסחרי קל

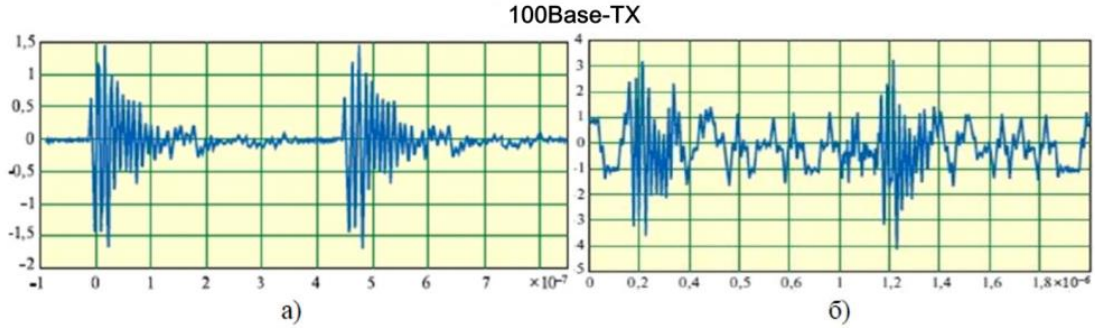
קשה שלא להיזכר בהקשר הזה באמירת הנבואה של וינסטון צ'רצ'יל אשר נאמרה לפני שנים רבות: "תקופת האבן עלולה לשוב על גבי כנפיו הזוהרות של המדע".

<u>איור 2.24</u>
"משמיד האלקטרוניקה" הנייד ושמו "2100 Series Suitcase" המבוסס על הגנראטור של מרקס
המיוצר בידי החברה Applied Physical Electronics

2.8 השפעת השאה"מ על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים

הערוצים לחדירתה של הקרינה האלקטרומגנטית לתוך הציוד האלקטרוני הם, בראש ובראשונה, אנטנות למיניהן וכבלים, מערכות הזנה, וגם זרמים בציפוי וקרינה החודרת דרך החלונות והדלתות, העשויות מחומרים שאינם מוליכים חשמל, וכמו כן, דרכי אוורור. זרמים מפעימות אלקטרומגנטיות מכוונות בכבלי חשמל חיצוניים ואלה הנמצאים בתוך האדמה, באורך של מאות ואלפי קילומטרים, יכולים להגיע לאלפי אמפר, והמתח בפתחים של כבלים כאלה – למיליון וולט. בקלטי אנטנה שאורכם אינו עולה על כמה עשרות מטרים, הזרמים מפעימות אלקטרומגנטיות מכוונות יכולים להגיע לעוצמה של כמה מאות אמפר. פעימות אלקטרומגנטיות מכוונות החודרות ישירות דרך חלקי המבנים העשויים מחומרים דיאלקטריים (קירות, חלונות, דלתות וכדומה), יכולות ליצור בחיווט פנימי זרמים בעוצמה של עשרות אמפר. סכנה מיוחדת נשקפת מקווי מתח חיצוניים ארוכים הקולטים את הקרינה משטחים גדולים ומובילים אותה הישר ליעד – אל יציאותיו של הציוד האלקטרוני הרגיש. נוכחותם של השנאים לאורך הדרך הזאת אינה משתקפת כלל על התהליך הזה. ולאור העובדה שרשתות החשמל בזרם נמוך ומכשירים רדיו אלקטרוניים פועלים בצורה תקינה במתח של כמה וולט ובזרם שעוצמתו עד כמה עשרות מיליאמפר, להגנתם מפני פעימות אלקטרומגנטיות מכוונות דרושה ירידה משמעותית מאוד בעוצמת הזרמים ובמתחים בקלט. כמה שהדבר נשמע מוזר, אך מלבד ממסרי הגנה על בסיס מיקרו מעבדים, גם למערכות אופטיות להעברת נתונים, שלהן שימוש נרחב בממסרי הגנות, יש רגישות גבוהה לפעימות אלקטרומגנטיות מכוונות. ליתר דיוק, הבקרים שהופכים את האותות החשמליים לאותות אופטיים בקצה אחד של קו תקשורת אופטי, ושמשחזרים אותם בקצה אחר של הקו. למשל, הניסויים להתאמה לתקני IEC בדבר תאום אלקטרומגנטי של מולטיפלקסור (מרבב) מסוג FOCUS [2.58] גילו שהוא לא תמיד מסוגל לעמוד ללא שיבושים ותקלות אפילו בהשפעות סטנדרטיות.

מערכת SCADA עם הכמות הגדולה של גלאים מבוססי מיקרו מעבדים ומשדרים המאוחדים ברשת ממוחשבת - זאת עוד מטרה אחת להשפעתן של הפעימות האלקטרומגנטיות המכוונות, אפילו המוחלשות שבהן.



איור 2.25

מרשם תנודה סטנדרטי של השיבושים בקו תקשורת Ethernet שנגרמו בידי פעימה אלקטרומגנטית מכוונת. א' - ללא העברת נתונים; ב' - בעת העברת נתונים (100Base-TX) [2.59]

אם אפשרות השימוש בפיצוץ גרעיני בגובה רב על מנת להנחית מכה אלקטרומגנטית על מערך לאומי להספקת החשמל נראית היפותטית, אפשרות הפגיעה של ארגוני טרור במערכות להספקת החשמל ברמה מקומית, על ידי השפעה מכוונת על מספר אתרים חשובים בו-זמנית, תוך שימוש במקורות קרינה לא גרעיניים, האפשרות הזאת ממשית ביותר.

הפגיעות ביותר מפני השפעות אלקטרומגנטיות מכוונות הן המערכות להעברת נתונים המשתמשות בפרוטוקולים בפס רחב. בהן ATM155 , Fast Ethernet, Gigabit Ethernet ואחרות, איור 2.25. הסיבה לכך היא העובדה שההבדל בין עוצמת האות לבין עוצמת השיבושים באזור העליון של הספקטרום אינו משמעותי. מעבר מכבל קואקסיאלי לכבל פשוט יותר על בסיס זוג שזור במטרה להפחית את עלותו (וזה קורה היום בכל מקום) גורם למערכת להיות פגיעה אף יותר. היום כבר מתחילים להשתמש ב Ethernet על בסיס זוג שזור בממסרי הגנה, ולפי אסטרטגית Smart Grid השימוש בו לצורך השליטה בכל האתרים של תעשיית החשמל רק ילך ויגבר.

רכיבים אלקטרוניים דיסקרטיים (בודדים) איתנים הרבה יותר מפני מתחי יתר והשפעות מזיקות אחרות, מאשר מיקרו-מעגלים משולבים [2.60]. לפי הנתונים הקיימים [2.61], 75 אחוזים מכל התקלות בהתקנים מבוססי מיקרו מעבדים הן תוצאה של מתחי יתר. מתחי יתר כאלה, באמפליטודה מעשרות וולט עד מספר קילו וולט, שנוצרים כתוצאה מהלכי החלפה בקווי חשמל או מהשפעת מטענים אלקטרוסטאטיים, הם "מכה קטלנית" לרכיבים פנימיים של מיקרו-מעגלים ומיקרו-מעבדים. לפי נתוני [2.61], טרנזיסטורים רגילים (רכיבים דיסקרטיים) מסוגלים לעמוד במתח של מטען אלקטרוסטאטי העולה כמעט פי 70 על המתח שבו מסוגל לעמוד, למשל, שבב הזיכרון (EPROM) של המערכת על בסיס מיקרומעבדים. ציוד תעשייתי ממוחשב (כולל ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים) פגיע במיוחד מפני השפעת פעימה אלקטרומגנטית כי הוא בנוי ברובו על בסיס התקני מוליכים למחצה ברמת צפיפות גבוהה רגישים מאוד להשפעת הליכי מעבר במתח גבוה. ייחודיותם של התקני מוליכים למחצה היא רמת אנרגיה נמוכה מאוד (מתח של כעשרה וולט) הדרושה כדי לפגוע בהם או להשמידם כליל.

מוכרות היום שלוש רמות של פגיעה בהתקני מוליכים למחצה כתוצאה מהשפעת פעימה אלקטרומגנטית בעוצמה גדולה: תקלה בפעולה, שינויים מתמשכים במאפיינים, פגיעות בלתי הפיכות. יציאתם בלתי הפיכה מכלל שימוש של המוליכים למחצה בדרך כלל קורת כתוצאה מחימום יתר או מפתיחת שטח [2.62-2.64]. לפגיעה במיקרו-מעבד או ברכיבי הזיכרון כתוצאה מהשפעות אלקטרומגנטיות מוחלשות יכול להיות אופי סמוי [2.65]. פגיעות

כאלה אינן מתגלות באף בקרה ויכולות להפגין נוכחות ברגעים הכי בלתי צפויים. בנוסף, בהשפעתה של פעימה אלקטרומגנטית שהוחלשה כתוצאה מצעדי הגנה, עלולות לקרות תקלות מקריות הפיכות, שהן תוצאה של שינוי ספונטאני בתוכן תאי הזיכרון, ושמן של התקלות האלה "כישלונות רכים" או "טעויות רכות" ("soft-failures" או "soft errors"). טעיות מן הסוג הזה (הפיכות, תקלות פעולה שמתקנות את עצמן) לא היו ידועות קודם בהתקנים אלקטרוניים שהיו מבוססים על רכיבים דיסקרטיים של המוליכים למחצה או על מיקרו-מעגלים רגילים.

הקדמה של השנים האחרונות בתחום ננו-טכנולוגיות הובילה להקטנה משמעותית בגודלם של רכיבי המוליכים למחצה (מדובר ביחידות או אפילו בשברירי מיקרון), להקטנת עובי השכבות של חומרי המוליכים למחצה וחומרי הבידוד, לירידה במתחי העבודה, להגברת מהירות העבודה, להקטנת קיבולת חשמלית של תאיי זיכרון בודדים, להגברת הצפיפות של תאים לוגיים יסודיים בהתקן אחד. כל אלה יחד הובילו להגברה חדה ברמת הרגישות של רכיבי הזיכרון אל מול השפעות אלקטרומגנטיות. הבעיה חמורה אף יותר על רקע העובדה שבמבני מיקרו-מעבדים המודרניים יש נטייה מתמדת להרחיב את השימוש ברכיבי הזיכרון. מיקרו-מעגלים משולבים מודרניים רבים הנכללים בתוך התקן מיקרו-מעבדים כוללים רכיבי זיכרון מובנים בנפח די גדול, שעל תקינותם אין שום דרך לפקח. בעיית הגברת הרגישות החדה להשפעות אלקטרומגנטיות אקטואלית לא רק לרכיבי זיכרון, אלא גם לאלמנטים לוגיים רבי מהירות, כלי השוואה, וכו', כלומר, למיקרו-אלקטרוניקה המודרנית בכללותה.

ידועה היטב יעילותו בהגנה מפני השפעות אלקטרומגנטיות של כלוב פאראדיי. מבנים מבטון משוריין כוללים רשת הארקה, ממסרי הגנה נמצאים בארונות מתכת, למסרים עצמם יש גוף ממתכת. זה מצטייר לא ככלוב אלא כ "מטריושקה" של פאראדיי. ואולם, הדבר אינו כה פשוט. ראשית כל, פעימות רבות תדירות חודרות בקלות דרך הפתחים בכלוב פאראדיי, דרך כל החלקים שאינם עשויים ממתכת, דרך חלונות הזכוכית בבניינים, דרך מערכת אוורור. נרשמו מקרים שבהם ההשפעה המוחלשת הזאת של פעימה אלקטרומגנטית על התקני המוליכים למחצה גרמה להרס חלקי של צמתי N-P, והדבר הביא לשינוי המאפיינים שלהם ולהופעת תקלות "הממצמצות" בתפקוד הציוד. תקלות כאלו מאחדות כמות משמעותית של האמצעים המיועדים לשירות טכני, ובנוסף, הן מגבילות את רמת הביטחון באמינותו של הציוד. את התקלות "הממצמצות" האלו בדרך קלל קשה לגלות, מכאן הצורך החוזר להוציא את הציוד מהשימוש, תוך אובדן זמן משמעותי לתהליך בקרת השיבושים. חייבים להתחשב בגורם הזה בעת הערכת רמת ההגנה של הציוד מפני מתקפה אלקטרומגנטית, כי הגנה חלקית או לא מלאה עלולה להוביל לבעיות נוספות.

הבעיה השנייה ידועה בשם "ההשפעה המאחרת של הפעימה האלקטרומגנטית", וזאת תכונה מסוכנת מאוד של השאה"מ. התופעה הזאת נוצרת בדקות הראשונות אחרי פיצוץ מטען גרעיני או מטען פצצה אלקטרומגנטית. בעת הזאת, פעימה אלקטרומגנטית שחדרה דרך מערכות חשמל יוצרת בהן שדות אלקטרומגנטיים מקומיים.

צניחת השדות האלה גורמת לשינויי מתח חדים שמתפשטים בצורה של גלים דרך חיווט החשמל למרחקים די גדולים מהמקום שבו נוצרה פעימה אלקטרומגנטית ראשונית. שלישית כל, כבלים וחוטים חיצוניים שיוצאים מארון ממסרי הגנה ומבניין, ושאורכם קילומטרים רבים, למעשה מבטלים את פעולתם ההגנתית, ולו מוחלשת, של בניינים ושל ארונות ממסרי הגנה.

2.9. מסמכים טכניים עיקריים בתחום השאה''מ

לאור הפנמת החומרה של בעיית השאה"מ, בשנים האחרונות הסוגיה הזאת נמצאת במרכז תשומת לבם של הגופים כמו הנציבות הבינלאומית לאלקטרו טכניקה (IEC), המועצה הבינלאומית למערכות חשמל גדולות של מתח גבוה (CIGRE), הועדה המיוחדת בקונגרס של ארה"ב, הגופים האירופיים. ברור לחלוטין שלעבודה יעילה בתחום הזה דרושים תקנים רלוונטיים ותיעוד טכני שונה. כמה מהתקנים האלה כבר גובשו בידי IEC:

1. **IEC TR 61000-1-3** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
2. **IEC 61000-1-5** High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
3. **IEC 61000-2-9** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HPEM environment – Radiated disturbance. Basic EMC publication.
4. **IEC 61000-2-10** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
5. **IEC 61000-2-11** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment-Classification of HEMP environments.

6 .**IEC 61000-2-13** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment-High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted.

7 .**IEC 61000-4-23** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.

8 .**IEC 61000-4-24** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance – Basic EMC Publication.

9 .**IEC 61000-4-25** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-25: Testing and measurement techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.

10 .**IEC 61000-4-32** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-32: Testing and measurement techniques – High altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium.

11 .**IEC 61000-4-33** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-33: Testing and measurement techniques – Measurement methods for high-power transient parameters.

12 .**IEC 61000-4-35** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-35: Testing and measurement techniques – HPEM simulator compendium.

13 .**IEC 61000-4-36** Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – IEMI Immunity Test Methods for Equipment and Systems.

14 .**IEC/TR 61000-5-3** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-3: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection concepts.

15 .**IEC/TS 61000-5-4** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 4: Immunity to HEMP – Specifications for protective devices against HEMP radiated disturbance. Basic EMC Publication.

16 .**IEC 61000-5-5** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance. Basic EMC Publication.

17 .**IEC 61000-5-6** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-6: Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external EM influences.

18 .**IEC 61000-5-7** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-7: Installation and mitigation guidelines – Degrees of protection provided by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code).

19 .**IEC 61000-5-8** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection methods for the distributed infrastructure.

20 .**IEC 61000-5-9** Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-9: Installation and mitigation guidelines – System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM.

21 .**IEC 61000-4-36** Electromagnetic compatibility (EMC) – Testing and measurement techniques – IEMI Immunity Test Methods for Equipment and Systems.

כמה מהתקנים עדין בתהליך גיבוש. התאחדות מהנדסי חשמל האמריקנית, IEEE, מציעה תקן משלה:

IEEE P1642 Recommended Practice for Protecting Public Accessible Computer Systems from Intentional EMI.

גם הנציבות האירופית גיבשה מסמך דומה:

Topic SEC-2011.2.2-2 Protection of Critical Infrastructure (structures, platforms and networks) against Electromagnetic (High Power Microwave (HPM)) Attacks.

במסגרת CIGRE הוקם צוות עבודה נפרד בסוגיה:

CIGRE WG C4.206 Protection of the High Voltage Power Network Control Electronics against IEMI.

תקנים רבים פורסמו בידי משרד ההגנה האמריקני ונאט"ו:

1. **MIL-STD-2169B** High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Environmental, 2012.
2. **MIL-STD-188-125-1** High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground Based C41 Facilities Performing Critical. Time-Urgent Mission. Part 1 Fixed Facilities, 2005.
3. **MIL-STD-188-125-2** High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground Based C41 Facilities Performing Critical. Time-Urgent Mission. Part 2 Transportable Systems, 1999.
4. **MIL-STD-461F** Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007.
5. **MIL-STD-464C** Electromagnetic Environmental Effects. Requirements for Systems, 2010. - Test Operations Procedure Report No. 01-2-620 High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Testing.
6. **MIL-STD-1377** Effectiveness of Cable, Connector, and Weapon Enclosure Shielding and Filters in Precluding Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (HERO), 1971.
7. **MIL-HDBK-240** Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance (HERO) Test Guide, 2002.
8. **NATO AECTP-500** Ed. 4. Electromagnetic Environmental Effects Test and Verification, 2011.
9. **NATO AECTP-250** Ed.2 – Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions, 2011.

ברוסיה בתחום הזה פורסמו במקורות פתוחים רק מסמכים רשמיים אחדים:

- **ГОСТ Р 53111-2008** עמידות תפקוד רשת תקשורת לשימוש כללי.
- **РД 45.083-99** המלצות להבטחת עמידות מערכי ציוד באתרי קשר חיווט חשמלי אל מול גורמים פוגעניים.
- **ГОСТ Р 52863-2007** הבטחת מידע. מערכות אוטומטיות במתכונת מאובטחת של ניסויי עמידות אל מול השפעות כוח אלקטרומגנטיות מכוונות.

שני המסמכים הראשונים מתייחסים אך ורק לתחום צר והוא - מערכות תקשורת. שניהם מבוססים על דרישות התקנים הרגילים, ולא התקנים המיוחדים של התאמה אלקטרומגנטית (EMC). המסמך האחרון מיועד לשימוש רחב יותר, אך גם הוא מבוסס על דרישות התקנים הכלליים של EMC. כל הדרישות המיוחדות (ואלו הן הדרישות הקשורות להשאה"מ) מסומנות בתקן הזה בסימן "X" ללא פרוט של המאפיינים הטכניים, ודבר נראה די מוזר, בהתחשב בשמו של התקן.

ישנם גם חומרים שלא פורסמו במקורות פתוחים, למשל: "נורמות בעמידות המכשור, המכשירים, ההתקנים והציוד של רשת התקשורת המאוחדת של הפדרציה הרוסית להשפעות קרינה מיננת ושל פאפ"ג" – החלטת הועדה הממלכתית לתקשורת חשמלית של משרד התקשורת הרוסי מס' 143 מתאריך 31.01.96. ישנם גם תקנים צבאיים מסווגים (להבדיל מהתקנים המערביים). אם כי לחומר הזה תחום שימוש צר בלבד, עצם קיומו מלמד על דאגה מסוימת מצידם של המומחים באשר לסוגיית השאה"מ. עם זאת, כפי שאפשר לראות מרשימת התקנים שהבאנו מעלה, נורמות העמידות ושיטות ניסויי הציוד להשפעת פאפ"ג כבר מזמן אינן סודיות ומתפרסמות במערב במקורות פתוחים, וזה נוגע גם לתקנים כלליים של IEC, וגם לתקנים צבאיים (מלבד יוצאי דופן אחדים, כמו למשל MIL-STD-2169B). קשה להבין את ההיגיון שמאחורי המדיניות הרוסית, שהרי מדובר בבעיה טכנית גרידא. כתוצאה מהמדיניות הזאת, לרוב המומחים הרוסים בתחומי הנדסה אזרחית רבים (למשל, בתחום תעשיית החשמל), שקשורים בצורה זו או אחרת לבעיות השאה"מ, אין עליהן שמץ של מושג.

בשנים האחרונות נכתבה ברוסיה שורה שלמה של עבודות דוקטורט בסוגיה [2.66-2.69]. כל העבודות האלו מתייחסות להשפעת השאה"מ על מערכות התקשורת, אך העובדה הזאת אינה משנה את מהות העניין.

ביבליוגרפיה לפרק 2

2.1. Gurevich V.I. The vulnerability of microprocessor based protective relays. Problems and Solutions. - M.: Infra-Inzheneriya, 2014. - 256 pp.

2.2. Operation Dominic, Fish Bowl Series, Debris Expansion Experiment. Air Force Weapons Laboratory. Project Officer's Report, Project 6.7, Report AD-A995 428, POR-2026 (WT-2026), 10 December 1965.

2.3. V. M. Loborev, Up to date state of the HEMP problems and topical research directions, in Euro Electromagnetic Conf. (EUROEM), Bordeaux, France, June 1994, pp. 15-21.

2.4. Kompaneets, A.S., Radio Emission From an Atomic Explosion, Soviet Physics JETP, December 1958.

2.5. W. J. Karzas and R. Latter, Electromagnetic Radiation from a Nuclear Explosion in Space, Physical Review, Vol. 126 (6), pp. 1919-1926, 1962.

2.6. Karzas, W.J., and R. Latter, EMP from High-Altitude Nuclear Explosions, Report No. RM-4194, Rand Corporation, March 1965.

2.7. Karzas, W.J., and R. Latter, Detection of Electromagnetic Radiation from Nuclear Explosions in Space, Physical Review, Vol. 137, March 1965.

2.8. Inston H.H., Diddons R.A. Electromagnetic Pulse Research. - ITT Research Institute Project T1029, Chicago, Illinois 60616, Final Report, September 1965.

2.9. DASA EMP (electronic pulse) Handbook, by United States Defense Atomic Support Agency. Information and Analysis Center, National government publication, Santa Barbara, Calif., 1968.

2.10. Electromagnetic Pulse Problems in Civilian Power and Communications, Summary of a seminar held at Oak Ridge National Laboratory, August 1969, sponsored by the U.S. Atomic Energy Commission and the Department of Defense, Office of Civil Defense.
2.11. EMP Threat and Protective Measures. – Office of Civil Defense, TR-61, August, 1970.
2.12. G. S. Parks, T. I. Dayaharsh, A. L. Whitson, A Survey of EMP Effects During Operation Fishbowl, Defense Atomic Support Agency (DASA), Report DASA-2415, 1970.
2.13. D. B. Nelson, A Program to Counter the Effects of Nuclear Electromagnetic Pulse in Commercial Power Systems, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-TM-3552 , Part 1. 8, October 1972.
2.14. J. H. Marable, J. K. Baird, and D. B. Nelson, Effects of Electromagnetic Pulse of a Power System, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-4836, December 1972.
2.15. Sandia Laboratories, "Electromagnetic Pulse Handbook for Missiles and Aircraft in Flight", SC-M-71 0346, AFWL TR 73-68, EMP Interaction Note 1-1, September, 1972.
2.16. Rickets, L. W., Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment, Wiley & Sons, Inc., 1972.
2.17. James K. Baird and Nicholas J. Frigo, Effects of Electromagnetic Pulse (EMP) on the Supervisory Control Equipment of a Power System, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-4899, October 1973.
2.18. L. W. Rickets, J. E. Bridges, J. Miletta, EMP Radiation and Protective Techniques, John Willey and Sons, New York, 1976.
2.19. United States High-Altitude Test Experiences: A Review Emphasizing the Impact on the Environment, Report LA-6405, Los Alamos Scientific Laboratory. October 1976.
2.20. S. Glasstone and P. J. Dolan, The Effects of Nuclear Weapons. U.S. Department of Defense, Washington, DC, 1977.
2.21. C. L. Longmire, On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosions, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-20, No. 1, pp. 3-13, February 1978.
2.22. W. Sollfrey, Analytic Theory of the Effects of Atmospheric Scattering on the Current and Ionization Produced by the Compton Electrons from High Altitude Nuclear Explosions, Rand Corp., R-1973-AF, 1977.
2.23. Butler, C., et al., EMP Penetration Handbook for Apertures, Cable Shields, Connectors, Skin Panels, AFWL-TR-77-149, Air Force Weapons Laboratory (The Dikewood Corporation), December 1977.
2.24. HEMP Emergency Planning and Operating Procedures for Electric Power Systems, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/Sub/91-SG105/1, 1991.
2.25. Impacts of a Nominal Nuclear Electromagnetic Pulse on Electric Power Systems, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/Sub/83-43374, 1991.
2.26. HEMP-Induced Transients in Electric Power Substations. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/Sub-88-SC863, February 1992.
2.27. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Critical National Infrastructures, April 2008.
2.28. High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices: Threat Assessments. CRS Report for Congress, July 2008.
2.29. The Early-Time (E1) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Its Impact on the U.S. Power Grid, Report Meta-R-320, Metatech Corp., January 2010.
2.30. The Late-Time (E3) High-Altitude. Electromagnetic Pulse (HEMP) and Its Impact on the U.S. Power Grid, Report Meta-R-321, Metatech Corp., January 2010.

2.31. Intentional Electromagnetic. Interference (IEMI) and Its Impact on the U.S. Power Grid, Report Meta-R-323, Metatech Corp., January 2010.
2.32. High-Frequency Protection Concepts for the Electric Power Grid, Report Meta-R-324, Metatech Corp., January 2010.
2.33. Protection of High Voltage Power Network Control Electronics Against Intentional Electromagnetic Interference (IEMI), Report CIGRE Working Group C4.206, November 2014.
2.34. IEC TR 61000-1-3 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
2.35. IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance. Basic EMC publication.
2.36. IEC 61000-2-10 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-10: Environment - Description of HEMP environment - Conducted disturbance.
2.37. IEC 61000-2-11 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-11: Environment - Classification of HEMP environments.
2.38. IEC 61000-2-13 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-13: Environment - High-power electromagnetic (HPEM) environments - Radiated and conducted.
2.39. IEC/TR 61000-5-3 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5-3: Installation and mitigation guidelines - HEMP protection concepts.
2.40. IEC/TS 61000-5-4 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 4: Immunity to HEMP - Specifications for protective devices against HEMP radiated disturbance. Basic EMC Publication.
2.41. IEC 61000-5-5 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Installation and mitigation guidelines - Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance. Basic EMC Publication.
2.42. IEEE P1642 Recommended Practice for Protecting Public Accessible Computer Systems from Intentional EMI.
2.43. Topic SEC-2011.2.2-2 Protection of Critical Infrastructure (structures, platforms and networks) against Electromagnetic (High Power Microwave (HPM)) Attacks, European Commission Security Research Program , 2010.
2.44. MIL-STD-188-125-1. High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C^4I Facilities Performing Critical Time-Urgent Missions, Department of Defense, 1994.
2.45. MIL-STD-461E. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Department of Defense, 1993.
2.46. MIL-STD-464C. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems, Department of Defense, 1997.
2.47. MIL-STD-2169B. High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Environment, Department of Defense, 1993.
2.48. ***MIL***-Hdbk-423. Military Handbook: High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Fixed and Transportable Ground-Based C41 Facilities, Vol. 1: Fixed Facilities Department of Defense, 1993.
2.49. High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Testing, Test Operations Procedure 01-2-620, U. S. Army Test and Evaluation Command, 2011.
2.50. Gurevich V.I. Enhancing the resilience of energy systems to HEMP - a vital task for our age - Energoexpert, 2015.
2.51. Belous. V. The threat of the deployment of EMP weapons for military and terrorist purposes - Nuclear control, 2005 No.1 (75), volume 11, pp. 133-140.
2.52. Burlakov A.A., Kirbadin V.V. On the influence of solar storms on the reliability of energy systems - abstracts from the international Scientific-technical Congress “Power Engineering in a Global World,” Krasnoyarsk, 16-18 June 2010, pp. 32-33.

2.53. Grekhov I.V., Yefanov V.M., Kardo-Sysoyev A.F., Shenderey S.V. The Formation of Nanosecond Voltage Variations in Semiconductor Diodes with a Drift Recovery System // Letters to the TPJ. 1983. Volume. 9. Issue 7. pp. 435-439.
2.54. Tuchkevich V.M., Grekhov I.V. New Principles in High Power Commutation using Semiconductor Devices. L.: Science. 1988. pp117.
2.55. Grekhov, I.V. High Power Pulse Commutation using Semiconductor Devices in the book entitled: The Physics and Technology of Powerful Pulse Systems / Edited by E.P. Velikhova. M.: Energoatomizdat, 1987. pp 237.
2.56. Slyusar, V. Ultra-powerful Electromagnetic Pulse Generators in Information Wars - Electronics: Science, Technology, Business 2002, Issue 5, pp. 60-67.
2.57. Slovikovskiy B.G. Small-scale High-voltage Nanosecond Pulse Generators Based on SOS-diodes. Synopsis of a Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences, Yekaterinburg, 2004.
2.58. Gurevich V.I. Optoelectronic Transformers: A Panacea or a Private Solution to Private Problems - "The Electro-technical News," 2010, No. 2, pp. 24-28.
2.59. Kirichek R.V. Research into the Influence of Very Fast Acting Pulses on the Data Transfer Process in Ethernet networks - Synopsis of a Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences, 05.12.13, St. Petersburg, 2011.
2.60. Gurevich V.I. The Reliability of Microprocessor Based Protective Relays: Myths and Reality - Problems of Power Engineering - 2008. - No. 56 - C.47-62.
2.61. Clark O. M., Gavender R. E. Lighting Protection for Microprocessor-based Electronic Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, No. 5, 1990.
2.62. Bludov S.B., Gladetskiy N.P., Kravtsov K.A. et al. The Generation of Very Fast Acting Powerful UHF Pulses and Their Effects on Electronic Technology - the Physics of Plasma, 1994, Volume 20, N 7, 8, pp. 712-717.
2.63. Panov V.V., Sarkisyan A.P. Certain Aspects of the Problem of Creating Functional UHF Weapons. Foreign Radio-electronics, 1993, 10, 11, 12, pp. 3-10.
2.64. Antipin V.V., Godovitsyn V.A., Gromov D.V., Kozhevnikov A.S., Ravayev, A.A. The Influence of Powerful Microwave Pulse Interference on Semiconductor Devices and Integrated Microcircuits. Foreign Radio-electronics, 1995, 1, pp 37-53.
2.65. Phadke A.G. Hidden Failures in electric power systems. International Journal of Physical Infrastructures, vol. 1, No. 1, 2004.
2.66. Methods of Ensuring the Resilience of Future Radio-relay, Tropospheric, and Satellite Communication Systems to the Effects of Powerful Electromagnetic Pulse Interference / Voskobovich Aleksandr Aleksandrovich - 05.12.13 - Moscow, 2002.
2.67. Developing Methods of Assessing the Resilience of Telecommunications Systems to the Effects of Ultrabroadband Electromagnetic Pulses / Vedmidskiy, Aleksandr Aleksandrovich - 05.12.13 - Moscow, 2003.
2.68. Theoretical and Experimental Methods of Assessing The Resilience of Terminals to the Effects of Ultraboadband Electromagnetic Pulses / Akbashev, Beslan Borisovich - 05.12.13 - Moscow, 2005.
2.69. Methods and Techniques for Assessing the Effect of High Energy Electromagnetic Pulses on Telecommunications Networks / Yakushin Sergey Pavlovich - 05.12.13. - Moscow, 2004.

3. שיטות ואמצעים לאבטחת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מפני פעימה אלקטרומגנטית

3.1 רגישותם של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים להשפעות אלקטרומגנטיות

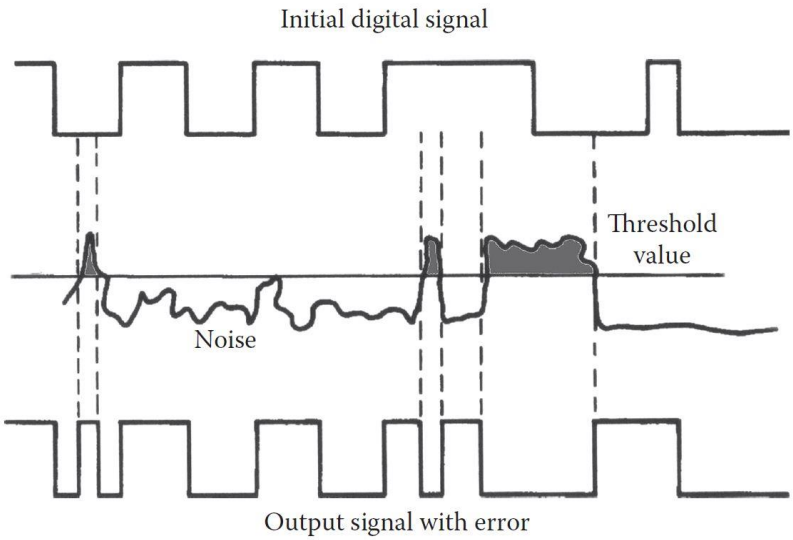
בעיית התאמה אלקטרומגנטית (EMC) של הציוד האלקטרוני נולדה בו בזמן עם הציוד הזה, על רקע העובדה שחלק אחד ממעגלים בציוד הזה נבנה בצורה כזאת שהוא קולט את הקרינה האלקטרומגנטית, כאשר חלק אחר מהווה מקור הקרינה הזאת. הבעיות הופיעו עקב ההשפעה ההדדית של המעגלים בתוך הציוד, וגם כתוצאה מהשפעתה על הציוד של קרינה חיצונית ממקורות שונים. במשך עשורים, בעיות EMC היו במרכז תשומת לבם של המומחים בתחום אלקטרוניקה, ציוד קשר ותקשורת. באופן פתאומי, ב-20-15 השנים האחרונות, הבעיה הזאת הפכה לאקטואלית מאוד גם בתחום תעשיית החשמל. שדות אלקטרומגנטיים משמעותיים באתרי תעשיית החשמל היו קיימים מאז ומעולם, על כך אין ויכוח. אולם, התקנים אוטומטיים וציוד שליטה והגנה ממסרית אלקטרו-מכאניים שהשתמשו בהם במשך עשורים לא היו רגישים לשדות האלה במידה רבה, לכן לא היו בעיות מיוחדות של EMC. בשני העשורים האחרונים נצפה מעבר נמרץ מהתקנים ממסרי הגנות אלקטרו-מכאניים לאלה המבוססים על מיקרו-מעבדים. והמעבר הזה נעשה לא רק בתחנות משנה חדשות שנבנות, אלא גם תוך החלפת ממסרים אלקטרו-מכאניים ישנים בממסרי הגנה מודרניים מבוססי מיקרו-מעבדים בתחנות משנה ישנות שנבנו בתקופה שבה איש עוד לא חשב על שימוש בטכנולוגיות מיקרו-מעבדים באתרים האלה. הממסרים המודרניים גילו רגישות גדולה להפרעות אלקטרומגנטיות המגיעות "מן האוויר", דרך קווי מתח ושנאים. נרשמו מקרים של הפעלת שווא של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים אפילו מהטלפון הנייד [4.1], ולא רק. דוגמאות טיפוסיות אחרות – מקרים של הפעלת שווא של התקני מיקרו-מעבדים באתרים של "מוסאנרגו", בתחנות משנה "אוצ'קובסקיה" "זובובסקיה". אלגוריתם פעולת הממסרים שובש עקב הברק, בגלל המחפר שעבד בקרבת המקום, בגלל ריתוך חשמלי שבוצע לא רחוק, ועקב הפרעות אחרות. בעת השקתה של תחנת המשנה "ליפצקיה", שהוציאה קרוב למיליון וחצי דולרים לרכישת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים, הבעיות הקשורות להתקני מיקרו-מעבדים מנעו במשך חצי שנה את הפעלתו של האתר. בסופו של דבר, התחנה הופעלה תוך שימוש בערכת ממסרי הגנות קלאסית [4.2]. נרשמו גם מקרים שבהם קצרים חשמליים ב-110 קילוווולט גרמו להפעלת שווא של ממסרי הגנה ב-330 קילוווולט, והפרעות בקומוטציה של סוג אחד של מתח חדרו (דרך מעגל זרם משותף) ליציאותיו של ציוד ממסרי הגנות שפעלו בקלס אחר של מתח קווי [4.3].

עבודה לא תקינה של ממסרי הגנה מסיבה של EMC לא מספקת, לפי הנתונים של "מוסאנרגו", נרשמת בכ-10 אחוזים מכלל המקרים של עבודה לא תקינה ונוגעת בעיקר לממסרית מבוססי מיקרו-מעבדים ומיקרו-אלקטרוניקה [4.4].

אחוז גבוה של מקרי העבודה הלא תקינה מסיבת אי ספקות EMC נובע מן העובדה שרגישות ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים להפרעות אלקטרומגנטיות היא פי כמה וכמה גבוהה יותר מרגישותם של ממסרים אלקטרו-מכאניים. למשל, לפי הנתונים [4.4], לגרימת תקלה בעבודתו של ממסר אלקטרו-מכני דרושה אנרגיה של 10

בחזקת - 3 ג'ואול, כאשר כדי לגרום תקלה במעגלים אינטגראליים צריך אך ורק 10 בחזקת -7 ג'ואול, פי 10000 פחות.

רמת הפגיעה תלויה בעמידותו של כל אחד מרכיבי המעגל, וגם מאנרגיית ההפרעה שהמעגל מסוגל לקלוט מבלי להיפגע. לדוגמה, בממסר אלקטרומחנטי בעל הסליל המותאם למתח של 230 וולט של זרם משתנה, הפרעת מיתוג מעומס אינדוקטיבי באמפליטודת (משרעת) 500 וולט, אפילו בהיותה יותר מפי 2 מתח יתר, לא בהכרח תוביל לניתוק הממסר הודות לעמידותם של התקנים אלקטרו-מכאניים לסוג כזה של הפרעות, ועקב המשך הלא רב של הפרעה כזאת (מיקרו-שניות). המצב שונה כשמדובר במיקרו-מעגל הניזון ממקור זרם ישר במתח 5 וולט. הפרעת פעימה באמפליטודת 500 וולט עולה פי 100 על מתח ההזנה של רכיב אלקטרוני זה, וגורמת לניתוקו הבלתי נמנע ולהריסתו של ההתקן. עמידותם של מיקרו-מעגלים במתח יתר נמוכה פי כמה וכמה מעמידותו של ממסר אלקטרומגנטי [4.5]. מתח יתר בעת מכת ברק או בעת מיתוג בהתקני כוח עלול לפגוע ולהרוס התקנים אלקטרוניים, ואף מערכות שלמות. סטטיסטיקה רבת שנים מוכיחה שמספר פגיעות כאלו מכפיל עצמו כל שלוש-ארבע שנים [4.5]. הסטטיסטיקה הזאת תואמת היטב למה שידוע כחוק מור [4.6], שעוד בשנת 1965 הראה שכמות המוליכים למחצה במיקרו צ'יפים מכפילה עצמה בערך כל שנתיים והמגמה הזאת נשמרת כבר הרבה שנים. אם לפני עשר שנים מיקרו-מעגלים של מה שנקרא לוגיקת TTL (טרנזיסטור-טרנזיסטור) הכילו 10-20 רכיבים למילימטר רבוע, ומתח ההזנה הטיפוסי שלהם היה 5 וולט, מיקרו-מעגלים היום יכולים להכיל כמעט מאה טרנזיסטורים CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) בכל מילימטר רבוע של שטחם, ומתח ההזנה שלהם הוא 1.2 וולט בלבד. טכנולוגיות חדשניות של גוף קשיח, למשל SOS (Silicon-On-Sapphire) , מעלים את רמת הצפיפות של הרכיבים ל 500 במילימטר רבוע אחד של השטח [4.7]. גלוי וברור בעבור מיקרו-מעגלים כאלה דרוש מתח הזנה נמוך אף יותר. גלוי וברור גם שככל שרמת האינטגרציה במיקרו-אלקטרוניקה גבוהה יותר, כך עמידות רכיביה למתחי יתר נמוכה יותר בגלל הקטנת עובי הבידוד והקטנת מתחי פעולה של המוליכים למחצה.

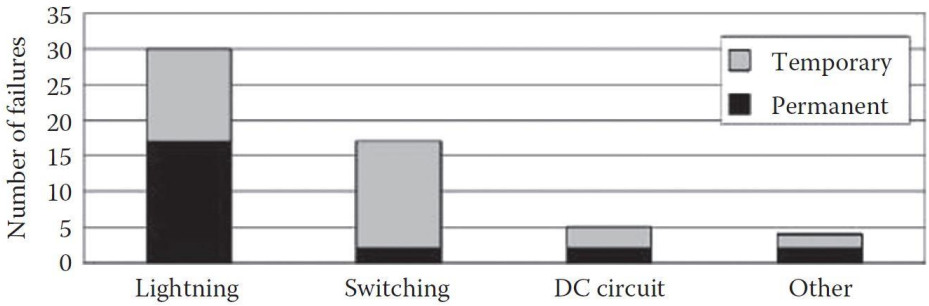


איור 3.1

השפעתה של ההפרעה בעלת רמת אנרגיה נמוכה על תפקודו של התקן דיגיטאלי

הפרעות בעלות רמת אנרגיה נמוכה קורות לעתים קרובות יותר מהפרעות בעלות רמת אנרגיה גבוהה, לכן התגובה הנפוצה ביותר של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים להשפעת הפרעות אלקטרומגנטיות לא תהיה הריסת ההתקן, אלא תקלה בעבודתו או כשל קצר בעבודתו ושיקום התפקוד מיד אחר כך, איור 3.1

משמעות הדבר – הממסר שבתפקודו בתחנת המשנה הייתה תקלה זמנית יתגלה כתקין לחלוטין בעת בדיקתו במעבדה, ולא תהיה שום דרך לקבוע את הסיבה להפעלת שווא. סטטיסטיקה אשר נאספה בידי המומחים של החברות היפניות המובילות בתחום ממסרי הגנה על בסיס מיקרו-מעבדים מוכיחה את הייחודיות הזאת של הממסרים הלאה, איור 3.2 [4.8].



<u>איור 3.2</u>
נתוני היצרניות היפניות לגבי פגיעותם של ממסרי הגנה מבוססי מיקרומעבדים מהשפעות אלקטרומגנטיות

כפי שאפשר לראות מהתרשים המוצג, תקלות קצרות ולא חוזרות בתפקוד הממסרים קורות לעתים קרובות יותר מאשר תקלות רציניות יותר. המסכנה הזאת נתמכת גם על ידי הנתונים שנאספו בידי צוות מומחים אחר [4.9]. לפי הנתונים האלה, תקלות קלות מהסוג הזה הן 70 אחוזים מכלל הפגיעות בממסרים מבוססי מיקרו-מעבדים. ועד 80 אחוזים מהתקלות האלה קורות במעגלים משולבים.

לפי העדות [4.4] ולפי ניסיון החברה "מוסאנרגו", ישנן הרבה הוכחות להשפעה שלילית של הפרעות אלקטרומגנטיות על תפקודם של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים. אפשר לראות זאת בצורה ברורה ביותר מניסיון ההפעלה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים מתוצרת חברת "SIEMENS" בתחנת כוח תרמית מספר 12 של חברת "מוסאנרגו" לפי המיזם שבוצע במכון "אטום-אנרגופרוייקט". בעת עבודות ההנדסה, דרישות EMC לא נלקחו בחשבון בכלל. עקב ההפרעות, מאוגוסט עד דצמבר 1999, נרשמו יותר מ 400 אותות שווא ביציאות דיסקרטיות ואנלוגיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים [4.4]. וכאן צריך לזכור שעלות כל ניתוק של ממסר הגנה מבוסס מיקרו-מעבדים גבוהה יותר פי 10 מעלות הניתוק של ממסר הגנה אלקטרו-מכני, בגלל הריכוז הגבוה של פונקציות בכל ממסר מבוסס מיקרו-מעבדים.

ההפרעות החודרות דרך הכבלים ליציאות המכשור האלקטרוני נקראות הפרעות "קונדוקטיביות" ("מוליכות"). מלבד הפרעות מן הסוג הזה, פעימת זרם חזק שעוברת בכבלים ובחוטים, יוצרת הפרעות בצורה של שדות אלקטרומגנטיים המשפיעים על כל המוליכים בקרבה. השפעה כזאת נקראת "אינדוקטיבית" ("השראתית"). ישנן גם קיבולות איסוף שגורמות לפעימות קצרות (כלומר, בתדירות גבוהה) של מתח יתר מקווי מתח גבוה להגיע למעגלים בעלי רמת מתח נמוכה דרך קיבולת בין ליפופים השנאים.

בעת התפשטות ההפרעה היא משנה את סוגה פעמים רבות, לכן החלוקה הזאת היא על תנאי בלבד, במיוחד כשמדובר בהליכים בעלי תדירות גבוהה. יתרה מזאת, כשהיא חודרת לציוד אלקטרוני באמצעות שדה אלקטרומגנטי או דרך כבלים, הפרעה סופגת מהפכים מרובים כבר בתוך הציוד הזה, עקב נוכחות קשרים מזיקים בין רכיבים בודדים או בין מעגלים שונים של הציוד. רכיב בעל תדירות גבוהה בהפרעה הזאת יכול לחדור אל תוך הציוד, כשהוא עוקף את המסננים ורכיבי הגנה. עוד דרך לחדירת ההפרעה: זרימת הזרמים בתוך גוף המתכת של ממסר הגנה מבוסס מיקרו-מעבדים, וכמו כן בתוך כיוסיהם של החוטים המרובים המחוברים לממסר הגנה.

כל זה מלמד שלספק רמה הולמת של הגנה מפני הפרעות אלקטרומגנטיות אינו דבר של מה בכך, אפילו כשמדובר בהפרעות טבעיות ולא מלאכותיות. ואם מדברים על הגנת הציוד האלקטרוני מפני השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות, כולל אלה שהן תוצאה של פעימה אלקטרומגנטית מפיצוץ גרעיני, הבעיה מצטיירת כקשה אף יותר, והפתרון – כיקר יותר. אף על פי כן, חשוב להדגיש שכשנפתור את בעיית השאה"מ, נספק תפקוד בטוח ואמין יותר של ציוד אלקטרוני בתחנות משנה גם במתכונתו הרגילה, כלומר, כשמדובר בהשפעת ההפרעות הטבעיות.

3.2 שיטות ההגנה מפני השאה"מ

את שיטות הגנת הציוד האלקטרוני בתחנות משנה מפני השאה"מ אפשר לחלק לפסיביות, אקטיביות, וטכניות-ארגוניות.

שיטות הגנה פסיביות כוללות שימוש באמצעי עזר חיצוניים (טכנולוגיות, חומרים, רכיבים, וכו') שאינם קשורים ישירות לתפקוד הציוד המוגן. זה כולל ארונות וכבלים מיוחדים, מגבילי מתח יתר ומסננים, מערכותהארקה משופרות, חומרי בניין מיוחדים, צבע, לכה, ציפויים, שטיחים ווילונות ממתכת, ובסופו של דבר שימוש ברכיבים וחומרים מיוחדים במבנה הציוד עצמו.

שיטות הגנה אקטיביות כוללות שימוש בהתקנים חיצוניים שתפקודם אינו קשור ישירות לתפקודו של הציוד המוגן. אם ניקח את ממסרי ההגנה מבוססי מיקרו-מעבדים כמשל, אפשר יהיה להראות שהשיטות האלה כוללות את רכיבי הפעלה מופשטים של ממסרי הגנות שפותחו במיוחד ונבנו על בסיס אלקטרו-מכני, מה שעושה אותם עמידים במיוחד ל השאה"מ. רכיבי הפעלה כאלה אינם מגיבים לפעימה אלקטרומגנטית קצרה וזו אינה יכולה לפגוע בהם, אך הם מגיבים לאחד הפרמטרים של מתכונת החרום (זרם, מתח) ומפעילים את ממסר ההגנה מבוסס מיקרו-מעבדים שבתורו מספק את ביצועו של כל הסט של המאפיינים הדרושים.

מבצעים טכניים-ארגוניים כוללים ארגון ואמצעים טכניים לאחסונם המיוחד של חלקי חילוף של הציוד האלקטרוני, שמספק שיקום מהיר ככל האפשר של הציוד שניזוק, התאמה לתקן של מבנה ותוכנה בציוד הזה, כולל ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים, אשר מספקת אפשרות החלפה הדדית של בלוקים ומודולים פנימיים, אוניברסאליות של שיטות בקרת הציוד האלקטרוני בידי מערכות בקרה מיוחדות, אשר מקטינה את זמן השבת הציוד לתפקוד.

כשבוחרים ומשתמשים באמצעיי ההגנה מפני פעימה אלקטרומגנטית, חייבים לקחת בחשבון שסוג אחד בלבד של אמצעיי הגנה אינו מסוגל לספק הגנה יעילה. רק שימוש משולב בשיטות ובאמצעים שונים של הגנה מסוגל לספק

הגנה אמינה של הציוד האלקטרוני. למשל, שימוש בארון המיוחד המוגן מפני פעימה אלקטרומגנטית אינו מגן על הציוד הרגיש מפני חדירת הפעימה דרך החיווט הנכנס אל תוך הארון הזה והמחובר לכניסות הציוד. באותה מידה, שימוש במסננים המיוחדים המגנים מפני חדירת הפעימה דרך החוטים אינו מגן מפני קרינה אלקטרומגנטית שחודרת לתוך הציוד דרך החלונות והפתחים בגופו. ושימוש בארונות מוגנים ובמסננים אינו פותר את בעיית ההשפעה של הפעימה האלקטרומגנטית על הציוד דרך מערכת הארקה.

3. שיטות ואמצעים פסיביים לאבטחת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים מפני פעימה אלקטרומגנטית

4.1. ארונות חשמל הרכבה

איור 4.1

ארון הרכבה בעל הגנה מוגברת מפני פעימה אלקטרומגנטית, המצויד בצירים מיוחדים, בריפוד גומי, ברכיבי חיבור מיוחדים, בחלונות אוורור מכוסות וכו' (Equipto Electronics Corp.)

בידוד מלא של ציוד אלקטרוני מהעולם החיצון וכיסוי המבנה שבו הוא נמצא בשכבה פרומגנטית עבה היו יכולים לספק אבטחה אידיאלית מפני פעימה אלקטרומגנטית. אך ברור לחלוטין שאין לממש אבטחה שכזאת במציאות. מהסיבה הזאת, במציאות אנו נאלצים להשתמש באמצעי הגנה אמינים הרבה פחות, כמו רשתות מוליכות זרם או ציפוי מוליך זרם לחלונות, מבני מתכת סלולאריים לפתחי אוויר ואוורור, חומרי סיכה מוליכים וריפודי גומי בהיקפי הדלתות והפתחים.

בשוק מוצעים היום בצורה נרחבת ארונות מתכת, איור 4.1, בעלי מבנה מיוחד, המבטיחים החלשה משמעותית של קרינה אלקטרומגנטית. ארונות סטנדרטיים מפלדה רגילה, בלי חלונות או חריצים, מחלישים גם הם באופן משמעותי את הפעימה האלקטרומגנטית. ואמנם, השימוש בלוחות מצופי אבץ ליצור הארונות, וגם בריפודים מוליכים מיוחדים, מעלה בצורה משמעותית את יעילותם של הארונות האלה, כי ציפוי האבץ מאפשר ליישר את הפוטנציאל בשטח גדול (התנגדות הסף של פלדה היא: $0.103\text{-}0.204\ \text{Ohm x mm}^2 / \text{m}$, כאשר התנגדות הסף של אבץ היא $0.053\text{-}0.062\ \text{Ohm x mm}^2 / \text{m}$). לאלומיניום רמת התנגדות נמוכה אף יותר:

($0.053\text{-}0.062\ \text{Ohm x mm}^2 / \text{m}$), לכן, ישנן חברות שמייצרות ארונות אחידים מהנתך המיוחד ALUZINC 150 (Aluzinc - המותג של התאגיד Arcelor) - זאת פלדה שיש לה ציפוי שעשוי ב 55 אחוזים מאלומיניום, ב 43.4 אחוזים מאבץ וב-1.6 אחוזים מצורן.

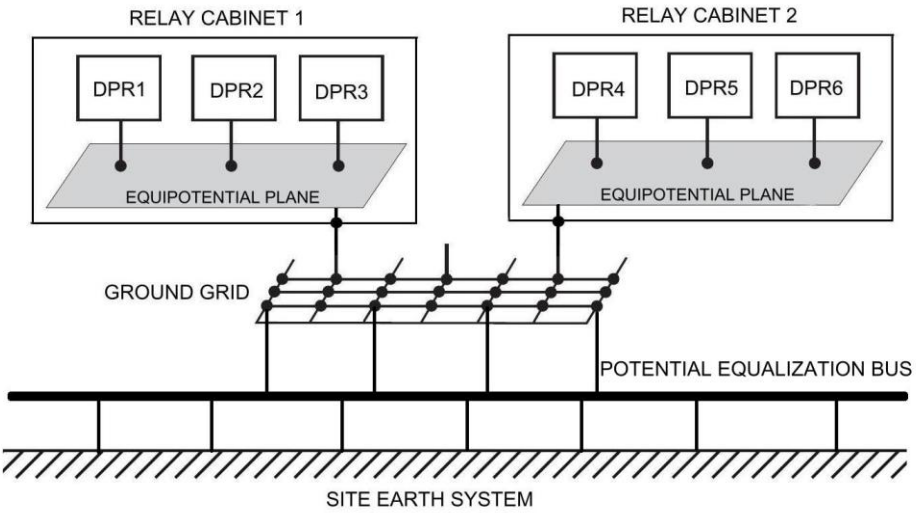
פני הארון שיש לו ציפוי מהסוג הזה מבטיחות רמה גבוהה של החזר הקרינה האלקטרומגנטית. ארונות כאלה מיוצרים ומיובאים למדינות רבות בידי חברת Sarel (כיום – Schneider Electric Ltd. , בריטניה).

ארונות דומים המיועדים להגנה מפני פעימה אלקטרומגנטית מיוצרים היום גם בידי חברות אחרות: Canovate Group, R.F. Installations Inc., ;Universal Shielding Corp. ;Eldon ;Equipto Electronics Corp.; ATOS ;MFB ;European EMC Products Ltd. ;Amco Engineering ;Addison ורבות אחרות. ארונות כאלה בדרך כלל מחלישים את הקרינה ב 90-80 דציבל בתדרים של 100 קילו-הרץ עד 1 ג'יגה-הרץ.

הבעיה היא שבמציאות ארונות הרכבה מכילים פתחים רבים לכניסה ויציאה של עשרות כבלים, והדבר מוביל באופן בלתי נמנע לירידה ברמת היעילות של הכיסוי. מלבד זאת, ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים שנמצאים בתוך ארון כזה, וגם ארון עצמו, חייבים להיות מאורקים. ואמנם, מערכת הארקה שקיימת בתחנות המשנה אינה מגיבה להשפעת פאפ"ג בצורה טובה, ולמרות הציפיות אינה מוסיפה להגנת הציוד האלקטרוני מפני ההשפעה הזאת.

4.2.3 הארקת הציוד האלקטרוני הרגיש

"הארקה היא הסוגיה שמבינים אותה פחות מכולן באוטומטיזציה... פתרון בעיות הארקה נמצא כיום בגבול שבין הבנה, אינטואיציה ומזל".
ויקטור דניסנקו
דר' למדעים טכניים, המהנדס הראשי של המעבדה למדע ולמחקר של אוטומטיזציה של הנדסה



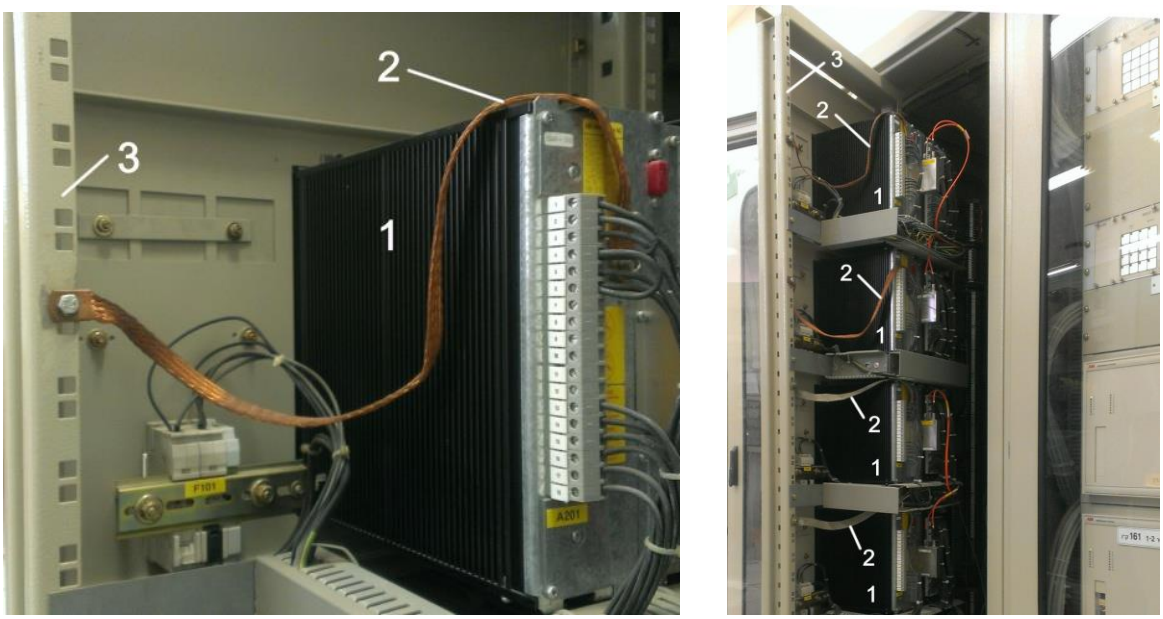
איור 4.2

תרשים שלהארקה רב נקודתית של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים בעת שימוש במשטח בעל אותו פוטנציאל חשמלי

בתור משטח כזה יכולים להשתמש ברכיבי מתכת של מבני הארונות הממסרים, איור 4.3.

למרבה הצער, במתקני תעשיית החשמל (תחנות משנה ותחנות כוח), אשר יש להם שטח גדול, אפילו שיטות כאלה של הארקה אינן יעילות דיין בגלל הכורח של הארקתם של התקנים חשמליים שונים ומגוונים, הממוקמים במרחק גדול אלה מאלה, בנקודות שונות בתוואי הארקה הכולל. ונקודת הארקה האלה מקבלות הבדל פוטנציאל משמעותי בעת זרימת זרמי הפעימה בעוצמה גדולה דרך תוואי הארקה. אם להתקני החשמל האלה אין חיבור גלווני, למשל, כמו לממסרי הגנה, המחוברים באמצעות קווי תקשורת סיבים אופטיים (FOCL), אז להבדל הפוטנציאל הזה אין תפקיד מיוחד. אולם, אם ממסרי ההגנה, הממוקמים במרחק זה מזה, מחוברים ביניהם באמצעות מערכת תקשורת קווית (כלומר, זוג שזור וערוץ תקשורת Ethernet רגיל שאליו עוברים בזמן האחרון כדי להפחית את העלות של

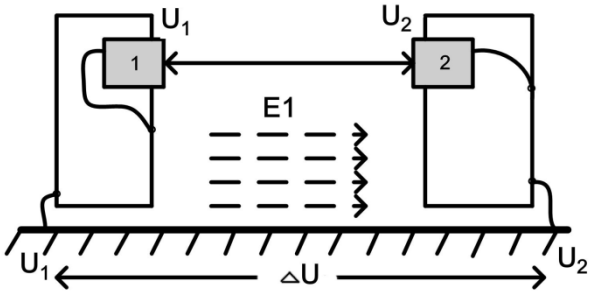
מערכות אספקת חשמל), אזי למעגלי המתח הנמוך של מערכת התקשורת הזאת יתווסף מתח גבוה, אשר יוביל בהכרח לפגיעה במערכת זו, כלומר, במקרים רבים, לכישלון ההגנה הממסרית, איור 4.4.



איור 4.3

התקן הארקה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים שהותקן בארונות מתכת,
תוך שימוש במשטח בעל אותו פוטנציאל חשמלי
1 - הממסרים בקופסות מתכת; 2- סדי נחושת; 3- מבנה ארון מתכת המשמש כמשטח בעל אותו פוטנציאל

מערכתהארקה מודרנית של ממסרי הגנה, הנחשבת למתוכננת בצורה הנכונה, היא מערכת רב נקודתית, שבה משתמשים במשטח בעל אותו פוטנציאל חשמלי, איור 4.2.



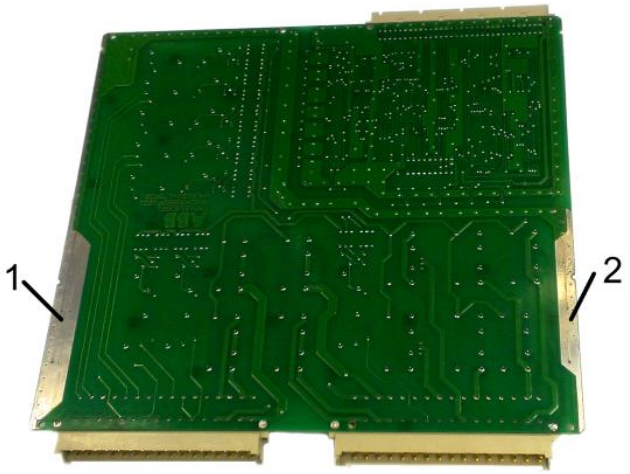
איור 4.4

תרשים החיבור של שני ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים (1 ו-2) הממוקמים במרחק די גדול זה מזה, עם ערוץ תקשורת לא מבודד (זוג שזור ורשת Ethernet)

לפי עדות [4.1]: "ככל ששטחו של האתר המוגן גדול יותר, כך פוטנציאל הבעיות גדול יותר גם הוא".

כידוע, ישנם שני סוגים של הארקה: אחד שמכנים אותו פונקציונאלי (או מבצעי) והאחר, המגן. כפי שזה נובע מהשמות של סוגים אלה של הארקה, הראשון שבהם נועד אך ורק להבטיח את התפקוד הנורמאלי של הציוד,

והשני – אך ורק להבטיח את בטיחותו של הצוות. ב [4.2] נטען שהארקה הפונקציונאלית נדרשת רק כדי להבטיח את תפקודם של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים, ונדונות דרכים שונות לביצועהארקה כזאת ושיטות לניסויה. אכן, בלוחות החיווט המודפסים המסוימים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים ישנם אזורים ריקים של מוליכים מודפסים, מצופים בציפוי כסף ובעלי רוחב מוגדל, אשר בעת התקנת הלוח באים במגע עם קפיצים מיוחדים שמבטיחים את מגעם של המוליכים המודפסים עם הגוף המוארק של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים, איור 4.5.



<u>איור 4.5</u>

כרטיס מודפס של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים בעל אזורים שנוקו (1 ו-2) ושבאים במגע עם הגוף המוארק באמצעות הקפיץ המיוחד

ואמנם, האמהארקה פונקציונאלית באמת הכרחית לפעילות התקינה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים, שבהם כל מעגלי הקלט ופלט מבודדים היטב מן הקרקע וממתקני חשמל אחרים (בעת שימוש בתקשורת סיבים אופטיים בין המסופים)? שהרי, תפקודם התקין של מעגלים אלקטרוניים פנימיים של ממסרי הגנה אינה קשורה לקיומה או אי קיומה של הארקה. באשר למידת היעילות של הגנתם של מעגלים אלקטרוניים רגישים מפני שדות אלקטרומגנטיים חיצוניים על ידי מעטפת מתכת, שנועדה לשמש מה שמכונה "כלוב פאראדי", גם יעילות זו אינה תלויה בנוכחות או בהעדר הארקה. כלומר, הארקת גוף הממסרים אינה משפיעה כלל על יעילותו של הגוף הזה. מצד השני, אם אותות הפרעה חודרים למעגלים האלקטרוני של הממסרים הנמצאים בתוך הגוף הזה דרך הכבלים, באיזו דרך אמורה הארקה למנוע את השפעת ההפרעות האלה (במיוחד הפרעות מסוג דיפרנציאלי)? התשובה ברורה: בשום דרך! יתר על כן, אפשר לטעון כיהארקת גופי הממסרים רק מחריפה את המצב ומצמצמת את עמידותה של ההגנה הממסרית להפרעות. לדוגמא, בהתאם לתקן IEC 60255-22-4 , את כל מעגלי קלט ופלט של ההגנה הממסרית בודקים במשרעת של 4 קילו-וולט, למעט יציאות תקשורת דיגיטאליות. כלומר, ההנחה מראש היא שהיציאות האלה לא יעמדו במבחנים כאלה. אך בעת השימוש בזוג שזור קונבנציונאלי ובחיבור מעגלים אלה לרשת Ethernet במקום להשתמש בתקשורת סיבים אופטיים, במעגלים האלה בהכרח יחול מתח גבוה, כמו במקרה שמוצג באיור 4.4. ואיך ישתנה המצב, אם גוף הממסרים יהיה מבודד היטב ממערכת ההארקה? אם נניח

בצד את הקיבולים הטפיליים (ובמקרה שמתואר להלן אכן אפשר להניחם בצד), אז, בהסתמך באותו האיור 4.4, המתח הגבוה לא יחול ביציאות התקשורת הדיגיטאלית.

בעיה נוספת במערכת ההארקה המקובלת היום - פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני בגובה, ובפרט, הרכיב שלה המכונה "מהיר" - E1, המאופיין בפעימה קצרה, אך חזקה מאוד, של שדה חשמלי ליד פני כדור הארץ, במתח של עד 50 קילוווולט בדקה, בעלת חזית קדמית של כמה ננו-שניות, וחזית אחורית של כמיקרושנייה אחת [4.3]. לשדה הזה מבנה מורכב, והוא מכיל רכיב אופקי ואנוכי בהם מותנית הופעתן של פעימות זרם משמעותיות במוליכים ארוכים, בפרט, במערכותהארקה המשמשות כאנטנות גדולות שקולטות אנרגיה אלקטרומגנטית בשטח נרחב.

במקרה של מכת ברק או תקר בבידודו של ציוד החשמל בעל מתח גבוה שיש לו חלקים מוארקים בארקה פונקציונאלית (למשל, נקודות אפסיות מוארקות של חיווט השנאים המחובר בצורת כוכב), למערכת הארקה יש תפקיד של אלקטרוד בעל פוטנציאל אפסי. ברוב המסמכים הנורמטיביים, אפילו במסמכים הרציניים ביותר, כמו [4.4], אין שום הבדל בין השפעתה של מכת ברק על מערכת הארקה, לבין השפעתה עליה של הרכיב E1 של פאפ"ג. למשל, במסמך [4.4] נכתב: "מפני שהשפעתה של ההפרעה מהפעימה האלקטרומגנטית דומה לזו שנצפית בעת מכת ברק, מערכת כליא ברק ומערכת אלקטרודות הארקה הן הממשקים העיקריים של מערכת ההגנה מפני הפעימה האלקטרומגנטית".

ואולם, במציאות ישנו הבדל משמעותי בין מכת ברק במתח גבוה על מערכת הארקה בעלת פוטנציאל אפסי, או תקר בבידודו של ציוד מתח גבוה על האדמה, לבין פעימת E1 של שדה חשמל רב עוצמה שחלק ממנו מכוונת במקביל לפני האדמה (כלומר, במקביל לרשת מערכת הארקה). בעת הופעתה של פאפ"ג, מערכת הארקה מפסיקה למלא תפקיד המשטח בעל פוטנציאל אפסי, ומתחילה למלא תפקיד המקור של מתח הפעימה הגבוה החל על הציוד האלקטרוני המוארק בחלקים שונים של מערכת הארקה ושיש להם קשר גלווני ביניהם, איור 4.4.

<u>איור 4.6</u>

טרמינלים מודרניים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים בתוך גופים בעלי חלונות, חריצים ופתחים רבים המשמשים למסכים, מקשים, לוחות אינדיקציה, ומרכיבים אחרים

מפני שמדובר בפעימה רבת עוצמה וקצרה מאוד (כלומר, שיש לה תכונות של תדר גבוה) היוצרת מתח שדה באוויר המגיע עד כדי 50 קילו-וולט למטר, הדבר מאפשר להבין שאפילו בקטע לא גדול של מערכת הארקה

סטנדרטית יכול להיווצר הבדל גדול של פוטנציאלים, העולה בהרבה על הערך שנוצר בעת זרימת זרמי הברק דרך מערכת הארקה. לכן, דרישות האיתנות החשמלית של בידודן של שרשראות הכניסה והיציאה בממסרי ההגנה הדורשות לעמוד במתחי פעימה ניסיוניים במנעד (דיאפזון) של ננו-שנייה במשרעת (אמפליטודה) 4 קילו-וולט, המופיעות בתקן IEC 60255-22-4 , בבירור אינן מספיקות כדי להבטיח את תפקודם התקין של הממסרים. יתר על כן, לא סתם הזכרנו מעלה את גוף הממסר, כרכיב שאמור למלא תפקיד של "כלוב פאראדי". מפני שבמציאות, הגופים ממתכת של הממסרים המודרניים אינם ממלאים בצורה טובה את התפקיד הזה של "כלוב פאראדי", בגלל הפתחים והחריצים הגדולים על פניהם הדרושים למסכים, לוחות מקשים, ועוד. איור 4.6.

מאפייניו של הרכיב E1 של פאפ"ג הם כאלה שכל החתכים הללו בגוף המתכת מאפשרים חדירתו של גל אלקטרומגנטי רב עוצמה בתדירות שווה המגיעה לעשרות ג'יגה-הרץ אל תוך תיבת הממסרים.

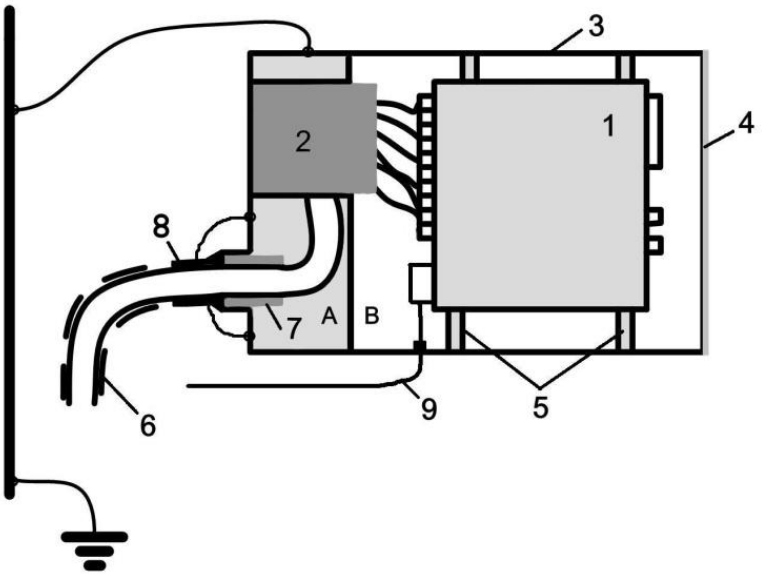
ארונות מתכת רגילים, אשר בהם מתמקמים כיום סטים של הגנה ממסרית, אינם גם הם מתאימים להגנה על הממסרים משדות אלקטרומגנטיים בתדר גבוה, כי יש להם חלק עליון או חלק תחתון פתוח לחלוטין, לכניסת כבלים מרובים, ולפעמים דלתות זכוכית שדרכן נוח לצפות במסכים ובאינדיקאטורים של הממסרים מבלי לפתוח אותן, איור. 4.7. לכן, בדרך זו או אחרת, יש צורך למצוא פתרונות חלופיים על מנת להבטיח הגנה כזו. כך, מתברר כי באמת הכרחית היא רק הארקתן של תיבות הממסרים, המגנה על הצוות מהתחשמלות בעת נגיעה בתיבת הממסר, ולא הארקה הפונקציונאלית.

<u>איור 4.7</u>

ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים המותקנים בתוך ארונות סטנדרטיים בעלי דלתות זכוכית

באשר להשפעתו של הרכיב E1 של פאפ"ג, מתברר שכל הפתרונות הטכניים הידועים בתחום מערכות הארקה שבהם משתמשים בתעשיית החשמל, לא רק שאינם יעילים בגלל ההתנגדות הגבוהה בתדירות שווה של עשרות ג'יגה-הרץ, אלא עלולים גם להיות מסוכנים לציוד אלקטרוני רגיש. כך שדרישת הארקה של תיבות ההתקנים המבוססים על מיקרו-מעבדים של ממסרי הגנות מנוגדת לדרישת הבטחת עמידותם בהשפעת פאפ"ג.

לפי הטענה [4.2],אין לראות את הארקה הפונקציונאלית בנפרד מארקת ההגנה, מבלי להפר את התקנים של בטיחות העבודה. נרשה לנו לערער בטענה הזאת ולראות את שני הסוגים האלה של הארקה כנפרדים ועצמאים זה מזה. הגישה הזאת מאפשרת לבסס את ארגוהארקת הממסרים על עקרון חדש, המבוסס על המלצת IEC 60364-5-548 [4.5] לגבי הגברת רמת עמידותו של ציוד הממוחשב להפרעות באמצעות הפרדת הציוד הזה ממקורות ההפרעות מפני שבמקרה המתואר "מקור ההפרעה" שכזה היא הארקה הפונקציונאלית, הצעתנו היא להפריד ממנה את ממסרי ההגנה מבוססי מיקרו-מעבדים, איור 4.8.



<u>איור 4.8</u>

העיקרון המוצע של הרכבת ממסרי הגנה, המבטיח רמת עמידות מוגברת לכל סוגי השפעות אלקטרומגנטיות, כולל פאפ"ג

A – התא "המזוהם"; B – התא "הנקי"; 1- הממסר הגנה בתוך תיבת פלסטיק מבודדת היטב; 2- מסנן פאפ"ג; 3- גוף מתכת; 4- דלת גוף מתכת; 5- מבודדים; 6 - כבל הבקרה בעל מסך כפול; 7- מבודד המעבר; 8- גומחת מתכת לחיבור הכבל עם גוף מתכת; 9- קו תקשורת סיב אופטי

על פי ההצעה הזאת, תיבת מתכת 3, איור 4.8, בעלת כמות פתחים מינימאלית, מחולק על ידי מעקה פנימי לשני אזורים: A – "מזוהם", B – "נקי". טרמינל הממסרים בתוך תיבת פלסטיק ממוקם באזור הנקי, חופשי מקרינה אלקטרומגנטית. תיבת 3 מכילה דלת 4 המספקת לצוות גישה ללוח הקדמי של הממסרים בעת עבודות התחזוקה. תיבת 3 מוארקת תוך כיבוד כל הנורמות והכללים הקיימים של הארקה, והדבר מבטיח כיבוד של כל דרישות הבטיחות. כשהמרחק בין הממסר לבין המחיצות הפנימיות של התיבה המוארקת גדול דיו, למשל 5-7 סמ', ההשפעה המזיקה של השרשראות האלקטרוניות של הממסרים על האדמה תהיה מזערית ואפשר יהיה להתעלם ממנה. באשר לתיבת הממסרים עצמה, היא חייבת להיות מבודדת בקפידה (עשויה מפלסטיק), תוך נקיטת צעדים נוספים למניעת התפשטותו של הפוטנציאל המסוכן על פניה של התיבה הזאת. צעדים כאלה יכולים להיות: כיסוי המסך בלוח פלסטיק שקוף נוסף; התקנת מקשי השליטה על פני התיבה דרך מתאמי הבידוד; התקנת התאורה על

גבי הצג שעל פני התיבה דרך סיבי פלסטיק קשוחים; שימוש בכניסה אופטית מבודדת לחיבור מחשב חיצוני לממסרי ההגנה. באופן כללי, זה אותן שיטות אבטחה פשוטות שמקובלות בהיעדר הארקה בכלי חשמל ידניים בעלי מה שנקרא בידוד כפול, ואינן מהוות קושי כלשהו ביישומן.

באשר להסרה האפשרית של מטען אלקטרוסטאטי שעשוי להצטבר על פני התיבה המבודדת של הממסרים, בעיה זו יכולה להיפתר על ידי החלת ציפוי דק המוליך למחצה ובעל רמת התנגדות גבוהה, על המשטח הפנימי של תיבת פלסטיק וחיבורו לתיבת מתכת מוארקת באמצעות הנגד המיוחד בעל רמת מתח גבוהה (50-100 קילוווולט) ורמת התנגדות גבוהה (כ 50 אום). מטען אלקטרוסטאטי יתנקז אל הקרקע באמצעות הנגד הזה. טכנולוגיית הציפוי הזה מגובשת היטב, ויש לה שימוש נרחב בציוד אלקטרוני מודרני. נגדים קומפקטיים בעלי רמת התנגדות גבוהה במתח 50 - 100 קילוווולט אינם חסרים בשוק ומיוצרים על ידי חברות רבות, למשל, Caddock Electronics, Arcol, Ohmite, Welwyn Components, ועוד.

לדעתנו, הפתרון הטכני המוצע יבטיח רמה גבוהה של עמידות הממסרים להפרעות, גם בתנאיי השימוש הטבעיים הקיימים היום, וגם בתנאיי חרום בעת השפעת פאפ"ג או אמצעים טכניים אחרים היוצרים השפעות הרסניות אלקטרומגנטית ממרחק [4.2]. במקביל, עלות היישום של הפתרון הטכני המוצע לא תכביד במיוחד על תעשיית החשמל. היא עשויה להיות משמעותית פחות ממחיר השיקום של מערכת הארקה הישנה במתקני אנרגיה רבים, שאינה מספקת תפקוד תקין של הממסרים בתנאי ההפעלה הקיימים.

4.3 מסנני פאפ"ג

השיטות העיקריות של הגנה מפני החשיפה לפאפ"ג של הציוד הרגיש במיוחד הן - סיכוך אלקטרומגנטי קפדני של ציוד עצמו, ושל הכבלים החיצוניים המחוברים אליו, וכמו כן, דיכוי הפעימה באמצעות מסננים מיוחדים.

4.3.1 מסנני פריט (Ferrite)

הסוג הפשוט ביותר של מסנן, שאינו דורש הוצאות גדולות אך שבכל זאת מחליש משמעותית את השפעתה של הפעימה האלקטרומגנטית הקצרה (הדומה במאפייניה לאות בתדר גבוה) בתוך החוטים המחוברים לציוד אלקטרוני, הוא מסנן פריט (Ferrite) בצורת טבעת (גליל) שעונדים על החוט, איור 4.9.

איור 4.9

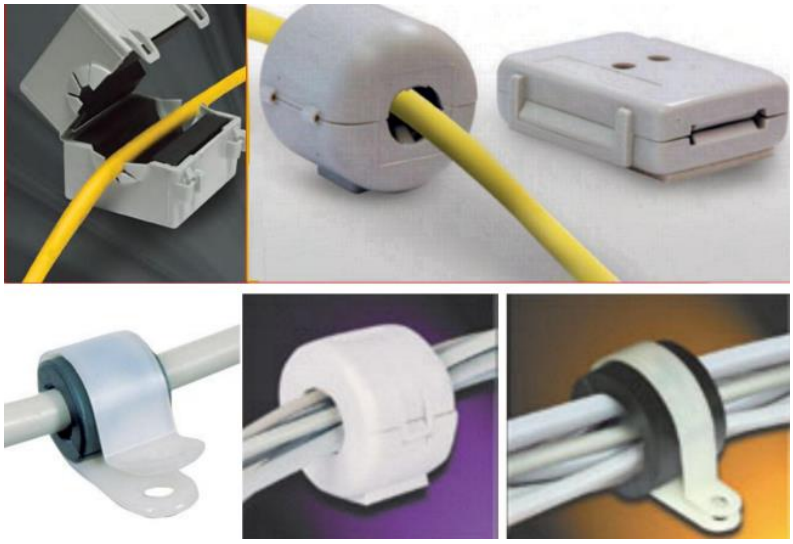
רכיבי פריט (Ferrite) של המסננים

אימפדנס הסליל של הכבל העובר דרך טבעת פריט הינו קטן מאוד בשביל אותות עבודה בתדר נמוך ובשביל הזרם המשתנה של תדירות תעשייתית, וגדול מאוד בשביל אותות בתדר גבוה (אותות פעימה) במנעד התדרים המסוים התלוי ממספר הפקעות, מהחומר ומהגודל הגיאומטרי של הטבעת. כתוצאה, הפרעות הפעימה והפרעות בתדר גבוה הנכנסות לכבל כזה יוחלשו במידה ניכרת. ההחלשה הנגרמת בידי המסננים מן הסוג הזה שווה ל 10-15 דציבל.

איור 4.10

מסננים מיניאטוריים על בסיס רכיבי פריט המיועדים להרכבה על פני המעגל המודפס

חברות רבות מייצרות סוגים רבים של מסננים כאלה, מיניאטוריים, המיועדים להתקנה בתוך הציוד ועל המעגלים המודפסים, איור 4.10, וכמו כן, להרכבה ישירות על החוטים (כבלים). על מנת להקל על ההתקנה, מסננים כאלה מיוצרים לעתים קרובות בצורה של שתי טבעות למחצה (צילינדרים למחצה) הממוקמות בתיבות פלסטיק הנסגרות בנקישה, והמבטיחות התקנה קלה ומהירה של מסננים על חוטים, איור 4.11.

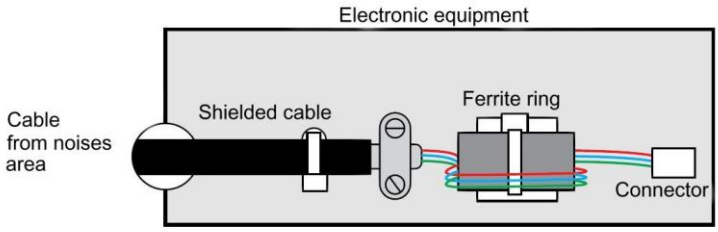


איור 4.11

מבנה המסננים מפריט להתקנה מהירה ונוחה על חוטים

בממסרי הגנות אפשר להשתמש במסננים כאלה בכל מקום: בשרשראות ההזנה, בשרשראות העברת אותות לוגיים, בשרשראות משנה של שנאי הזרם והמתח, איור 4.12.

מסננים על בסיס פריט מיוצרים על ידי חברות רבות, טבלה 4.1.



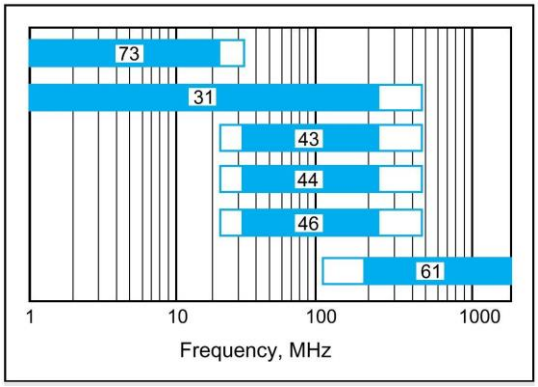
איור 4.12

התקנת המסנן המבוסס על טבעת פריט על כבל הבקרה הנכנס אל תוך הממסרים

טבלה 1 . מאפייני תדר של מסננים על בסיס פריט המיוצרים על ידי חברות רבות

שם החברה	מנעד התדרים של המסננים (מגה-הרץ)
Fire-Rite Products Corp.	1 – 1000
Ferrishield	30 – 2450
Ferroxcube	0.2 – 200
Murata	מיניאטוריים למעגלים מודפסים
NEC/Tokin	0.1 – 300
Parker Chomerics	30 – 200
Laird	30 – 2000
TDK	10 –500
Leader Tech, Inc	1 – 2450
Wurth Elektronik	מיניאטוריים למעגלים מודפסים

מנעדי תדר בטבלה 4.1 אינם מתייחסים לסוג מסוים של מסנן, אלא מצביעים רק על טווח התדרים, שבתוכו פועלת חברה זו או אחרת. במציאות, מנעדי תדר של סוגים קונקרטיים של מסננים צרים הרבה יותר מאשר אלה שמצוינים בטבלה 4.1. כמשל, איור 4.13 מתאר מנעדי תדר של חומרים מסוגים שונים, שבהם משתמשים לייצור רכיבי פריט בחברה Fire-Rite Products Corp. .



איור 4.13

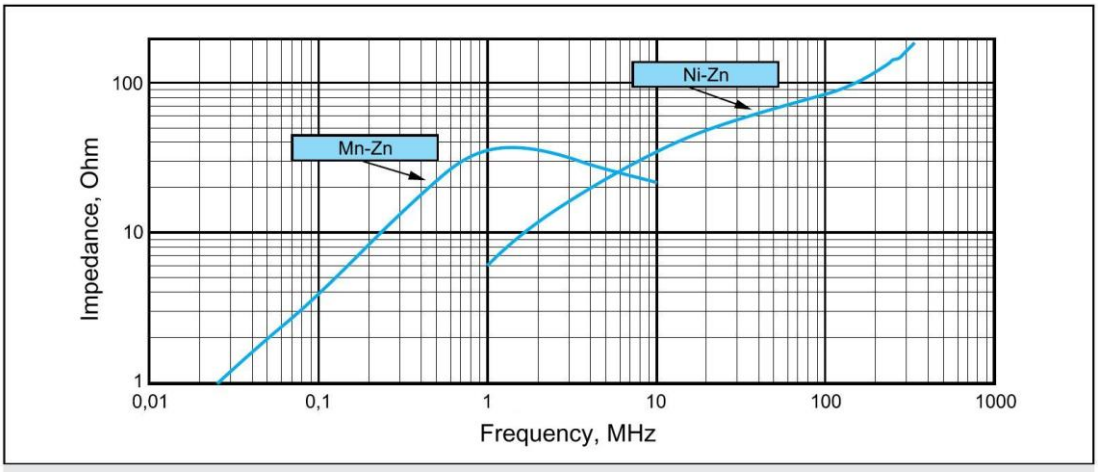
מנעדי תדר של סוגי חומרים שונים (מסומנים במספרים), שבהם משתמשים לייצור רכיבי פריט בחברת Fire-Rite Products Corp.

למרות הפשטות הנראית לעין והעלות הנמוכה (1-10 דולר ארה"ב), מסנני פריט אינם כה פשוטים כפי שזה עליו להראות. יעילותם תלויה בגורמים רבים ומרובים: סוג החומר, תדירות פעימת זרם שאותה צריך להחליש, מימדים גיאומטריים של רכיב פריט, מספר סלילי החוט העובר דרכו, נתון המרכיב הקבוע של הזרם הזורם בחוט, טמפרטורה, ועוד.

תכונות התדירות של המסנן תלויות בכמה מאפיינים, בראש ובראשונה, בסוג החומר של רכיב פריט. בעבור המנעד מ-0.1 עד 2 מגה הרץ בדרך כלל משתמשים בפריט Mn-Zn (מנגן-אבץ) בעל חדירות מגנטית $\mu = 600 - 20.000$, ובעבור המנעד 1 מגה הרץ – 2.45 ג'יגה-הרץ – פריט Ni-Zn (ניקל-אבץ) בעל חדירות מגנטית $\mu = 15 - 2000$. בתהליך היצור משתמשים גם בתערובות שונות של פריט.

מלבד מאפייני תדר, הנתון החשוב בעבור המסנן המבוסס על רכיבי פריט הוא התנגדותו המלאה אשר ממנה תלויה רמת החלשתה של ההפרעה.

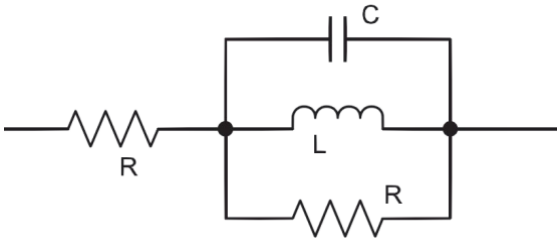
ההתנגדות המלאה של המסנן המבוסס על רכיב פריט תלויה במידה רבה גם בסוג החומר שבו משתמשים, ובתדירות העבודה, איור 4.14.



איור 4.14

תלות ההתנגדות המלאה של המסנן על בסיס רכיב פריט בסוג החומר ובתדירות

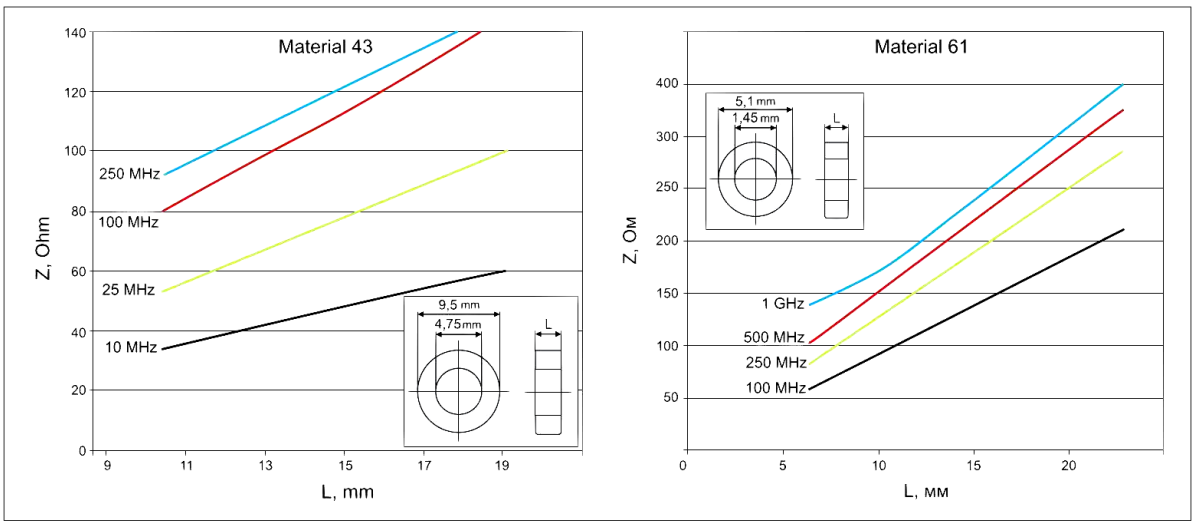
מפני שלמסננים על בסיס רכיב פריט יש אינדוקטיביות, קיבולת, והתנגדות אקטיבית, איור 4.15, מתברר שמאפייני התדר וההתנגדות המלאה של המסנן תלויים גם במימדיו הגאומטריים של רכיב פריט, בין היתר, באורכו, איור 4.16.



איור 4.15

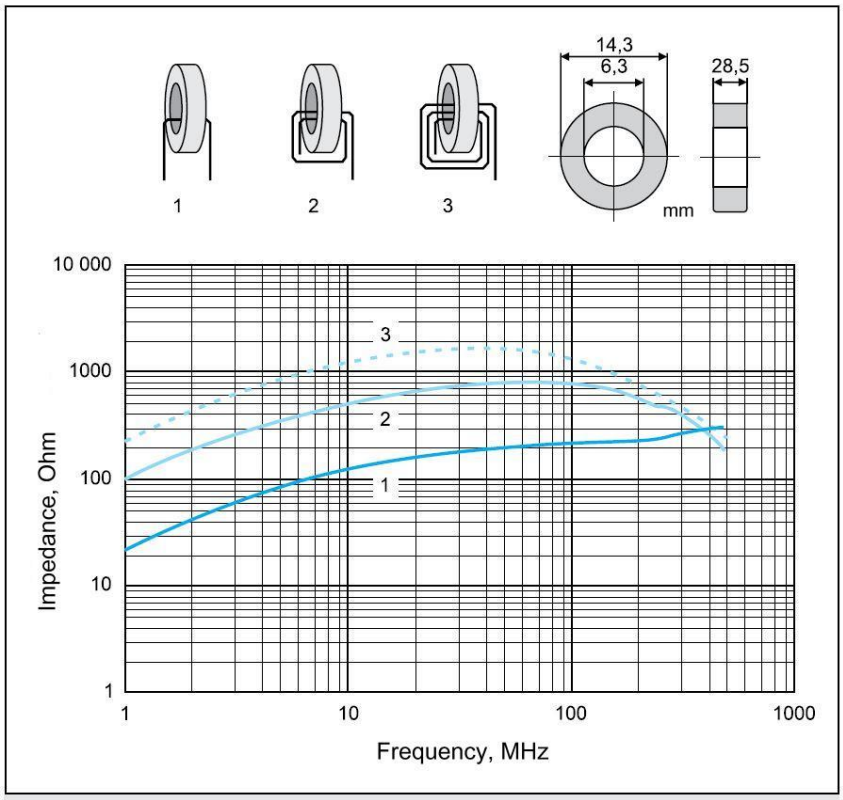
תרשים ההחלפה של המסננים על בסיס רכיב פריט

כפי שאפשר לראות מאיור 4.16, למסנני רכיב פריט שאורכם גדול יותר ישנן גם התנגדות מלאה גדולה יותר, כששאר המאפיינים זהים, והדבר נובע מהתנגדותם הגדולה יותר של המסננים בעלי רכיבי פריט ארוכים יותר.



איור 4.16

תלות ההתנגדות המלאה Z של המסנן באורך L של רכיבי פריט העשויים משני סוגי החומרים (43 ו-61) של חברת Fire-Rite Products Corp.

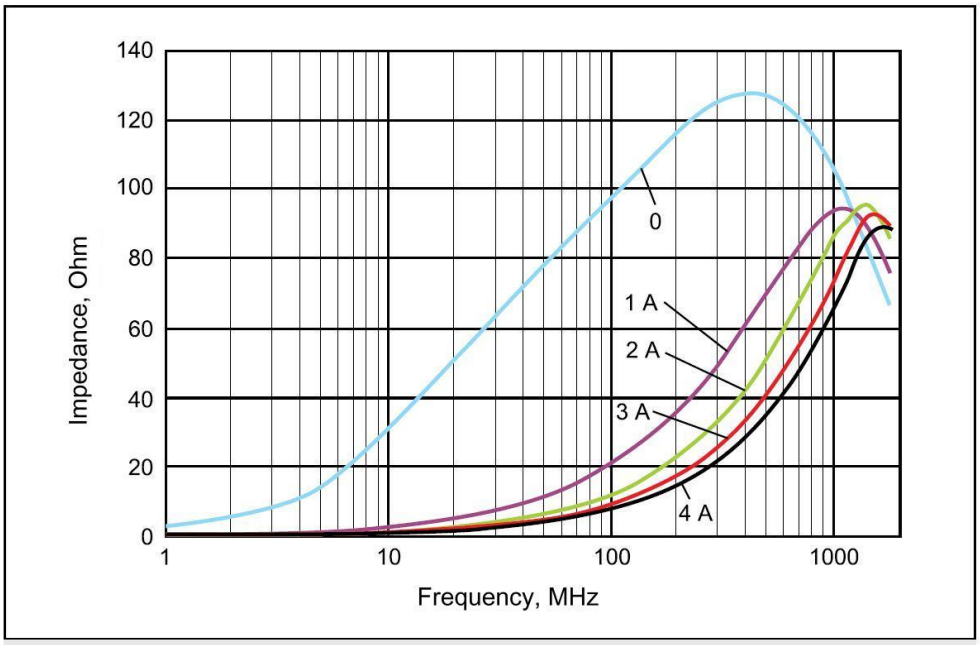


איור 4.17

תלות טיפוסית של התנגדותו המלאה של המסנן בכמות הליפופים (המסומנים במספרים 1-3), העוברים דרך רכיב פריט

התנגדותו המלאה של המסנן המבוסס על רכיבי פריט תלויה גם בכמות הסלילים של החוט העובר דרך רכיב פריט, איור 4.17. כפי שאפשר לראות באיור 4.17, ככל שתדירות ההפרעה גבוהה יותר, התנגדותו המלאה של המסנן בעל כמה סלילי החוט מתחילה לרדת מהר הרבה יותר, מאשר זו של המסנן בעל סליל אחד בלבד, וההסבר לכך הוא קיבולתו הגדולה יותר של המסנן בעל כמה סלילים. אם תדירות ההפרעה ממשיכה לגדול, מסננים בעלי כמה סלילים הופכים יעילים פחות ממסננים בעלי סליל אחד.

עוד תכונה לא נעימה של המסנן המבוסס על רכיבי פריט היא התלות של מאפייניו בזרם הקבוע הזורם דרכו, איור 4.18. ההשפעה הזאת מותנית בשינוי התכונות המגנטיות של רכיב פריט לנוכח הזרם הקבוע.



איור 4.18

השפעת הזרם הקבוע במסנן על מאפייניו

קיום אינדוקטיביות וקיבולת בתרשים החלפת המסנן (איור 4.15) מתנה את סכנת היווצרותה של התהודה (רזוננס) בתדרים מסוימים, כשבמקום החלשת אות ההפרעה, הוא יוגבר. זהי עוד תכונה לא נעימה של המסנן מן הסוג הזה.

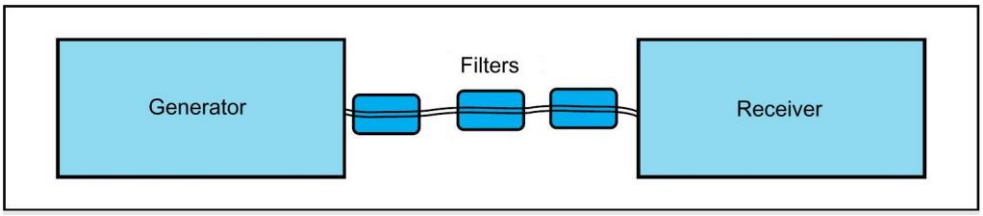
אז איך לבחור נכון את המסנן להגנה יעילה מפאפ"ג, כאשר ישנם גורמים רבים כל כך שמשפיעים על מאפייניו? הדבר אינו פשוט. במיוחד אם ניקח בחשבון את העדר התקנים המתארים את הליך מדידת המאפיינים של מסננים כאלה, ואת העובדה שיצרנים שונים משתמשים בשיטות שונות על מנת לבצע מדידות כאלה, והדבר הופך לכמעט בלתי אפשרי להשוות בין מאפייני המסננים המיוצרים על ידי יצרנים שונים.

בהתבסס על הניתוח שהבאנו מעלה, אפשר להמליץ על עקרונות בסיסיים הבאים לגבי בחירת המסנן המבוסס על רכיבי פריט:

1. התדרים הבינוניים (300-500 מגה הרץ), והתדרים הגבוהים (2 – 2.45 ג'יגה הרץ). שימוש בשלושה מסננים המותקנים בזה אחר זה על חוט אחד פותר גם את בעיית התהודה, כי לשלושת המסננים בעלי מאפיינים שונים יהיו גם תדרי תהודה שונים.

2. אפשר להשתמש בנתוני היצרנים רק לבחירה מקדימה של המסננים, ולאחר מכן צריך לערוך ניסוי יעילות מניעת ההפרעה באמצעות למניעה יעילה של הפרעת פעימה במנעד רחב ככל האפשר של תדרי השא"מ, צריך להשתמש לפחות בשלושה מסננים המותקנים זה אחר זה על חוט (כבל) אחד, העשויים מחומרים שונים, המבטיחים את הערכים המקסימאליים של התנגדות המסננים המלאה, הממוקמים באזור התדרים הנמוכים (0.1 מגה-הרץ), המסננים שנבחרו בכל מנעד התדרים והזרמים אשר בו מעוניין הצרכן.

3.



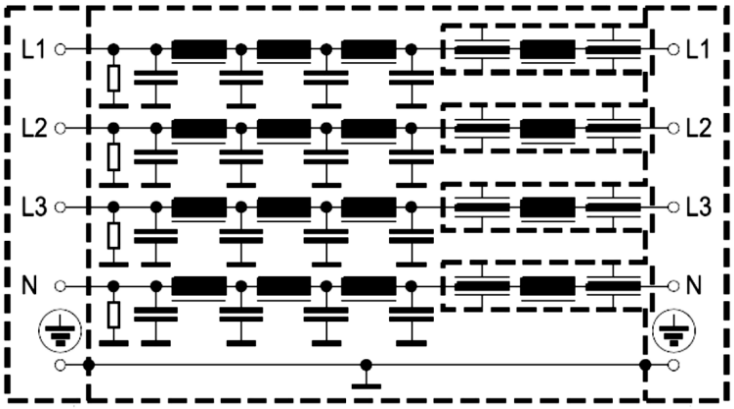
איור 4.19

מתקן לבדיקת יעילות המסננים על בסיס רכיבי פריט

ניסוי כזה יכול להתבצע במתקן שיש בו גנראטור ההפרעה בעל מאפיינים ממשיים (לפחות, מנעד תדרים ממשי) והתקן הקלט. הגנראטור מתחבר לכניסת התקן הקלט בעזרת כבל שעליו מותקנים המסננים, איור 4.19.

4.3.2 מסננים על בסיס חוליות LC

חברות רבות מייצרות גם מסננים מיוחדים על בסיס חוליות LC, איור 4.20, שדרכם מקיימים את הקשר בין הציוד האלקטרוני המוגן לבין המערכות וההתקנים החיצוניים.



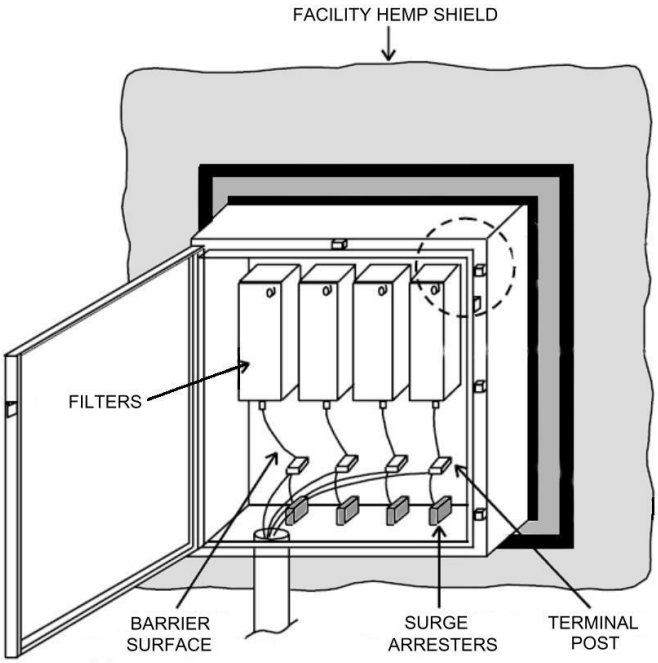
איור 4.20

תרשים טיפוסי של מסנן כוח של פאפ"ג המורכב מסט של חוליות C-L

השוק העכשווי של מסננים כאלה כולל עשרות סוגים המיוצרים על ידי חברות שונות: ETS-Lindgren, MPE, Meteolabor-EMP, European EMC Products Ltd., Captor Corp., LCR Electronics, API

Technologies, Astrodyne TDI Corp., Fi-Coil, EMI Solutions Pvt. Ltd, RFI Corp., ועוד. נדמה שאין שום בעיה, אם מישהו חפץ בהגנת ציודו מפני פאפ"ג. תרכיב את המסננים האלה ותישן בשקט! אך השאלה היא: האם באמת אפשר לישון בשקט אחרי הרכבת מסננים כאלה? כאשר אתה מנסה לבחור מסנן שיכול ביעילות לדכא את פאפ"ג, לפתע אתה נתקל בבעיה: כל החברות שפרטנו מעלה מפרסמות את המסננים שלהן בתור אמצעיים יעילים ביותר של הגנה מפני פאפ"ג, וטוענות שהמסננים האלה תואמים לתקן הצבאי MIL-STD-188-125 [4.6], אך באותו זמן הן מצביעות על הפרמטרים של פעימות הניסוי שאליהן נחשפו המסננים, והפרמטרים האלה שונים מאלה המופיעים בתקן הזה. למשל, התקן מדבר על מבחן באמצעות פעימות זרם 20/500 ננושניות באמפליטודה מסוימת, בעומס של 60 אום, בעוד שהמסננים נבדקים על ידי היצרנים באמצעות הפעימות של 8/20 מיקרו-שניות בעומס של 1 אום. למה? מכיוון שפעימת 8/20 היא פעימה סטנדרטית שאותה יוצר כל סוג של ציוד ניסוי המיועד למבחן העמידות למכת ברק, כאשר לניסוי בפעימות זרם של 20/500 ננו שניות בעומס של 60 אום דרוש ציוד מיוחד ויקר מאוד שאינו עומד לרשותם של יצרני המסננים. על הבעיה הזאת מדובר ב [4.7].

עוד דבר מוזר הוא העובדה שתקן MIL-STD-188-125 מדבר על מבחן האתר באמצעות פעימות זרם בשתי מתכונות: בעת זרימת הזרם בין כל הכניסות המאוחדות יחד לבין האדמה (common mode) ובין כל כניסה בנפרד לבין האדמה (wire-to-ground mode).



<u>איור 4.21</u>

התקן תיבת הקלט לחיבור כבל חיצוני לאתר המוגן מפני פאפ"ג (לפי התקן MIL-STD-188-125)

ואולם, בעת פיצוץ גרעיני בגובה, פעימת מתח גבוה עלולה לחול לא רק בין כניסות הציוד לבין האדמה (המתכונת הזאת מכונה בתקנים אחרים "common mode"), אך גם בין הכניסות השונות של הציוד המבודד מהאדמה ("differential mode").

התקן MIL-STD-188-125 אינו מדבר על ניסויים כאלה, אך תקנים אחרים כן מדברים עליהם. לאור העובדה הזאת, ישנן חברות שמפרסמות את המסננים שלהן בתור מסנני פאפ"ג, אך במציאות אינן מציידות אותם כלל ברכיבים המגבילים את מתחי הפעימה, כשהן מצטטות את התקן MIL-STD-188-125, אך טוענות שמפני שהמסננים שלהם עברו מבחן בפעימת זרם באמפליטודה של כמה אלפי אמפר ונמצאו תואמים לתקן MIL-STD-188-125, משמעות הדבר היא שהם מבטיחים הגנה מלאה מפאפ"ג. ובאמת, התקן הזה מציג את מגבילי מתחי הפעימה בתור רכיבים עצמאים לחלוטין שאין להם קשר למסננים, איור 4.21.

עם גישה זו, המסננים באמת לא חייבים להגן מפני מתח יתר בכניסות. השאלה היא: האם אפשר לטעון עם הגישה הזאת כי המסננים האלה מספקים הגנה מלאה מפני פאפ"ג? כנראה, מפני שהם מבינים את הבעיה, יצרנים רבים מציידים את המסננים שלהם ברכיבי הגנה מפני נחשולי מתח, המותקנים בכניסות. לדעתם, כעת אפשר בביטחון לכנות מסננים כאלה מסנני הגנה מפני פאפ"ג.

עם זאת, בבחינה מדוקדקת יותר של מרכיבי ההגנה שבהם משתמשים במסננים האלה, מתעוררים ספקות רציניים באשר ליעילותם. מגבילי מתח הנפוצים והזולים ביותר שבהם משתמשים במסננים, אלה הם מדכאי מתח העובדים על הגז ונגדי מתח תלויים, איור 4.22. כידוע, אלה הם רכיבים יחסית "איטיים", המתמודדים היטב עם דיכוי פעימות סטנדרטיות של 8/20 מיקרו-שניות, אבל אינם מספיקים לפעול כאשר הם נחשפים לפעימה קצרה במתח גבוה E1 של פאפ"ג, עם הפרמטרים של 2/25 ננו-שניות [4.8] (או 5/50 ננו-שניות על פי [4.9]). הצרכן שקרא כי המסנן שבו הוא בחר נועד להגן מפני פאפ"ג ונבחן בפעימות זרם של 8/20 מיקרו-שניות, בתאום מלא לתקן צבאיMIL-STD-188-125, לא יחפש תקן זה כדי לבדוק אם מדובר בפעימה הנכונה.

<u>איור 4.22</u>

מסננים של חברת MPE עם רכיבי הגנה בכניסה, שבתור הרכיבים האלה משתמשים בנגדי מתח (VDR) ומדכאי נחשולי מתח חולף העובדים על גז (GDT)

ואולם, מוקדם מדי להאשים את היצרנים. ב [4.10] נקבע במפורש כי הנגדים הלא מספיק מהירים שמותקנים במסננים, ומדכאי נחשולי מתח הפועלים על גז איטיים אף יותר, אינם מיועדים כלל להגנה מפני פאפ"ג, ואלה הם אלמנטים של הגנה מפני ברקים ומתחי קומוטציה. המצב הוא כזה: במסננים להגנה מפני פאפ"ג משתמשים במגבילי מתח שנועדו להגן מפני... ברק, לא מפני פאפ"ג! עם זאת, כמה סוגים של מסננים מתוצרת חברת MPE בעלי נגדי מגן מכונים באלוני הפרסום מסננים שנעשו במיוחד כדי להגן מפני הרכיב E1.

ואולם, ניתוח קפדני של מאפייני המסננים האלה מלמד על כך שאינם שונים, מלבד השם שבכותרת, משאר המסננים המיוצרים בחברה הזאת, כלומר, הם מוגנים ממכת ברק אך לא מרכיב E1 של פאפ"ג. במקרה ההפוך, יהיה צורך להודות שמאפייני מכת ברק אינם שונים ממאפייני הרכיב E1, והדבר כלל אינו משקף את המציאות.

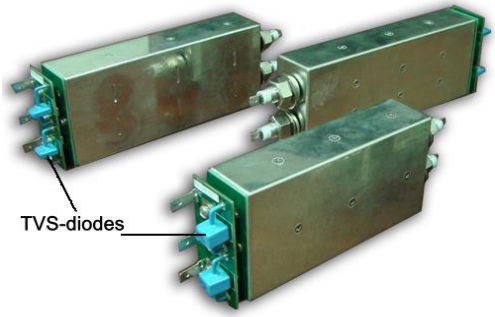
בדיון עם נציג חברת MPE לגבי השימוש בנגדי מתח במסננים המיועדים להגנה מפני פאפ"ג, הוצגה טענה חדשה אחת. נציג החברה הודיע שלמרות העובדה שהנגד עצמו אינו רכיב מהיר במיוחד, בחיבור עם רכיבי LC של המסנן יעילותו הופכת למספיקה כדי להגן מפני הרכיב E1 של פאפ"ג. בדיקת הטענה הזאת של החברה מלמדת שגם זו אינה מדויקת. במספר פרסומים בסוגיה [4.11-4.12] נטען שהחיבור לרכיב ההגנה של מוליכים חיצוניים, קצרים ככל שיהיו, בעלי אינדוקטיביות קטנה מאוד, מוריד את מהירות פעילותו. מתברר שזמן התגובה של רכיב ההגנה לפעימת מתח שחלה עליו תלויה במידה רבה ממבנה גופו של הרכיב הזה ומהצורה (אורך) של יציאותיו [4.11-4.12]. יתר על כן, ב [4.12] נטען שהמבנה והאורך של היציאות החיצוניות הם שקובעים את זמן התגובה של רכיב ההגנה. יצרני רכיבי הגנה יודעים זאת היטב, לכן, לעתים קרובות, באלוני הפרסום שלהם הם מציינים את זמן התגובה לא של הרכיב שהורכב במלאו בתוך הגוף עם היציאות, אלא של החומר שממנו עשוי הרכיב הזה [4.12]. עם זאת, היצרנים עובדים על שיפור מבנה היציאות ברכיבי הגנה, ובהצלחה [4.13].

מן האמור לעיל מתברר כי כדי לקבל נתונים אובייקטיביים על המהירות של סוג מסוים של רכיב הגנה חייבים לעשות בדיקה עצמאית של המוצרים המוכנים המוצעים בשוק, אם כי כמה נתונים עקיפים של תוצאות בדיקות כאלה [4.14] מאפשרים לעשות הערכה השוואתית ראשונית. לדוגמא, על פי [4.14], ההתנגדות הדינאמית וזמן התגובה של רכיב ההגנה על בסיס דיודת המפולת (דיודה TVS) הם כמעט פי 10 פחות מאשר אלה של נגד מתח. אנחנו לא ערכנו מחקר עצמאי לגבי המהירות של הדיודות והנגדים האלה על מנת לאשר או להפריך את הממצאים הללו, עם זאת, העובדה כי להגנת הציוד האלקטרוני ממטענים אלקטרוסטאטיים במתח גבוה (במנעד של ננו-שנייה, הקרוב ביותר מבחינת מאפיין הזמן פאפ"ג) משתמשים ברכיבי הגנה על בסיס דיודות מפולת, ולא על בסיס נגדי מתח, מדברת בעד עצמה.

דיודות מפולת עוצמתיות ביותר (עם זרם פעימה עד 10 קילואמפר, והמתח הנותר של 200-500 וולט) מיוצרות בידי החברה .Bourns, Inc.

במגבילי מתח פעימה כאלה מצוידים מסנני החברה .Captor Corp, איור 4.23, ובהם מומלץ להשתמש בתעשיית החשמל.

בעיה נוספת הקשורה לשימוש ברכיבי הגנה מפני מתחי פעימה היא הליך הפעלתם של הרכיבים האלה שאומץ ברוב המסננים, איור. 4.20, ושבו כל אחד מהרכיבים האלה מופעל בין קלט לבין הגוף המוארק של המסנן. בעת הפעלה כזאת יוצא שבין שתי כניסות המסנן מופעלים שני רכיבים המחוברים זה אחר זה, והדבר יוצר מתח שיורים כפול אשר עשוי לסכן את המעגל האלקטרוני המוגן.

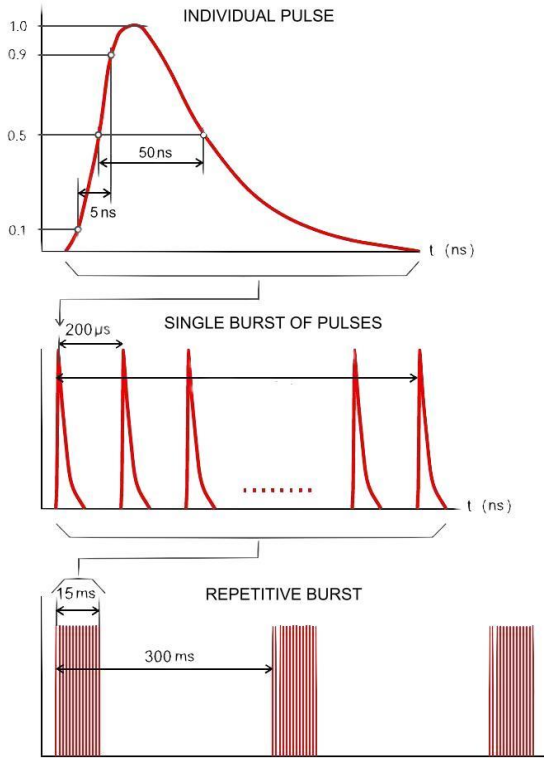


<u>איור 4.23</u>

מסנני פאפ"ג של חברת .Captor Corp, המצוידים במגבילי אמפליטודת מתח פעימה

רבי עוצמה ומהירים המבוססים על דיודות TVS

דרישות טכניות לעמידות הציוד למתחים כאלה ושיטות ניסויו מתוארות בתקני IEC 61000-4-4 [4.9] ו IEC 61000-4-25 [4.15]. כשמדובר בפעימה ניסיונית של מתח כזה, הכוונה היא למה שמכונה Electrical Fast Transient (EFT) – פעימה מהירה שמאפייניה ושיטות ניסויה מתוארים בתקן IEC 61000-4-4, איור 4.24. שיטת בחירת המאפיינים של פעימות ניסיוניות על בסיס התקנים האלה בעבור הדוגמא המסוימת – התקן ממסרי הגנה על בסיס מיקרו מעבדים, מתוארת ב [4.16], ובעבורה אמפליטודת מתח פעימה EFT היא 8 קילו-וולט.

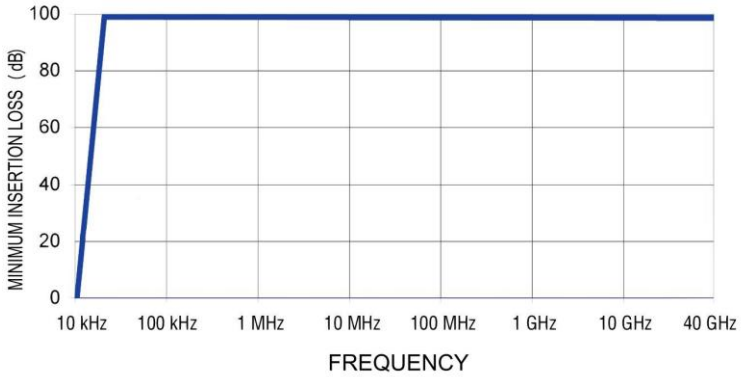


<u>איור 4.24</u>

Electrical Fast Transient (EFT) -פעימה מהירה (IEC 61000-4-4)

לדעתנו, ניסויים כאלה חייבים לחול על המסננים בעלי רכיבי הגנה מפני מתחי פעימה, המיועדים להגנה מפני פאפ"ג, בנוסף לניסויים הדרושים במסגרת התקן MIL-STD-188-125, תוך החלת מתחים ניסויים בין כניסות לאדמה, וכן בין כניסות שונות.

בעיה נוספת קשורה למאפיין אמפליטודת התדר של המסננים. מאפיין סטנדרטי של מסנן באיכות גבוהה המיועד להגנה מפני פאפ"ג מוצגת באיור 4.25. איך קשורים מאפייניהם של המסננים האמיתיים למאפיין סטנדרטי זה?



<u>איור 4.25</u>

מאפיין סטנדרטי של אמפליטודת תדר במסנני פאפ"ג באיכות גבוהה.

חברות אחדות (למשל, Meteolabor) אינן מציינות כלל במפרט הטכני של כמה מהמסננים שהן מייצרות את הנתונים הנוגעים למנעד התדר ולדיכוי. אחרות (למשל, MPE) מביאות במפרט הטכני את המאפיין הסטנדרטי שחייב לחול במסננים לפי התקן MIL-STD-188-125 (מנעד התדר 14 קילו הרץ – 40 ג'יגה הרץ, דיכוי בכלל המנעד – 100 דציבל) ובהמשך מביאות את המאפיינים הממשיים של המסננים שהן מייצרות עם הפרמטרים: 10 קילוהרץ – 1 ג'יגה הרץ עם הדיכוי של 80 דציבל – למסנן באיכות רגילה, ומנעד תדר דומה, אך עם דיכוי של 100 דציבל – למסנן באיכות משופרת. והיכן נעלם מנעד התדר מ 1 ג'יגה הרץ עד 40 ג'יגה הרץ? עובדי החברה Astrodyne (LCR Electronics, Inc.) היו ערמומיים יותר. הם כתבו במפרט הטכני של המסננים שלהם שהם מבטיחים דיכוי ב- 100 דציבל במנעד תדרים של 14 קילו הרץ עד 10 ג'גה הרץ, ובהתאם לתקן MIL-STD-220 [4.17], אך במקרה של כיסוי ובידוד טובים של המסננים (קרא: מותקנים בתוך "כלוב פאראדי"), מנעד התדרים שלהם יכול להתרחב לערך הנדרש של 40 ג'יגה הרץ. הנה המצב: כדי שהמסנן יגן בצורה טובה מפני פאפ"ג, צריך קודם להגן על המסנן עצמו מפני פאפ"ג! כפי שנהוג לומר – הדבר מדבר בעד עצמו.

הקומיות של המצב משתקפת בטבלה 4.2, שבה מובאים להשוואה מאפייני תדר של המסננים המיוצרים בחברות המובילות: כל המסננים מיועדים לאותה המטרה, וכולם תואמים לתקן MIL-STD-188-125, ועם זאת, לכל המסננים האלה יש מאפיינים שונים בצורה משמעותית. איך זה יכול להיות?

ייחודיות נוספת של התהליך המקובל בהפעלת רכיבים פנימיים מסוימים של המסננים, בין כל כניסה לבין האדמה, היא לא רק מתח שיורים כפול ברכיבי ההגנה, כפי שהזכרנו קודם, אלא גם קיבולת כפולה ואינדוקטיביות כפולה,

החלה בין הכניסות, לעומת האינדוקטיביות והקיבולת בין כל כניסה לבין האדמה. מכך נובע שמאפייני תדר של המסננים בעבור הפעימה החלה בין הכניסות, לא יהיו זהים לאלה שיהיו בעבור הפעימה החלה בין הכניסה לאדמה.

טבלה 4.2 מאפייני תדר של המסננים המיוצרים בידי החברות המובילות

יצרן מסנני פאפ"ג	רוח התדר		דיכוי דציבל	הערות
	Min	Max		
LCR Electronics	14 kHz	1 GHz	100	-
MPE	10 kHz	1 GHz	80	למסנן הסטנדרטי
MPE	14 kHz	18 GHz	100	למסנן המשופר
Fi-Coil	14 kHz	1 GHz	100	-
Captor Corp.	14 kHz	10 GHz	100	-
ETS-Lindgren	14 kHz	40 GHz	100	-
MeteoLabor	200 kHz	1 GHz	80	למסנן מסוג PLP
MeteoLabor	-	-	-	למסנן מסוג USP

עד כמה יהיו המאפיינים האלה שימושיים כשמדובר בהגנה מפני פאפ"ג?

ואיזה צרכן "יחפור" עמוק כל כך? למה שלא יאמין לטענות החברה היצרנית על היעילות הגבוהה של תוצרתה? ואפילו אם הוא לא יאמין, הוא לא יוכל, ברוב המקרים, לבדוק בכוחות עצמו את היעילות האמיתית של "עבודת" המסנן הזה. ברור וגלוי מה תהייה יעילות ההגנה של ציודו החשוב על ידי המסנן, כשבמקרה החרום המסנן הזה לא יהיה מסוגל להגן על הציוד הזה מפני פאפ"ג.

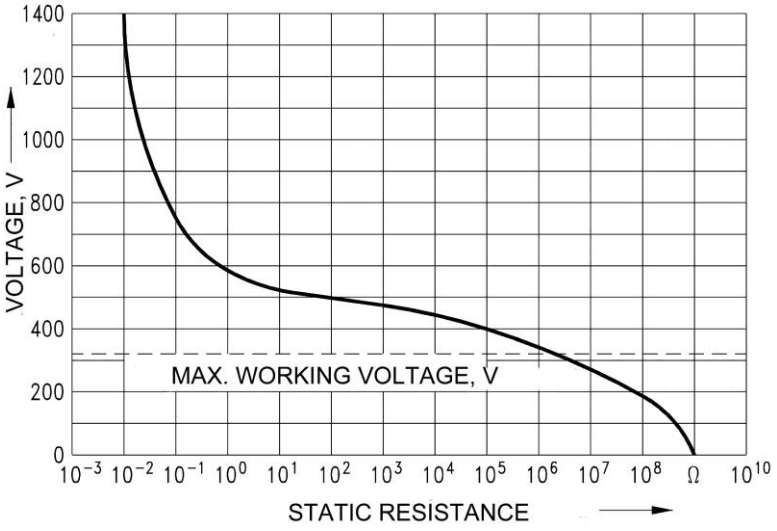
היום המצב הוא כזה שכל יצרן מחליט אם לכלול או לא לכלול את מגבילי המתח בתוך המסנן; אם להשתמש או לא להשתמש ברכיבים זולים אך לא מתאימים לפי מאפייניהם; אם לנסות את המסננים במבחן סטנדרטי של פעימת "ברק", או של הפעימה עם הפרמטרים שנקבעו בתקן צבאי, אם להזכיר או לא להזכיר את מנעד התדרים, לעשות שימוש במנעד התדרים המפורט בתקן MIL-STD-188-125 או בתקן MIL-STD-220 [4.17], ואולי אפילו לציין את מנעד התדרים משלהם, ובו בזמן לתת קישור לתקן הצבאי הנודע. בכל מקרה, איש לא יבדוק!

המצב הזה הוא תוצאה של העדר תקן מיוחד שבו ינוסחו הדרישות למבנה ולמאפיינים של מסנני פאפ"ג, לשיטות הניסוי שלהם, לקריטריונים של איכות עבודתם. המצב הזה, לדעתנו, הוא בלתי מקובל, בהתחשב בחשיבות הבעיה, והוא דורש תיקון מיידי.

1.1 מפרצים

השיטה היעילה למאבק נגד נחשולי מתח מכוונים בכניסות הציוד האלקטרוני ובתפסי ההזנה שלו היא השימוש הנרחב ברכיבים באלי מאפיינים לא ליניאריים: מדכאי מתח העובדים על הגז, נגדי מתח, רכיבים מוליכים למחצה

המבוססים על וסת מתח חשמלי, ועוד, המופעלים במקביל למכשור המוגן (למשל, במקביל לכניסתו של ממסר ההגנה) ובין כל תפס של המכשור הזה לבין האדמה. נגדים בעלי מאפיינים לא ליניאריים העשויים מאבקה דחוסה של תחמוצת אבץ ZnO (לעתים רחוקות יותר – מצורן קרביד, בריום טיטנט, וחומרים אחרים) נחשבים כיום לרכיבים בעלי המאפיינים הטובים ביותר. אלה הם נגדי מתח הנפוצים ביותר. הם מיוצרים כיום בכמויות ענקיות: בלי תיבות, בתוך תיבות מסוגים שונים, לעתים קרובות הם מצוידים ברכיבי עזר שונים ומגוונים (מרעומים, דגלי סימון וכו'). צריך לבחור נכון את הנגדים. לצערנו, לעתים קרובות נוצר מצב שבו הנגדים, אפילו בציוד של החברות המובילות בעולם, נבחרו בצורה שגויה, וכתוצאה מכך אינם ממלאים שום תפקיד הגנתי.



<u>איור 4.26</u>

דיאגראמת מתח סטנדרטית של נגד ZnO

מפני שדיאגראמת מתח של נגד רחוקה מלהיות מושלמת, איור 4.26, לבחור נכון את הנגד אינה משימה פשוטה. מצד אחד, נגד לא צריך להעביר דרכו זרם חשמלי העולה על 1 מיליאמפר (ערך סטנדרטי לנגדים מודרניים) במתח עבודה מקסימאלי (אחרת הוא יתחמם ויישרף), מצד שני, לאחר הפעלתו, מתח שיורים עליו (clamping voltage) צריך להיות קטן בצורה משמעותית מהמתח שבו מסוגלים לעמוד המרכיבים האלקטרוניים של הציוד המוגן (אחרת, לא הנגד יגן על המרכיבים האלקטרוניים, אלא המרכיבים האלה "יגנו" על הנגד).

בגלל אי-שלמותה של דיאגראמת מתח של הנגדים, כדי למלא אחר התנאים האלה, המתח המקסימאלי שבו עומדים המרכיבים האלקטרוניים המיועדים לעבודה ברשת של 220 וולט, צריך להיות לא פחות מ-1000 וולט. עם זאת, ראשית כל, המרכיבים האלקטרוניים המיועדים למתח כה גבוה יקרים בהרבה מהמרכיבים המיועדים למתח נמוך, ושנית, המאפיינים האחרים שלהם טובים פחות. למשל, לטרנזיסטורים למתח של 1000-1200 וולט יש מקדם כוח קטן יותר וצניחת מתח במצב פתוח גדולה יותר, מאשר לטרנזיסטורים למתח 400-500 וולט. לכן, לעתים קרובות אפשר לראות, למשל, במקורות הזנה של ממסרי הגנות ושל רשמי חרום, וכמו כן בציוד אלקטרוני אחר של החברות המובילות בעולם, את הטרנזיסטורים שעומדים במתח מקסימאלי של 500 וולט, ברשת של 220-250 וולט. להבטיח הגנת המרכיבים האלקטרוניים בידי הנגדים על רקע היחס הזה בין מתח העבודה לבין המתח המקסימאלי הנסבל זהי משימה בלתי אפשרית.

איור 4.27

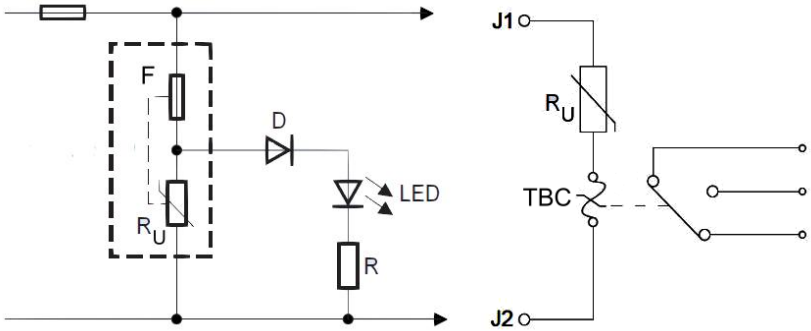
מפרצים הספק גבוה מסוגים שונים עם מתח נומינלי 130-1100 וולט וזרם מ 3 עד 100 קילו אמפר

מפרצים עשויי תחמוצת מתכתית הם רבי עוצמה, איור 4.27, והם מיוצרים בתיבות פלסטיק מיוחדות המיועדות להרכבה על פס DIN סטנדרטי בתוך ארונות הרכבה, איור 4.28.

איור 4.28

התקני הגנה רבי עוצמה המבוססים על מפרצים מתחמוצת מתכתית מתוצרת החברה Square D (Schneider Electric), המיועדים להרכבה על פס DIN סטנדרטי

לצערנו, מרכיבים מעולים שכאלה אינם מהירים דיים (למטרת ההגנה מפני פאפ"ג). המאפיינים שלהם מתדרדרים בגלל ההשפעה החוזרת של עומסי פעימה רבי עוצמה.



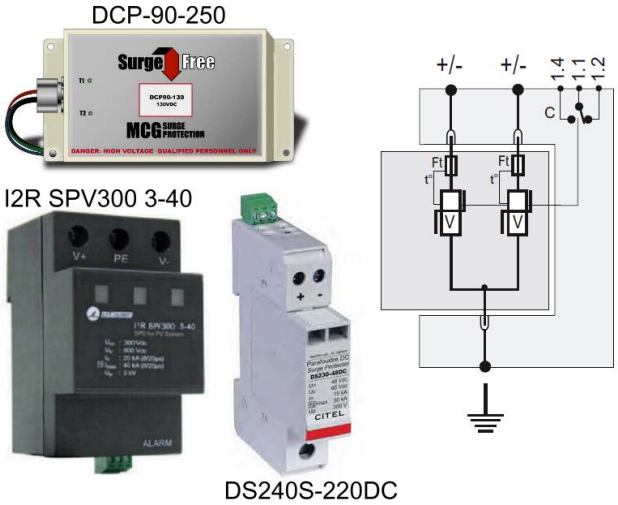
a) b)

איור 4.29

תרשימי הפעלה של מפרצים עם פתיל F (a); ועם מגע תרמו-מתכתי TBC (b)

בתוך כך, גובר זרם הזליגה דרך מפרץ במתח רגיל, המפרץ מתחיל להתחמם ורמת התנגדותו יורדת, כשהזרם גובר, עד כדי שריפתו. לפעמים הדבר מסתיים בקצר ברשת ההזנה, על כל ההשלכות שבכך. משום כך, בזמן האחרון אפשר למצוא בשוק נגדים בעלי פתילים מובנים המחוברים בזה אחר זה עם המפרץ. בעת הגברה פתאומית בזרם העובר דרך המפרץ, הפתיל נשרף ומדליק את נורת ההזהרה, איור 4.29 a. לעתים, במקום פתיל רגיל משתמשים במגע תרמו-מתכתי המותקן על המפרץ ומופעל בעת עליית הטמפרטורה שלו, איור 4.29 b. את המגע אפשר לצרף לשרשרת האזעקה המתריעה על הצורך להחליף את הנגד.

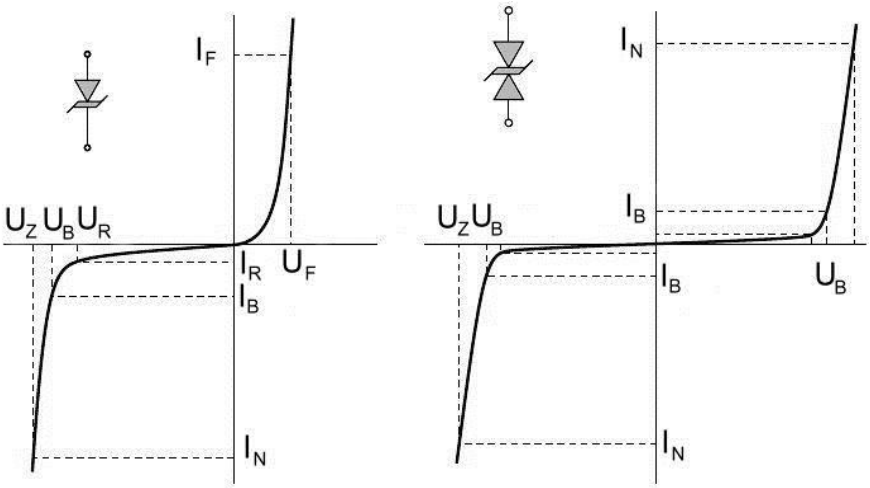
להגנת רשתות זרם ישר – ובתחנות משנה ותחנות כוח אלה הן רשתות מסועפות וארוכות של הזנה אופרטיבית - משתמשים בהתקנים מיוחדים על המפרצים.



איור 4.30

התקני מגן על המפרצים לרשתות זרם ישר עם מתח נומינלי 220 וולט

להתקנים האלה בדרך כלל שנים או שלושה מפרצים המצוידים במגע תרמו-מתכתי, והמבטיחים הגנה מפני נחשולי מתח בין "+" ל"-", ובין "+" ל"אדמה", בין "-" ל"אדמה", איור 4.30. ההתקנים האלה מבטיחים זרימת זרם פריקה בגבולות 40-200 קילואמפר ויותר.



איור 4.31

מאפייני מתח של מדכאי דיודה חד-כיווניים (לזרם קבוע) ודו-כיווניים (לזרם משתנה)

החיסרון הנ"ל של המפרצים – העדר מהירות מספקת להגנה מפני פאפ"ג – אינו קיים במפרצים מהירים מצורן, הבנויים על בסיס דיודות Transient Voltage Suppressor Diodes או TVS Diodes , שפעולתם מבוססת על שינוי התנגדות חד מרמה יחסית גבוהה לכמעט אפסית, בעת העברה על מתח הסף החל עליהם, איור 4.31.

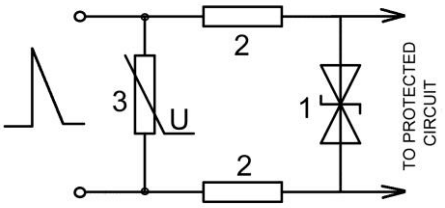
נוסף על כך, להבדיל מנגדים, מאפייניהם של מגבילי המתח האלה על בסיס דיודות TVS , לאחר השפעה חוזרת של מתח גבוה ושל שינוי מצב פעולה, אינם מתדרדרים. עד לאחרונה, לרכיבי הגנה כאלה לא הייתה עוצמת פעימה מתפזרת מספקת, ולכן היה להם שימוש רק בשרשראות בעוצמה נמוכה של הציוד האלקטרוני. עם זאת, בזמן האחרון הגיעו לשוק גם מדכאים רבי-עוצמה, איור 4.32. לדוגמא, החברה הידועה Littelfuse, המתמחה בעיצוב וייצור של רכיבי הגנה מפני נחשולי מתח, השיקה ייצור של המדכאים בעלי עוצמת פעימה של עד 30 קילו-ואט ועומדים בזרימת זרמי פריקה עד כמה מאות אמפר. דיודות TVS של חברת UN Semiconductor מסוגלות להעביר פעימות זרם באמפליטודה של עד 3 קילו-אמפר ולעבוד בעת המתחים של עד 440 וולט. דיודות TVS בעלות עוצמה גדולה ביותר (זרם פעימה של עד 10 קילו אמפר, מתח שיורים של 200-500 וולט) מיוצרות על ידי החברה Bourns, Inc.

איור 4.32

TVS Diodes בעלי הספק גבוה

את מדכאי דיודה, בדומה למפרצים רגילים, אפשר לחבר במקביל על מנת להגביר את זרם הפריקה.

להגברת יעילות ההגנה מפני נחשולי מתח אפשר גם להשתמש בחיבור מקביל של כמה סוגים שונים של מגבילי מתח, כגון נגדים ומגבילים מוליכים למחצה, איור 4.33. להתקן היברידי שכזה יש מאפיינים מעולים.



איור 4.33

התקן הגנה היברידי: 1 – TVS-diode; 2 - נגדים מגבילי זרם; 3 – מפרץ - varistor

הראשון שמופעל בו זהו תמיד מדכא מהיר 1 המגיב על הפעימה עוצמתית ככל שתהיה והסופג חלק מאנרגיה שלה. את זרם הפריקה מגבילים נגדים 2, והדבר מונע את הריסתו של המדכא. נפילת מתח בנגדים 2 מעלה את המתח במפרץ 3, והדבר גורם לירידה חדה ברמת התנגדותו ולדלף הנגדים. החלק הנותר (והגדול) של האנרגיה נספג על ידי מפרץ - varistor.

התקנת מפרצים על פסי צבירה מערכות זרם ישר וחילופין, ודיודות TVS פחות עוצמתיות – בקרבה ישירה לכניסות המכשירים האלקטרוניים המוגנים, מספקת מערכת הגנה יעילה מאוד.

4.5. סיכוך כבלי פיקוד

שיטת המיגון העיקרית של כבלי פיקוד מפני מתחים מכוונים היא סיכוכם, וכמו כן, בחירת הדרך הנכונה להנחתם, תוך הרחקה מקסימאלית מכליא ברק ומכבלי כוח, וגם שימוש במגשי כבלים מיוחדים. ישנם כמה סוגים של מגשים כאלה: מגשי פלסטיק עם קטעים מאלומיניום, מגשי פלסטיק עם ציפוי מתכת, מגשי אלומיניום.

באופן כללי, יעילותו של מסך מתכת (כלומר, דרגת החלשתו של שדה אלקטרומגנטי) מותנית בשתי תכונותיו: ספיגת אנרגיה בעת מעבר גל אלקטרומגנטי דרך הסביבה המוליכה והחזרת הגל בגבול בין שתי הסביבות. שתי התופעות האלה תלויות מתדירות הגל האלקטרומגנטי וגם מחומר המסך. ספיגה מיטבית של אנרגיה אלקטרומגנטית מובטחת על ידי חומרים פרומגנטיים (ברזל, "פרמנדור" - קובלט-ברזל, "פרמלוי" - ניקל-ברזל), ואת ההחזרה המיטבית של הגל האלקטרומגנטי מבטיחים חומרים דיא מגנטיים (נחושת ואלומיניום). יעילות מאפייני הסיכוך של חומרים פרומגנטיים יורדת כשמתח השדה גדל עקב הזנתו, ויעילות מסכים דיא מגנטיים יורדת ככל שהתדירות גוברת עקב הגברת ההתנגדות. מכמה סיבות טכניות וכלכליות, הנפוצים ביותר הם המסכים בצורה של רשת נחושת, וגם אלה העשויים מאלומיניום.

מפני שעומק חדירת הגל האלקטרומגנטי לתוך המתכת תלוי ביחס הפוך מתדירות הגל הזה, ברור שככל שציפוי המתכת של הסיכוך עבה יותר, כך היא תהייה יעילה יותר בהחלשת שדה אלקטרומגנטי למנעד תדרים רחב יותר. למשל, אם לסיכוך יעיל בתדירות 500 קילוהרץ מספיק מסך נחושת בעובי של 0.6 מילימטרים, הרי שלתדירות תעשייתית של 50 הרץ דרוש מסך נחושת בעל עובי המחיצות של כ 6 סנטימטרים (למסך פרומגנטי מספיקה המחיצה בעובי 5 מילימטרים).

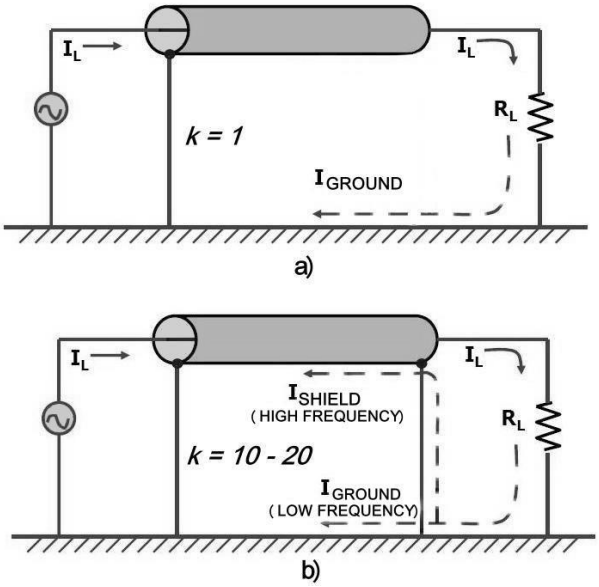
מהנאמר ברור, שאפקט הסיכוך הקטן ביותר הוא זה של מגשי פלסטיק עם ציפוי מתכתי שלהם שימוש נרחב בהנחת כבלי פיקוד. מבנה כזה מתחיל לעבוד ביעילות רק בתדירויות של 600 מגהרץ ויותר. בתדירויות הנמוכות מ 200 מגההרץ המבנה הזה אינו פועל כלל. למתחים החלים על כבלי פיקוד בתחנות משנה בדרך כלל יש תדירות נמוכה בהרבה מ 200 מגהרץ, לכן השימוש במגשי פלסטיק עם ציפוי אינו הגיוני כלל. עם זאת, מגשי אלומיניום וחיווט נחושת על הכבלים עודם מסוגלים להחליש מתחים מכוונים פי כמה וכמה, לכן עושים בהם שימוש נרחב.

את החלשת מתחים מירבית במנעד רחב של תדרים יכולה לספק הנחת כבלי פיקוד בתוך צינורות מים ממתכת.

לפעילותם היעילה של ציפויי הסיכוך חייבים להבטיח את זליגתו אל תוך האדמה של המתח המכוון אליהם. במקרה המושלם, הפוטנציאל לכל אורכו של הסיכוך צריך להיות שווה לפוטנציאל האדמה, לכן, לעתים, בשרשראות

האלקטרוניות הרגישות במיוחד של תדירות גבוהה משתמשים בארקה רב שלבית של סיכוך הכבל, כל 0.2 λ (λ - אורך הגל של שדה אלקטרומגנטי).

בעת הנחת הכבלים בתחנות המשנה אפשר להשתמש בפתרון נוסף: הנחתו במקביל לקו הכבל של צמיג נחושת ליישור הפוטנציאל, המוארק משני צידיו. אולם, מסיבות כלכליות, לעתים קרובות יותר משתמשים בארקה פשוטה של סיכוך מצד אחד או משני צדדים, איור 4.34.

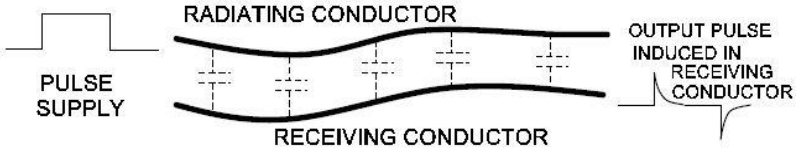


איור 4.34

פעילות הסיכוך המוארק מצד אחד ומשני צדדים

לעתים קרובות אנו שומעים מאנשי מקצוע בתחום ממסרי הגנות שלסיכוך כבלי פיקוד דרושההארקה רק מצד אחד. ככל הנראה, הדעה הזאת מסתמכת על שתי עובדות הידועות היטב לעובדים בתחום:הארקת שרשראות זרם רק מצד אחד, וכמו כן,הארקת סיכוכי כבלי כוח במתח גבוה מצד אחד. את שתי העובדות הידועות האלה לעתים מייחסים גם להלידהארקתם של סיכוכי כבלי פיקוד, מבלי להתחשב בכך שהארקה בשתי הדוגמאות האלה היא אמצעי להבטחת בטיחות חשמלית, ולא אמצעי להגנה מפני הפרעות.

במציאות,הארקת סיכוך כבל פיקוד רק בצד אחד תהייה יעילה רק נגד מתחי קיבולת, איור 4.35 (מה שמכונה הגנה אלקטרוסטאטית), אך אינה יעילה כלל (מקדם החלשת ההפרעה k=1) למתחים אינדוקטיביים, כי הסיכוך הזה אינו מספק שרשראות לסגירת זרם ההפרעה.

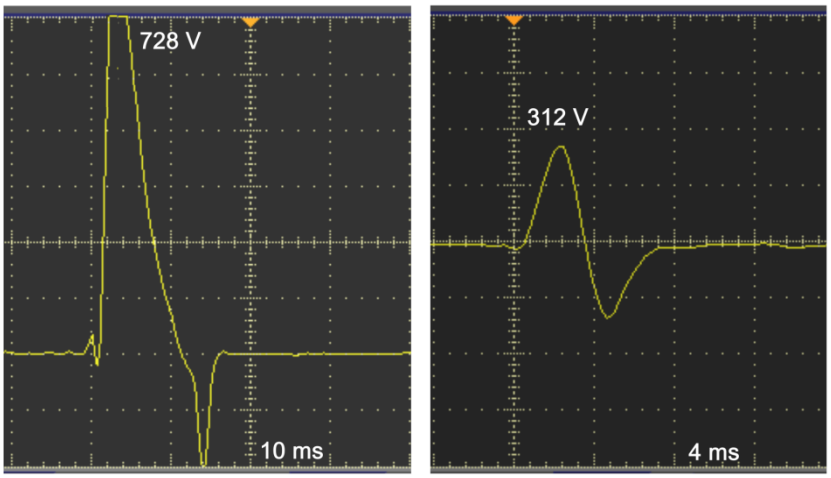


איור 4.35

מתח הפרעה דרך קשר קיבולת בין המוליכים

בעתהארקתו של הסיכוך משני צדדים, נוצרת שרשרת נוספת (מסך) בעלת אימפדנס (עכבה חשמלית) קטן בצורה משמעותית לאות בתדר גבוה, מאשר זה של האדמה. כתוצאה מכך, אות העבודה מתחלק לשני חלקים: אחד מהם (בתדר נמוך) חוזר דרך האדמה, כמו קודם, והשני (בתדר גבוה) – דרך סיכוך הכבל. כך שלרכיב בתדר גבוה הזרם בסיכוך שווה לזרם בעורק המרכזי, המכוון בכיוון הנגדי, ומה שמפצה עליו הוא הקשר האלקטרומגנטי בין הסיכוך לבין העורק המרכזי. כך מבטיחים את ההגנה מקרינה בתדרים גבוהים מהעורק המרכזי אל המרחב החיצוני (כלומר, אל הכבלים השוכנים בקרבתו) עם מקדם החלשת ההפרעה k=3-20 . המערך הזה פועל ביעילות בעת השפעה אלקטרומגנטית חיצונית על הסיכוך, כשהאות בתדר גבוה בסיכוך מוארק באדמה. כשמבצעים חיבור של סיכוך לצמיג האדמה, צריך לקחת בחשבון ששום "גלילים" של חוט החיבור על הסיכוך אינם מתקבלים על הדעת, כמו גם קיפול בטבעות של חוט החיבור הארוך שבין הסיכוך לצמיג האדמה. כל קיפול נוסף של החוט הזה מגביר את אימפדנס מערכת הארקה בתדרים גבוהים ומקטין בצורה חדה את יעילותה.

מקור רב עוצמה של הפרעות בתחנות משנה יכולים לפעמים להיות גורמים שכלל אינם מובנים מאליהם. לדוגמא, באחת מתחנות משנה ברוסיה נרשמו מקרים של ניתוקי שווא של אחד ממפסקי מתח גבוה בעת הפעלת פקודת ניתוק לסליל המפסק האחר. כבלי פקודה המחוברים לסלילי שני המתגים לא היו מסוככים, ועברו במגש משותף לאורך כ -25 מ '. ניסויים באוסצילוסקופ שנעשו בתחנת המשנה הזאת, איור. 4.36, הראו כי בסליל המפסק שנותק בטעות יכולות לחול פעימות במשרעת של 500 - 728 וולט במתח הפיקוד של 220 וולט המופנה לסליל המפסק השני.



<u>איור 4.36</u>

השפעת מתחים אינדוקטיביים של כבל פיקוד אחד על האחר:

משמאל - כבלים לא מסוככים; מימין - כבל מסוכך משני צדדים

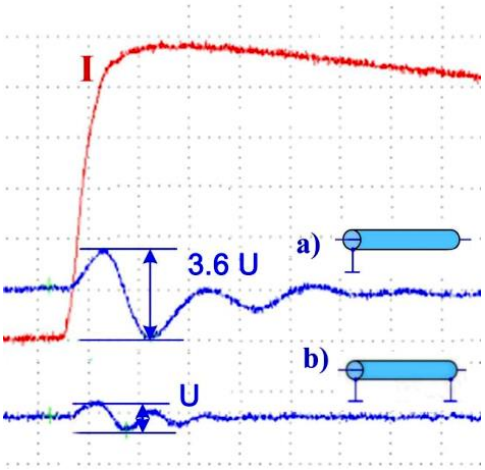
אורך הפעימה המכוונת הזאת לעתים יכול להיות כזה, שהוא גורם להפעלת שווא של המפסק. יצירתה של הפרעת פעימה כה עוצמתית במעגלי הפיקוד גורם הפתעה ואף רתיעה. אך הכל הופך לברור, אם נזכר בכך שסליל המפסק מצויד בליבה פרומגנטית ויש לה אינדוקטיביות די משמעותית, והמפסק מצויד במגע-מפסק החותך את הזרם בסליל הזה בעת הפעלתו של המפסק. כידוע, אנרגיה הנוצרת בעת קריעת מעגל זרם בעל אינדוקטיביות עלולה להיות די

משמעותית. לאחר הארקה משני צדדים של סיכוך כבל הפיקוד של אחד המפסקים, עוצמת הפעימה האינדוקטיבית של ההפרעה בכבל השני ירדה בצורה משמעותית, איור 4.36, ומקרים של הפעלת שווא של המפסק השני נפסקו כליל.

בעיה עם הארקה הדו-צדדית של הסיכוך עלולה להתעורר רק בעת הזרימה הקבועה דרך המוליך המרכזי של זרמים משתנים משמעותיים בגודלם (בדרך כלל, זרמים בתדירות תעשייתית) הגורמים לזרמים אינדוקטיביים משמעותיים בסיכוך ולחימומו. כתוצאה מכך, נאלצים להשתמש בחוטים בעלי חתך גדול יותר (כדי להקטין את רמת החימום של בידוד החוטים) או לעשותהארקה של אחד מקצוות הסיכוך דרך קבל. למעבה יש רמת התנגדות גבוהה יותר לזרמים בתדירות תעשייתית, והתנגדות קטנה מאוד להפרעה בתדר גבוה.

במקרים מסוימים יכול להיווצר מצב שבו זרם פעימה גדול יחסית יכול לזרום דרך הסיכוך המוארק משני צדדים, והדבר גורם למתח בעורק מרכזי. זה עלול לקרות למשל תחת השפעת הזרם המשמעותי מברק, הזורם ברכיבי מערכת הארקה הממוקמים בקרבת כבלי הפיקוד, או תחת השפעתו של הזרם מקצר בקרבת המקום, איור 4.37. כפי שמתואר ב [4.18], בעת זרימת זרם הברק בארקה של 100 קילו אמפר, אפילו כשסיכוך הכבל מוארק משני צדדים, מתח שיא בעורק מרכזי עלול להגיע ל 8.2 קילו וולט, וזה גבוה בהרבה מרמת הסיבולת של ממסרי הגנה על בסיס מיקרו מעבדים.

במקרים כאלה חייבים לשנות את תוואי הנחתם של כבלי הפיקוד (להרחיקם ממכשור מיתוג , מכליא ברק, מפרצים מתח גבוה), או, לחלופין, להקטין את הבדל הפוטנציאלים בין קצוות מוארקים של סיכוך הכבל בעת שזה נתון להשפעת הפרעת פעימה רבת עוצמה.



<u>איור 4.37</u>

המתח החל על כבלי הפיקוד עמהארקה חד-צדדית (a) ודו-צדדית (b)

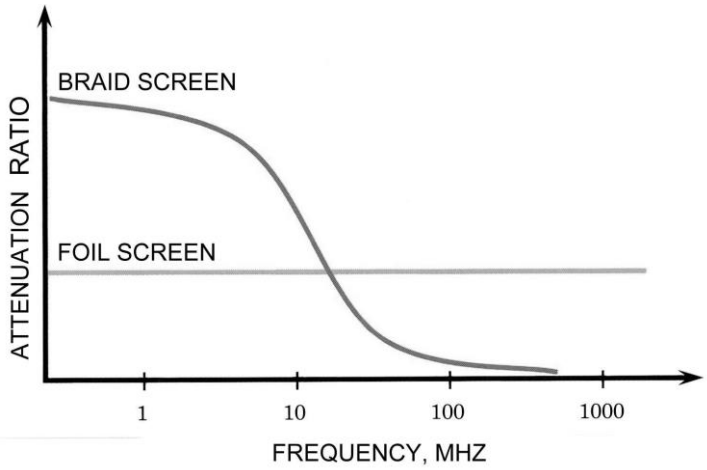
של הסיכוך בעת זרימת פעימת זרם (I) של ברק דרך הארקה

את זה אפשר לפתור באמצעות הנחתו, לאורך הכבלים, של צמיג נחושת המוארק משני צידיו, אשר נקרא "צמיג משוואת הפוטנציאלים". פעולתו מותנית בכך שאימפדנס פס הנחושת בתדרים גבוהים קטן בהרבה מאימפדנס האדמה (ואפילו מאימפדנס הסיכוך), לכן, החלק העיקרי של זרם בתדר גבוה מהפרעת הפעימה יזרום דרך הצמיג

הזה, ולא דרך הסיכוך. ברור שהצעדים האלה יהיו יעילים ביותר, אם ינוקטו בשלב התכנון והבנייה של תחנת משנה חדשה, ולא בעת "חסימת החורים" בתחנת משנה ישנה.

כבלי פיקוד חייבים בוודאי להיות מסוככים ובזוגות שזורים. הדרישה המינימאלית לסיכוך היא הצפיפות הגבוהה של החיווט (לא פחות מ 85%).

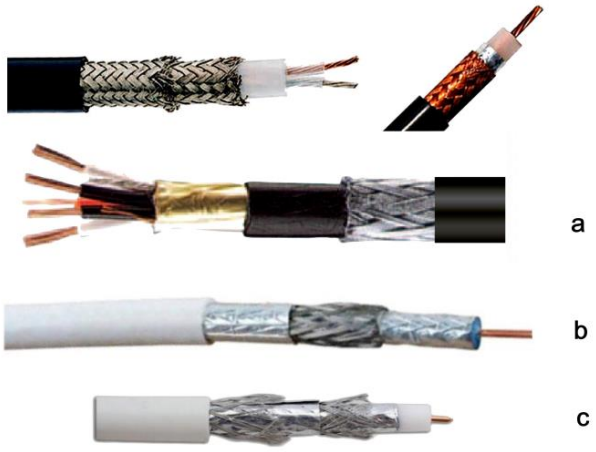
הכבל הקואקסיאלי יעיל יותר מבחינת הסיכוך. בתדרים נמוכים יחסית, עד כמה עשרות מגה-הרץ, שריון הכבל הזה מבטיח סיכוך טוב יותר מאשר הרדיד, בעיקר בשל עוביו. ואולם, בהמשך, רמת תכונות הסיכוך של השריון הזה יורדת בצורה חדה והופכת לכמעט בלתי מקובלת, עוד לפני שמגיעים לתדירות של 100 מגה-הרץ. בו בזמן, לרדיד יש מאפיין אמפליטודת תדר שטוח בתחום של התדרים הגבוהים, והוא שומר על תכונות סיכוך מספקות עד כדי עשרות ג'יגה-הרץ, איור 4.38.



<u>איור 4.38</u>

תלות מקדם הסיכוך מהתדירות, למסכים בצורה של שריון ורדיד

לכן, צריך לתת עדיפות לכבלים בעלי סיכוך רב-שכבתי, המכיל גם שריון, וגם רדיד, איור 4.39.



<u>איור 4.39</u>

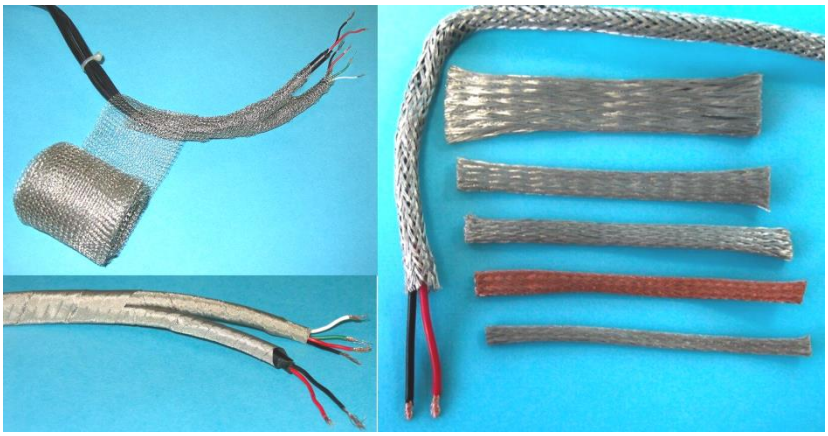
כבלים עם סיכוך כפול (a), משולש (b), מרובע - משולב (שריון-רדיד) (c)

מובן שבמיזמים חדשים צריך להשתמש בסוגים מיוחדים של כבלי פיקוד, עם שילוב של זוג שזור ושל מסכים מרדיד לכל זוג כזה, עם מסך משותף תלת-שכבתי משולב (למשל, כבל בעל 48 עורקים מסוג RE-2X(ST)2Y(Z)Y PIMF), איור 4.40.

איור 4.40

כבל RE-2X(ST)2Y(Z)Y PIMF המתואר כעמיד במיוחד בהפרעות

(להעברת אותות אנלוגיים ודיגיטאליים עד 200 קילו-ביט לשנייה; זוג שזור של חוטים עם מסך מרדיד פוליאסטר לכל זוג; מסך משותף תלת-שכבתי ושריון ממיתר מתכת; בידוד חיצוני - פוליאתילן מצולב (XLPE); עד 24 זוגות של חוטים בתוך הכבל; אפשר לעשות בו שימוש להנחה באוויר וגם בתוך האדמה; בעל רמת איתנות מכאנית גבוהה)



איור 4.41

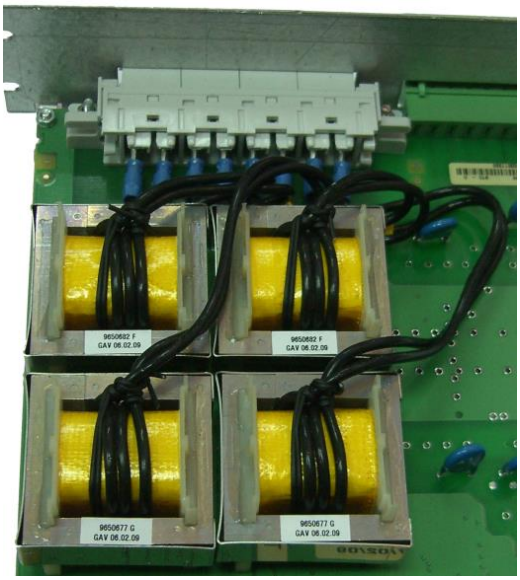
חומרים לסיכוך עצמי של כבלים לא מסוככים

זהו המקרה האידיאלי, אך מה לעשות עם עשרות כבלי פיקוד ישנים הנמצאים בארונות הגנה ממסרית נוכחיים? להחליפם בחדשים? במקרים רבים הדבר מסובך ויקר למדי. למרבה המזל, ישנן חברות (למשל, Holland Shieldind Systems BV) שמייצרות רצועות רשת מיוחדות שבהן אפשר פשוט לעטוף את כבלי פיקוד ישנים לא מסוככים, וגם שרוולי רשת שאותם אפשר להלביש על כבלים לא מסוככים או בעלי סיכוך חלש, איור 4.41.

4.6 שינויים מבניים בממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים

4.6.1 כניסות אנלוגיות

שנאי זרם ומתח הם המרכיבים אשר מקשרים את הכניסות האנלוגיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים עם מעגלי זרם ומתח חיצוניים, לכן, המרכיבים האלה הם הראשונים שיהיו נתונים להשפעת נחשולי מתח רבי עוצמה של השא"מ.



איור 4.42

קטע מן המודול של הכניסות האנלוגיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים עם שנאי זרם מותקנים. אפשר לראות בבירור את הסליל הראשוני המורכבת מ-4 ליפופים של חוט מבודד גמיש בצבע שחור

לשנאי זרם הנכנסים בממסרי ההגנה יש מבנה פשוט ביותר. בדרך כלל זהו שריון משנה רב-סלילי שסובב את הליבה הפרומגנטית, ושריון ראשי המורכב מכמה סלילים של חוט מבודד עבה, הסובבים את שריון המשנה המבודד, איור 4.42. שיטות להגברת האיתנות של המבנה הזה מפני מתחי פעימה רבי עוצמה הן פשוטות יחסית:

- עיטוף סליל המשנה באפוקסי תוך יצוק בוואקום, איור 4.43.
- שימוש בחוט בבידוד מתח גבוה ליצור סליל ראשי.
- שימוש במסכים נוספים ובציפוים מוליכים למחצה המיישרים את השדה המגנטי במבנה שנאי זרם.
- שימוש בידוד נוסף בליבה של שנאי.

עשרות סוגים של חוטים גמישים ובידוד במתח גבוה מסיליקון, פוליאתילן, טפלון למתח של 10-25 קילוולט, מיוצרים על ידי חברות רבות: Teledyne Reynolds, Multi-contact; Allied Wire & Cable; Wiremax;

Dielectric Sciences Inc., Axon' Cable, Daburn Electronics & Cable, Sumitomo Electric, Belden, ורבות אחרות.

איור 4.43

שנאי זרם במבנה מעטפת (קפסולה) עם סליל משנה, שהוכנס בתוך גוף פלסטיק וצופה באפוקסי שנוצק בוואקום. רואים את סליל הראשוני שכולל ליפוף אחד של חוט גמיש מבודד

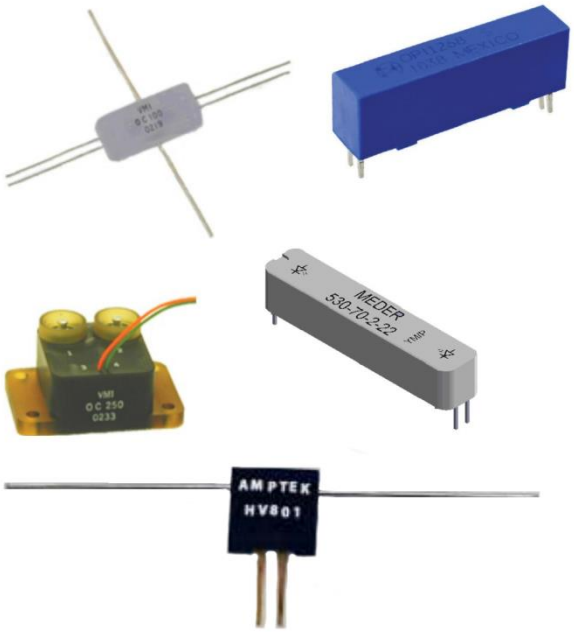
המלצות להגברת איתנות שנאי מתח דומות לאלה שתוארו מעלה, מלבד דבר אחד: במקום חוט גמיש עם בידוד מתח גבוה בתור שריון ראשוני, משתמשים בחוט שריון בעל בידוד משופר בדרגה שלישית, בהתאם ל IEC 60317-0-1 Specification for particular types of winding wires – Part 0-1: General requirements – Enamelled polyimide round copper wire, וגם טבילתם של שני השריונים תחת וקום. מפני שהגדלת הסעיף של חוט השריון מלווה בהגדלה אוטומטית של עובי הבידוד ושל האיתנות החשמלית שלה, צריך לשאוף לשימוש בחוט בעל סעיף גדול יותר, למרות ההגדלה הטבעית של ממדי שנאי המתח.

חלק מהיצרנים מייצרים חוטי השריון עם מבודד מ polyimide, אשר מסוגלים לעמוד אפילו במתח כפול, לעומת הערך המתוקן לפי IEC 60317-0-1 למשל, החברה הבריטית P.A.R. Insulations & Wires Ltd, הטורקית Bemka A. S. ואחרים.

4.6.2 כניסות דיגיטאליות

בידוד של כניסות דיגיטאליות (לוגיות) כמעט לכל סוגי ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מסופק על ידי מצמדים אופטיים. בדרך כלל אלא מצמדים אופטיים מיניאטוריים DIP-4, DIP-6, DIP-8, SOP-4. חוזק חשמלי של הבידוד בין אלמנטים פנימיים של פוטו-קרינה ופוטו-קלט יכול להגיע במצמדים אופטיים כאלה ל 5 - 7 קילו וולט של הערך הנוכחי של זרם חליפין. עם זאת, בפועל, מצמדים אופטיים, הממוקמים על מעגלים מודפסים, לא יעמדו במתחים כאלה בגלל המרחק בין הרגליים על פני הלוח. באותה העת מוצגים בשוק בצורה רחבה מצמדים אופטיים בקפסולות מיוחדות, עם יציאות מפוזרות בחלל של קלט ופלט, איור. 4.44, מסוגלים לעמוד במתח בין קלט לפלט המגיע ל 12 - 25 קילו וולט. אלה מצמדים אופטיים מסוג OC100 (Voltage Multipliers, Inc.);

HV801 (Amptec, Inc.); OPI1268S (TT Electronics); 5253003120 (Standex Meder Electronics) ואחרים. דווקא מצמדים אופטיים כאלה יש ליישם בכניסות דיסקרטיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים להגברת איתנותם מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני



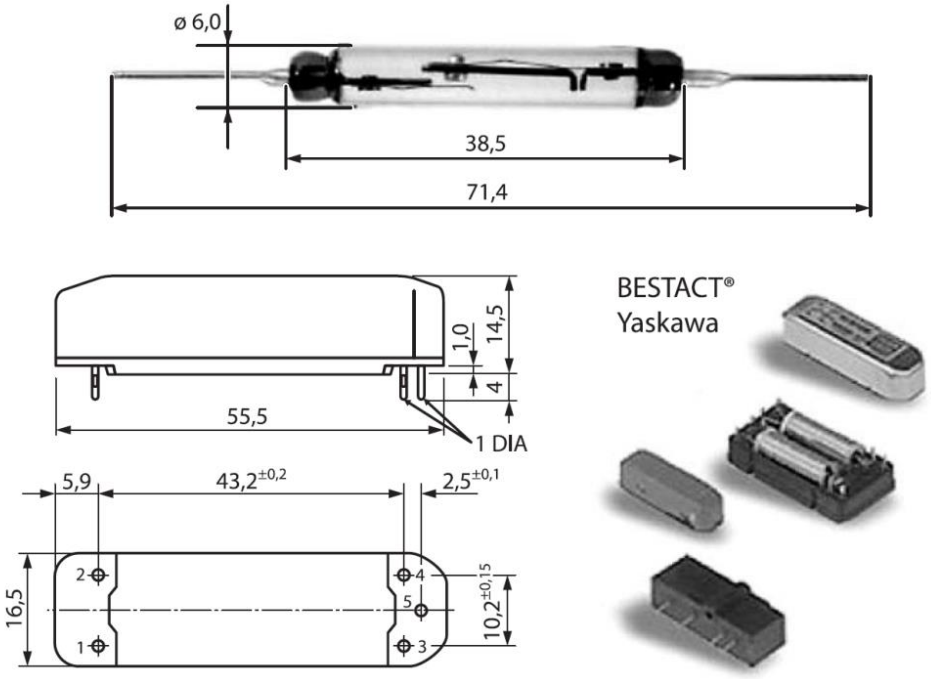
איור 4.44

המראה החיצוני של מצמדים אופטיים מסוג מסוים, עם מתח בידוד קלט פלט של 12 - 25 קילו וולט

סכמות ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים בדרך כלל בנויות בצורה כזו שהמרכיב הראשון, אשר מקבל אות הנכנס לכניסה דיסקרטית הוא מפרץ (וריסטור), אשר מגן על הכניסות של המצמדים אופטיים מפני מתחי יתר. אחריו באים נגדים עם התנגדות גבוהה, אר מפחיתים רמה של מתח קלט (בדרך כלל זה 230 וולט של DC) עד למתח פעילות של מעגל הקלט של מצמד אופטי , כאשר הזרם במעגל לא גבוהה מ כמה מיליאמפר. בעת השימוש בדיודה TVS (ראה לעיל) במקום מצמדים אופטיים, הכניסות הדיסקרטיות מוגנות היטב לא רק מפני נחשולי מתח מיתוג, כמו בשימוש ווריסטורים, אלא גם מפני פעימת מתח גבוה של מרכיב E1 של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, אם הוא מצליח לחדור לכניסות האלה. הפעילות מהירות מדי של מצמד אופטי מודרניים, במיוחד אלה על הבסיס של photodiodes, אשר יכול להגיע עד ל 10^{-9} שניות, מהווה בעיה נוספת. לכן, על מנת לשפר חסינות של המצמד אופטי מפני הפרעות יש צורך בהגנה נוספת מפני הפעלות שווא בעת השפעה של פעימה קצרה E1, אשר ניתן להשיג על ידי מעקף של כניסת המצמד אופטי עם קבל קרמיקה בתדר גבוה, אשר מפחית את מהירות התגובה של המצמד אופטי ובכך משפר את חסינותן להפרעות.

4.6.3 ממסרי יציאה

שימוש בממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים ממסרי יציאה עם בידוד חשמלי בחוזק משופר הוא אחד האמצעים להגדלת איתנות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני



איור 4.45

מגע הרמטי (reed switch)עצמתי מסוג R14U (R15U) עם מגע כפול וממסר על בסיסו מתוצרת חברת Yaskawa

סיכויים טובים לשימוש יש לממסרים עם מגעים הרמטיים עשויים על בסיס מגעים הרמטיים (reed switch) חדשים קטנים במימדים עם עוצמה גדולה מסוג R14U ו R15U, עם קומנטציה כפולה, מתוצרת יאסקווה, תחת שם המותג BESTACT®, איור. 4.45. מגעים הרמטיים מסוג זה בעלי מגע כפול (ראשי מכבה קשת), עם מיתוג רציף, המאפשר להפעיל עומס פעיל אינדוקטיבי עם זרם של 15 אמפר, במתח של 220 וולט DC ו -30 אמפר במתח של AC 220V. על בסיס המגעים ההרמטיים האלה החברה מייצרת סוגים שונים של ממסרים, כגון R1-B14T2U. אחד ההבדלים של מגע הרמטי מסוגים אחרים של ממסרים אלקטרומגנטים הוא עיצוב פשוט (מגע הרמטי וסליל) וכן באפשרות של אמצעים טכניים פשוטים להבטיח רמה גבוהה מאוד של בידוד (עשרות קילו וולט) בין הסליל למגע הרמטי. תכונה כזאת של ממסר עם מגע הרמטי חשובה מאוד כאשר משתמשים בו כממסר פלט בממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים המוגן מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, וזה יכול להיות מיושם על בסיס פיתוחים מוכנים של המחבר, מתוארים ב [4.19].

4.6.4 לוחות מעגלים מודפסים

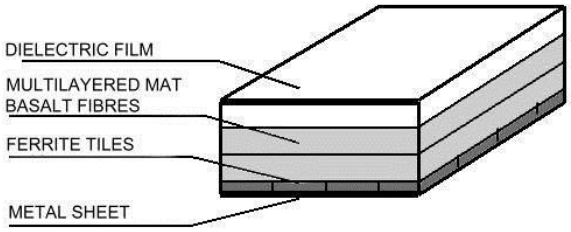
איתנות למתחי פעימה של מעגלים מודפסים מודרניים עם רכיבים ממוקמים על הפני הלוח תלויה לא רק בבחירה נכונה של רכיבים אלקטרוניים, אלא גם במתח פריצה בין הרגליים של האלמנטים ובמרחק בין מוליכים המודפסים (אשר, עקב צפיפות אריזה גבוהה יכולים להיות קטנים מאוד). לכן, אחת הדרכים נוספות להגברת האמינות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים בתנאים של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני יכול להיות ציפוי רציף דו צדדי של מעגל מודפס שחור, אשר עמיד במתח גבוה. דוגמה ללק כזה יכולים להיות מוצרים מתוצרת Vol Roll תחת שם המותג Damicoat ®, מסוג 2405-01, 2407-01, וכו'. הלקים האלה בעלי חוזק דיאלקטי של

70 - 100 קילו וולט/מ"מ. משום שמעגלים המודפסים עם ציפוי כזה הם לחלוטין לא ניתנים לתיקון מכך נובעת דרישה נוספת לבניית ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים : מספר מעגלים מודפסים שמרכיבים את ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים , צריך להיות מוגדלת, כך שבמקרה של כישלון של כל מודול פונקציונאלי אחד אפשר יהי להחליף רק מודול אחד כזה במקום קבוצה גדולה של מודולים פונקציונאליים מסודרים על המעגלים המודפסים המשותפים. לשם כך, מספר מעגלים מודפסים, מהם מורכב ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים צריך להיות מוגדל למספר המודולים הפונקציונאליים. כלומר, כל מודול פונקציונאלי (ספק כוח, מודולים קלט דיסקרטיים, מודולים קלט אנלוגיים, מודול מעבד מרכזי, מודול ממסרי פלט) חייב להיות על מעגל מודפס נשלף נפרד, אשר מחובר ל מעגלים אחרים באמצעות מחבר דרך מעגל מעבר מחבר.

גישה כזאת היא לא רק נחוצה עקב חוסר אפשרות לתקן מודולים עם ציפוי, אלא גם רצויה מאוד מפני שהוא מסייע לטפל בבעיה של סטנדרטיזציה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים ואוניברסליזציה של מודולים שלו [4.20].

יתרון נוסף של מבנה כזה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים , אשר מורכב מודולים פונקציונאליים נפרדים שאינם ניתנים לתיקון היא אפשרות להשתמש בקריטריון חדש (לממסרי הגנה) של הערכת אמינות, במקום קריטריון כזה מוזר, בלשון המעטה, כמו "זמן ממוצע לכישלון" (MTBF) עם מספרים הפנטסטיים שלו ב:90-50 שנים, אשר אין להם קשר לאמינות ריאלית (לא מזויפת). הקריטריון הזה נקרא " Gamma-percentile operating time to failure" ומאפיין זמן הפעלה שבמהלכו כישלון האובייקט אינו מתרחש בהסתברות מסוימת, מבוטא באחוזים. לדוגמא, זמן 95% לכישלון במשך 5 שנים לפחות אומר שבמשך 5 שנים של פעילות הכישלון המרבי של ההתקנים צריך להיות לא יותר מ 5%. כאשר יש לצרכן מדד כזה נוח וברור, הוא יכול לעקוב אחר מספר יחידות פגומות במשך תקופה מסוימת של זמן ולבוא בטענות ליצרן, אם בתקופה זו אירע כשלון במספר גדול בהרבה של מודולים ממה שהיה מובטח על ידי היצרן. עם נתון זה, לצרכן יהיה הרבה יותר קל לנווט בשוק העתידי של מודולים אוניברסאליים [4.20], בבחירת אפשרות המתאימה ביותר של יחס מחיר/איכות. בנוסף לזה, יש צורך לדרוש מהיצרנים לציין במסמכים טכניים ומסמכי מכרזים נתון של משך חיים ממוצע של מודולים נפרדים והמלצות בנוגע להחלפת מניעתית של מודולים אלו, על מנת לשמור על רמה גבוהה של אמינות ממסרי הגנות. לדוגמה, עבור מודול ספק כוח זה יכול להיות 10-8 שנים; עבור מודול כניסות לוגיות - 12 שנים; עבור מודול CPU - 15 שנים; מודול קלט אנלוגי - 17 שנים, וכו'. הנתונים האלה צריכים להיות ידועים ליצרן הגון, אשר עוקב אחרי סטטיסטיקת הכשלים או הפגמים של מוצרים שלו.

4.7. חומרי בניה



איור 4.46

המבנה של הלוח המשולב "Ferrilar-5" למרחב מוגן

אחד הסוגים של הגנה כזאת הוא הגנה על בניינים ומבנים נפרדים מפני חדירה של פעימה אלקטרומגנטית. ההגנה החזקה ביותר היא הגנה באמצעות פנלים מיוחדים המכילים שכבות קליטת הדף של פעימה אלקטרומגנטית, איור. 4.46.

עם זאת, יצירת חדר משוריין באופן מלא זו משימה יקרה למדי. לכן, בפועל, מעניינים יותר פתרונות ביניים זולים יותר אשר משתמשים למשל בסרט, לק מגן, וילונות, וכו'. בשנים האחרונות חלה התקדמות משמעותית בתחום צבעי מוליכות חשמל וחומרי בניין עם מאפיינים ייחודיים ומגוון רחב של אפשרויות יישום, כמו גם ציפויים מוליכים שקופים אשר יכולים להופיע על זכוכית כציפוי. צבעים מוליכים חשמל, לקים ותרסיסים מבוססות על נחושת, אלומיניום, ברונזה, ניקל וגרפיט מיוצרים על ידי חברות רבות, למשל, Caswell, YSHIELD EMR-protection Company, Less EMF Inc, Gold Touch, Inc., Spraylat Corp., Cybershield, Applied Coating Technologies Ltd, BM Industria Bergamasca Mobili S.p.A.

מאפיינים טובים יש לצבע מגן "Tikolak" של חברת ממוסקבה "טיקו". "Tikolak '- חומר צבע לק מוליך חשמל חדש לא מתכתי, מוגן על ידי פטנט של הפדרציה הרוסית, הוא תערובת של מילוי פחמני ופולימריים בתערובת ביחס: מילוי אפוקסי 8-20% מילוי של תערובת גרפיט עם פחמן שחור לפי יחס משקל של 0.1: 1.0: 11 -39% חומק הקשחה 0.5-1.5% ממס אורגני כל השאר. לפי הנתונים של חברת טייקו "Tikolak" מסוגן לשריין קרינה אלקטרומגנטית בטווח רחב של תדרים עד 300 ג'יגה-הרץ. "Tikolak" אשר מצפה משטחים הפנימיים או החיצוניים של הבניינים, מפחית בהרבה פעימות את יכולת חדירת הקרינה האלקטרומגנטית (על פי נתוני המפתח שכבה אחת של "Tikolaka" בעובי של רק 70 מ"מ מפחיתה את עוצמת הקרינה פי 3 - 3.5). "Tikolak" ניתן לשים כציפוי על חומרי בנייה שונים - סיבתי, עץ, דיקט, לוחות גבס, וכן על כל חומר גמיש -. בד, עור, סרט, נייר, וכו'. הציפוי של "Tikolak" יכול להיות מיושם על כל חומר גמר - טפט, אריחי קרמיקה, וכו'. בעוד "Tikolak" עולה הרבה פחות מאשר מקבילים הזרים שלו (כ 70 $ ארה"ב לכל 1 ק"ג).

לקבלת זכוכית שקופה מוליכה חשמל והודפת פעימה אלקטרומגנטית, משתמשים בסרטים מוליכים למחצה של תחמוצת של מתכות שונות: בדיל, אינדיום, אבץ ואחרים. טכנולוגיית ייצור זכוכיות כאלה היא מורכבת מאוד, דורשת זמן רב ציוד יקר וכוח אדם מקצועי. חברת טיקו הנ"ל פיתחה שיטה (פטנט מספר RF 2,112,076) שיטת הייטק חסכונית של ציפוי זכוכית על בציפוי מוליך חשמל המבוסס תחמוצת אינדיום ובדיל. זכוכית מוליכה שקופה מיוצרת על ידי חברות רבות, למשל, Tycon Technoglass Tycon Technoglass, Pilkington, Shenzhen Wanyelong Industry Co., Ltd, InkTec и др. ואחרות.

החברה Alfapol מסנט פטרבורג יצרה חומרי בניין על בסיס חמרי גלם shungite, המשלבים את תכונותיהם של חומרים קונבנציונאליים ומוליכות חשמל גבוהה יחסית. זה מגדיר את יכולתו של החומר להגן על קרינה אלקטרומגנטית. לדברי החברה ,Alfapol חומרי schungite משולבים בעלי יכולת סיכוך רדיו ניתן לחלק לשתי קבוצות לפי האפשרות הפקה מהם סיכוך:

- חומרים מבניים, הכוללים בטון, לבנים, תמיסת בנאות. חומרים המסוגלים לספק החלשת האנרגיה האלקטרומגנטית בתחום התדרים מעל 100 MHz ברמה של לפחות 100 דציבלים. על תכונות פיסיקליות ומכניות חומרי בנייה shungite אינם נחותים מחומרי בנייה מסורתיים מקבילים.

<u>איור 4.47</u>

סרטים מוליכי חשמל, חוטים ובדים החלישים פעימה אלקטרומגנטית (עד 80 dB),

מתוצרת Koolon Fiber Tech. Corp.

חומרי Shungite נבדקו בבנייה (בטון בלוחות מעבר ולבנים בבניה) ונמצאו תואמים את הדרישות הקיימות.

- חומרים לשיקום, כגון תמיסות מסטיקות, המאפשרים להחליף בניינים קונבנציונאליים לבניינים מסוככים. מסטיקות יכולים לספק אפקט סיכוך ברמה לפחות 30 דציבלים בטווח מעל 30 מגה-הרץ, עם עובי השכבה של 2-3 ס"מ. ותרכובת טיח "Alfapol 1 " עם עובי שכתב הטיח של 15 מ"מ בטווח תדרים מ 10 kHz עד 35 ג'יגה-הרץ מספק החלשת פעימה אלקטרומגנטית ב -10 - 15 dB.

Shungite - קבוצה של מינרלים פחמניים מוצקים, בעיקר סוגים של חומרים אמורפיים של הפחמן, במבנה שלהם קרובים מאוד לגרפיט. ההרכב הכימי של ה-shungite הוא קבוע: מכיל בממוצע 60 - 70% של פחמן ו 30-40% של אפר. האפר מכיל: 35-50% של תחמוצת סיליקון, 10-25% של תחמוצת אלומיניום, 4-6% של תחמוצת אשלגן, 5.1% נתרן, 4.1% של תחמוצת טיטניום, ואלמנטי טומאה אחרים.

כהשלמה לקירות הבניינים המכילים shungite ניתן להשתמש בוילונות מוליכות חשמל ובדים, ריצופים, המיוצרים על ידי חלק מהחברות, איור. 4.47.

ביבליוגרפיה לפרק 4

4.1 Whitaker J. C. Electronic Systems Maintenance Handbook, Second Edition - CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton – New York – London, 2001, 624 p.

4.2 איליין ו.פ., איליין נ.ו. הארקה בארונות של הגנות ממסריות. – הגנה ממסרית ואוטומטיזציה, 2015, מס'1, עמ' 26-30.

4.3 גורביץ ו.י. פגיעות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים. בעיות ופתרונות. אינפא הנדסה 2014. עמ' 256.

4.4 Grounding and Bonding in Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C41SR) Facilities. Technical Manual TM 5-690. Headquarters Department of the Army, 17 February 2002.
4.5 IEC 60364-5-548: 1999. Electrical installations of buildings - Part 5: Selections and erection of electrical equipment - Section 548: Farthing arrangements and equiponential bounding for information technology installations.
4.6 MIL-STD-188-125-1 High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions; Part 1: Fixed Facilities.
4.7 A. J. Nalhorczyk, HEMP Filter Design to Meet MIL-STD-188-125 PCI Test Requirements. – IEEE. 10-th International Conference “Electromagnetic Interference & Compatibility”, 26-27 Nov., 2008, pp. 205 – 209.
4.8 MIL-STD-461F Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007.
4.9 IEC 61000-4-4 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-4: Testing and measurement techniques - Electrical fast transient/burst immunity test, 2012.
4.10 Application Notes Cat. 1: HEMP Filter Maintenance and Monitoring. Rev.1. MPE Ltd., December, 2012.
4.11 Surge Protective Device Response Time, Application Note 9910-0003A, Schneider Electric, August 2011.
4.12 Power Quality Surge Protective Devices (SPD), Application Notes: Response Time ratings, DET-733 (8/10), General Electric.
4.13 Surface Mount Power TVS Diodes Deliver Optimal Protection for Power Supply. Application Note, Bourns, Inc, 7/14.e/ESD1435.
4.14 S. J. Goldman, Selecting Protection Devices: TVS Diodes vs. Metal-Oxide Varistors, Power Electronics, June 1, 2010.
4.15 IEC 61000-4-25:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-25: Testing and measurement techniques - HEMP immunity test methods for equipment and systems
4.16 גורביץ ו.י. בעיות בדיקה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים לאיתנות מפני השפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות. תרכיבים וטכנולוגיות, 2014, מס' 12, עמ' 161-168.
4.17 MIL-STD-220B Method of Insertion Loss Measurement, Department of Defense, 1959.
4.18 קוזניצוב מ.ב., קונגורוב ד.א., מטבייב מ.ו., טרסוב ו.נ. בעיות של הגנה מעגלי פלט במכשירים ממסרי הגנה חשמליים מפני קפיצות מתח עוצמתיות. Relay Protection and Substation Automation of Modern EHV Power Systems (Moscow – Cheboksary, September 10–12, 2007).
4.19 Gurevich V. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. Marcel Dekker, New York, 2003, 292 p.
4.20 גורביץ ו.י. בעות סטנדרטיזציה בהגנה ממסרית. סנקט פתרסבורג, הוצאה לעור דיאן, 2015. עמ' 168.

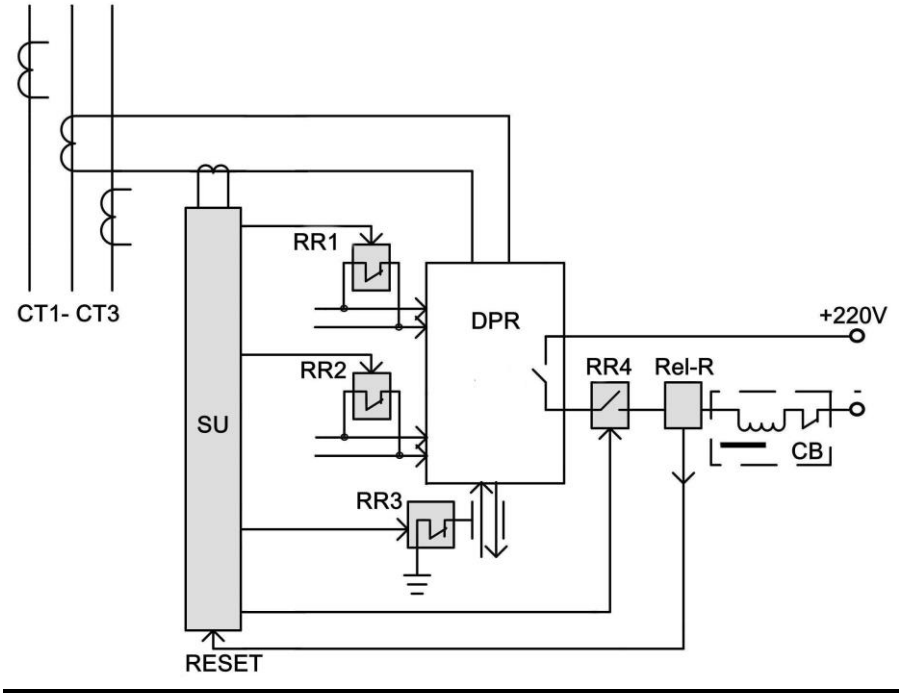
5. שיטות ואמצעים פעילים של הגנה על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מפני פעימה אלקטרומגנטית

5.1 עיקרון החדש של הגנה אקטיבית על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים

במבנה של מערכת החשמל המודרנית ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים הם החוליה הקריטית [5.1], שכן מצד אחד הם הכי פגיעים להשפעות הרסניות מכוונות מרחוק, מצד שני - הם קשורים ישירות אל מכשירי מיתוג הכוח, המשפיע על מצב מערכת החשמל. לכן, דווקא על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים בראש ובראשונה מכוונים השפעות הרסניות מכוונות בצורה של התקפות סייבר [5.2] ואפקטים הרסניים מכוונים של אלקטרומגנטיים [5.3]. מודעות לבעיה של אבטחת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מפני התקפות סייבר בשנים האחרונות הובילה להאצה של פיתוחים ומחקרים הקשורים בעיקר לשכלול פרוטוקולים תקשורת מחשב מיועדים לממסרי הגנה ולהגדלת האמינות שלהם. עד לאחרונה דווקא בתחום הזה התמקדו כל המאמצים של אנשי מקצוע. לגבי השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות, כפי שמוצג בפרק 1 , נדמה לי בבעיה הזאת בינתיים איש לא עוסק ברצינות. לפני 17 שנים, כאשר בעיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים רק החלו לצוץ, המחבר הציע באופן כללי רעיון של הגנה משולבת בעלת ביצועים גבוהים מפני התקפות סייבר והשפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות באמצעות חומרה במקום התוכנה. מכשיר הגנה זה, הפועל על עיקרון של מעקף כניסות רגישות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים באמצעות ממסרים אלקטרו מכאניים מהירים על מגעים הרמטיים [5.6]. בהמשך, הרעיון של השימוש בממסרים אלקטרו מכאניים מהירים על מגעים הרמטיים במשותף עם ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים לצורך הפחת פגיעותם מפני השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מכוונות נותח ע"י המחבר יותר לעומק [5.7, 5.8]. כמו שהראינו כבר לא פעם, את הבעיה של שיפור האמינות של ממסרי הגנות אי אפשר לפתור כאשר משלבים את הפונקציות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים עם פונקציות שאינן קשורות להגנה ממסרית, לדוגמא פונקציות פופולאריות כמו ניטור תקינות הציוד החשמלי, הפעלת מתגים בשלט רחוק, וכו'. בממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים יש להשתמש אך ורק לפתרון בעיות של ממסרי הגנות. יתר על כן, מפני שבנוגע למשימות אחרות, למשל, לניטור חשמל, כהיום בשוק יש מספר עצום של התקנים מיוחדים, החל מממסר פשוט בודק את תקינות המעגל של הסליל המתג, עד למערכות מורכבות השולטות בזמן אמת על הרכב הגזים המומסים בשמן שנאים או רמת פריקות חלקית בבידוד. באשר לשליטה מרחוק במתגים באמצעות ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים , קשה מאוד להבדיל בין גישה מרחוק מורשית לגישה מרחוק לא מורשית, לכן יש לשלול שימוש כזה בממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים. יתר על כן, כי ההפרדה של פונקציות ניהול חומרה פשוטה מספיקה כדי לספק הגנה מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת ומתגי שלט רחוק (ראה להלן).

הרעיון הכללי מאחורי שיטת הגנת על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת המוצע הא משמש יחד עם ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים בגוף הפעלה אלקטרו מכני על מגעים הרמטיים, אשר מחובר פונקציונאלית בצורה רציפה לממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים ושימוש באלמנטים

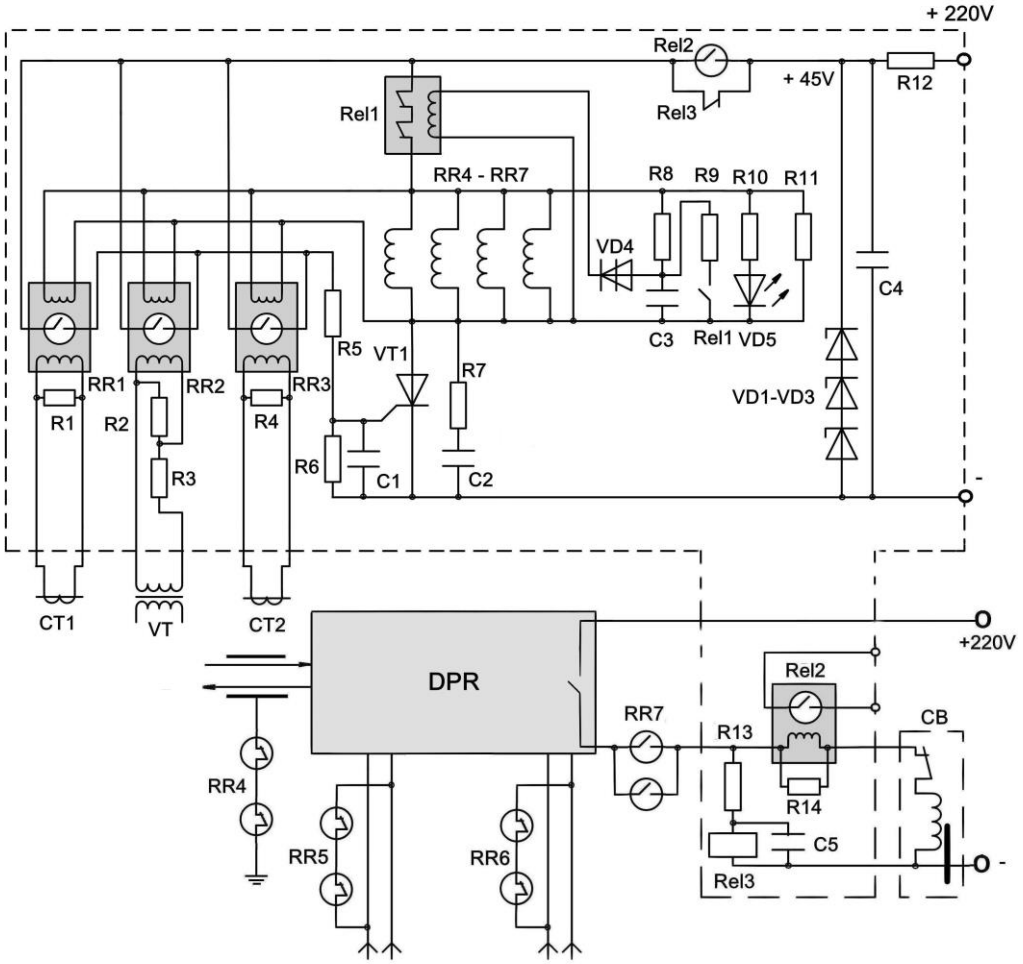
אלקטרו מכאניים מהירי תגובה (RR1 - RR7), אשר מספקים חסימה של כניסות רגישות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים וניתוק מעגל הפלט שלו, איור. 5.1.



<u>איור 5.1</u>
תרשים מבני של מכשיר הגנה על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים (DPR)
מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת

חזרה של גוף הפעלה למצבו המקורי מתבצעת לפי העובדה של הפעלת המתג ומסנכרנת עם פקודת איפוס כעבור פרק זמן קצר המוגדר מראש. ללא הפעלה מחדש של גוף הפעלה באמצעות זרם ו/או מתח של גוף הפעלה כזה, ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים לא יוכלו להשפיע על מצב פעילות של מערכת אנרגיה, אשר הושפעה מהשפעה אלקטרומגנטית הרסנית מכוונת או פשוט מהפרעה אלקטרומגנטית חזקה. אבל אם גוף הפעלה נכנס לפעולה וממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים נפתח מחסימה אז שום דבר לא מונע את השימוש במאפיינים מיוחדים ופונקציונאליות רחבה שלממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים . יחד עם זה, הפעלות מיותרות של גוף ההפעלה בשום אופן לא פוגעות בפעולתה התקינה של ממסרי הגנה, ולכן אין דרישות מיוחדות לגוף הפעלה מבחינת הדיוק ההפעלה. חשוב רק שהוא תמיד יפעל לפני ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים , כלומר היה בעל הגדרות סף נמוכות עם ערך קטן יותר עבור הפרמטר המפוקח. אם הפעלה של גוף הפעלה הייתה מיותרת ולא הייתה הפעלה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים , אזי המכשיר חוזר באופן אוטומטי למצבו המקורי. הדרישות הטכניות העיקריות למכשיר כזה הן האמינות הגבוהה שלו, חוסר רגישות לפעימת תדר גבוה קצרה (טווח מיקרו וננו שנייה) והפרעות בתדירות גבוהה, עמידות לקפיצות מתח המשמעותיות, רמה גבוהה של בידוד גלווני מהמעגלים החיצוניים, הפעלה מהירה (כמה אלפיות השנייה). מגעים הרמטיים - אלה הם אותם האלמנטים, המאפשרים לפתור את הבעיות הללו באמצעים טכניים פשוטים.

פרק זה מספק תיאור של מכשיר משוכלל, שנועד להגן על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מפני השפעות הרסניות מכוונות מרחוק, העונה לדרישות הנ"ל, איור. 5.2 .המכשיר פועל כדלקמן. במצב ההתחלתי, במהלך הפעולה הרגילה של האובייקט המוגן, כל הממסרים עם מגע הרמטי - reed switches (חיישני מתח וזרם וכו') RR1- RR3 נמצאים במצב למטה.



<u>איור 5.2</u>

סכימה משוכללת של התקן הגנה על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים (DPR)
מפני השפעה הרסנית מכוונת מרחוק

VT1 SSR נעול וסלילים של ממסרי מגע הרמטי RR4-RR7 ללא חשמל. מגעים סגורים בצורה נורמאלית RR5 וRR6 - מנתקים ומקצרים כניסות לוגיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים , מגעים - RR4 ערוץ תקשורת, ומגעים RR7 מנתקים את המעגל הפלט של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים . לכן, במצב כזה, ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים חסומים לחלוטין גם בכניסה וגם ביציאה ושום התקפה מכוונת או התקפת סייבר לא יכולה לגרום להפעלת שווא שלהם וסגירת מעגל לא מורשית של סליל המנתק של המתג. מעקף של כניסות לוגיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים ושל ערוץ התקשורת משפר גם את שרידותו בעת השפעה של פעימה אלקטרומגנטית עוצמתית.

בהופעה של מצב חירום באובייקט המוגן, לפחות אחד הפרמטרים המבוקרים (זרם, מתח, עוצמה) משתנה בצורה חדה. שינוי זה גורם להפעלה של לפחות ממסר מגע הרמטי אחד RR1- RR3 תוך פקר זמן לא עולה על 1 מ"ש. בעת כניסה לפעולה מגע הרמטי של ממסר מתאים מתחיל לרטוט בתדירות כפולה. בעת סגירת המגע הראשונה של מגע הרמטי הזה מייד נפתח תיריסטור VT1 וסלילים של ממסרי מגע הרמטיRR4-RR7 מקבלים חשמל. הפעלת ממסר RR4-RR6 מתרחשת תוך לא יותר מ 4 מ"ש, וסגירת מגעים עוצמתיים של ממסר מגע הרמטי RR7 על בסיס מגע הרמטי מסוג Bestact R15U – תוך פרק זמן הלא עולה על 5 מ"ש. לפיכך, זמן התגובה הכולל של כל המכשירים במצב חירום הוא פחות מ -6 מ"ש, מה שבהשוואה זמן מינימאלי להפעלת ממסר עצמו של 30-40 מ"ש סביר בהחלט. במצב פעולה כזה ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבדים יהיה לחלוטין משוחרר מנעילה ויחזור למצב פעולה רגיל, תוך שמירה של כל הגדרות ומאפיינים .כפי שניתן לראות בסכימה של איור. 5.2, כל ממסר פלט (חיישנים) מצויד בסליל מתפתל השני במגע הרמטי, אשר מקבל זרם ממקור DC בעת שחרור תיריסטור VT1. הודות לשדה מגנטי נוסף שנוצר על ידי סליל זה, ממסר מגע הרמטי מפסיק לרטוט ועובר למצב נעילה יציב. לאחר שממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבדים יסיים מחור פעילות לפי מאפייני זמן ההשהיה, מגע פלט פנימי שלו ייסגר ויספק זרם לסליל מנתק של המתג. הזרם אשר זורם במעגל הסליל המנתק של המתג גורם להפעלת ממסר מגע הרמטי Rel2 עם מגע הרמטי עוצמתי מסוג Bestact R15U והסגירה של המגעים שלו, אשר מחוברים במקביל למגעים סגורים בצורה נורמאלית Rel3. באיחור זמן קטן מאוד (בסדר גודל של 20-50 מ"ש) הממסר Rel3 מופעל. השהיית זמן זה נחוצה כדי שמגע של ממסר Rel2 תמיד ייסגר לפני פתיחת מגע Rel3 .

בסוף מחזור פעולה של מתג מגע שלו משתחרר ומעגל הספקת זרם של סליל המנתק נפתח. זה משחרר את ממסר Rel2 והמגע שלו שובר מעגל אנודה של תיריסטורים VT1, אשר מייד ננעל ומנתק אספקת חשמל לסלילי ממסר RR4-RR7 וסלילי- DC של ממסר RR1- RR3. כל ההתקן במהירות חוזר למצבו המקורי ומוכן למחזור חדש של פעולה.

אם הפעלת התקן התבררה כמיותרת וממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבדים לא שלח פקודה לניתוק המתג, מעגל אספקת חשמל VT1 ינותק לזמן קצר באמצעות מגע של ממסר Rel1, לאחר טעינת הקבל C3 דרך הנגד R8 וביטול נעילת דיניסטור VD4. הקיבולת של קבל הזה התנגדות הנגד מספקים השהיית זמן של כמה שניות, עולה על הזמן המרבי הדרוש כדי להשלים מחזור מלא של הממסר כדי לא לפגוע בעבודתו, אם היא נחוצה. הפעלה של ממסר Rel1 קצרה, משום שמייד אחרי הפעלתו וניתוק המגע המחובר בצורה נורמאלית במעגל התריניסטור, נסגר המגע שלו המנותק בצורה נורמאלית ופורק את הקבל C3 באמצעות נגד נמוך ההתנגדות R9 , ומספק פריקה מלאה שלו וחזרה למצבו המקורי. יחד עם זה דיניסטור VD4 ננעל וסליל הממסר Rel1 מנותק מהחשמל. כך נעשית חזרת המכשיר בכוח למצבו המקורי אם פעולתו הייתה מיותרת.

הנגד R11 נחוץ להגדלת זרם, העובר דרך SCR עוצמתי VT1 והחזקתו אמינה במצב מוליכות. VD5 LED הוא אינדיקטור של מצב ההתקן.

מגעים של ממסרים חיצוניים, המיועדים להפעלה/שחרור פרקציות פנימיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים, אשר מגדירות מצב של הגנה ממסרית, צריכים להתחבר בנוסף לכניסות לוגיות ממוגנות כפי שמוצג באיור. 5.2 (עם מעקפים במצב נורמאלי) וגם לכניסות לוגיות (Bx.1, Bx.2) של ההתקן ההגנה המתואר. במקרה זה, כדי לשפר את אבטחת המערכת, חייבים להיות לפחות שני אותות קלט של אירוע, המגיעים משני

מקורות. בתוך התקנים הגנה אותות אלה מבודדים גלוונית ממעגלים חיצוניים באמצעות ממסרים מגע הרמטי נוספים RR7, RR8 שבאמצעותם מיושמת גם כן פונקצית לוגית "ו " שתוצאת פעילות שלה היא הפעלת התקן הגנה ושחרור מחסימה כל הכניסות הלוגיות לצורך ביצוע כל הפעולות הנדרשות. לא בהכרח שני המקורות האלה צריכים להיות בצורה של אותות דיסקרטיים (מגעי הממסר). אחד מהם יכול להיות אות דיסקרטי, והשני - האנלוגי בצורה של מתח או זרם, מתקבלים לממסר מגע הרמטי מתאים, אשר מגעי פלט שלו מחוברים לפי סכימה לוגית "ו". עם זה, פלט הממסר של קלט לוגי שני (שלא בשימוש) אפשר לעקוף באמצעות מעקף S.

איתנות של כניסות לוגיות נוספות האלה מפני הפרעות פעימה קצרות מועד, אפילו עם אמפליטודה גדול מאוד מסופקת ברמה מתאימה של בידוד בין סליל למגע הרמטי ובזמן הפעלה של מגע הרמטי עצמו. האחרון לא יכול לפעול תוך פרק זמן קצר מכמה מ"ש, ובכך הוא מהווה מסנן טבעי ויעיל מאוד של הפרעות פעימה בתדר גבוה.

על מנת להבטיח את החסינות הדרושה מפני הפרעות של מצבי מעבר שונים במעגלי אספקת הזרם DC, הכניסות הנוספות האלה חייבות להיות בעלות התנגדות נמוכה משמעותית מהכניסות הרגילות הלוגיות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים, מה שאפשר להשיג באמצעות מעקפים עם נגדים פנימיים R15 ו.R16 .

אף על פי שסלילים של ממסרי קלט עם מגע הרמטי הרבה יותר עמידים בפני קפיצות מתח מאשר התקנים מוליכים למחצה, במכשיר ננקטו אמצעים נוספים כדי להגן עליהם מפני מתחי יתר הנובעים מהשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת, באמצעות וריסטורים VDR1, VDR2.

מבחינה מבנית, מכשיר ההגנה מותקן בתוך תיבה מסוככת, הדומה לקופסת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים עם ההבדל היחיד שאין בה מסך, אבל יש גישה אל מנגני הפעלת סף מוכוונים של מגעים הרמטיים של גוף ההפעלה.

טבלה 5.1 **הפרמטרים העיקריים של סוגים מסוימים של מגעים ואקום הרמטיים במהירות גבוהה**

פרמטר/סוג מגע הרמטי	**MRA 5650G**	**KSK-1A75**	**HYR 2016**	**HYR 1559**	**MARR -5**	**KSK-1A85**
סוג המגע	NO	NO	NO	NO	NO	NO
מיתוג המתח, וולט	1000	1000	1000	1500	1000	1000
מיתוג הזרם, אמפר	1	0.5	1	0.5	0.5	1
מיתוג העוצמה, וואט	100	10	25	10	10	100
מתח פריצה, וולט	1500	1500	2500	1500	2000	4000
זמן הסגירה מ"ש	0.6	0.5	0.8	0.4	0.75	1.0
זמן הפתיחה, מ"ש	0.05	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1
מימדים, מ"מ	D =2.75 L=21	D=2.3 L=14.2	D=2.6 L=21	D=2.3 L=14.2	D=2.66 L=19.7	D=2.75 L=21
רגישות, ליפוף/ אמפר	20 – 60	15 - 40	15 -70	15 - 50	17 - 38	20 – 60

כדי לשפר את האמינות של המכשיר ועמידותו להשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת, נעשה שימוש רק בכמה התקנים מוליכים למחצה והם נבחרו עם פוטנציאל גדול מאוד של מתח וזרם, שלא משתמשים בהם בציוד אלקטרוני תעשייתי רגיל. כך לדוגמא, במתח הפעלה של 45 וולט, SCR VT1 נבחרו עם מתח מקסימאלי של

1200 וולט, במתח פעולה של חלקיקי אמפר הוא מסוגל לפעול על זרמים של עשרות אמפר ולהעביר פעימות קצרות של זרם של מאה אמפר. גם סטביליטרונים VD1-VD3 ודיניסטור VD4 נבחרו עם פוטנציאל כוח מרובה. ממסרי ביניים Rel1 Rel3 נבחרו עם מגעים הרמטיים בעלי עוצמה גבוהה יותר.

להלן מובאות כמה הנחיות כלליות לבחירת הבסיס אלמנטארי עבור מכשיר הגנה פעילה המוצע..

כאלמנט עם סף רגישות אפשר להשתמש במגעים ואקום הרמטיים מיניאטוריים, העומדים במתח ניסוי לא פחות מ-1 קילו וולט עם זמן תגובה עצמית של כ -1 מ"ש טבלה 5.1. משום שלפעילות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים במצב חירום של האובייקט המוגן הזמן הדרוש בדרך כלל לא עולה על כמה שניות, אז זמן חזרה של -5 10 שניות למצב המתנה הוא מספיק כדי להשלים את מעגל הפעולה הרגיל של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים

.

טבלה 5.2

הפרמטרים החשובים ביותר של סוגים מסוימים של תיריסטורי מתח גבוה, המיועדים להלחמה על מעגלים

פרמטר / **סוג**	**CLA50E-1200HB**	**25TTS12**	**30TPS12** **30TPS16**	**BTW68-1200**
V_{RRM}/V_{DRM}, V	1200	1200	1200 1600	1200
$I_{T\ (RMS)}$, A	79	25	30	30
$I_{T\ (AV)}$, A	50	16	20	19
I_{TSM}, A	650	300	250	400
I_{GT}, mA	50	60	45	50
I_L, max., mA	125	200	200	40
I_H, max., mA	100	100	100	75
dv/dt, V/µs	1000	500	500	250
T_{GT}, µs	2	0.9	0.9	100
T_J, °C	-40 +150	-40 +125	-40 +125	-40 +125
קופסה	TO-247	TO-220AC	TO-247AC	TOP3 ins.

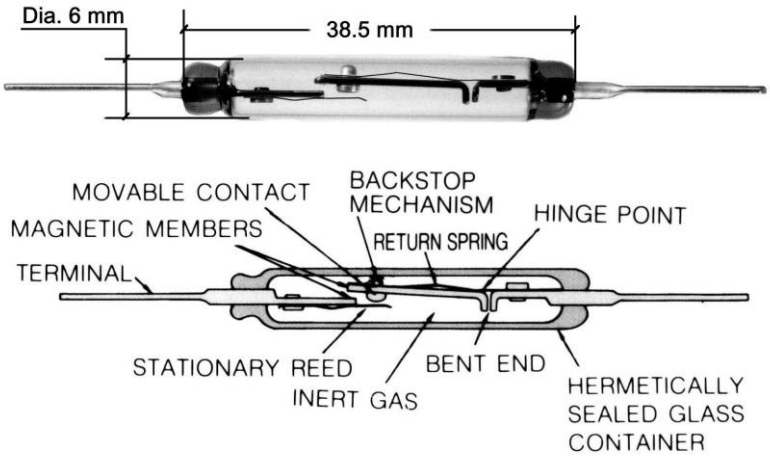
מאז הזרם הכולל הנצרך על ידי פיתולים של ממסרי ביצוע RR4 - RR7, עשוי להיות פחות זרם נעילה (IL) וזרם החזקה של (IH) תיריסטורVT1, המעגל באיור. 5.2 השלים על ידי נגד עוצמתי R11, אשר מגדיל את הזרם הכולל העובר דרך תיריסטור עד 250-300 מילי-אמפר. למרות שבשוק קיימים תיריסטורים מיוחדים עם רגישות גבוהה עם זרמי נעילה והחזקה לא יותר מ -10 מילי-אמפר (TS820-600, TIC106, BT258-600R, X0402MF, MCR708A1 et al.,) השימוש בהם אינו מומלץ במכשיר זה, משום שזה יכול להפחית את חסינותו להפרעות.

המשך לטבלה מספר 5.2

פרמטר / סוג	CS 20-12io1 CS 20-14io1 CS 20-16io1	CS 30-12io1 CS 30-14io1 CS 30-16io1	CS 45-12io1 CS 45-16io1
V_{RRM}/V_{DRM}, V	1200 1400 1600	1200 1400 1600	1200 1600
$I_{T\,(RMS)}$, A	30	49	75
$I_{T\,(AV)}$, A	19	31	48
I_{TSM}, A	200	300	520
I_{GT}, mA	65	65	100
I_L, max., mA	150	150	150
I_H, max., mA	100	100	100
dv/dt, V/µs	1000	1000	1000
T_{GT}, µs	2	2	2
T_J, °C	-40 +125	-40 +125	-40+140
קופסה	TO-247AD	TO-247AD	TO-247AD

בטבלה 5.2 מוצגים פרמטרים של סוגים מסוימים של טריניסטורים, המתאימים ביותר לשימוש בגוף הפעלה. כדי לשפר את החסינות להפרעות של הגוף הפעלה השתמשו בו באלמנטים נוספים RC.

כמגעים של ממסרי ביצוע, אשר חוסמים מגע פלט של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים , אפשר להשתמש בהצלחה במגעים הרמטיים עם מילוי גז Bestact R15U של חברת יאסקווה, איור. 7.3, מיועדים להפעלת זרמים עד 30 אמפר במתח של 240 וולט למשך זמן שלא יעלה על 5 מ"ש.



<u>איור 5.3</u>

מגע הרמטי עוצמתי (reed switch) עם מילוי גז מסוג Bestact R15U של חברת יאסקווה, עם מיתוג כפול

מגעי מתג הרמטיים ואקום מיניאטוריים בעלי מתח גבוה מסוגים שונים, אשר מכילים מגע סגור באופן נורמאלי טבלה 5.3, יכולים להיות מנוצלים למעקפים כניסות רגישות של ממסרים מבוססי מיקרו מעבדים (ללא זרם).

לממסרים אלקטרומכניים הסתברות לכשל עקב "הפעלת יתר" הרבה יותר נמוכה מההסתברות "לאי הפעלה", ולכן חיבור מקביל שלהם (להבדיל מחיבור מקביל פשוט של מהממ"מ) חד משמעית יגביר את האמינות של ממסרי הגנה עבור מגעים נוספים, אשר סגורים בצורה נורמאלית ומהווים מעקפים לכניסות המהממ"ם שיפור אמינות יכול להיות מושגת על ידי חיבור סדרה של המגעים ביניהם.

טבלה 5.3 הפרמטרים העיקריים של סוגים מסוימים של מגעים הרמטיים עם מגע מעבר

פרמטר / סוג ויצרן	GC 1917 Comus	HSR-830R Hermetic Switch	HSR-834 Hermetic Switch	HSRV933W Hermetic Switch	DRR-DTH Hamlin
W מקס. מיתוג הספק	60	25	100	100	50
V מקס. מתח מיתוג	400	250	500	500	500
A מקס. מיתוג זרם,	1	1	3	3	0.5
B מתח התמוטטות	1000	1000	1000	1500	1200
זמן הסגירה, מ"ס	4.0	3.6	2.0	4.2	4.5
זמן הפתיחה, מ"ס	0.15	4.2	1.0	3.7	7.0
גודל הבלון, מ"מ	D=5.6, L=36	D=5.3, L=32	D=5.3, L=34	D=5.3, L=33	D=5.5 L=39.7

קבל של שרשרת העיתוי, כמו גם את כל המרכיבים האחרים של המכשיר, נבחר עם איכות משופרת ועם יתרון גדול (פי חמש) לפי מתח ההפעלה, ראה טבלה. 5.4.

כמפעיל מתח נבחרו שלוש דיודות זנר עם חיבור רציף VD1 VD3 - עם מתח הייצוב של 15 וולט, בעלי עוצמה של 10 וואט כל אחת.

טבלה. 5.4 הפרמטרים העיקריים של סוגים מסוימים של קבלי פ בעלי איכות גבוהה לשרשרות העיתוי

סוג הקבל	יצרן	קיבולת ומתח	מידות מ"מ	טמפרטורות °C להפעלה
B43504B2477M	EPCOS	470 µF, 250V	Dia.30 x 30	-40 +105
B43505A2477M	EPCOS	470 µF, 250V	Dia.30 x 35	-40 +105
EETHC2E471CA	Panasonic	470 µF, 250V	Dia.25 x 30	-40 +105
MAL215933471E3	Vishay	470 µF, 250V	Dia.25 x 40	-25 +105
MCHPR250V477M25X41	Multi-comp	470 µF, 250V	Dia.25 x 41	-25 +105
381LQ471M250J022	Cornell Dublier	470 µF, 250V	Dia.25 x 30	-40 +105

ב-dynistor VD4 (איור 5.2) עם מתח פתיחה של 24 - 36 וולט וזרם עובר של 1- 2 אמפר יכולים להיות מומלצים משכירים מהסוגים הבאים NTE6407, DB3, BR100 / 03, CT-32, HT-32, ועוד. וכממסר אלקטרומגנטי Rel (האיור 7.2) - ממסרים אלקטרומגנטיים ניטראליים הרמטיים (בספרות הטכנית באנגלית הם נקראים "Full Size Cristal Can Relays ") עם שני מגעי מתג (שני מגעים סגורים אשר משתמשים בהם לשפר האמינות) עם זרם מיתוג 2 - 5 אמפר, עם סליל ל- 24 וולט. כדוגמה לממסרים מסוג זה אפשר להביא ממסרים של סדרה: РЭН33, РЭН34, РЭК134, РЭС48, 782XDXH, H782, B07, FW, SF, G2A-434ADC24, HGPRM-B4C05ZC, 2B-7506 ואחרים.

טבלה 5.5 הפרמטרים העיקריים של סוגים מסוימים של דיודות זנר 10-20 ואט עם מתח הייצוב 15וולט

סוג הקבל	יצרן	קיבולת ומתח	מידות מ"מ	טמפרטורות ^{o}C להפעלה
B43504B2477M	EPCOS	470 µF, 250V	Dia.30 x 30	-40 +105
B43505A2477M	EPCOS	470 µF, 250V	Dia.30 x 35	-40 +105
EETHC2E471CA	Panaso-nic	470 µF, 250V	Dia.25 x 30	-40 +105
MAL215933471E3	Vishay	470 µF, 250V	Dia.25 x 40	-25 +105
MCHPR250V477M25X41	Multi-comp	470 µF, 250V	Dia.25 x 41	-25 +105
381LQ471M250J022	Cornell Dublier	470 µF, 250V	Dia.25 x 30	-40 +105

בעת צריכה עצמית מועטה של המעגל, יתרון עוצמה גדול מבטיח היעדר החימום של דיודות זנר והגדלת האמינות עבודתם, כמו גם את היכולת לספוג פעימות מתח יתר של האנרגיה הגבוהה. הפרמטרים של דיודות המתאימים ביותר

לא נדרש שום סף הפעלה של ההתקן הזה. חשוב רק שזה תמיד יפעל לפני מהממ"מ, בכל מצב חשוד של מעגל מבוקר משום שהפעלת יתר של ההתקן כתוצאה מהכוונה לא מדויקת לא משפיע על התנהגות של מהממ"מ, אשר מוגן ע"י ההתקן הזה.

השימוש במכשיר המוצע רכיבים מאוד אמינים, אשר נבחרו לפי יתרונות גדולים של הזרם, המתח והכוח, ואשר יכול לפעול בטווח רחב של טמפרטורות, מספר מצומצם מאוד של רכיבים אלה, בידוד חשמלי גבוה ושכפול של המרכיבים הקריטיים ביותר מבטיח אמינות גבוהה של מהממ"מ בעת הפעלת הפרעות אלקטרומגנטיות עוצמתיות, התקפות סייבר והשפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות וזה תואם את האמינות ואיתנות של הממסרים אלקטרומכניים.

כל האלמנטים של התקן הגנה המתואר צריכים להיות ממוקמים בתוך תיבה נפרדת ומצוידים במחברים או כניסות חיבור מיוחדות, המתאימות למהממ"מ.

מהממ"מ אשר מוגנים על ידי ההתקן המתואר יכולים להיות מחוברים (במידת צורך) גם לתפעול מקביל לצוך הגנה על מתקני אספקת חשמל חשובים וקריטיים. בעת שימוש במכשיר התואר יש גם אפשרות של חיבור במקביל למהממ"מ ממסרי הגנה אלקטרומכניים נוספים עם עיכוב ל-0,1 שניות. [5.7].

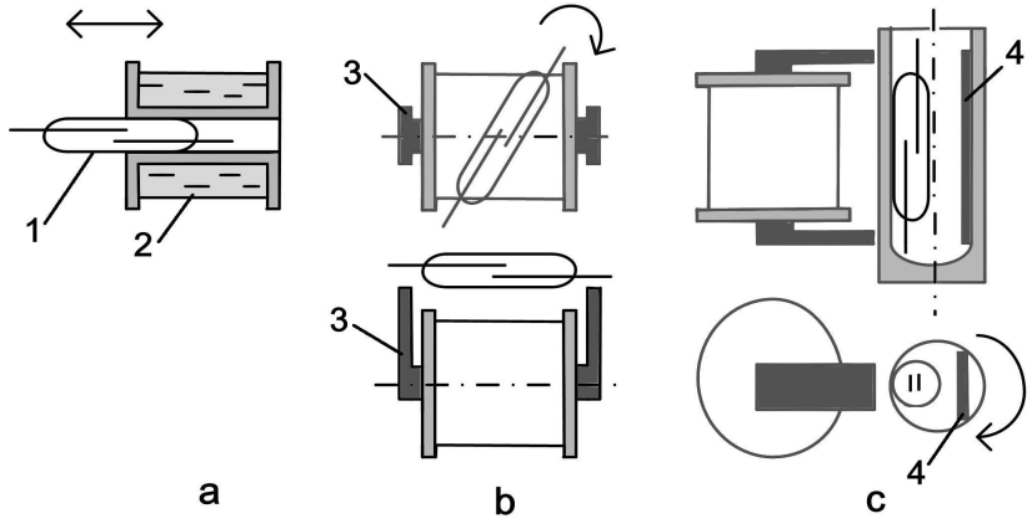
ברור כי הפתרונים המעגליים הספציפיים עשויים להיות שונים מאלו המתוארות בפרק זה, אולם, הגישה המוצעת לפתרון הבעיה בהחלט תתרום לשפר המהימנות של הגנה ממסרית המבוססת על מהממ"מ.

אין ספק, ישנם מצבים ספציפיים של פעילות הגנה ממסרית ותוכניות אינטראקציה בין הממסרים הנפרדים אשר עבורם מימוש השיטה המוצעת של ההגנה על מהממ"מ תהיה קשה לביצוע. זה די טבעי וצפוי. במקרים ספציפיים כאלה, יהיה צורך או בהשלמת השיטה המוצעת, או בשינוי כל הדפוסים הידועים של אינטראקציה בין הממסרים.

הפתרון המתואר נועד אך ורק לאשר את ההיתכנות הטכנית של ההגנות על מהממ"מ מנפי השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת באמצעות חומרה ולא תוכנה והוא יכול לשמש איזושהי נקודת מוצא לפיתוח מכשירים ספציפיים מתאים לייצור תעשייתי.

מאמצים נוספים צריכים להתמקד בפיתוח ממסרי קלט מבוססי מגעים הרמטיים (חיישני זרם ומתח) עם סף הפעלה מתכוונן.

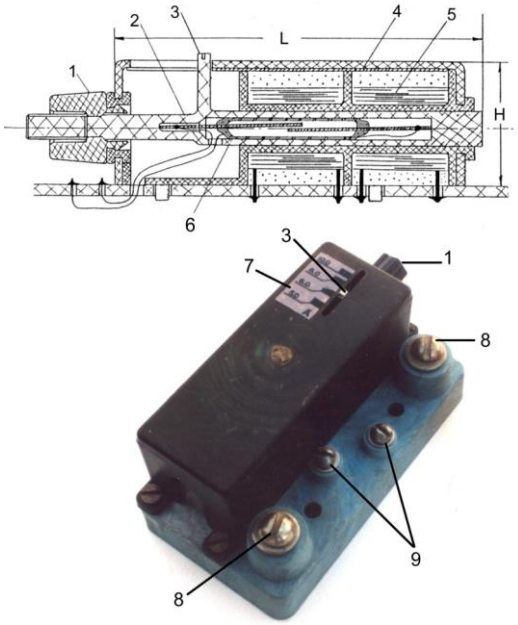
5.2 חיישני זרם ומתח על בסיס ממסרים בעלי מגעים הרמטיים עם סף הפעלה מתכוונן



איור 5.5

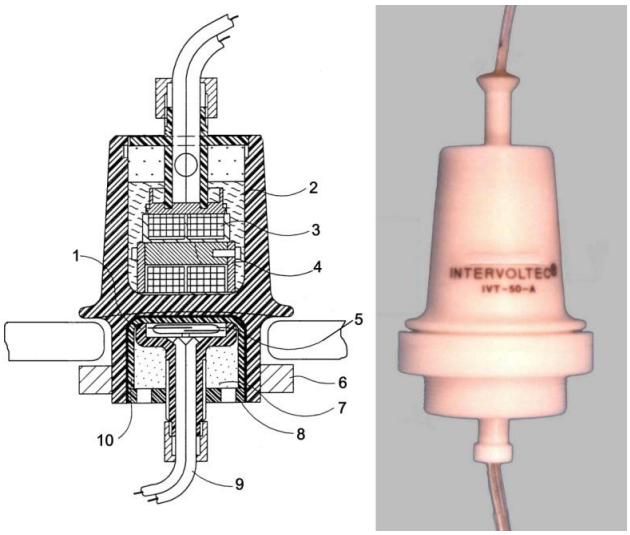
סכמה מבנית של ממסרים בעלי מגעים הרמטיים עם סף הפעלה מתכוונן : a - עם תנועה קואקסיאליים של מגע הרמטי בתוך הסליל; b - עם סיבוב של ציר מגע הרמטי יחסית לציר הסליל ועם מיקום מגע הרמטי חיצוני; c - עם מעבר אקסצנטרי של מגע הרמטי ומעקף המגנטי. 1 - מגע הרמטי; 2 - סליל; 3 - ליבה פרומגנטית; 4 - לוח מסך פרומגנטי (מעקף מגנטי).

ממסרים בעלי מגעים הרמטיים - רכיבים נפוצים בתחום הטכניקה, המיוצרים על ידי חברות רבות .יתרונות כאלה של מגעים הרמטיים כמו הרמטיות, עמידות גבוהה, מהירות תגובה טובה, סביבת גז מיוחדת או ואקום בתוכם נמצאים מרכיבי המגעים, היעדר צורך בכיוון וניקוי המגעים, רמה גבוהה של בידוד גלווני בין הקלט (סליל שליטה) ופלט (מגע הרמטי) סף הפעלה חד ויציב, הופכים אותם כאלה שאין להם תחליף במגוון רחב של מערכות אוטומציה וציוד מדידה.



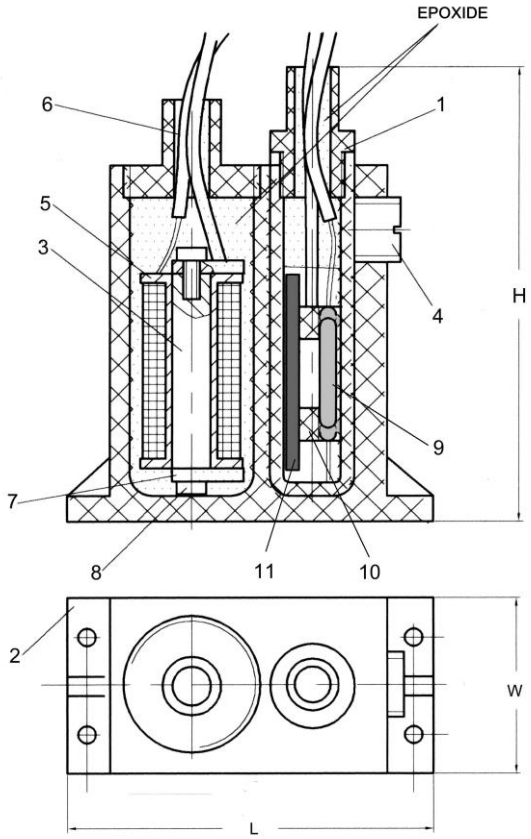
איור. 5.6

ממסרים בעלי מגעים הרמטיים עם סף הפעלה עם מיקום אקסיאלי של מגע הרמטי וסליל ועם תנועת מגע הרמטי קואקסיאלית. 1 – מתג כיוון מסתובב; 2 – חלק פלסטי נייד, עם מגע הרמטי מוטבע בתוכו; 3 - אינדיקאטור מצב מגע הרמטי; 4 - מסך פרומגנטי; 5 - סליל עם מתפתל; 6 – מגע הרמטי; 7 - סקלה; 8 – יציאות המתפתל; 9 – יציאות מגע הרמטי



איור 5.7

ממסר מגע הרמטי עם סף הפעלה מתכוונן, אשר מורכב לפי סכמה b עם מגע הרמטי, הממוקם מחוץ לסליל, ציר האורכי שלו בזווית עם ציר האורכי של הסליל. 1 - קפסולת פלסטיק בצורת פטרייה עם חריץ למגע הרמטי; 2 - חלל הגוף עם הסליל; 3 - סליל; 4 - ליבה פרומגנטית; 5 – מגע הרמטי; 6 - אום; 7 - מילואי אפוקסי של גוף מסתובב עם מגע הרמטי; 8 – אום קיבוע של הגוף המסתובב; 9 – יציאות מגע הרמטי; 10 - הגוף המסתובב של מגע הרמטי.



איור 5.8

מבנה של ממסר קומפקטי עם סף הפעלה מתכוונן, שנבנה על פי התכנית עם התנועה אקסצנטרית של מגע הרמטי. 1 - החלק הבולט של הגוף-קפסולה המסתובב ; 2 – התקני קיבוע; 3 – ליבה פרומגנטית; 4 - בורג נעילה; 5 - סליל עם מתפתל; 6 - יציאות הסליל; 7 – קוטבי הליבה; 8 - ברגי קיבוע הקטבים; 9 – מגע הרמטי; 10 - בידוד הפרדה; 11 - מעקף מגנטי

עם זאת, לאף אחד מממסרי מגע הרמטי, המיוצרים ע"י התעשייה אין אפשרות של כיוונן סף ההפעלה, מה שהצריך פיתוח הממסרים כאלה.

הבה נבחן סכמות ממסרי מגע הרמטי, אשר מתאימים יותר לשימוש הנ"ל, ובעלי סף הפעלה מתכוונן, איור. 5.5.

האפשרות הפשוטה ביותר היא סכמה קונסטרוקטיבית, אשר מוצגת באיור. 5.5 a עם מיקום קואקסיאלי של מגע הרמטי וסליל שליטה ועם תנועה של מגע הרמטי לאורך הציר הסליל. הרגישות המרבית של הממסר מושגת כאשר מרווח של מגע הרמטי ממוקם במרכז הסליל.

בעת הזזת המרווח יחסית למרכז הסליל, רגישות מגע הרמטי לזרם בתוך הסליל יורדת. עם זאת, יישום מעשי של הסכמה המבנית לא היה פשוט איור 5.6.

להזזת המגע ההרמטי היה צורך בייצור מבנה, הדומה לרדוקטור תולעת, אשר בתוכו סיבוב סביב הציר של עצמו ידית 1 עם הברגה בפנים גורם לתזוזת הבורג עם הברגה חיצונית, אשר ממוקם בקצה של החלק ה-2 עם מגע הרמטי מוטבע בתוכו. בנוסף למורכבות, גם אורך גדול של הממסר L , אשר פי שלוש גדול יותר מקפסולה של מגע הרמטי הוא גם חסרון. עוד חסרון מבני אחד הוא יציאת מגע הרמטי מאזור של סכיכה יעילה מגנטית בעת הוצאת המגע מהסליל. חוזק חשמלי של בידוד בין סליל למגע הרמטי במבנה הזה לא עולה כל 1 קילו וולט.

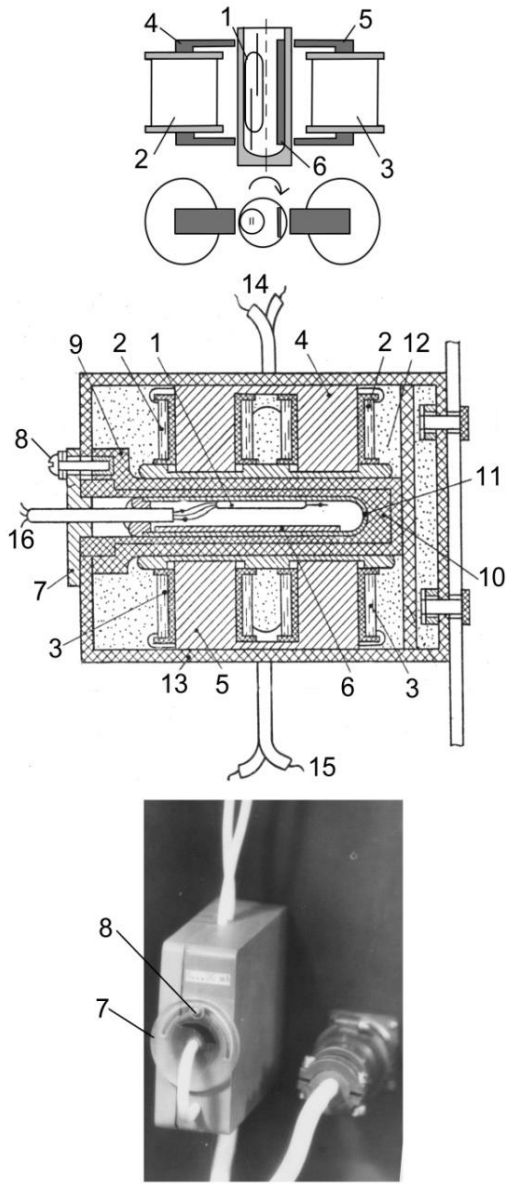
פשוטה יותר מבחינת הביצוע היא סכמה המוצגת באיור. 5.6. בממסר, שנבנה על פי הקונספט הזה, בתוך הסליל ממוקמת ליבה פרומגנטיץ עם קטבים, ומגע הרמטי ממוקם על הצד החיצוני של הסליל, עם ציר מקביל לציר הסליל.

בנית ממסר לפי השיטה הזו הוא פחות מסובך מהקודמת. איור 5.7

במצב שמוצג באיור. 5.7, הרגישות של הממסר היא מקסימאלית. הקהה של הממסר מבוצעת ע"י סיבוב מגע הרמטי כך שתוצר זווית בין הציר האורכי של הסליל ומגע הרמטי. רגישות מינימאלית של הממסר מושגת בזווית של 90 מעלות בין הצירים הנ"ל.

במבנה כזה כיוון סף הפעלה מתבצע באמצעות סיבוב הגוף 10 בטווח של 0-90 מעלות, באמצעות קצה קפסולת מגע הרמטי, הבולט החוצה, וקיבוע מצבו על ידי אום נעילה 8. הרכבת הממסר ללוח החיצוני יכולה להתבצע או על ידי אום 6 (כפי שמוצג באיור 5.7) או באמצעות טבעת בולטת עם חורים וברגים רגילים. לממסר מסוג זה יש גוף גלילי בקוטר גדול למדי (גדול מהאורך של קפסולת מגע הרמטי) וגובה, השווה בערך לאורך משולש של מגע הרמטי. חוסן חשמלי של הבידוד בין מגע הרמטי לסליל בממסר במבנה כזה, גבוה בהרבה מהרמה של הממסרים הקודמים ויכול להגיע לעשרות קילו וולט. די אם אומר כי עיצוב זה מומש על ידי המחבר למתחים עד 70 קילו וולט (עם העובי המתאים של גוף הבידוד, אורכו, ובחירת חומר בידוד מתאים ליצורו. ממסרים עם סף מתכוונן הם קומפקטיים ביותר, מבנה של הממסר כזה מוצג באיור 5ג . בממסר זה מגע הרמטי ומעקף מגנטי ממוקמים זה מול זה, בצורה אקסצנטרית, בתוך אמפולה מסתובבת.

במצב של רגישות מקסימאלית מגע הרמטי צריך להיות קרוב ככל האפשר לקטבים של ליבת הסליל השליטה, ומעקף מגנטי מרוחק מקסימאלית. בעת סיבוב האמפולה הנ"ל מגע הרמטי מתרחק מקטבים של הליבה, ומקומו תופס מעקף מגנטי, אשר מחליף זרם מגנטי באזור מגע הרמטי. שימוש במעקף מגנטי זה אפשר להגיע לטווח כוונון סף הפעלה גדול של מגע הרמטי עם קוטר קטן של אמפולת הסיבוב, ז"א אפשר להקטין את הגודל הממסר.



<u>איור 5.9</u>

ממסר מגע הרמטי דיפרנציאלי, עם סף הפעלה מתכונן. 1 – מגע הרמטי; 2 ו -3 - סלילים עם מפתלי שליטה; 4 ו-5 - ליבות פרומגנטיות שטוחות בצורת П; 6 - מעקף מגנטי; 7 – מכוון הכוונת הממסר; 8 – נועל המכוון; 9 - מבודד קבוע; 10 – החלק המסובב של המבודד; 11 - אמפולה עם מגע הרמטי ומעקף מגנטי; 12 - חומר מילוי אפוקסי; 13 – גוף פלסטיק של הממסר, בצורת מלבן; 14 ו -15 – יציאות סלילי השליטה; 16 – יציאות מגע הרמטי

לאחר כיוון הממסר לזרם הפעלה מסוים מיקום האמפולה מקובע באמצעות בורג 4. הממסר הזה גם בעל כוח בידוד חשמלי גבוה בין מגע הרמטי לסליל השליטה, במיוחד כאשר נעשה שימוש בבידוד מתח גבוה של חוטים כיציאות הסליל ומגע הרמטי.

אפשר לייצר ממסר דיפרנציאלי עם סף הפעלה מתכונן, אשר מגיב להבדלי מתח וזרם , מסופקים לשתי כניסות שונות של הממסר הזה, איור. 5.9.

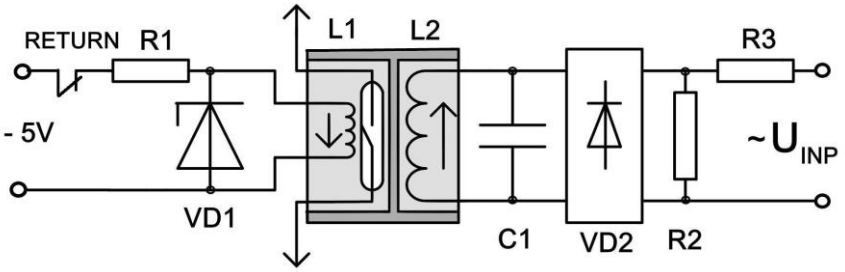
הסכימה המבנית של הממסר, למעשה, היא סוג של C (איור 5.5), אך נבדלת בכך שיש לה שני סלילים הממוקמים באותו מישור משני צדי אמפולה עם מגע הרמטי ומעקף מגנטי.

במבנה כזה בעת סיבוב הטבעת משתנה מיקום המגע ההרמטי 1 והמעקף המגנטי 6, יחסית קטבי הליבות 4 ו-5 של סלילי השליטה. במהלך סיבוב הטבעת מגע הרמטי מתרחק מסליל אחד ומתקרב לסליל שני, כתוצאה מכך משתנה מידת ההשפעה של הסלילים האלה (ז"א אותות יוצאים) על המגע ההרמטי. אם לבחור הפעלת הסלילים כהפוכה, אז במצב אמצעי ניטרלי של מבודד סיבוב 10 מתיחות שדה חשמלי באזור המגע ההרמטי תשאף לאפס. בעת סיבוב המבודד עם מגע הרמטי, השפעתו של סליל אחד על המגע ההרמטי תיחלש, ועל סליל שני תגבר.

מבנה של הממסר הזה מספק רמה גבוהה של בידוד גלווני בין קלט ופלט בשל נוכחות של מבודד מתח גבוה 9. אם לעשות יציקת המבודד הזה ביחד עם התיבה מפלסטיק באיכות גבוהה, ולאחר הרכבת הממסר להשתמש במילוי אפוקסי בוואקום, אז אפשר להשיג חוזק חשמלי של המבודד הזה והמבנה זה של עשרות קילו וולט.

לעבודה משותפת עם ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים (כפי שהוזכר קודם לכן בפרק זה) בידוד של עשרות קילו וולט כמובן מיותר. אבל הבידוד של 5-10 קילו וולט של מתח הפעימה לא יהיה מיותר, כאשר מדובר בהגנה על המכשיר מפני ההשפעות של פעימה אלקטרומגנטית חזקה, מאופיינת, כידוע, במתחי מושרה גבוהים. בקונסטרוקציות לפי סכמות B ו-C- רמת הבידוד כזאת מיושמת בלי שום בעיות, כי הקונסטרוקציות האלה פותחו במקור במיוחד לצורך פעילות בסביבת מתח גבוה [5.9].

המבנים אשר תוארו נבדקו בפועל והדגימו ביצועים מצוינים גם בתור ממסרי מתח מרבי וגם בתור ממסרי זרם מרבי. עם זאת, במקרים מעשיים מסוימים, לדוגמא, כאשר מדובר בשימוש בהם בהתקני הגנה על ממסרים מבוססים מיקרו מעבדים, אשר המיישמים את הפונקציה של הגנת מרחק, יש לפעמים צורך בממסר מתח מינימאלי.



<u>איור 5.10</u>

ממסר מגע הרמטי עם מתח מינימאלי

לצורך יישום של פונקציה ממסר עם מתח מינימאלי, ממש על המגע ההרמטי צריך להיות ממוקם סליל נוסף L1 עם מספר קטן יחסית של פיתולים, אשר מתחבר במעגל למקור מתח יציב של 5 וולט, וסליל פעילות מבודד L2 צריך להיות מחובר דרך מיישר דיודה VD2 וקבל החלקה C1 מסוג סרט, איור 5.10, אשר בעלי פוטנציאל מתח גדול (מתח קלט משנאי מתח תקני, אשר משתמשים בו באנרגטיקה בדרך כלל לא גבוה מ-100 וולט).

סלילים L1 ו-L2 מחוברים בצורת חיבור גב אל גב, בצורה כזאת, ששדה מגנטי כולל באזור מגע הרמטי שואף לאפס במצב פעילות נורמאלי. בעת ירידה משמעותית של מתח קלט (שעליו, יחד עם עליה בזרם, בדרך כלל מגיבה מערכת

הגנת מרחק של קווי תמסורת) שדה מגנטי של הסליל L2 נחלש, ושדה מגנטי, מיוצר על ידי L1 נותר ללא שינוי. השדה השיקומי באזור מגע הרמטי מתחזק והוא נכנס לפעולה. מסנה של מגע הרמטי עצמו יכול להיות כל אחד מהנדונים לעיל.

בהתקן כזה אפשר להשתמש בדיודה מסוג BY 2000 (Diotec Semiconductor) למתח של 2000 וולט וזרם של 3 אמפר (זרם פעימה של 80 אמפר) בתיבה מסוג DO-201 (קוטר 4.5 מ"מ, אורך 7.5 מ"מ). קבל מסוג (WIMA) MKP1T041007H00 1 µF 1600 וולט, במימדים 41.5 x 45.5 x 24 מ"מ. אלמנטים האלה ממוקמים על מעגל מודפס של ההתקן, מחוץ לתיבת הממסר. שימוש באלמנטים כאלה הפועלים במתח גבוה בסביבה של מחת נמוך יחסית, אשר מתקבל במעגל מודפס לאחר חילוק בנגדים R2-R3 (15-20 וולט) נחוץ לאספקת חסינות גבוהה של ההתקן מפני קפיצות מתח, מיוצרות על ידי פעימה אלקטרומגנטית עוצמתית.

בכל הממסרים שתוארו לעיל מומלץ להשתמש במגעים ואקום הרמטיים קטנים, אשר עומדים בניסוי במתח לפחות 1 קילו וולט ובעלי זמן התגובה כ- 1 מ"ש, טבלה 5.1

בידוד אלמנטים של מבנה של כל סוגי הממסרים אשר נידונו, מומלץ לבצע מחומר יציקה תרמופלסטי מסוג ULTEM-1000 (Polyetherimide – PEI), חומר שקוף למחצה בצבע ענבר בעל מאפיינים מכנים מעולים, מאפייני חום מעולים (-55 +170 ºC) ומאפייני חשמלי מעולים (33 kV / מ"מ, tgδ = 0.0012) ספיגת מים נמוכה (0.25% ב -24 שעות), עמידות גבוהה לסוגים שונים של קרינה, יחסית טובה הדבקה על תרכובות אפוקסיות. ובתור מילוי אפוקסי - STYCAST 2651-40 (Emerson & Cumming) – מתכובת דו-מרכיבית בצבע שחור, בעל מאפיינים דיאלקטיים טובים(18 κV/mm, tgδ = 0.02), ספיגת מים נמוכה (0.1% ב -24 שעות), טווח רחב של טמפרטורות הפעלה (-75 +175 ºC), צמיגות נמוכה מאוד במצב נוזלי והידבקות טובה למתכות וחומרים פלסטיים.

התרכובת הזאת בעלת מקדם הרחבה ליניארי קרוב מאוד ל Ultem-1000, מה שחשוב מאוד בעת שימוש בממסרים בטווח רחב של טמפרטורות. בתור חומר המקשה יש להשתמש ב CATALYST-11.

ראוי לזכור כי אסור להטביע את מגע הרמטי בתוך התרכובת האפוקסית. לפני הפעולה הזאת חייבים לשים עליו שכבה של חומר דעיכת, פיצוי מכאני, נגד מתחים מכאניים, המתרחשים במהלך התגבשות של התרכובת האפוקסי.

כדי למנוע חדירה של הפרעות מתח גבוה ופעימה לתוך מעגלי פלט של הממסרים דרך הקיבולת שלו, מגע הרמטי ממוקם בתוך אמפולת אלומיניום בעלת דופן דק ומקורקעת.

הפתרונים הטכניים הנ"ל יכולים לשמש בסיס מעשי בשלבי הכנת ייצור ממסרי זרם ומתח עם סף הפעלה מתכוונן למכשירים שנועדו להגביר את היציבות של הגנת ממסרים מבוססים מיקרו מעבדים מפני התקפות סייבר מרוחקות והשפעות הרסניות מכוונות.

5.3 היבטים טכניים וכלכליים של שיטת הגנה אקטיבית על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים

דנו לעיל בפגיעות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מפני השפעות הרסניות זדוניות מרחוק (אלקטרומגנטיות הקיברנטיות), והראינו את את הצורך להגן על מהממ"מ, כמו כן תיארנו את שיטת הגנה ספציפית, המבוססת על השימוש המשותף במהממ"מ ומנגנון הפעלה על מגעים הרמטיים, אשר מחובר רציף עם מהממ"מ ואשר מבטל חסימה

שלו רק כאשר לפחות אחד הפרמטרים המפוקחים (זרם, מתח, הזווית ביניהם, וכו') מתקרב אל סף ההפעלה של מהממ"מ איור 5.1.

ההגדרה עצמה של הבעיה, וגם השיטה המוצעת של הגנה על מהממ"מ מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת כל כך יוצאת דופן כל כך שונה מכל דבר ידוע בעבר שזה בהכרח יגרום מצד המומחים להרבה מאוד שאלות ויגרום גם לגל רגשות (ש לא תמיד חיוביות). היעדר תשובות במאמרים שפורסמו בעבר, לשאלות מתעוררות רבות, מוביל לעתים קרובות לאי הבנות, ומכאן אל הדחייה המוחלטת של השיטה המוצעת. לכן, אנחנו ננסה לנסח את שאלות הנפוצות ביותר בדיונים בנושא הזה ולתת עליהן תשובות.

שאלה 1:

על פי הסכימה מגעים הרמטיים תלויים על מהממ"מ מכל הצדדים, כמו קישוטים על עץ חג המולד?

ברור למדי כי מגעים הרמטיים אינם תלויים כמו קישוטים בכניסות ויציאות של מהממ"מ, אלא יחד עם כל המרכיבים האחרים של התקני הגנה המוצעים ממוקמים בתוך קופסה מסוככת, שהיא דומה במבנה לקופסא של מהממ"מ רק עם הבדל אחד שאין צורך במסך, אבל יש גישה למנגנוני כיונון סף הפעלה של מגעים הרמטיים. מודול ההפרדה הזה מצויד באותם מגעי חיבור, הנועדים לחיבורים חיצוניים כמו גם מהממ"מ.

שאלה 2

בהתייחס למגעים הרמטיים יש דעה רווחת על אי אמינותם (התקועה). עד כמה מוצד השימוש בהם במכשירים, אשר אמור להיות בעלי אמינות מוגברת?

מגעים הרמטיים, ליתר דיוק ממסרים על בסיס מגעים הרמטיים, אשר משתמשים בהם בגוף הפעלת ההגנה (מנגנון הפעלה של התקן הגנה) שונים ממסרים קונבנציונאליים אלקטרומכניים במספר גדול של תכונות חיוביות. ראשית כל, מרכיבים מגע של מגעים הרמטיים יבשים נמצאים בתוך בלון הרמטי הממולא בתערובת של גזים אצילים בלחץ או וואקום ולכן הם לא מושפעים מגורמים סביבתיים קשים (לחות, אבק, גזים). מגעים אלה אינם דורשים הכוונה וניקוי במשך כל חיי הפעולה שלהם. שנית, ממסרים מבוססים מגעים הרמטיים בעלי ביצועים מהירים פי 3-5 ויותר לעומת ממסרים אלקטרומכניים רגילים. שלישית, בזרם חליפין למגעים הרמטיים יש מקדם החזרה של 0.9 - 0.95, שהוא גבוה בהרבה מפרמטר דומה של ממסר רגיל.

דבר רביעי, בממסרים עם מגעים הרמטיים אפשר להשיג רמת בידוד גלווני של קלט מפלט (בין סליל למגעים) של עשרות קילו וולט, וזה בלתי אפשרי עבור ממסרים אלקטרומכניים רגילים. דבר חמישי, בניגוד לממסרים רגילים, לממסרים עם מגע הרמטי יש סף ברור ויציב של הפעלה בעת עלייה חלקה בזרם בסליל השליטה, מה שמאפשר ליצור על בסיס מגעים הרמטיים אמצעי הגנה ומדידה רגישים. בנוסף לאמור לעיל, ניתן לציין כי מגעים הרמטיים יבשים אינם רגישים למצב בחלל ומשתלבים היטב עם אלמנטים אלקטרוניים, אלקטרומגנטיים ומגנטיים, מה שמאפשר ליצור על בסיסם מספר גדול של מודולים והתקנים פונקציונאליים שונים [5.10].

מגעים ואקום הרמטיים וממולי גז, אשר מיוצרים על ידי חברות מובילות המתמחות בתחום זה (בהם ייעשה שימוש בהתקן [5.11]), אינם זולים (15 - 30 דולר ליחידה), אך רכיבים אמינים מאוד, אשר נמצאים בשימוש נרחב לא רק בתעשייה והנדסת תקשורת, אלא גם תעשייה צבאית, תעשייה אווירית ותעשיית חלל.

מגעים הרמטיים תופסים מקום ביניים בין אלמנטים מוליכים למחצה ורכיבי תקשורת אלקטרומכניים על פי פרמטרים רבים. לכן, ומרכזיות טלפוניה אוטומטיות מבוססות מגעים הרמטיים מכונות "קוואזיאלקטרוניות".

על פי המפרטים הטכניים משך חיי השירות של מרכזיות כאלה מוגדר כ-40 שנים, ומספר מגעים הרמטיים, אשר יוצאים מכלל פעולה במשך תקופה הזאת לא יעלה על 0.3%.

רק הנתונים אלה מדברים כבר בעד עצמם.

עם זאת, למגעים הרמטיים יש הבדל מהותי אחד מממסרים קונבנציונאליים אלקטרומכניים: המערכת המגנטית שלהם אינה מבודדת מהמגעים, אלא נוצרת על ידי המגעים עצמם.

הבדל הזה מתנה קיבולת עומס נמוכה של מגעים הרמטיים לפי המתח. בניגוד לממסרים קונבנציונאליים, מגעים הרמטיים אינם מאפשרים עומס יתר על המגעים אפילו לטווח קצר. הסיבה לכך היא העובדה שהשדה המגנטי של הזרם העובר דרך מגעים סגורים של מגע הרמטי מופנה לקראת שדה מגנטי של הסליל, אשר מחזיק את המגעים במצב סגור ומחליש אותו, בהחלשת לחיצת מגע, עד היווצרות המרווח. זה מוביל לשחיקה מוגברת, ולעיתים גם ריתוך של מגעים הרמטיים אפילו בהעברת זרם קצר מועד, העולה על הערך המרבי המותר עבור סוג זה של הערך. אי ידיעה של תכונה הזאת של מגע הרמטי והשימוש בו מבלי לקחת בחשבון את ההבדלים מהממסר הרגיל מבחינת קיבולת העומס, מוביל לעתים קרובות תקלות בציוד, וכתוצאה מכך, אל חוסר האמון במגע הרמטי. כאשר בוחרים בצורה נכונה משטר הפעלת המגע ההרמטי זה מבטיח פעילות תקשורת אמינה של מעגלים במיליוני מחזורי הפעלה. בעת שימוש במגע הרמטי לתקשורת במעגלים חיצוניים, בהם זרם עשוי להשתנות בטווח רחב, אף אחד לא רוצה לעקוב אחר מצב הזרם בעת פעילות המגעים. הרבה יותר קל לוותר על השימוש בהם, וזה מה שקורה לעתים קרובות בפועל. במבנה המוצע של חלק מהמגעים ההרמטיים כלולים רק במעגלים פנימיים של ההתקנים, שבהם עומס הזרם נמוך בעשרות מונים מהמקסימום המותר עבור מגעים הרמטיים. חלק אחר מנתק מעגלים של כניסות דיסקרטיות, בהן זרמים אינם עולים על כמה מילי-אמפר, מה שקטן בשני סדרי גודל מערך הסף המותר. ורק דרך מגעים הרמטיים, אשר מחוברים ברציפות עם מגעי פלט של מהממ"מ ומיועדים להפעלת סליל הניתוק של המתג, יכולים לעבור זרמים של כמה אמפר. אולם, ראשית, מגעים הרמטיים אלה אינם מבצעים ישירות מיתוג של זרמים אלה, אלא רק מחברים מעגל ללא זרם, ושנית, הם נבחרו מסוג כזה (Bestact R15U, ייצור של החברה היפנית יאסקווה), שהמספק פוטנציאל גדול לפי הזרם.

שאלה 3

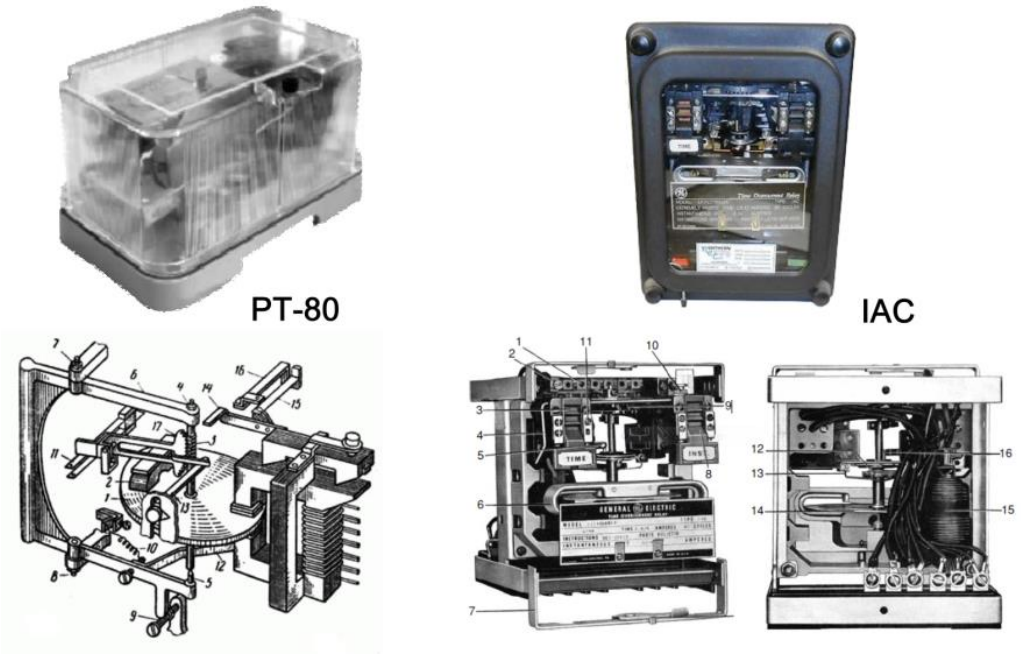
מהממ"מ מודרניים משלבים 20-10 ויותר פונקציות שונות במסוף אחד. האם זה אומר שמכשיר הגנה המוצע חייב לכלול אותו המספר של ממסרי קלט?

לא, זה לא. העניין הוא שכל מגוון פונקציות בהן נעשה שימוש במסוף אחד של מהממ"מ מבוסס על מדידות זרם, מתח והזווית ביניהם. בהתאם לכך, ממסרי קלט של התקן הגנה המוצע חייב לכלול מרכיבי הסף של הזרם, המתח והזווית ביניהם. ערכי הסף של כל האלמנטים הללו חייבים להיות פחות מערכי המינימום של ההגדרה נבחרת במהממ"מ.

<u>שאלה 4</u>

למה צריכים להשתמש במהממ"מ יקרים יחד עם התקני הגנה חדשים למיניהם וגם כן יקרים, אם אפשר פשוט לחזור לשימוש בממסרי הגנה אלקטרומכניים, אשר זולים ואיתנים להשפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות?

אכן, ממסרי הגנה אלקטרומכניים נמצאים בשימוש כבר יותר ממאה שנים ועדיין מספקים הגנה אמינה ל פעילות חירום שכל סוגים של ציוד חשמלי.



איור 5.11

המראה החיצוני וההרכב של ממסרים אלקטרומכניים, אשר דומים לפי המבנה והפרמטרים, עם בעיכוב תלוי בזמן: משמאל PT-80 מתוצרת מפעל בעיר צ'בוקסרי, מימין IAC, מתוצרת ג'נרל אלקטריק

די אם אומר כי רשת חשמל לאומית גדולה ונרחבת, כמו הרוסית, אפילו היא כיום משתמשת כמעט ב80% בממסרים אלקטרומכניים. עם זאת, למרות העובדה שממסרים אלקטרומכניים הוכיחו את אמינותם הגבוהה, לפני כ 30-40 שנים, כל היצרניות המובילות בעולם של ממסרים הפסיקו לעסוק בפיתוח ושכלול ממסרים אלקטרומכניים והחלו בפיתוח אינטנסיבי קודם של ממסרים מוליכים למחצה, אשר מהעתיקים לחלוטין את הפונקציות ומאפיינים של ממסרים אלקטרומכניים ולאחר מכן בממסרים מבוססים המיקרו-מעבדים, אשר מעתיקים פונקציות של הממסרים המוליכים למחצה, איור. 5.10. רק כמה שנים מאוחר יותר הופיעו בשוק ממסרים מבוססים מיקרו מעבדים עם תכונות משופרות וביצועים משופרים.

לפני כ 20-25 שנים, רוב היצרניות המובילות בעולם של ממסרי הגנה פשוט הפסיקו לייצר ממסרים אלקטרומכניים וריכזו את כל מאמציהם על מהממ"מ. הסיבה העיקרית לתופעה זו נעוצה בעובדה כי לייצר על ציוד אוטומטי מעגלים מודפסים עם רכיבים אלקטרוניים, ולאחר מכן לבדוק אותם על ציוד אוטומטי, זה הרבה יותר נוח מאשר לייצר על מכונות כרסום דיוק גבוה חלקים מיניאטוריים, להרכיבם לבדוק ולכוון אותם באופן ידני.

בגלל ההבדל חד בעלויות הייצור בין ממסרים אלקטרונכניים למהממ"מ, הצרכן גם נהנה, משום שהעלות של מהממ"מ, שיוצר על ידי יצרנים מובילים של עולם הממסרים היום כבר הרבה יותר נמוכה מהעלות היצור של ממסר אלקטרו מכני עם אותם מאפיינים. הטענה כי היום ממסר אלקטרו מכני הרבה יותר זול מממסר מבוסס מיקרו מעבד ברוב המקרים אינה נכונה ולא נתמכת על ידי ניתוח של מחירי השוק בעולם. לדוגמה, אם ממסר אלקטרו מכני עם

הגנה תלת שלבית של קווים מסוג LZ31 (מתוצרת ABB) במחירים נוכחים היה עולה 30-35 אלף דולר ארה"ב, אז הממסר מקביל מבוסס המיקרו מעבד עם תכונות משופרות - מסוג D30 (ג'נרל אלקטריק) עולה כיום רק 7.000 דולר ארה"ב וממסר סיני מקביל מסוג GTL-823 (Electric Guatong) אפילו פחות מזה - 4.5 אלף דולר .

באשר למחירים במדינות הפוסט סובייטיות, הם מעוותים מאוד ואינם מתאימים יחס המחירים הנוכחי בשוק העולמי. לדוגמא, אם נשווה מחירים לממסרים אלקטרומכניים דומים במבנה ומאפיינים עם מאפיין תלוי: PT-80 תוצרת רוסיה (כ-60 דולר ארה"ב) שוות יותר מ-20 פי פחות מממסר אמריקאי IAC (איור 5.11) (כ-1400 דולר ארה"ב).

הבדל במחיר זה יכול להיות מוסבר על ידי השימוש ברוסיה בציוד זול, חומרים זולים יותר, והכי חשוב כוח עבודה זול. אבל אז הייתי מצפה כי היחס בין מחירים של ממסרים מתוצרת רוסיה לממסרים מתוצרת מערב אולי לא יהיה בדיוק אותו הדבר, אבל לפחות קרוב. ומה אנחנו רואים בפועל? ניקח כדוגמא ממסר הגנה מרחוק על קווים: ממסר D30 שכבר הוזכר (ג'נרל אלקטריק) וממסר עם פרמטרים דומים סיריוס-LP-03-3 (אוטומציית רדיוס NPP), איור 5.12. מסתבר כי העלויות שלהם שוות בערך (6500 - 7,000 דולר). איך נחתן להסביר את זה, לאור האמור לעיל? גם אם ניקח בחשבון כי בממסרים רוסיים משתמשים בהרבה רכיבים אלקטרוניים מתוצרת מערב, עדיין יהיה קשה להסביר את הסיבות האובייקטיביות ליחס המחירים המוזר הזה. סביר להניח, יש פה מקום להפקעת מחירים ברורה על ידי יצרני ממסרים הרוסים של כדי להשיג רווחי אל.

<u>איור 5.12</u>

ממסרים מבוססים המיקר מעבדים להגנה מרחוק על קווים D30 (תוצרת GE, ארה"ב) וסיריוס-LP-03-3 (מתוצרת "אוטומציה רדיוס", רוסיה), עם מאפיינים והעלות דומים

אם נתמקד מתמקדים בתמחור המעוות הקיים ברוסיה, אז ככל הנראה, יכולים להיות קשיים משמעותיים עם היישום המעשי של מכשיר הגנה המוצע.

מצד שני, קמפיין פרסום חזק, מאורגן על ידי יצרני הממסרים מבוססים מיקרו מעבדים, על ידי אוניברסיטאות וארגוני מחקר המעוניינים במימון פרויקטים חדשים עשה את שלו. היום, להעלות את השאלה של חזרה ממסרים אלקטרומכניים משמעות הדבר להיות מנודה בקהילה של המומחים בתחום, להיות ריאקציוניסט שמרן, אשר מנסה לעצור את ההתקדמות הטכנולוגית. אף אחד מהמומחים או הפקידים המעורבים בתהליך קבלת ההחלטות לא ייקח על עצמו אחריות כזאת. ואם זה יקרה, אז בטוח שבמקרה כזה הוא יקבל מבול סוער של אשמות בורות מניעת הקידמה

וקונסרבטיזם. בנוסף, למען האובייקטיביות, יש לציין כי מהממ"מ אכן בעלי תכונות ופונקציונאליות מסוימות, שאינם זמינות עבור ממסרים אלקטרומכניים.

אם ניקח בחשבון את כל הגורמים הללו, אנו יכולים לומר כי שאלת החזרה אל ממסרים אלקרטומכניים אינה עומדת על הסדר היום, אפילו אם יחס המחירים ברוסיה מצדיק את זה מנקודת מבט כלכלית.

שאלה 5

נניח כי חזרה לממסרים אלקטרומכניים היום היא באמת בלתי אפשרית. אבל אז, למה לא להשתמש במהממ"מ במשולב עם ממסרים אלקטרומכניים אלה במקום להמציא התקנים חדשים על מגעים הרמטיים?

למעשה, במשולב מהממ"מ וממסרים אלקטרומכניים כבר מזמן נעשה שימוש בפועל, איור. 5.13. עם זאת, משתמשים בו לא בחיבור רציף, כפי שהוצע על ידינו, אלא בחיבור מקביל, כלומר למטרת גיבוי, על מנת לשפר את איתנות. כפי שהראינו קודם [5.7], שיטת שימוש כזאת של מהממ"מ עם ממסרים אלקטומכניים (כלומר, החיבור המקביל שלהם) הוא לא נכון מטבע הדברים. בעת שימוש בחיבור מקביל כזה ממסרים אלקטרומכניים באמת צריכים לחקות באופן מלא את הפונקציות של מהממ"מ ולהיות עם אותן הגדרות.

בכל מקרה של שימוש משולב של מהממ"מ רב תכליתי וממסרים אלקטרומכניים יש צורך בסט של ממסרים אלקטרומכניים בכלל לא זולים, מה שעושה את הפרויקט הזה מאוד מפוקפק בגלל העלות הגבוהה שלו הצורך בשטחים גדולים עבור ההתקנה של מספר רב של ממסרים אלקטרומכניים שונה.

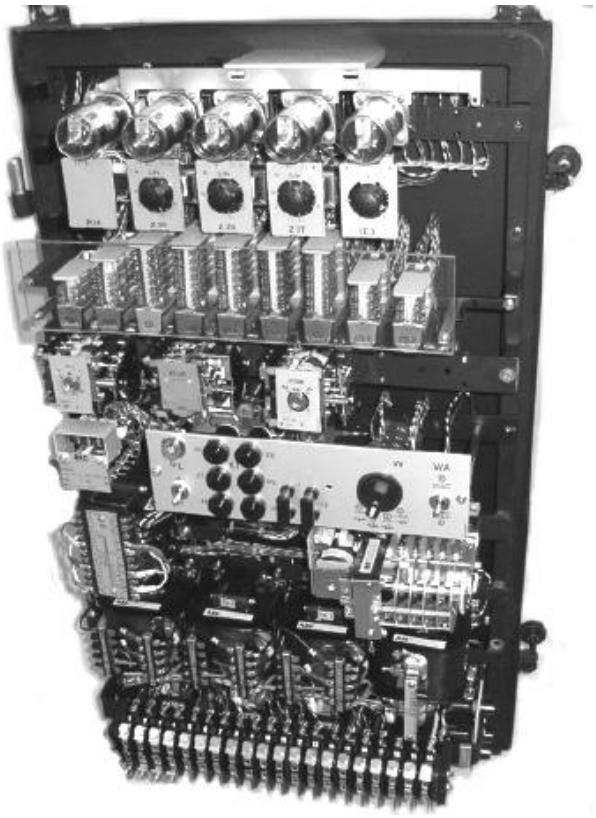
<u>איור 5.13</u>

קטע לוח של התקן הגנת מרחוק של קווים חשובים 160 קילו-וולט, הכיל ממסרים אלקטרומכניים מסוג LZ31 (למעלה), אשר מחוברים בחיבור מקביל לממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מסוג Micom P437 (למטה)

מכשיר הגנה המוצע מבוסס על ממסרים עם מגעים הרמטיים צריך להיות הרבה יותר פשוט, קל וזול יותר מערכת ממסים אלקטרומכניים, הנחוצים להגנה כל ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד אחד. רק במקרה כזה הוא בעלי סיכוי סביר להיכנס לשימוש.

שאלה 6

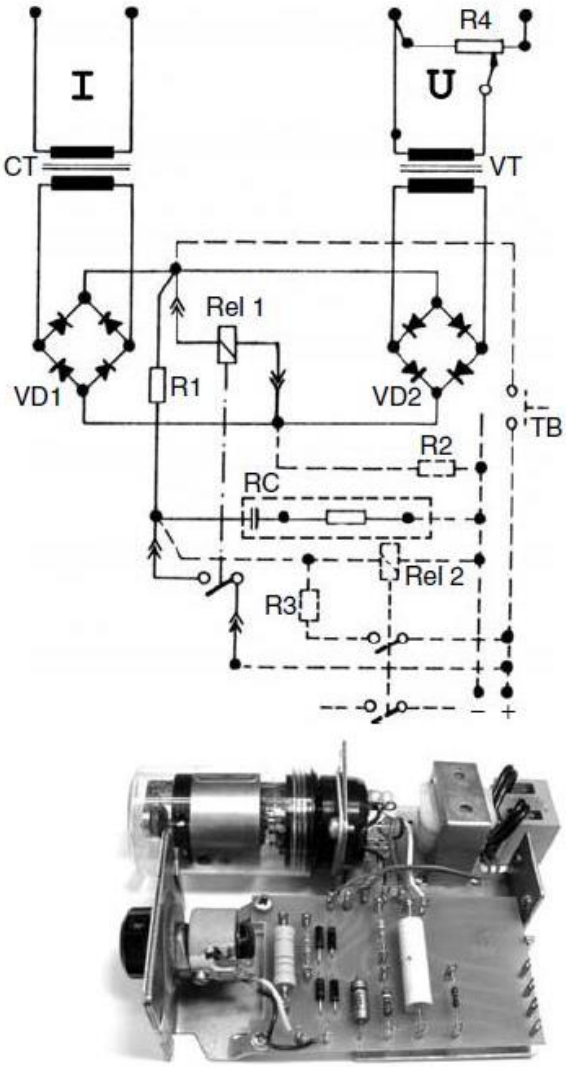
כדי להיות אוניברסאלי ולעבוד ביעילות התקן הגנה המוצע מבחינת אפשרויות הפונקציונאליות צריך להיות זהה לסט של ממסרים אלקטרומכניים. לפיכך, העלות שלו חייבת להיות בערך אותו הדבר. אז למה שהוא יהיה זול יותר?



<u>איור 5.14</u>

ממסר הגנה על קווים LZ31

בואו נבדוק איך פועל ממסר אלקטרומכני. ניקח למשל ממסר אלקטרומכני זרמי עם זמן המתנה תלוי, שבו בעת הגעה לסף מסוים של זרם, דיסק אלומיניום מתחיל הסתובב לאט, ומגע נייד, הקשור לדיסק זה, מתחיל להתקרב לממסר נייח (ממסר מסוג IAC, איור. 5.11). לאחר זמן מה, שהוא מותנה במהירות סיבוב הדיסק (אשר נקבעה על פי כמות הזרם העובר דרך סליל הממסר), המגע יסגור (דרך ממסר ביניים) את מעגל של הסליל המנתק. עבור גוף המפעיל של ההתקן המוצע להגנה על מהממ"מ אין צורך בשום עיכוב זמן, שתלוי בזרם. גוף המפעיל הזה צריך לפעול רק ברמה מסוימת של זרם, אשר קצת נמוכה יותר מתחילת פעולה של הדיסק הנ"ל. זה הכל. אין צורך בשום פונקציה אחרות כי שאר הפונקציות תופעלנה על ידי המהממ"מ אשר ייכנס לפעולה. כלומר, במקרה הזה, במקום ממסרים מורכבים ויקרים עם-עיכוב-פיצוי זמן משתמשים בממסר הכי פשוט הכולל סליל ומגע הרמטי.כדוגמא נוספת, נבדוק כמה סוגים של ממסר הגנה על קווים מרחק.



איור 5.15

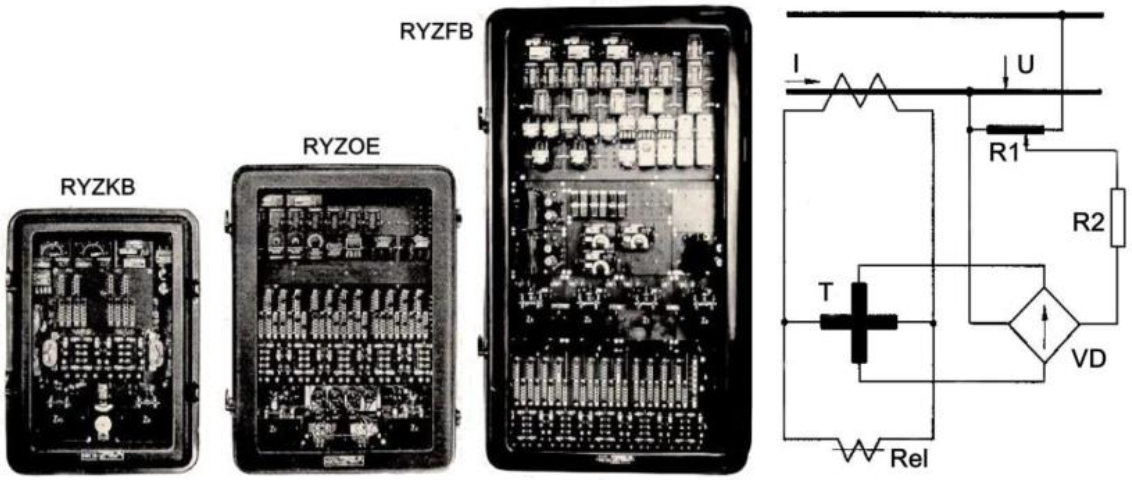
עקרון הפעולה מבנה הגוף המפעיל (starting element)של ממסר הגנה מרחוק מסוג LZ31

הגרסה האלקטרומכנית של הממסר הזה, למשל, מסוג LZ 31, איור. 5.14 מכילה הרבה מכלולי אלקטרומכניים הקשורים ביניהם ומבטיחים שלושה שלבים של מדידת התנגדות קו עד למקום של הקצר, חשיפות זמן מתאימות לשלבי עיכוב זמן האלה, צורה מיוחדת של מאפיינים וכו'. כפי שכבר צוין לעיל, העלות הממסר כזה היא 35-30 אלף דולר.

עם זאת, הפעלתו של המכלול הזה מתבצעת על ידי גוף הפעלה פשוט ביותר, שהוא עוקב אחר האיזון בין הזרם המתח הקו, האיור 5.16. הגוף מתחיל לפעול בעת הפרת האיזון בין הזרם והמתח.

בממסרי הגנה מרחוק מורכבים וגדולים למדי מסוג RYZKB, RYZOE, RYZFB, מתוצרת ASEA בשנות ה-70, האיור. 5.16, מיושמים מספר פונקציות הגנה. עם זאת, כל הממסרים האלה מצוידים בגוף הפעלה פשוט מאוד, אשר מוצג באיור. 5.16. גופים הפעלה האלה היו חלק בלתי נפרד של התקנים מורכבים ולא יוצרו בנפרד. היוצאים מן הכלל הם כמה סוגים של ממסרים, שיוצרו ע"י ChEAZ, למשל, ממסר מסוג KRS-112, איור 5.17, המכיל

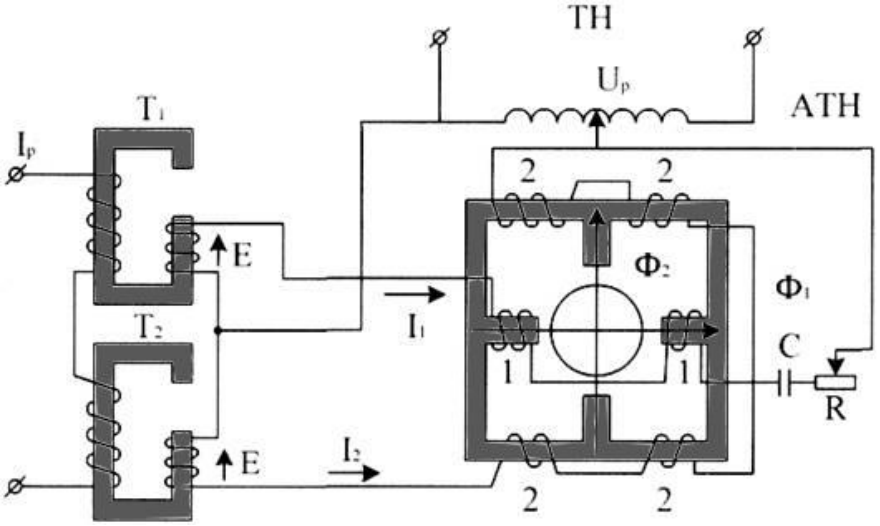
משנקים מיוחדים מנגנון אינדוקציה ארבעה קטבים עם רוטור מסתובב. הממסר הזה, למעשה, מהווה גוף הפעלה נפרד של הגנות מרחוק.



איור 5.16

ממסרים אלקטרומכניים של הגנה מרחוק שונים מסוג ASEA

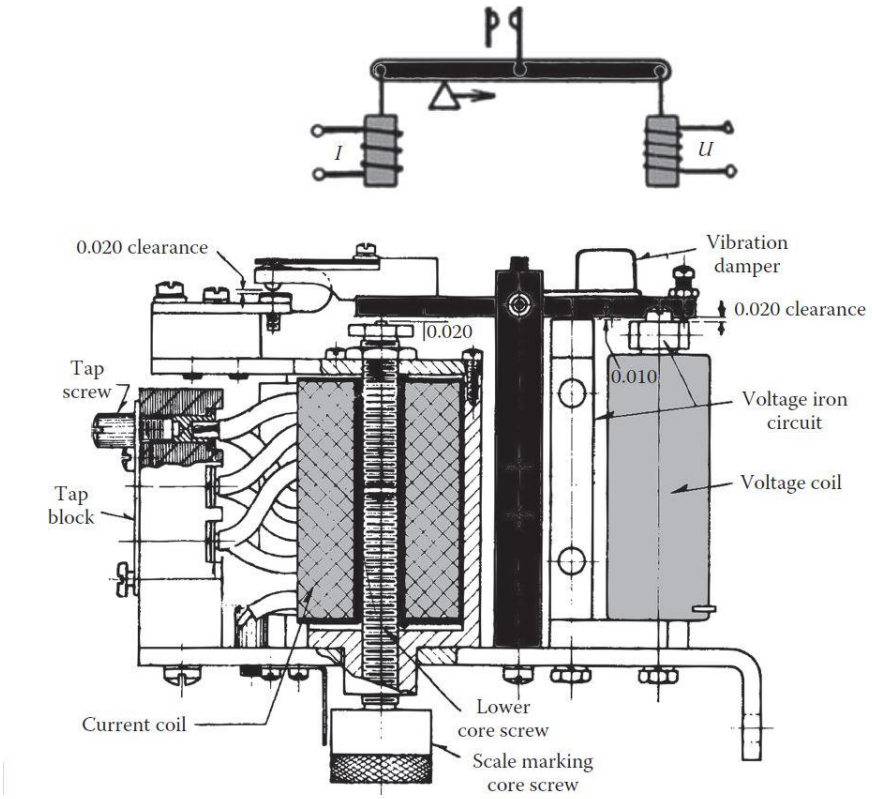
וסכימה של גוף ההפעלה שלהם (תוצרת שנות ה-70)



איור 5.17

ממסר KRC-112 עם מנגנון אינדוקציה

אולם, גם הוא מסובך למדי, יקר ובעל ממדים גדולים. ובכל מקרה, יישום מערכת מיושנת בשילוב עם הטכנולוגיה המתקדמת ביותר של מהממ"מ בקושי אפשר לכנות רעיון טוב.



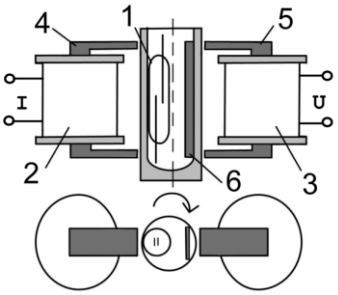
איור 5.18

גוף הפעלה אלקטרומגנטי מסוג בלנס, אשר משתמשים בו בממסר הגנה מרחוק

מסוג HZM (Westinghouse)

מבחינה זו הרבה יותר אטרקטיבי יכול להיות גוף הפעלה של הגנה מרחוק מסוג HZM (Westinghouse), איור. 5.18. זהו מכשיר פשוט מאוד המכיל ליבה עם אסל מתנדנד דמוי T (החלק העליון של האות T) ושני סלילים: של מתח ושל זרם, אשר משפיעים כל קצות האסל. עמדת האסל הזה, עם המגע המחובר אליו, תלויה במאזן בין השדות המגנטיים שנוצרו על ידי הסלילים של הזרם והמתח. היחידה הזו היא חלק מהמנגנון הפנימי של הממסר HZM ומעולם לא יוצר בנפרד.

מגע הרמטי, אשר בנוי על אותו עיקרון של איזון בין הזרם והמתח (איור. 5.19), הרבה יותר קל ואמין יותר [5.11].



איור 5.19

גוף הפעלה להגנת מרחק פשוט ביותר עם סף הפעלה מתכונן. 1 – מגע הרמטי;
2 ו-3 - סלילים עם פיתולי שליטה; 4 ו -5 - ליבות פרומגנטיות שטוחות בצורת Π; 6- מעקף מגנטי

הממסר הזה מגיב להבדל בין השדות המגנטיים הנוצרים על ידי הסלילי המתח והזרם וסף הפעלתו יכול להתכונן בטווח רחב על ידי סיבוב של קפסולה עם מגע הרמטי. גוף הפעלה כזה יכול להיות מיושם בצורה מוצלחת במנגנון הפעלה של התקן הגנה.

לפיכך, המכשיר המוצע עם מספר קטן של גופי הפעלת זרם ומתח פשוטים (מבוססים על מגעים הרמטיים) קל לעין ערוך וזול יותר מאשר ערכה מלאה של ממסרים אלקטרומכניים. בנוסף, גופי הפעלה על מגעים הרמטיים אינם דורשים תחזוקה במהלך פעילותם, וגורמים לעיכוב נמוך משמעותית בזמן התגובה הכללי של ממסר הגנה,הוא בעל רמה גבוהה של בידוד מקלט לפלט, אשר בלתי מושגת עבור ממסרים אלקטרומכניים הישנים.

שאלה 7

במקרים מסוימים, פקודות לניתוק והפעלה מתקבלות ישירות מממסרי ההגנה (למשל, פקודות של הגנת גז על השנאי) ובאותו זמן משוכפלות על ידי שליחת אותות לכניסות דיסקרטיות של מהממ"מ, ובכך מפעילות מנגנון תיעוד מצבי חרום. איך במקרה כזה יפעל ההתקן המוצע, אשר חוסם כניסות דיסקרטיות של מהממ"מ?

במצב כזה, כל בעיות נפתרות בצורה די פשוטה: צריך רק להביא אות מהממסר המפעיל (במקרה שלנו זה ממסר גז) גם לאחת הכניסות של מנגנון הפעלה של התקן. במקרה כזה תשוחרר חסימה מהמהממ"מ ומתעד מצבי חרום יפעל ויתעד אינפורמציה על הפעלת ממסר גז.

שאלת 8

ישנה דרישה ידועה בנוגע למניעת אפשרות הכנסה לסליל המנתק של המתג כל אלמנט נעילה נוסף, אבל בהתקן המוצע, המעגל הזה מנותק ע"י מגע של ממסר נוסף. האם אפשר לקבל מצב כזה?

בפועל, מגע של ממסר נוסף, אשר פתוח בצורה נורמאלית לא נכלל במעגל של הסליל המנתק של המתג, אלא במעגל, המחבר מגע של ממסר פלט מהממ"מ עם סליל מנתק של המתג. כלומר, המגע הנוסף הזה חוסם לא את המעגל של הסליל המנתק של המתג אלא רק מעגל הפלט של המהממ"מ. מעגל הסליל המנתק של המתג נשאר חופשי לחיבור של גל מגע חיצוני או התקנים עם ניהול ידני.

שיטות פעילות ואמצעי הגנה על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים מפני פעימה אלקטרומגנטית

שאלה 9

מה לעשות עם הגנות מורכבות, כגון ההגנה שמספקת בידוד מקפיצות זרמי מגנטיזציה של השנאי ומכילות מסנני הרמוניק 2 ו-5? המכשיר המוצע חייב גם להכיל מסננים כאלה? או דוגמא אחרת: הגנה דיפרנציאלית. כיצד ניתן להבטיח את הפעולה של המכשיר בעת מצב פעילות חירום רק באזור המוגן?

לא, לפעילות של מנגנון הפעלה של התקן הגנה אין צורך במסננים כאלה ואין גם צורך בבידוד מקפיצת זרם מגנטיזציה. הפעלת מנגנון הפעלה של התקן הגנה מקפיצת של זרם מגנטיזציה של שנאי רק משחררת מחסימה ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים למשך כ-10 שניות ולא יותר מזה. חסימה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים מפני הפעלות מיותרות מסופקת ע"י אלגוריתם שלהם. כעבור אותן 10 שניות מנגנון הפעלה של התקן הגנה חוזר למצב מקורי ושוב חוסם את ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד. כנ"ל לגבי ההגנה הדיפרנציאלית. למכשיר מנגנון הפעלה של התקן הגנה לא חשוב היכן נמצאת התקלה: באזור המוגן או מחוצה לו. מה שחשוב בשבילו זה רק נוכחות

זרם K3, ואת אזור התקלה יגלה ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אחרי שמנגנון הפעלה של התקן הגנה ישחרר לו את החסימה. זמן הפעלת המנגנון הפעלה של התקן הגנה הינו כ-6 מ"ש, בהתחשב בזמן התגובה של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד עצמו זה לא משפיע למעשה על הזמן הכולל של פעילות ממסרי הגנות.

שאלה 10

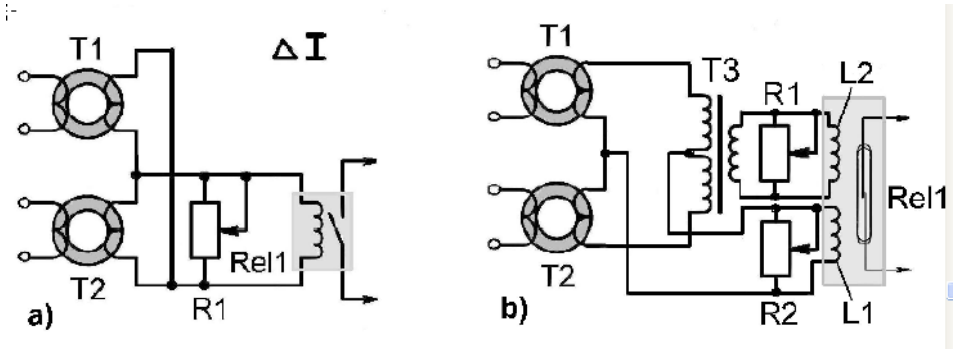
בהפעלה רציפה של ממסר הגנה אלקטרומכני וממסר הגנה מבוסס מיקרו-מעבד האפשרויות של הגנת ממסר למעשה תוגבל ביכולות של ממסר הגנה אלקטרומכני, משום שהוא בעל מאפיינים מוגבלים וצנועים יותר.

האם זה טוב?

לא, זה לא נכון. המכשיר המוצע בשום פנים ואופן לא מגדיר לא את המאפיינים ולא את התכונות של הגנה ממסרית. הוא רק מפעיל את ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ברגע שלפחות אחד הפרמטרים מתוך מכלול פרמטרים שבפיקוח יתקרב אל ערך סף הפעלת הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד. המשך הפעילות של ממסר ההגנה ותגובתו למצב חרום יותנה באופן מלא במאפיינים ובתכונות של הממסר הזה.

בפועל כנראה יימצאו משטרי הפעלה יותר מסובכים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר לא נדונו במאמר זה, אשר עבורם יהיה צורך בפיתוח מנגנון הפעלה מיוחד. מצב כזה לא נשלל.

עם זאת, גם אם יהיה צורך ביצירת מנגנון הפעלה מסוג זה, אז על בסיס שילוב של מגעים הרמטיים ומעגלים מגנטיים יש אפשרות ליצירת מנגנונים כאלה הרבה יותר פשוטים, זולים ויותר מהירים מאשר ממסרי הגנה אלקטרומכניים מסורתיים.



<u>איור 5.20</u>

אפשרויות של מנגנוני הפעלה קוואזיאלקטרוניים של הגנה דיפרנציאלית

למשל, מערכת, מודגמת באיור 5.20 יכולה לשמש לפיקוח על זווית בין זרם חשמלי ומתח או בתור מנגנון מדידת עוצמה.

אפשרויות נוספות מתגלות בעת שימוש בשילוב של אלמנטים מגנטיים ומוליכים למחצה במתח גבוה עם מגעים הרמטיים. לדוגמא, באיור 5.20 א מודגמת מערכת פשוטה, אשר מגיבה להפרש בזרם החשמלי, ובאיור 5.20 ב - עם הקשחת רגישות לזרמי חשמל שונים לפי זרם ישר.

שאלה 11

הפרעות בתדר גבוה והפרעות אימפולס יכולות לחדור לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד גם דרך מעגלי זרם ומתח. כיצד ניתן להגן עליהם באמצעות השיטה המוצעת?

השאלה הנוגעת לכדאיות הגנה על מעגלי זרם חשמלי ומתח ושיטות טכניות ספציפיות, אשר מסוגלות לספק הגנה מסוג זה דורשות המשך מחקר. הנקודה היא שזרמי הקלט והמתח מגיעים למעגלים האלקטרוניים של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד דרך שנאי קלט חשמל ומתח, אשר ישנם בכל ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר ממירים ערכי כניסה די עוצמתיים לאותות עם עוצמה חלשה. אותות כאלה מהווים וולטים בודדים, אשר מגיעים לממיר אנלוגי דיגיטאלי (מא"ד), אשר בתוכו אותות אנלוגיים עוברים קוונטיזציה לפי רמות ומומרים לקוד דיגיטאלי. תהליך קוונטיזציה (של דיסקרטיזציה) מתבצע בתוך ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד עם תדירות די נמוכה 600-1200 הרץ ולכן כל התהליך לוקח זמן מסוים, אשר גבוה פי כמה ממשך הפעימה של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. במשך פעילות הפעימה של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת ממיר אנלוגי דיגיטאלי פשוט לא יספיק לבצע שינויים נדרשים. לכן אופי השפעה על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד של פעימות השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת, אשר חדרו דרך מעגלי זרם ומתח יוגדר על פי הפרעות אינדוקטיביות וקונדוקטיביות, אשר לא שונות בהרבה מהפרעות מסוג זה, אשר חדרו לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בדרכים אחרות.

עם זאת, קיימת גם אפשרות של היחלשות משמעותית של הפרעות כאלה על ידי כיבוי מעקפים מעגלי זרם ומתח משניים של שנאי פלט פנימיים הנ"ל. לצורך כך יצרן של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריך להוציא את המעגלים האלה למחבר חיצוני נפרד כדי לחבר דרכם מגעים הרמטיים של המערכת ההגנה המוצעת למעגלים האלה.

לפיכך, מן הניתוח הנ"ל עולה בבירור כי מימוש מעשי בשיטת הגנה המוצעת על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מבחינה טכנית וכלכלית ריאלית למדי וניתנת לביצוע בתנאי הפרדת פונקציות של ממסרי הגנה מכל הפונקציות אחרות אשר מועמסות היום על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בכמויות גדולות מדי. יישום הדבר הזה חייב להתבצע כמובן ע"י מפעלים יצרנים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, שיכולים להציע לצרכנים מנגנון הפעלה של התקן הגנה כאופציה נוספת להגברת בטיחות ואמינות בהפעלת ממסרי הגנה באובייקטים חשובים.

5.4 הגנה על מערכת הפעלת המפסק מרחוק

עקב נטייה שלילית להעמיס על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד פונקציות נוספות, אשר אין להן קשר לממסרי הגנה [5.12, 5.13] הפעלת צעדי הגנה על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד המוצעים לעיל בחלק מהמקרים תהיה קשה למדי. מדובר בשימוש נפוץ בממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד להפעלת מתג שליטה מרחוק. ברור לחלוטין כי לשימוש מסוג זה בממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד אין שום דבר משותף עם פונקציות הגנה ממסרית, ואת החיבור מרחוק לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד באמצעות ערוצי תקשורת במטרת שינוי מצב המתג מאוד קשה להבדיל באמצעות כלי חומרה מהתקפות סייבר.

כפי שראינו לא פעם קודם לכן, את המשימה של שיפור אמינות ממסר ההגנה לא ניתן לפתור כאשר פועלות שתי פונקציות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ובמקביל מופעלות פונקציות שאינן קשורות להגנה ממסרית, דוגמת פונקציה פופולארית כמו ניטור תקינות ציוד חשמלי, הפעלת מתגים בשלט רחוק וכד'.

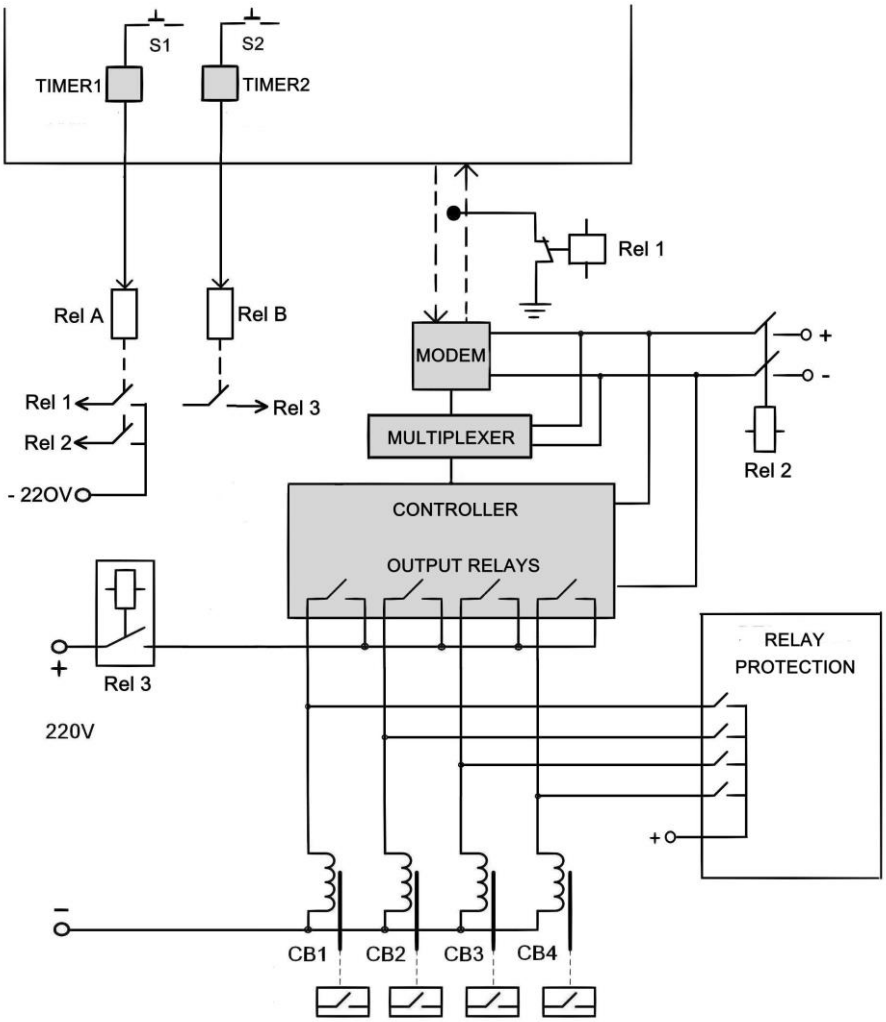
ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריך לשמש אך ורק לפתרון בעיות הגנה ממסרית. קל וחומר, שלפתרון בעיות אחרות, דוגמת ניטור ציוד חשמלי, יש כיום בשוק כמות גדולה מערכות מיוחדות, החל מממסרים פשוטים, אשר

עוקבים אחרי שלמות המעגל המנתק סליל המתג, ועד למערכות מורכבות העוקבות בזמן אמת אחרי הרכב הגזים, מעורבבים בשמן השנאים או אחרי רמת פריקות בבידוד. לפי דעתנו גם מתג שליטה מרחוק חייב להיות בהפרדה מההגנה הממסרית וצריך להתבצע באמצעות מכשירים מיוחדים, המיועדים לכך. רק במקרה כזה יש אפשרות לשפר אמינות של הגנה ממסרית ולהגן עליה בצורה אפקטיבית מפני השפעול הרסניות מכוונות מרחוק. פיצול פונקציות מסוג זה מאפשר לא רק הגנה על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד עם מידת יעילות גבוהה אלא גם להוציא לפועל מערכת שליטה מרחוק על המתגים (מתג שליטה מרחוק מאובטח).

מערכת משמ"מ מוצע, איור 5.21, היברידית ומשלבת בתוכה גם בקר מיקרו-מעבד עם ערוץ רשתי להעברת נתונים וגם ערוץ הכבלים עם ממסר אלקטרומכני. המטרה העיקרית של המערכת המוצעת היא למנוע שינויים בלתי מורשים במצב המתגים בעת מתקפת סייבר או במצבים של נזק להתקנים אלקטרוניים הכלולים במערכת. מטרה משנית של המערכה היא הולכת שיפור ביכולת עמידה שלה שמירת יכולת התפקוד לאחר השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. הרעיון הכללי של מערכת כזאת הוא כי כל פקודת שינוי מצב המתג, שמשודרת בערוץ רשתי, חייבת להיות מאושרת על ידי הפעלה קצרה מרחוק של ממסר אלקטרומכני בתחנת המשנה על ידי אספקת מתח לסליל שלו באמצעות כבל רזרבי רגיל. מדוע יש צורך בשימוש בממסר אלקטרומכני ומדוע אי אפשר להשתמש בערוץ מאשר על בסיס קו קשר סיב אופטי?

הבעיה היא כי קו קשר סיב אופטי לא פותר את הבעית הגנה מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת, משום שקווי קשר סיב אופטי מסוג זה משני הצדדים מכילים מרבבים מורכבים מבוססי מיקרו-מעבדים, אשר מספקים המרת אותות חשמליים ואותות אור בקצה אחד של קו קשר סיב אופטי ושיחזור אותות חשמליים מאותות אופטיים בקצה השני. כפי שהציגו המחקרים שבוצעו על ידנו בנוגע לסוגים מסוימים של מרבבים [5.14], הם לא מסוגלים לעמוד אפילו במתחי יתר של פעימות סטנדרטיות בהתאם לדרישות התאמה אלקטרומגנטית (דה"א).

במקרים של נזק למרכיבים פנימיים של מרבבים תחת השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת מצב של מעגלי פלט שלהם יהיה בלתי צפוי. אם מרבב כזה לא יוכל להעביר פקודה לשינוי מצב המתג לא תהיה שום קטסטרופה, אבל אם מעגלי הפלט שלו יהיו במצב מופעל אזי אי אפשר להימנע ממצבים לא נעימים. כנ"ל בנוגע לכל המרכיבים אחרים של מערכת מתג שליטה מאובטחת מרחוק מוצעת (מודם, בקר). נוסף על כך, משום שהנחת קווי קשר סיב אופטי מוקצים והתקנת ציוד הממשק די יקרים, אז כבר היום קיימת נטייה לוותר על שימוש בקווי קשר סיב אופטי מוקצים ושימוש ברשתות מחשב קיימות על בסיס כבלים זולים עם זוג שזור. יתר על כן, במטרת הוזלה נוספת של מערכות בקרה, הגנה ממסרית ומערכות אוטומטיות, שוקלים בכובד ראש את האפשרות מעבר לטכנולוגיות אלחוטיות וויי – פיי. בכל מקרה, יצרני ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מובילים רבים בכל העולם כבר היום מייצרים אותם עם מודמים מובנים של Wi-Fi. למען הדיוק, הרעיון של העברת כל המערכות לייצור חשמל לתקשורת על גבי רשתות מחשב רגילות, כולל רשתות אלחוטיות - זהו הרעיון המרכזי של קונספט "רשתות חכמות" (smart gird). בהקשר זה גדלה רלוונטיות פיתוח מערכות הגנה מיוחדות ומערכות הגנה ממסריות וכן כן ניהול בשלט רחוק במכשור תקשורת מפני השפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות, אשר כוללות השפעות אלקטרומגנטיות והתקפות סייבר, שלא קשורות לרשתות מחשב ובעלות איתנות מוגברת מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת.



איור 5.21

המבנה המוצע של שליטה מפסקי הזרם מאובטחים מרחוק (משמ"מ)

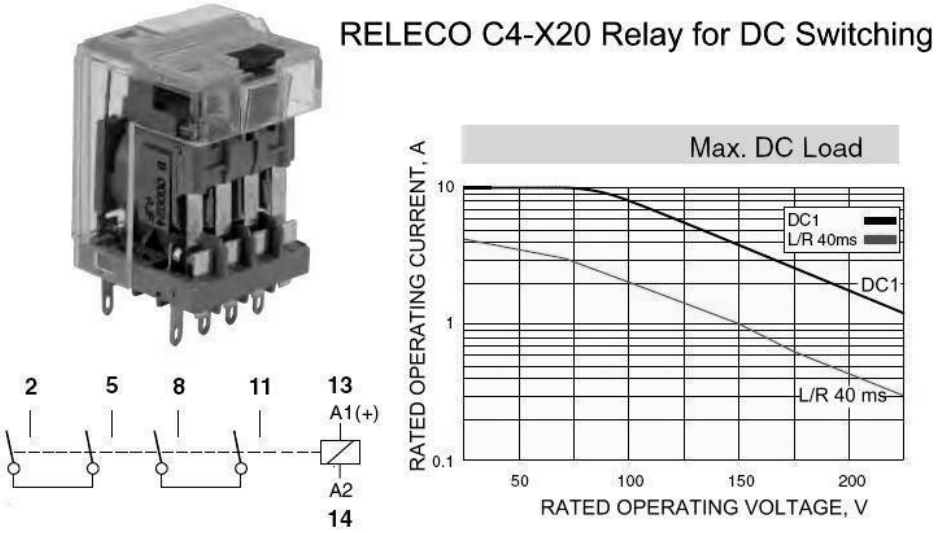
מעגלי אספקת חשמל מודגמים בצורה סכמאטית לפשטות כסקיצה וזאת הסיבה לכך שכאלמנט הגנה מסוג זה אנו בחרנו בממסרים אלקטרומכניים, נשלטים באמצעות מתח אופרטיבי עם כבלי בקרה. על מנת להגן על הערוץ הנוסף מפני חיבור חיצוני זדוני והפעלה בלתי מאושרת של ממסרים אלקטרומכניים, משתמשים בחוטים מוליכים חשמל, השייכים לכבלי בקרה שונים, ובמקום ממסר אחד משתמשים בשני ממסרים RE1A ו-RE1B איור 5.21. ברור שסלילי ממסרים האלה וחוטים מולכים חשמל של הכבלים, אשר על גביהם מתבצעת אספקת חשמל, צריכים להיות מאבטחים (לדוגמא באמצעות ווריסטור) מפני מתחי יתר של אימפולסים, אשר יכולים להופיע בחוטי חשמל האלה תחת השפעה של אימפולס עוצמתי של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. מעבר לכך רצוי לבצע אספקת חשמל לממסרים האלה באמצעות זרם-חליפין בתדירות תעשייתית עם כבל, אשר מחובר לנתק במעגל אספקת החשמל, ובצד תחנת כוח משנה רצוי להשתמש בשנאי מפריד. צעדים אלה ימנעו הפעלת הממסרים RE1A ו-RE1B מזרמי חשמל בתדירות אולטרה נמוכה מכבלים תת-קרקעיים תחת השפעה של E3 פעימה אלקטרומגנטית.

במקרים בהם שימוש בכבלי בקרה לא ניתן לביצוע בשום תנאי, בשל המרחק הגדול של חדר בקרה מתחנת כוח משנה, יש אפשרות לשימוש בקו קשר סיב אופטי כערוץ תקשורת מאשר. עם זה צריך לקחת בחשבון הפחתת מיגון

המערכת מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. על מנת למנוע שליחת פקודות ספונטאניות, בלתי רצויות לשינוי מצב המתגים עקב פגיעה במנגנונים אלקטרוניים של המערכת, הם צריכים להכיל מנגנוני אבחנה עצמית.

ערוץ קו קשר סיב אופטי צריך להכיל מנגנון בקרה תמידית של תקינות עצמית, כמו כן מנגנון בקרת מצבי מתג RE1A ו-RE1B, והבקר - במנגנון פנימי של אבחנה עצמית, אשר מופעל מייד אחרי הפעלת ממסרים RE11 ו- RE12 ומכילה גם סקירת מצב ממסרי הפלט (הם צריכים להיות מנותקים) ותקינות ערוץ התקשורת. בעת גילוי תקלה, מנגנון אבחנה עצמית צריך לחסום המשך פעילות הבקר. בנוסף לכך, לצורך הגנה על המערכת מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת צריכים להשתמש בשיטות שונות של הגנה פסיבית, המתוארות בסעיף 4.

רק במקרה של קבלה בחדר בקרה אינפורמציה על תקינות של כל האלמנטים של המערכת, יכול להתקבל אישור לשימוש בה לצורך הפעלת מתגים בשלט רחוק. במערכת מוצעת כל פקודה לשינוי מצב המתגים, אשר מועברת בערוץ רשתי מכל סוג, צריכה להיות מלווה בהפעלת קצרה מרחוק של שני ממסרים RE1A ו-RE1B בכבל בקרה (ייתכן אופטי). מגעים של הממסרים האלה מפעילים ממסרי ביניים אלקטרומכניים מקומיים: RE11 (משחרר חסימה מערוץ תקשורת רשתי) RE12 (מספק חשמל למנגנונים אלקטרוניים של המערכת)RE13 (מפעיל מעגל אספקת חשמל של סלילי המתגים). כל הממסרים המקומיים האלה יכולים להיות שונים במאפיינים. לדוגמא ממסר 11RE – ממסר בתדירות גבוהה, RE13 - ממסר עם מגעים עוצמתיים, אשר מיועדים למיתוג (חליפין) עומס אינדוקטיבי על זרם ישר. קיום של שני ממסרי בקרה RE1A וRE1A עם ערוצי הפעלה נפרדים מגביר בטיחות המערכת מפני גישה לא מרשית.



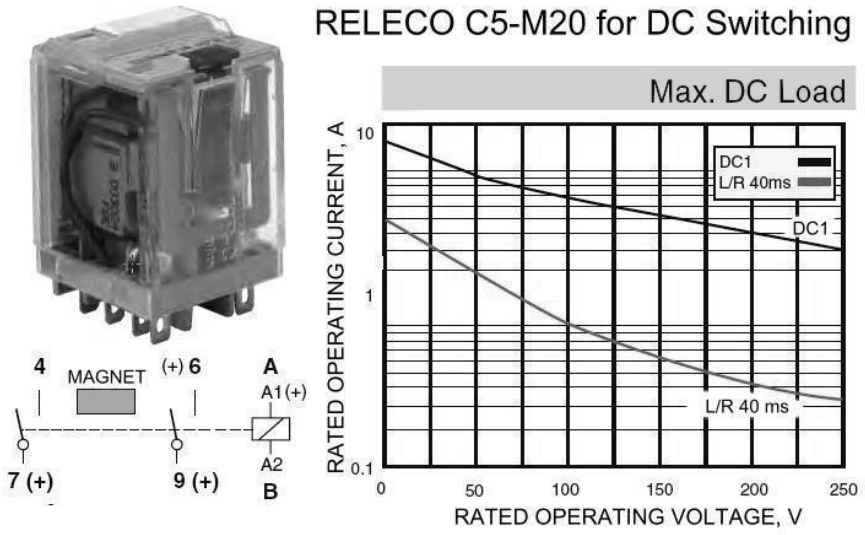
<u>איור 5.22</u>

ממסר מסוג C4-X20 של חברת RELECO (עם כיסוי מרוחק חלקית)

עם שני מגעים עם שני נתקים ויכולת מיתוג שלו על זרם ישיר

הראשון מופעל RE1A, ולאחר העברה מידע נחוץ בנוגע לשינוי במצבים של מתגים כאלה או אחרים לבקר ולאחר סגירת המגעים של בקר ממסר יוצא תואם מופעל ממסר RE1B ובמגע שלו מפעיל את הממסר RE13. משך מצב מופעל של ממסרי RE1A ו-RE1B מוגבל באופן אוטומטי ע"י טיימרים בכדי למנוע חיבור תמידי של הממסרים האלה בעת טעות הצוות. למעשה, זה פרק זמן קצר ותוך פרק זמן כזה אי אפשר לבצע התקפת סייבר.

וחסימת ערוץ תקשורת וניתוק אספקת חשמל של הבקר, מעבר לפרק זמן קצר הזה, שוללים סכנה של הפעלה מוקדמת של ממסרי הפלט של הבקרים כתוצאה מהתקפת סייבר עם שינוי לא מורשה במצבי המתגים בהמשך, בעת הפעלת ממסר RE1B.



איור 5.23

ממסר מסוג C5-M20 של חברת PELECO עם שני מגעי סגירה ומגנט מכבה קשת ויכולת מיתוג של המגעים שלו להעמסה אינדוקטיבית

איור 5.24

ממסר מסוג RMEA-FT-1 עם מגע סגירה אחד, עם נתק משולש, אשר מסוגל לבצע קומטציה של זרם ישיר עד A3 בהעמסה אינדוקטיבית במתח V220 (יצרן: S.A. RELEQUICK)

אותם צעדים מפחיתים באופן משמעותי את הסבירות לפגיעה במכשור אלקטרוני רגיש (מודם, מרבב, בקר) מפגיעה כתוצאה מהשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת.

לאחר מתקפת סייבר מתועדת או פעימה אלקטרומגנטית, שליטה מחרוק במתגים צריכה להיות אסורה עד לבדיקה מיוחדת, משום שמצב הבקר לאחר השפעות כאלה בלתי ידוע.

ממסרי הפלט של הבקר יכולים להיות מעטי עוצמה, תקניים, אלה שבד"כ מסופקים עם הבקרים. לעומת זאת הממסר RE13 חייב להיות בעל מגעים , אשר מסוגלים להפעיל עומס אינדוקטיבי מספיק חזק (סלילי בקרת מתגים) על זרם ישיר ועם מתח V220.

ניתוח מפרטים של סוגים נפוצים של ממסרים אלקטרומגנטיים מראה כי רובם לא מיועדים לקומוטצית (ואפילו להפעלה) עומסים אינדוקטיביים על זרם ישיר עם מתח V220 [5.15]. למטרה זאת משתמשים בממסרים עם מבנה מיוחד: אשר מבטיחים ניתוקים רציפים רבים במעגל קומוטציה (איור 5.22) או אלה שמכילים מגנט סמוך למגעים, אשר נועד לדחיפה של הקשת מהמרווח בין מגעים (איור 5.23).

ישנם גם ממסרים של שלושה ניתוקים למגע, איור 5.24, אשר מאפשרים לשלוט בסלילי ניתוק של מתגים במתח גבוה מסוג ישן, עם צריכה גבוהה של החשמל.

באותם מקרים, כאשר שימוש בכבל בקרה לשליטה בממסרים RE1A ו-RE1B לא ניתן לביצוע בשל מרחק הגדול של חדר בקרה מתחנת כוח משנה, יש אפשרות להשתמש בקו קשר סיב אופטי כערוץ תקשורת מאשר. עם זה צריך לקחת בחשבון הפחתת מיגון מערכת מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. על מנת למנוע שליחת פקודות ספונטאניות בלתי רצויות לשינוי מצב המתגים עקב פגיעה במנגנונים אלקטרוניים של המערכת הם צריכים להכיל מנגנוני אבחנה עצמית.

ערוץ קו קשר סיב אופטי צריך להכיל מנגנון בקרה תמידית של תקינות עצמית, כמו כן מנגנון בקרת מצבי מתג RE1A ו-RE1B, והבקר - במנגנון פנימי של אבחנה עצמית, אשר מופעל מייד אחרי הפעלת ממסרים RE11 ו- RE12 ומכילה גם סקירת מצב ממסרי הפלט (הם צריכים להיות מנותקים) ותקינות ערוץ התקשורת.

בעת גילוי תקלה מנגנון אבחנה עצמית צריך לחסום המשך פעילות הבקר.

רק במקרה של קבלה בחדר בקרה אינפורמציה של תקינות כל האלמנטים של המערכת, יכול לצאת אישור לשימוש בה לצורך שליטה מרחוק במתגים.

כפי שניתן לראות, בשני המקרים, קרי, גם לצורך הגנה על ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים וגם לצורך הגנה על מתג שליטה מרחוק, משתמשים בממסרים מכאניים, אולם, השימוש בממסרים האלה שונה, מה שקשור לשוני באלגוריתם פעולה בין ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים ומתגי שליטה מרחוק. אם במקרה הראשון שליחת הפקודה למתגים מתבצעת בצורה אוטומטית, בעת שינוי משטר פעילות מבוקר של רשת חשמל או ציוד אספקת חשמל וכוח, אז במקרה השני שליחת הפקודה למתגים מתבצעת ידנית ע"י צוות הפיקוח. לדבר הזה קשורים עקרונות שונים של ביצע הגנות.

כך במקרה הראשון חשוב להגן על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר פועל בצורה אוטומטית, מפני שינויים בלתי מורשים בתכנות שלו ובהגיון הפנימי, אשר גורמים להפעלת ממסרי הפלט ואין אפשרות לבדוק נכונות הפקודות לפני הפעלת ממסרי פלט.

בנוסף לכך, אין שום אפשרות לשלוח לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד אות חיצוני פותר כלשהו, בעת כניסה למצב חרום ברשת מפוקחת והאות המכריע הזה צריך להתגבש במקום, בעת היווצרות מצב החרום. לעומת זאת במקרה השני, כאשר האובייקט המוגן (מתג שליטה מרחוק) לא פועל בצורה אוטומטית, הסוגיה נהיית פשוטה יותר משמעותית ויש אפשרות להשתמש באות פותר חיצוני. בנוסף לכך, במצבים קריטיים מתג שליטה מרחוק יכול להיות בכלל מבוטל. ההבדלים הטבעיים האלה בעקרונות ארגון הגנה מפני השפעות דסטרוקטיביות זדוניות שוב פעם תומכים בכדאיות הפרדת המשימות של ההגנה הממסרית ושליטה במתגים מרחוק.

ביבליוגרפיה לפרק 5

5.1 Gurevich, V.I. Issues of Philosophy in Relay Protection - The World of Technology and Engineering, 2013, No. 1 pp. 56-58.

5.2. Gurevich V.I. The Cyber Weapon Versus Power Engineering - PRO Electricity, 2011, No. , pp. 26-29

5.3. Gurevich V.I. Problems of the Electromagnetic Impact on Microprocessor Based Protective Relays. Ch. 1 - Components and Technology, 2010, pp. 60-64.

5.4. The Impact of Implementing Cyber Security Requirements Using IEC 61850. - CIGRE Working Group the B5.38, August 2010.

5.5. Gurevich, V.I. Intellectual Networks: New Perspectives or New Problems? - "The Electrical Technology Market," 2010, No. 6 (Ch. 1); 2011, No. 1 (Ch. 2).

5.6. Gurevich, V.I. On Certain Approaches to Finding a Solution to the Problem of the Electromagnetic Compatibility of Protective Relays in Electrical Power Engineering. - Industrial Power Engineering, 1996, No. 3, pp. 25-27.

5.7. Gurevich, V.I. Electromechanical and Microprocessor Based Protective Relays. Is Symbiosis Possible? - Relay Protection and Automation, 2013, No. 2, pp. 75-77.

5.8. Gurevich, V.I. A Protective Relay Protection Device - Control Engineering Russia, 2013, No. 3, pp. 47-51.

5.9. Gurevich V.I. Protection Devices and Systems for High-Voltage Applications. - Marcel Dekker, New York, 2003, 292 p.

5.10. Gurevich, V.I. Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering - CRC Press (Taylor & Francis Group) Boca Raton - London - New York, 2008, 419 p.

5.11. Gurevich, V.I. Sealed Contact Reed Relays With a Regulated Activation Threshold - Components and Technology, 2013, No. 11, pp. 30-33.

5.12. Gurevich, V.I. The Technical Process in Relay Protection - Dangerous Trends in the Development of Relay Protection and Automation - "The Electro-technical News", 2011, No. 5, pp. 38-40.

5.13. Gurevich, V.I. On Multifunctional Relay Protection "PRO Electricity," 2012, Nos. 42-43, pp. 45-48.

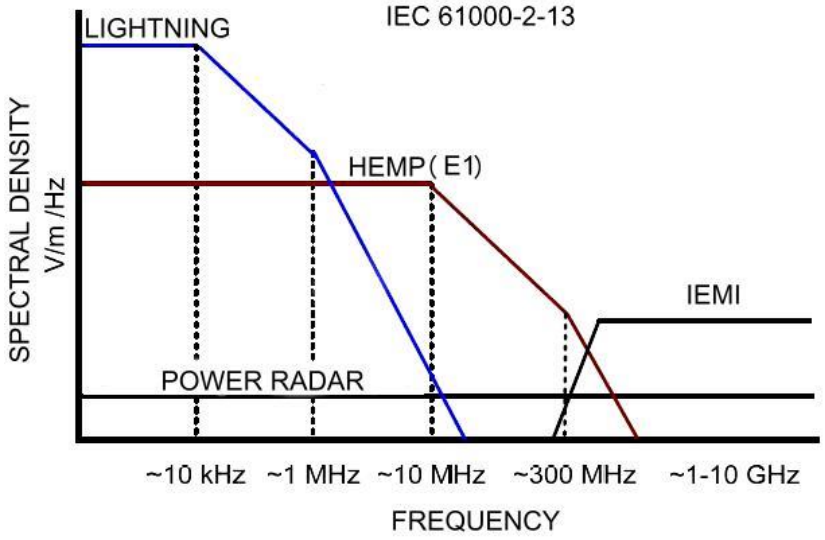
5.14. Gurevich, V.I. Current Problems in Relay Protection: An Alternative View - "The Electrical Power Engineering News," 2010, No. 3, pp. 30-43.

5.15. Gurevich, V.I. The Idiosyncrasies of Relays that are Designed to De-energise High-Voltage Circuit Breaker Trip Coils "Electricity," 2008, No. 11, pp. 22-29.

6. בדיקת עמידות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מפני השפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות

6.1 ניתוח מקורות של השפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות

דרישות יציבות עבור ממסרי הגנה (כולל ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד) מפני השפעות אלקטרומגנטיות מובאות בתקנים של ועדה בינלאומית בחשמל - IEC (וב"א) סדרה 60255. דרישות כלליות לתאימות אלקטרומגנטית (ת"א) אל מכשור אלקטרוני – בתקנים של IEC סדרה 61000. בתקנים זהים לסדרה IEC 61000 משתמשים גם ברוסיה. אולם, כל הדרישות האלה מתייחסות למה שמכונה "השפעות אלקטרומגנטיות לא מתוכננות", קרי השפעות (הפרעות) ממקור טבעי. אבל השפעות אלקטרומגנטיות ממקור טבעי המיועדות פגיעה במכשור אלקטרוני - השפעות הרסנית אלקטרומגנטיות מכוונות - משפיעות על המכשור במידה הרבה יותר חזקה מאשר השפעות התואמות תקנים וב"א ולכן התקנים הרגילים של IEC לא יכולים להיות מיושמים במקרה הנדון.



איור 6.1

צפיפות ספקטראלית של מקורות שונים של השפעות אלקטרומגנטיות

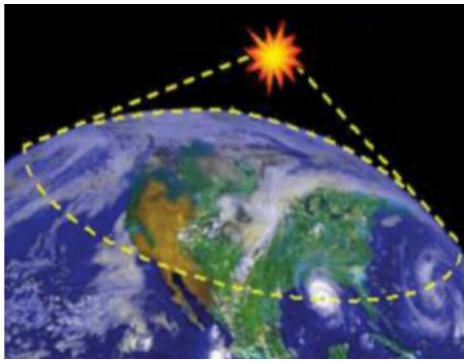
מכוונות בהתאם לתקנן IEC 61000-2-13

לצורך פיתוח המלצות ספציפיות בנוגע לדרישות טכניות בעת ניסוי של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד לאיתנות מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת יש צורך בפיתרון של כמה סוגיות.

1. לסווג סוגים של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת ולהכליל את הפרמטרים טכניים שלהם.
2. להעריך את הפרמטרים של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת, אשר משפיעה על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בתנאי שימוש בפועל.

3. על סמך האנליזה של תקנים קיימים בתחום השפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות לנסח דרישות טכניות לציוד, אשר נדרש לסימולציה השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת וניסוי בממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד לבדיקת איתנות מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת.
4. לערוך בדיקת שוק של הציוד אשר מיועד לבדיקות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד.

כפי שניתן לראות באיור 6.1. לברק יש צפיפות ספקטראלית של שדה קרינה אלקטרוני הרבה יותר גדולה מאשר אפילו למקור קרינה כה עוצמתי כפעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני. אולם, יחד עם זה יש לקחת בחשבון, כי כל האנרגיה של הברק מרוכזת במה שמכונה מוביל הדרגתי והוא בעל אזור פגיעה נקודתי, לעומת זאת קרינה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני משתרעת על פני שטח עצום של כדור הארץ, איור 6.2.



<u>איור 6.2</u>

אזור פגיעה של ברק ופעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני

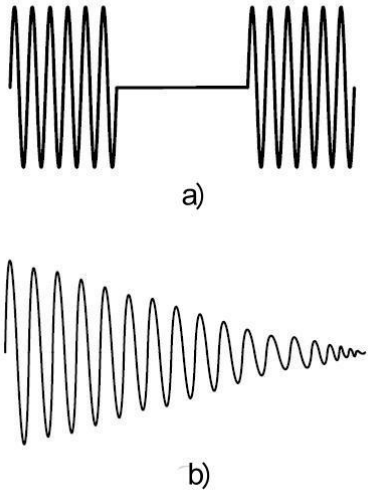
כל אחד מהסוגים האלה של השפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות מחולק בתורו לתת סוגים של השפעות. פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני כוללת בתוכה שלושה סוגים שונים של ההשפעה בהתאם לשלושת המרכיבים של הפעימה אלקטרומגנטית: E1 (זמן מוקדם), E2 (זמן ביניים), E3 (זמן מאוחר), אשר מתוארים בסעיף 2.

משום שמדובר על ניסוי בציוד אלקטרוני אזי בהמשך נקודת עניין שלנו תהיה רק מרכיב 1E, כמרכיב עוצמתי ביותר ומסוכן ביותר בעבור הציוד האלקטרוני. הפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות ראה סעיף 2 מחולקות לשני סוגים:

1. קרינה אלקטרומגנטית בעלת פס צר ומכוון או פס אולטרה רחב (HI POWER MICRO WAVE). קרינה כזאת יכולה להופיע מ
   - גנראטור, אשר פועל על תדר קבוע
   - גנראטורים, אשר מקרינים מקבצים של פעימות בתדר גבוה, בתדרים ממאות הרץ עד עשרות קילו הרץ (איור 6.3)
   - גנראטורים עם טווח תדרים אולטרה רחב מעשרות מגה הרץ ועד מאות ג'יגה הרץ
   - גנראטורים, המקרינים אותות תדרים גבוהים דועכים במשרעת (איור 6.3)

- גנראטורים של פעימות עם עוצמת שיא מוקרנת מעשרות מגה וואט עד יחידות גיגה וואט. הגנראטורים האלה מייצרים פעימות קצרות מאוד טווחים של ננו שניות (יחידות-עשרות ננו שניות) וסובננושניות (משך הפעימה עשרות-מאות פיקה שניות), אשר מובלות בתדרים 0.1- 10 קילו הרץ ויותר.

2. קרינה אלקטרומגנטית פעימה עם מקור בפיצוץ, אשר רוב מהם מבוסס על שימוש במקרין גלי הלם, אשר מייצר עוצמה של (1 גיגה וואט ויותר) פעימה קצרה במשך פחות מ 1 ננו שנייה, עם תדירות הקרינה המתקבלת – ממאות מגה הרץ עד מאות גיגה הרץ בפעימה אחת.



<u>איור 6.3</u>

סוגים מסוימים של אותות עם מקור בהפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות
א. חבילות של פעימות בתדר גבוה עם אמפליטודה זהה
ב. פעימות בתדר גבוה עם דעיכה באמפליטודה, אשר חוזרות עם תדרים של כמה קילו הרץ

בניגוד לסיווג המובא לעיל תקן NATO AECPT 250 ED2/0: LIFLET 2011 -257 HI POWER MICRO WAVE מחלק הפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות לארבעה סוגים לפי עקרון שונה:

א) מקור קרינה רדיו אלקטרומגנטית נייד, אשר מכוון לעבר מטרת הפגיעה וממוקם מחוץ לאזור מוגן של המטרה, אבל כזה שמסוגל להתקרב אליה למרחק די קרוב, המבטיח פגיעה אפקטיבית.

ב) מקור קרינה רדיו אלקטרומגנטית קומפקטי נישא, אשר יכול להיות מסופק לתוך אזור מוגן, מתחת לבגדים של בן אדם או בצורה של תיק, ומותקן בסביבה ממש קרובה למטרת הפגיעה. מקור חלש עוצמה מסוג זה יכול להיות הרבה יותר מסוכן מאשר מקור קרינה רדיו אלקטרומגנטית עוצמתי מרוחק, משום שהקרינה שלו לא מוחלשת בשום דבר.

ג) מקור מגע של קרינה רדיו אלקטרומגנטית, אשר מספק כוח ישירות לחוטים ולכבלים חשמליים אשר מחוברים לציוד אלקטרוני, המהווה מטרת הפגיעה, למשל כבלי תקשורת.
מקור כזה יכול להיות ממוקם גם בתוך וגם מחוץ לאזור המוגן.

ד) מקור קרינה רדיו אלקטרומגנטית מסוג פיצוצי, אשר בעל צורה של פצצה אלקטרומגנטית או פגז, המקרין פעימה אלקטרומגנטית קצרה, אשר חודרת לתוך המכשור דרך קירות, חלונות ודרך חוטים וכלבים היוצאים מחוץ לבניין.

תקן נאט"ו בעבור מקורות קרינה רדיו אלקטרומגנטית המפורטים לעיל מצביע על עוצמת קרינה מקסימאלית של אנטנה 1 גיגה וואט/מ"ר, אשר מוגבלת בחוסן חשמלי של אוויר, השווה 1 מגה וולט/מ^2. ראוי לציין, כי במקורות ספרות רבים אחרים מציינים ערך שונה לחוסן חשמלי של אוויר בתנאי אקלים נורמאליים: 3-2 מגה וולט/מ^2. בנוסף לכך, אפילו בשדות חשמליים בלתי רגילים עולה עוד מתח אוויר בפריקת פעימה וחוצה את הערך התקני למתח AC 50 הרץ. יחס אמפליטודה של מתח פעימה חודרת אל המתח בתדר 50 הרץ מכונה מקדם פעימה k_i. במקרה של שדות חשמליים לא הומוגניים k_i =1.1-1.3 צריך לקחת בחשבון כי בתנאים של לחץ אוויר מופחת (באזורי הרים גבוהים) או במקרה של אבק ולחות באוויר (ערפל) חסינות חשמלית של אוויר יכולה לפחות משמעותית. ירידה בחסינות חשמלית של אוויר נראית גם במהלך של יינון האוויר תחת השפעה של פריקה בתדירות גבוהה. אף על פי כן בשנת 2008 במכון לאלקטרוניקה אולטרה מדויקת בסניף סיבירי של אקדמיה למדע של רוסיה לא מזמן יוצר גנראטור עם פס אולטרה רחב של פעימות, איור 6.4, עם עוצמת שיא בפלט, של 3.4 גיגה וואט, מה שגבוה בהרבה מסף עוצמת הקרינה לפי תקן נאט"ו. גנראטור הזה פועל במתח 205 קילו וולט ופלוס 157 קילו וולט ומייצר פעימות באורך של 1 ננו שנייה עם תדירות מוליכות הפעימות 100 הרץ. במעבדה של חל אוויר ארה"ב, אשר ממוקמת בבסיס חל אוויר קירטלנד (אלבוקרקה, ניו מקסיקו) עוד בשנת 1989 פותח מקרן רדיו אלקטרומגנטי עם עוצמת הקרינה של 7.5 גיגה וואט, על בסיס מה שנקרא vircator (גנראטור עם קתודה וירטואלית), אשר פועל במתח של 4 מגה וולט וזרם 80 קילו אמפר [6.1]. מאז הצליחו לשפר משמעותית את מנגנון ה-vircator , להגדיל עוצמה עד 40 גיגה וואט, לשפר מקדם יעילות מה שאפשר להכניס את הגנראטור העצמתי המכוון - מקרן רדיו אלקטרומגנטי על בסיס ה-vircator לתוך ראש של טיל שיוט, אשר מסוגל לשרוף כל ציוד אלקטרוני ומחשבים ללא אמצעי הגנה מיוחדים, הנמצאים בנתיב הטיסה שלו.

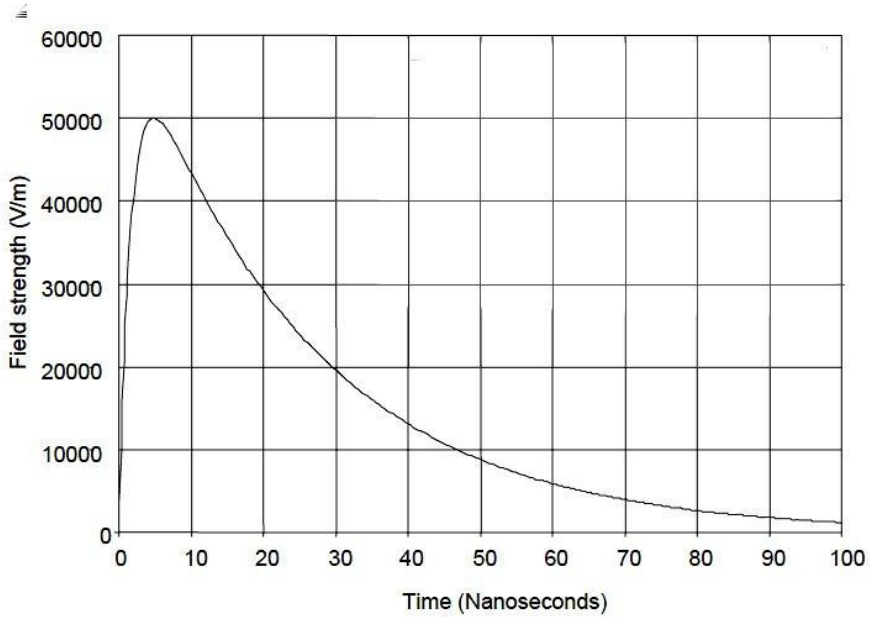
איור 6.4

הפרויקט הסודי, אשר הוחל בשנת 2008 [6.2] הסתיים בהצלחה מלאה, על כך דווח באמצעי תקשורת רבים, אשר כינו את ההצלחה כעידן חדש במלחמות עתידיות

6.2 פרמטרים בבדיקת עמידות מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני

בהתאם לתקן 61000-4-25 מבחני איתנות של ציוד אלקטרוני מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני צריך להכיל שני מרכיבים עיקריים: מבחן חסינות לקרינה אלקטרומגנטית והשפעות של פעימות מגע. השפעות פעימות מגע בתורם מחולקות לשני סוגים: מתחי פעימה, מגיעים לנקודות קלט של המכשור וזרמי פעימה, מולכים לאורך חטים וכבלים.

הגדרת נורמות ספציפיות של המבחן מתחילה מבחירה באחד משש קונצפציות הניסוי. תקנים 61000-2-11 ו-61000-5-3 מגדירים את הקונצפציות האלה. לממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד, אשר ממוקמים במבנים קבועים עשויים בטון ולבנים ומצוידים בהגנה מפני ברקים, ללא מסנני הגנה מיוחדים אפשר לבחור בקונצפט מס' B2. הקונצפט הזה מניח היחלשות המבנה ברמת קרינה אלקטרומגנטית ב -20 dB בטווח של תדרים 30-100 קילו הרץ. לקונצפט הנבחר ולמרכיב E1 מתיחות השדה החשמלי של קרינה, אשר משפיע על האובייקט נקבעת ברמה של 5 קילו וולט/מ (רמה R4), מתיחות של השדה המגנטי 13.3 A/m

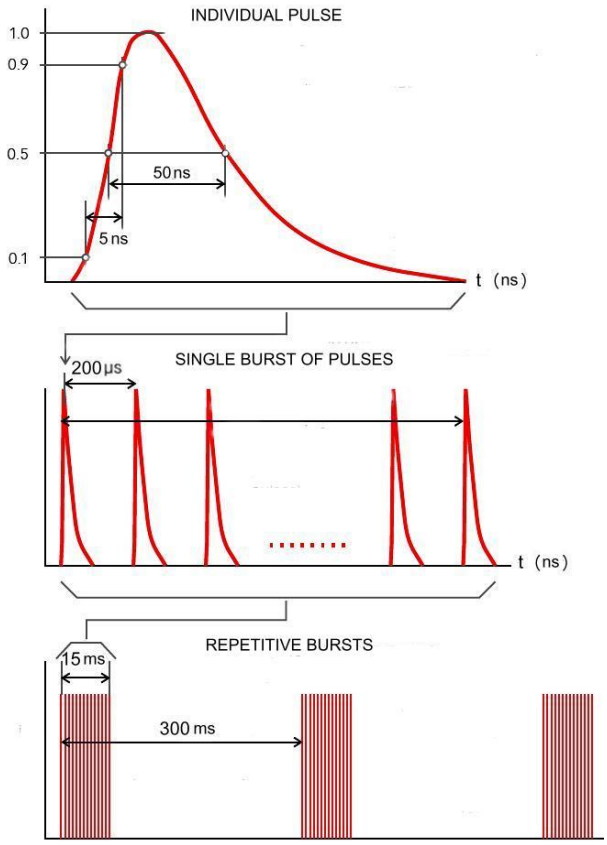


איור 6.5

צורת מרכיב פעימה אלקטרומגנטית בהתאם לתקנים:

IEC 61000-2-9, IEC 61000-2-10, IEC 61000-2-11 ו-mil-STD 461F

לצורך השוואה: למבנים מעץ, אשר לא מחלישים את פעימה אלקטרומגנטית, מתיחות שדה חשמלי מהווה 50 קילו וולט/מ (רמה R7). לאותו קונצפט של ומרכיב E2 מתיחות שדה חשמלי נקבע 10 וולט/מ' ושל שדה מגנטי 0.08 A/M. פרמטרים של פעימה אלקטרומגנטית מתוארים בתקנים 61000-2-9, 61000-2-10, 61000-2-11, MIL-STD-461F: זמן התגברות הפעימה (החזית הקדמית) 2.5 ננו שניות, רוחב הפעימה 25 ננו שניות, צורת הפעימה מתאימה למתואר באיור 6.5



איור 6.6

ELECTRICAL FAST TRANSIENT (EFT) פעימה מהירה (IEC61000-4-4)

בטבלה 1 של התקן הזה אמפליטודה של מתח ניסוי עבור HEMP (מסומן כ"מיוחד") מצוין בסמל "X" ומתאים עבורו לרמות F8 או F9.

בשלב הבא בוחרים ברמת השפעה ניסויית עבור אפקט פעימת מגע ובהתאם לתקן 61000-4-25. עבור הקונצפט הנבחר B2 וביניהן חוטים מחוברים לאובייקט הנבדק ולא שקועים בקרקע בוחרים ברמת השפעה ניסויית E8 (לאספקת סבירות חסינות נורמאלית של האובייקט 50%) או E9 (לסבירות של 99%). רמת E8 מניחה חסינות של אובייקט הנבדק למתח פעימה של 8 קילו וולט, ורמה E9 - 16 קילו וולט. הסבירות של 50% נחשבת נורמאלית בתקן ויכולה לשמש לציוד אזרחי.

המונח מתח פעימה ניסוי מניח Electrical Fast Transiet (EFT) - פעימה מהירה, אשר פרמטרים שלה (למעט אמפליטודה של מתח ניסוי) ושיטות הניסוי מתוארים בתקן IEC 61000-4-4, איור 6.6.

6.3 פרמטרים בדיקת עמידות להפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות

כפי שצוין לעיל התקן הוועדה הבין-לאומית לחשמל (IEC 61000-4-36) עם פרמטרים של ניסוי לחסינות להפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות עדיין לא מפורסם. אולם, קיימים תקנים אחרים ותוצאות המחקרים, אשר מאפיינים פרמטרים הפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות [6.3-6.15]. כיום יש כמה שיטות עם הבדלים עקרוניים

לייצור קרינה רדיו אלקטרומגנטית עוצמתית, אשר יכולה לשמש לפגיעה מרחוק במערכות אלקטרוניות ומערכות מחשב, מה שמתנה טווח רחב מאוד פרמטרים של הקרינה:

- מתיחות של השדה החשמלי בטווח מ-1 עד 100 קילו וואט/מ'
- אורך קדמת הפעימה מ-100 עד 500 פ/ש;
- אורך הפעימה ממאות פיקה שניות עד יחידות של ננו שניות;
- תדירות חזרות הפעימות מ-0.1 עד 1000 הרץ.

ברור לחלוטין שביניהן טווח כה רחב לפרמטרים של מקורות ידועים, מאוד קשה לקבוע קריטריונים ברורים לניסויי לחסינות ציוד אלקטרוני מפני קרינות כאלה. אף על פי כן על סמך המחקרים, אשר בוצעו ע"י מומחה מוביל בתחום ווליאם רדסקי (William Radaski) אפשר לדבר על קראת פעימה רחבת פס עם אורך קדמת הפעימה 1000 פיקה שניות, רוחב הפעימה 1 ננו שנייה, תדירות מוליכות הפעימה 1 מגה הרץ ומתיחות השדה החשמלי 10 קילו וולט/מ [6.7]. לפי המידע העומד לרשות המחבר, אותם פרמטרים צריכים להיכנס לתקן IEC 61000 - 4-36.

6.4 ציוד לבדיקת עמידות להשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת

בפיתוח של מקור פעימות עוצמתיות קרינה רדיו אלקטרומגנטית עוסקים הרבה ארגונים בהרבה מדינות בעולם:

1. מכון לציוד אלקטרוני אולטרה מדויק (עיר טומסק)
2. מכון לאלקטרו פיזיקה (עיר יקטרינבורג);
3. מכון לרדיו טכניקה ואלקטרוניקה (עיר מוסקבה)
4. מכון לפיזיקה יישומית (עיר ניז'ני ניבגורוד)
5. מכון לחקר ומדע של פיזיקה ניסויית של רוסיה (עיר סרטוב)
6. מכון לרדיו טכניקה במוסקבה
7. מכון לחקר טמפרטורות גבוהות (עיר מוסקבה)
8. הלשכה להנדסה (עיר יקטרינבורג)
9. הלשכה להנדסה (עיר טומסק)
10. האוניברסיטה הממלכתית של מוסקבה
11. מכון פוליטכני של אורל (עיר יקטרינבורג)
12. מפעל לייצור טומסקטרנסגז (עיר טומסק)
13. מכון למדע וחקר מוליכים למחצה (עיר טומסק)
14. מפעל לחקר מדע וייצור זנית (עיר זלנוגרד)
15. מפעל לחקר ומדע בורווסטניק (עיר סנט פטרבורג)
16. מרכז לחקר המדע של מתח גבוהה במוסקבה
17. אוניברסיטה טכניון של טכסס (עיר לבבוק, ארה"ב)
18. ADVANCED PHYSICS, Inc, (עיר ארביין ארה"ב)
19. מרכז מחקרים GEC-MARCONI (עיר צ'מספורד, בריטניה)

20. מרכז מחקרים לפיזיקה גרעינית SOREQ (עיר יבנה)
21. רפא"ל מערכות הגנה מתקדמות (חיפה, ישראל)
22. מרכז מחקרי DSTO (עיר סולסברי, אוסטרליה)
23. אוניברסיטה סטרזקלייד (עיר גלזגו, בריטניה)
24. מכון לפיזיקה (עיר טרטו, אסטוניה)
25. מכון צפוני-מערבי לטכנולוגיות גרעיניות (עיר סיאן, סין)
26. מעבדה מחקרית RMA (עיר בריסל, בלגיה)
27. המרכז למחקר DSO (סינגפור)
28. המרכז למחקר DIEHIK SHTIFTUNG (עיר רוטנבך על פגניצה, גרמניה)
29. AVIATION UNIVERDITY OF AIR FORCE CHANGCHUN', סין
30. מכון לחקר הגנה אלקטרוסטטית ואלקטרומגנטית
31. אוניברסיטה לאלקטרוניקה מדע וטכנולוגיה, סין
32. בייג'ין קיי מעבדה למתח גבוה ו EMC, סין
33. אוניברסיטה לכוח חשמלי בצפון סין
34. מעבדה להגנה על תחנות כוח וניטור ופיקוח בטיחותי דינמי, סין
35. מכון להנדסה ננג'ינג מס' 1, סין
36. אוניברסיטה ג'ילין, סין

אולם, התוצר של רוב הארגונים האלה מיועד לביצוע מחקרים של עצמם ואינו מיועד למכירה בשוק כסימולאטורים של פעימה אלקטרומגנטית או הפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות לצורך בדיקת ציוד אלקטרוני.לרוב יצרנים גדולים של ציוד צבאי יש סטנדים ניסויים משלהם לביצוע ניסויים בדגמים של הציוד המיוצר על ידם, איור 6.7, אשר גם כן לא מיועד למכירה. סטנדים כאלה יש ליצרני ציוד צבאי בסין, קנדה, צרפת, גרמניה, הודו, ישראל, איטליה, הולנד, רוסיה, שוודיה, אוקראינה, בריטניה, ארה"ב. חלק מהם מתוארים בפרוטרוט בתקן IEC/TR 61000-4-32.

איור 6.7

סטנד ניסויים לביצוע סימולציית השפעות של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני על ציוד צבאי

איור 6.8

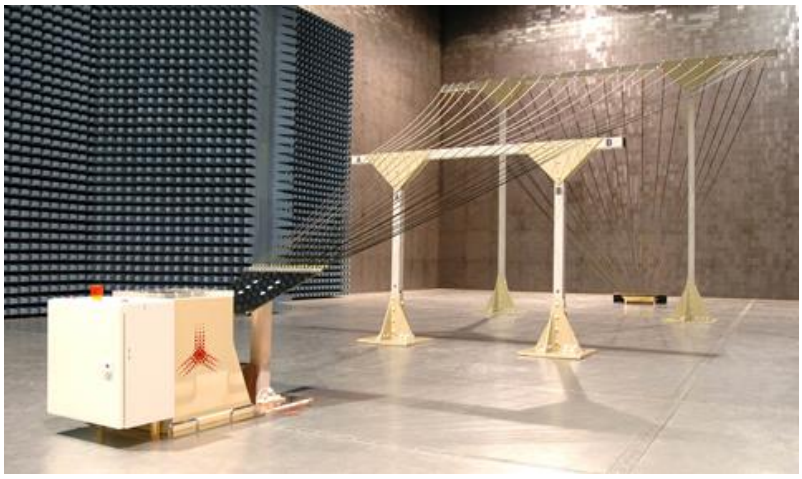
סימולאטור נייח של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני "אללור"

של מרכז לחקר מתח גבוה בעיר איסטרה, מחוז מוסקבה)

ממדי הסימולאטור: 13.5x35x100 מטר, נפח עבודה: 10x10x10 מטר; צורת הפעימה: 2.5/25 ננו שניות; מתיחות מקסימאלית של פעימת שדה חשמלי: 70 קילו וולט/מ

איור 6.9

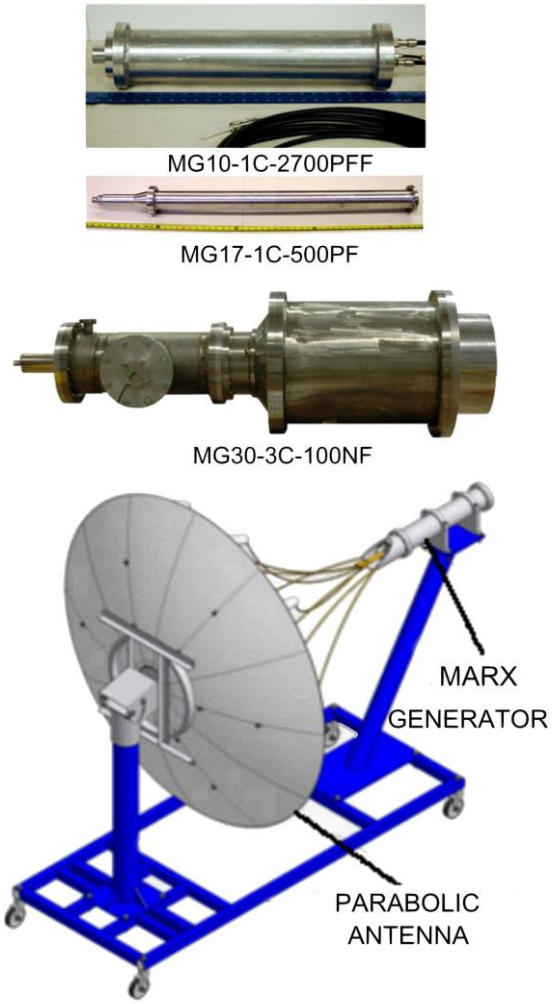
סטנדים קומפקטיים לבדיקות של ציוד אלקטרוני לעמידות מפני פעימה אלקטרומגנטית.
א- מונטנה טכנולוגיה, ב-אפלייד פיזיקל אלקטרוניקס



איור 6.10

סטנד ניסויי, אשר מיוצר למכירה ע"י חברה מונטנה טכנולוגי (ארה"ב) לניסויי מעבדה של אובייקטים יותר גדולים, למשל כאלה כמו ארונות ממסרי הגנה לעמידות לפעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני מצד שמאל רואים גנראטור פעימות, מימין - מערכת אנטנות

במדינות רבות יש גם מעבדות ניסויים מיוחדות, אשר מקבלות הזמנות לביצוע ניסויים מסוג זה מארגונים זרים. ברוסיה למשל עוסק בזה קומפקס ניסויי "אללור" במרכז מחקרי למתח גבוה בעיר איסטרה מחוז מוסקבה. איור 6.8. אולם יש מעט מאוד חברות, אשר מייצרות ציוד לביצוע ניסויים לחסינות מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת בהתאם לתקנים. מתקנים גדולים המיועדים לסימולציה של פעימה אלקטרומגנטית מיוצרים על ידי חברות דייטון ט. בראון (ארה"ב), איירורד טכנולוגי קו בע"מ (סין) ונוספות. מתקני ניסויים לא גדולים, אשר מתאימים לניסויי מעבדה בציוד אלקטרוני מסוג ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים לחסינות לפעימה אלקטרומגנטית מיוצרים רק ע"י שתי חברות: מונטנה טכנולוגי, ששוויצית ואפלייד פיזיקל אלקטרוניקס אמריקאית, איור 6.9.



<u>איור 6.11</u>

גנראטורים קומפקטיים של מרקס בעלי עוצמה גדולה MG10-1C-2700PPF (300 קילו וולט, 1 גיגה וואט);MG17-1C-500PPF (510 קילו וולט, 400 מגה וואט);MG30-1C-100PPF (006 קילו וולט, 6 גיגה וואט) ומקור קרינה רדיו אלקטרומגנטית על בסיס גנראטורים האלה עם אנטנה פרבולית מכוונת

חברת Montena Technology מייצרת הרבה סוגים של מכשור, כולל סטנדים די גדולים (גובה 1.8 מטר, אורך מלא 7 מטר), אשר מתאימים לניסויים בארונות שלמים עם ציוד אלקטרוני, לדוגמא, ארונות הגנה ממסרית, איור

6.10 בכל הקשור לציוד ניסויי לבדיקת מכשור אלקטרוני לחסינות מפני הפרעות אלקטרומגנטיות זדוניות, אז כציוד מסוג זה, אפשר להשתמש בגנראטורים קומפקטיים מרקס, ברמות עוצמה שונות, עם אנטנה מכוונת, ואשר מוצעים במגוון רחב ע"י חברה אפלייד פיזיקל אלקטריקס, איור 6.11

טבלה 6.1 אמפליטודה מקסימאלית של פעימה 5/50 ננו שניות של מתח יוצא בגנראטורים EFT (IEC61000-4-4), אשר קיימים בשוק

אמפליטודה מקסימאלית של מתח פעימה של פלט, קילו וולט	יצרן	סוג של גנראטור EFT
7.3	Haefely EMC Technology	PEFT 8010
8	TESEQ	NSG 2025 *
8	Kentech Instruments Ltd.	J0101031/3 *
8	Thermo Electron Corp.	KeyTek ECAT E421 *
4.8	NoiseKen Laboratory Co.	FNS-AX3-A16B
7	EMTEST	EFT 500N8
5	EMC Partner	TRA3000
4.4	Schaffner	EFT 6501
6.6	Shanghai Yi PaiElectronmagneticTechn.	EFT-4060B
5	Suzhou 3Ctest Electronic Co.	EFT500
5	Hipotronics	AXOS8

*** הייצור הופסק**

הרבה יותר קשה עם ציוד ניסוי לחסינות של ציוד אלקטרוני מפני אפקט פעימת מגע (Electrical Fast Transient - EFT), איור 6.12. קודם גנראטורים EFT עם מתח יוצא הנדרש של 8 קילו וולט, היו מיוצרים על ידי חברות TESEQ, KENTHECH INSTRUMENTS LTD ו-THERMO ELECTRON CORP. (טבלה 6.1) על בסיס מכשיר ואקום יוצר פריקות, אשר מגבש פעימות ניסוי. עם הופעה של אלמנטים עוצמתיים של קומוטציה - IGBT-טרנזיסטור, ייצור של גנראטורים על מכשיר ואקום לפריקות הופסק בשלושת החברות, משום שפעימות,

מיוצרות על ידי טרנזיסטור, היו הרבה יותר יציבות ו"נכונות" מאשר פעימות בייצור מכשיר ואקום לפריקות. לצערנו, יחד עם העלאת היציבות של הפעימות המיוצרות היה צורך להפחית את האמפליטודה שלהם.

ניתוח שלנו הראה כי נכון להיום אף אחד מהגנראטורים המיוצרים לצורך מכירה EFT לא עומדים באופן מלא בדרישות התקנים בנוגע לאמפליטודת הפעימה (8 קילו וולט). המכשיר הקרוב ביותר לדרישות התקן בנוגע לאמפליטודת הפעימה היה גנראטור מסוג PEFT 8010, אשר מיוצר על ידי חברה שוודית HAEFELY EMC TECHNOLOGY, איור 6.12

איור 6.12

גנראטור EFT מסוג PEFT 8010, עם אמפליטודה מקסימאלית של הפעימות 7.3 קילו וולט, אשר מיוצר על-ידי חברה HAEFELY EMC TECHNOLOGY שוודית

לכן, עבור בדיקת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים לאיתנות מפני השפעות אלקטרומגנטיות מכוונות יש צורך בשלושה סוגים של השפעות, בנוסף למכלול מלא של הניסוי להתאמה אלקטרומגנטית [6.17]:

1) קרינת פעימה אלקטרומגנטית עם אורך פרונט הפעימה 2 ננו שניות, רוחב הפעימה 0.25 ננו שניות ומתיחות שדה חשמלי 5-50 קילו וולט/מ

2) קרינת פעימה אלקטרומגנטית עם אורך פרונט הפעימה 100 פיקה שניות, רוחב הפעימה 1 ננו שנייה, תדירות הולכת הפעימה 1 מגה הרץ, מתיחות השדה 10 קילו וולט/מ

3) פעימה מהירה 5/5 ננו שניות (EFT) עם אמפליטודת הפעימה 8 קילו וולט, אשר מועבר באמצעות מגע קלטים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים.

מכשור ניסוי קומפקטי, עם פרמטרים מספיק קרובים לדרישות ישנו ונגיש בשוק החופשי. וזה פותח אפשרויות לפתיחת מעבדה מיוחדת לבדיקת יציבות מערכות מודרניות של ממסרי הגנות והתקנים אחרים מה שמכונה מכשור חשמלי תעשייתי "קריטי" לבדיקת חסינות לפעולות הרסניות אלקטרומגנטיות זדוניות. עלות סט של ציוד מסוג זה למעבדה כזאת היא בסביבות 500 אלף דולר ארה"ב.

6.5 שימוש בקריטריוני איכות הפעולה בעת בדיקות ציוד חשמלי תאימות אלקטרומגנטית

תגובת האובייקט הניסוי להפרעות אלקטרומגנטיות יכולות להיות שונות, למשל האובייקט הניסוי יכול להתקלקל לגמרי עקב פריצה חשמלית במרכיבי אלקטרוניקה או לחילופין, יכול להפסיק פעילות תקינה רק למשך השפעת הפעימה או השדה האלקטרומגנטי. עוד גרסא אחת להפסקה זמנית בפעילות התוכנה, תחת השפעה של מתח פעימתי המופעל על האובייקט הניסוי אשר דורש (או שלא דורש) הפעלה מחדש של התוכנה הפנימית של האובייקט הניסוי ע"י המפעיל. יכול להיות הרבה גרסאות של תגובת האובייקט הניסוי להפרעות אלקטרומגנטיות יכול להיות הרבה. סוג התגובה להפרעות אלקטרומגנטיות, אשר בבסיס ההנחה הסבירה עבור סוג מסוים של האובייקט הניסוי וסוג הניסוי הנתון מכונה קריטריון איכות התפקוד. קריטריון איכות התפקוד הוא מדד החשוב ביותר בעת ניסוי לתאימות אלקטרומגנטית, משום שמהבחירה הנכונה שלו תלויות התוצאות כישלון או הצלחה בבדיקת מערכת מסוימת. אולם, בתקנים של תאימות אלקטרומגנטית אין ולא יכולה להיות שיטת בחירה נכונה של הקריטריונים האלה. בדרך כלל מסתפקים במשפט: בחירת דרגות קשיחות של קריטריונים לאיכות התפקוד מתבצע ע"י אנשים, אשר עוסקים בפיתוח, התאמה ואישור משימות טכניות או תנאים טכניים ובטבלה, אשר ממנה אפשר לבחור קריטריון איכות התפקוד כזה או אחר, מתוך 3-4 קריטריונים, המוצעים ע"י תקן מסוים. וזה ברור משום שהבחירה הנכונה תלויה בסוג מסוים של אובייקט הניסוי ובדרך פעולה מסוימות בתפקוד שלו. יותר מזה, לאותו סוג של האובייקט הניסוי יש אפשרות לבחור בקריטריונים של איכות התפקוד שונים בהתאם לדרך הפעולה שלו, שיטות הפעלה, יעוד, תנאי השימוש וכו'. לכן הבנה של תכונות מיוחדות של כל אובייקט ניסוי היא חשובה מאוד, משום שבחירה של קריטריון איכות התפקוד כזה או אחר היא המפתח בתהליך קבלת החלטה בנוגע לכשרות או אי כשרות של האובייקט הנתון לשימוש בתנאים מסוימים לפי תוצאות הניסוי.

6.6 תנאי שימוש מיוחדים בקריטריוני איכות התפקוד בעת בדיקת ממסרים מבוססי מיקרו-מעבדים לחסינות להשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. ארגון NAERC, לפי בקשה מיוחדת של ועדת קונגרס ארה"ב

COMMITION TO ASSESS TO THREAT TO THE UNITED STATES FROM ELECTROMAGNETIC PILSE (EMP) ATTAK הורכבה רשימה של ציוד לייצור חשמל, אשר חייב להיבדק לחסינות מפני השפעה של פעימה אלקטרומגנטית מפיצוץ גרעיני בגובה רב. בתוך הרשימה הזאת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד והתקנים של מערכות SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) - שם כללי של מערכות תוכנה וחומרה מסוגים שונים, אשר עוסקים באיסוף נתונים בזמן אמת באמצעות חיישנים רבים, באיבוד נתונים, שמירה, מיפוי והעברת המידע בנוגע לאובייקטים של המעקב, וכמו כן העברת פקודות מפעיל לאובייקטים מרוחקים – בסיס של מערכת בקרת תהליכים אוטומטית בתחנות משנה. חברה מטטק ביצעה בדיקות ממסרי הגנה מבוססי מיקרו-מעבדים מסוג SEL-311L (הגנת קו דיפרנציאלית) ובקר של מערכת SCADA מסוג SEL-2032, איור 6.13, בתוכנית מזורזת ורק לחסינות מפני מרכיב E1 פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני. תוצאות של הבדיקות האלה מוצגות בדו"ח META-R-320 [6.16]. פכי שנראה בדו"ח הזה כקריטריונים של איכות התפקוד, בעת ביצוע בדיקות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ובקר SCADA, נבחרו הערכות תקינות התפקוד והיעדר פגיעות לאחר כל ניסוי, אשר כרוך בהעברת פעימות בתדר גבוה קצרות (5/50 ננו שניות) עם אמפליטודה עד 8 קילו

וולט לכניסות שונות של המערכות. כפי שצוין בדו"ח בעת העברת הפעימות באמפליטודה 3.2 קילו וולט לפורט עוקב, ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד הופעל מכוח עצמו, אך לאחר מכן חזר לפעילות תקינה. פורטים מסוימים אחרים (למשל IRIG-INTER-RANGE INSTRUMENTATION GROUP TIME CODE– פורט לסנכרון הזמן) נפגעו כבר במתח של 600 וולט. בבקר SCADA נפגע מודול תקשורת ETHERNET במתח של 1.2 קילו וולט.

איור 6.13

ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מסוג SEL-311L ובקר למערכת SCADA מסוג SEL-2032 מתוצרת SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES (ארה"ב) אשר הועמדו למבחני חסינות פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני

בדו"ח מצוין כי בתור אחד הפרמטרים הנוספים לקריטריונים לאיכות התפקוד נבחר תיעוד רישומי תוצאות בדיקת זרמי חשמל ומתחים בכניסה לממסרים ע"י אוסצילוגרף. הדו"ח מראה שבמהלך הניסוי לא נתקלו בהפרעות ברישום.

6.7 ביקורת השיטה, בה נעשה שימוש ב [6.16] בבדיקות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

1. לדעתנו שימוש בקריטריונים איכות התפקוד, המבוססים על בדיקת תקינות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, לאחר השפעת הפרעה הוא לא נכון ואינו מאפשר הסקת מסקנה חד משמעית בנוגע לחסינות הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד להפרעות. הסיבה היא שלממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד יש תכונות מיוחדות בהשוואה למערכת SCADA, אשר נדונו ב [6.17, 6.18]. בלי להמעיט בחשיבות ה-SCADA היא מיודעת קודם כל לאיסוף אוטומטי, עיבוד והדגמה של אינפורמציה. אף על פי כן שהמערכת מורכבת ממה שמכונה REMOTE TERMINAL UNITS(RTU) - מערכות ביצוע מופעלים בשלט רחוק, הם לא יכולים לעבוד בצורה אוטומטית ומיועדים רק לביצוע הוראות של מפעיל מחדר בקרה מרוחק. רוב תחנות משנה פועלות בצורה אוטומטית ללא התערבות של אדם. שליטה ידנית במצבי המתגים בתחנות כאלה (למעשה שליטה בקונפיגורציה של מעגל חשמלי) נשענת על-ידי מפעיל מחדר בקרה דרך מערכת SCADA אשר מאופיינת בפגיעות מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. לכן במקרה של הפעלת השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת, שליטה בתחנת משנה מחדר בקרה בסבירות גבוהה תנותק וקונפיגורציה של מעגל החשמל תוגדר רק ע"י מערכת הגנה ממסרית – המערכת היחידה, אשר יכולה להשפיע באופן אוטומטי על מצבי המתגים. יחד עם זה, ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד, אשר מהווה בסיס ממסרי הגנה מודרנית מחליפים ביניהם כל הזמן

אינפורמציה ופקודות בצורה אוטומטית, באמצעות ערוצי תקשורת פגיעים (בניגוד למערכת SCADA שבה פקודות שליטה קריטיות המגיעות למתגים יכולות להגיע רק ביוזמת המפעיל). במקרה של פעילות לא תקינה ממסרי הגנה הפועלות אוטומטית ללא אפשרות להתערבות המפעיל, במקרה של תגובות מיותרות כתוצאה משפעות הרסניות אלקטרומגנטיות מכוונות מעגל חשמלי וגם מערכת כוח בכלל יכולים להיהרס לחלוטין. זאת אחת הסיבות לכך שממסרי הגנה צריכה להיבדק להשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת במהלך תפקודה ולא להיבדק לגילוי תקלות לאחר השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת.

2. דרכי חדירת הפרעות חשמליות לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בצורת של פעימה אשר מגיעות לכניסות מוגנות ברוב המקרים וחדירה של גל אלקטרומגנטי בעל תדר גבוה, אשר חודר לתוך מרכיבים פנימיים בעלי רגישות גבוהה או דרך כניסות/יציאות בלתי מוגנות של התקנים אלקטרוניים וכמו כן דרך כבלים רבים, אשר מחוברים לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ומשמשים כאנטנות לצורך קליטת אנרגיות - שונות. על אחת כמה וכמה שהשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת אינה מוגבלת רק בפעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, אלא כוללת גם קרינה אולטרה בתדר גבוה עם פס רחב של מקורות מיוחדים בעוצמה של כמה גיג וואט, אשר מיועדת לפגיעה מרחוק במערכות אלקטרוניות [6.18]. לצערנו מהווה איום לא רק מכשור אלקטרוני, אשר מיועד לפגיעה אלא גם קרינה ממכ"מים עוצמתיים רגילים.

לדוגמא, בשנת 1999 תועד רשמית מקרה של כשל קטסטרופאלי של מערכת SCADA של חברת SAN DIEGO COUNTRY WATER AUTORITY אשר אחראית על אספקת מים בעיר סן דייגו. הסיבה לכך הייתה קרינה ממכ"ם אוניה, אשר נמצאה במרחק של 25 מייל מהעיר.

מקרה דומה אירע בשנת 1980 בהולנד, בצנרת גז, אשר ממוקם במרחק של 1,5 קילומטר מנמל דנהלדר. אז פגיעה במערכת SCADA ע"י מכ"מ של נמל גרם לפיצוץ עז של גז, לכן ניסויים של חסינות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מפני השפעות הרסניות מכוונות לא צריכים להסתפק רק בשליחת פעימת מתח גבוה לכניסות מסוימות אלא צריכים להיות מלווים גם בהקרנת אובייקט הניסוי בקרינה אלקטרומגנטית עם אנטנות מכוונות, בהתאם לדרישת התקנים מסוימים.

3. יש לשים לב שבמקרה של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני יושפע ממנה לא רק מכשור אלקטרוני הפועל בתדרים גבוהים (ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, מכשור מסוג SCADA) אלא גם ציוד של תחנות כוח: מבודדים קווים, שנאים, גנראטורים. צריך לקחת גם בחשבון שההשפעה על הציוד הזה תהיה לא רק מרכיב E1 (אשר הודגמו בניסויים [6.16]) אלא גם שני מרכיבים אחרים שלה: E2 ו-E3. כפי שידוע מהמחקרים שבוצעו בעבר [6.16] בברה"מ ובארה"ב כתוצאה מהשפעה משולבת מסוג זה, של כל המרכיבים של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, מאוד גבוה הסבירות לפגיעה בציוד תחנת כוח מתח גבוהה: קצר במבודדים קווים, רוויה ושריפה של שנאי כוח, קצר במבודדים של גנראטורים וכדומה. זאת אומרת זמן הפעלת השפעה של הפרעה אלקטרומגנטית על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד תואם את הזמן של שינויים פנימיים במרכיבים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, וזה קשור להופעה בכניסות שלו ערכי חרום של זרמי חשמל מבוקרים. מה תהיה התגובה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד במהלך אירוע מסוג זה? האם ממסרי הגנות, אשר הושפעה מהשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת תנתק בזמן את השנאי, אשר נכנס לתהליך רוויה, מקטע

פגום של קו אוויר, את הכבל הפגום? האם פעולות משותפות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד שונים יכולות לגרום להרס מוחלט ולקריסה של כל המערכת?

ניסוי אשר בוצע ב[6.16] לא נותן מענה לשאלות האלה.

ייצרנו מערכת כה מסובכת שאנחנו כבר לא יכולים לצפות מראש את כל ההשפעות האפשריות עליה, כל הכשלים האפשריים. "אנחנו מוסיפים לתוך המערכות האלה התקני אבטחה חדשים אבל נשארים עם בעיות שלא נפתרו, אשר שייכות לקשרים נסתרים בתוך המערכות האלה" – כותב מומחה ידוע בתחום פגיעות מערכות מורכבות צ'רלז טרוראו [6.19]. פרואו מכנה את הבעיה הזאת "בעיה בלתי צפויה" מפני שאפילו במקרה של תאונה רגילה המערכת מפעילה שיתופי פעולה שלא רק פתאומיים אלא גם בלתי צפויים עבור מרווח זמן קריטי מסוים. ברוב המקרים בזמן התאונה אף אחד לא ציפה ולא ידע איך אלגוריתמים מסוימים משפיעים אל אלגוריתמים אחרים. לכן אף אחד לא יכול היה לצפות מראש את מה שקרה. כל זה באופן מלא מתייחס היום למערכת משוכללת ודי מורכבת ומסועפת של הגנה ממסרית, אשר התנהגותה לחלוטין בלתי צפויה בעת הפעלת השפעות הרסניות מכוונות. לגבי עוד ניסוי אחד אשר בדק את חסינות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד (בצירוף מקרים מוזר) מופיע מידע במצגות פרסום של יצרן ההתקנים האלה חברת שוויציר Schweitzer Engineering [6.20], בהן מובאות תוצאות בדיקת דגמי ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מסוג SEL-311A בסטנדים ניסויים של אתר ניסויים פיקטיני של צבא ארה"ב בניו ג'רסי, בעת ניסוי לפעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני וקרינה אלקטרומגנטית, איור 6.14. במצגת פרסומית הזאת נטען כי כל הניסויים עברו בהצלחה.

יחד עם זאת, בבחינה קפדנית יותר של החומר הזה מגיעים למספר סתירות. למשל באיור 6.15 מובא הודעת פרסום שבה נטען כי SEL-311 עבר ניסוי בתנאי שדה מתח בטווח של 25-1000 מגה וולט, כאשר תקן צבאי MIL-STD 461 דורש רק 50 וולט/מ.

איור 6.14

בדיקת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מסוג SEL311-L להשפעות הרסניות מכוונות על סטנדים ניסויים של אתר ניסויים צבא ארה"ב פיקטיני, ניו ג'רסי [6.20]

SEL-311C Tested at US Army's Picatinny Arsenal in New Jersey

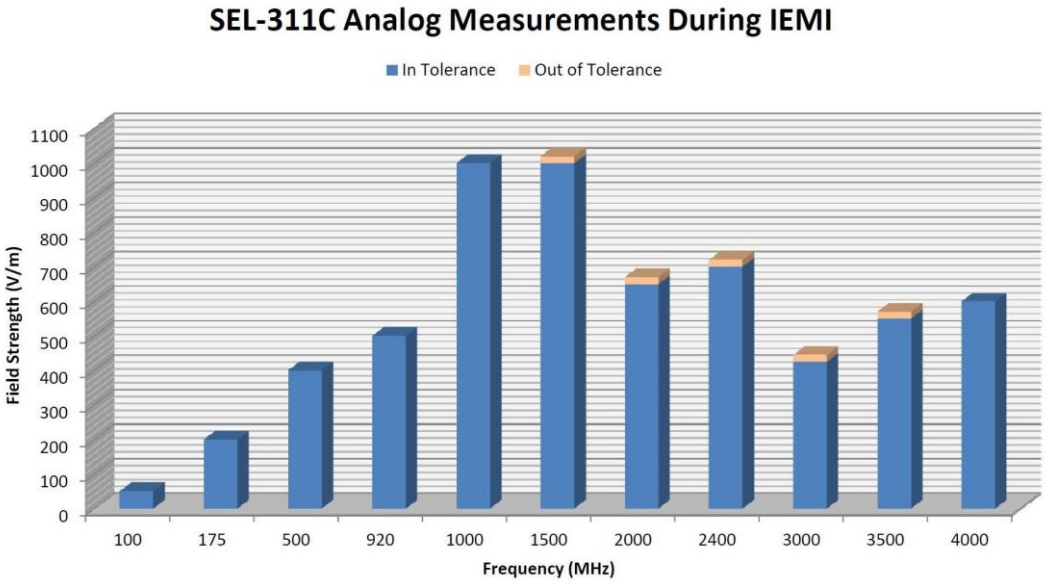
RF from 100 MHz to 4 GHz at power levels from 25 to 1000 volts per meter (Mil-Std 461 ask for 50V/m only)

<u>איור 6.15</u>

טקסט מאלון פרסום של חברת SEL [6]

במסמך הנ"ל מומחים של חברה כה רצינית SEL מדגימים בורות די מוזרה, אם ניקח בחשבון כי ב- MIL STD-461 מתיחות השדות, המתאימים להשפעות הרסניות מכוונות, ניתנות לא בוולטים אלא בקילו וולטים והמספר "50" מוזכר שם לא כ-50 וולט/מ אלא כ50 קילו וולט/מ.

עוד יותר מוזר נראית דיאגראמת עמודות, אשר מוצגת באיור 6.16, ממנה נובע כי בפועל השתמשו במתיחות השדה ב -1000 וולט/מ רק בעת ניסויים בתדרים של 1000-1500 מגה הרץ, שאר טווח התדרים מתיחות השדה הייתה כמעט חצי מזה והתלות אמפליטודה בתדר לא תואמת את MIL-STD-461.

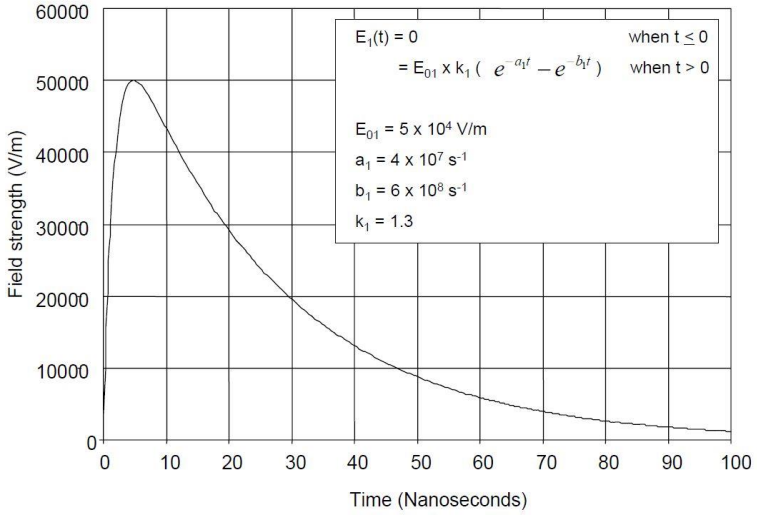


<u>איור 6.16</u>

פרמטרים של קרינה אלקטרומגנטית בבדיקות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מסוג SEL-311L [6.20]

כפי שניתן לראות בגרף המוצג, רמות מתיחות השדה מוגבלות בהתחלת אי יציבות בפעילות הממסר (אזורים צהובים בפסגות העמודות). במילים אחרות למעשה בגרף הזה מוצג אזור פעילות יציב של טרמינל מסוג SEL, אשר מותקן בנפרד (ז"א מחוץ למערכת הגנה ממסרית). מכאן נובע כי מחוץ לטווח ערכים של הגרף הזה, עם ערכים מאוד נמוכים של מתיחות השדה החשמלי, ממסר לא מספק פעילות יציבה.

אם נשווה את זה לנורמות של התקנים MIL-STD-461, איור 6.17, אפשר להבחין כי פרמטרים, בהם נעשה שימוש בעת הניסוי אפילו לא מתקרבים לדרישות התקן הזה. בהתחשב בסתירות כאלה בעת בחירת פרמטרים לניסוי חסינות SEL-311L מפני השפעות הרסניות מכוונות נשאלת השאלה האם אפשר להתייחס ברצינות לטענות היצרן בנוגע לחסינות ויציבות הפעילות של הממסרים המיוצרים על ידו?



איור 6.17

גרף מעמוד 138 MIL-STD-461E לצורך השוואה לגרף, אשר מובא באיור 6.16
(1 ננו שנייה תואמת תדר של 1 גיגה הרץ)

עוד בעיה אחת, אשר קשורה לבחירת כאובייקט ניסויי טרמינל בודד של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד. טרמינלים מסוג זה בדרך כלל מיוצרים בגוף עשוי ברזל, אשר מחליש בצורה פעילה את הקרינה האלקטרומגנטית, לכן תוצאות הניסויים לחסינות מפני קרינה אלקטרומגנטית בנוגע לטרמינל בודד, מראש צפויות להיות חיוביות. בתנאי אמת, בפועל מחוברים לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד כבלים רבים, אשר משמשים כאנטנות הקולטות כוח אלקטרומגנטי ומספקות אותו אל המרכיבים הפנימיים של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד; מסופים רבים ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מחוברים ביניהם דרך מכשירי קשר מסוימים, אשר מושפעים מהפרעות הרסניות מכוונות. לכן חייבים להעמיד למבחן מערכת הגנה ממסרית ורק בעת פעילותה ולא במסוף בודד ומבודד.

כדוגמא לגישה נכונה בעת ביצוע ניסויים במערכות מורכבות, שכוללת כמובן גם את ההגנה הממסרית, יכול לשמש מבחן ניסויי של מערכת SCADA המתואר ב[6.21] איור 6.18.

איור 6.18

בדיקת מערכת SCADA לחסינות מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני [6.21].

רואים למעלה מערכת אנטנות של סימולאטור של פעימה אלקטרומכנטית. מרכיבי מערכת SCADA ממוקמים בקופסות נפרדות ומחוברים ביניהם במערכת קשר תקנית. ובכן, יוצא שאם יש לנו תוצאות של שני ניסויים בלתי קשורים של אותו סוג ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר בוצעו ע"י גופים שונים, אזי אי אפשר להסיק שום מסקנה בנוגע למידת חסינות אמיתית להשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת. אז מי צריך ניסויים כאלה.

6.9 תוצאות והמלצות בנוגע לביצוע ניסויים על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

1. עקב שגיאות מתודולוגיות בעת ביצוע ניסויים על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר בוצעו בעבר ע"י גופים בלתי קשורים, אי אפשר להכיר בהם כמסופקים ולהכיר בתוצאות כבעלות ערך. נכון להיום, אין נתונים בדוקים ואמיתיים בנוגע למידת החסינות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד להשפעות הרסניות מכוונות ולכן ניסויים כאלה צריך לערוך פעם נוספת.

2. סוגים ושיטות הניסויים על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריכים להתבצע באופן מלא ובהתאם לתקנים מיוחדים.
3. כקריטריון איכות התפקוד צריך לבחור אחד אשר מאפשר פעילות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד במשטר נורמאלי ומשטר חרום של אובייקט מוגן במהלך הפעלת ההשפעה עליו בהפרעה אלקטרומגנטית ולא קריטריונים, אשר מבוססים רק על בדיקות תקינות המסופים לאחר סיום השפעת ההפרעה.
4. יש צורך לערוך ניסויים גם על מסוף ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בודד וגם על מערכת מסופים, הכוללת מספר ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד, מחוברים ביניהם בכבלים באורך לא פחות ממספר מטרים דרך התקן קשר מסוים. בעת הניסוי הקרנה אלקטרומגנטית צריכה להשפיע על כל המערכת וניסויים של פעימה אלקטרומגנטית עם מתחים מסוימים צריכים לערוך על מסופים בודדים וגם על מסופים מאוחדים והתקנים ביחד.
5. בעת ניסויי יש לבחור מספר מדרגות אמפליטודה של פעימה ניסויית ומתח שדה חשמלי: מהערך המינימאלי ועד המקסימאלי מתוך טווחים תקניים, אשר הובאו לעיל. בתוצאות המתקבלות אפשר להשתמש בעת חישוב והערכה של חסינות ויציבות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר מותקנים בארונות מסוימים ובמבנים, בעלי מקדם מסוים להפחתת שדה אלקטרומגנטי, וכמו כן בעת פיתוח דרישות עבור היחלשות השדה, אם יסתבר שבתנאים הקיימים לא מסופקת יציבות וחסינות נדרשים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מפני השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת.

ביבליוגרפיה לפרק 6

6.1 Platt R., Anderson B., Christofferson J., Enns J., Haworth M., Metz J., Pelletier P., Rupp R., Voss D. Low-frequency multigigawatt microwave pulses generated by a virtual cathode oscillator. - Applied Physics Letters 27.03. 1989, Vol. 54 Issue 13, p. 1215.

6.2 Counter-Electronics High Power Microwave Advanced Missile Project (CHAMP) Joint Capability Technology Demonstration (JCTD). Solicitation Number: BAA-08-RD-04, 16 October 2008 (Restricted Data).
6.3 Methods of Ensuring the Resilience of Future Radio-Relay, Tropospheric, and Satellite Communications to the Impact of High-Power Electromagnetic Interference / Voskobovich Vladimir Vikorovich 05.12.13 Moscow, 2002.
6.4 Development of the Methods of Assessing the Resilience of Telecommunication Systems to the Impact of Ultra Broad Band Electromagnetic Pulses / Vedmidskiy Aleksandr Aleksandrovich 05.12.13 Moscow, 2003
6.5 Theoretical and Experimental Methods of Assessing the Resilience of Terminals to the Impact of Ultra Broad Band Electromagnetic Pulses / Akbashev Beslan Borisovich 05.12.13 Moscow, 2005.
6.6 Methods and Techniques for Assessing the Impact of an High-Energy Electromagnetic Pulse on Telecommunications Networks / Yakushin Sergey Pavlovich 05.12.13 Moscow 2004.
6.7 Radasky W, Savage E, Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) and Its Impact on the US Power Grid - Meta-R-323 Metatech report for Oak Ridge National Laboratory, 2010.
6.8 NATO AECTP-250 Leaflet 257 - High Power Microwave (HPM).
6.9 MIL-STD-461F Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, 2007
6.10 Staines G Compact Sources for Tactical RF Weapons Application - DIEHL Munitionssyteme Amerem-2002 Maastricht, Nederlands, 2002
6.11 R. Barker and E. Shamiloglu High Power Microwave Sources and Technologies. IEEE Press, New York, 2001.
6.12 W. Prather, C. Baum et al Ultra-wideband Source and Antenna Research IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 28 pp. 1624-1630, Oct. 2000.
6.13 Multi-wave High-Power UHF Generators / Koshelev V.I. 01.04.04 Tomsk, 1990
6.14 High-Power Pulse UHF Generators Based on a Backward Wave Tube in an Amplified Emissions Mode / Yelchaninov A.A. 01.04.04 Tomsk, 1990
6.15 The Generation of High-Power UHF emissions Based on High-Current Nanosecond Electronic Beams / Korovin, S.D. 01.04.04 Tomsk, 1990.
6.16 Savage E., Gilbert J, Radasky W. The Early-Time (E1) High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and its Impact on the U.S. Power Grid - Report Meta-R-320 for Oak Ridge National Laboratory, 2010
6.17 Gurevich V.I. Problems of Standardisation in the Field of Microprocessor Based Protective Relays - Components and Technology, 2012, No. 1, pp. 6-9.
6.18 Gurevich V.I. The Vulnerability of Microprocessor Based Protective Relays. Problems and Solutions - M.: Infra-Inzheneriya, 2014, 256 p.
6.19 Perrow C. Normal accidents. Living with high risk technologies, First ed. Princeton: Princeton University Press, 1984
6.20 EMP Effects on Protection and Control Systems - Schweitzer Engineering Laboratories, 2014, 31 p.
6.21 Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (Attack), April 2008

7. צעדים ארגוניים וטכניים להגנה על ממסרי הגנות מבוסס מיקרו מעבד מפני פעימה אלקטרומגנטית

7.1 בעיות סטנדרטיזציה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

סטנדרטיזציה ואוניברסליזציה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד הן אחת הדרכים החשובות ביותר להגדלת השרידות של הגנה ממסרית תחת השפעה של פעימה אלקטרומגנטית, משום שמאפשרת להאיץ בצורה משמעותית את תהליך של שיקום וחזרה לפעילות תקינה לאחר גרימת נזק מפעימה אלקטרומגנטית או אמצעי פגיעה אחרים, הנשלטים מרחוק וכמו כן מהווה אחת הדרכים להעלאת יעילות השימוש בתנאים רגילים.

7.1.1 מי מבצע תאום תהליך סטנדרטיזציה בתחום ממסרי הגנות?

היום התקני הגנה ממסרית ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מיוצרים ע"י עשרות יצרנים בעלי שם עולמי, כמו ABB, SIMENS, GENERAL RLRCTRIC, ALSTOM (AREVA), SEL, NARI RELAYS, BECKWITH ELECTRIC, SCHNEIDER ELECTRIC, COOPER POWER, ORION ITALIA, VAMP, WOODWARD ואחרים, וכמו כן ע"י חברות רבות ברוסיה ואוקראינה (ABB ממסרי צ'בוקסרי, אקרא, ברסלר, צ'אאז, רדיוס אוטומטיקה, חרטרון אינקור, קייבפריבור, רלסיס, PZA SYSTEMS, אנרגומשבין, מכנוטרוניקה ואחרים.

כל אחד מהיצרנים הרבים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד קובע בעצמו את הצורה והמידות עבור כל מודל המיוצר על ידו, קובע גם את הרכב ומבנה של המסופים הפנימיים, את התוכנה. כתוצאה מכך היום מיוצגים בשוק מאות סוגים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד, אשר לא תואמים אחד את השני לא מבחינת החומרה ולא מבחינת התוכנה. יותר מזה, לרוב אפילו ממסי הגנה מבוססי מיקרו מעבד של אותו יצרן אבל מדגם שונה ומדור שונה לחלוטין לא תואמים זה את זה.

מצב כזה גורם לבעיות רבות, אשר מעכבות התפתחות ההגנה הממסרית. כך למשל אי התאמה מעשית של החומרה של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מובילה לכך שמאז הרכישה הראשונה מיצרן מסוים של ערכת ההגנה הממסרית, הצרכן נאלץ במשך שנים רבות לרכוש מסופים רזרביים יקרים מאותו היצרן, אפילו אם האיכות שלהם לא הכי טובה. הרבה בעיות נובעות גם מרכישות במכרז של הגנות ממסריות, אשר נהוגות כיום במדינות רבות בכל העולם. זכייה של חברות יצרניות שונות במכרזים כאלה גורמת לכך שתוך 10-15 שנים במערכת כוח אחת מצטברים עשרות מודלים שונים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד, אשר יוצרו ע"י יצרנים שונים, מה שמגביר בצורה חדה עומס על צוות התחזוקה ובנוסף גורם לטעויות שונות בכל השלבים: החל מחישובי התקנות ועד להתקנות בפועל ובדיקות הממסרים.

לפי הנתונים אשר פורסמו ע"י חוקרים שונים, שיעור פעולות לא נכונות של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד הנובעות מטעויות של צוות תחזוקה (מה שמכונה הגורם האנושי) מגיע ל:50-70% [7.1-7.3]. ממשקי תוכנה שונים ואי התאמה מוחלטת של מערכות התוכנה של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד לא מאפשרים לבצע אוטומטיזציה של תהליך הניסוי משולב ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר נכון להיום תופס הרבה זמן ומאמץ של

הצוות המתחזק ומהווה מקום נוסף לטעויות אפשריות של הצוות (למשל בעת החזרת ההתקנות הריאליות לאחר הניסויים.) [7.4].

עקב היעדר התקנים, למעשה גבולות ומסגרות, מגמות מודרניות של פיתוח ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד ממשיכות בכיוון מורכבות הפעילות והגדלה של מספר פונקציות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד לצורך פתרון סוגיות, אשר בכלל לא אופיינית לממסר הגנה, למשל ניטור מצב מערכת חשמל. לדעתנו, הגדלת דרגות חופש של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד אינה מקובלת, בניגוד לדעה של מומחים שונים [7.5-7.12]. ראוי לציין, כי מגמה תמידית להגדלת מורכבות הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד נצפית בכל העולם וכמעט כל היצרנים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד חוטאים בכך, הרי התקן מורכב יותר ויותר ומסובך יותר, קל יותר לפרסם ואפשר למכור אותו במחיר יותר גבוה. אולם, צרכני הקצה מעריכים את המגמות כאלה בתחום ההגנה הממסרית בצורה לגמרי שונה מהיצרנים. אני מביא פה לדוגמא להערכת ההגנה הממסרית של אחד היצרנים המובילים ע"י מומחים לממסרים ברוסיה [7.13]:

במסוף SIPROTEC 7SJ642 (SIMENS) טמונה מורכבות יתר טכנית ומורכבות יתר של מידע. במדריך לשימוש (C53000G1140C1476, 2005) מציינים "קלות התפעול" של המערכת באמצעות לוח בקרה ובאמצעות חיבור תוכנת בקרה בעלת DIGSI, מה שלא תואם את המציאות. למשל, יש צורך בהכנסת קרוב ל-500 פרמטרים (הגדרות), בלי לקחת בחשבון הכנסת שינויים בלתי נמנעים לתוך מטריצת האותות וכל אות בנפרד בעל מאפיינים, אשר משפיעים על תפקוד ההתקן (מטריצת האותות, מודפסת מתוך DIGSI תופסת קרוב ל 100 עמודים של טקסט אנגלי). בהתחשב בצורך כתיבת הנהלים ומטרות לצורך הקמה והתאמת המערכת ופרוטוקולים לבדיקת המסופים ששם צריכים להיות מצוינים כל הפרמטרים של ההתאמה, היקף החומר פשוט בלתי סביר. כמות גדלוה של המידע הנכנס מכביד על תהליך ההתאמה. ריבוי פרטים טכניים דורש מומחיות יותר גבוהה לצורך תפעול המסוף. סה"כ כמות המסמכים השייכים למסוף זה אלפי עמודים, אבל יחד עם זה לרוב אין שם אינפורמציה נחוצה ויש גם שגיאות. לצערנו, סיטואציה בשוק הממסרים במשך שנים רבות הולכת ומדרדרת וארגונים, אשר נועדו לתאם פעילות בתחום הזה (למשל ארגונים כמו מכון לחקר ממסרים ברוסיה) לא רק לא מחפשים פתרון לבעיות מסוג זה, אלא תורמים להעמקת הבעיה, כאשר מציעים הרחבת הפונקציות של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד על חשבון העמסה עליהם פעולות, אשר לא מאפיינות בד"כ מערכות הגנה ממסריות, מעודדות גם שימוש בהגנה ממסרית בהגיון לא דטרמיננטת ומה שמכונה "בינה מלאכותית". כך בין היתר, מציעים להאציל לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד פונקציות הניטור של ציוד חשמלי ולהטיל עליו חיזוי מצב הציוד הזה. מניחים שהגנה ממסרית כזאת תבצע ניתוק של מערכות חשמל על פי הערכות של חיזויים שלה עצמה הרבה לפני הגעתה למצב חרום (מה שמכונה הגנה ממסרית חזויה מוקדמת)[7.10-7.12]. בהקשר זה נשאלת השאלה מה זה בכלל "ממסר להגנה", האם הוא מסוגל לתת תחזיות ולנתק ציוד חשמלי לפני שאירוע מצב חרום מגיע.

נכון להיום לא קיים מושג מעוגן בחוק התקנים, אשר מגדיר מה זה "ממסר הגנה". בספרות המתייחסת לנושא ממסרי הגנה מחברים שונים נותנים פירושים שונים למושג הזה, אשר לא תמיד נכונים ומשקפים רק את הראיה הסובייקטיבית של המחבר עצמו[7.14]. היעדר הגדרה תקנית למושג "ממסר הגנה" תורם לא רק לפרשנות חופשית אלא כתוצאה מזה גם לייחוס פונקציות לא אופייניות שונות, דבר שהוא בכלל לא תמים ויכול לגרום לתוצאות בלתי צפויות [7.12].

לכן, לפי דעתנו, סטנדרטיזציה בתחום הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריכה להתחיל מהגדרה מדויקת של המושג "ממסר הגנה", מה חייב להיות רשום בתקן. בוודאי שבמקרה קבלה של הגדרה רשמית של המושג, אשר הוצעה בסעיף 7.14 תפזר לחלוטין את הערפל הנוצר בידי מדענים מסוימים בנוגע להגנה ממסרית והעניין תתנקה מהרעיונות ופיתוחים, אשר די מעניינים כשלעצמם, אך אין להם שום קשר להגנה ממסרית.

7.1.2 עקרונות בסיסיים לסטנדרטיזציה של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

מה הן העקרונות הבסיסיים, אשר יכללו בתקן עתידי? לדעתנו אלה צריכים להיות:

- איסור לשימוש בממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בפונקציות אשר לא שייכות לממסר הגנה בהתאם להגדרה חוקית של "ממסר הגנה".
- הפחתה משמעותית של כמות הפונקציות ביחידת מסוף מיקרו-מעבד אחת; חישוב כמות אופטימאלית של פונקציות כאלה, לא רק לפי קריטריון העלות ממסר הגנה אלא גם האמינות שלו.
- ויתור על שימוש באלגוריתמים עם היגיון לא דטרמיניסטי, אשר מותיר פעולות בלתי צפויות של ההגנה הממסרית.
- הפשטה מקסימאלית של ממשק התוכנה על בסיס פלטפורמה אוניברסאלית מסוימת, מתאימה לכל הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד (בתקן ייקבעו דרישות בסיסיות ועקרונות של פלטפורמה כזאת.
- הכנסת הדרישות היציבות של הגנת על ממסר מבוסס מיקרו-מעבד בתנאים של השפעות אלקטרומגנטיות הרסניות מתוכננות מראש הן על ידי שיפור יציבות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד עצמו להשפעות מסוג זה על ידי שימוש באמצעים טכנולוגיים, אשר יכולים להחליש בצורה משמעותית השפעות כאלה, והן על ידי הכנסה אוטומטית של ערכה רזרבית של ממסר הגנה במצבי חירום, אשר יכולים להיות בצורה של ממסרים אלקטרומכאניים.
- הכנסה של דרישות משופרות עבור אבטחת סייבר, כולל איסור שימוש בטכנולוגיה, שבה יש מצב להשתלטות עוינת על פקודות ואותות הגנה ממסרית, ומעוותות בצורה מכוונת, למשל, טכנולוגיות אלחוטיות (Wi-Fi), טכנולוגיות רשתיות Ethernet.

בנוסף לעקרונות הכלליים המפורטים לעיל, תקן צריך לכלול, לדעתנו, גם לדרישות למבנה הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד.

על אילו דרישות מדובר?

7.1.2.1 סטנדרטיזצית של המראה החיצוני של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

כפי שצוין לעיל נכון להיום כל סוג של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בעל קופסה ייחודית, אשר שונה מדגם לדגם, לפעמים אפילו כשמדובר באותו היצרן, איור 7.1. יחידות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד כאלה ממוקמות היום בדרך כלל בארונות ממסרים: 5-3 יחידות בכל ארון, איור 7.2.

מבחינה היסטורית, יש לנו מצב [7.15], שבו היום יש לנו מספר עצום של צורות לממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד, אשר בכלל לא קשורים זה לזה, לא מחליפים זה את זה ולא תואמים זה את זה.

איור 7.1

ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד מודרניים בקופסאות מסוגים ומידות שונים

אחרי שהוציא פעם סכום נאה לרכישת ערכת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מאחד היצרנים, הצרכן, בפועל נכנס לעבדות כלכלית ליצרן זה עבור תקופה של 10-15 שנים, משום שאחרי ביצוע העסקה לצרכן כבר לא משנה כמה יצרנים שונים קיימים בשוק, שכן הוא לא יכול להשתמש במוצרים של יצרנים אחרים. לצאת מהעבדות הזאת הוא יכול רק על ידי בזבוז סכום כסף לא פחות גדול מסכום הרכישה הקודמת (ובכך הוא עובד מעבדות אחת לשנייה).

איור 7.2

שיטה מודרנית להרכבת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד בארונות

ומה עושה היצרן כשהוא במצב של מונופול מוחלטת? נכון: הוא מעלה מחיר! המחיר למודול רזרבי אחד של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד יכול להגיע כמעט לשליש ואף לחצי מהמחיר הלא זול בכלל של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד! משום שלצרכן אין כבר ברירה, הוא קונה גם במחיר כזה. ומה קורה כעבור 8-10 שנים של שימוש בממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד? זה מה שקורה: בתקופה זו מפתח יצרן כמה סוגים חדשים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד ומבחינתו פשוט לא כדאי להחזיק מתקנים לייצור מודולים רזרביים לממסרים ישנים והוא פשוט מפסיק לייצר אותם. מה יש לעשות לצרכן במצב הזה? נכון: לזרוק את הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד הישן, אפילו אם התקלקל שם רק מודול אחד (מעגלים מודפסים של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד מודרניים בנויים לפי טכנולוגיה שלא מאפשרת תיקונים) ולרכוש חדש. ובכך היעדר התקנים יוצר בעיה כלכלית חמורה מאוד, אשר מעכבת התפתחות ומודרניזציה של ממסרי הגנות.

לפי דעתנו דור הבא של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריך לייצר בצורה של מודולים פונקציונאליים (מעגלים מודפסים), אשר בעלי ייחודיות לפי הגודל ובעלי חיבורים ייחודיים.

במקרה כזה לא יהיה צורך בקופסאות נפרדות (מה שקיים בהרבה מקרים בתחום אלקטרואנרגטיקה).

כל ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד יכול להיבנות ע"י מדור אופקי נפרד בארון, עם מסילות למעגלים מודפסים, עם דלת פרטית ודופן אחורית עם מחברים ומסופים לחיבור כבלים חיצוניים.

ארון ממסרים עצמו צריך להיות מיוצר לפי טכנולוגיה ייחודית המספקת הגנה על תכולתו מפני השפעות אלקטרונגנטיות. כיום קיימות טכנולוגיות (ארונות מיוחדים, סלילים ואיטומים לכבלים חשמליים וכו') אשר יכולים להפחית משמעותית השפעות של קרינות אלקטרומגנטיות חיצוניות בטווח רחב של תדרים על מכשור רגיל כמו ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד. ארונות כאלה מיוצרים היום על ידי חברות: R.F. INSTALLATION, INC; UNIVERSAL SHIELDING CORP; ELDON; EQUIPTO ELECTRONICS CORP; EUROPEAN EMC PRODUCTS LTD; AMCO ENGINEERING ורבים אחרים.

7.1.2.2 סטנדרטיזציה של מודולים פונקציונאליים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

כיום מודולים ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד לא תמיד מורכבים ממודולים פונקציונאליים ולפעמים יש להם צורה של "וינגרט" כאשר על פלטה פונקציונאלית אחת ממוקמים בלוקים פונקציונאליים שונים [7.16]. מבנה כזאת לא מתאים למימוש רעיון של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד אוניברסאלי, לכן כל פלטה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד עתידי צריכה להכיל מודול אחד, למשל: מודול מעבד מרכזי, מודול ספק כוח, מודול כניסות אנלוגיות, מודול כניסות לוגיות, מודול ממסרי הפלט.

בביצוע מבני כזה בשוק היו צצים "שחקנים חדשים". חלק מהם היו מתמחים בייצור מודלים עם כניסות אנלוגיות עם שנאי חשמל ומתח, אחרים – בייצור של לוחות-אם, יצרנים נוספים – בייצור של כניסות דיגיטליות, יצרנים אחרים - בארונות בנפח שונה: החל מארונות תליה ועד לארונות רצפה בגודל מלא. הצרכן היה יכול להרכיב את הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד שלו ממודולים של יצרנים שונים, כפי שעושים היום בתחום של מחשבים אישיים, בהתחשב בעלות ואיכות המודולים. זה לא רק יפתור רב בעיות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד הקיימות היום אלא גם יצמצם באופן משמעותי את עלות הגנה הממסרית. הדבר האחרון יכולת לאפשר להתקין שני סטים של הגנות זהות במקום אחד כדי לשפר את אמינות השימוש ולהשתמש בסט שני כגיבוי רזרבי, אשר מופעל אוטומטית עם אות "WATCHDOG" מממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד עיקרי פגום. אפשר גם היה לוותר על ספק כוח פרטי לכל

ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ולהשתמש עבור הארון בערכה כפולה של ספק כוח בעלת עוצמה מוגברת ואמינה יותר. אפשר היה להתקין בארון כזה הרבה מודולי שירות שונים, אשר מגבירים את אמינות הפעילות של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד.

איור 7.3

ספרים בתבנית פוליו עבי כרס עם תיאור של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, מיועדים לצרכן

אפשר היה אז לפשט מאוד את העבודה של צוות שירות, כלומר, צוות שירות ממסרי הגנות, משום שהוא לא היה צריך אז ללמוד ספרים עבי כרס (איור. 7.3) של כל אחד מהסוגים המותקנים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ולהתמודד עם תכונות מיוחדות של כל אחד מהם. בנוסף להקלות משמעותיות בתפעול ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד וצמצום הזמן לפתוח הגנות חדשות, היה יורד משמעותית שיעור השגיאות, הנובעות ממה שמכונה הגורם האנושי.

7.1.2.3. סטנדרטיזציית התוכנה של ממסרי הגנות מבוסס מיקרו מעבד

התוכנה של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריכה להתבסס על עקרונות בדוקים ואמינים, בהם משתמשים במחשבים אישיים, זאת אומרת צריכה להיות מעטפת בסיסית בדומה לתוכנת חלונות (Windows) (אבל בוודאי הרבה יותר פשוטה) ומספר תוכנות עזר וספריות, מיועדות לסוגים מדויקים של ההגנות. בנוכחות של פלטפורמת תוכנה אוניברסאלית ומבנה מעטפת ייחודי של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, בלית ברירה היה נוצר גם השוק לתוכנות עזר, לסוגים שונים של הגנות. יותר מזה, היה אפשר להגיע לכך, שממשקים של התוכנות האלה היו גם עוברים תהליך סטנדרטיזציה, כדי שהצרן, בעת רכישת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד חדש, לא יצטרך ללמוד מחדש או ללמוד מאפס ממשק תוכנה, כפי שזה קורה היום.

7.1.2.4 על הצורך בסטנדרטיזציה של הניסויים על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

ניסויים על ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בעת הכנסתם לפעולה ובעת הפעולה מהווים מספר פעולות די מסובכות וחשובות בדיוק ואמינות שלהן תלויים לא רק במשך זמן הניסוי, אלא גם בנכונות פעולה של הגנה הממסרית. הדבר האחרון מותנה בכך, שבתהליך הניסויים, לעתים קרובות, יש צורך לשנות הגדרות הממסר או לחסום פונקציות מתחרות ולאחר מכן לבטל את החסימות. בדיקות של מאפייני הגנה של צורה מורכבת (בפרט, מאפיינים של הגנה מרחוק) של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד מודרניים רב תכליתיים יכולות להתבצע רק באמצעות שימוש

במערכות ניסוי מורכבות מאוד. צורך בחיבור נכון של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד מורכבות למערכות ניסוי מהווה בעיה נפרדת [7.4], אשר נדונה בפרוטרוט בסעיף [7.14].

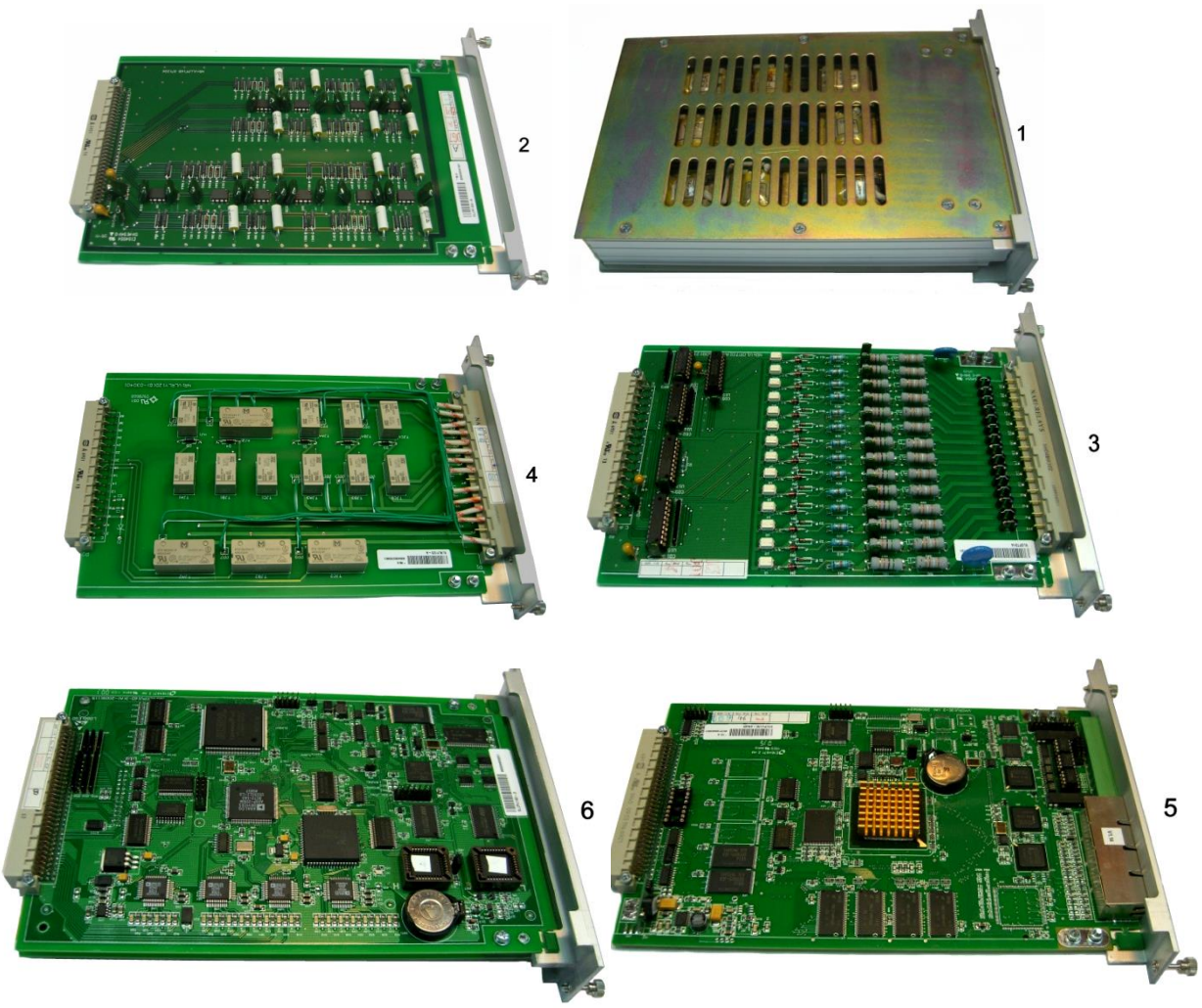
7.1.2.5 עקרונות בסיסיים להנדסה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד – בסיס לתקן עתידי

איור 7.4
מודול ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מאוחד, אשר בו מודול מיקרו-מעבד נמצא בסמוך לספק כוח וממסר הפלט

ובכן, העקרונות הבסיסיים, אשר צריכים להיות מונחים לפי דעתנו בבסיס התקן העתידי עם שם הקוד: "עקרונות הנדסת התקנים מבוססי מיקרו-מעבדים של הגנה ממסרית. דרישות עיקריות":

1. בלוקים פונקציונאליים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד חייבים להיות בהפרדה פיזית ברורה והמיקום האקראי על מעגלים מודפסים, אשר מיושם היום [7.15] חייבים להחליף במיקום מסודר על פי תקן מיוחד הנקבע מראש. לדוגמא, מודולים פונקציונאליים כמו ספק כוח, מודל שנאי כניסת זרם ומתח, עם אלמנטים של עיבוד מקדמי של האותות, מודול כניסות דיגיטאליות, מודול ממסרי הפלט, מודול מעבד מרכזי וכו' צריכים להיות על מעגלים מודפסים נפרדים בגודל תקני עם חיבורים אוניברסאליים.

2. התקנים נפרדים של הגנה ממסרית של מתקן אנרגיה צריכים להיות מיוצרים ונמכרים לא כמוצרים בודדים בעלי ארגזים ייחודיים בגודל וצורה שונים, אלא בצורה של מעגלים מודפסים אוניברסאליים נפרדים (מודולים), שמהם הצרכן יכול להרכיב ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בתצורה נדרשת. מעגלים האלה (מודולים) צריכים להיות מיועדים להתקנה פשוטה (על ידי הכנסה למסילות עד לחיבור לפלטה מחברת) לתוך ארונות מברזל, עם תאים נפרדים ועם דלתות נפרדות. ארונות ברזל צריכים להיות מיוצרים לפי טכנולוגיה אשר לוקחת בחשבון הגנה על תכולתם מפני הקרנות אלקטרומגנטיות חיצוניות.



<u>איור 7.5</u>

ערכת מודולים פונקציונליים (220 x 145 מ"מ), אשר יוצרו על גבי מעגלים מודפסים נפרדים, מהם מורכבים ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד שונים מתוצרת חברת NARI-RELAYS: PCS-931 (הגנה דיפרנציאלית של הקוים), PSC-902 (הגנה מרחוק), וכו'. 1 - מודול שנאי קלט של זרם ומתח; 2 - מסנן צר (פילטר אנטיאליאזינג); 3- מודול כניסות דיגיטאליות; 4 מודול ממסרי פלט; 5 מודול תקשרת אופטי; 6 מודול מעבד מרכזי

1. פונקציות ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריכות להיות מוגבלות רק במטלות של הגנה ממסרית בלי שום מטלות אחרות. כמות הפונקציות במודול אחד צריכה להיות אופטימאלית לפי המחירים ואמינות ומוגבלת בתקן.
2. תוכנת מחשב אשר מיועדת לעבודה עם ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד צריכה להיות מורכבת מבסיס סטנדרטי של מעטפת וערכה של תוכנות עזר שונות וספריות מתאימות למעטפת כללית בסיסית.
3. אספקת חשמל לכל המודולים בארון צריכה להתבצע משני מקורות בעלי בטיחות מוגברת, אשר מחוברים ביניהם כעיקרי ורזרבי.

האם מבחינה טכנית יישום קונצפט בניית ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד הוא אפשרי?

כפי שצוין לעיל, לרוב ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד הקיימים היום בשוק, אין ערכת המודולים מחולקים במדויק לפי הפונקציות, וההרכב שלהם מזכיר "וינגרט" כאשר על אף מעגל מודפס בלוק של מעבד מרכזי לא יכול להיות בסמוך לספק כוח פעימתי. איור 7.4.

אולם, ניתוח של סוגים רבים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד הכי מודרניים של יצרנים מובילים מאפשר לנו לאתר התקנים, אשר תואמים בצורה מספקת כבר היום את הדרישות, אשר הובאו לעיל בכל הנוגע לביצועיים הנדסיים [7.16].

התקנים כאלה הם ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבדים מסדרה 900 של חברה סינית ידועה NARI-RELAYS. במודולים אוניברסאליים שלה משתמשים בהגנות מסוגים שונים, איור 7.5. המודולים האלה מוכנים להפעלה ולא דורשים שום הכנה מראש (מלבד הגדרת פעולות הגנה, כמובן). אין צורך בשום הכוונה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד לאחר הרכבתו, שהיא, למעשה, רק התקנה של מעגלים מודפסים, אשר מתואר באיור 7.5 (בפועל, הערכה כוללת גם פלטה של ספק כוח, אשר אין לה צורך בקונצפט שלנו ולכן היא לא הודגמה) לתוך מסילות מסומנות בקופסה (במקרה שלנו זה יהיה חלק מהארון). הרכבה של הגנה מורכבת כמו הגנה מרחוק, המכילה 7 מודולים נפרדים, אשר מתקבלים בקופסאות קרטון והפעלת ממסר לא תיקח יותר 15-10 דקות, ולאחר מכן אפשר להתחיל כבר בהגדרת המטלות. ברור למדי כי מהנדס ממסרי הגנה רגיל, ללא מומחיות בטכנולוגיות מבוססות המיקרו-מעבדים, יכול בקלות להתמודד עם ההרכבה של ממסרי ההגנה מהיחידות האוניברסאליות כאלה, ישירות באתר התקנה.

למעשה, כבר היום, אין מניעה לתחילת מימוש התפיסה המוצעת על שטחה של מדינה כלשהי. ברכישה בשלב ראשון ערכות של מודולים אוניברסאליים NARI-RELAYS (עם אלגוריתמים שונים, כתובים ב- EERKOM ומערכות שונות של שנאי קלט), ובהקמת ייצור ארונות עבורם, אפילו חברה קטנה כבר יכולה לצאת כיום לשוק של ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד עם קונצפט חדש של הגנת ממסרית זולה ואמינה, מצוידת מודולים-בלוקים רזרביים.

מהן היתרונות של הדרך החדשה לפיתוח ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד?

עבור הצרכן:

- צמצום עלויות משמעותי ברכישת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד;
- יכולת להרכיב ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ממודולים נפרדים של יצרנים שונים בצורה הטובה ביותר מבחינת הצרכים של הארגון, במונחים של איזון אופטימאלי בין איכות ועלות;
- יכולת ליצור מערך אופטימאלי של כלים חלקי חילוף ואביזרים עבור מודולים ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד;
- הפחתת חשיבות הבעיה של אמינות מופחתת של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד באמצעות החלפה מהירה וחופשית על המקום של מודולים פגומים זולים והחלפתם במודולים רזרביים, אשר נכנסים לפעולה באופן אוטומטי בעת פגיעה בעיקריים; ביטול הצורך לתקן את המודול ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד פגום;
- אפשרות להימנע מעבדות ליצרן מונופוליסט אחרי רכישה בודדה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד;

- הגברת תחרות בין יצרנים על חשבון שחקנים חדשים בשוק – חברות קטנות וגדולות, המתמחות בייצור רק מודולים בודדים ולא ערכות שלמות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד;
- פישוט הניסויים וצמצום ההשפעה של "הגורם האנושי";
- פישוט משמעותי של עבודה עם התוכנה, אפשרות לבחור את היישום המתאים והנוח ביותר (ממשק), האפשרות של החלפת יישומים ללא כאב ראש (ממשקים) עבור אותו ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד;
- האצת ההתקדמות הטכנולוגית בתחום ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, בלי לסבך הפעלתם, מבלי לגרום לבעיות נוספות לצרכן בכל מעבר לדור חדש של מכשירים, הפחתת עלות החידוש ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, משום שאין צורך לחדש את הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד כל 10-15 שנים, כפי שזה קורה היום. אפשר להסתפק בשדרוג מודולים בודדים שלה. יתר על כן, שדרוג לוח האם יכול להיות אפילו יותר תדיר מאשר נעשה כיום, מה שיתרום לקדמה טכנולוגית בתחום זה.

עבור יצרן:

היעדר צורך בייצור מודולים מיושנים נדרשים לשמירת הפעילות תקינה של דגמים ישנים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד;

ויתור על תיקון חינמי של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד במשך כל החיים;

עלייה משמעותית בצריכה של מודולים נפרדים;

הקמה של שוק חדש ליישומים חדשים (ממשקים);

האפשרות להתמקד בייצור של סוג מסיום של מודולים נפרדים, הרווחיים ביותר עבור היצרן;

אפשרות להשתתפות בעסקים האלה של חברות קטנות ובינוניות שאין להן מספיק משאבים לפיתוח וייצור של ערכות שלמות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד.

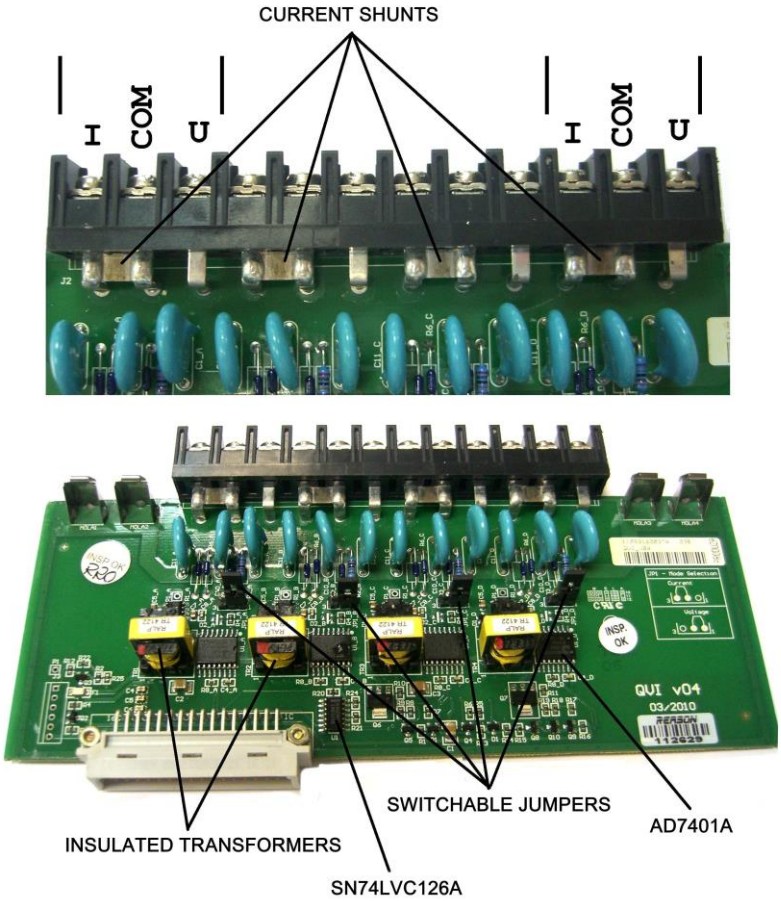
יתרון התחרותי של יצרנים מקומיים אשר ראשונים התחילו לייצר ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד בצורה של מודולים בשטחה של מדינה אחת, על פני הזרים.

<u>איור 7.6</u>

מודול כניסות אנלוגיות של מבנה מסורתי עם שנאי זרם חשמל

הרעיון של הקמת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ממערך של בלוקים אוניברסאליים, מודולים, אינו מפריע בשום צורה להשבחתם והפיתוח שלהם, ושימוש בעקרונות בניה חדשים.

לדוגמה, דבר מאוד פרספקטיבי, לדעתנו, החלפת שנאי זרם מקובל כיום בתוך מודול קלט אנלוגי, איור. 7.6 במעקפים מיניאטוריים, איור. 7.7. מעקפים מיניאטוריים, בצורה של חיבור (מגשר) באורך של 5 מ"מ בין כניסות חשמל ישירות על למחבר החשמל. המחבר כולו מחולק לארבע קבוצות של שלוש יציאות כל אחד. היציאה המרכזית של כל קבוצה משותפת גם למעגל הזרם וגם למעגל המתח. יציאה שמאלית קיצונית – של זרם, יציאה ימנית קיצונית – של מתח. זאת אומרת כל אחד מארבע ערוצי מדידה יכול להיות מנוצל ככניסה אנלוגית של זרם חשמלי או ככניסה אנלוגית של המתח.



<u>איור 7.7</u>

מודול של כניסות אנלוגיות
(RT MEASUREMENT TECHNOLOGIES GBMH) DIGITAL RECORDER RPV-311
בגודל 75x190 מ"מ

כל אחת מהכניסות האלה צריכה לקבל הגדרות נוספות ככניסת זרם או כניסת מתח באמצעות מגשרים ניידים על המעגלים מודפסים.

למרות גודלו הזעיר, יש מעקף בעל פרמטרים טובים מאוד.

- זרם נקוב A5

- עומס מתמשך - A10
- עומס זמן קצר (2 ש) - A 100
- טווח של זרמי קלט A100-A0.25
- דיוק 0.1% מהסקאלה המלאה
- התנגדות – 3 O, עומס על הTT חיצוני – נמוך מ-0.1 BA

במודול זה, אותות הכניסה האנלוגיים (ומתח וזרם) מומרים במילי וולטים, אשר מומרים אחר כך לאות דיגיטאלי בעל תדר גבוה (20 מגה-הרץ) על ידי ממירים אנלוגיים-דיגיטאליים מסוג AD7401A עם בידוד במתח גבוה של קלט מפלט (בהתאם להגדרות היצרן - עמידה בדקה אחת של מתח 5 קילוואט) מועברת הלאה באמצעות שנאים בתדר גבוה על ליבות הברזל, מנורמל באמצעות ערכה מרובעת של אלמנטים לוגיים מסוג SN74LVC126A, והולך לשקע הפלט.

בדרך הזאת ההחלטות טכניות אשר קיבלה חברה TECHNOLOGIES GBMH RT MEASUREMENT אפשרו יצירת מודול של אותות אנלוגיים, אשר שונה בפשטות שלו ומידות קטנות, זאת אומרת אפשרות לעשות עוד צעד אחד לקראת הקונצפט הנידון של ערכת מודולים אוניברסאלית להרכבת סוגים שונים של ממסרי הגנה.

ברור לחלוטין כי כל האמור לעיל הוא רק מתווה של כמה מהעקרונות הכלליים בתקן העתידי. בעבודה בפועל על תקן זה צריך לשתף מגוון רחב של אנשי מקצוע ומדענים, יצרני ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד עתידיים, וצרכנים עתידיים ומהנדסים. היעדר כהיום תקנים כאלה, כלומר, מסגרות מגבילות כלשהן ומגמות להתפתחות בפיתוח ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד כבר מוביל להפסדים כלכליים משמעותיים, ובעתיד הקרוב עשוי להוביל לכאוס מוחלט בתחום זה.

7.2. עקרונות בסיסיים של סטנדרטיזצית ניסויים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

סטנדרטיזצית הניסויים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד – עוד מגמה חשובה אחת, המאפשרת צמצום זמן שיקום ממסרי הגננות לאחר החלפת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר נפגע מפעימה אלקטרומגנטית או על ידי אמצעים אחרים של פגיעה אלקטרומגנטית. לאחר קביעת העובדה של פגיעה הרסנית מכוונת בתחנת כוח (תחנת משנה) ומערכת כיבוי החירום שלה, לפני הפעלה מחדש יש צורך לבדוק תקינות ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד המופעלים מחדש. אחת הבעיות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד היא מורכבות תהליך הבדיקה של תקינות שלהם, מה שמשפיע ישירות על זמני אספקת החשמל.

תקינות של התקני ממסרי הגנות נהוג לבדוק על אותם מתקנים, אשר יעשה בהם שימוש בעתיד בפעילות ריאלית של הממסר בנקודה מסוימת ברשת. בעת שינוי הגדרות במהלך השימוש בממסר היה צורך בבדיקה חוזרת של תקינות הממסר עם ההגדרות החדשות האלה. בימים של ממסרי הגנה אלקטרומכניים זה היה אמצעי מוצדק למדי, משום שמעבר מן הגדרה אחת לאחרת על ידי ההזזה מכאנית אלמנטים פנימיים של הממסר או העברה מגעים של שנאים בנויים. בעת שינוי הגדרות של הממסרים כאלה היה יכול להיות כי המעגלים הפנימיים של הממסרים, אשר מחוברים למגעים החדשים של השנאים, לא תקינים (קריעה ונתק של החוט, מגע רופף, בידוד פגום וכו') או שבמצב חדש של האלמנטים המכאניים בממסר מופר האיזון, מופיע "מחיקה" וצרות דומות. לכן, הפעולה הרגילה של ממסרים אלקטרומכניים עם סט אחד של הגדרות עוד לא מבטיחה את הפעילות התקינה שלהם עם הגדרות אחרות.

בממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מעבר מסט הגדרות אחד למשנהו לא מלווה בשינויים פיזיים של המבנה הפנימי שלו. ללא קשר להגדרות ומצבים שונים, בממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד פועלים אותם מעגלי קלט ופלט, אותם אלמנטים לוגיים, אותו מעבד, אותו ספק כוח, וכו'. אפילו הפעלה וניתוק פונקציות בודדות של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד לא קשורה לשינוי מצב הפיזי של המעגלים שלו. בדיקת התקינות של בחירה היגיון ההגנה ותקינות של חישוב ההגדרות עבור התנאים הספציפיים של רשת מסוימת - היא משימה אחרת, שאין לה קשר לבדיקת תקינות הממסר, והאחריות מוטלת לא על הצוות המתפעל ואחראי על תקינותם אלא על השירות ההנדסי אשר אחראי על פיתוח הגדרות ובחירה של ההיגיון הפנימי לפעילות הממסר. וזה גם בלתי אפשרי בתהליך של בדיקת תקינות הממסר לדמות כל המצבים האמיתיים וכל הצירופים האפשריים של גורמים פועלים ברשת אמיתית. זיהוי של מצבים כאלה אינו מהווה מטרה בבדיקות התקינות של ממסר הגנה. יתר על כן, אפשר להראות כי ויתור על בדיקות ממסר באמצעות הגדרות מחושבות הוא צעד חיובי להפחתת הסיכון של פעולה שגויה של ההגנה כתוצאה ממה שמכונה "הגורם האנושי" (סיבות לכמעט 50% של פעילות לא נכונה של ההגנה). העניין הוא שבהגנות מרובות פונקציות מבוססות מיקרו-מעבד הגדרות עבור תנאי הפעלה ספציפיים נבחרות כך שלבדוק פונקציות ספציפיות של הממסר אפשר רק אם לשבש או לכבות לחלוטין פונקציות מתחרות אחרות. אי שחזור של פונקציה כזאת למצב מקורי לאחר תום בדיקת הממסר לעתים קרובות גורם לפעולות שגויות של ההגנה במצבי חירום. גישה דומה לבעיה של בדיקת ממסר ההגנה אומצה גם ב -[7.17]. במסמך הזה, אשר הינו בעל מעמד של תקן, כל בדיקות הממסרים מחולקות לשני סוגים: בדיקות כיול (שנועדו לבדוק את ההגדרות תצורה הממסר) ופונקציונאליות. אם עבור הבדיקה התפקודית נקבעת תדירות של אחת ל- 4 שנים לכל סוגי ממסרים (לרבות אלקטרומכניים ומבוססי מיקרו-מעבדים), ולבדיקות הכיול נקבעת תדירות ביצוע בדיקה פעם ב- 4 שנים עבור ממסרים אלקטרומכניים בלבד. כיול תקופתי (כלומר, בדיקת ההגדרות) של הגנת ממסרים מבוססי מיקרו-מעבדים אינו מתוכנן מראש בכלל.

7.2.1. מבט חדש על הבעיה

בהתבסס על האמור לעיל, אנו יכולים לנסח כמה עקרונות שניתן לאמץ אותם בעת בדיקות הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד:

1. כדי לאשר את תקינות הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד המורכבים רב תכליתי בעת הכנסתם לשימוש, לאחר תיקונים או במהלך הבדיקה תקופתית, לא חייבים לבצע בדיקתם דווקא על אותן הגדרות, עליהן הממסר ימשיך לפעול ברשת נתונה.

2. כדי לבדוק תקינות הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מספיק לבדוק את תפקודו התקין רק בנקודות קריטיות מסוימות, שהוגדרו מראש על פי מאפיינים מסוימים; במצבי הפעלה מסובכים ביותר ומורכבים (משולבים), כולל מצבי פעולה דינאמיים עם מאפייני החלפה שנקבעו מראש – אופייניים לרשתות חשמל טיפוסיות (אך לא בהכרח לרשת נתונה).

איור 7.8

ערכת השראתיות של חברת ג'נרל אלקטריק לבדיקות ממסרי הגנה אלקטרומכניים

איור 7.9

מתקן מסוג (ASEA)TURH-20 לבדיקה של ממסרי הגנה אלקטרומכניים,
מכילה ערכות של השראתיות והתנגדויות פעילות

בדיקות כאלה צריכות לכסות את כל הקלטים והפלטים פיזיים של הממסרים. לאחר בדיקת הממסר ואישור תקינותו כל הגדרות הבדיקה צריכות להיות מוחלפות באופן אוטומטי על ידי מערכת מוכנה מראש (קובץ) של הגדרות מחושבות ריאליות.

3. בדיקה כזו של הגנה המיקרו-מעבד בתנאי ההפעלה המורכבים ביותר תאפשר, לדעתנו, בדיקה הרבה יותר טובה של תקינות הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, לעומת בדיקה בתנאים מוגבלים ביותר של הגדרות ספציפיות שיאפשרו המשך התפקוד של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד.

4. בדיקה מקיפה של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בעת הכנסתו לפעולה בתנאי הפעלה קשים ביותר מאפשרת לבטל ביצוע בדיקות נוספות של יכולת פעילות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד בכל פעם שמשנים את ההגדרות במהלך השימוש.

העקרונות האמורים לעיל מאפשרים מבט חדש על בעיית בדיקה ואבחון של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד.

ניתן להניח כי המכשיר הראשון לבדיקת ממסרי הגנה הופיע כמעט בו זמנית עם ממסרי ההגנה עצמם. מטבע הדברים, הם היו כה פרימיטיביים כמו ממסרי הגנה עצמם. בהתחלה אלה היו רק סלילי הַשׂרָאוּת מכוילים איור 7.8 וריאוסטטים.

עם השיפור ושכלול של הממסר, הגדרות הניסוי שלו והתקנה נהיו גם כן מורכבים יותר. הופיעו מתקני ניסוי (סטנדים) (איור 7.9) המכילים ערכות השראות וההתנגדויות פעילות אשר באמצעותן ניתן היה כבר לקבוע את הזווית בין המתח והזרם טווח רחב ולבדוק ממסרים אלקטרומכניים מורכבים למדי.
במערכות אנרגיה שונות נקבעו מועדים שונים לבדיקות תקופתיות של הגנה ממסרית (אחד לכל 3 - 2 שנים), אבל בדרך כלל הקפידו ועמדו במועדים.
בעת הופעתם בשוק ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים מצב השתנה מקצה אל הקצה. יצרנים של מכשירים אלה הצהירו כי ממסרי המיקרו, לכאורה לא זקוקים לבדיקות תקופתיות, כי הם בעלי מערכת אבחון עצמי מובנית. תכונה זאת הייתה מוצגת בפרסומות כמעט כמו היתרון העיקרי שלהם על ממסר אלקטרו מכאני אלקטרו-אנלוגי. קמפיין פרסום עוצמתי שהושק על ידי היצרנים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד שיחק את תפקידו. מומחים רבים בתחום ממסרי הגנה ללא עוררין האמינו לתעלול פרסומי זה, מבלי יכולת בפועל לזהות את אמינות ההצהרה הזאת, אם כי זה היה די ברור שזה בלתי אפשרי ליצור מערכת בדיקה המבוססת על מיקרו-מעבד פנימי ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר תבדוק תקינות פיזית של אלפים רבים רכיבים אלקטרוניים. זה גם בלתי אפשרי מבחינה תפקודית לבדוק את התקינות, למשל, של יחידת הקלט או הפלט ללא הכללת היחידות האלה ובדיקת התגובה של הממסר בעת שליחת אותות. בפועל, רוב הממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבדים פשוט לא שמים לב להחלפת יחידה שלמה של מעגלים מודפסים מסוג אחד לסוג אחר שאינו תואם את ההגדרות הנוכחיות של הממסר. על הגימיק הזה ועל גימיקים פרסומיים אחרים הקשורים ל"אבחון עצמי" של הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד יש אזכורים בכתבות רבות של המחבר בנושא הזה. בניגוד ליצרני הממסרים, יצרנים של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה תמיד טענו שכל ממסרי ההגנה תמיד צריכים לעבור בדיקות תקופתיות, כולל מערכת ממסר הגנה מבוססת מיקרו מעבד משום שאחוז מה שמכונה "אבחון עצמי" תופס לא יותר מ 15% של התוכנה והחומרה. איור. 7.10. מערכות בדיקה ממוחשבות מודרניות לבדיקה של הגנות מבוססות מיקרו-מעבדים רב התכליתיות למרות הטענות של יצרני ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד על היעדר צורך בבדיקות תקופתיות של מערכות הגנה, יצרני מערכות בדיקה של ממסרי הגנה המשיכו מבלי לעצור, לפתח במהירות ולהשיק ולשווק מערכות בדיקה חדשות וחדישות בשוק.

7.2.2 מערכות בדיקה מודרניות עבור ממסרי הגנה

מכוון שעקרונות בניית הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד היום הפכו להיות משותפים עבור רוב היצרנים, אז באופן טבעי, כל המערכות בדיקה המוצעות בשוק כיום של חברות שונות הן גם מאוד דומות זה לזה, ולא רק במראה

החיצוני, איור. 7.10, אלא גם במאפייניהן של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה היום - הן מכשירים ממוחשבים באופן מלא אשר אינם מכילים כל פקדים בלוח בקרה קדמי, מלבד שקעי חיבור לכבלים חיצוניים ומחבר RS232 לחיבור המחשב. עלות מערכות בדיקה של ממסרי הגנה כאלה עשרות אלפי דולרים. מערכות כאלה נועדו לבדוק לשלוש קבוצות: סטטיות (בדיקות מצב יציבות), דינאמיות (ניסוייהם דינאמיים) ותהליכי מעבר (בדיקות מעבר). הקבוצה הראשונה של בדיקה נועדה לבדוק את ההגדרות הבסיסיות של הפעלת הממסר, והיא מעין מבחן הראשוני של הממסר. הקבוצה השנייה של בדיקות נועדה בעיקר לבדוק את ההתנהגות של הגנות מורכבות, כגון הגנות מרחוק או דיפרנציאליות, על חלקים שונים של אזורי הגנה ואת המאפיינים של שינוי פרמטרי קלט (זרם, זווית, מתח) לאורך זמן. יים מניחה הכנסה לתוך מעגלי הקלט של הממסר קובצים של תהליכי מעבר בפורמט COMTRADE שחולצה מן אשר נשלפו ממכשירי ההקלטה, שהקליטו תהליך מעבר בפועל של קצר ברשת, או קבצים באותו פורמט, שנבנו באופן מלאכותי באמצעות תוכנות מיוחדות. תוצאות הבדיקה מועברות למסד נתונים מיושם בדרך כלל על ידי Sybase SQL Anywhere ונרשמות אוטומטית כמו פרוטוקול סטנדרטי שמאפשר לשלוח אל המדפסת. יצרני מערכות בדיקה של ממסרי הגנה מציעים בדרך כלל ערכות של תהליכי בדיקה (ספריות) בצורת מאקרוסים לסוגים שונים של ניסויים ואפילו לסוגים נפוצים של ממסרים.

7.2.3 בעיות של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה מודרניים בעלי סופר גמישות ואפשרויות פונקציונאליות הרחבות ביותר

מערכות בדיקה של ממסרי הגנה האלה מאפשרות לדמות כמעט כל תנאי העבודה של ממסרי הגנה הקיימים בפועל, לרבות הקמה לפי דרישות משלה תחת קבצי Comtrade מלאכותיים; עיוות מלאכותי של צורת הגל הנוכחית; סימולציה של הרמוניות; הסטה של סינוס ואידה של הזרם ביחס לציר (סימולציה של רכיב אפריודי); סימולציה של תגובה המפסק; בנייה אוטומטית של מאפיינים מורכבים ביותר של הגנה מרחוק לצורך ניסוי; סנכרון הגנות דיפרנציאליות באמצעות לוויינים, וכו'. יכולות על כאלה של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה מודרניים מותנות בקיום הצד השני של המטבע: הצורך להזין מאות פרמטרים לתוך עשרות טבלאות לבצע כל בדיקת ממסר נפרדת. הספריות המובנות של תהליכי הבדיקה בפועל עוזרות מעט, שכן הן אינן פותרות מהצורך למלא טבלאות רבות. צריך להוסיף לכך גמישות ואוניברסאליות לא קטנים של האובייקט הנבדק (ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד), אשר גם כן דורש הכנסת מספר עצום של פרמטרים של עשרות תפריטים נפתחים וטבלאות. אי התאמה הקלה ביותר בין הגדרות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד למערכות בדיקה של ממסרי הגנה מובילה לתוצאות שגויות. יתר על כן, לא תמיד אפשר להבין כי התוצאות שהתקבלו אינן נכונות. גם במקרים שבהם השגיאה ברורה (למשל, אפיון המתקבל של הממסר לא תואם את הערך התיאורטי), מאוד קשה לקבוע בדיוק איפה אירעה השגיאה: בהגדרות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד או בהגדרות של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה . על סמך הניסיון האישי המחבר יכול לאשר כי חיפוש השגיאה מסוג זה היא מסובכת מאוד ולוקחת הרבה מאמץ וזמן.

לא פחות קשה לעבוד עם מודל של רשת חשמל (דגם מערכת הפעלה), אשר משתמשים בה בסוגים מסוימים של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה לבדיקת הגנות מרחק. כדי להגדיר פרמטרים למערכות בדיקה של ממסרי הגנה במצב הזה דרוש ידע של מגוון רחב של פרמטרים של רשת חשמל אמיתית, אשר יש צורך להכניס אותם לתוך טבלאות מיוחדות עם מקדמים ספציפיים. טכנאי חשמל ואפילו מהנדס שירות ממסרי הגנה לא מכירים את רוב

הפרמטרים של הרשת האמיתית, המקדמים המיושמים לעתים קרובות אינם ידועים, מה שמחייב השתתפות מהנדסי בדיקת ממסרים של שירות אחר בתהליך בדיקת הממסרים.

7.2.4 הפתרון המוצע לבעיה

פסיכולוגים מזמן מצאו כי ככל המפעיל צריך להשתמש במספר רב של לחצנים (אמיתיים או וירטואליים, כלומר, של התוכנה) כך פוחתת יעילות האינטראקציה של אדם עם ציוד כזה.

תכונות ופונקציות רבות של טכנולוגיה כה מורכבת פשוט יוצאות מטווח של התפיסה האנושית. כיצד אז ניתן לשלב את האוניברסאליות ואפשרויות פונקציונאליות רחבות של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה עם אפשרויות של טכנאי או מהנדס ממוצע של שירות ממסרי הגנה, אשר זקוק באימות ובדיקה מהירים של מספר מצומצם סוגי ממסרים? להתגבר על קשיים עצומים, לפתח נהלים עצמיים וליצור על הבסיס ספריית מאקרוסים, כפי שנכתב על ידי יצרני מערכות בדיקה של ממסרי הגנה? יש לנו הצעות לפתרון רדיקלי יותר לבעיה זו:

1. מערכות בדיקה המודרניות מבוססות ממסרי הגנה מיקרו-מעבדים של הדור האחרון טכנית אין הצדקה מבחינה כלכלית להשתמש בהם לבדיקת ממסרים אלקטרומכניים פשוטים כגון ממסרי זרם ומתח (למשל מסוג RT-40 או RN-54, כפי שמוכתב על ידי יצרנים של RETOM-51 הרוסית). לעניין זה הרבה יותר יעיל שימוש במערכות בדיקה פשוטות. אין שום טעם לפתח הליכי בדיקה לביצוע בדיקות ממוחשבות אוטומטיות של ממסרי הגנה כאלה, אלא אם כן מדובר בביצוע בדיקות של מאות ממסרים זהים בתהליך הייצור שלהם.

2. לשימוש במערכות בדיקה של ממסרי הגנה מודרניות מדור אחרון בספריות מובנות של נהלי בדיקה הדורשות הכנסה מספר רב של פרמטרים והיכרות מקדמים רבים יש הצדקה רק להגנות מורכבות אלקטרומכניות ישנות (למשל הגנות מרחוק מסוג LZ-31).

3. כדי לבדוק ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מודרניות מורכבות רב-פונקציונאליות יש צורך לפתח פלטפורמת תוכנה משותפת לכל סוגי מערכות בדיקה של ממסרי הגנה אשר עבורם צריכות להיות דרישות חוק בהתאם לתקן בינלאומי. דוגמא לפלטפורמת תוכנה משותפת היא Sybase SQL Anywhere הידוע אשר נמצאת בשימוש נרחב ליצירת מסד הנתונים במגוון של מכשירי קלט ואיסוף ועיבוד נתונים, סימולציות, מערכות בדיקה של יצרנים שונים. דוגמה נוספת היא פורמט אוניברסאלי יישומים לעבודה עם סוגים שונים של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה יכולים להיות בעלי ממשקים שונים לחלוטין, אבל הם כולם חייבים להיות מיושמים על פלטפורמת תוכנת משותפת ותקנית. Comtrade, אשר משמשת כל סוגי מכשירי תיעוד של מצבי חרום מבוססי מיקרו-מעבד, ולמעשה, בכל סוגי מערכות בדיקה של ממסרי הגנה לצורך הדמיית ארעי מעבר.

4. ליישומים העובדים עם סוגים שונים של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה יכולים להיות ממשקים שונים לחלוטין, אבל הם חייבים להיות מיושמים על פלטפורמת תוכנת תקנית משותפת.

5. יצרני ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד חייבים לספק למערכות ההגנה שלהם שני תקליטורים. על אחד מהם, תחת מספרים מתאימים, אמורים להיות מוקלטים סטים מלאים של הגדרות למצבי הגנה ספציפיים או לנקודות מאפיינות של הגדרה, או דוגמאות טיפוסיות של רשתות חשמל. על השני, תחת המספרים שקשורים לסטים של הגדרות הגנה צריכים להיות מוקלטים סטים מלאים של הגדרות מערכות בדיקה של ממסרי הגנה

ותרשימים של חיבורים חיצוניים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד לכניסות ויציאות של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה.

6. השימוש היעיל במערכות בדיקת ממסרי הגנה המודרניות לבדיקת ממסרי הגנה מבוססי מיקרו מעבד רב תכליתיים מודרניים מובטח, לדעתנו, רק אם הליך הבדיקה כולה יבוא לביטוי בטעינה לתוך הממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד סטים של הגדרת מספר XX1, שנטען לתוך מערכות בדיקה של ממסרי הגנה סטים של הגדרות מספר YY1, לחיבור ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד למערכות בדיקה של ממסרי הגנה ו ... הכנת כוס קפה. לפיכך, הסט של צעדים המוצע לאיחוד פלטפורמת תוכנת של מערכות בדיקה של ממסרי הגנה מודרניות מדור אחרון תאפשר לארגן את העבודה של בדיקת ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד מודרני רב-תכליתי בדרך חדשה. אנו מאמינים, שזה יסיר הרבה מחסומים טכניים ופסיכולוגיים, ויתרום לירידה משמעותית של הזמן הדרוש לבדיקת תקינות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, גם בעת השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת וגם במצבי שימוש ופעילות רגילים של ממסרי הגנה.

7.3 יצירת מלאים של מודולי מכשור אלקטרוני הניתנים להחלפה כאמצעי לשיפור שרידות מערכת אספקת החשמל

7.3.1 אופטימיזצית המלאי המודולים של ציוד אלקטרוני, הניתנים להחלפה

אחת הדרכים היעילות לשיפור שרידות המערכת החשמל היא שיקום מהיר של מכשירים פגומים באמצעות שימוש בחלקי חילוף, כלים ואביזרים (חלקי חילוף) עם זאת, יצירת מלאי חלקי חילוף דורשת סכומי כסף משמעותיים, במיוחד במקרה של מערכות הגנה אלקטרוניות מורכבות מבוססות מיקרו-מעבד, אוטומציה ובקרה, אשר בשימוש נרחב במערכות אספקת חשמל. לכן, בכל העולם כבר מזמן עוסקים בחיפוש עבור מלאים אופטימאליים של חלקי חילוף, המאפשרים שילוב של אמינות הנדרשת של מערכות עם הוצאות מינימאליות. יצירת מלאים אופטימאליים של חלקי חילוף - בעיה משותפת, ידועה היטב בתחומים טכניים רבים, שכיום היא מבוססת היטב באופן תיאורטי, עם השימוש בטכניקות אופטימיזציה מתמטיות שונות [7.18 - 7.25]. שיטות ידועות לייעל מלאי חלקי חילוף מבוססות על ניתוח של הנתונים הסטטיסטיים של כשלים באלמנטים, מודולים נשלפים או מוצרים שלמים. כלומר, מספר ערכות חלקי חילוף דרושות מחושב על בסיס העובדה כי הכשלים של ציוד אלקטרוני הם אירועים אקראיים בודדים המתרחשים עם תדירות מסוימת, אשר כפופה לחוקים של התפלגות הסטטיסטית של משתנים אקראיים. הצורך להגדיל את מספר סטים של חלקי חילוף במטרה להבטיח את שיקום פעילות הציוד לאחר פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני אינו מוטל בספק.

אבל איך בדיוק אפשר להגדיל אותו? ברור כי במקרה של השפעת פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני על הרשת אספקת החשמל יתרחשו כשלים מסיביים סימולטאניים של ציוד אלקטרוני, אשר אינם כפופים לשום חוקים סטטיסטיים. בנוסף, התהליך הרגיל, די ארוך של הזמנה וקבלת סטים חדשים של חלקי חילוף לחידוש מלאי לאחר אזלת מלאי של הסטים אשר הוכנו מראש אינו מתאים במקרה הזה. לפיכך, עליה פשוטה במלאים של חלקי חילוף פי אחד וחצי פי שניים (כפי שלפעמים נעשה לפעמים על ידי מנהלים לא כל כך נבונים) אינו פותר את הבעיה, והעלאת מלאי לרמות כאשר עבור כל הציוד האלקטרוני אשר נמצא בשימוש יוחזקו חלקי

חילוף - פשוט לא מציאותי מטעמים כלכליים. לכן, כדי לחישוב הסט האופטימאלי של חלקי חילוף יש להשתמש בגישה שונה לחלוטין.

השיטה המוצעת מבוססת על שלושה נדבכים עיקריים:

1. לא כל המכשירים חשמליים חייבים להיות מכוסים בסט חלקי חילוף, אלא רק חלק מהם, מזוהה כהתקנים חשובים וקריטיים אשר בלעדיהם אפילו פעילות חלקית של מתקני חשמל היא בלתי אפשרית, ואשר ביניהם, בתורו, יש לבחור רק התקני חשיבות קריטית עבור מערכת החשמל.

2. עבור התקנים חשובים וקריטיים שנבחרו יש לספק מלאי חלקי חילוף מלאים ולא חלקיים.

3. מלאים של חלקי חילוף התקנים חשובים וקריטיים יש ליצור בנוסף ובנפרד ממלאי חלקי חילוף המאוחסנות במחסנים.

לפיכך, אופטימיזציה מלאים של חלקי חילוף במקרה זה באה לביטוי רק בחישוב כמות של התקנים חשובים וקריטיים הנדרשים להשלמת התקני חשיבות קריטית ברשת חשמל ספציפית.

7.3.2 הבעיה של אחזקת מלאי של חלקי חילוף

הבעיה של אחזקת מלאי של חלקי חילוף דורשת פתרון שתי בעיות: היכן לאחסן חלקי חילוף וכיצד לאחסן אותם.

היום, במערכות אספקת חשמל רבות סטים של חלקי חילוף מאוחסנים במחסנים, לעתים קרובות רחוקים מתחנות הכוח, משם מקבלים אותם במקרה הצורך שירותי תיקונים או שירותים אשר מעורב ישירות בתחזוקה. בעת הצורך בשיקום התקנים חשובים וקריטיים לאחר חשיפת לפעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, מתעוררת בעיה של אספקת חרום של מטענים עם חשיבות קריטית לאובייקטים בעלי חשיבות קריטית, מכיוון ש מתחת השפעה של פעימה אלקטרומגנטית בסבירות גבוהה יושבתו מיקרו בקרים, אשר אחראים כל פעילות של כלי תחבורה מודרניים. עבור מערכות טלקומוניקציה בהתאם ל-[7.19] משתמשים במערכת דו-שלבית של ניהול מלאי חלקי חילוף, אשר כוללת סטים של חלקי חילוף 0 וחלקי חילוף קבוצתיים. הסט של חלקי חילוף - 0 הוא חלק בלתי נפרד מההתקן (במקרה הנדון התקנים חשובים וקריטיים) ואמור להיות במקום הפעלת ההתקן (במקרה שלנו באובייקט בעל חשיבות קריטית. הסטים של חלקי חילוף קבוצתיים, אשר משתמשים בהם להשלמת המלאים של חלקי חילוף - 0 ומאוחסנים במרכז שירות טכני גדול (או במחסן. הסטים של חלקי חילוף -0 וחלקי חילוף קבוצתיים חייבים לעבור בדיקות וניסויים לפני העברה לאחסון. גישה כזאת של ארגון האחסון של חלקי חילוף של ציוד אלקטרוני כאשר יש צורך בשיקום מערכת החשמל לאחר חשיפה להשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת מוצדקת לחלוטין ולדעתנו, הכי יעילה גם בתחום האנרגיה, מכיוון שפותרת את הבעיה של משלוח דחוף של חלקי חילוף לאובייקט בעל חשיבות קריטית לצורך שיקום של התקנים חשובים וקריטיים. אחסון של חלקי חילוף להתקנים חשובים וקריטיים במקום פעילות של התקנים חשובים וקריטיים האתר אינו מחייב פתרון של בעיה זו. בעיה נוספת ניתן לפתור על ידי ארגון כזה של אחסון של חלקי חילוף להתקנים חשובים וקריטיים: בעיית התצורה שלהם והגדרות לפני התקנתם בחומרה, אשר דורשת זמן משמעותי, בהשתתפות צוות מוכשר, שימוש בציוד אלקטרוני ומחשבים מיוחדים (אשר יכול גם להיות פגומים). כדוגמה לסוג זה של התקנים חשובים וקריטיים יכולים לשמש ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד

המודרניים , אשר חיוניים לתפעול מערכת החשמל. במקרים של תקלות והשבתות רבות של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד כתוצאה מחשיפה לפיצוץ גרעיני יהיה קשה מאוד להתמודד עם הגדרת סטים רבים של חלקי חילוף במתקני כוח מרוחקים מרובים. לכן, סטים של חלקי חילוף לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד, אשר מוגדרים כהתקנים חשובים וקריטיים צריכים להיות מאוחסנים לא רק בקרבה לממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד פעילים, אלא גם חייבים להיות מתוכנתים מראש, מוגדרים ומוכנים להחלפה מהירה של בלוקים מושבתים של ממסר הגנה מבוסס מיקרו מעבד ספציפי, עם הגדרות ומאפיינים ספציפיים שלו. השאלה השנייה שצריך לפתור: כיצד לאחסן חלקי חילוף להתקנים חשובים וקריטיים. הבעיה היא שפיצוץ גרעיני יוצר על פני הקרקע עוצמת השדה החשמלי המגיעה ל 50 קילו-וולט/מטר בעוצמת השדה כזאת על הפלטים של רכיבים אלקטרוניים אפילו יחסית קטנים במימדים (בתוך מעגל מודפס אחד) עלול להתרחש הפרש פוטנציאלים, המספיק לפריצה חשמלית של p-n מעברים בהשכבות הדקות ביותר של הבידוד מיקרו-מעבד או מחיקת מידע בתאי זיכרון. לכן ערכות של חלקי חילוף להתקנים קריטיים חייבים להיות מאוחסנים במכולות מאובטחות מפני השפעות של פיצוץ גרעיני. בעלי אילו תכונות צריכות להיות המכולות האלה?

נפנה לתקן [7.26] MIL-STD-188-125-1 , אשר קובע את הדרישות עבור מיגון אפקטיבי של אובייקטים קריטיים מפני השפעות של פיצוץ גרעיני טבלה. 7.1.

טבלה 7.1

דרישות מינימאליות למיגון אפקטיבי של אובייקטים קריטיים מפני השפעות של פיצוץ גרעיני, איור 1 מ MIL-STD-188-125-1 [6.26])

החלשה, המסופקת על-ידי המסך, דציבלים	**תדירות הקרינה**
20	**10 kHz**
40	**100 kHz**
60	**1 MHz**
80	**10 MHz**
80	**1 GHz**

במקביל, תקן [7.27] IEC 61000-2-13 מספק נתונים עבור צפיפות ספקטראלית של סוגים שונים של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת, איור 7.11 שממנו ניתן לראות כי עבור רכיבים, E1 ו E2 (בתקן E2 מסומן כ"הבזק", (משום שהוא בעל פרמטרים, קרובים להבזק) פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני צפיפות הקרינה נשארת גבוה מקסימאלית בתדרים מתחת ל -10 קילו-הרץ, וכבר פוחתת דרמטית בתדרים מעל 300 מגה-הרץ. מקורות אחרים של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת(לא פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני) יוצרים קרינה בצפיפות גבוהה יחסית בטווח תדירות גבוהה יותר עד 10 ג'יגה-הרץ. לכן, הגנה יעילה חייבת להינתן בטווח תדרים בין יחידות בודדות של קילו-הרץ עד 10 גיגה-הרץ. כידוע, עומק החדירה של גלים אלקטרומגנטיים למתכת

נקבע על ידי ואפקט-עור ותלוי בתדירות: ככל שהתדירות (F) גבוהה יותר, כך פוחת עומק החדירה (Δ) של הגל, זאת אומרת, כך דופן כמסך יכול להיות דק יותר:

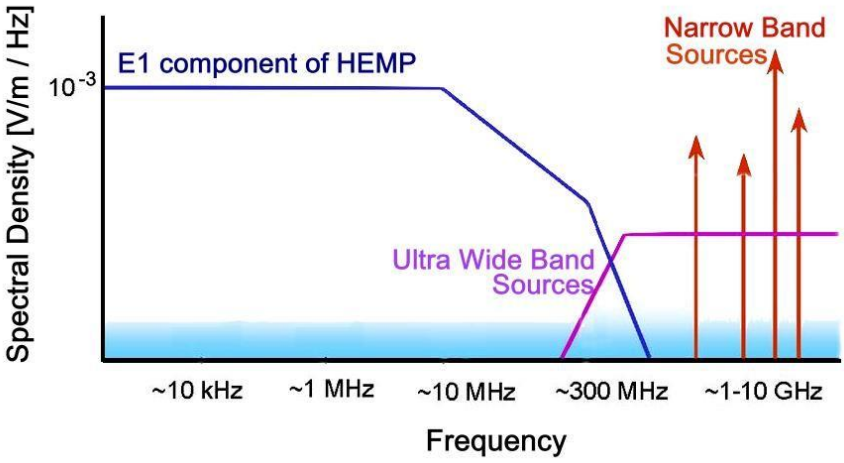
$$\Delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{\mu_m f}}$$

איפה: - Δעומק חדירת הגל

ρ – ההתנגדות סגולית של המתכת

μm - חדירות מגנטיות של המתכת

f תדירות הקרינה



איור 7.11

צפיפות ספקטרלית של קרינה ממקורות שונים של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת (מתוך תקן IEC 61000-2-13)

עומק החדירה של גלים אלקטרומגנטיים - היא שכבת פני השטח של המתכת, שבו עוצמת השדה האלקטרומגנטי פוחתת ב e = 2.718 פעמים. לפי הנתונים של [7.28] בשכבה הזאת ישוחרר כמעט 86% מהאנרגיה המגיעה מפני השטח. טבלה 7.2 מובאות תוצאות החישובים על פי הנוסחה לעיל, עבור מתכת אלומיניום, אשר בשימוש נרחב ביותר כמסך.

טבלה 7.2 עומק החדירה של גל אלקטרומגנטי בדופן המסך אלומיניום עבור תדרים שונים

תדרים	1 קילו הרץ	10 קילו הרץ	100 קילו הרץ	1 מגה הרץ	10 מגה הרץ	100 מגה הרץ	1 גיגה הרץ
עומק חדירת הגל, מ"מ	2.6	0.83	0.26	0.083	0.026	0.0083	0.0026

כפי שניתן לראות מהטבלה, מיכל עשוי אלומיניום עם עובי הדופן של 3 מ"מ יכול לספק הנחתה אפקטיבית מספקת של כל סוגי הקרינה מהשפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת אז מה מציע כיום שוק מיכלי הגנה? קודם כל, שוק זה מיוצג בצורה רחבה על ידי מכלי מתכת גדולים וכבדים עבי דופן, איור. אשר בעלי מערכות אוורור ומסננים לכבלי כניסה.

איור 7.12

מכלי מתכת גדולים, בוקסים להגנה מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני מצוידים במערכות אוורור וסינון לחיבור כבלים חיצוניים

מכולות כאלה נמצאות בשימוש נרחב בצבא והן בהחלט מספקות הגנה נאותה לציוד ממוקם בהן. למרבה הצער, אלה אמצעי הגנה יקרים מאוד, אשר ככל הנראה לא יכולים להיות משומשים לאחסון חלקי חילוף במתקנים לאספקת חשמל. סוג נוסף של מיכל הגנה הוא חדר ללא חלונות עם קירות ודלתות, מרופדת יריעות נחושת (חדרים כאלה המוצעים על ידי חרת Holland Shielding Systems). מיכלי הגנה כאלה גם בעלי יכולת המסך מעולה (של -40 120 [dB] בתחום התדרים מ 10 קילו-הרץ עד 10 ג'יגה-הרץ), אלא גם, כמו במקרה הקודם, יקרים מדי. מכולות פשוטות, אמינות ומאוד זולות להגנה מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני הם לפי טענות היצרנים שלהם, שקיות פלסטיק בגדלים שונים עם שכבת מתכת, איור. 7.13.

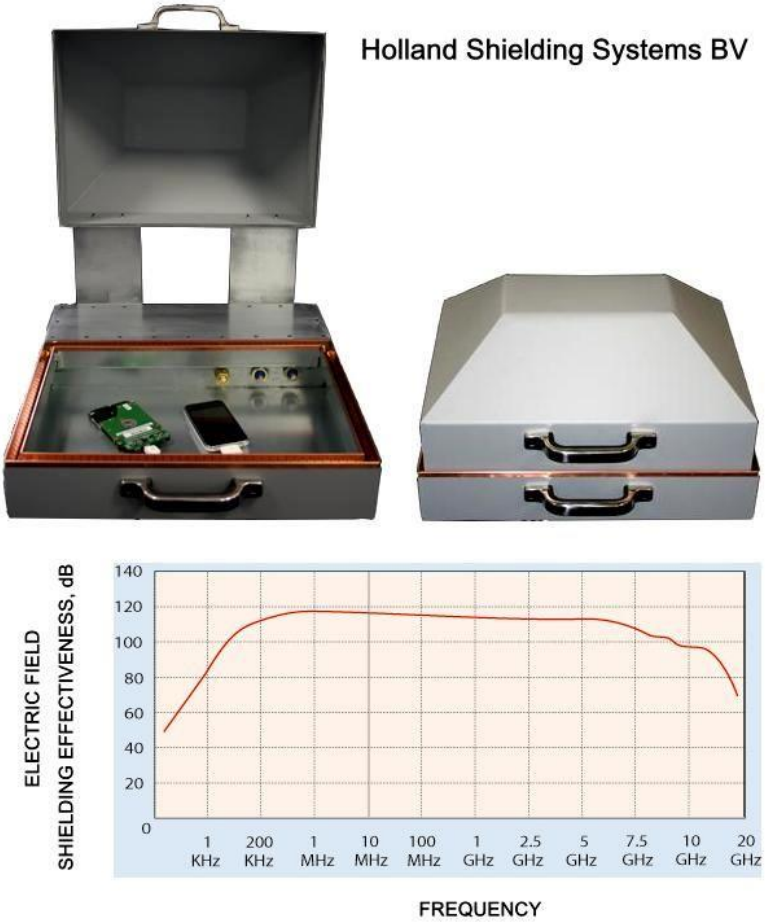
איור 7.13

שקיות פלסטיק עם שכבת מתכת, שנועדו להגן על מכשירים אלקטרוניים קטנים מנפי פעימה אלקטרומגנטית

איור 7.14

סוכך מגן (אוהל), עשוי בד מתכת

בדרך כלל, יצרני שקיות כאלה מציינים רמה גבוהה של הפחתת הקרינה, המגיעה עד [dB] 45- 40, אבל יחד עם זה לא מגלים עבור איזה טווח התדרים התקבלו הערכים האלה. האם שכבה בעובי כמה מיקרונים מסוגלת ביעילות להחליש את השדה האלקטרומגנטי בתחום התדרים מקילו הרץ עד ג'יגה הרץ? טבלה 7.2 נותנת תשובה חד משמעית לשאלה זו: לא, לאסכולה!



איור 7.15

מיכל הגנה של חברת Holland Shielding Systems BV, אשר בעל יכולת מסך מאוד גבוהה

סוג נוסף של מכל הגנה, שגם כן מיוצג באופן נרחב בשוק, ומפורסם כאמצעי אמין מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני הוא סוכך (אוהל), עשוי מאותו, כמו גם חבילות של פלסטיק מתכת או, במקרה הטוב, בדים ארוגים המכילה חוטי מתכת, איור. 7.14. מיכלי מתכת ניידים מיוחדים עבי דופן המספקות מיגון יעיל מאוד, גם מיוצגים באופן נרחב בשוק, איור. 7.15. למרבה הצער, מיכלים כאלה יקרים מדי לצורך אחסון של חלקי חילוף והם בעלי נפח פנימי חסר. לפי דעתנו, הכי מתאימים הם מיכלי אלומיניום פשוטים, אשר מורכבים בריתוך מגיליונות אלומיניום בצורה של קופסאות פשוטות עם מכסים, איור 7.17. מיכלים כאלה עם עובי הדופן של 3/16 אינץ ' (4.8 מ"מ) הם בעלי דרגת מסך מקובלת למדי: של הסיכוך של לא פחות מ -50 dB בתחום התדרים 100 dB 76) ;kHz - GHz 1 ב 300 MHz, 66 dB ב GHz 1) מיוצרים על ידי מספר חברות, כולל Montie Gear, הנדסה EMP, וכו 'לפי גדלים סטנדרטיים או אינדיבידואליים.

<u>איור 7.17</u>

מיכלי הגנה זולים לאחסון של חלקי חילוף, עשויים גילוני אלומיניום

יש לציין כי מיכלים בגדלים נדרשים יכולים להיות מיוצרים בכח בית מלאכה, העוסק בעבודות ריתוך. יחד עם זה, כדי למנוע חשיפה לשדות אלקטרומגנטיים של החלק העליון של טווח התדרים על מכשירים אלקטרוניים מאוחסנים (אשר עלולים לחדור לתוך חלל פנימי של המיכל דרך הפערים שנוצרו על ידי מכסה רפוי) מומלצים מוצרים אלקטרוניים רגישים במיוחד (למשל, מעגלים מודפסים עם מיקרו-מעבדים ורכיבי זיכרון) להציב בחתך שקיות פלסטיק מתכת המתוארים לעיל לפני השמה במיכלים.

לסיכום, אנו יכולים להסיק את המסקנות הבאות:

1. אחד הצעדים לשיקום מהיר של פעילות מערכת החשמל לאחר חשיפה לסוג מסוים של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת היא יצירת סטים מיוחדים של חלקי חילוף לציוד אלקטרוני.

2. שיטות ידועות לייעול מלאי חלקי חילוף אינן ישימות במקרה הנדון.

3. להבטחת שיקום המהיר של תקינות ציוד האלקטרוני של מערכת חשמל חייבים ליצור סטים של חלקי חילוף עבור התקנים קריטיים, הממוקמים באתרים קריטיים של מערכות חשמל. תקנים קריטיים ואתרים קריטיים צריכים להיות מוגדרים מראש.

4. סטים של חלקי חילוף להתקנים קריטיים צריכים להיות בלתי תלויים ממלאים כלליים של חלקי חילוף, המאוחסנים במחסנים.

5. סטים של חלקי חילוף להתקנים קריטיים צריכים להיבדק מראש, צריכים להיות מכוונים ומוגדרים מראש וצריכים להיות מאוחסנים בסמיכות לאתרים קריטיים, אשר אליהם הם שייכים.

6. סטים חלקי חילוף להתקנים קריטיים ציריכם להיות מאוחסנים במקומות מוגנים מפני פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני וסוגים אחרים של השפעה הרסנית אלקטרומגנטית מכוונת במיכלים סגורים, אשר יכולים להיות מיוצרים בריתוך של גיליונות אלומיניום בעובי כ- 5 מ"מ בלוקים רגישים במיוחד, אשר מכילים מיקרו-מעבדים ורכיבי זיכרון צריכים להיות ממוקמים מראש בתוך שקיות פלסטיק עם שכבת מתכת.

ביבליוגרפיה לפרק 7

7.1. Konovalova E.V. The Principle Results of the Operation of Protective Relays in the Energy Systems of the Russian Federation - A Collection of Reports from the XV Scientific-Technical Conference “Relay Protection and the Automation of Energy Systems,” Moscow, 2002.

7.2. Kjolle G.H., Heggset J., Hjartsjo B.T., Engen H, Protection System Faults 1999-2003 and the Influence on the Reliability of Supply // 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.

7.3. Gurveich V.I. Problems in Assessing the Reliability of Relay Protection. “Electricity,” 2011, No. 2, pp. 28-31.

7.4. Gurevich V.I. Testing DPRs - Electro: Electrical Technology. Electrical Power Engineering. The Electrical Power Industry, 2009, No.1 pp. 31-33.

7.5. A, Bittencourt, M. R. de Carvalho. J.G. Rolim, Adaptive Strategies in Power Systems Protection using Artificial Intelligence Techniques - The 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Curitiba, Brazil, November 8-12, 2009.

7.6. M.A. Laughton Artificial Intelligence Techniques in Power Systems, In book “Artificial Intelligence Techniques in Power Systems” the Institution of Engineering and Technology, 1997, pp. 1-18.

7.7. R. Khosla, T. Dillon, Neuro-Expert System Applications in Power Systems - in book “Artificial Intelligence Techniques in Power Systems,” the Institution of Engineering and Technology, 1997, pp. 238-258.

7.8. Yu.Ya. Lyamets, D.V. Kerzhayev, G.S. Nudelman, Yu.V. Romanov, Multifaceted Relay Protection - Articles from Reports Presented at the Second International Scientific-Technical Conference “Contemporary Trends in the Development of Relay Protection Systems and the Automation of Energy Systems” Moscow, 7-10 September 2009

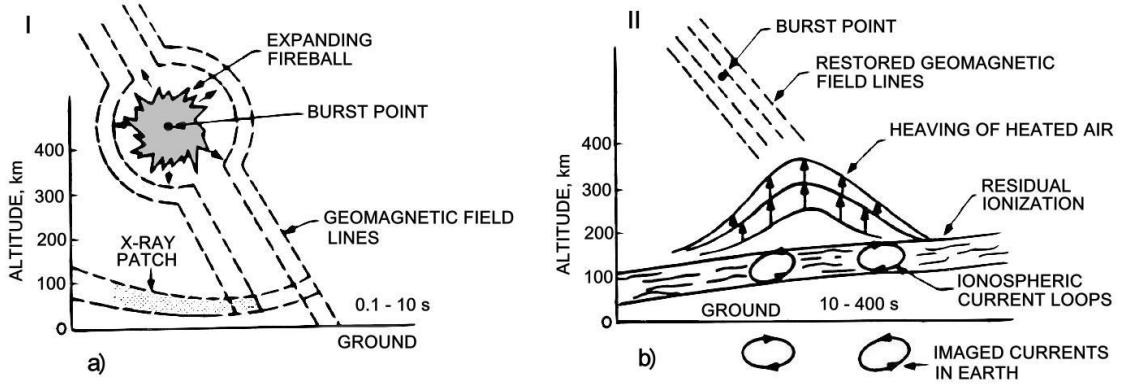
7.9. T.S. Kamel, M.A. Khassan, A. EL-Mordshedi (Cairo University Egypt) Using Artificial Intelligence Systems in the Remote Protection of Overhead Power Lines - Articles from Reports Presented at the Second International Scientific-Technical Conference “Contemporary Trends in the Development of Relay Protection Systems and the Automation of Energy Systems” Moscow, 7-10 September 2009.

7.10. Bulychev A. Nudelman, G. Relay Protection. Upgrades as a Result of Preventative Functions - “The Electro-technical News,” No. 4(58), 2009.
7.11. Gurevich V.I. Fata Morgana or visionaries at the All-Russian Scientific-Research Institute for Flow Metering - Electrical Networks and Systems, 2009, No. 6, pp. 54-57.
7.12. Gurevich V.I. The “Intellectualisation” of relay protection; Good Intentions or the Road to Hell? Electrical Networks and Systems, 2010, No. 5, pp. 63-67.
7.13. Belyaev A.V., Shirokov V.V., Yemelyantsev A.Yu. Digital Relay Protection Terminals. Attempts to Integrate them a Russian Environment - Electro-technical News, 2009, N0. 5.
7.14. Gurevich V.I. The Problems of Standardisation in the DPR field - SPB.: The DEAN Publishing House, 2015. 168 p.
7.15. Gurevich V.I. Current Issues in relay protection: An Alternative View “The Electrical Power Engineering News,” 2010, No. 3 pp. 30-43.
7.16. Gurevich V.I. A New Concept in the Manufacture of DPRs “Components and Technology,” 2010, No. 6, pp. 12-15.
7.17. PJM Relay Testing and Maintenance Practices. PJM Interconnection. Relay Subcommittee. Rev. 2/26/04, 2004
7.18. Zhadnov V. Automation in the Design of Spare Components in SPTA: methods and techniques - Components and Technology, 2010. No 5, pp. 173-176
7.19. OST 45.66-96 Spare Parts, Tools and Accessories for Telecommunication Devices. Industry Standard. M.: The Central Scientific Technical Institute “Informsvyaz,” 1997.
7.20. Zatsarinniy A.A., Gagarin A.I., Kozlov S.V. et al. The Idiosyncrasies of Designing SPTA Components in Automated Information Systems in a Protected Environment - Systems and Information Technology Devices, 2013 t. 23, No. 1 pp. 113-131.
7.21. Dopira R.V., Lysyuk A.P., Tsybenko D.V. et al Methods for Designing a System to Provide Spare Parts for Radio-electronic Technology Distributed on a Territorial Basis - Software Products and Systems, 2009, No.1 pp. 128-130.
7.22. GOST RV 20.39.303-98. A Comprehensive General Purpose System. Military Apparatus, Instruments, Devices, and Equipment. Reliability Requirements. The Composition and Arrangement of the Specification. - M.: The Standartov Publishing House, 1998.
7.23. Trimp M.E., Dekker R., Teunter R.H. Optimize initial spare parts inventories: an analysis and improvement of an electronic decision tool. - Report Econometric Institute E1 2004-52, Erasmus University Rotterdam, 2004, 70 p.
7.24. MIL-STD-1388-2 Department of Defense Requirements for a Logistic Support Analysis Record, 1993.
7.25. Love R.E., Stebbins B.F. An Analysis of Spare Parts Forecasting Methods Utilised in the United States Marine Corps. - Thesis AD-A184 698, Naval Postgraduate School, Department of the Navy, 1987.
7.26. MIL-STD-188-125-1 High-Altitude Electromagnetic pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions; Part 1: Fixed Facilities.
7.27. IEC 61000-2-13: 2005 Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-13: Environment - High-power electromagnetic (HPEM) environments - Radiated and conducted.
7.28. Industrial Electro-thermal Installations / N.M. Nekrasova, L.S. Katsevich, I.P. Yevtyukova. M.: Gosenergoizdat, 1961. 415 p.

8. הגנה על ציוד הספק גבוה מפני פעימה אלקטרומגנטית

8.1 אפקט מגנטו-הידרו דינאמי של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני

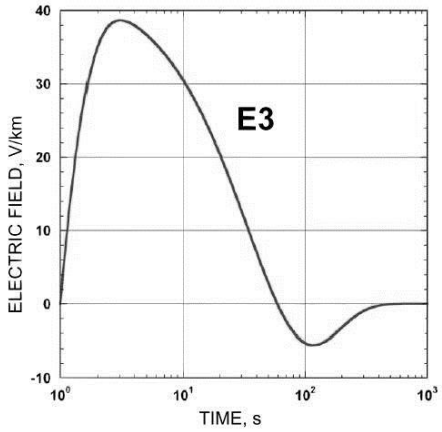
אפקט מגנטו-הידרו דינאמי של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני הוא אוחד המרכיבים של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, אשר נהוג לסמן אותו כמרכיב **E3**.



איור 8.1

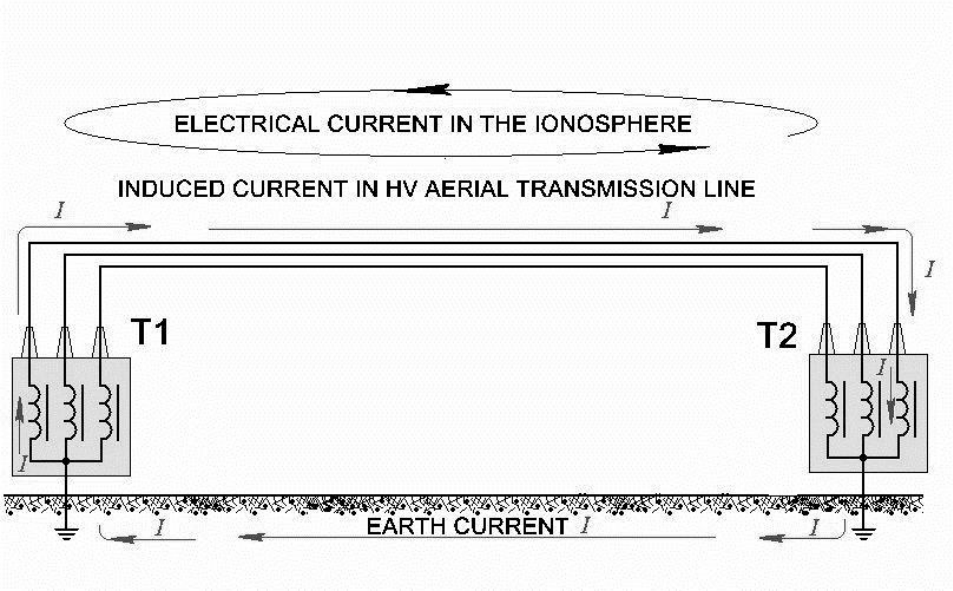
שני שלבים של אפקט מגנטו-הידרו דינאמי של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני [8.1]
א) "גל הלם" , ב) "נפיחות"

הוא מבוסס על אפקטים מגנטו-הידרו דינאמיים, על אינטראקציות של פלזמה, מוצרי פיצוץ גרעיני ואוויר מיונן ומחומם עם השדה המגנטי של כדור הארץ. ישנם שני שלבים של האפקט הזה, המכונים בספרות זרה "Blast Wave" (גל הלם) ו "Heave " (נפיחות), עם מנגנונים שונים של היווצרות ומשך הזמן, איור. 8.1. השלב הראשון עם משך הזמן של 1 - 10 שניות מותנה בפיזור מרכיבים של פלזמה גדולות הנוצרות כתוצאה מפיצוץ באוויר דליל (בגובה רב) בנוכחות של שדה מגנטי של כדור הארץ.



איור 8.2

שינוי מתח של הרכיב האופקי של השדה החשמלי על פני השטח של כדור הארץ
כתוצאה מהשפעה של מרכיב E3 של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני



איור 8.3

תרשים זרימת הזרמים בחוטים של קווי חשמל וסגורים דרך הניטראלי של שנאי כוח

לפיכך נוצרת אינטראקציה מורכבת בין היונים של הפלזמה, שדה מגנטי וקרינה גמא רנטגן, אשר מלווה בהיווצרות שדה מערבולת חשמלי. השפעות פיסיות אלה מובילות להסטה החזקה של השדה המגנטי של כדור הארץ, שהיא חזקה יותר ככל שעוצמת האנרגיה של הפיצוץ וגובה הפיצוץ גבוהים על פני השטח של כדור הארץ. בשלב השני מתרחשת נפיחות ועלייה מהירה למעלה של מאסות אוויר לוהטות כתוצאה מהפיצוץ ומיוונות מאוד, ומהוות למעשה פלזמה. הצטלבות קווי כוח שדה מגנטי של כדור הארץ והפלזמה המיוננת מלווה בקיטוב של שכבת אוויר וגנרציה שדה חשמלי בעוצמה גבוהה, אשר בתורו מייצר זרימת זרמים חזקים ביונוספרה. התהליכים האלה הם איטיים יחסית. משך שלב זה של הפיצוץ הוא 10 - 300 שניות.

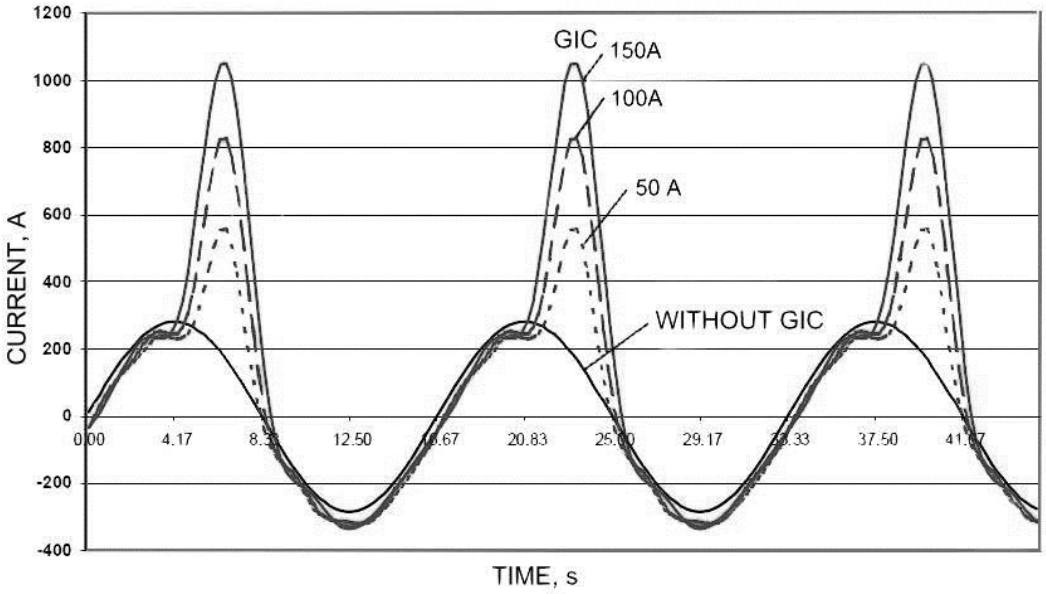
התוצאה של כל התהליכים האלה באווירה דלילה היא היווצרות ליד פני השטח של כדור הארץ שדה חשמלי, המשתנה יחסית לאט עם מתח של יחידות בודדות עד עשרות וולט לקילומטר. איור 8.2.

למרות מתיחות קטנה של השדה החשמלי הנגרם על ידי מרכיב של פיצוץ גרעיני E3 של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, היא מובילה בחפצי מתכת מורחבים (צינורות, מסילות, קו תמסורת חשמל) זרמים חשמליים די חזקים בתדרים נמוכים מאוד (מתחת ל-1 הרץ), כלומר, זרמים קווזי ישרים. מסוכנים במיוחד הם הזרמים המושרים בחוטי קו תמסורת החשמל, איור. 8.3.

8.2. השפעה של המרכיב E3 של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני על ציוד הספק גבוה של תחנות כוח

משום שזרם מושרה גיאומגנטי בעל תדירות נמוכה מאוד (פחות מ -1 הרץ), אז ההשפעה שלו דומה להשפעות של DC ולכן קודם כל השפעתו תבוא לידי ביטוי בהשפעה של הציוד החשמלי המכיל מערכות אלקטרומגנטיות, כגון שנאי כוח. הרווית הליבה של שנאי כוח בזרם קוואזי ישר (זרם פועם) בניוטראל גורם לעליית זרם המגנטיזציה, לעיוות חזק של עקומת הזרם בסלילי השנאי, לגידול משמעותי של צניחות בשנאי כוח ולגידול בטמפרטורה של

הסליל והמעגל המגנטי, האיור. 8.4. הסכנה של מצב פעולה שכזה של השנאי היא לא רק בהסתברות גבוהה של השבתת השנאי עצמו, אלא גם בהשפעה שלילית על מערכת אספקת חשמל כולה.

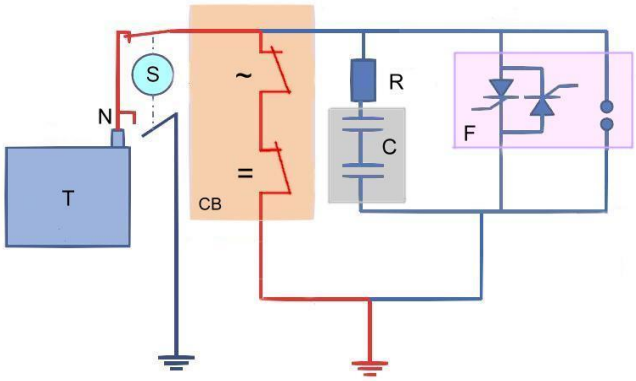


איור 8.4

עיוות צורת הזרם במצב קבוע בסלילים של השנאי הספק במהלך הזרימה בניטראלי שלו זרמים גיאומגנטיים בעוצמה של 50, 100 ו – 150 A [7.3].

שנאי, אשר נמצא במצב זה הוא מקור עוצמתי לגלים הרמוניים זוגיים ואי-זוגיים, אשר גורמים לעומס יתר על סוללות פיצוי קיבולי ומשבשים פעילות תקינה של ממסרh הגנה. התקני הגנה על סוללות קבלים יכבו אותם ויצילו אותם מפני עומס יתר. בשילוב עם עלייה חדה סימולטאנית בצריכת הספק הריאקטיבי על ידי שנאי עצמו, אשר נמצא במצב כזה, ובנוכחות הקיבולת הגדולה שלו, זה יוביל לגירעון הספק ריאקטיבי משמעותי במערכת. פעולה זו מפחיתה מתח ואוטומטי נכנסים לפעולה רגולטורי מתח, תחת עומס של השנאים עצמם, אשר מנסים לשחזר את רמת המתח. מגענים של התקני מחליף דרגות בשנאי אינם מתאימים למיתוג זרמים המכילים מרכיב DC משמעותי ובסבירות יותר גבוהה צפויים להיהרס, מה שיכול לגרום נזק להתקן מחליף דרגות השנאי ולהביא לקצר חשמלי בסלילי ויסות של השנאי. במצב כזה מייד אמורים להיכנס לפעולה מפסקי הזרם ולכבות את השנאים הפגומים. אבל השאלה היא, האם מפסקי זרם מתח גבוה יהיו מסוגלים להתנתק זרמים כאלה של קצר חשמלי ובכלל האם יכבו את זרמי העומס, המכילים מרכיב DC גדול? הם הרי אינם מיועדים למיתוג של זרמים כאלה. ומה יקרה עם הקבלים, אשר מעקפים בצורה רציפה קטבים מחוברים של מתגים כאלה, כאשר הם תחת השפעה של גלים הרמוניים בתדירות גבוהה? נכון להיום יש יותר שאלות מאשר תשובות. עם זאת, ידוע כי סערות שמש חזקות, אשר גורמות לאפקטים דומים לפי פרמטרים שלהם לאפקטים הנגרמים על ידי מרכיב E3 של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני, הובילו לא פעם לנזקים חמורים בציוד חשמלי ולקריסת מערכות אנרגיה במדינות שונות.

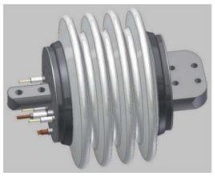
8.3 הגנה על ציוד חשמלי מפני השפעות זרמים מושרים גיאומגנטיים



איור 8.5

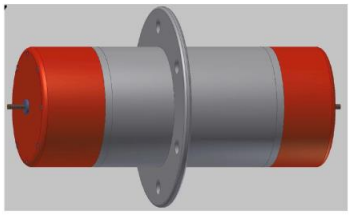
תרשים טיפוסי של התקן נעילת זרם אלקטרומגנטי מושרה חשמל בניוטרל של שנא י כוח

T - שנאי, S – מפסק, המיועד להשבתת ההתקן, CB - מתג מיוחד הנועד לכיבוי זרמי AC ו DC, C- סוללת קבלים, R - הנגד המגביל, F – התקן מיוחד להגנה מפני מתחי יתר, בעת זרימת זרמי חירום במעגל ניוטרל



4275 Bi-tron™

3275 Pulsatron™



4138 Bi-tron™

איור 8.6

התקנים עוצמתיים להגנה מפני מתחי יתר של חברה Advanced Fusion Systems מסוג 4275 (35 קילו וולט, 100 קילואמפר), 3275 (500 קילוולט, 250 קילואמפר) 4138 (75 קילוולט, 250 קילואמפר)

ברור לחלוטין כי להגן ביעילות על ציוד חשמלי של מערכות אנרגיה אפשר על ידי מניעת זרימה דרכה זרם אלקטרומגנטי מושרה. ניתן להשיג את זה או על ידי מניעת זרימת זרם אלקטרומגנטי מושרה דרך קו תמסורת חשמל (על ידי שימוש בסוללת פיצוי קיבולי אורכי, המחוברת לנקודת ניתוק של קווי תמסורת חשמל) או על ידי חסימת זרם אלקטרומגנטי מושרה לניטראלי של שנאי כוח (על ידי חיבור קבלים בצורה רציפה לתוך הארקת הניוטראל).

פיצוי ניבולת אוכרי – דבר יקר ומשתמשים בו רק בקווי תמסורת חשמל מאוד ארוכים לפיצוי על התנגדות אינדוקטיבית של הקווים. לכן, בזמן אחרון מפתחים בצורה אינטנסיבית מערכות על בסיס קבלים, המונעות הגעה של זרם אלקטרומגנטי מושרה לניוטרל של שנאי כוח.

הבעיה היא כי בהעדר זרם אלקטרומגנטי מושרה התקנים האלה לא צריכים להשפיע על הפעילות הרגילה של שנאים ורשת חשמל, כלומר, לא צריכים להפחית את היעילות של הארקת הניוטראל, צריכים לעמוד בזרימת זרמים גדולים של קצר חשמלי ויחד עם זה להביא להופעה של ארעיים פרורזוננסיים ונחשולי עומס יתר במצבי המעבר.

על מנת להבטיח תנאים אלה, בכל סוגי הגדות מסוג זה, מקובל אלגוריתם פעילות כזה, שבו סוללת הקבלים במעקף על ידי רכיב מיתוג בייפס כוח (CB), והוא נכנס לפעולה על ידי ביטול מעקף (ניתוק הרכיב המחבר הזה) רק בעת גילוי הזרם אלקטרומגנטי מושרה, איור. 8.5.

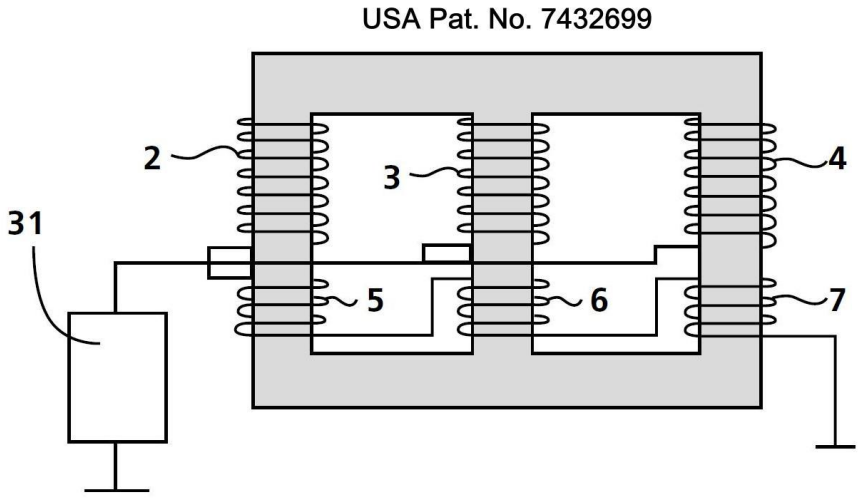
היווצרות של מצבי חירום ברשת עם קבלים מחוברים לניוטראל יכול להוביל להופעה של מתחים גבוהים מאוד במעגל הניוטראל של השנאי, העולה על רמת הבידוד ניוטראל, וכמו כן על הקבלים עצמם. לכן, התקנים כאלה צריכים להיות מצוידים בהתקני הגנה מיוחדים נגד נחשול מתח יתר F (וריסטורים רגילים אינם מתאימים לכך). באיור. 8.5 מודגם התקן הגנה, אשר מכיל בלוק של SCR 6 בהספק גבוה עם מתח גבוה והתקן הגנה ואקום. בפועל, במקום יחידת SCR בשימוש נרחב גם התקני הגנה בעלי שלושה אלקטרודות עם מבנה מיוחד, איור. 8.6.

<u>איור 8.7</u>

מערכות לחסימת זרם אלקטרומגנטי מושרה במעגלי ניוטראלי של שנאי כוח. בחלק העליון מערכת, המוצע על ידי חברת ABB , אשר מצוידת בבקר של חברת SEL, בחלק התחתון מערכת פרי פיתוח של חברת Phoenix Electric

יתר על כן, צריכה לקחת בחשבון אפשרות לניתוק של ההתקן הזה על ידי מערכת מיתוג מיוחדת (S) מסוג מפריד עם סכין הארקה השבתת ההתקן ללא ניתוק השנאי. באופן כללי, ההתקן יוצא לא כל כך פשוט ובכלל לא זול (מעל 300 אלף דולר ארה"ב), איור. 8.7.

ישנן גם שיטות אחרות של הגנה על השנאים מפני זרם אלקטרומגנטי מושרה המבוססות על שינוי המבנה של השנאי. הוספה של פערים נוספים לא מגנטיים לתוך מעגל מגנטי של השנאי מפחיתה סבירות של רוויה שלו, אולם, פוגע במפרטים הבסיסיים של השנאים.



איור 8.8

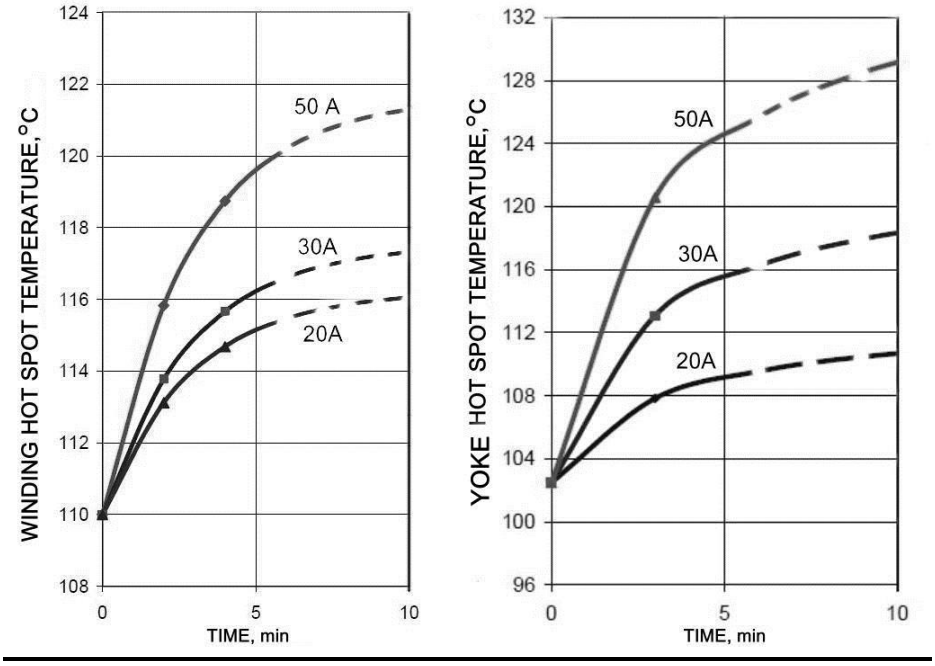
מבנה של שנאי כוח עם סליל נוסף, המפצה על זרם אלקטרומגנטי מושרה, 2-4 – סלילים עיקריים; 5-7 – סלילי פיצוי; 31 – אלמנט עם התנגדות גבוהה לDC והתנגדות נמוכה לAC

פתרונות ידועים אחרים, איור. 8.8 מניחים הצבת סלילם נוספים על מעגל מגנטי של השנאי, אשר מקזזים את ההשפעה של זרם חשמלי קבועה? ועם מחוברים על ידי מעקף באלמנט מיוחד (31) בעל התנגדות גבוהה עבור DC והתנגדות נמוכה עבור AC.

ככל הנראה, אלמנט כזה יכולה לשמש סוללת קבלים, למרות שזה לא מוזכרת באופן ישיר בפטנט של ארה"ב מס' 7432699. פתרון דומה מתואר בפטנטים האמריקאי מס' 7489485. בפתרונות טכניים אחרים הציעו לחבר את סליל הפיצוי למקור מתח DC מוסדר חיצוני, המקזז את זרם אלקטרומגנטי מושרה. יש הצעות לחבר סלילי השנאי לפי סכימה "זיגזג הפוך" שבו מתרחש קיזוז הדדי של זרמי מגנט של כל פאזה, כל אחת בגודל שווה אבל בכיוון הפוך, והרווית המגנטית אינה מתרחשת.

כל הפתרונים הללו דורשים שינויים בטכנולוגית ייצור של שנאי כוח, גורמים להרעת מאפיינים טכניים שלהם ומובילים לגידול הניכר בעלות שלהם. כלומר, כל הפעולות טכניות, המכוונות למניעה/קיזוז זרם אלקטרומגנטי מושרה כרוכות בעלויות משמעותיות. בהקשר זה, נשאלת השאלה על הכדאיות הכלכלית של השקעת סכומים ניכרים על מנת למנוע נזק לציוד חשמלי כתוצאה מאירוע כזה חריג כפיצוץ גרעיני בגובה רב.

מספר יצרניות שנאים בהספק גבוה ומתח גבוה מובילות בעולם (סימנס, ABB ואחרים) מדווחים על פיתוח שנאים מיוחדים (GIC Safe Power Transformers), אשר מסוגלים לעמוד במשך כמה שעות בזרם אלקטרומגנטי מושרה של עד 50 אמפר, ובמשך כמה שעות גם בזרמים אלקטרומגנטיים מושרים בודדים עם אמפליטודה של עד 200 אמפר. בחומר פרסום שלהם היצרנים לא חושפים את הפתרונות הטכניים המאפשרים להגדיל את עמידות השנאים לזרם אלקטרומגנטי מושרה, אבל ברור שלא מדובר על פתרונות טכניים, אשר חוסמים הגעה של זרם קוואזי ישיר לנייטרל של השנאי או מזקקים זרמים מגנטיים במעגל מגנטי, משום שבמקרה של יישום פתרונות טכניים כאלה לא קיימות הגבלות השפעת הזרם אלקטרומגנטי המושרה ואין הגבלות נוקשות שלו בגודלו.



<u>איור 8.9</u>

דוגמאות של גרף חימום הסליל ומעגל מגנטי של שנאי כוח בעת זרימת זרמים גיאומגנטיים של 20, 30 ו-50 אמפר בניוטרל שלו

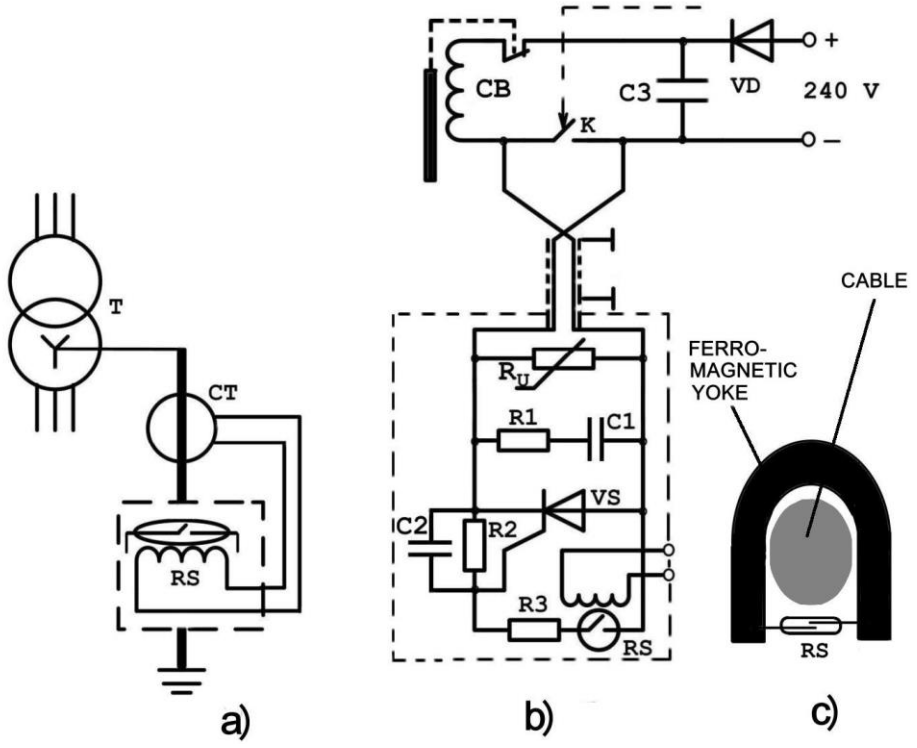
סביר להניח שהשנאים כאלה רק עמידים יותר בפני טמפרטורה גבוהה בזכות שימוש בציפויי לק עמידים לטמפרטורה גבוהה המיועדים לבידוד צלחות מגנטיות של מעגל מגנטי וחומרי בידוד מיוחדים עבור הסלילים.
הגדלת עמידות השנאים לזרמים קוואזי ישירים, אשר זורמים בתוכים בכלל לא מהווה פתרון מלא של הבעיה, שכן, כפי שהראינו לעיל, שנאי עם מעגל מגנטי רווי מהווה מקור לבעיות חמורות עבור סוגים רבים אחרים של ציוד חשמל, לכן שמירת יכולת פעילות של השנאי לא מבטיחה יכולת פעילות של מערכת אספקת החשמל.

ספק אם השקעת אמצעים כספיים ניכרים כדאית כאשר מנסים להגן על מערכות אנרגיה מפני אירוע בודד, אשר ההסתברות ההתרחשות שלו די נמוכה. אז מה הסיפור כאן ולמה התקני הגנה מסוג זה מפתחים ומשווקים בשוק? העניין הוא שזרם אלקטרומגנטי מושרה מתרחש לא רק במהלך פיצוץ גרעיני בגובה רב, אלא גם במהלך סופות שמש חזקות, אשר מופיעות מעת לעת וגורמות לתאונות חמורות במערכות אנרגיה. עם זאת, ההשפעה של סופות שמש על אזורים שונים של כדור הארץ היא לא אחידה. ההשפעה הזאת מתחזקת ככל שמתקרבים לקטבים של כדור הארץ

ונחלשת מאוד באזורים קרובים לקו המשווה. באזורים רחוקים מן הקטבים, סופת שמש אינן גורמות לזרים אלקטרומגנטיים מושרים משמעותיים, אשר מסוגלים לפגוע בפעולתן התקינה של מערכות חשמל. עם זאת, מפתחים של התקני בטיחות בדרך כלל מצביעים על העובדה כי הפרמטרים של זרם אלקטרומגנטי מושרה הנובע מסופות שמש ומן הפיצוץ גרעיני בגובה רב, הם מאוד דומים זה לזה ולכן מערכת החשמל, השואפות לשפר את עמידות של ציוד חשמלי מפני פיצוץ גרעיני בגובה רב צריכות להשתמש באמצעי מיגון כזה, ללא תלות במיקום הגיאוגרפי שלהן. על פניו נראה כי הכול הגיוני.

אולם, יש הבדל אחד חשוב פרמטרים של זרם אלקטרומגנטי מושרה, הנובע מסופת שמש חזקה ומפיצוץ גרעיני בגובה רב, אשר מעמיד בסימן שאלה את תוקפו של ההיגיון הזה. ההבדל הוא - משך קיומו של הזרם אלקטרומגנטי מושרה. בעת פיצוץ גרעיני בגובה רב משך קיומו של זרם אלקטרומגנטי מושרה הוא קר כמה דקות, שבמהלכן שנאי כוח בהספק חום גדול, פשוט אינם מספיקים להתחמם לטמפרטורה מסוכנת, איור 8.9 .

ברור כי עבור ערכים גדולים של זרם אלקטרומגנטי מושרה, הטמפרטורה של חלקים של השנאי תהיה גבוהה יותר, אבל בפרק זמן כה קצר, היא, בכל זאת, לא הגיע לערכים מסוכנים עבור השנאי. סכנה משמעותית יותר היא זרמים מעוותים בצורה בלתי סימטרית על ידי שנאי רווי, עבור סוגים אחרים של מערכות כוח שנדונו לעיל, אשר אין להם אינרציה כמו לשנאי כוח. עם זאת, אם במהלך סופת השמש זרם אלקטרומגנטי מושרה קיים במשך שעות רבות, שבמהלכן חייבת להישמר אספקת חשמל לצרכנים, אז בעת פיצוץ גרעיני בגובה רב זרם אלקטרומגנטי מושרה מוגבל בכמה דקות, שבמהלכן ניתן לנתק את הציוד החשמלי על מנת למנוע נזק, ולאחר מכן להפעיל אותו מחדש.



איור 8.10

ממסרי ההגנה של שנאי הכוח מהזרם מושרה מגנטי בתדירות נמוכה במעגל הניטראלי

במקרה כזה, שכן התהליך של התגברות הזרם האלקטרומגנטי המושרה הוא איטי למדי, אפשר להשבית את השנאים מיד עם זיהוי של מרכיב קבוע בזרם בניוטרל, מבלי להמתין לרוויה של מעגל מגנטי שלו וכל האירועים הנלווים. שיטה זו של הגנה על מערכות אנרגית חשמל מפני האפקט מגנטו-הידרו דינאמי של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני נראית לנו הרבה יותר נכונה מאשר שיטות שתוארו לעיל, משום שהן בעלות יעילות גבוהה ואינן דורשות עלויות גבוהות.

כל העלויות ליישום שיטה זו של הגנה הן ההתקנה של ממסר מיוחד, המגיב להופעת מרכיב קבוע בזרם הניוטראלי ומיד שולח פקודה לניתוק השנאי.

ממסר כזה חייב להיות עם מבנה מיוחד, ולא כזה, שחברת ABB השתמשה שליטה במערכת SolidGround (בקר מתוכנת תעשייתי מסוג-SEL 2240), משום שמדובר על התקן הגנה מפני מרכיב E3 של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני המופיע לאחר רכיבי E1 ו- E2 אשר צפוי להשבית את יחידת בקרה מבוססת מיקרו מעבד מערכת SEL-2240 בסבירות גבוהה יותר עוד לפני שזה יספיק להיכנס לפעולה.

באיור 8.10a מוצג עקרון הפעלה של ממסר, הרגיש לרכיב DC בניוטרל של שנאי כוח וחסר רגישות לזרם חילופין, המשתנה בטווח רחב. הממסר מורכב ממגע הרמטי (reed switch) RS עם סליל, הממוקם על הכבל המחבר את נקודת הניטראלי של השנאי עם נקודת ההארקה, בניצב לציר של כבל ושנאי זרם טורואידלי CT, המותקן על הכבל הזה. בהעדר מרכיב קבוע בזרם הניטראלי, השדה המגנטי של הכבל המשפיע ישירות על המגע ההרמטי, מפוצה במלואו על ידי השדה המגנטי של הסליל, היושב על המגע ההרמטי ומקבל כוח משנאי זרם. שינוי זרם AC הזורם בניטראלי מוביל לשינוי יחסי בשדות הגנטיים המשפיעים על מגע הרמטי ולקיזוז ההדדי. במקרה הופעתו של רכיב DC משמעותי בזרם הניטראלי (יותר מ 10 – 15 אמפר) איזון שדות מגנטיים המשפיעים על המגע ההרמטי מופר: השדה המגנטי של הכבל עדיין משפיע עליו, והשדה המגנטי המפצה של הסליל, אשר מקבלת חשמל משנאי זרם, לא משפיע, משום שרכיב DC לא עובר טרנספורמציה דרך שנאי הזרם. כתוצאה מכך מגע הרמטי נכנס לפעולה. המעגל של הממסר בפועל כולל מגבר כוח נוסף על VS SCR, וריסתור RU ומעגל R1C1, המגן על SCR מהפרעות ועומסי יתר, באיור B10. הממסר מצויד במסך אלקטרוסטטי רציף ובמסך פרומגנטי, שיש בו רק חלון מצד הכבל באזור המיקום מגע הרמטי ומחובר למעגל של סליל הכיבוי של המתג CB באמצעות כבל מסוכך מיוחד עם זוגות מסולסלים ומסך רב שכבתי משולב עם ארקה בשני קצותיו, ועמיד בפני פעימה אלקטרומגנטית. בממסר ניתן להשתמש במגעי ואקום הרמטיים מיניאטוריים במתח גבוה, למשל, מסוג KSK-1A85 (מתוצרת Meder אלקטרוניקה), עם חוזק חשמלי של הבידוד בין המגעים של 4000 וולט, בקוטר הצנצנת 2.75 מ"מ ובאורך של 21 מ"מ. מגע הרמטי זה מסוגל למתג עומס עד 100 וואט (מתח מתג מקסימאלי 1000 ולט; זרם מתג מקסימאלי 1 אמפר); זמן התגובה 1 מ"ש; רגישות מקסימאלית 20 אמפר. במידת הצורך הגברת הרגישות ניתן להשתמש באלמנטים פרומגנטיים נוספים (רכזי השדה המגנטי), הממוקמים באזור המגע ההרמטי, איור c10. לקבלת ממסר עם רגישות נמוכה יותר וסף הפעלה גבוה יותר, ציר אורכי של המגע ההרמטי צריך להיות בזווית שומה מ °90 לציר הכבל, שעליו הוא מותקן. SCR גם כן נבחר מיניאטורי עם מתח גבוה מסוג SKT50/18E (מתוצרת חברת Semicron) עם מתח מרבי של 1800 וולט וזרם ממושך מקסימאלי של 75 אמפר, אשר מסוגל לעמוד בקצב גבוהה של עליית הזרם (1000 וולט/מק"ש) טווח טמפרטורות פעולה רחב (°C 130+ 40-). מעגל אספקת החשמל של סליל המכבה מצויד בקבל C3, המבטיח הפעלתו של המתג כיבוי אפילו עם האובדן מתח הפעולה. מעגל R2C2 נועד

לשפר החסינות מפני הפרעות. קבל C2 מספק השהייה מסוימת בהפעלתו של SCR ומונע ממנו פתיחה תחת השפעה של הפרעה פעימתית עוצמתית.

יישום בממסר רכיבים דיסקרטיים עם מתח גבוה במקום מיקרו אלקטרוניקה מסורתית מבטיח אמינות הגבוהה שלו בתנאי חשיפה לפעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני.

התבסס על האמור לעיל, אנו יכולים להסיק המסקנות הבאות:

1. אפקט מגנטו דינאמי של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני אשר מהותו הופעה של זרם (פועם) קוואזי ישר, הזורם דרך ניטראלי של שנאי כוח, משפיע בצורה שלילית לא רק על שנאים עצמם, אלא גם על סוגים רבים אחרים של הציוד חשמלי, בראש ובראשונה על סוללות הקבלים מפסקי זרם מתח גבוה. לכן, פתרונות טכניים המכוונים להגנה מפני ההשפעות של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני אמורים לספק הגנה לא רק לשנאים, אלא גם לכל שאר הסוגים של ציוד חשמל במערכות אנרגיה. פתרונות טכניים מיועדים לא לחסימה או קיזוז זרמים גיאומגנטיים מושרים, אלא רק מגבירים את היציבות של שנאים לזרימת דרכם זרמים כאלה, לא יכולים להיחשב כיעילים.

2. פתרונות קיימים המבוססים על מניעת רווית מעגלים מגנטיים של השנאי ניתן לחלק לשתי קבוצות:
- שימוש במתקנים חיצוניים הכלולים בניתוק של הניטראלי השנאי וחוסמים זרימת זרם קוואזי ישר במעגל ניטראלי;
- שינוים מבניים פנימיים של השנאי עצמו (סלילים או מעגל מגנטי), אשר מונעים את הרוויה של המעגל המגנטי במהלך זרימת זרם קוואזי ישר במעגל ניטראלי.

כל אחד הפתרונים הטכניים הידועים שמטרתם שמירה על התפקוד התקין של מערכת החשמל בעת השפעת הזרם אלקטרומגנטי מושרה על אלמנטים שלה כרוכים בעלויות חומריות משמעותיות.

4. למרות הדמיון של רוב הפרמטרים של זרמים אלקטרומגנטיים מושרים הנובעים מפיצוץ גרעיני בגובה רב (רכיב E3) כתוצאה מסערות שמש חזקות, יש ביניהם הבדל אחד משמעותי: משך קיומו של הזרם האלקטרומגנטי המושרה. ההבדל הזה מכתיב גישות שונות להגנה על ציוד חשמלי מהשפעות סערות שמש, ומרכיב של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני E3.

5. השימוש בפתרונים טכניים ידועים להגנה על מערכת חשמל מהשפעות של רכיב E3 בפיצוץ גרעיני אינו יכול להיחשב כמוצדק מבחינה כלכלית. במקרה זה הפיתרון המוצדק הוא ניתוק קצר מועד של שנאי הספק למשך כמה דקות לפי אות של ממסר מיוחד, חזרתו אוטומטית לפעולה לאחר מכן.

6. ממסר, אשר שולח פקודה לניתוק השנאי חייב להיות בעל מבנה מיוחד המבטיח יכולת פעולה שלו תחת השפעת כל הרכיבים של פעימה אלקטרומגנטית של פיצוץ גרעיני.

ביבליוגרפיה לפרק 8

8.1 Study to Access the Effects of Magnetohydrodinamic Electromagnetic Pulse on Electric Power Systems. – Report ORNL/sub-83/43374/1/v, Oak Ridge National Laboratory, 1985.

8.2 IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance, 1996.

8.3 The Late-Time (E3) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Its Impact on the U.S. Power Grid. – Report Meta-R-321, Metatech Corp., 2010.