

Krótkie porównanie wiodących w górnictwie odkrywkowym systemów inicjowania materiałów wybuchowych

The short comparison of the most popular explosive's initiation systems

Sebastian Prędko

ORICA Poland Sp. z o.o., ul. Kielbaśnicza 24, 50-110 Wrocław, Polska

Streszczenie: *Artykuł stanowi kontynuację – zapoczątkowanej w trakcie wcześniejszych konferencji IPOEX - problematyki inicjowania ładunków MW z użyciem nieelektrycznych oraz elektronicznych systemów inicjowania w warunkach kopalń odkrywkowych.*

Abstract: *This article is the continuation of the subject matter regarding non-electric and electronic initiation systems on quarries.*

Słowa kluczowe: *zapalniki nieelektryczne, zapalniki elektroniczne, porównanie systemów inicjowania MW*
Keywords: *non-electric detonators, electronic detonators, comparison of explosives initiation systems*

1. Wprowadzenie

Spośród wielu znanych sposobów urabiania złóż z wykorzystaniem materiałów wybuchowych (MW), to roboty strzałowe długimi otworami są podstawową metodą jednorazowego uzyskiwania urobku o żądanej ilości (objętości) mas skalnych oraz wymaganej granulacji (rozdrobnienu). Obecnie uznaje się, że najbardziej efektywnym z punktu widzenia technologii urabiania oraz konieczności ochrony przyległych obiektów jest odpalenie ładunków z określonym opóźnieniem względem siebie [1,2]. Metodę tę określa się mianem strzelania milisekundowego. Optymalne opóźnienie milisekundowe powinno mieć taką wartość, aby umożliwić wytworzenie wyraźnej, dodatkowej powierzchni odsłonięcia na skutek detonacji ładunku poprzedzającego. Detonacja ładunku poprzedzającego powoduje bowiem powstanie spękań w strefie urabiania, a ciśnienie gazów postrzałowych nadaje poszczególnym ziarnom skały odpowiednią energię kinetyczną, co skutkuje powstaniem tzw. stożka działania. Idea odpalania milisekundowego polega zatem na takim zaprojektowaniu kolejności i czasu odpalenia poszczególnych ładunków, aby kolejny ładunek detonował dopiero wówczas, gdy nastąpiło przemieszczenie calizny skalnej na skutek detonacji ładunku poprzedzającego i doszło do powstania szczelin oddzielających kolejny ładunek od jeszcze nie urobionej skały. Dobór odpowiedniego opóźnienia milisekundowego do zadanych warunków stanowi ważny aspekt właściwego projektowania robót strzałowych, mający bezpośredni wpływ na efekt odstrzału oraz intensywność drgań parasejsmicznych i ich oddziaływanie na otoczenie. Jest to zagadnienie badane i opisywane w literaturze światowej od lat. Istnieje wiele hipotez mówiących o warunkach prawidłowego doboru opóźnienia [3÷5]. Badania te prowadzone były, są i będą w oparciu o dostępne środki techniczne, mogące zagwarantować przede wszystkim powtarzalność wyników, a co za tym idzie ich wiarygodność. W przypadku odpalania milisekundowego takimi środkami technicznymi są stosowane środki inicjujące. Obecnie na rynku wyróżnić można trzy systemy inicjowania MW: system elektryczny, zwany też klasycznym (często z wykorzystaniem lontu detonującego), system nieelektryczny oraz system elektroniczny. Zastosowanie systemu elektrycznego do odpalania długich otworów strzałowych jest obecnie znikome. Można powiedzieć, że standardem w robotach strzałowych jest system nieelektryczny, który jednak – już w przeciągu kilku, kilkunastu najbliższych lat – powinien zostać wyparty przez systemy elektroniczne. Tak dalece idący wniosek można postawić bazując na charakterystyce poszczególnych systemów oraz skali problemów związanych z efektywnością robót strzałowych prowadzonych w coraz mniej korzystnych warunkach górnictwo-geologicznych.

2. Krótka charakterystyka systemów inicjowania

Zarówno systemy nieelektryczne, jak i elektroniczne zostały już wielokrotnie szczegółowo opisane w literaturze fachowej, w tym w materiałach konferencyjnych [6,7], stąd w niniejszym artykule przypomniana zostanie wyłącznie idea ich działania.

Systemy nieelektryczne oparte są na pirotechnicznych zapalnikach wewnątrztorowych o stałym, relatywnie długim nominalnym czasie odpalenia (np. 500 ms), które łączone są na powierzchni za pomocą tzw. konektorów (przełączników), dostępnych w kilku ściśle określonych skokowych wariantach czasowych (np. 17 ms, 25 ms, 42 ms itd.). Oznacza to, że sterowanie czasami opóźnień poszczególnych ładunków MW odbywa się na powierzchni i jest ściśle zależne od doboru i sposobu łączenia konektorów. Detonacja przenoszona jest od jednego do drugiego ładunku za pomocą rurki detonującej, stanowiącej integralną część zapalników (w tym konektorów), która posiada na swych ściankach napyłoną substancję o określonym składzie i parametrach, mających zagwarantować zainicjowanie umieszczonego w spłonce zapalnika elementu opóźniającego o określonym czasie spalania. Systemy elektroniczne w większości oparte są na pełnej dwukierunkowej komunikacji pomiędzy zapalnikiem a urządzeniem peryferyjnym służącym do jego detekcji, logowania, programowania, uzbrajania i odpalania. Sercem każdego systemu jest zabudowany w spłonce zapalnika mikrochip (miniaturowy układ elektroniczny) odpowiedzialny za nadanie ściśle określonego, bardzo precyzyjnego opóźnienia, dostępnego w szerokim zakresie (np. do kilkunastu tysięcy ms), przy możliwości programowania w wąskich interwałach czasowych (np. 1 ms).

3. Porównanie systemów inicjowania

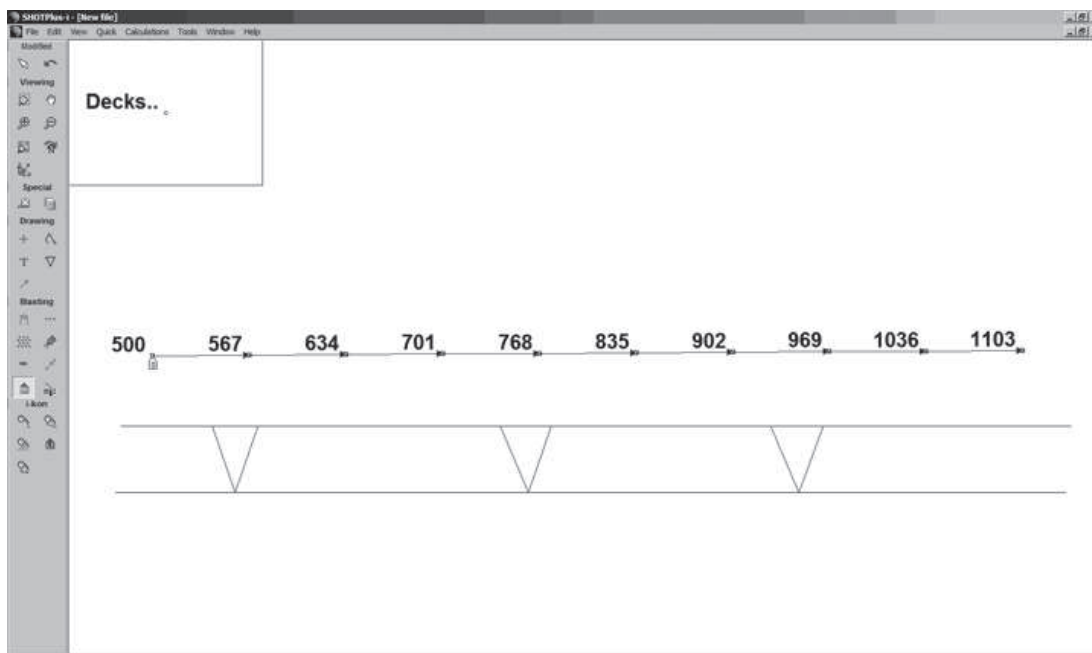
Spośród szerokiej gamy dostępnych na rynku systemów inicjowania wyróżnić – jako reprezentatywne – można system nieelektrycznego inicjowania typu Exel oraz system elektroniczny i-kon. Ich odmiennosc pozwala na przeprowadzenie analizy porównawczej na co najmniej czterech podstawowych płaszczyznach, do których zaliczają się: budowa (konstrukcja) zapalnika, precyzja osiąganych opóźnień, stopień kontroli nad prawidłowością działania systemu a także ich elastyczność oraz funkcjonalność.

3.1. Budowa (konstrukcja) zapalnika

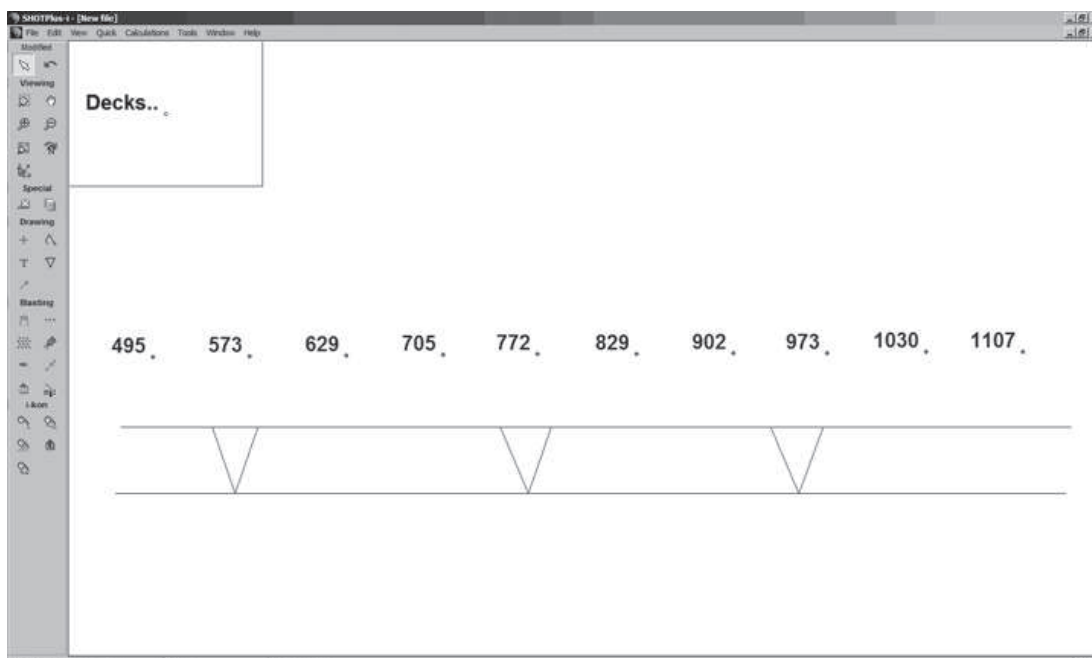
Różnica w budowie zapalników elektronicznych i nieelektrycznych wynika bezpośrednio z całkowicie odmiennej idei przekazywania sygnału inicjującego wysyłanego od urządzenia odpalającego do zapalnika oraz sposobu osiągania wymaganego opóźnienia milisekundowego. Budowę podstawowych rodzajów zapalników omówiono np. w pracy [8].

3.2. Precyzja osiąganych opóźnień

Standardem w produkcji zapalników nieelektrycznych jest zapewnienie co najwyżej 1% odchylenia opóźnienia milisekundowego w stosunku do czasu nominalnego. Ta zasada dotyczy jednak warunków laboratoryjnych, sprawdzalnych i osiągalnych wyłącznie na etapie kontroli jakości. Nawet tak – wydawałoby się – niewielkie zaburzenie precyzji nie pozostaje jednak bez wpływu na projektowanie robót strzałowych. Jej istnienie oznacza bowiem możliwość zaburzenia projektowanej sekwencji odpalania ładunków MW już w przypadku najprostszyc strzelań, jakimi są strzelania jednoszeregowe z zastosowaniem konstrukcji ładunku ciągłego. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy schemat takiego strzelania, z założeniem stałego opóźnienia (67 ms) pomiędzy otworami. Z kolei na rys. 3 zobrazowano potencjalny wpływ tylko 1% odchylen nominalnych czasów opóźnień na rzeczywistą sekwencję odpalania. Została ona znacząco zaburzona z postaci 67 ms do niejako „przypadkowo” następujących po sobie detonacji w układzie: (0-78-56-76-67-57-73-71-57-77) ms.



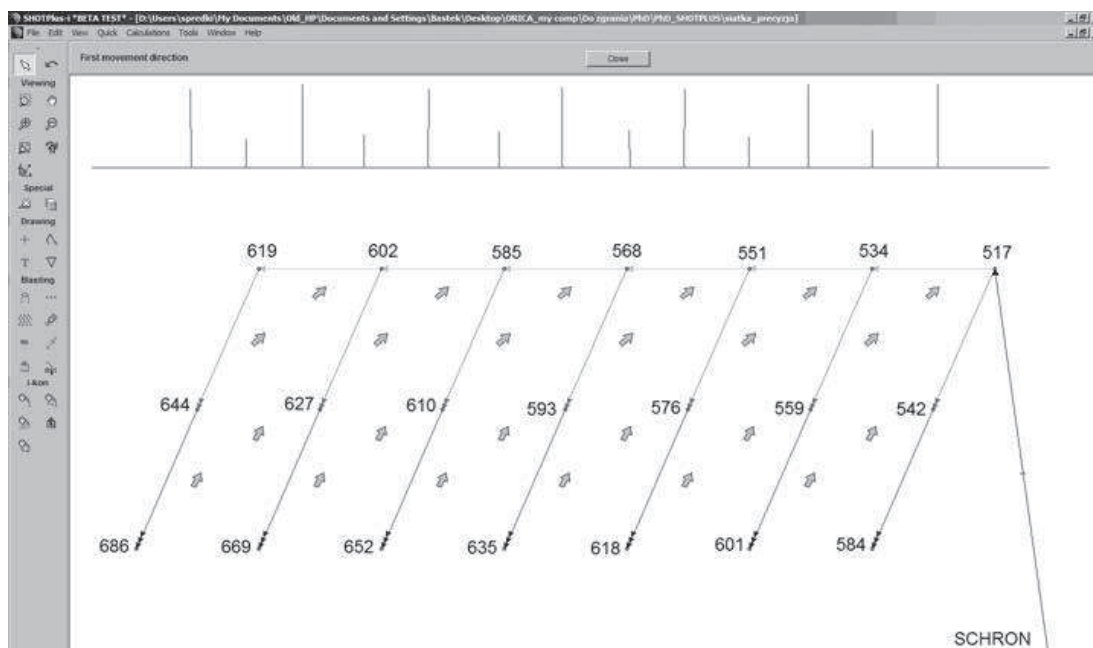
Rys. 2. Przykładowy schemat opóźnień strzelania z zastosowaniem ładunku ciągłego



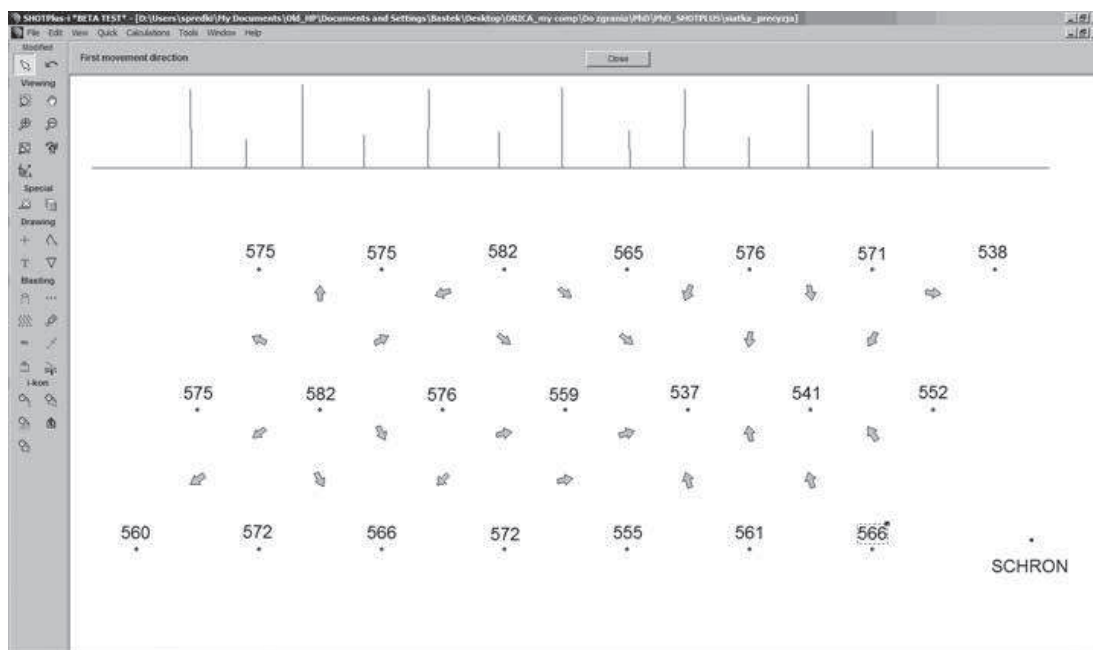
Rys. 3. Przykładowy scenariusz zaburzonej sekwencji odpalania sieci strzałowej zaprojektowanej wg rys. 2

W rzeczywistości – standardowe, zakładane na etapie produkcji – 1% odchylenie precyzji może ulec zwielokrotnieniu, będąc głównie wynikiem długiego okresu składowania (w szczególności w nieodpowiedniej temperaturze) lub rezultatem działania wysokociśnieniowej fali uderzeniowej, rozchodzącej się w ośrodku skalnym na skutek detonacji ładunków MW w sąsiednich otworach strzałowych, mogącej mieć wpływ na zmianę parametrów fizycznych i chemicznych pirotechnicznych elementów opóźniających, znajdujących się w łusce zapalnika [9]. Czynnikiem przynajmniej częściowo przeciwdziałającymi ubocznym skutkom przywołanych zjawisk są przede wszystkim rodzaj i jakość użytych do produkcji komponentów oraz jakość produkcji w ogóle. Potwierdzeniem tego jest fakt, że w literaturze spotkać można co najmniej kilka, różniących się od siebie, rezultatów badań nad precyzją zapalników nieelektrycznych, dla przykładu mówiących jedynie o (3 ÷ 5)% [10], a w skrajnych przypadkach nawet o 10 % odchylenia od nominalnego czasu opóźnienia [11]. Doskonałym przykładem określenia wpływu czasu składowania zapalników pirotechnicznych na precyzję

opóźnień jest przeprowadzone w KD „Barbara” w Mikołowie badanie próbki 5-letnich zapalników jednego z producentów zagranicznych, których wyniki wykazały średnio 4,4% odchylenie od nominalnego czasu 500 ms. W przypadku jednej z próbek odchylenie to wyniosło 6% [12]. Możliwość powstawania tak znaczących odchyleń w wielu przypadkach może wręcz negować albo przynajmniej stawiać pod dużym znakiem zapytania wiarygodność projektowanych sieci strzałowych. Odchylenia rzędu ($20 \div 25$) ms w przypadku zapalników wewnątrztorowych oraz ($2 \div 10$) ms w przypadku konektorów powierzchniowych stanowić mogą bowiem bezpośrednie zagrożenie sekwencyjności odpalania ładunków MW, zarówno w przypadku strzelań jedno- jak i wielozeregowych. Na rys. 4 i 5 w przykładowy sposób zobrazowano wpływ potencjalnych odchyleń na rzeczywistą sekwencję odpalania.



Rys. 4. Przykładowy schemat opóźnień wraz z planowanym kierunkiem przemieszczania mas



Rys. 5. Przykład zaburzonego schematu opóźnień wraz z kierunkiem przemieszczania mas

Na rys. 4 przedstawiono projektowane opóźnienia otworów strzałowych wraz z kierunkiem przemieszczania mas. Na rys. 5 zobrazowano jeden z potencjalnych scenariuszy rzeczywistych opóźnień milisekundowych,

wynikających z właściwej zapalnikom nieelektrycznym precyzji. Z analizy powyższych rysunków jasno wynika, że w skrajnych przypadkach, nawet najlepiej zaprojektowana siatka strzałowa w chwili odpalenia może zmienić się w nie do końca kontrolowaną sekwencję kolejno detonujących po sobie ładunków MW, co może skutkować zwielokrotnieniem ładunku MW przypadającego na opóźnienie milisekundowe, wcześniejszym odpaleniem ładunków w szeregach położonych dalej od czoła ściany eksploatacyjnej aniżeli w szeregach położonych bliżej (np. wybrane ładunki w drugim szeregu detonują przed ładunkami w szeregu pierwszym) czy niespodziewaną zmianą kierunku przemieszczania mas skalnych. Efekty takich zmian, będących wynikiem odchyłeń w precyzji zapalników pirotechnicznych, mogą wpłynąć nie tylko na samą efektywność urabiania, ale również na bezpieczeństwo prowadzonych robót strzałowych. Tak odpalone ładunki MW należy traktować wówczas jako zupełnie nowy schemat połączeń i przypisanych poszczególnym ładunkom opóźnień milisekundowych, co jednoznacznie wymusza powstawanie – odmiennego od oczekiwanego – efektu odstrzału, charakteryzującego się zwiększeniem strefy rozrzutu odłamków skalnych, zwiększoną wychodowością brył nadwymiarowych, powstawaniem progów przyspągowych czy powstawaniem spękań wstecznych. W skrajnych przypadkach – udokumentowanych w literaturze – może dojść nawet do przerwania ciągłości ładunku MW w pojedynczych otworach lub zniszczenia sąsiednich otworów strzałowych, co prowadzi do powstawania niewypałów. Należy zaznaczyć, że – pomimo wiedzy na temat istnienia ograniczonej precyzji zapalników pirotechnicznych – jeszcze do niedawna całkowicie pomijano, czy mówiąc inaczej - nie dostrzegano problemu odchyłeń rzeczywistych czasów opóźnień od czasów nominalnych, opierając wszelkie obliczenia tylko i wyłącznie właśnie na czasach nominalnych, poniekąd nadając im status „czasów niezaburzalnych”. Sytuacja ta dotyczy zarówno praktyki górniczej, jak i rozważań akademickich, co znajduje swe szerokie odzwierciedlenie w polskiej literaturze fachowej. Tak zdefiniowane przyczyny i konsekwencje zaburzonej precyzji zapalników pirotechnicznych mogą być wyeliminowane poprzez zastosowanie zapalników elektronicznych. Ich precyzja również podlega zaburzeniu, jednakże skala tych zaburzeń jest nieporównywalna z zapalnikami pirotechnicznymi, a to za sprawą wykorzystania energii elektrycznej i układu scalonego z mikrochipem do przekazywania i generowania opóźnień milisekundowych. Jakość elektronicznych układów scalonych stosowanych przez producentów – podobnie jak to ma miejsce w przypadku palnych komponentów do produkcji elementów opóźniających zapalników nieelektrycznych – jest zróżnicowana, stąd także i w tym przypadku istnieje pewien zakres potencjalnych odchyłeń. Ich wielkość czyni je jednak pomijalnymi zarówno na etapie standaryzacji produkcji, jak i użytkowania w rzeczywistych warunkach terenowych, co jednak nie oznacza, że nie podlegają one kontroli. Producenci systemów elektronicznych publikują dane o precyzji ich zapalników, które w większości przypadków oscylują wokół wartości 0,01%.

Dla przykładu zapalnik o nominalnym czasie opóźnienia 500 ms w praktyce odpalony może zostać z opóźnieniem 499,95 ms lub 500,05 ms. Projektując sieci strzałowe z wykorzystaniem systemów elektronicznych można zatem przyjąć, że rzeczywiste czasy odpalenia poszczególnych ładunków MW odzwierciedlają czasy projektowane, a ewentualne negatywne, niepożądane skutki odstrzału nie są wynikiem jakości lub ograniczeń systemu inicjowania.

3.3. Stopień kontroli nad prawidłowością działania systemu

Pewność inicjowania to jeden z podstawowych elementów bezpiecznego wykonywania robót strzałowych, bezpośrednio wpływający na możliwość powstawania ewentualnych niewypałów. Analizując ideę działania oraz konstrukcję porównywanych systemów można wręcz mówić o przepaści technologicznej w zakresie możliwości kontrolowania prawidłowości działania danego systemu, zaczynając od zapalnika, poprzez linię strzałową a na urządzeniu odpalającym kończąc. System nieelektryczny pozwala jedynie na wizualną i manualną kontrolę poprawności wykonanych połączeń sieci strzałowej oraz sprawdzenie stanu naładowania baterii w zapalarni tuż przed odpaleniem serii. Funkcjonalność poszczególnych zapalników czy rurki detonującej są w zasadzie nieznane lub mówiąc inaczej – są znane jedynie w stopniu odpowiadającym rezultatom badań partii testowych pobieranych wprost z linii produkcyjnej. Jakość produkowanych obecnie zapalników nieelektrycznych jest bardzo wysoka a producenci gwarantują niezawodność systemów, niemniej jednak w praktyce zdarzają się pojedyncze przypadki wadliwych zapalników lub rurki detonującej, skutkujące

powstawaniem niewypałów, stąd najczęściej to sami użytkownicy poszukują rozwiązań, mogących podnieść poziom niezawodności odpalenia systemem nieelektrycznym pojedynczego ładunku MW. W praktyce oznacza to stosowanie dwóch ładunków udarowych na pojedynczy człon ładunku zasadniczego. Ciekawym rozwiązaniem jest opracowany w Wielkiej Brytanii kształt pobudzacza, który ma dwa otwory, przeznaczone na łuski zapalnika. Z jednej strony podwaja to pewność zainicjowania, z drugiej strony pozwala zastosować o jeden pobudzaczn mniej w pojedynczym otworze strzałowym.

System elektroniczny jest zupełnym przeciwieństwem systemu nieelektrycznego w aspekcie sprawdzania funkcjonalności poszczególnych elementów składowych. Dla przykładu, wykorzystując samotestujące się urządzenie typu Logger w systemie i-kon, można sprawdzić funkcjonalność zarówno zapalników, jak i linii strzałowej na każdym etapie logowania, programowania i odpalania tak każdego zapalnika z osobna, jak i całej sieci strzałowej. Jest to przykład pełnej kontroli osoby wykonującej roboty strzałowe nad poszczególnymi elementami używanego systemu inicjowania, gdzie każda nieprawidłowość jest na bieżąco monitorowana i rejestrowana, a użytkownik jest w pełni świadomy jej istnienia.

3.4. Elastyczność i funkcjonalność systemów

Wdrożenie systemów nieelektrycznych otworzyło przed użytkownikami szerokie możliwości projektowania siatek strzałowych, w tym doboru opóźnień milisekundowych do oczekiwanego efektu odstrzału, głównie za sprawą szerokiej gamy skokowych opóźnień milisekundowych dotyczących zarówno zapalników wewnątrzotworowych, jak i powierzchniowych. W stosunku do zapalników elektrycznych była to wręcz rewolucyjna zmiana, umożliwiająca zupełnie nowe podejście do wykonywania robót strzałowych. Fakt ten szczególnego znaczenia nabral w przypadku projektowania strzelań wielozeregowych. Należy jednak pamiętać, że zapalniki pirotechniczne są obciążone ograniczoną precyzją, stąd i możliwości swobodnego projektowania robót strzałowych są ograniczone. Można założyć, że w aspekcie projektowania sieci strzałowych funkcjonalność systemów nieelektrycznych jest limitowana przez dwa główne czynniki: skokowość opóźnień i ich precyzję. Jak wspomniano, są to jednak ograniczenia natury technicznej, związane z technologią produkcji poszczególnych elementów systemów nieelektrycznych. Obie grupy wspomnianych ograniczeń są natomiast w pełni wyeliminowane w przypadku systemów elektronicznych. Precyzja na poziomie $\pm 0,01\%$ oraz możliwość dowolnego przypisywania opóźnień w interwale 1 ms czynią z każdego tak skonstruowanego systemu elektronicznego niezastąpione narzędzie w projektowaniu zarówno mniej, jak i bardziej skomplikowanych robót strzałowych. Istnieje jednak jeden poważny aspekt funkcjonalności, w którym systemy nieelektryczne przewyższają systemy elektroniczne. Jest to – wynikający z idei przekazywania sygnału inicjującego w rurce detonującej – brak ograniczeń co do ilości zapalników odpalanych w pojedynczej serii. Wielkość serii w systemach nieelektrycznych limitowana jest dopuszczalnymi ładunkami MW, w tym ładunkiem całkowitym, ładunkiem pojedynczego otworu strzałowego i ładunkiem przypadającym na opóźnienie milisekundowe. Z kolei w systemach elektronicznych ilość odpalanych ładunków dodatkowo limitowana jest wydajnością urządzeń odpalających (zapalarek).

4. Podsumowanie

Porównanie systemów inicjowania bezsprzecznie wypada na korzyść systemów elektronicznych. Wydaje się zatem, że już sama dostępność do tak nowoczesnej technologii powinna być wystarczającym powodem do masowego jej stosowania w zakładach górniczych urabiających złoża z wykorzystaniem MW, kosztem najbardziej rozpowszechnionych obecnie systemów nieelektrycznych. Nie jest to jednak proces tak łatwy, jak to by się mogło wydawać. W świadomości wielu środowisk, nie tylko polskich, ale i światowych wciąż pokutuje pierwotny zamysł wdrożenia systemów elektronicznych, który skutecznie blokuje ideę masowego stosowania systemów elektronicznych we wszystkich zakładach górniczych. W pierwotnym założeniu systemy te miały być bowiem tylko i wyłącznie narzędziem dodatkowym, opracowanym jedynie na potrzeby uzyskiwania precyzyjnych czasów opóźnień milisekundowych. To z kolei pozwalałoby zastosować go wszędzie tam, gdzie charakterystyka systemów elektrycznych lub nieelektrycznych stanowiłaby barierę ku efektywnej

eksploatacji złóż lub ich partii. W założeniu miał to być zatem bardziej system uzupełniający, aniżeli wiodący, wykorzystywany lokalnie, w obrębie danego rejonu eksploatacyjnego. Przekonanie to zdalnie potęgowane jest przez wielkość kosztu jednostkowego zapalnika elektronicznego, który co najmniej kilkukrotnie przewyższa koszt jednostkowy zapalnika nieelektrycznego. Tymczasem kilkuletnie już doświadczenia w zakresie używania systemów elektronicznych w Polsce uwidaczniają zarówno techniczne, jak i ekonomiczne korzyści płynące z inicjowania ładunków MW systemem elektronicznym, co pozwala postawić tezę, że systemy nieelektryczne być może już w niedalekiej przyszłości zostaną wyparte przez bardziej zaawansowane technicznie systemy elektroniczne.

Literatura

- [1] Onderka Zb., *Efekt sejsmiczny strzelania – uwagi i zalecenia*. Konferencja Technika strzelnicza w górnictwie. Jaszowiec 2001.
- [2] Winzer J., *Wpływ opóźnień milisekundowych przy prowadzeniu strzelań eksploatacyjnych na częstotliwościowe charakterystyki drgań gruntu i budynków*. Kraków 2004.
- [3] Andrew A.B., *Design Criteria for Blasting*. Proc. of the 7th Conference on Explosives and Blasting Techniques. Montville 1980.
- [4] Olofsson S.O., *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Arla 1997.
- [5] Onderka Zb., *Określenie wpływu konstrukcji ładunków i wielkości opóźnień międzystrzałowych na intensywność drgań sejsmicznych i rozdrobnienie urobku – wytyczne i zalecenia*. Kraków 1990.
- [6] Prędko S., *Przegląd elektronicznych systemów inicjacji produkcji Orica*. Instytut Przemysłu Organicznego, Ustroń 2009.
- [7] Prędko S., *Pierwsze próby zastosowania zapalników elektronicznych w Polsce*. Katowice 2008.
- [8] Miller D., Martin D., *A review of the benefits being delivered using electronic delay detonators in the quarry industry*. Melbourne 2008.
- [9] Cunningham C., *The effect of timing precision on control of blasting effects*. AA Balkema Publishers 2000.
- [10] Osborne S., *Blast timing - Anything goes with electronic detonators*. Auckland 2005.
- [11] Sharma P., *Electronic delay detonator system for large mines*.
- [12] *Sprawozdanie NR 88/09 z badań środka strzałowego*. KD „Barbara”, Mikołów 2009.