

การพัฒนาต้นแบบระบบขบวนอาวุธ แบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้งานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่

พลุกจิกา สุขศิริมัย^{1*} และ จิรายุส จันทะวงศ์²

วันที่รับ 9 สิงหาคม 2567 วันที่แก้ไข 23 ธันวาคม 2567 วันที่ตอบรับ 5 มกราคม 2568

บทคัดย่อ

ระบบขบวนหัวรบได้ถูกนำมาติดตั้งในระบบอาวุธหลายชนิด เช่น ระบบกระสุนปืนใหญ่ ระบบจรวด ระบบมิสไซล์ และระบบขีปนาวุธนิวเคลียร์ เป็นต้น เพื่อที่จะสามารถโจมตีเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันเริ่มมีแนวคิดพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งเป็นอากาศยานไร้คนขับแบบติดอาวุธ เพื่อนำมาใช้งานในการโจมตีหรือป้องกัน เช่น การนำฝูงอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่บินเข้าโจมตีศัตรู เป้าหมายละลอกที่ 2 เพื่อเน้นการโจมตีกองกำลังทหารที่กำลังหลบหนี บินโจมตีในพื้นที่รวบรวมกำลังพล หรือบินป้องกันการโจมตีทางอากาศจากขีปนาวุธหรืออากาศยานต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษา กลไกการทำงานของระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ โดยในขั้นต้นเป็นการศึกษาและรวบรวมองค์ความรู้ในการออกแบบการทำงานของระบบขบวนหัวรบแบบ อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ให้มีการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยในการนำไปใช้งานจริง จากการศึกษาระบบขบวนแบบอิเล็กทรอนิกส์นำมาสู่การออกแบบวงจรไฟฟ้า สำหรับขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตอบสนองการทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ได้ โดยออกแบบภายใต้มาตรฐาน MIL-STD-1316 ต้องประกอบด้วยระบบที่ทำงานอิสระต่อกันจำนวน 2 ระบบ และ ต้องทำงานพร้อมกัน มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ วงจร Safe & Arming ระบบการเก็บรักษา ระบบการรับรู้ และระบบจุดชนวน เป็นต้น โดยเริ่มต้นทำงานแบบ 2-Stage Arming ในช่วงแรกทำการเช็คค่าความแรง ที่อากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ได้ Take-off ขึ้นไปในอากาศ เมื่อค่าพารามิเตอร์และระยะเวลามากกว่า ค่าที่กำหนดไว้ ทำการปลดความปลอดภัยขั้นที่ 1 ออก หลังจากอากาศยานเดินทางเข้าสู่เป้าหมายน้อยกว่า ระยะที่กำหนดไว้ ระบบขบวนหัวรบจะปลดความปลอดภัยขั้นที่เหลือออก ทำให้ขบวนหัวรบพร้อมทำงาน เมื่อกระทบเป้าหมายทำการจุดวัตถุระเบิดโดยทันที จากขั้นตอนการทำงานที่ได้จากการศึกษาระบบขบวนหัวรบ ได้มีการออกแบบบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อจำลองการวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการใช้งานจริงและ เป็นต้นแบบในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

คำสำคัญ : โดรนกามิกาเซ่, โดรนติดอาวุธ, ขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์, กลไกขบวนหัวรบ

¹ ส่วนงานวิศวกรรมวัตถุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ส่วนงานวิศวกรรมอากาศยาน, ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: Phulkjika.s@dti.or.th

Development of Electronic Fuzing System Prototype for Kamikaze Unmanned Aerial Vehicle

Phulkjika Sooksirimuch ^{1*} and Jirayuth Jantawong ²

Received 9 August 2024 Revised 23 December 2024, Accepted 5 January 2025

Abstract

Fuze systems are integral components of numerous weapon systems, including artillery shells, rockets, missiles, and nuclear warheads, enhancing target engagement effectiveness. The current trend involves the development of armed kamikaze UAVs for both offensive and defensive applications. These UAVs can be deployed in swarms for second-wave attacks, targeting fleeing enemy forces, striking troop concentrations, or intercepting incoming missiles and aircraft. This necessitates a thorough investigation into the operational mechanisms of electronic fuze systems within the context of kamikaze UAV integration. This research focuses on the design and development of an effective and safe electronic fuze system for seamless integration with kamikaze UAVs. The study involves compiling existing knowledge and developing a design that ensures efficient and reliable operation. The resulting design of the electronic fuze circuit adheres to MIL-STD-1316 military standards. It comprises two independent, concurrently operating systems, with key components including a safe & arming circuit, a storage system, a sensing system, and a detonation system. The fuze system employs a two-stage arming sequence. The initial stage involves monitoring acceleration data following the kamikaze UAV's takeoff. Once predetermined parameters and durations are met, the first safety mechanism is disengaged. Upon the UAV's approach to the target within a specified range, the remaining safety mechanisms are released, activating the fuze. Upon target impact, the explosive charge is immediately detonated. Based on this operational analysis, an electronic board has been designed to simulate the arrangement of real-world electronic components. This prototype serves as a foundation for further research and development efforts.

Keywords: Kamikaze drones, Loitering Munition, Electronic fuze, Safe and arm

¹ NBC and Explosive Engineering Division, Research & Development Department, Defence Technology Institute

² Aeronautical Engineering Division, Research & Development Department, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: Phulkjika.s@dti.or.th

1. บทนำ

ในบทความฉบับนี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการรวบรวมข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบขบวนอาวุธอิเล็กทรอนิกส์และในส่วนที่สอง คือ การออกแบบบอร์ดิอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบขบวนอาวุธอิเล็กทรอนิกส์ขั้นต้น โดยมีรายละเอียดในเนื้อหาต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.1 ความสำคัญของระบบจุดชนวนในอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่

ในปัจจุบันเริ่มมีแนวคิดนำระบบขบวนทั้งในส่วนอิเล็กทรอนิกส์และส่วนของเครื่องกลมาประยุกต์ใช้กับยุทธโศภรณ์ทางทหารต่าง ๆ เช่น นำไปใช้กับโดรนติดอาวุธหรือการโจมตีด้วยอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งสามารถทำได้โดยการบรรจุวัตถุอันตรายเพื่อนำไปทิ้งในตำแหน่งที่ต้องการหรือจุดระเบิดในตำแหน่งที่ต้องการ เพื่อให้เกิดการบาดเจ็บหรือทำลายสิ่งก่อสร้าง อาจรวมถึงการบรรจุวัตถุระเบิดแล้วจุดชนวนกลางอากาศอีกด้วย ยังมีการนำระบบจุดชนวนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้กระสุนที่จุดชนวนกลางอากาศ ทำให้สารเคมีหรือรังสีและชีวภาพแพร่กระจาย การวางระเบิดในถ้ำโดยใช้หุ่นยนต์เป็นตัวนำวัตถุระเบิดไปวางและจุดระเบิดด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้การกำหนดเวลาให้ระเบิดหรือมีการศึกษาการจุดชนวนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำมาใช้กับเรือดำน้ำไร้คนขับที่สามารถติดวัตถุระเบิดเพื่อไปโจมตีเป้าหมาย เป็นต้น จากแนวคิดดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาระบบจุดชนวนให้มีความทันสมัยรองรับเทคโนโลยีในอนาคตควบคู่ไปกับการความต้องการทางเทคนิค เพื่อให้มีความมั่นใจในระดับสูงว่าในการออกแบบระบบจุดชนวนมีความปลอดภัยในทุกขั้นตอนของการพัฒนา เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดลงให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการใด ๆ กับระบบจุดชนวนด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ยังคงมีความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาเช่นกัน

ในประวัติศาสตร์ยุคแรกของการบินระบบขบวนไร้คนขับ ความแตกต่างระหว่างโดรนและขีปนาวุธนำวิถี

ไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจน จนในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 Kettering Bug ซึ่งเป็นหนึ่งในโดรนรุ่นแรก ๆ ที่ออกแบบมาให้ทำการระเบิดด้วยการพุ่งชนเป้าหมายเหมือนจรวด เพื่อสนับสนุนช่วยเหลือการรบและโจมตีอากาศยาน ซึ่งได้มีการนิยามระบบนี้ว่า “โดรน” (Drone) แต่ปัจจุบันได้ถูกเรียกขึ้นมาใหม่ว่า Loitering Munitions ซึ่งระบบที่เรียกขึ้นมาใหม่นี้ทำให้เกิดความสับสนระหว่าง โดรน และ จรวดนำวิถี หรืออาจจะถูกเรียกว่าโดรนกามิกาเซ่ (Kamikaze Drone) ในบางสถานที่ [1]

Loitering Munitions เป็นระบบอากาศยานไร้คนขับประเภทหนึ่งที่ถูกออกแบบมาเพื่อโจมตีเป้าหมายภาคพื้นดินที่อยู่นอกขอบเขตนอกสายตาด้วยหัวรบระเบิด ซึ่งระบบอากาศยานดังกล่าว จะสามารถพาดเคลื่อนย้ายได้สะดวกและมาพร้อมกับจำนวนที่ค่อนข้างมาก ที่มีไว้สำหรับใช้งานในหน่วยภาคพื้นดิน เช่น ทหารราบที่มีอาวุธนำวิถีที่แม่นยำ ซึ่งมาพร้อมกับกล่องอิเล็กทรอนิกส์และอินฟราเรดความละเอียดสูง ช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งเป้าหมาย การสำรวจ และนำทางอากาศยานไร้คนขับไปยังเป้าหมายได้ การกำหนดลักษณะเฉพาะของอาวุธยุทธโศภรณ์คือ ความสามารถในการ Loitering ในอากาศเป็นระยะเวลานานก่อนจะโจมตี โดยใช้เวลาในการตัดสินใจว่าจะโจมตีเป้าหมายเมื่อใดและอย่างไร [2]

ในส่วนของระบบอาวุธที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับจะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ ดังนี้ ระบบค้นหาเป้าหมาย (Seeker) ระบบขบวน (Fuze) ระบบหัวรบ (Warhead) เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบมีความสำคัญและมีรูปแบบการใช้งาน หรือรูปแบบการทำงานที่แตกต่างกันออกไป แต่ทุกส่วนมีระบบการทำงานร่วมกันเพื่อให้สามารถทำลายเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ [3] ซึ่งระบบอากาศยานไร้คนขับประเภทโจมตีเป้าหมายโดยใช้วิธีการทำลายเป้าหมายไปพร้อมกับตัวอากาศยานจะเรียกว่า โดรนกามิกาเซ่ หรือ อากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งคำว่า กามิกาเซ่ หรือ คามิกาเซะ นั้นถูกนำมาใช้เรียกอากาศยานพลีชีพของประเทศญี่ปุ่น

ในสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งได้ทำภารกิจโดยการบรรทุกวัตถุระเบิดและพุ่งเข้าชนเรือรบ ลักษณะการใช้งานของระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่นั้น ตัวระบบจะถูกกำหนดเป้าหมายเบื้องต้นไว้อย่างชัดเจนหรือให้ระบบประมวลผลบนตัวลำทำการค้นหาเป้าหมายอย่างอิสระ

อากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่จะสามารถทำลายเป้าหมายที่กำหนดไว้ ด้วยการพุ่งเข้าใส่เป้าหมายเพื่อเป็นกระสุนนำทางหรือทำลายเป้าหมาย ความสำเร็จในการโจมตีเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับหัวรบและชนวนที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่เป็นหลัก ดังนั้น รูปแบบการใช้งานระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่จะขึ้นอยู่กับระบบหัวรบและเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ ส่วนผลการทำลายของหัวรบนั้น จะขึ้นอยู่กับประเภทและวัตถุระเบิดเป็นหลัก เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการพิสูจน์คุณลักษณะของชนวนหัวรบ จึงได้ทำการแบ่งชนวนหัวรบออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ ส่วนประกอบ การนำไปใช้ทางเทคนิค ซึ่งต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดด้านมาตรฐานความปลอดภัยและลักษณะทางกายภาพ ดังนั้น ควรมีการนำมาตรฐานต่าง ๆ รวมถึงความปลอดภัยสำหรับการประเมินหัวรบและชนวนหัวรบ ซึ่งในการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถทำการพิสูจน์ให้เห็นถึงความต้านทานต่อปัจจัยทางภูมิอากาศและการทำงานทางกายภาพเป็นหลัก ส่วนในปัจจุบันประเด็นปัญหาในการวิจัยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบเป็นชนวนหัวรบ คือ การกำหนดเงื่อนไขอายุการทำงานของอุปกรณ์และประสิทธิภาพ เพื่อนำมาใช้บนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่ปลอดภัยในระยะเวลาที่ยาวนานสูงสุด เป็นต้น [4] - [9]

ระบบชนวนหัวรบของอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการสร้างระดับความเสียหายต่อเป้าหมายและควรได้รับการพัฒนาและทดสอบภายใต้ข้อกำหนดที่เข้มงวด ดังนั้น คุณลักษณะของระบบชนวนหัวรบที่เชื่อถือได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้จากการออกแบบ

การตรวจสอบ (รวมถึงการทดสอบระยะการยิง) จะสามารถกำหนดประสิทธิภาพของระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ในการนำมาใช้งานเพื่อปฏิบัติการในภารกิจต่าง ๆ ได้

1.2 ประวัติและวิวัฒนาการของระบบจุดชนวนแบบอิเล็กทรอนิกส์

ระบบชนวน (Fuze) เป็นระบบทางกายภาพ ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้ตอบสนองกับเป้าหมายหรือเงื่อนไขต่าง ๆ อีกทั้งยังใช้เป็นตัวเริ่มจุดวัตถุระเบิดหรือสารเคมีที่บรรจุอยู่ภายในหัวรบภายใต้เงื่อนไขของการจุดระเบิด โดยปกติชนวนจะประกอบด้วยกลไกทางกล กลไกทางไฟฟ้า หรือกลไกทางกลทำงานร่วมกับกลไกทางไฟฟ้า และในชนวนหัวยังมีระบบกลไก Safety and Arming Device (SAD, S&A) ที่ช่วยป้องกันการเริ่มทำงานหรือการเริ่มจุดชนวนวัตถุระเบิด (Explosive Train) ก่อนเวลาอันควรอีกด้วย ซึ่งชนวนนี้จะถูกนำไปใส่ในหัวรบโดยถ้าใส่ในตำแหน่งด้านหน้าของหัวรบจะเรียกว่า ชนวนหัวหรือชนวนหัวรบ แต่ถ้าใส่ในด้านหลังจะเรียกว่า ชนวนท้ายหรือชนวนท้าย เป็นต้น

ระบบกลไกการทำงานของระบบชนวนหัวรบ จะมีหน้าที่สำคัญได้แก่ “SAFE”, “ARM” และทำให้เกิดการปะทุหรือระเบิดของอาวุธยุทธโธปกรณ์ (เช่น จรวด ฟันระเบิด กระสุนระเบิดไม่นาวีถิขนาด 20 มม. ถึง 406 มม. และชิ้นส่วนย่อยในระบบอาวุธยุทธโธปกรณ์ เป็นต้น) ในระยะแรกของระบบชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ ถูกออกแบบมาในขนาด 5 นิ้ว สำหรับการใช้นิงานของกองทัพเรือในการป้องกันภัยและขีปนาวุธทางอากาศจนเมื่อสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการพัฒนานำกระบวนการ Continuous Wave Doppler Radar ในการสร้างการเกิดปะทุของวัตถุระเบิดหรือขีปนาวุธเมื่อระบบอาวุธได้เคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายเครื่องบินรบ และในการนำไปประยุกต์ใช้งานพบว่าได้มีการนำไปใช้ในจรวดจุดชนวนระบบอาวุธประเภทหัวรบนิวเคลียร์อีกด้วย โดยในปัจจุบันจะพบว่า จรวด และระเบิดจำนวนมาก นำระบบชนวนหัวรบแบบประเภทอิเล็กทรอนิกส์

ในประเภทที่มีความซับซ้อนของระบบแตกต่างกันออกไปมาใช้ ทำให้เกิดการพัฒนาระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ไปอย่างมากในหน่วยงานทหารของสหรัฐอเมริกา (U.S. Army Application) [6] จนกระทั่งไม่นานมานี้ในการพัฒนาระบบวิถีโค้งขนาดใหญ่ได้นำขบวนหัวรบแบบทางกลไปเข้าโปรแกรม The Army's M-762 และถูกเปลี่ยนเป็นขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ ในขั้นต้นของการออกแบบระบบขบวนหัวรบและความปลอดภัยจะทำการออกแบบภายใต้เอกสารมาตรฐานทางทหาร MIL-STD-1316 ซึ่งจะเป็มาตรฐานสำคัญที่จะสามารถสรุปได้ว่าขบวนหัวรบดังกล่าวมีความปลอดภัยจากการออกแบบและนำไปใช้งานในหัวขัอทฤษฎีที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบความปลอดภัยของขบวนหัวรบจะต้องมีอย่างน้อย 2 ระบบที่ทำงานในด้านระบบกลไกที่ถูกออกแบบให้แยกทำงานอย่างอิสระหรือกระบวนการประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะของขบวนหัวรบเป็น "Arming" เพื่อที่จะทำให้เกิดการประทุของการระเบิดทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการโจมตีเป้าหมายได้อย่างสมบูรณ์ [10] – [12]

ระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นกลไกของการ Safety และ Arming แบบใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ซึ่งในยุคแรกจะใช้วงจรแอนะล็อก โดยใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (R, L, C) มาต่อเชื่อมกันเพื่อความรวดเร็วในการประมวลผลของสัญญาณนาฬิกา ต่อมาเริ่มมีการนำอุปกรณ์จำพวกลอจิกเกต (Logic Gate) เข้ามาใช้ในการพัฒนาระบบขบวนหัวรบมากขึ้นจากนั้นพัฒนาต่อยอดเป็นชิปไอซี (Integrated Circuit) ในปัจจุบันมีการนำชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เข้ามาช่วยประมวลผลคำสั่งและลดความซับซ้อนของวงจรทางไฟฟ้า ทำให้วงจรไฟฟ้ามีขนาดเล็กลง อีกทั้งยังสั่งการและรับข้อมูลจากเซนเซอร์ เพื่อนำค่าข้อมูลที่วัดค่าได้มาเป็นเงื่อนไขในการทำงานได้อีกด้วย โดยในปัจจุบันพบว่า จรวดอากาศยานไร้คนขับ กระสุนปืนและระเบิดจำนวนมาก

ที่มีการนำระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อนของระบบที่แตกต่างกันนำมาใช้งานได้ เกิดการพัฒนาระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ไปอย่างมาก

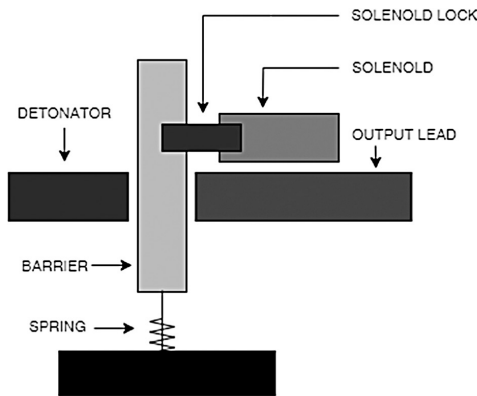
2. หลักการทำงานของระบบขบวนแบบอิเล็กทรอนิกส์

2.1 องค์ประกอบหลักของระบบขบวน

ส่วนประกอบหลักของระบบขบวนหัวรบสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ ระบบ Safe and Arm ระบบ Energy Storage ระบบ Event Sensing และระบบ Detonator ซึ่งทุกส่วนประกอบอยู่ในขบวนหัวรบโดยมีรายละเอียดดังนี้ [13] – [15]

2.1.1 ระบบ Safety and Arming

ระบบ Safety and Arming (S&A) ของขบวนหัวรบจะเป็นส่วนประกอบหลักในการออกแบบหัวรบและการทำงานของหัวรบให้เกิดการจุดระเบิดให้เสร็จสมบูรณ์โดยการออกแบบระบบกลไก S&A นี้จะใช้หลักมาตรฐานความปลอดภัยทางทหาร MIL-STD 1316 [12] เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ โดยได้กำหนดให้กลไก S&A จะต้องมึกลไกการทำงานอย่างน้อย 2 ชุดที่ทำงานเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งอาจจะเป็กลไกทางกลทำงานร่วมกันทั้ง 2 ชุด กลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ทำงานร่วมกันทั้ง 2 ชุด หรือกลไกทางกลทำงานร่วมกับกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ก็ได้ แต่ในการออกแบบและนำไปใช้งานจะต้องมั่นใจว่าระบบกลไก S&A นี้มีความปลอดภัยในการใช้งานตามคำสั่งที่แม่นยำและจะไม่ทำงานเองก่อนเวลาอันควร ในส่วนของหลักการการทำงานระบบกลไก S&A นั้นอธิบายได้ว่า ในกรณีที่ขบวนหัวรบอยู่ในสถานะ Safed อาจทำหน้าที่เป็นตัวจุดขบวน หรือเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับขบวนวัตถุระเบิดของขบวนหัวรบ หากมีการจุดขบวนในขณะดังกล่าว คลื่นแรงดันหรือแรงกระแทกจะไม่สามารถส่งต่อกลไกถัดไปให้ทำงานได้ซึ่งจะกล่าวได้ว่าระบบ Safed อย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 1 เป็นการทำงานแบบขัดจังหวะของตัวจุดขบวน จะทำการป้องกันไม่ให้แรงดันจากการจุดระเบิดส่งไปยังวัตถุระเบิดหลัก ซึ่งถูกเรียกว่า Interrupted

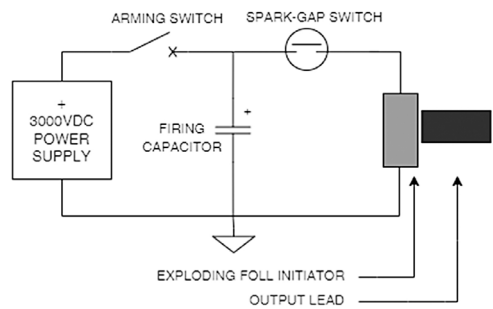


รูปที่ 1 ตัวอย่างการทำงานของวงจร S&A ของการทำงาน วงจรชนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Interrupted Explosive Train [13]

Explosive Train ซึ่งเป็นระบบกลไก S&A ในส่วนแรก และทำงานอย่างอิสระ ในการทำงานของส่วนที่สอง จะเป็นการให้พลังงานไปยังส่วนตัวจุดชนวนด้วยระบบ อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเรียกว่า Micro Detonators จะทำการ ปลดปล่อยพลังงานขนาด Milli-Joules ไปยังตัวจุดชนวน ดังรูปที่ 2 ใช้ระบบไฟฟ้าในการจุดชนวนอาวุธ จะเห็น ได้ว่าวงจรจะมีการต่อเข้าด้วยกันทั้งหมด เมื่อมีการ เปลี่ยนสถานะของสวิตช์และมีการแสไฟฟ้าต้นทาง ระบบไฟฟ้าจะวิ่งต่อไปยังระบบอาวุธโดยอัตโนมัติ ซึ่งเรียกว่า Non-Interrupted Explosive Train เนื่องจากจะไม่มีส่วนใด ทำการเคลื่อนที่นอกจากกระแสไฟฟ้าที่ทำการวิ่งไป ยังตัวจุดชนวนเท่านั้น โดยทั้งสองระบบได้ทำหน้าที่ เหมือนกันคือส่งพลังงานไปยังตัวจุดชนวนอาวุธ เป็นต้น

2.1.2 ระบบ Energy Storage

ระบบชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ มีการออกแบบให้ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน ให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้ และยังสามารถ เก็บพลังงานไว้ในระยะเวลาที่นาน ทั้งนี้ ได้มีการพัฒนา ระบบแหล่งจ่ายพลังงานให้สามารถจัดเก็บให้ยาวนาน ขึ้นมากกว่า 20 ปี โดยแบตเตอรี่จำนวนมากในอดีต จะนิยมใช้สารเคมีอิเล็กโทรไลต์เหลวเก็บไว้ในหลอด บรรจุชนิดแก้ว ซึ่งระบบชนวนหัวรบที่ได้ถูกยิงออกไป ในระบบปืนจะสร้างความแรงทำให้แก้วแตก ทำให้ แบตเตอรี่ได้ทำปฏิกิริยาเคมีในการเติมพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2 ตัวอย่างการทำงานของวงจร S&A ของการทำงาน วงจรชนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Non-Interrupted Explosive Train [13]

ในระบบ ส่วนในระบบหุ่นระเบิดและวัตถุระเบิดขนาดเล็ก จะใช้การทำลายตัวแก้วแทน ในระเบิดหรือจรวด จะใช้โครงสร้างพลังงานในการกำเนิดกระแสไฟฟ้าในบางระบบ จะนำความร้อนจาก Pyrotechnic Charge มาใช้งาน โดยใช้ Thermoelectric ในการสร้างพลังงาน แล้วนำ เก็บในตัวเก็บประจุ ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปใช้ในการ จุดชนวนอาวุธในภายหลัง ซึ่งอาจจะผ่านกลไกทางกล หรือ อุปกรณ์สวิตช์ประเภทสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในชนวน อาวุธเกือบทั้งหมดจะมีการจัดสรรพลังงาน เพื่อใช้ในการจุดตัวชนวนตัวเอง

2.1.3 ระบบ Event Sensing

ระบบ Event Sensing หรือระบบตรวจจับ เป้าหมาย โดยการใช้เซนเซอร์ในการหาจุดที่เหมาะสม สำหรับการจุดตัวของระบบจุดชนวนให้ทำงานอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะสามารถกำหนดให้ทำงานก่อนถึงเป้าหมาย หรือทำงานเมื่อกระทบเป้าหมาย หรือทำงานหลังจาก กระทบเป้าหมายเมื่อเวลาผ่านไปตามระยะเวลาที่ได้ กำหนดไว้จากระบบชนวนอาวุธ โดยระบบเซนเซอร์จะ ทำงานแบบเรียบง่าย เช่น การใช้สวิตช์แบบตกกระทบ เป้าหมาย เมื่อเกิดการกระทบเป้าหมายแล้วจะทำการ ปิดระบบนำทางให้กระแสไหลผ่านไปยังตัวจุดชนวนได้ โดยระบบต่าง ๆ ในรูปแบบอื่นยังพบเห็นการใช้ระบบกล้อง ถ่ายภาพ ระบบกล้องอินฟราเรด(IR) ผ่านระบบอัตโนมัติ DSP (Digital Signal Processing) ระบบคลื่นเรดาร์ FM-CW ซึ่งนำมาประยุกต์และประมวลผลทำให้ระบบชนวน

หัวรบมีความหลากหลายในการนำไปใช้งานที่มากขึ้น

2.1.4 ระบบ Detonator

ระบบ Detonator หรือระบบสำหรับจุดชนวนระเบิด ในสมัยก่อนจะใช้วัตถุระเบิดชนิด Trinitrotoluene หรือ TNT เป็นตัวจุดระเบิด แต่เนื่องจากประสบปัญหาสารประกอบ Nitroglycerin ใน TNT เกิดการไหลมารวมตัวเกาะกันเป็นแท่ง ซึ่งมักจะเกิดเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยอาจจะนำไปสู่การจุดตัวโดยไม่ตั้งใจจากการสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยได้ ดังนั้น ระบบอาวุธสมัยใหม่จะใช้ระบบจุดชนวนที่ใช้วัตถุระเบิดที่มีความเสถียร เช่น C-4 เป็นต้น วัตถุระเบิดเหล่านี้จะถูกจุดโดยใช้สารเคมีที่มีพลังงานในการสร้างมากกว่า 105 PSI ขึ้นไปเพื่อทำให้เกิดการระเบิดขึ้น ในการออกแบบระบบจุดชนวนจะใช้การขยายพลังระเบิดจากจำนวนน้อยสู่การระเบิดที่ทรงพลัง

2.2 การทำงานของระบบชนวน

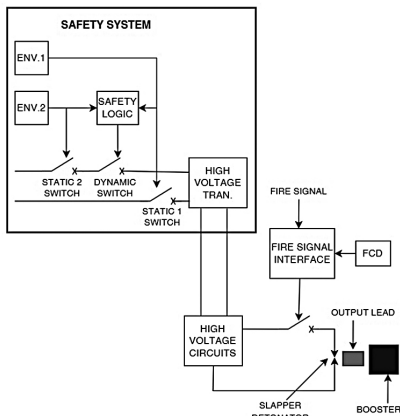
ระบบชนวนหัวรบจะเริ่มทำงานตั้งแต่ทำการปล่อยหรือยิงอาวุธออกไป และเมื่อระบบผ่านเงื่อนไขความปลอดภัยทั้งหมดตามที่ถูกออกแบบหรือติดตั้งไว้ ระบบจะทำการเปลี่ยนสถานะจาก Safety เป็น Arming ซึ่งเป็นสถานะพร้อมจุดชนวน เมื่อเกิดการกระทบเป้าหมายหรือรอบเวลาทำงานครบตามคำสั่งในการจุดตัวจะทำให้ระบบชนวนหัวรบทำการจุดระเบิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ดังนั้น การทำงานของชนวนอาวุธจะต้องไม่มีความซับซ้อนและทำงานได้อย่างถูกต้องและสมบูรณ์ ตามรูปที่ 3 ซึ่งอธิบายได้ว่า ในส่วนของระบบชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์จะมีอยู่ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วน Safety ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขการทำงานอย่างน้อย 2 กลไก (ENV.1, ENV.2) ในส่วนของกลไกนี้อาจจะใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มาเป็นตัวประมวลผลการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อการทำงานของกลไกถึงจุดที่กำหนดจะทำให้สวิตช์สับลง เพื่อเปิดกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านไปยังระบบถัดไป คือ High Voltage Transformer โดยทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าไปยังส่วนที่ 2 คือ ส่วน Arming สำหรับ

เตรียมการจุดชนวน ประกอบไปด้วยวงจร High Voltage Circuit จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปให้ส่วนต่าง ๆ ให้ทำงานครบวงจรสำหรับบรอดสถานะการจุดชนวน ทั้งนี้ อาจต้องมีระบบประมวลผลเพื่อใช้ในการคำนวณตั้งแต่ขั้นตอนการเริ่มไปจนถึงเป้าหมาย ระบบไฟฟ้าที่เพียงพอเพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ บนชุดชนวนอาวุธ และระบบการสื่อสารร่วมกับอุปกรณ์อื่น เนื่องจากระบบที่ใช้อาจเซนเซอร์ร่วมกับอุปกรณ์ชุดควบคุมและนำทางหรือแม้กระทั่งการรับค่าเงื่อนไขรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้ทราบว่าการทำงานจะถูกออกแบบเพื่อจุดประสงค์หลักคือการทำลายเป้าหมาย แต่ระบบจะต้องมีการทำงานที่ปลอดภัยกับผู้ใช้งานร่วมด้วย [14] - [16]

2.3 ประเภทของสัญญาณจุดชนวน

ในการแยกประเภทของสัญญาณจุดชนวนแบ่งได้ตามลักษณะของชนวนได้ 4 ประเภท ดังนี้ ชนวนแบบเวลา (Time Fuze) ชนวนแบบตกกระทบ (Impact Fuze) ชนวนแบบหน่วงเวลา (Delay Fuze) และชนวนแบบระยะทาง (Proximity Fuze) [12] - [14] ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

1. ชนวนแบบเวลา (Time to ARM/Time to Detonate) อุปกรณ์ประเภทนี้จะใช้การตั้งเวลาในการเริ่มทำงานและตั้งเวลาในการระเบิดหลังจากเปลี่ยนสถานะเป็น Arming ระบบชนวนแบบเวลาจะถูกใช้ในระบบกระสุนและจรวด ตัวอย่างเช่น การนำชนวนแบบเวลา ไปใช้งานใน M762 ของกองทัพสหรัฐอเมริกา เป็นระยะเวลาเกือบ 10 ปีตั้งแต่มีการพัฒนามา ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็นวงจรสัญญาณนาฬิกา ข้อดีของชนวนแบบเวลาจะคำนวณเป็นระยะเวลาจากจุดเริ่มต้นขณะยิง เมื่อทำการยิงออกไประบบชนวนอาวุธจะเริ่มทำงานและนับเวลาไปจนกว่าจะถึงเวลาที่กำหนดไว้ ซึ่งทำให้ไม่ต้องสนใจว่าจะกระทบเป้าหมายหรือไม่ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้จากระยะเวลาในการเดินทางของอาวุธ ให้ทำงานได้ในจุดใดจุดหนึ่งตามที่ต้องการ ข้อเสียของชนวนแบบเวลาคือ ต้องการวงจรนับสัญญาณนาฬิกา หากสัญญาณนาฬิกาไม่ถูกต้อง



รูปที่ 3 ลักษณะรูปแบบการทำงานของระบบชนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์ [13]

จะทำให้เวลาในการเดินทางและจุดที่ระเบิดจะผิดเพี้ยนไป และหากกระทบเป้าหมายแล้วระบบชนวนยังไม่ถึงเวลาที่กำหนดไว้ อาจส่งผลให้ระเบิดทำงานอย่างไม่สมบูรณ์

2. ชนวนแบบตกรกระทบ (Time to ARM/ Impact to Detonate) อุปกรณ์ประเภทนี้จะทำการตั้งเวลาให้เริ่มทำงานและใช้การกระทบเป็นการจุดระเบิด ระบบชนวนประเภทนี้นิยมใช้ในระบบกระสุน ระเบิด จรวด และอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็น Piezoelectric Sensor ข้อดีของชนวนแบบตกรกระทบจะใช้ในการทำลายเป้าหมาย เช่น ยานพาหนะต่าง ๆ เสาสัญญาณ ซึ่งชนวนแบบตกรกระทบจะทำงานทันทีเมื่อสัมผัสกับเป้าหมาย และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย ข้อเสียของชนวนแบบตกรกระทบจะต้องมีการทำงานที่รวดเร็ว ซึ่งจะต้องทำงานทันที หรือมีประสิทธิภาพความเร็วสูงมากกว่ามิลลิวินาที

3. ชนวนแบบหน่วงเวลา ระบบชนวนประเภทนี้จะทำการตั้งเวลาตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นเพื่อให้เปลี่ยนสถานะเป็น Arming และเวลาที่ใช้ในการระเบิดหลังจากได้กระทบเป้าหมาย ซึ่งระบบดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในระบบกระสุน ระเบิด จรวด และอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็น Piezoelectric Sensor ร่วมกับวงจร

สัญญาณนาฬิกา ข้อดีของชนวนแบบหน่วงเวลา คือสามารถนำไปใช้ในการทำลายเป้าหมายที่อยู่ภายในอาคาร ยานพาหนะ สิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ซึ่งเมื่อระบบอาวุธกระทบเป้าหมายชนวนอาวุธจะทำงานและหน่วงเวลาในการทำงาน ซึ่งมีโอกาสที่จะสามารถทำลายเป้าหมายที่อยู่ภายใต้สถานที่ป้องกันได้ ข้อเสีย คือ ชนวนแบบหน่วงเวลาจะไม่ทำงานในการระเบิดทันที ซึ่งหากระบบมีความเสียหายจากชุดวงจรและระยะเวลาหน่วงไม่ทำงาน หรือเวลาหน่วงมากเกินไป อาจจะทำให้ระเบิดทำงานไม่สมบูรณ์

4. ชนวนแบบระยะทาง ระบบชนวนประเภทนี้จะทำการตั้งเวลาตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นเพื่อให้เปลี่ยนสถานะเป็น Arming และทำการระเบิดเมื่อเข้าใกล้เป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งระบบดังกล่าวจะถูกนำไปในระบบกระสุน ร็อกเก็ตและจรวด ซึ่งสัญญาณจุดชนวนที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะพบเป็นเรดาร์เซนเซอร์วัดความกดอากาศ เลเซอร์วัดระยะทางหรือกล้องถ่ายภาพ ข้อดีของชนวนแบบระยะทางจะทำงานก่อนถึงเป้าหมาย ซึ่งจะส่งผลให้สามารถทำลายเป้าหมายที่อยู่บนภาคพื้นหรือบนอากาศได้จำนวนมาก ซึ่งจะทำให้ระบบอาวุธกระจายตัวเป็นวงกว้างต่อเป้าหมายต่าง ๆ เช่น โรงกลั่นน้ำมัน โรงไฟฟ้า อาคาร บ้านเรือน ที่อยู่อาศัย เป็นต้น ข้อเสียของชนวนแบบระยะทางคือ จะต้องทำการบรรจุอุปกรณ์ตรวจวัดระยะเข้าไปร่วมกับระบบชนวนทำให้อุปกรณ์มีน้ำหนักและขนาดที่มากกว่าเดิมและระบบประมวลผลจะต้องทำงานอย่างรวดเร็วเพื่อให้ทันต่อการประมวลผล

3. การออกแบบและการพัฒนา

3.1 ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ

ในด้านความปลอดภัยการออกแบบจะอยู่ภายใต้มาตรฐานการออกแบบทางทหาร MIL-STD-1316 [12] นอกจากการออกแบบตามมาตรฐานดังกล่าวแล้วยังพบว่า เกณฑ์การออกแบบของระบบชนวนอาวุธยังแบ่งออกได้อีก 4 หัวข้อ โดยมีหัวข้อที่ต้องคำนึงถึงในด้านต่าง ๆ ดังนี้ ด้านงบประมาณและราคา (Cost) ด้านการเก็บรักษามากกว่า 20 ปี (Twenty Year Storage Life) ด้านการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอัตราการเร่ง

(Shock and Acceleration) และ ด้านขนาดและน้ำหนัก (Size and Weight) [17] - [18] ซึ่งในด้านต่าง ๆ เหล่านี้ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. ด้านงบประมาณและราคา

ในการออกแบบระบบขีปนาวุธถูกกำหนดด้วยปัจจัยหลากหลายประการ สิ่งที่ได้ชัดเจนที่สุดคือราคา จะต้องเหมาะสมเมื่อเทียบกับราคาของอาวุธที่นำไปใช้ในเป้าหมายเพื่อการต่อต้านศัตรูหรือมิใช่เพื่อการครอบครองในการผลิตระบบขีปนาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ แม้ว่าจะถูกจำกัดด้านราคา แต่ยังคงประสิทธิภาพทั้งความปลอดภัย ความแม่นยำ และความน่าเชื่อถือ

2. ด้านการเก็บรักษามากกว่า 20 ปี

เนื่องด้วยทางรัฐบาลมักจะนิยมซื้ออาวุธมาเก็บไว้จนกว่าจะมีความจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ ซึ่งอาวุธและยุทธโศปกรณ์ รวมถึงระบบขีปนาวุธต่าง ๆ จะต้องมีความเสถียรสูง โดยมีอายุการเก็บรักษาอย่างน้อย 20 ปี ในการใช้งานของระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ แม้ว่าจะถูกออกแบบและผลิตขึ้นในปัจจุบัน แต่อาจจะถูกใช้งานในการป้องกันหรือโจมตีเป้าหมายในอนาคต ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ระบบขีปนาวุธอิเล็กทรอนิกส์จะต้องมีความน่าเชื่อถือแม้ว่าจะถูกจัดเก็บมากกว่า 20 ปี

3. ด้านการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอัตราการเร่ง

การใช้งานระบบขีปนาวุธอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่ มักจะมีความหลากหลายในการใช้งาน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงขึ้นความสูงจากการทำการบินของอากาศยานไร้คนขับ และช่วงเวลาการนำทางเพื่อโจมตีเข้าสู่เป้าหมาย เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วของชั้นบรรยากาศที่อากาศยานทำการบินขึ้นไป โดยปกติบนภาคพื้นดินจะมีอุณหภูมิประมาณ 40°C แต่เมื่อทำการบินขึ้นไปอุณหภูมิจะลดลงเรื่อย ๆ อากาศบางประเภทอาจจะขึ้นไปจนติดลบในเวลาไม่ถึง 30 นาที ซึ่งแล้วแต่ความสูงของอากาศยานที่ทำการบิน แต่เมื่อต้องการ

โจมตีเป้าหมายทำให้ต้องลดระดับความสูงลงเพื่อพุ่งไปที่เป้าหมายทำให้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือเรียกว่า เพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจากการบินลดระดับ และยังมีความเร่งในการวิ่งเข้าสู่เป้าหมายเป็นต้น ดังนั้น การออกแบบดังกล่าวจะต้องรองรับรูปแบบการทำงานหรือการทำการบินที่มีความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเร่งของระบบอากาศยานอย่างรวดเร็วด้วย

4. ด้านขนาดและน้ำหนัก

การออกแบบการใช้งานขีปนาวุธอิเล็กทรอนิกส์บนระบบอากาศยานไร้คนขับจะถูกจำกัดทั้งขนาดและน้ำหนัก เนื่องจากพื้นที่บนอากาศยานไร้คนขับมีจำกัด ซึ่งต้องออกแบบทั้งขนาดและน้ำหนักให้มีความเหมาะสม รวมถึงตำแหน่งในการติดตั้งขีปนาวุธ เพราะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบังคับอากาศยานไร้คนขับ ยิ่งน้ำหนักรวมของอากาศยานเบาจะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการบินได้นานขึ้น เป็นต้น

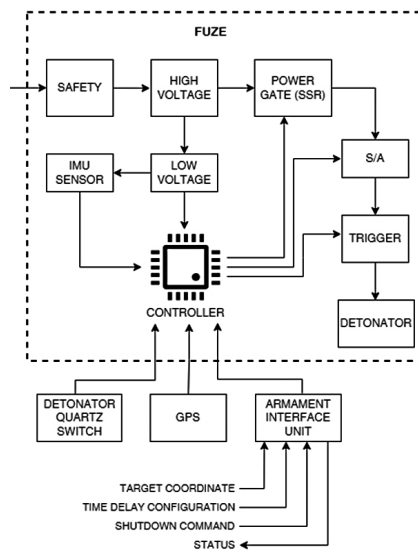
3.2 การทดสอบและการทดลอง

การทดสอบและทดลองของระบบขีปนาวุธจะมีความเกี่ยวข้องกับมาตรฐานที่สำคัญจำนวน 3 หัวข้อ ดังนี้ หัวข้อทดสอบ STANAG 4187 Edition 4 (Fuzing Systems - Safety Design Requirements) รวมถึง MIL-STD-1316E (Fuze Design, Safety Criteria For) หัวข้อทดสอบ STANAG 4497 (Hand-Emplaced Munitions (HEM), Principles for Safe Design) รวมถึง MIL-STD-1911A (Hand-Emplaced Ordnance Design, Safety Criteria For) และหัวข้อทดสอบ STANAG 4157 Edition 2 และ AOP-20 (Tests for the Safety Qualification of Fuzing Systems) รวมถึง MIL-STD-331C (Fuze and Fuze Components, Environmental and Performance Tests For) [19] ซึ่งแต่ละการทดสอบจะเป็นการบ่งบอกว่าระบบขีปนาวุธที่ได้รับการออกแบบมาจะสามารถทำงานได้อย่างมีความปลอดภัย

3.3 ระบบขีปนาวุธแบบนำวิถีใช้งานร่วมกับระบบอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเช่

การนำระบบขีปนาวุธไปใช้งานร่วมกับระบบอากาศยานไร้คนขับจะมีอยู่ใน 3 รูปแบบหลัก ได้แก่รูปแบบ

ติดบนอาวุธประเภทปล่อยจากอากาศยาน รูปแบบติดบนอาวุธประเภทยิงออกจากอากาศยาน และรูปแบบติดบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อพุ่งชนไปยังเป้าหมาย เป็นต้น สำหรับการออกแบบของระบบเพื่อการนำไปใช้งานแบบกามิกาเซ่ เมื่อทำการพิจารณาประเภทอากาศยานจะพบว่า มีอากาศยานจำนวน 2 ประเภท ได้แก่ อากาศยานประเภทหลายใบพัด (Multi-Rotor) และอากาศยานประเภทปีกนิ่ง (Fixed-Wing) เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักคือ การนำระบบอากาศยานพุ่งสู่เป้าหมายและทำลายตนเองพร้อมไปกับเป้าหมายไปด้วยกัน การพัฒนาระบบขบวนหัวรบจะถูกเลือกจากการใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะไม่เหมือนกับการใช้งานบนอาวุธประเภทกระสุน จรวด หรือขีปนาวุธ ที่จะมีแรงขับส่งให้อาวุธออกตัวด้วยความเร่งที่สูง ส่วนการออกตัวของอากาศยานไร้คนขับจะมีการออกตัวที่แตกต่างกันออกไป ส่วนการออกแบบโดยการใช้ขบวนหัวรบประเภทอิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างจะมีความน่าสนใจ เนื่องจากในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาติดตั้งบนระบบอากาศยานไร้คนขับค่อนข้างจะถูกจำกัดด้วยน้ำหนักและขนาด [20] ดังนั้น เพื่อการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานจะทำการเลือกใช้ระบบประมวลผลหลักเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ความเร็วสูง และในระบบขบวนหัวรบจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้ง IMU เพื่อวัดค่าความเร่ง วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า และวงจรการจุดระเบิด รวมถึงจะต้องทำการต่อร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกจำนวน 3 จุด ได้แก่ Impact Switch, GPS และ Target Information โดยการนำข้อมูลดังกล่าว มาทำให้ระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ดังการออกแบบระบบแสดงตามรูปที่ 4 ถูกออกแบบให้มีระบบประมวลผลกลางที่ทำการรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากระบบและสัญญาณจากภายนอก เช่น พิกัดตำแหน่งตัวเอง สัญญาณเป้าหมายและเซนเซอร์วัดแรงกระแทก เป็นต้น เพื่อเริ่มกระบวนการทำงานของขบวนอาวุธให้มีการทำงานที่ปลอดภัยและน่าเชื่อถือ ซึ่งสามารถสื่อสารกับระบบชุดควบคุมอาวุธ (Armament Interface Unit) ที่ใช้บนอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์และระบบการทำงานที่ถูกนำไปใช้บนระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับ

เพื่อสั่งการ ให้ระบบขบวนอาวุธเริ่มทำงานในช่วงเวลาที่คาดหวังไว้ และทำการจุดตัวเมื่อถึงเป้าหมาย โดยมีความแม่นยำและไม่ทำงานก่อนถึงระยะที่กำหนดไว้ รวมถึงความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายที่จะทำให้ระบบไม่เริ่มทำงานโดยไม่ตั้งใจ

4. แนวโน้มในอนาคต

4.1 การพัฒนาเทคโนโลยีจุดขบวนใหม่

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจสำหรับอุตสาหกรรมตลาดขบวนอาวุธพบว่า อุตสาหกรรมดังกล่าวจะมีอัตราส่วนการเติบโตขึ้นประมาณ 4% โดยคาดว่าตลาดอุตสาหกรรมจะมีมูลค่าประมาณ 1,290.78 ล้านเหรียญสหรัฐ (ประมาณสี่หมื่นห้าพันล้านบาท) ในปี 2031 [21] จะเห็นได้ว่า หากแบ่งตามลักษณะจะสามารถแบ่งออกได้เป็น ขบวนหัวรบกระสุนปืนครก ขบวนหัวรบกระสุนปืนใหญ่ ขบวนหัวรบจรวดและขีปนาวุธ และขบวนหัวรบอากาศยาน ซึ่งในการใช้งานนั้นระบบขบวนหัวรบกระสุนปืนครกจะเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากปืนครกมีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายได้เร็ว มีความแม่นยำสูง และตัวกระสุนมีความหลากหลายต่อการใช้งาน ทำให้วิเคราะห์ได้ว่า

การพัฒนาระบบขนวนหั่วรบจะขึ้นอยู่กับลักษณะอาวุธที่ถูกนำไปติดตั้ง ซึ่งปัจจุบันได้เริ่มนำไปติดตั้งบนโดรนหรือระบบอากาศยานไร้คนขับ โดยจะสามารถใช้ขนวนหั่วรบทั้งแบบทางกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะเป็นไปตามการนำไปใช้งานเพื่อทำลายเป้าหมายอย่างสมบูรณ์ ทั้งแบบการติดตั้งระบบอาวุธปล่อยหรือระบบที่ทำให้ตัวโครงสร้างทำลายไปพร้อมกัน ในการพัฒนาระบบจุดขนวนอาวุธจะมีการทำงานในระบบดิจิทัลมากขึ้น โดยการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาทำงานร่วมกัน ตัวอย่างเช่น ระบบนำทางด้วยพิกัดดาวเทียม (GPS) ระบบเซนเซอร์วัดตำแหน่งที่มีขนาดเล็ก (IMU, INS, AHRS) เป็นต้น เนื่องจากระบบขนวนหั่วรบต้องการความเสถียรภาพมากขึ้น ทำให้เกิดความต้องการระบบขนวนหั่วรบที่มีความน่าเชื่อถือที่สูงขึ้น และมูลค่าต้นทุนจากเทคโนโลยีขั้นสูงที่ลดลงจากการเข้าถึงที่ง่ายขึ้น ซึ่งอาจจะพบความสามารถของขนวนหั่วรบที่มีระยะเวลาเก็บของขนวนอาวุธที่ยาวนานมากกว่า 30 ปี รวมถึงมีขนาดที่เล็กลงและมีความน่าเชื่อถือ ความแม่นยำที่สูงขึ้น ตามเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไป

4.2 ผลกระทบต่อการพัฒนาอาวุธ

ในการพัฒนาได้นำระบบอิเล็กทรอนิกส์ไปใช้งานในระบบอาวุธมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งการที่ระบบขนวนหั่วรบเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์อาจจะถูกโจมตีจากเป้าหมายต่าง ๆ เช่น Electromagnetic Pulses (EMPs) เป็นการสร้างคลื่นสนามแม่เหล็กส่งไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีการหยุดการทำงานหรือทำงานผิดพลาดไป ซึ่งจะทำให้ระบบอาวุธนั้นไม่สามารถที่จะใช้งานได้และยังจะเป็นอันตรายต่อผู้ที่นำไปใช้อีกด้วย ซึ่งเมื่อมีการโจมตีจึงต้องมีการป้องกันที่สูงขึ้น ดังนั้น ผลกระทบต่อการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไปใช้ในระบบอาวุธอาจจะยังมีความเสี่ยง จึงต้องออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ให้มีวงจรป้องกันสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และทดสอบตามมาตรฐานทางไฟฟ้าต่าง ๆ ให้เพียงพอก่อนการนำไปใช้งาน เมื่อเริ่มนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้มากขึ้น จะพบว่า การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำอาจจะส่งผลต่อการซื้อและขายต่อในท้องตลาดมากขึ้น

หากไม่ได้เป็นประเทศที่สามารถผลิตชิป (Chip) ได้เอง อาจจะพบปัญหาในการหาอุปกรณ์เพื่อสร้างระบบอาวุธที่มีความแม่นยำสูงได้ โดยปัญหาดังกล่าวอาจจะย้อนมาถึงชนิดแร่บริสุทธิ์ที่ได้นำมาผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

4.3 การพัฒนาชุดวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์

การพัฒนาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันจะสามารถเลือกคุณภาพของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้จากหลากหลายบริษัท ซึ่งในการออกแบบจะเริ่มตั้งแต่การเลือกอุปกรณ์ ช่วงอุณหภูมิการทำงาน ค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ การทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก เป็นต้น ซึ่งระบบอิเล็กทรอนิกส์จะต้องทำการอ่านค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัด เช่น การวัดท่าทาง ความเร่ง และการตกกระทบเป้าหมายของระบบอาวุธ ตามอุปกรณ์ที่มีอยู่บนบอร์ดประมวลผล และสามารถทำงานตามการทำงานของโปรแกรมที่ถูกเขียนกำหนดไว้อย่างถูกต้อง โดยสามารถเก็บและนำมาทำงานได้ภายใต้ระยะเวลาที่มากกว่า 20 ปี ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องไม่ชำรุดหรือเสียหายเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน (ในการเก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นระยะเวลานานมักจะพบปัญหาของอุปกรณ์ตัวเก็บประจุชำรุดเสียหาย ส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด) ในการออกแบบชุดขนวนหั่วรบแบบอิเล็กทรอนิกส์จึงต้องทำการเลือกอุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้งานจริงได้เมื่อเวลาผ่านไปเป็นระยะเวลาที่นาน

ทั้งนี้ จากการศึกษาาระบบขนวนอาวุธแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวมานี้ นำมาสู่การออกแบบวงจรสำหรับขนวนหั่วรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตอบสนองการทำงานร่วมกับอากาศยานไร้คนขับแบบกามีกาเซ่ได้ โดยระบบจะสามารถทำการประมวลผลและตอบสนองต่อการนำไปใช้งานได้ ซึ่งในการพัฒนาดังกล่าวจะถูกออกแบบตามมาตรฐาน MIL-STD-1316 และต่อยอดโดยการนำไปทดสอบตามมาตรฐานของ MIL-STD-331 หากระบบมีการเขียนภาษาโปรแกรมเพื่อใช้ทำงานจะต้องนำโปรแกรมคำสั่งไปทำการทดสอบการทำงานเพื่อให้แน่ใจว่าคำสั่งโปรแกรมต่าง ๆ จะสามารถทำงาน

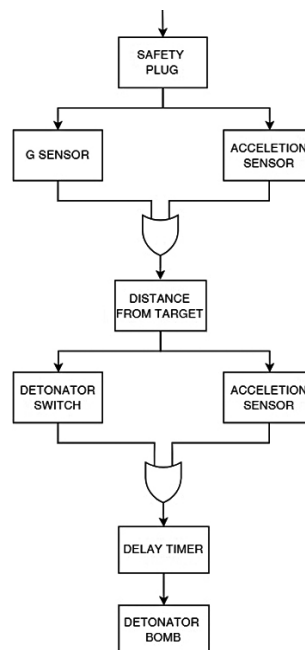
ได้อย่างถูกต้องโดยไม่มีข้อผิดพลาด ซึ่งกล่าวได้ว่าระบบชุดวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์จะมีส่วนของการออกแบบชิ้นงานและโปรแกรมควบคุมการทำงานที่ได้มาตรฐานสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

จากรูปที่ 5 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ โดยเริ่มต้นระบบจากการทำงานแบบ 2-Stage Arming โดยในช่วงแรกระบบจะทำการเช็คค่าความเร่งที่อากาศยานทำการ Take-off เมื่อเกินค่าพารามิเตอร์และระยะเวลาที่ได้กำหนดไว้ จะทำการปลดความปลอดภัยในส่วนแรก ต่อมาเมื่ออากาศยานได้เดินทางเข้าสู่เป้าหมายน้อยกว่าระยะที่ได้กำหนดไว้ระบบจะทำการปลดความปลอดภัยออกทั้งหมด ทำให้ขบวนอาวุธพร้อมทำงาน เมื่อระบบอาวุธกระทบเป้าหมาย จะทำการนับค่า Delay Time ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งหากไม่ได้ถูกกำหนดไว้หรือครบตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ระบบขบวนอาวุธจะทำการจุดตัวเริ่มทำงานโดยทันที

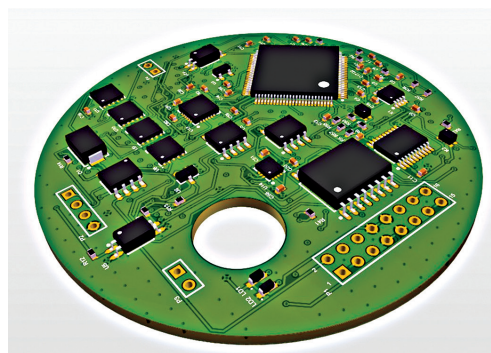
จากรูปที่ 4 การทำงานของระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ในกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประ) นักวิจัยได้ออกแบบแบบจำลองวงจรทางไฟฟ้า เป็นไปตามรูปที่ 6 ด้านบนของบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ และรูปที่ 7 ด้านล่างของบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ โดยบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. ซึ่งมีตัวประมวลผลหลักเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล STM32F4 และประกอบไปด้วยตัวเซนเซอร์วัดแรงเฉื่อยในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขการทำงาน รวมถึงกลไก Safety and Arming ที่อยู่ด้านล่างของบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ Solid Stage Relay เป็นตัวปลดขั้นตอนการทำงานแต่ละส่วน ทั้งนี้ในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นส่วนของความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตและทดสอบ เพื่อเป็นต้นแบบในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

5. บทสรุป

ระบบขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการออกแบบจากมาตรฐานความปลอดภัย MIL-STD-1316 จะสามารถนำไปใช้ในการติดตั้งร่วมกับอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของขบวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับแบบกามิกาเซ่ได้ออกแบบไว้

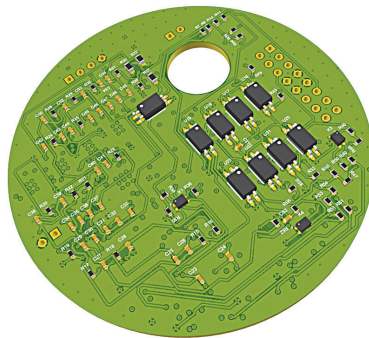


รูปที่ 6 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ (ด้านบน) โดยมีอุปกรณ์วัดค่าแรงเฉื่อยอยู่ตรงกลางบอร์ดทั้ง 2 ด้าน ในตำแหน่งเดียวกัน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการทำงานของระบบประมวลผลที่มีจุดหมุนและจุดเปรียบเทียบอ้างอิงที่จุดเดียวกัน โดยในการออกแบบจะคำนวณให้อุปกรณ์วัดค่าแรงเฉื่อยทั้งสองอยู่ที่ระยะทางที่เท่ากันบนบอร์ด เพื่อการทำงานแบบ Redundancy ซึ่งหากอัตราส่วนไม่เท่ากันจะทำให้ลักษณะการรับแรงจะไม่เท่ากัน และบนบอร์ดประมวลผลจะมีช่องให้สายไฟผ่านลงไปเชื่อมต่อยังระบบอื่น ๆ เพื่อให้ชุดบอร์ดไม่เป็นสิ่งกีดขวางรวมทั้งทำงานและสื่อสารได้ง่ายขึ้น

แบบกามีกาเซ่ได้ และหากมีการทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-331 จะสามารถระบุได้ว่า ระบบชนวนอาวุธดังกล่าวปลอดภัยเมื่อนำไปใช้งาน โดยนักวิจัยได้ทำการออกแบบภายใต้มาตรฐาน MIL-STD-1316 ซึ่งจะต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ข้อมูลของเป้าหมาย ตำแหน่งพิกัดทาง GPS และกระแสไฟฟ้า เป็นต้น จากอุปกรณ์ภายนอก โดยหากไม่ทำการศึกษาหรือนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ให้ระบบก็จะไม่สามารถ Arming ได้ ดังนั้น ระบบชนวนหัวรบทางอิเล็กทรอนิกส์จะไม่มีโอกาสหลุดตัวจากการทำงานของตัวอุปกรณ์เองโดยอัตโนมัติจากชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากไม่มีระบบไฟฟ้าในตัวและต้องการข้อมูลตำแหน่งตัวเองและเป้าหมาย ดังนั้น จะสามารถระบุได้ว่าระบบดังกล่าวปลอดภัยจากการทำงานเองโดยไม่ตั้งใจ โดยการทำงานของระบบชนวนหัวรบที่ทำการออกแบบมานั้นจะสามารถแปลงระบบชนวนหัวรบได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบชนวนหัวรบแบบตกกระทบและรูปแบบชนวนหัวรบแบบหน่วงเวลา โดยจะสามารถใช้ติดตั้งได้ทั้งข้างหน้าและข้างหลังของระบบหัวรบเพื่อนำไปใช้งานที่แตกต่างได้โดยการออกแบบระบบชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ในครั้งนี้มุ่งเน้นในรูปการทำงานของระบบชนวนหัวรบภายใต้ความปลอดภัยและศึกษาแนวทางในการพัฒนาบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัย

6. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

การออกแบบระบบชนวนหัวรบทางอิเล็กทรอนิกส์ในขั้นต้นเป็นการออกแบบในชุดควบคุม ซึ่งมีความซับซ้อนและต้องการออกแบบให้มีความปลอดภัยสูง ซึ่งปัจจุบันโปรแกรมในการออกแบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการออกแบบบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ จึงไม่อาจออกแบบบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ให้มีการป้องกันที่มีคุณภาพได้ในการออกแบบชุดชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์ยังจะต้องทำการออกแบบระบบให้ครบ ซึ่งจะต้องทำการเลือกระบบอุปกรณ์ทำงานต่าง ๆ มาประกอบรวมให้ครบระบบและน้ำหนักเบา ซึ่งอาจจะมีการออกแบบและใช้งบประมาณสำหรับการนำไปสร้างขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อนำไปประกอบผลิติดอกมาและมีการปรับเปลี่ยนวัสดุเพื่อ



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์บนบอร์โดอิเล็กทรอนิกส์ (ด้านล่าง) แสดงวงจร Safe and Arm ของชนวนหัวรบแบบอิเล็กทรอนิกส์

ให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะสมกับความปลอดภัย ขนาดเล็ก และมีน้ำหนักเบา เหมาะกับการนำไปใช้งานมากที่สุด เมื่อทำการทดสอบและขึ้นรูปชิ้นงานเสร็จสิ้นแล้ว ยังมีการใช้งบประมาณสำหรับการทดสอบ เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัยตามมาตรฐานทางทหาร MIL-STD-331

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Mori, "The Japanese Contribution to Violence in the World: The Kamikaze Attacks in World War II," *Int. forum Psychoanalysis*, vol. 28, no. 1, pp. 1-7, 2017. September 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/320071487>
- [2] M. Rutherford. "Kamikaze Drone Loiters Above, Waits for Target." CNET.com. <https://www.cnet.com/science/kamikaze-drone-loiters-above-waits-for-target/> (accessed Mar. 12, 2024).
- [3] K. A. Rigby., "Introduction to Weapons Integration," in *Aircraft Systems Integration of Air-Launched Weapons*, P. Belobaba, J. Cooper, R. Langton and A. Seabridge, Eds., NJ, USA: Wiley, 2013, pp. 6 - 15.
- [4] V. Boulanin and M. Verbruggen, "Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems," SIPRI, Solna, Sweden, 2017.
- [5] Z. Zhang, J. Li, Y. Yang, C. yang, and R. Mao, "Research on Speed Scheme for Precise

- Attack of Miniature Loitering Munition,” *Mathematical Problems Eng.*, vol. 2020, pp. 1 – 19, 2020, doi: 10.1155/2020/4963738.
- [6] S. E. Fowler, G. N. Hemmings, and J. V. McVay, “Self-Checking Arming and Firing Controller,” U.S. Patent 4,541,341, Sep. 17, 1985.
- [7] B. S. Davis, E. F. Bukowski, and W. P. D’Amico, “Electronic Safe and Arm Apparatus for Initiating a Pyrotechnic,” U.S. Patent 6,401,621 B1, Jun. 11, 2002.
- [8] T. B. Mellor, E. Brogmus, G. E. Dunn P. Willens, and M. L. Sedig, “Rocket Guidance Adapter” U.S. Patent 8,291,827 B2, Oct. 23, 2012.
- [9] V. Kumar and R. P. Gaikar, A. Ramchandani, N. Sharma, and P. Raut, “Electronic Time Fuze,” in *Int. Conf. Emerg. Trends Electron. & Commun. Eng. (ETECE-2015)*, Pune, Mahrastra, India, Apr. 2015, pp. 1 - 6.
- [10] E. M. Klotz, “The Fuze Industrial Base at Naval Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, California,” M.S. thesis, Nav. Postgraduate School, Monterey, CA, USA, 1992. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10945/23686>
- [11] *Engineering Design Handbook: Ammunition Series - Fuzes*, U.S. Army Materiel Command, Washington, D.C., 1969, pp 1 - 8.
- [12] *Fuze Design, Safety Criteria For*, MIL-STD-1316E, U.S. Department of Defense, Washington, D.C., USA, Jul. 2015.
- [13] S. E. Fowler, “Safety and Arming Device Design Principles,” Nav. Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, CA, USA, Rep. NAWCWD TP 8431, 1999.
- [14] F. Sauerlaender, “Design Methodology for Safe and Arm Devices,” Nav. Air Warfare Center Weapons Division, China Lake, CA, USA, Rep. NAWCWD TP 8504, 2001.
- [15] Naval Air System Command. *Description and Characteristics Airborne Bomb and Rocket Fuze Manual*. (2008). [Online]. Available: <https://info.publicintelligence.net/USNavyRocketBombFuzeManual.pdf>
- [16] M. Grujicic and W. C. Bell., “Smart-fuze Design and Development Based on Computational Analysis of Warhead/Urban-target Interactions,” *Res. Appl. Mech. Eng. (RAME)*, vol. 2, no. 1, pp. 1 – 10, Mar. 2013.
- [17] L. Jianping and W. Bing., “A Ground Monitor Designed for an Electronic Safety and Arming Fuze,” in *2007 8th Int. Conf. Electron. Meas. Instrum.*, 2007, pp. 4-402 - 4-405.
- [18] M. Dennis, B. Hanrahan, and C. Brackmann, “Electronic Fuzing,” Texas Instruments, Texas, USA, 1991. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/snoa217/snoa217.pdf>
- [19] *Fuze, Ignition Safety Devices and Other Related Components, Environmental and Performance Tests for*, MIL-STD-331D Department of Defense Test Method Standard, May 2017.
- [20] S. Singh, S. C. Ramu, P. Kumar, P. K. Reddy, and P. Chinni, “ORNITHOPTER - IoT Based Kamikaze Drone,” in *2023 IEEE 11th Region 10 Humanitarian Technol. Conf. (R10-HTC)*, Oct. 2023, p. 474.
- [21] Business Research Insights. “Electronic fuze market report overview.” BUSINESSRESEARCHINSIGHTS. com. <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/electronic-fuzes-market-101687> (accessed Jul. 14, 2024).