ระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวด

พฤกจิกา สุขศิริมัช [1*] และ ธนัช ขันเงิน [2]

วันที่รับ 13 กรกฎาคม 2563 วันที่แก้ไข 28 สิงหาคม 2563 วันตอบรับ 31 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบชนวนหัวรบ (Fuze) ของการวิจัยนี้มีแนวคิดการออกแบบและขั้นตอนการทำงานตามเอกสาร MIL-STD-1316D ซึ่งระบุถึงเกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบชนวนหัวรบ โดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างกลไกทางไฟฟ้าและกลไกทางกล เพื่อให้สามารถรับรู้ถึงเป้าหมาย การตอบสนองต่อเงื่อนไขและคำสั่งต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ในการจุดชนวนวัตถุระเบิดได้อย่างแม่นยำและปลอดภัย อีกทั้งยังได้ศึกษาสิทธิบัตรต่าง ๆ เช่น Electro-mechanic Fuze เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาชนวนหัวรบ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในขั้นตอนการทำงาน และให้มีศักยภาพในการทำงานของระบบชนวนหัวรบที่ดียิ่งขึ้น โดยบทความวิจัยนี้เป็นรายงานผลการศึกษา การออกแบบ และการจำลองการทำงานของระบบชนวนหัวรบแบบ Electro-mechanic Fuze ที่ทำงานร่วมกันระหว่างกลไกทางไฟฟ้าและกลไกทางกล เพื่อเป็นขั้นพื้นฐานในการต่อยอดความคิดในขั้นต่อไป

คำสำคัญ: ชนวนหัวรบ, จรวด, กลไกทางไฟฟ้า, กลไกทางกล

[1, 2] ส่วนงานวิศวกรรมวัตถุระเบิด และนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

[*] Corresponding author, E-mail: phulkjika.s@dti.or.th

Electro-mechanic fuze for rockets

Phulkjika Sooksirimuch [1*] and Thanach Khantong [2]

Received 13 July 2020 Revised 28 August 2020 Accepted 31 August 2020

Abstract

The design of fuze in this research use the methodology and procedures indicated in MIL-STD-1316D which determined the safety qualifications need to be considered when designing fuze. This design incorporates both mechanical and electrical mechanisms for target perception, conditions and command responses that are pre-determined for safe and accurate detonation of the fuze. Also, patents are studied as guidelines for designing and developing of the fuze to further enhanced safety and potential of the fuze. This research article is a report of the design and simulation of Electri-mechanic fuze to use as a foundation for further studies in the future.

Keywords : Fuze, Rocket, Electro-mechanic fuze

[1, 2] NBC and Explosive Engineering Division - RNE Defence Technology Institute.

[*] Corresponding author, E-mail: phulkjika.s@dti.or.th

1. ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

ในการออกแบบชนวนหัวรบ (Fuze) นั้นผู้เขียนได้ใช้ MIL-STD-1316D Safety Criteria for Fuze Design และ Safety and Arming Device Design Principles [1] เป็นแนวทางในการออกแบบ เพื่อให้ชนวนหัวรบที่ได้มีความปลอดภัยสูงและเป็นไปตามหลักการสากล โดย MIL-STD-1316D เป็นเอกสารที่จัดทำโดยกระทรวงกลาโหมของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งภายในเอกสารจะระบุถึงเกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่จะต้องคำนึงถึงเมื่อทำการออกแบบชนวนหัวรบ (Fuze) โดยเอกสารดังกล่าวให้คำจำกัดชนวนหัวรบว่า เป็นระบบทางกายภาพที่ถูกออกแบบเพื่อให้รับรู้ถึงเป้าหมายหรือตอบสนองต่อเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดไว้ เช่น เวลา ความดัน หรือคำสั่ง และทำการเริ่มจุดขบวนวัตถุระเบิด (Explosive train) หรือจุดยุทโธปกรณ์นั้น ๆ ทันที ซึ่งตาม [2] การออกแบบชนวนหัวรบมีเงื่อนไขที่ต้องคำนึงถึง ดังนี้

1.1 ระบบความปลอดภัยของชนวนหัว โดยในระบบเป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- ไม่ทำให้เกิดขั้นตอนการพร้อมยิง (Arming sequence) จนกว่าผู้ใช้ตั้งใจจะให้เกิดการพร้อมยิง
- ไม่อ่อนไหวต่อความล้มเหลวร่วม (Common-mode failures) กล่าวคือ หากเกิดการผิดพลาดที่จุดใดจุดหนึ่งของระบบ ชนวนหัวจะต้องไม่ทำงาน
- จะต้องไม่มีโหมดความล้มเหลวจากจุดเดียว (Single-point failure mode) ก่อนหรือในช่วงจุดเริ่มต้นขั้นตอนการพร้อมยิง กล่าวคือจะต้องไม่มีการผิดพลาดใด ๆ เกิดขึ้นทั้งสิ้นก่อนหรือในช่วงจุดเริ่มต้นขั้นตอนการพร้อมยิง
- ต้องมีโหมดล้มเหลวแค่จุดเดียวระหว่างการพร้อมยิง ซึ่งควรจะเป็นช่วงใกล้กับช่วงสุดท้ายของการหน่วงการพร้อมยิง

ทั้งนี้การออกแบบชนวนหัวต้องป้องกันการพร้อมยิงก่อนกำหนด (Premature fuze arming) หรือการทำงานใด ๆ หากชนวนหัวนั้นเป็นชนวนหัวทางไฟฟ้าแล้วเกิดการผิดพลาดภายในวงจรไฟฟ้า ในช่วงก่อน ระหว่าง หรือภายหลังการนำไฟฟ้ามาใช้ในระบบของชนวนหัว

นอกจากนั้น ระบบความปลอดภัยของชนวนหัวยังจะต้องประกอบด้วยคุณลักษณะด้านความปลอดภัย (Safety features) ตั้งแต่ 2 แบบขึ้นไป โดยจำเป็นต้องทำงานอิสระจากกันและป้องกันการพร้อมยิงโดยไม่ตั้งใจ และเมื่อทำงานแล้วจะต้องไม่สามารถย้อนกลับสู่สภาวะเดิมได้ ต้องมีการหน่วงการพร้อมยิงเพื่อให้สามารถออกห่างจากชนวนหัวได้เมื่อปฏิบัติงาน ต้องไม่สามารถพร้อมยิงด้วยมือได้ และหากเป็นชนวนหัวชนิดไฟฟ้าโปรแกรมควบคุมการทำงาน (Firmware) จะต้องไม่สามารถถูกลบหรือปรับเปลี่ยนได้โดยสภาพแวดล้อม

1.2 อัตราความล้มเหลว จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน ดังนี้

- ก่อนขั้นตอนการพร้อมยิง อัตราความล้มเหลวของการพร้อมยิงและการทำงานต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 1,000,000 ชนวนหัว
- ก่อนออกจากท่อยิง อัตราความล้มเหลวของการพร้อมยิงต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 10,000 ชนวนหัว และอัตราความล้มเหลวของการทำงานต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 1,000,000 ชนวนหัว
- ช่วงระหว่างขั้นตอนการพร้อมยิง และก่อนออกจากท่อยิง ต้องอยู่ที่ 1 ความล้มเหลว ต่อ 1,000 ชนวนหัว

โดยการวิเคราะห์เงื่อนไขความอันตราย มีดังนี้

- วิเคราะห์อันตรายเบื้องต้น ใช้ MIL-STD-882 [2]
- วิเคราะห์อันตรายของระบบและการวิเคราะห์อย่างละเอียด ใช้ Fault tree analysis และ Failure mode effects and criticality analysis
- ชนวนหัวรบที่มีการใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ หรืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์อื่น ๆ ให้มีการวิเคราะห์การมีส่วนร่วมของซอฟต์แวร์ต่อการทำงานของคุณลักษณะด้านความปลอดภัย
- หากพบว่าซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นการควบคุมลักษณะ

ด้านความปลอดภัยโดยตรง จะต้องมีการวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อเป็นการยืนยันว่าซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะไม่ล้มเหลวและส่งกระทบต่อคุณลักษณะด้านความปลอดภัย

โดยในการวิจัยพื้นฐานครั้งนี้จะยึดเพียงหลักการออกแบบเบื้องต้นเหล่านี้ เนื่องจากจะยังไม่มีการนำวัตถุระเบิดมาใช้ทดสอบจริง และเป็นเพียงการพิสูจน์แนวความคิดเบื้องต้นเท่านั้น

Safety and Arming Device Design Principles เป็นเอกสารที่อ้างอิงเพิ่มเติมจาก MIL-STD-1316D [3] โดยจะเป็นการอธิบายหลักการต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น

ในการออกแบบระบบไฟฟ้าของชนวนหัวรบ ผู้เขียนได้ใช้สิทธิบัตรของชนวนหัวรบทางด้านไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วเป็นรากฐานในการต่อยอดความคิดและการออกแบบที่จะนำไปสู่การทำงานร่วมกันระหว่างระบบไฟฟ้าและระบบทางกล โดยสิทธิบัตรแรกที่ผู้เขียนได้นำแนวความคิดมาใช้คือ US 5, 271, 327 [4] ต่อมาได้มีการศึกษาสิทธิบัตร US 7, 213, 518 [5] เพิ่มเติม โดยระบบชนวนหัวในสิทธิบัตรดังกล่าวนั้น เป็นการต่อยอดโดยตรงจากสิทธิบัตรแรกด้วยการปรับปรุงการทำงาน เช่น ทำให้ชนวนหัวสามารถทำงานได้กับยุทโธปกรณ์หลายๆ ชนิด และสามารถปรับแต่งให้ใช้กับยุทโธปกรณ์อื่นๆ ในอนาคตได้ นอกจากนี้ยังออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแหล่งจ่ายพลังงานภายในตัวชนวนหัวรบเพื่อเพิ่มอายุการเก็บรักษาของชนวนหัว รวมถึงการเพิ่มระบบทำลายตัวเองเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการไม่จุดตัวของยุทโธปกรณ์

1.3 แนวคิดการออกแบบชนวนหัวรบ

แนวคิดในการออกแบบกลไกทางด้านเครื่องกล ผู้เขียนได้นำแนวคิดจากชนวนหัวชนิด M423 ซึ่งเป็นชนวนหัวชนิดเครื่องกลที่มีใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยรายละเอียดการทำงานนั้นได้ระบุไว้ในสิทธิบัตร US 3, 722, 419 [6] ซึ่งสรุปได้ว่า ชนวนหัวชนิดนี้จะใช้การหมุนของใบพัดเพื่อกำหนดสถานะการพร้อมยิง/ไม่พร้อมยิงของชนวนหัว ซึ่งเมื่อใบพัดหมุนมาอยู่ในตำแหน่ง arm แล้วจะทำให้ขั้นตอนการพร้อมยิงนั้นสมบูรณ์ และเมื่อเกิดการตกกระทบอย่างรุนแรงจะทำให้ชนวนหัวนั้น ไปจุดระเบิดแรงสูงที่อยู่ภายในหัวรบได้

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

โครงการวิจัยพื้นฐานระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวดมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- เพื่อศึกษาการออกแบบระบบชนวนหัวรบโดยใช้แนวคิดการออกแบบและขั้นตอนตามตามเกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบชนวนหัวรบ
- เพื่อศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างกลไกทางไฟฟ้าและกลไกทางกล เพื่อให้สามารถรับรู้ถึงเป้าหมายการตอบสนองต่อเงื่อนไขและคำสั่งต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในการจุดชนวนวัตถุระเบิกได้อย่างแม่นยำและปลอดภัย
- เพื่อศึกษาสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับชนวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์และเชิงกลโดยใช้เป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาชนวนหัวรบ

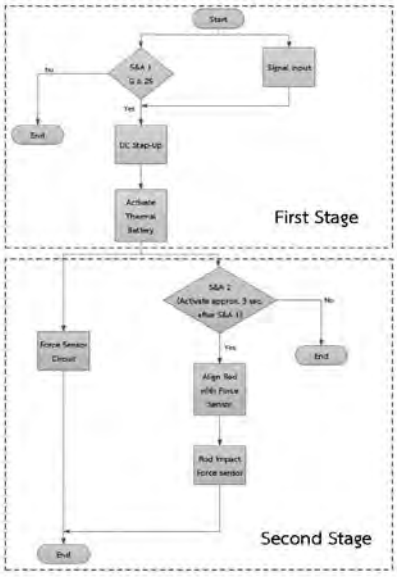
2. การออกแบบระบบชนวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์-เชิงกล (Electro-mechanic fuze)

การออกแบบชนวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์และเชิงกลจากที่ได้ศึกษาตามสิทธิบัตร US5271327A Electro-Mechanical Base Element Fuze [4] นั้น ได้สรุปแนวทางออกออกแบบเป็น 2 ส่วน ตามรูปที่ 1 โดยขั้นแรก (Frist Stage) เป็นขั้นตอนแห่งความปลอดภัยและอุปกรณ์พร้อมยิง (Safety and Arming Device: S&A1) โดยเป็นกลไลทางกลที่ทำงานเมื่อค่า G มากกว่า 25G และมีสัญญาณทางไฟฟ้ามาเชื่อมต่อเพื่อจุดแบตเตอรี่ความร้อน (Thermal Battery) โดยใช้วงจรแปลงแรงดันให้สูงขึ้น (DC Step-up) และในขั้นที่ 2 (Second stage) จะเป็นการทำงานหลังจากแบตเตอรี่ความร้อนจุดตัวแล้ว

ซึ่งจะมีความปลอดภัยและอุปกรณ์พร้อมยิงลำดับที่ 2 (S&A2) ซึ่งจะมีการทำงานภายหลังความปลอดภัยและอุปกรณ์พร้อมยิงลำดับที่ 1 ทำงานแล้ว 3 วินาที โดยเป็นกลไลทางกล เพื่อเชื่อมต่อกับวงจร Force Sensor เพื่อทำการเริ่มจุดขบวนวัตถุระเบิด

3. ผลการออกแบบกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ขั้นต้น

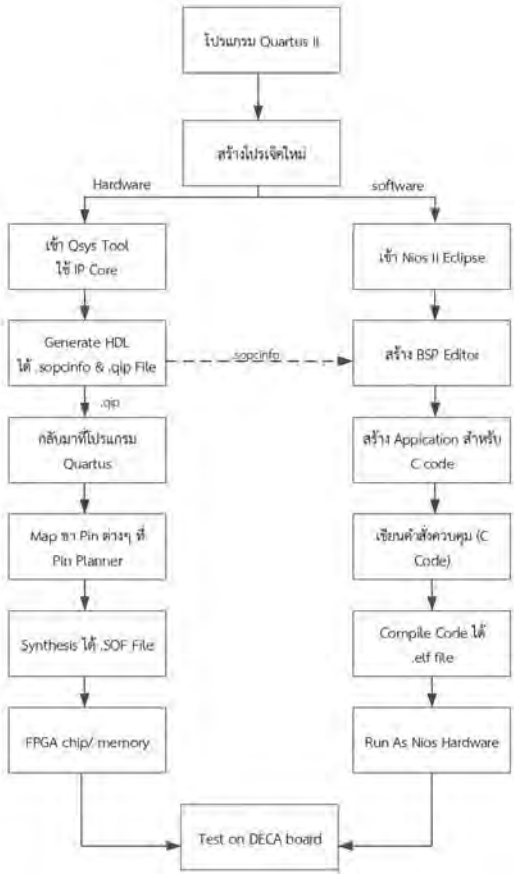
ระบบชนวนหัวรบถือเป็นระบบที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดจากการทำงานของกลไกภายในได้สูงมาก เช่น การเกิดการลัดวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สั่งการ ควบคุมการทำงานของระบบชนวนหัวรบ หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในสภาวะที่ไม่พึงประสงค์ต่อการทำงาน จึงมีการศึกษากลไกการทำงานของระบบชนวนหัวรบที่ใช้กลไกการจุดระเบิดด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Field Programmable Gate Array หรือ FPGA) ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการประมวลผลการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในระบบชนวนหัวรบ เพื่อลดข้อผิดพลาดดังกล่าว จึงใช้บอร์ด FPGA ทดลองในการศึกษาควบคุมการทำงานของระบบชนวนหัวรบหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยเริ่มศึกษาคุณลักษณะและการทำงานทั่วไปของบอร์ดการออกแบบวงจรดิจิทัล และ การศึกษาการออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ใน FPGA ขั้นต้น



รูปที่ 1 การออกแบบระบบเชิงอิเล็กทรอนิกส์-เชิงกล

FPGA เป็นวงจรรวมทางดิจิทัลที่สามารถโปรแกรมวงจรหรือฟังก์ชันการทำงานลงไปภายในได้เอง เหมาะสำหรับการออกแบบวงจรไฟฟ้าและการออกแบบชิปต้นแบบของวงจรทางดิจิทัล ถ้าเปรียบเทียบการออกแบบวงจรดิจิทัลบน FPGA กับการออกแบบวงจรดิจิทัลโดยการใช้ IC Gates หรือใช้ IC TTL หลายๆ ตัวบนแผ่น PCB การออกแบบวงจรดิจิทัลบน FPGA สามารถออกแบบวงจรดิจิทัลด้วยซอฟต์แวร์ได้ จากนั้นเมื่อทดลองจำลองได้ผลที่น่าพอใจแล้วจึงโปรแกรมข้อมูลลงบนชิป FPGA จะเห็นว่าการแก้ไขทำได้ง่าย เพียงแก้บนซอฟต์แวร์เปรียบเหมือนอุปกรณ์ดิจิทัลอยู่ในรูปของซอฟต์แวร์แก้ไขง่าย สามารถโปรแกรมข้อมูลใหม่หรือโปรแกรมข้อมูลซ้ำได้ ลดความยุ่งยากจากการเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่และลดการเกิดสัญญาณรบกวนจากการออกแบบ PCB [7] แต่การนำ IC จำนวนมากมาต่อกัน เมื่อเกิดความผิดพลาดจะต้องทำการออกแบบ PCB หรือลายวงจรใหม่ ทำให้การแก้ไขยุ่งยากและสิ้นเปลือง IC อีกด้วย

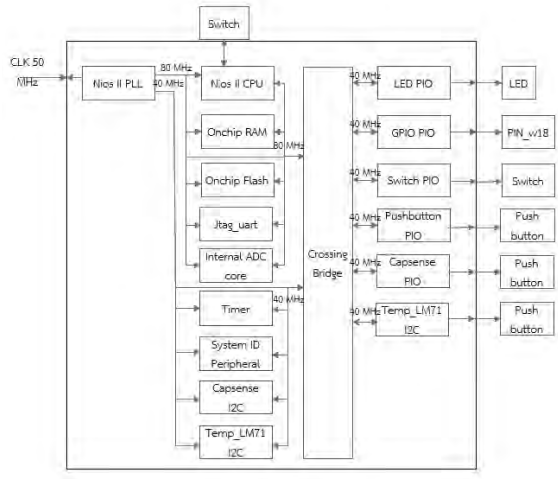
ในการศึกษาการใช้งานและรายละเอียดของ FPGA นี้ได้เลือกใช้บอร์ดทดลองอเนกประสงค์ DECA ซึ่งมีคุณสมบัติครบถ้วนพร้อมใช้งานอยู่ในตระกูล MAX 10 FPGA ของบริษัท Altera Electronic ซึ่งบอร์ด DECA นี้ เป็นบอร์ดทดลองที่เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาการออกแบบวงจรดิจิทัลด้วย FPGA โดยบอร์ดนี้มีชิปที่ควบคุมการทำงานหรือการสั่งการเพียงชิปเดียว คือ ชิป 10M50DAF484C6G มีหน่วยความจำถาวร (Non-volatile) ที่สามารถโปรแกรมลอจิกเกตลงในชิปโดยข้อมูลไม่หายเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงได้ มีสัญญาณความถี่สูงสุดอยู่ที่ 50 MHz มี ความจุเกตขนาด 50,000 เกต ซึ่งจำนวนเกตยิ่งมากยิ่งสร้างวงจรที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนได้มากยิ่งขึ้น มี Instant-on ภายในตัวชิปและมี Boot-time ที่มีความรวดเร็วต่อการตอบสนองในการประมวลผลสูง เนื่องจากในระบบชนวนหัวไม่ต้องการที่จะจ่ายไฟให้วงจรภายในตั้งแต่แรก ดังนั้นเมื่อระบบชนวนหัวที่ออกแบบได้รับสัญญาณทางไฟฟ้าจึงต้องเลือกชิปที่ประมวลผลได้รวดเร็วที่สุดเพื่อความพร้อมในการทำงาน



รูปที่ 2 การทำงานของโปรแกรมในการออกแบบวงจร

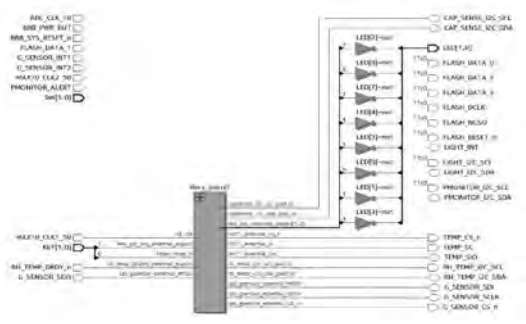
การออกแบบวงจรดิจิทัลที่ใช้กับบอร์ด DECA นี้ สามารถออกแบบได้หลากหลายวิธี เช่น การนำเกตมาต่อกันใน FPGA เพื่อสร้างเป็นวงจรไฟฟ้า การเขียนภาษา HDL (Hardware Description Language) ซึ่งภาษาที่นิยมใช้คือ VHDL และ Verilog HDL การวาดผังวงจร (Schematic Capture) โดยเลือกองค์ประกอบจากไลบรารี เช่น ลอจิกเกต หรืออื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนสูงขึ้น แล้วนำมาต่อกันเป็นวงจรตามต้องการ และการสร้างฮาร์ดแวร์จำลองใน FPGA และใช้ซอฟต์แวร์ในควบคุมการสั่งการเป็นต้น โดยผู้เขียนได้ศึกษาและออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ควบคู่กันไป เพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาระบบชนวนหัวรบในส่วนของฟังก์ชันสำหรับออกแบบ ส่วนของฮาร์ดแวร์เรียกว่า Qsys Tool จะเป็นการใช้ IP Core เข้ามาช่วยในการสร้าง Hardware โดย Generate file เป็นภาษา HDL code เพื่อนำไปสร้าง Hardware จำลองสำหรับใช้ในการเขียนคำสั่งควบคุมต่อไป ส่วนฟังก์ชันสำหรับควบคุมและสั่งการทำงานเรียกว่า Nios II Software Build Tools for Eclipse จะเป็นส่วนเขียนโปรแกรมควบคุมส่วน Hardware ที่ได้สร้างขึ้นมาใน FPGA chip โดยมีขั้นตอนการออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ตามรูปที่ 2

จากการออกแบบและทดสอบระบบชนวนหัวรบเชิงอิเล็กทรอนิกส์-เชิงกล ในส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ได้พัฒนาและออกแบบฮาร์ดแวร์จำลองใน FPGA และออกแบบซอฟต์แวร์ในการควบคุมการสั่งการ โดยเป็นการจำลองการทำงานระหว่างส่วนเชิงกลและส่วนไฟฟ้าว่าสามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างไร เมื่อกระบวนการทางกลทำงานครบกระบวนการจะมีไม้มากดที่สวิตช์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ให้หลอดไฟ LED ติดทุกครั้งที่สวิตช์ถูกกด เพื่อเป็นการนับรอบการทำงานครบของกระบวนการทางกลและการติดของหลอด LED เป็นการแสดงถึงการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ว่าสามารถทำงานตามคำสั่งได้ โดยในส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้นได้ออกแบบฮาร์ดแวร์จำลองใน FPGA ตามรูปที่ 3 และออกแบบซอฟต์แวร์ในการควบคุมการสั่งการอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ บนบอร์ด DECA



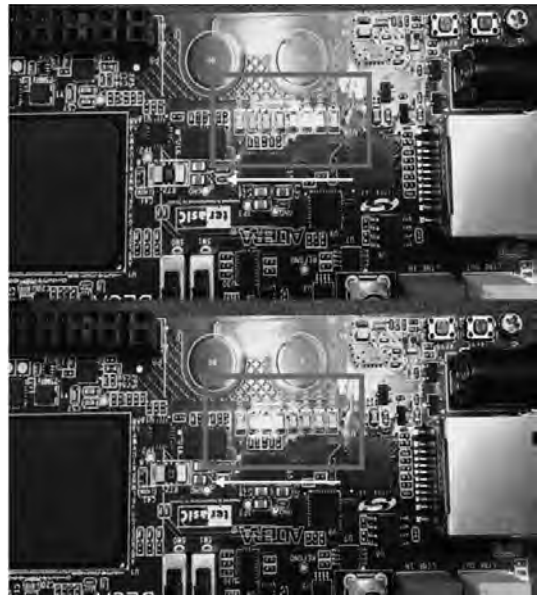
รูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าสำหรับใช้งานบนบอร์ด DECA

จากรูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าได้รับสัญญาณ Clock 50 MHz จากบอร์ดเข้ามาที่โมดูล PLL ซึ่งมีหน้าที่สร้างและจ่ายสัญญาณ Clock ให้แก่ Processor และอุปกรณ์ต่อพ่วง (Peripherals) ในที่นี้โมดูล PLL สร้างสัญญาณ Clock ใหม่ขนาด 80 MHz สำหรับจ่ายให้ Nios II CPU, ONchip RAM, Onchip Flash, Jtag_Uart และ Internal ADC Core เนื่องจากโมดูลเหล่านี้ต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูลและประมวลผลข้อมูลสัญญาณ Clock ใหม่ขนาด 40 MHz เพื่อจ่ายสัญญาณ Clock ให้แก่โมดูลของอุปกรณ์ต่อพวงหรือโมดูลที่ใช้ความเร็วในการทำงานน้อยลงมา จากข้างต้นจะเห็นว่าระบบที่ออกแบบมานี้มีสัญญาณ Clock ที่ทำงานในความถี่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องสร้างโมดูล Crossing Bridge เพื่อเชื่อมให้โมดูลและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบที่ทำงานที่ความถี่ต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้ เมื่อออกแบบระบบดิจิทัลใน Qsys Tool เสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการเชื่อมต่อขาสัญญาณต่าง ๆ ในระบบฮาร์ดแวร์เชื่อมกับอุปกรณ์ต่อพ่วงภายในบอร์ด DECA ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรไฟฟ้าออกแบบใน Qsys Tool

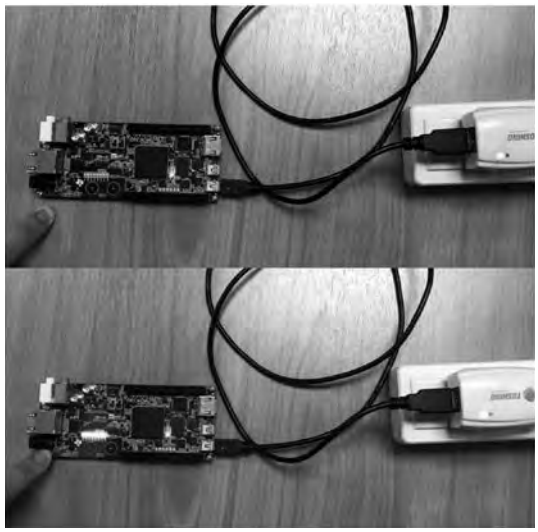
เมื่อได้ส่วนของฮาร์ดแวร์ที่พร้อมสำหรับการใช้งานแล้ว จึงเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานเป็นภาษา C (C Embedded) ใน Nios II Software Build Tools for Eclipse เพื่อควบคุมในส่วนของฮาร์ดแวร์ จากรูปที่ 5 แสดงผลการควบคุมการทำงานในซอฟต์แวร์โดยในส่วนการทำงานของชนวนหัวรบข้างต้น เป็นการจำลองการทำงานโดยกดสวิตช์ 1 ครั้งจะทำให้ LED ดวงที่ 1 ติดและเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ เมื่อถึงครั้งที่ 9 LED จะดับทุกดวงและเมื่อกดครั้งที่ 10 LED ดวงที่ 1 จะติดใหม่ เป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ และที่หน้าต่างโปรแกรมจะแสดงจำนวนครั้งที่กดสวิตช์ไปเรื่อย ๆ ซึ่งการกดสวิตช์นี้ เป็นการจำลองการเริ่มต้นการทำงานของระบบชนวนหัวรบอิเล็กทรอนิกส์ ว่าเมื่อการทำงานในส่วน S&A ปลดล็อคจะมีส่วนสัมผัสกับส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อสามารถเชื่อมต่อกันได้แล้วการที่ LED ติดจะเป็นตัวบอกว่าในส่วนของวงจรไฟฟ้าพร้อมทำงาน



รูปที่ 5 ผลจากการใช้ภาษา C ควบคุมการทำงาน

จากการออกแบบชนวนหัวรบอิเล็กทรอนิกส์ข้างต้นเป็นการโปรแกรมคำสั่งต่าง ๆ เข้าไปเก็บไว้ที่ RAM คือ เมื่อถอดสายไฟฟ้าออก ทำให้ข้อมูลที่โปรแกรมคำสั่งเข้าไปเสียหาย และต้องทำการเสียบสายไฟระหว่างบอร์ดกับคอมพิวเตอร์ตลอดเวลาเพื่อจ่ายไฟไปเลี้ยงอุปกรณ์ต่าง ๆ บนบอร์ดให้ทำงานได้ และเพื่อควบคุมการทำงานของคำสั่งที่ได้โปรแกรมข้อมูลลงในชิปจึงไม่สะดวกต่อการนำบอร์ดทดลองไปใช้งานจริง ดังนั้นจึงได้ศึกษาเรื่อง User Flash Memory โดยชิป MAX 10 นี้สามารถโปรแกรมคำสั่งและบันทึกวงจรไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีแบบ Non-Volatile เช่นเดียวกับโครงสร้างหน่วยความจำ RAM คือโปรแกรมแล้วต้องมีไฟเลี้ยงตัวชิปอยู่ตลอดเวลา หากไฟดับวงจรจะหายทันที ดังนั้นในการออกแบบใช้งานจึงต้องมี Flash Memory สำหรับเก็บ

ค่าสถานะของวงจรต่อพ่วงอยู่เสมอ โดยต้องโปรแกรมข้อมูลทั้งส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ลงใน Flash Memory ด้วย การทำงานคือ เมื่อเปิดไฟเลี้ยงชิปข้อมูลที่โปรแกรมคำสั่งเข้าไปเก็บใน Flash Memory จะถูกโหลดมาสร้างเป็นวงจรตามที่ได้โปรแกรมไว้และทำงานได้ทันที และที่สำคัญ PGA สามารถใช้โปรแกรมที่เป็นเครื่องมือในการพัฒนาออกแบบวงจรตัวเดียวกันได้ สิ่งที่ต้องระมัดระวังของ MAX 10 คือ สามารถโปรแกรมข้อมูลได้ไม่เกิน 10,000 ครั้ง จากนั้นต้องเปลี่ยนชิป FPGA ใหม่



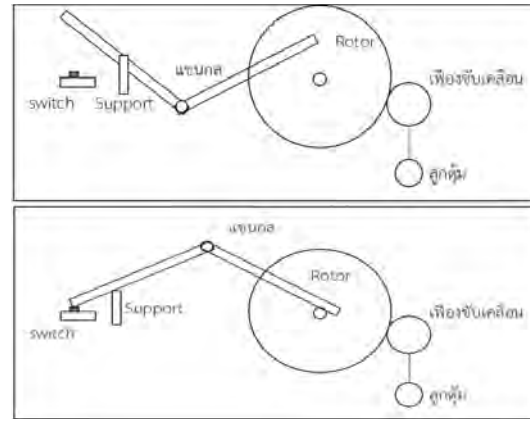
รูปที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาเรื่อง Flash Memory

จากรูปที่ 6 แสดงผลการทำงานของชนวนหัวรบอิเล็กทรอนิกส์ โดยเมื่อทำการกดสวิตช์ถึงครั้งที่ 8 หลอด LED จะสว่างทุกดวง แต่เมื่อกดสวิตช์ถึงครั้งที่ 9 หลอด LED จะดับทุกดวง จากรูปเห็นได้ว่า บอร์ด DECA เชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์ดัดแปลง (Adapter) เพื่อจ่ายไฟไปเลี้ยงบอร์ด ไม่ได้เชื่อมเข้าอยู่กับคอมพิวเตอร์ นั่นแสดงว่าได้ทำการโปรแกรมในส่วนของฮาร์ดแวร์และคำสั่งควบคุมการทำงานภาษา C ลงไปใน Flash Memory เรียบร้อยแล้ว

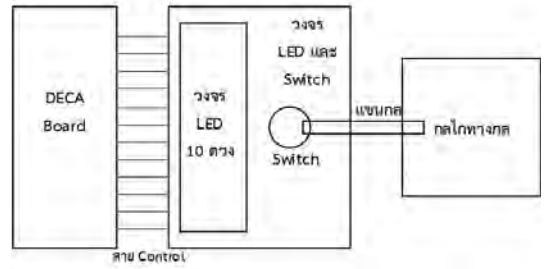
4. การอภิปรายผล

4.1 ผลการออกแบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวด

กลไกของระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวดนั้น ได้นำกลไกทางกลจากชนวนหัว M423 มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อกลไกทางกลทำงานครบรอบการทำงานที่ตั้งค่าไว้ จากรูปที่ 7 จะมีแขนกลเป็นตัวเชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นตัวกำหนดการเริ่มทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์และเมื่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำงานครบรอบคำสั่งการที่ได้โปรแกรมลงไปจะแสดงผลการจุดระเบิดเป็นการสว่างของหลอด LED ซึ่งผลเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงกลไกการทำงานตามรูปที่ 8



รูปที่ 7 (บน) ลักษณะของกลไกทางกลก่อนการทำงาน
(ล่าง) ลักษณะของกลไกทางกลหลังการทำงาน



รูปที่ 8 การทำงานของกลไกด้าน electronics

4.2 ข้อขัดข้องระหว่างกระบวนการออกแบบ

ในการทำการวิจัยและพัฒนาระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวด ภายใต้โครงการวิจัยพื้นฐานของ สทป. มีความล่าช้าในการจัดซื้อจัดจ้างทำให้ไม่สามารถลองสร้างต้นแบบระบบเพื่อทดสอบ

แนวความคิดนี้ได้ ทำให้งานหยุดชะงักลง อย่างไรก็ตาม สทป. เป็นเพียงหน่ยงานเดียวในประเทศที่มีการวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ดังนั้นจึงยังมีโอกาสในการดำเนินการด้านนี้ต่อ ทั้งนี้จะเป็นไปตามยุทธศาสตร์ นโยบาย และทิศทางการวิจัยและพัฒนาของ สทป.

4.3 แผนงานในอนาคต

4.3.1 กลไกเชิงอิเล็กทรอนิกส์และเชิงกล

สำหรับแผนงานในอนาคตของกลไกด้านเครื่องกลของระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวด ผู้เขียนตั้งเป้าที่จะทำต้นแบบจำลองโดยมีหลักการทำงานที่นำแนวความคิดจากชนวนหัว M423 มาใช้ [8] โดยเฟืองขับเคลื่อนจะถูกขับเคลื่อนด้วยการแกว่งของลูกตุ้ม ซึ่งจะทำหน้าที่ เป็น Timer delay ส่วนตัวเฟืองขับเคลื่อนจะใช้ในการหมุนใบพัดซึ่งภายในติดกับใบพัดจะเป็นแขนกล โดยเมื่อใบพัดหมุนครบรอบตามที่ออกแบบไว้ แขนกลจะลงไปกระแทกกับสวิตช์ซึ่งจะทำให้ส่วนกลไกด้านอิเล็กทรอนิกส์ทำงาน ทั้งนี้ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างแขนกลและใบพัดจะมีร่องเพื่อให้แขนกลนั้นวิ่งตามร่อง เมื่อสุดร่องแล้วก็จะครบรอบของใบพัด แล้วจะมีระบบล็อกเพื่อป้องกันการหมุนกลับของใบพัด

4.3.2 กลไกด้านไฟฟ้า

สำหรับแผนงานในอนาคตของกลไกด้านอิเล็กทรอนิกส์ของระบบชนวนหัวรบสำหรับอาวุธยิงประเภทจรวดนั้น ผู้เขียนตั้งเป้าที่จะทำวงจรต้นแบบเพื่อ Contact กับส่วน Mechanic โดยการออกแบบวงจรและอุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอกบอร์ด DECA และเป็นการศึกษาการอินเตอร์เฟสอุปกรณ์ต่อพ่วงภายนอกเพื่อพัฒนาศักยภาพการทำงานของระบบให้ดียิ่งขึ้น

5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาหลักการการทำงานของระบบชนวนหัวและการศึกษาสิทธิบัตร US5271327A Electro-Mechanical Base Element Fuze [4] ทำให้ทราบว่า ระบบชนวนหัวรบถือเป็นระบบที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดจากการทำงานของกลไกภายในได้สูงมาก ดังนั้นการออกแบบระบบชนวนหัวจะต้องระมัดระวังและเพิ่มการทดสอบตามมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อให้มั่นใจว่า ชนวนหัวจะทำงานตามคำสั่งเวลา และค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ออกแบบไว้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความมั่นใจในการใช้งาน ทั้งนี้ในการศึกษาการออกแบบชนวนหัวขั้นแรกจึงต้องทดสอบอุปกรณ์และเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมต่อการใช้งานและความปลอดภัย และจะต้องใช้เวลาในการศึกษาทดสอบทดลองวงจรไฟฟ้าและกลไกทางกลให้มีความเสถียรภาพ เพื่อนำไปสร้างต้นแบบของระบบชนวนหัวในอนาคตต่อไป

6. References

[1] Department of Defense, (1991). Military Standard Fuze Design, Safety Criteria For. Avialable at http://www.everyspec.com

[2] Military and Government Specs & Standards. 2012. Standard practical system safety. MIL-STD-882 Revision E, Naval Publications and Form Center (NPFC). 104p.

[3] Department of Defense, 1991. MIL-STD-1316D, Military standard: fuze design, safety criteria for. 21p.

[4] Filo, G. F., Kurschner, D. L. and Weber, P. L. (1993). Elecro-mechanical base element fuze. United States Patent. US5271327. Date of Patent: 21 December 1993. 13p.

[5] Sutcliffe, S. A. (2007). Modular electronic fuze. United States Patent.

US 7,213,518 B2. Date of Patent: 8 May 2007. 3p.

[6] James J.O., (1973). Arming Device for Missiles. United States Patent. US 3,722,419.

[7] ณรงค์ ทองฉิม และเจริญ วงษ์ชุ่มเย็น. (2552). ออกแบบไอซีดิจิทัลด้วย FPGA และ CPLD ภาคปฏิบัติ โดย ใช้ภาษา VHDL. พิมพ์ครั้งที่ 1. ซีเอ็ดยูเคชั่น, บมจ. 440น.

[8] ธนัช ขันทอง (2559) รายงานความก้าวหน้าของเจ้าหน้าที่ทดลองงาน. กรุงเทพมหานคร. รายงาน. : สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ.