

mjr dr inż. Rafał BAZELA
dr inż. Piotr BRZOZOWSKI
ppłk dr inż. Mariusz MAGIER
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

BADANIA LABORATORYJNE LASEROWEGO ZAPALNIKA ZBLIŻENIOWEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych laserowego zapalnika zbliżeniowego do amunicji moździerzowej, który wykonano i przebadano w Zakładzie Uzbrojenia Artyleryjskiego w ramach realizacji projektu badawczego rozwojowego nr R00 0001 06.

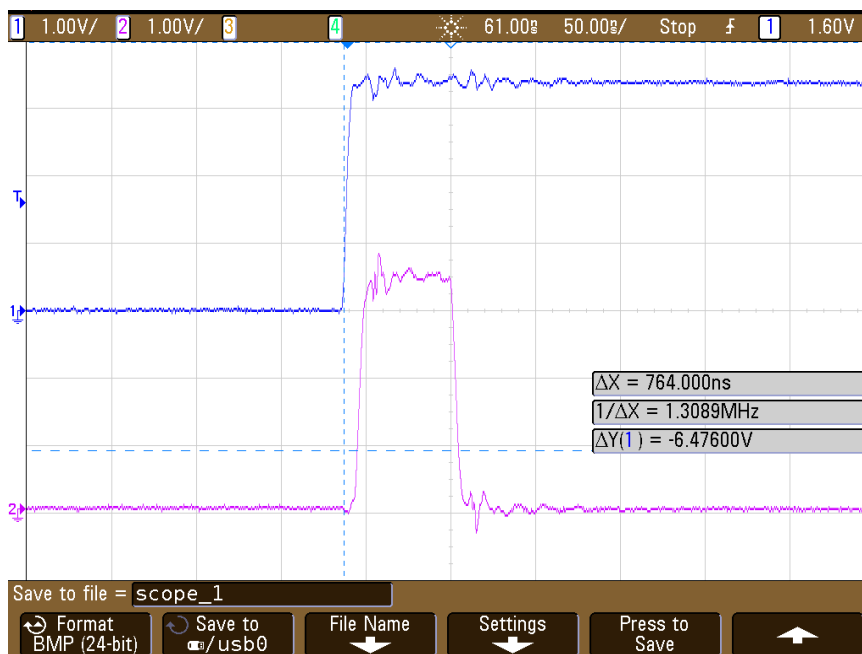
LABORATORY TESTS OF THE LASER PROXIMITY FUSES FOR MORTAR AMMUNITION

Abstract. In this paper we present the laboratory tests of the laser proximity fuze for mortar ammunition.

1. Badanie laboratoryjne bloku formowania krótkich impulsów dla sterownika lasera

Wykonanie zasadniczych elementów sensora zbliżeniowego uczyniło możliwym przeprowadzenie pierwszych testów. Badania laboratoryjne miały na celu sprawdzenie prawidłowości wykonanych układów oraz wystawienie pierwszych ocen co do poprawności zastosowanych rozwiązań i koncepcji.

Badania rozpoczęto od testowania bloku odpowiedzialnego za formowanie impulsu dla sterownika diody laserowej. Zadaniem tego bloku jest formowanie krótkich impulsów o ściśle zdefiniowanym czasie trwania. Impulsy są wytwarzane na polecenie mikrokontrolera. Prawidłowo działający blok powinien wytwarzać impulsy o długości niezależnej od czasu pobudzenia bloku przez mikrokontroler. Mikrokontroler nie jest w stanie wytwarzać bezpośrednio impulsów dla lasera samodzielnie. Celem przeprowadzenia testu wykonano następujące badanie laboratoryjne. Mikrokontroler został zmuszony do wystawienia na czas $1\mu\text{s}$ stanu wysokiego na wyprowadzeniu połączonym z blokiem formowania impulsów. Blok formowania został skonfigurowany do generacji impulsu o czasie trwania 50ns. Na oscyloskopie obserwowano sygnał wystawiony przez mikrokontroler oraz stan wyjścia bloku. Uzyskany wynik przedstawiono na rysunku 1 poniżej.



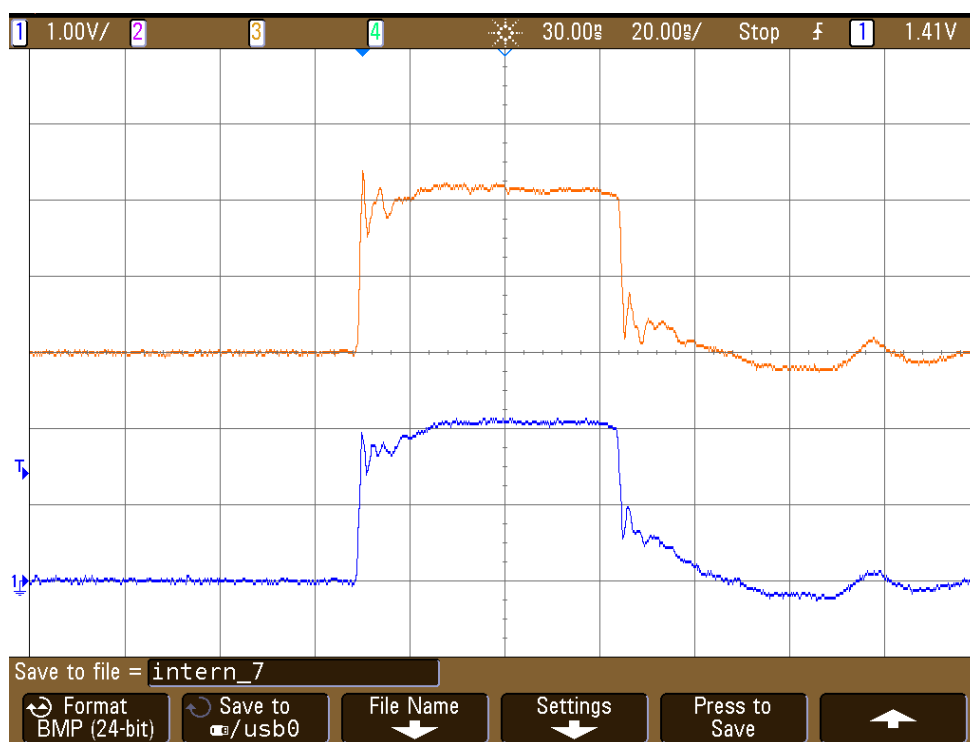
Rys. 1. Testowanie układu formującego impuls dla sterownika lasera.

Celem wykazania niewrażliwości bloku na temperaturę powtórzono to samo badanie w temperaturach od -30 do $+50^{\circ}\text{C}$. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że blok formowania impulsów spełnia swoje zadanie gdyż wytwarzane impulsy są powtarzalne a czas pobudzenia wejścia bloku przez mikrokontroler oraz temperatura otoczenia nie wpływają na uzyskiwane wyniki.

2. Badanie laboratoryjne sterownika diody laserowej

Sygnaly wytwarzane w bloku formowania impulsów przechodzą bezpośrednio do bloku sterownika diody laserowej. Zadaniem tego bloku jest dostarczenie w krótkim silnego impulsu prądowego do diody laserowej. Czas trwania pobudzenia prądowego określony jest wprost przez czas trwania impulsu dostarczonego z bloku formowania impulsu laserowego. Wymagania dla sterownika są znaczne, gdyż pożądanym jest, aby wytwarzany impuls laserowy możliwie dobrze odwzorowywał kształt i czas trwania impulsu sterującego. Ze względu na zastosowaną diodę laserową optymalnym byłoby otrzymanie impulsu o natężeniu do 4A i czasie trwania do 50ns . W trakcie prac wykonano kilka wariantów sterownika diody laserowej. Sterownik składa się z układu zasilania, kondensatorów, drivera oraz diody laserowej. Układ zasilania diody laserowej jest w istocie elementem podwajającym napięcie, którego zadaniem jest podwyższenie napięcia do 12V . Jest to niezbędne dla zapewnienia prawidłowego napięcia polaryzacji diody. Układ sterownika działa impulsowo, a wydajność źródła zasilania bloku jest mocno ograniczona stąd konieczność użycia zestawu kondensatorów o niskiej rezystancji szeregowej jako bezpośredniego źródła zasilania lasera. Kondensatory są ładowane pomiędzy kolejnymi pobudzeniami lasera. Wydajność prądowa podwajacza napięcia wynosi ok. 100mA . Kondensatory tworzą pojemność ok. $30\mu\text{F}$. Prawidłowy impuls laserowy wytwarzany jest o ile napięcie na kondensatorach nie spadnie poniżej $8\text{-}9\text{V}$, cykl pracy dalmierza nie przekroczy 2kHz oraz czas impulsu laserowego nie przekroczy 100ns . Wynika z tego, że minimalny czas ładowania kondensatorów między pomiarami powinien wynosić około $500\mu\text{s}$. Proste obliczenia szacunkowe pokazują, że wydajność prądowa (100mA) podwajacza napięcia jest wystarczająca dla naszych potrzeb.

Aby potwierdzić słuszność tej tezy wykonano badania pokazujące realne możliwości sterownika. Pierwsze badanie polegało na pobudzeniu diody laserowej w celu pomiaru parametrów impulsu laserowego. Badanie ograniczono do pomiarów elektrycznych tj. pomiarów prądu przepływającego przez diodę laserową. Nie rejestrowano wielkości optycznych z powodu braku odpowiedniego sprzętu do rejestracji. Pomiar prądu diody realizowano poprzez pomiar spadku napięcia na dwóch rezystorach (prąd pobierany jest z dwóch sekcji sterownika) połączonych szeregowo z diodą laserową. Rezystory miały takie same wartości rezystancji tj. 1Ohm każdy. Wyniki pomiarów przedstawiono na poniższym rysunku (rysunek 2Rys.). Zadaniem wykorzystanych rezystorów szeregowych jest ograniczanie maksymalnej wartości prądu przepływającego przez diodę laserową. Na wykresie pokazano wartości spadku napięcia na obu rezystorach. Wynik pokazuje, że wykonany sterownik zapewnia prawidłowe wysterowanie diody laserowej. Prąd przepływający przez diodę laserową ma bardzo strome zbocze narastające, a wartość maksymalna ustala się na zamierzonych 4A (2x2A), przy których laser osiąga optymalne natężenie impulsu świetlnego. Obserwowano duży wpływ długości przewodów połączeniowych na charakterystykę impulsu prądowego (patrz Rys. 3). Wykonano kilka dodatkowych pomiarów dla długich połączeń diody laserowej ze sterownikiem. Ograniczono się do rejestracji przebiegów z jednej sekcji sterownika. Obserwowane zjawisko wiąże się z istotnym wpływem indukcyjności doprowadzeń do diody laserowej. Nawet niewielka indukcyjność przewodu powoduje znaczący spadek napięcia na przewodach z racji bardzo stromego zbocza impulsu prądowego. Z tego powodu istotne jest aby długość połączenia przewodowego sterownika z laserem była ograniczona do niezbędnego minimum a grubość przewodów była możliwie duża.



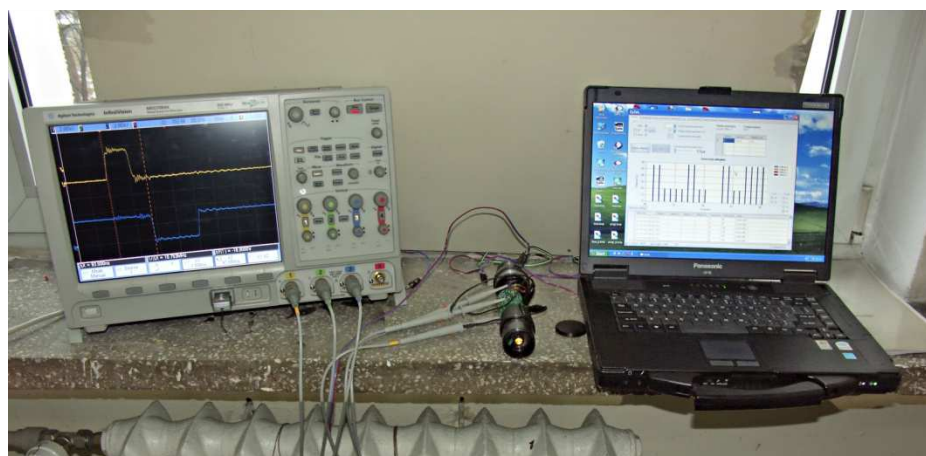
Rys. 2. Zarejestrowane przebiegi impulsów prądowych dostarczanych do diody laserowej.



Rys. 3. Wyniki rejestracji wpływu długości połączenia sterownika lasera z diodą laserową na kształt impulsu prądowego lasera (odpowiednio 1cm, 5cm, 20cm).

3. Pomiary odległości dalmierza

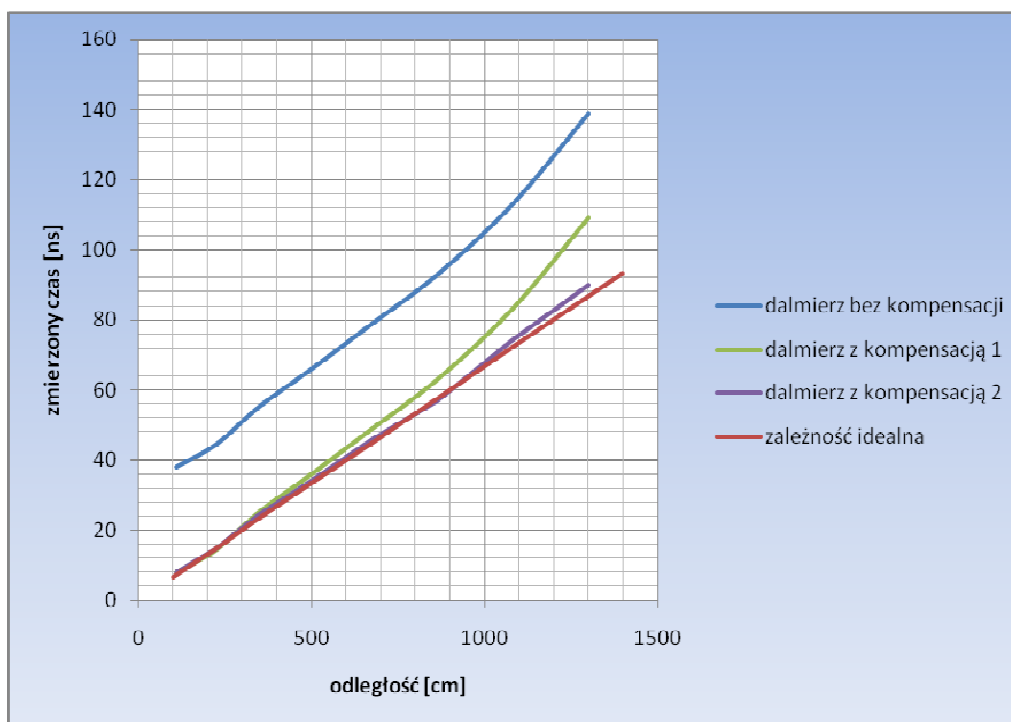
Wykonane moduły optyczne oraz płytki testowe dalmierza (a później również docelowe moduły elektroniki) pozwoliły na przeprowadzenie badań podstawowej funkcji dalmierza czyli pomiaru odległości. Jak już wspomniano wcześniej, pomiar odległości jest w istocie pomiarem czasu powrotu odbitego impulsu laserowego. Wykonano badania polegające na ustawianiu przeszkody w ściśle określonej odległości od dalmierza i rejestracji czasu mierzonego przez dalmierz. Stanowisko pomiarowe (patrz fotografia 1) składało się z modułu optyki połączonego z modułem elektroniki, oscyloskopu oraz komputera z autorskim oprogramowaniem do testów dalmierza. Wynikiem dalmierza jest czas między sygnałem trafiającym na sterownik diody laserowej a sygnałem wychodzącym z komparatora.



Fot. 1. Stanowisko pomiarowe do badań dalmierza laserowego.

Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4. Kolorem niebieskim oznaczono pierwsze pomiary czasu impulsów odbitych. Kolorem czerwonym oznaczono charakterystykę idealnego dalmierza laserowego. Widoczna na wykresie charakterystyka istotnie odbiega od idealnej. Najbardziej widoczne jest przesunięcie całego wykresu o czas ok. 30ns w stosunku do charakterystyki idealnej. Wartość przesunięcia jest w tym przypadku wynikiem istnienia skończonego czasu propagacji sygnału przez sterownik diody laserowej. Opóźnienie to jest praktycznie stałe i w niewielkim stopniu zależne od temperatury otoczenia. W celu jego skompensowania wprowadzono w oprogramowaniu dalmierza stałą poprawkę mierzonego czasu a następnie powtórzono badanie. Wyniki kolejnego testu (dalmierz z kompensacją 1) oznaczone są kolorem zielonym. Poprawka zmniejszyła istotnie błędy popełniane przez dalmierz, ale wciąż widoczna była nieliniowa zależność czasu od odległości. Widoczny jest wyraźny wzrost błędu pomiaru czasu wraz ze wzrastającą odległością. Przyczyną tego

zjawiska jest spadek mocy impulsu odbitego. Impuls ma coraz mniejszą amplitudę a jego zbocza tracą na stromości. Powoduje to, że komparator coraz później przełącza swój stan w odpowiedzi na impuls. Również w tym przypadku wykonano zabieg polegający na skompensowaniu pomiarów dalmierza poprzez wprowadzenie krzywej korekcyjnej do oprogramowania dalmierza. Kolejne pomiary wykonano już z obiema poprawkami. Wyniki tych pomiarów oznaczono na wykresie kolorem fioletowym (dalmierz z kompensacją 2). Błąd pomiaru odległości w całym mierzonym zakresie nie przekracza 0,3m Uzyskane rezultaty pokazują, że dalmierz spełnia swoje funkcje.



Rys. 4. Wyniki pomiarów czasu powrotu impulsu laserowego w funkcji odległości dalmierza od przeszkody. (opis w tekście).

4. Kalibracja modułu optycznego

Wzajemne dopasowanie przestrzenne optyki z elementami elektronicznymi nie może, niestety, być ustalone w całości na etapie projektowania. Mimo że można zapewnić na etapie produkcji utrzymanie bardzo wąskich tolerancji wykonania elementów mechanicznych jak i optycznych to sprawa wygląda zgoła inaczej w przypadku elementów elektronicznych. Tolerancja położenia struktury półprzewodnikowej lasera w obudowie elementu jest porównywalna lub czasem nawet przekracza rozmiar całej struktury. Nieznacznie lepiej wygląda sytuacja z fotodiodami lawinowymi. Wynikiem tego jest konieczność uzupełnienia konstrukcji mechanicznej modułu o elementy pozwalające na regulację położenia przestrzennego elementów elektronicznych. Wykonany w trakcie realizacji projektu moduł wyposażono więc w elementy regulacyjne. Regulacja położenia fotodiody możliwa jest w trzech wymiarach. Wkrętka, w której obsadzona jest fotodioda, zapewnia ruch diody wzdłuż osi optycznej. Regulację wkrętki wykonuje się za pomocą specjalnego klucza. Ruch w pozostałych dwóch wymiarach realizowany jest za pomocą trzech wkrętów. Po zakończeniu regulacji całość unieruchamiana jest za pomocą kołków.



Fot. 2. Urządzenie do testowania i regulacji modułu optycznego zapalnika laserowego.

Sam proces justowania optyki wykonany był ręcznie. Zestawiono do tego celu tymczasowe stanowisko. Stanowisko składało się z uchwytu do modułu optycznego, przeszkody umieszczonej w odległości 10m, oscyloskopu oraz urządzenia wykonanego na potrzeby justowania optyki (patrz fotografia 3). W skrzynce testera (fotografia 2) umieszczono układ zasilania, sterownik diody laserowej oraz układ zasilania fotodiody wraz z kompletnym analogowym torem wzmacniającym sygnał optyczny padający na fotodiode. Tester zapewniał ciągłą generację impulsów laserowych o częstotliwości regulowanej za pomocą potencjometru, a ponadto umożliwiał obserwację sygnału odbitego w postaci analogowej na wyjściu podłączanym bezpośrednio do oscyloskopu. Justowanie polegało na podłączeniu modułu optycznego do testera, a następnie takim ustawianiu elementów regulacyjnych w module (to jest trzech wkrętów regulacyjnych oraz wkrętki) aby amplituda sygnału odbitego rejestrowana na oscyloskopie była jak największa. W ten sposób zestrojono wszystkie wykonane moduły optyczne.



Fot. 3. Moduł optyczny podłączony do testera.

5. Badanie odporności zapalnika na narażenia mechaniczne.

Konstrukcja mechaniczna modułu optycznego spełnia kilka zadań. Najważniejszym z nich jest utrzymanie w odpowiedniej odległości elementów elektronicznych oraz optycznych. Równie ważną funkcją z racji zastosowania modułu jako elementu pocisku moździerzowego jest zabezpieczenie optyki i elementów optycznych przed działaniem dużych przeciążeń występujących w trakcie strzału.

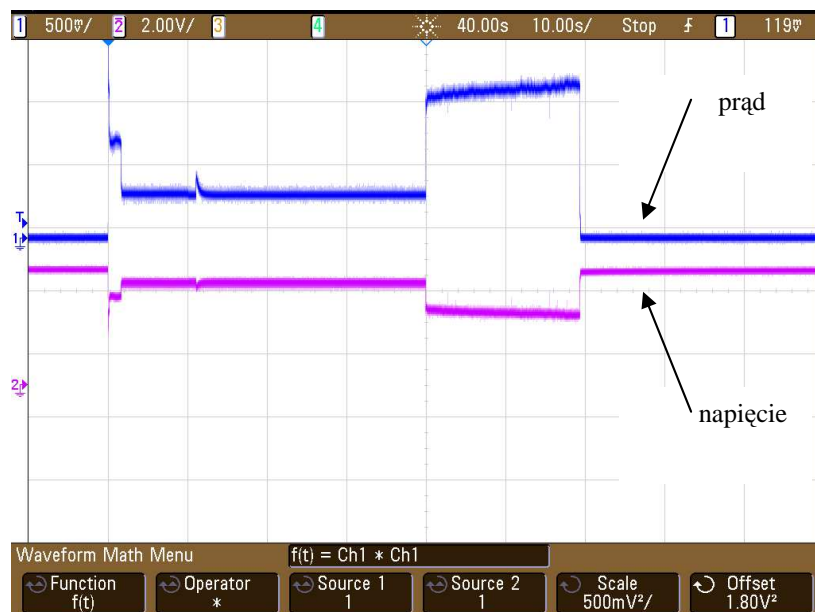
Wstępne badania odporności mechanicznej zapalnika na udary wykonano w warunkach laboratoryjnych. Do tego celu wykorzystano istniejące stanowisko w WITU (młot Masseta). Badania polegały na poddaniu krótkotrwałemu udarowi kompletnego zapalnika. Próby wykonano dla przeciążenia o wartościach 500g, 1000g, 2000g. Po każdym udarze oceniano sprawność funkcjonalną modułu na stanowisku testowym oraz oceniano, poprzez oględziny, stan mechaniczny zapalnika na okoliczność wystąpienia luzów, naruszenia połączeń przewodowych oraz pęknięć optyki. Po wykonanych badaniach nie wykryto zmiany w działaniu modułu elektroniki zapalnika ani nie zaobserwowano usterek mechanicznych (patrz fotografia 4). Wynik tych badań pozwoliły na uznanie konstrukcji mechanicznej modułu optycznego i modułu elektroniki za poprawne i zdadne do wykorzystania w modelu zapalnika zbliżeniowego.



Fot. 4. Zdjęcie laserowego zapalnika zbliżeniowego po laboratoryjnych testach odporności na udar (zapalnik ze zdjętą osłoną korpusu).

6. Pobór mocy przez laserowy zapalnik zbliżeniowy

W ramach badań laboratoryjnych wykonano badania poboru mocy kompletnego laserowego zapalnika zbliżeniowego. Badanie miało na celu: sprawdzenie zdolności baterii do samodzielnego zasilania zapalnika oraz rejestracja profilu czasowego poboru mocy przez zapalnik w pełnym cyklu pracy. Przez cykl pracy rozumiany jest tu czas od momentu wystrzału pocisku do jego detonacji. Do badań wykorzystano w pełni funkcjonalny zapalnik (przed zalaniem elektroniki masą samoutwardzalną). Zasilanie zapalnika pobierane było z baterii przewidzianej w projekcie. Napięcia było mierzone na wejściu zasilania modułu elektroniki natomiast pobór prądu był mierzony poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze wstawionym między baterię i moduł elektroniki. Rezystor szeregowy miał oporność o wartości 3.22 Ohma. Tak duża wartość rezystancji dość dobrze odpowiada stanowi baterii po dziesięcioletnim okresie jej składowania. Zapalnik zaprogramowano do odmierzenia zwłoki czasu załączenia dalmierza w wymiarze 30sek oraz czas pracy dalmierza 20sek. Celem ustawienia maksymalnego poboru mocy przez zapalnik ustawiono również maksymalne dopuszczalne napięcie polaryzacji fotodiody. Oba mierzone parametry (uśrednione napięcie na wejściu zapalnika oraz uśredniony spadek napięcia na rezystorze szeregowym - prąd) rejestrowano przy pomocy oscyloskopu. Wyniki badania przedstawiono na poniższym rysunku (rys. 5). Rejestracja rozpoczęła się w momencie pobudzenia sygnału startowego (odpowiednik wystrzału w warunkach polowych). Widoczny na początku przebiegu skok prądu jest związany z załączaniem obwodów wewnętrznych modułu elektroniki. W dalszej części przebiegu widoczne jest jego ustabilizowanie się, co spowodowane jest stałym poborem prądu przez zapalnik, który odmierza zadany czas oraz rejestruje dane z akcelerometru.



Rys. 5. Wyniki rejestracji prądu (kolor niebieski) i napięcia (kolor fioletowy) na baterii w trakcie pracy zapalnika laserowego.

Widoczny w trzeciej sekundzie skok prądu jest wynikiem włączenia przez zapalnik układu ładowania kondensatorów strzałowych. Kondensatory zostają naładowane do wymaganego napięcia 12V po około 200ms. Wraz z doładowywaniem kondensatorów, prąd spada do ustalonej poprzednio wartości. Po 30 sekundach zapalnik włącza zasilanie modułu dalmierza i rozpoczyna pomiary odległości. Widoczny jest gwałtowny skok poboru prądu spowodowany głównie przez uruchomienie przetwornicy 300V. Wartość pobieranego prądu zbliża się wtedy do wartości maksymalnej rzędu 300mA. Wraz z upływem czasu widoczny jest spadek napięcia na baterii związany z silnym procesem jej rozładowania oraz nagrzewaniem się przetwornicy wysokiego napięcia. Większy pobór prądu zmniejsza napięcie na baterii a to z kolei powoduje, że przetwornica starając się utrzymać napięcie 6V na wyjściu pobiera na wejściu coraz większy prąd z baterii. Efektem tego jest stały wzrost poboru prądu z baterii. Mimo wystąpienia tego efektu, bateria ma wystarczającą wydajność prądową i pojemność aby sprostać wymaganiom energetycznym wykonanego zapalnika. Co więcej, na tej samej sztuce baterii wykonano ponad 20 kolejnych takich pomiarów w odstępach trzyminutowych, a mimo to napięcie na baterii nie spadło poniżej dopuszczalnego poziomu. Badanie to powtórzono z sukcesem również w komorze klimatycznej w temperaturach -30°C i $+50^{\circ}\text{C}$. Potwierdziło to słuszność wyboru typu zastosowanej baterii. Przewidywany przez producenta dopuszczalny czas składowania baterii wynosi min. 10 lat przy spadku energii zgromadzonej w baterii do poziomu 80%. Oznacza to, że zapalnik wyposażony w baterię tego typu zachowa swoją funkcjonalność po dziesięcioletnim okresie magazynowania.

W kolejnej publikacji zostanie przedstawiony opis badań poligonowych modelu konstrukcji laserowego zapalnika zbliżeniowego.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2008-2010 jako projekt badawczy rozwojowy nr R00 0001 06.