

Antoni Frodyma  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Nowoczesne rozwiązania elektrycznego odpalania urządzeń strzałowych w otworach wiertniczych

### Wprowadzenie

Wiele spośród zabiegów pola naftowego – takich jak perforacja kumulacyjna w otworach wiertniczych, czy wycinanie rur produkcyjnych i okładzinowych – wykonywanych jest urządzeniami strzałowymi zapuszczanymi do otworu wiertniczego na przewodzie elektrycznym, a do zapoczątkowania detonacji łańcuchów balistycznych w tych urządzenia konieczne są urządzenia elektrowybuchowe, czyli zapalniki elektryczne.

Perforatory i inne urządzenia strzałowe zapuszczane do otworu na kablu strzałowym są inicjowane konwencjonalnymi, elektrycznymi urządzeniami strzałowymi typu cieplnego, którymi są zazwyczaj zapalniki z elektrycznym mostkiem drutowym – znane powszechnie jako główki zapalcze. Są one odpalane za pomocą prądu elektrycznego przekazywanego przez kabel strzałowy-geofizyczny; z powierzchniowej zapalarki do wglębnego urządzenia strzałowego. Potencjalnym zagrożeniem przy prowadzeniu tych prac jest przedwczesne odpalenie, spowodowane występowaniem prądów błędzących, indukowanych przez źródła spoza układu strzałowego.

Takimi źródłami mogą być: promieniowanie elektromagnetyczne z nadajników radiowych i radarowych, różnice potencjału pomiędzy elementami konstrukcji pomostu albo pomiędzy wyciągiem kabla strzałowego a wieżą wiertniczą, operacje spawania elektrycznego, ochrona katodowa, lub inne źródła prądu elektrycznego w sąsiedztwie.

Duże platformy przybrzeżno-morskie – w szczególności zaś platformy będące w fazie budowy i rozwoju – mogą w większym stopniu rodzić zagrożenie występowania prądów błędzących. Przed rozpoczęciem operacji strzałowych wdrażane są długie i szczegółowe procedury wyłączania, które mogą być kosztowne i mogą zwiększać zagrożenia

dla bezpieczeństwa w innych obszarach, takich jak utrata łączności z łodziami i helikopterami. Zwolnienia z konieczności zachowania ciszy radiowej mogą zmniejszać te problemy, ale wymagają rygorystycznej analizy i wysokich standardów posługiwania się materiałami wybuchowymi, jak również potwierdzonego wyłączenia wszystkich nadajników radiowych nieobjętych zwolnieniem.

O ile wyłączenie znanych, dużych źródeł prądów błędzących – zwłaszcza pracujących w granicach działki otworu wiertniczego – takich jak: agregaty prądotwórcze, ochrona katodowa, spawarki, etc., jest stosunkowo łatwe do wykonania (podobnie jak potwierdzenie bezpieczeństwa poprzez pomiar napięcia prądów błędzących w miejscu wykonywania zbrojenia urządzeń strzałowych), o tyle zagrożenia stwarzane przez emisję energii o częstotliwościach radiowych (RF) są trudne zarówno do wykrywania, jak i likwidowania.

### **Źródła energii stanowiące zagrożenie dla prac strzałowych**

#### *Zagrożenie od promieniowanej energii o częstotliwościach radiowych*

Największe potencjalne zagrożenie stanowią komercyjne nadajniki zakresu AM (od 0,535 do 1,605 MHz). Dzieje się tak dlatego, że łączą one w sobie wysoką moc i wystarczająco niską częstotliwość, dzięki czemu w przewodach następuje niska strata energii RF.

Tworzenie zagrożenia przez nadajniki FM i TV pracujące w trybie modulacji częstotliwości jest mało prawdopodobne. Chociaż moc przez nie promieniowana jest wyjątkowo wysoka, a anteny są spolaryzowane poziomo, to prądy o wysokiej częstotliwości są szybko tłumione w zapalnikach lub przewodach łączących. Te źródła RF

zazwyczaj wykorzystują anteny umieszczone na szczycie wysokich masztów, co dodatkowo wpływa na tłumienie natężenia pola elektromagnetycznego na poziomie gruntu.

Radionadajniki ruchome, jak również inne produkty bezprzewodowe, muszą być oceniane jako potencjalne zagrożenie, gdyż pomimo ich niewielkiej mocy mogą one znaleźć się bezpośrednio w strefie prowadzenia prac strzałowych. Na rynek ciągle wprowadzane są nowe produkty bezprzewodowe, takie jak: telefony komórkowe, urządzenia GPS, systemy akwizycji danych oraz układy zdalnego otwierania pojazdów.

Radionadajniki zakresu CB (*Citizen Band*) stanowią niezwykle problem z kilku powodów:

- 1) publicznie używane są miliony takich urządzeń,
- 2) ich częstotliwość robocza leży w zakresie, który uznawany jest za najgorszy przypadek dla typowych elektrycznych obwodów strzałowych,
- 3) niektórzy nieodpowiedzialni operatorzy stosują nielegalne wzmacniacze liniowe w celu zwiększenia ich zasięgu nadawania.

#### *Telefony komórkowe*

Choć ręczne, zasilane akumulatorowo telefony komórkowe są poprzez swoją budowę urządzeniami niskiej mocy, zachowującymi właściwy współczynnik absorpcji (SAR) – poniżej zalecanych bezpiecznych poziomów dla tkanek organizmu człowieka – to powstają kwestie dotyczące użytkowania telefonów komórkowych w sąsiedztwie obwodów strzałowych.

Po pierwsze, wskutek mobilności telefonu komórkowego urządzenie to może być przyniesione na bardzo bliską odległość lub styczność z obwodem strzałowym. Telefony komórkowe o mocy wyjściowej mniejszej od jednego wata powinny być utrzymywane w odległości co najmniej trzech metrów od obwodu strzałowego.

Po drugie, gniazdo lub punkty stykowe ładowania akumulatora telefonu komórkowego mogą również zetknąć się z przewodami zapalnika lub obwodu strzałowego. W każdym przypadku wynikiem takiego zdarzenia jest powstanie sytuacji potencjalnie niebezpiecznej.

#### *Używanie w pobliżu obwodów strzałowych ręcznych źródeł energii niskiej mocy o częstotliwości radiowej*

Obserwowane ostatnio rozpowszechnienie małych, ręcznych źródeł częstotliwości radiowej o niskiej mocy (układy bezprzewodowego sterowania odmykaniem, nadajniki RF do zdalnego sterowania urządzeń, nadajniki otwierania drzwi garażowych, bezprzewodowe układy sterowania systemów składowania itp.) wprowadza wiele

problemów dotyczących bezpiecznego użytkowania tych urządzeń w sąsiedztwie obwodów strzałowych lub urządzeń elektrowybuchowych. Po pierwsze, konieczne jest odnotowanie, że te źródła niskiej mocy promieniowania RF dzielą się na dwie ogólne kategorie:

- a) nadajniki częstotliwości radiowych o kodowanym sygnale wyjściowym,
- b) nadajniki częstotliwości radiowych o ciągłym sygnale wyjściowym z modulacją częstotliwości.

Typ pierwszy to urządzenia z modulacją impulsową o bardzo niskim obciążeniu cyklu roboczego, dające w efekcie względnie niską średnią moc dostarczaną do pobliskiego obwodu strzałowego. Drugi typ urządzeń nadaje w sposób ciągły, z możliwością dostarczania względnie wysokiej średniej mocy do obwodu strzałowego. Ponieważ strzałowy może nie posiadać informacji dotyczących typu użytkowanego źródła promieniowania RF, podaje się następujące zalecenia:

- a) Jeżeli ręczne urządzenie częstotliwości RF niskiej mocy ma sygnał wyjściowy nieznanego typu, należy przestrzegać zachowania bezpiecznej odległości – 1,5 metra dla nadajników ręcznych o mocy wyjściowej 2 waty lub mniejszej.
- b) Jeżeli konieczne jest wykorzystywanie ręcznego źródła częstotliwości RF niskiej mocy w bliskiej odległości od obwodów strzałowych lub urządzeń elektrowybuchowych, wówczas należy skonsultować się z kompetentnym laboratorium, celem zbadania źródła RF i ustalenia bezpiecznej odległości pomiędzy tym konkretnym źródłem RF, a obwodem strzałowym lub urządzeniem elektrowybuchowym.

#### *Wojskowe instalacje emitujące energię o częstotliwościach radiowych*

Nadajniki wojskowe stają się coraz liczniejsze i obejmują zakres częstotliwości od kiloherców do tysięcy mega-herców, często o wyjątkowo dużej promieniowanej mocy.

Z uwagi na charakter robót wojskowych, wiele danych dotyczących tych układów jest utajnionych z powodów bezpieczeństwa. Jeżeli konieczne jest przeprowadzenie prac strzałowych w sąsiedztwie obszarów wojskowych, zaleca się skontaktować z biurem pełniącym służbę dowódcy jednostki wojskowej, w celu wyjaśnienia mu harmonogramu prac zaplanowanych do wykonania oraz uzyskania pomocy w określeniu, czy zaplanowane do wykonania operacje strzałowe będą bezpieczne od zagrożeń pochodzących od energii o częstotliwościach radiowych.

Do określania bezpiecznych odległości prowadzenia prac strzałowych, dla różnego typu radiowych instalacji

nadawczych można stosować opracowane w tym celu nomogramy obliczeniowe [1].

*Ochrona katodowa*

Układy ochrony katodowej są zasilane z prostowników transformatorowych, które mogą dostarczać prądy stałe o natężeniach do 1200 amperów i napięciach do 50 V. Przykładowo, w sytuacji platformy prąd przepływa przez wodę morską z elektrod ochrony katodowej u podstawy konstrukcji (wraz z przewodem pionowym) i powraca przez konstrukcję do ujemnego zacisku prostownika transformatorowego. Jeżeli prąd powraca do prostownika transformatorowego przez izolowane linie z katod dookoła nóg powyżej linii rozbryzgów, ale poniżej pokładów, to mogą występować tylko minimalne prądy błądzące niebezpieczne dla operacji strzałowych (rysunek 1).

*Sytuacja zwarcia z ochroną katodową*

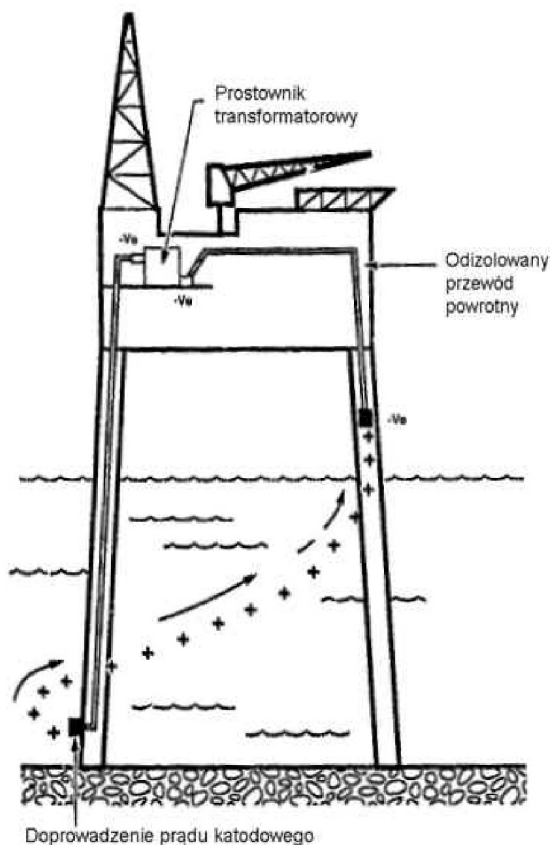
Jeżeli powrót następuje bezpośrednio do zacisku ujemnego dołączonego w wysokim punkcie konstrukcji, to – w przypadku uszkodzenia układu uziemiającego lub jego niedostatecznej sprawności – różnice potencjałów mogą

powodować przepływ prądów błądzących i iskrzenie. Takie prądy ochrony katodowej stanowią zagrożenie dla operacji strzałowych do momentu ich wyłączenia (rysunek 2). Wyłączenie układu ochrony katodowej na czas przekraczający 24 godziny wymaga ponownego rozruchu tego układu; w krokach po 100 amperów co 24 godziny, znacznie zwiększając w ten sposób czas, gdy konstrukcja pozostaje bez ochrony przed korozją.

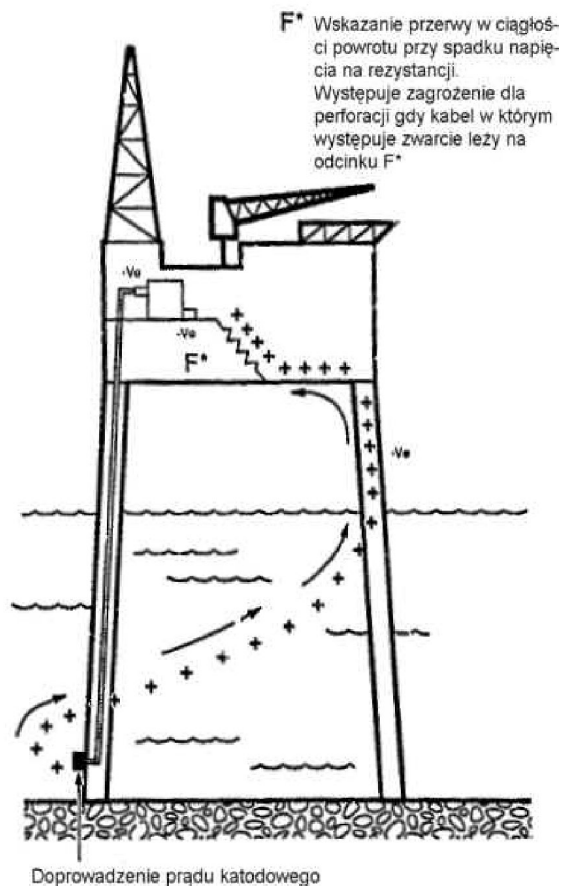
**Spawanie elektryczne**

Spawanie elektryczne może stwarzać podobne, ale większe problemy dla operacji strzałowych, jeśli chodzi o prądy błądzące. Znakomita większość prac spawalniczych prowadzonych na konstrukcjach przybrzeżnomorskich to spawanie prądem stałym: przy maksymalnym napięciu otwartego obwodu wynoszącym 70 V; napięciach spawania od 20 do 40 V i prądach spawania rzędu kilkuset amperów.

Zagrożenie dla operacji strzałowych może występować wówczas, gdy kabel geofizyczny-strzałowy z występującym zwarcie przekracza odcinek pokładu o wyższym potencjale elektrycznym (rysunek 3). Wskutek tego,

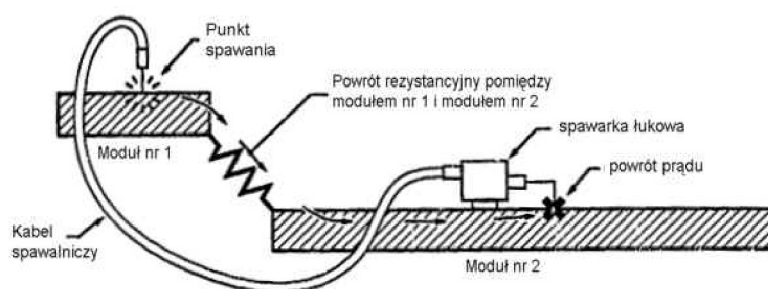


Rys. 1. Prąd ochrony katodowej



Rys. 2. Sytuacja zwarcia z ochroną katodową

w celu zagwarantowania bezpieczeństwa w trakcie prowadzenia prac strzałowych z wykorzystaniem konwencjonalnych, elektrycznych głowiczek strzałowych, konieczne jest wyłączenie wszelkich robót spawalniczych.



Rys. 3. Różnice potencjałów elektrycznych w trakcie spawania elektrycznego

## Strategie bezpieczeństwa przy posługiwaniu się urządzeniami strzałowymi inicjowanymi elektrycznie, w obecności zagrożeń występujących w środowisku wiertni

### Zapalniki elektryczne

Istnieją różne rodzaje zapalników elektrycznych stosowanych w pracach strzałowych górnictwa naftowego i można je podzielić pod względem mocy wymaganej do ich zdetonowania, jak również stosowania w nich inicjujących (pierwotnych) materiałów wybuchowych, takich jak azydek ołowiu oraz materiałów wtórnych-kruszących, lub tylko tych drugich. Zapalniki elektryczne o niskiej mocy mogą detonować już przy mocy 40 mW.

Wysokiej mocy, samoistnie bezpieczne zapalniki elektryczne wymagają dedykowanych źródeł zasilania, o napięciach sięgających od kilkuset do kilku tysięcy voltów. Zapalniki elektryczne można zatem podzielić na następujące kategorie:

Kategoria 1. Zapalniki elektryczne niskiej mocy, wykorzystujące mostek drutowy i inicjujące materiały wybuchowe. Te zapalniki nie mają dodatkowych rezystorów zabezpieczających.

Kategoria 2. Zapalniki elektryczne niskiej mocy, wykorzystujące mostek drutowy i inicjujące materiały wybuchowe, ale z dodatkowymi rezystorami (około 50  $\Omega$ ) w celu zwiększenia bezpieczeństwa.

Kategoria 3. Są to: a) zapalniki elektryczne z mostkiem drutowym i inicjującym materiałem wybuchowym, ale z dodatkowym obwodem elektronicznym wykorzystywanym do zwiększenia bezpieczeństwa, lub b) zapalniki elektryczne bez pierwotnych materiałów wybuchowych, wymagające do zdetonowania mocy rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu watów (np. mostek półprzewodnikowy).

Kategoria 4. Zapalniki elektryczne wysokiej mocy, samoistnie bezpieczne, niezawierające pierwotnych materiałów wybuchowych (np. zapalnik z folią eksplodującą, albo z eksplodującym mostkiem drutowym) [7].

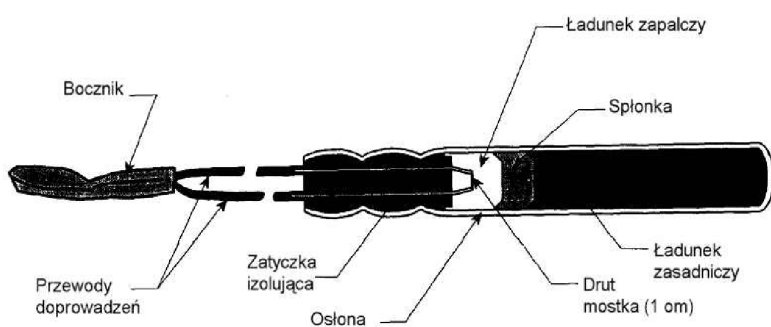
### Kategoria 1 – zapalniki z mostkiem drutowym

Najwcześniej stosowanym na polach naftowych typem zapalnika był zapalnik z mostkiem drutowym (oporowym), zwany niekiedy „główką zapalczą”. Jeszcze całkiem niedawno, zanim zagadnienia bezpieczeństwa wysunęły się na pierwszy plan, zapalniki z mostkiem drutowym były najbardziej popularne na polach naftowych, przy czym jednym z powodów tej popularności był ich niski koszt (rzędu kilkudziesięciu złotych). Choć obecnie już się od nich odchodzi (zob. API-RP67), nadal jednak warto zapoznać się ze sposobem działania tych urządzeń, ponieważ służą one jako wzorzec odniesienia dla zapalników innych typów.

Rysunek 4 ilustruje budowę typowego zapalnika z mostkiem drutowym. Głównymi elementami składowymi są: osłona zewnętrzna, para przewodów doprowadzeń, zatyczka, drut mostka oraz łańcuch balistyczny MW wewnątrz osłony metalowej. Mostek drutowy jest zamontowany na końcówkach przewodów doprowadzeń, a jego rezystancja wynosi typowo około 1  $\Omega$ . Łańcuch balistyczny MW wewnątrz osłony składa się z trzech stopni MW. Pierwszym jest ładunek zapalczy – stykający się bezpośrednio z mostkiem drutowym, łatwo zapalający się. Drugim stopniem jest ładunek spłonki, który rozwija sekwencję od palenia się do detonacji. Na tym stopniu stosowany jest zazwyczaj ładunek wybuchowy pierwotny, taki jak azydek ołowiu. Trzecim stopniem jest ładunek podstawowy wtórnego materiału wybuchowego – takiego jak RDX (heksogen) lub HNS (oktogen), o wysokiej gęstości. W niektórych zapalnikach ładunek zapalczy i spłonka są połączone; w takim układzie stosowany jest ogólnie azydek ołowiu.

Zasada działania zapalnika z mostkiem drutowym jest względnie prosta. Prąd płynący przez drut mostka powoduje wzrost jego temperatury, wskutek rozgrzewania oporowego. Gdy temperatura drutu mostka przekroczy





Rys. 4. Typowy zapalnik z mostkiem drutowym

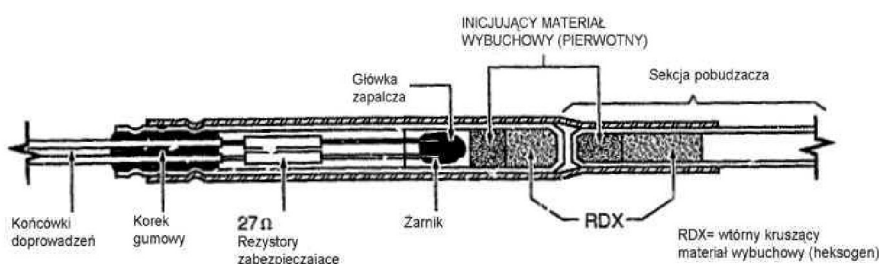
wartość krytyczną (około 300°C dla pierwotnych materiałów wybuchowych), rozpocznie się zapłon. Ponieważ zapalniki z mostkiem drutowym mają mały opór obwodu, już napięcia błędzące o wartości 0,5 V mogą spowodować zainicjowanie urządzenia.

*Kategoria 2 – zapalniki z rezystorami zabezpieczającymi*

Na rysunku 5 przedstawiono budowę typowego zapalnika oporowego. Jest on podobny w konstrukcji do zapalnika z mostkiem drutowym, za wyjątkiem jednego lub kilku dodatkowych rezystorów włączonych w obwód urządzenia. Zapalniki z rezystorami zaczęły być szeroko stosowane po ujawnieniu się problemów bezpieczeństwa dotyczących zapalników z drutem oporowym, ponieważ są one nieco mniej czułe na zagrożenia od elektryczności błędzącej niż zapalniki z drutem oporowym.

Rezystory, które zazwyczaj włączane są szeregowo w obwód drutu mostka, zapewniają ogólną rezystancję obwodu rzędu 50–55 Ω i służą do ograniczenia przepływu prądu, który może być generowany przez niskie napięcia błędzące. Rezystory te służą również jako upusty energii; pochłaniające ciepło i rozpraszające je od mostka i materiałów wybuchowych – przynajmniej do momentu, gdy poziom tej energii wzrośnie do punktu, w którym przewyżczy ona zabezpieczenie zapewniane przez rezystory.

Ten typ zapalnika typowo nie ulega pobudzeniu przy poddaniu go oddziaływaniu napięcia do 10 woltów, ale może być inicjowany napięciami nieco wyższymi (12-wol-



Rys. 5. Typowy zapalnik elektryczny z rezystorami zabezpieczającymi

towy akumulator samochodowy). Na przykład dla stosowanych w kraju elektrycznych zapalników naftowych tego typu (seria ZEN) prąd nieodpalający wynosi 0,2 A, zaś prąd zawsze odpalający – 0,45 A. Warto również zauważyć, że zarówno zapalnik z mostkiem drutowym jak i zapalnik oporowy zawierają pierwotne (czułe) materiały wybuchowe, co sprawia, że są one wrażliwe nie tylko na zagrożenia elektryczne, ale również na uderzenie, tarcie i iskrzenie.

*Kategoria 3 – zapalniki z mostkiem półprzewodnikowym*  
Zasada działania mostka półprzewodnikowego:

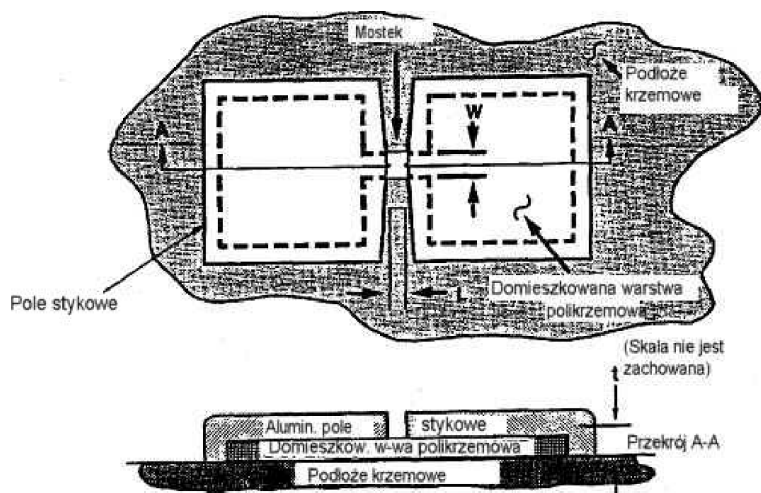
Większość urządzeń elektrowybuchowych zawiera niewielki metalowy mostek drutowy, podgrzewany impulsem prądu z zestawu odpalającego, działający przy napięciach od kilku do kilkudziesięciu woltów. Materiał egzoergiczny okalający mostek drutowy jest podgrzewany poprzez przewodnictwo ciepłe od mostka drutowego i typowo zapala się po kilku milisekundach po zadziałaniu impulsu prądowego.

Mostek półprzewodnikowy oferuje nową metodę pobudzania materiału wybuchowego. Na rysunku 6 przedstawiono schemat działania takiego mostka – jest to niewielki, silnie domieszkowany element polikrzemowy, uformowany w waflu polikrzemu na podłożu krzemu. Sam element mostka ma grubość 2 μm, a jego długość jest określana przez rozstaw aluminiowych pół kontaktowych, pokazanych na rysunku 6. Nominalna rezystancja mostka wynosi 1 Ω. Kształt warstwy polikrzemowej i aluminiowych pół kontaktowych jest określany przez maski generowane komputerowo, dlatego też projekty mostka z łatwością można dopasować tak, by spełniały szerokie spektrum potrzeb.

Aluminiowe pola stykowe zapewniają styk o bardzo niskiej rezystancji do niżej leżącej, domieszkowanej warstwy polikrzemowej. Druty są dołączane do pół stykowych ultradźwiękowo, umożliwiając przepływ prądu od jednego do drugiego pola stykowego przez mostek. Proces dołączania jest procedurą niskokosztową, wytwarzającą bardzo silne

wiązanie. W istocie te wiązania i druty pozostają nienaruszone po odpaleniu większości mieszanek pirotechnicznych.

Gdy impuls prądowy przepływa przez mostek półprzewodnikowy, wybucha on – tworząc jaskrawe wyładowanie plazmowe, które podgrzewa materiał egzoergiczny w procesie konwekcyjnego przeno-



Rys. 6. Uproszczony schemat mostka półprzewodnikowego (SCB). Mostek jest utworzony z silnie domieszkowanej warstwy polikrzemowej, ograniczonej liniami przerywanymi. Typowe wymiary mostka wynoszą 270  $\mu\text{m}$  szerokości na 90  $\mu\text{m}$  długości i 2  $\mu\text{m}$  grubości. Przewody elektryczne są dołączane do aluminiowych pól stykowych, umożliwiając przepływ doprowadzanego impulsu prądowego między polami stykowymi przez mostek [5]

szczenia ciepła. Fizyka tego procesu jest bardzo odmienna od mechanizmu przewodnościowego – działającego w przypadku mostków drutowych. Jest to odzwierciedlane przez niską energię wymaganą do zapłonu mostka półprzewodnikowego (mniej niż 3 mJ i nawet 30  $\mu\text{J}$ ) i bardzo szybkie czasy zadziałania urządzeń SCB. Przyrządy pirotechniczne z mostkiem półprzewodnikowym wytwarzają wyjściową falę detonacyjną w czasie nieprzekraczającym 50  $\mu\text{s}$  po doprowadzeniu impulsu prądowego – w porównaniu do milisekundowego czasu reakcji przyrządów wykorzystujących mostek drutowy.

Do inicjowania przyrządów z mostkiem półprzewodnikowym wykorzystywać można różne obwody: stałoprądowe, stałonapięciowe, zapalarki oraz pojemnościowe zespoły

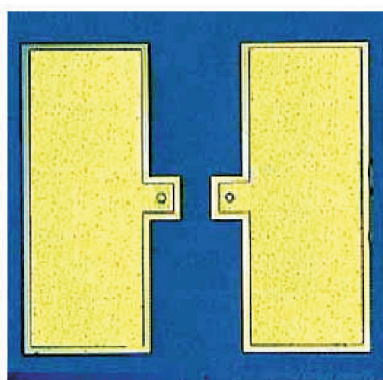
wyładowcze. Ponieważ podłoże zapewnia bardzo duży i niezawodny rozpraszacz ciepła, uzyskiwane są bardzo dobre poziomy prądu nieodpalającego – mimo iż energia zawsze odpalająca jest bardzo niska. Prąd nieodpalający jest definiowany jako maksymalny prąd jaki można doprowadzić do mostka przez określony czas bez spowodowania jego zapłonu, natomiast energię zawsze odpalającą definiujemy jako minimalną energię niezawodnego odpalenia. W przypadku badań wykonanych dla materiału pirotechnicznego (nadchloran potasu podwodorku tytanu) uzyskano energię zawsze odpalającą o wartości 2,72 mJ (w temperaturze 54°C), a pięciominutowy przepływ prądu nieodpalającego – o natężeniu 1,39 A, zaś w przypadku przyrządu z mostkiem drutowym wartości te wynoszą odpowiednio: 32,6 mJ energii zawsze odpalającej i 1,1 A prądu nieodpalającego (oba pomiary w temperaturze otoczenia). Należy zauważyć, że

warunki badania dla mostka półprzewodnikowego były bardziej niekorzystne niż dla urządzenia z mostkiem drutowym. Ponadto urządzenia z mostkiem półprzewodnikowym tolerują wyładowania elektrostatyczne (ESD) oraz energie o częstotliwościach radiowych [5].

#### Kategoria 4 – zapalniki samoistnie bezpieczne

##### Zapalniki z wybuchającym mostkiem drutowym (EBW)

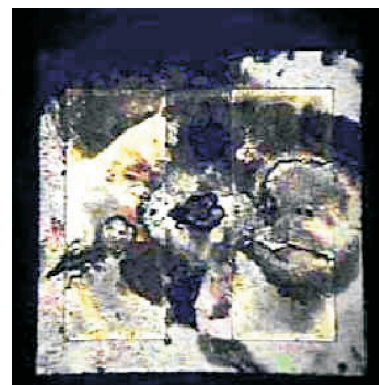
Trzeci rodzaj zapalników stosowanych w górnictwie naftowym to urządzenia z mostkiem wybuchowym. Ten rodzaj zapalnika nie zawiera pierwotnych (inicjujących) materiałów wybuchowych, co jest istotnym czynnikiem w zwiększaniu ogólnego bezpieczeństwa. Rysunek 8 przedstawia schemat typowego zapalnika typu EBW (*Exploding*



a) Widok mostka z góry



b) Krzemowe złącze mostka podczas odpalania



c) Fotografia odpalonego urządzenia

Rys. 7. Ilustracje mostka półprzewodnikowego w formie schematu: w momencie odpalania i po odpaleniu urządzenia [4]

Bridge Wire). Zasada działania zapalnika tego typu jest inna niż w przypadku zapalnika z mostkiem drutowym – zamiast cieplnego wywoływania zapłonu, zapalnik EBW inicjuje od bezpośredniego udaru. Realizuje się to poprzez nala-dowanie wgłębnego zespołu odpalającego do wysokiego napięcia, typowo wynoszącego od około 1000 do 3000 V. W odpowiednim czasie odpalania, energia zmagazyno-wana w zespole odpalania jest rozładowywana w ciągu mikrosekundy, powodując przepływ przez drut mostka ogromnego prądu elektrycznego. Przepływ tego prądu ma tak wielkie natężenie i szybkość, że powoduje eksplozję drutu i wysłanie fali uderzeniowej (rzędu 117 MPa) do materiału wybuchowego. Poprzez staranny dobór typu materiału wybuchowego i jego gęstości, energia fali ude-rzeniowej jest wystarczająco duża do pobudzenia detonacji wtórnego materiału wybuchowego.

Zapalniki z folią wybuchową (EFI – Exploding Foil Initiator)

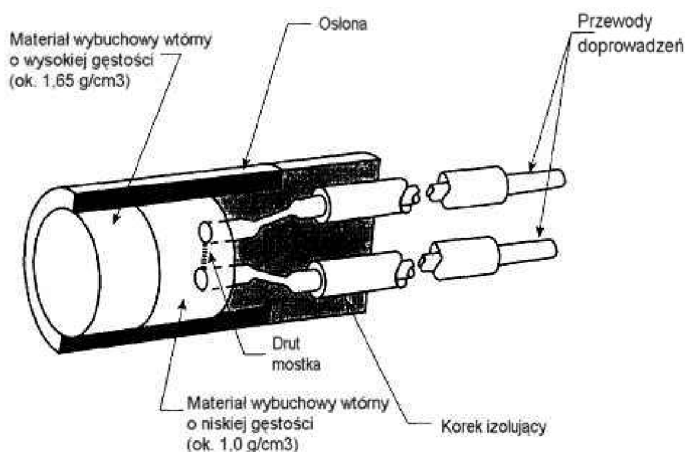
Zapalniki typu EFI są podobne do zapalników EBW w tym, że one również wymagają olbrzymich ilości energii elektrycznej do pobudzenia wtórnych materiałów wybucho-wych, zaś różnią się sposobem w jaki energia ta jest przeka-zywana do materiału wybuchowego. Jak opisano powyżej, zapalnik typu EBW dostarcza energię poprzez bezpośredni udar, pochodzący od eksplodującego drutu. W przypadku zapalnika EFI energia elektryczna powoduje wybuch mostka foliowego, który ścina sąsiadującą membranę z tworzywa sztucznego w celu utworzenia „lotki” (jak pokazano na rysunku 10). Ta lotka jest przyspieszana na długości bębna do prędkości sięgających 3000 m/s (8,8 Macha) przez roz-prężające się gazy, pochodzące z eksplodującej folii. Lotka uderza następnie w pastylkę wtórnego materiału wybucho-wego, z energią uderzenia sięgającą około 11,7 GPa, co wy-starcza do bezpośredniego pobudzenia wtórnego materiału wybuchowego. Podobnie jak w przypadku zapalnika EBW, zapalnik EFI do działania wymaga wysokonapięcio-wego, pojemnościowego, wyładowczego zespołu odpalającego. Napięcia robocze wynoszą typowo od 2000 do 3000 V, a w celu uzyskania detonacji czas rozładowania zespołu odpalającego EFI musi wynosić około 1/2 mikrosekundy, czyli dwukrotnie krócej niż w przypadku zespołu odpalającego zapalnika EBW.

Ze względu na parametry transmisji elektrycznej, wgłębne zespoły odpalające zarówno zapalników EBW jak i EFI – muszą znajdować się w bliskiej odle-głości od zapalnika. Powoduje to, że zespół odpalający jest narażony na uszkodzenie udarowe (od wybuchu), co rodzi kwestie niezawodności; w rzeczywistości niektórzy producenci układów EBW i EFI stosują zespoły odpalające, które – w celu zagwarantowania

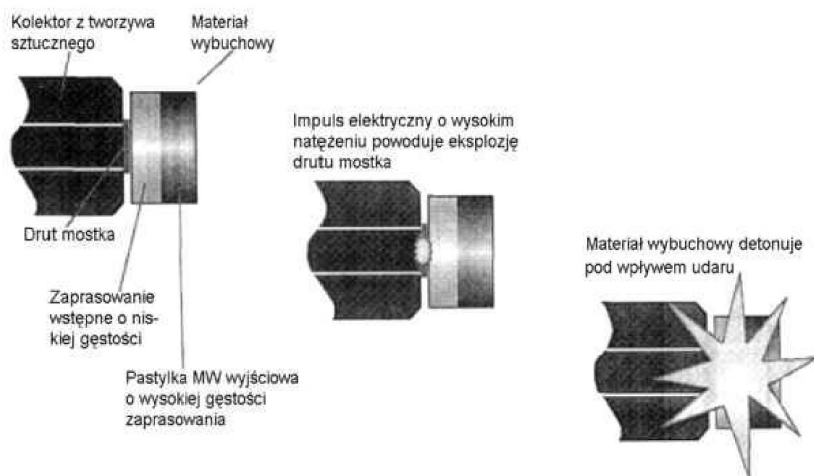
niezawodności działania – zintegrowane są w zapalniku i ulegają zniszczeniu przy każdym odpaleniu. W wyniku tego koszt systemów EBW i EFI jest bardzo wysoki. Ponadto niektóre układy typu EFI wyma-gają stosowania specjalnych paneli odpala-jących na powierzchni, co jeszcze bardziej zwiększa koszty ich stosowania.

W tabelicy 1 zestawiono właściwe dla danego zapalnika cechy charakterystyczne i ograniczenia stosowania czterech typów elektrycznych urządzeń strzałowych. Z tabeli tej jasno wynika, że obecne urządzenia nie są w stanie zaoferować łącznie atry-butów opłacalności, niezawodności oraz zwiększonego bezpieczeństwa.

Największa moc nie powodująca odpalania

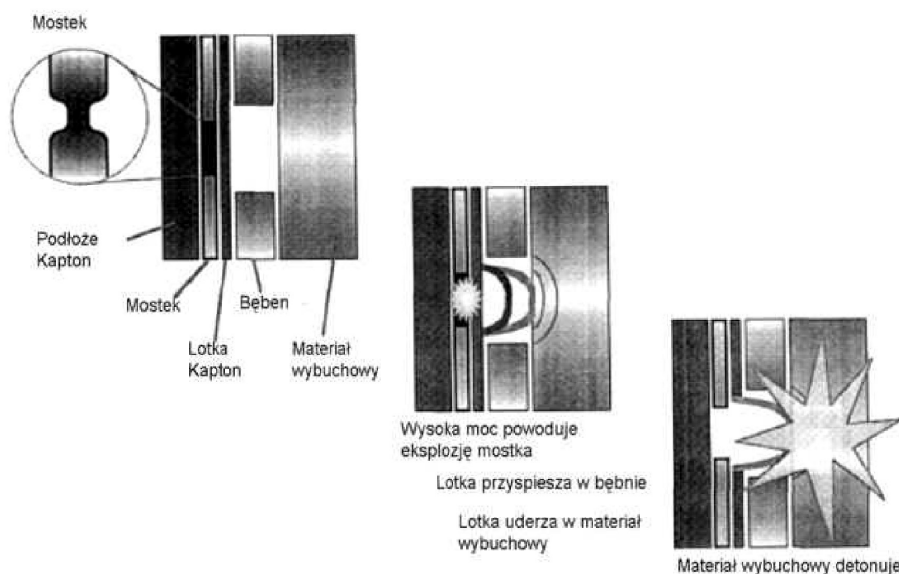


Rys. 8. Zapalnik z mostkiem wybuchowym [3]



Rys. 9. Sekwencja zadziałania zapalnika z wybuchającym mostkiem drutowym (EBW) [6]





Rys. 10. Zapalnik z folią wybuchową – sekwencja zadziałania [6]

W przypadku gdy wymagane jest uchylenie wyłączenia radia/radaru, wówczas należy porównać indukowaną moc dla najgorszego przypadku – z mocą nie powodującą odpalenia stosowanego zapalnika elektrycznego.

Konwencjonalne zapalniki elektryczne z dwoma rezystorami wykazują wyraźny margines bezpieczeństwa w porównaniu z podobnymi zapalnikami bez takich rezystorów. Użycie filtra RF w zapalniku elektrycznym poprawia margines bezpieczeństwa o kolejny rząd wielkości i jest stosowane, gdy występuje

Tablica 1. Porównanie ograniczeń i kosztów elektrycznych urządzeń strzałowych

Urządzenie	Zasadnicza wada	Względny koszt
Z drutem grzejnym	Zawiera pierwotne (inicjujące) materiały wybuchowe, urządzenie jest względnie czułe	Niski
Z rezystorami	Zawiera pierwotne (inicjujące) materiały wybuchowe, urządzenie jest względnie czułe	Niski
Z mostkiem wybuchającym	Wymaga stosowania wglębnego wysokonapięciowego zespołu odpalającego	Wysoki
Z folią wybuchową	Wymaga stosowania wglębnego wysokonapięciowego zespołu odpalającego	Wysoki

Bezpieczeństwo prac strzałowych w odniesieniu do prądów błądzących zależy od „mocy nie powodującej odpalenia” dla stosowanych zapalników elektrycznych. Moc nie powodująca odpalenia jest to parametr definiowany jako średnia statystyczna i reprezentuje moc o 6 wartości odchylenia standardowego mniejszą od mocy odpalającej dla zapalnika elektrycznego. Skutecznie oznacza to moc, która może być bezpiecznie zaabsorbowana przez zapalnik.

Można rozważać trzy różne typy zapalników elektrycznych stosowanych w perforacji na kablu strzałowym, jeżeli chodzi o poziomy mocy nie powodującej odpalenia:

Typ zapalnika elektrycznego	Moc nie powodująca odpalenia
bez rezystorów bezpieczeństwa	0,01–0,04 W
z rezystorami bezpieczeństwa (2×27 Ω)	2,0–4,8 W
z filtrami RF	20 W (dla częstotliwości RF > 20 MHz)

znaczna moc nadawania (o częstotliwości radiowej powyżej 20 MHz). Jednak w przypadku prądów błądzących pochodzących od źródeł prądu stałego lub przemiennego o niskiej częstotliwości, zastosowanie filtrów RF nie przynosi żadnej poprawy bezpieczeństwa w porównaniu do zapalników z rezystorami bezpieczeństwa.

#### Określanie indukowanej mocy o częstotliwości radiowej

Czynnikami określającymi najgorszy przypadek indukowanej energii o częstotliwościach radiowych, dla kabla strzałowego-geofizycznego zawieszony w wieży wiertniczej, są parametry wymienione poniżej:

$P_r$  – moc odbierana w antenie utworzonej przez kabel strzałowy,

$G_r$  – wzmacnienie anteny odbiorczej utworzonej przez kabel strzałowy,

$r$  – odległość nadajnika radiowego od kabla strzałowego,

$F_m$  – częstotliwość nośna nadajnika radiowego [MHz],

ERP – skuteczna moc promieniowana anteny nadawczej.

Czynniki te są powiązane ze sobą poprzez następujące równanie:



$$P_r = G_r \cdot ERP \frac{24}{r \cdot F_m} \quad (1)$$

Z wyrażenia tego wynika, że moc, która może być odebrana w antenie utworzonej przez kabel strzałowy zmniejsza się szybko ze wzrostem odległości i częstotliwości nośnej – pozostając w proporcji do mocy nadawanej. Współczynnik  $G_r$  opisuje wpływ pola o częstotliwości radiowej na antenę utworzoną z kabla.

Równanie (1) jest ważne dla części pola znajdującej się w dużej odległości od źródła promieniowania, gdzie nadawanie radiowe działa w sposób powszechnie rozumiany i gdzie wypromieniowana energia jest przenoszona w kierunku od anteny nadawczej. Jednak równanie (1) nie jest spełnione w rejonie bliskim nadajnika, w którym oprócz pola energii elektromagnetycznej o częstotliwości radiowej występuje dodatkowo pole magnetyczne i pole elektryczne, nie będące jednak w fazie z polem elektromagnetycznym. Natężenie tych pól zanika znacznie szybciej niż natężenie pola elektromagnetycznego, ponadto nie przenoszą one energii na duże odległości od anteny nadawczej do otwartej przestrzeni, ale mogą ją nadal dostarczać do anteny znajdującej się w tym rejonie – jakkolwiek mniejszą od tej przewidywanej teorią dla pola oddalonego, na której opiera się równanie (1).

### **Zapalnik typu RED (działający w środowisku wiertni) [3]**

Przedsiębiorstwo Jet Research Center opracowało bezpieczny zapalnik należący do kategorii 3. Bazując na doświadczeniach zebranych z projektowania zapalników typu EBW i EFI uznano, że – w celu wyeliminowania wglębnego zespołu odpalającego – poziom mocy wymaganej do zainicjowania dołączonego zapalnika elektrycznego wymagałby znacznego zmniejszenia; i odwrotnie – przyjęto również, że ta moc nie może być na tyle niska, aby umożliwiać zainicjowanie urządzenia przez prądy błądzące. Próbuąc zrównoważyć te kwestie zdecydowano się przebadać nowe urządzenie inicjujące stosowane w samochodowych poduszkach powietrznych, zwane mostkiem półprzewodnikowym (SCB). Mostek półprzewodnikowy jest względnie nowym komponentem stosowanym do inicjowania materiałów wybuchowych – około 30-krotnie mniejszym niż mostek drutowy stosowany w zapalniku z mostkiem drutowym. Mostek półprzewodnikowy do działania wymaga małego obwodu rozładowania pojemnościowego – co czyni go wysoce pożądanym w budowie nowego zapalnika, jako że taki obwód mógłby być wykorzystywany nie tylko do odpalania, ale również do

zabezpieczania przed zagrożeniami występującymi w środowisku wiertni.

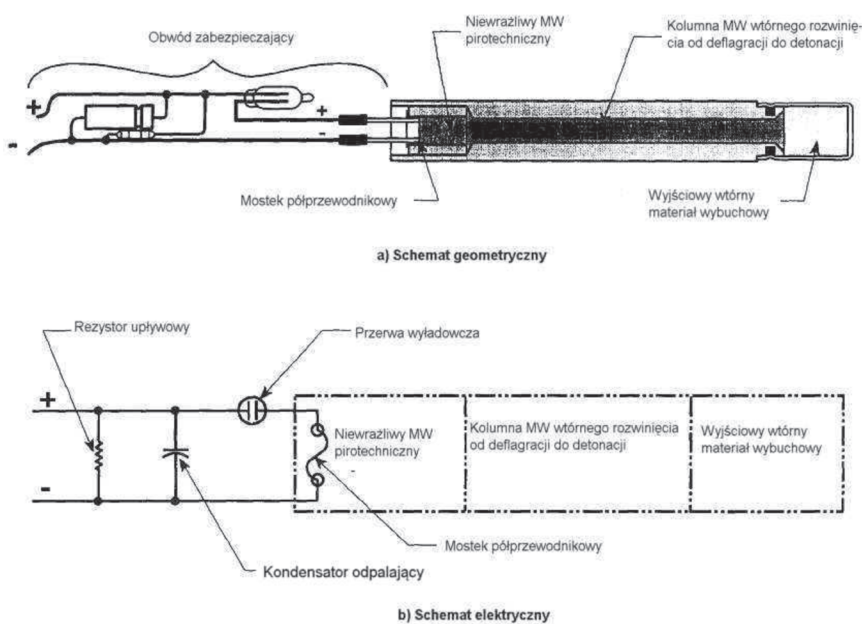
Dokonany przegląd powszechnie stosowanych w przemyśle zapalarek oraz znajomość ograniczeń napięciowych dla kabli karotażowych-strzałowych wskazały, że górne napięcie robocze obwodu wyładowczego mostka półprzewodnikowego powinno być ograniczone do 160 V prądu stałego. Jest to napięcie wynoszące 10% napięcia wymaganego w układach zapalników EBW lub EFI – co oznacza, że elektronika obsługi mostka półprzewodnikowego może być znacznie prostsza, mniejsza i tańsza niż w przypadku powyższych zapalników. Ograniczenie wartości napięcia od dołu określono – opierając się na względach wynikających z oceny zagrożeń powstających w środowisku wiertni – na 120 V prądu stałego.

Po określeniu w taki sposób granicznych wartości napięcia, zadanie skupiło się na znalezieniu nieczułego materiału wybuchowego, który mógłby być zainicjowany przez obwód wyładowczy mostka półprzewodnikowego pracujący w zakresie napięcia od 120 do 160 V. Ponadto, w celu zapewnienia obsługi wymagań temperaturowych większości otworów wiertniczych na całym świecie, zdecydowano się dobrać materiał wybuchowy o odporności temperaturowej wynoszącej co najmniej 190°C przez jedną godzinę. Materiałem, który spełnia to wymaganie (i nie jest materiałem inicjującym-pierwotnym) jest HMX – cyklotetrametyleno-tetranitroamina. Materiał ten wypróbowano w urządzeniach z mostkiem półprzewodnikowym, ale ze słabym powodzeniem; choć możliwe było jego zainicjowanie, to niezawodne odpalenie wymagało zastosowania napięcia przekraczającego 160 V, co zasadniczo odrzucało wymóg obniżenia progu energii przez zapalnik. Zdecydowano się więc na wypróbowanie jako materiału wybuchowego nieczulej mieszaniny pirotechnicznej podwodorku tytanu/nadchloranu potasu (THKP). Materiał ten jest wyjątkowo nieczuły na normalne zagrożenia stosowania, natomiast jest łatwo inicjowany mostkiem półprzewodnikowym. Po szeregu prób i przybliżeń stwierdzono, że zainicjowany THKP może być stosowany w styku z kolumną HMX, aby niezawodnie osiągnąć detonację w procesie przejścia od deflagracji do detonacji. Badania doświadczalne wykazały, że krytycznymi parametrami w tym względzie są: uziarnienie, gęstość oraz zamknięcie materiału HMX.

### Zasada działania

Na rysunkach 11a i 11b przedstawiono schematy geometryczne i elektryczne zapalnika RED. Odpalenie realizowane jest przez zadanie na przewody zapalnika

dotadniego napięcia prądu stałego. Gdy to nastąpi, mały kondensator odpalający wewnątrz zapalnika ładuje się do momentu, gdy stała przerwa iskrowa ulegnie przebiciu (pomiędzy 126 i 154 V). Przy wyładowaniu poprzez tą przerwę następuje gwałtowny przepływ prądu przez mostek półprzewodnikowy, co następnie powoduje jego odparowanie. Bardzo gorące gazy plazmowe, wygenerowane poprzez odparowanie mostka (około 5200°C), powodują zapalenie się nieczułego materiału pirotechnicznego, a to z kolei powoduje zapoczątkowanie reakcji deflagracji w sąsiadującej kolumnie wtórnego materiału wybuchowego. Deflagracja rozwija się w tej kolumnie i następnie przechodzi w detonację, dzięki specjalnej budowie rury deflagracyjno-detonacyjnej. Reakcja detonacji zostaje przeniesiona na inne elementy łańcucha balistycznego, takie jak lont detonujący i ładunki kierunkowe. W przypadku niewypału, rezystor upływowy w obwodzie służy do rozładowania kondensatora, a następnie rozbrojenia urządzenia. Czas rozbrojenia wynosi około 5 sekund.



Rys. 11. Zapalnik typu RED do pracy w środowisku wiertni – schemat geometryczny i elektryczny [3]

Zapalnik RED może być odpalony za pomocą standardowych zapalarek napowierzchniowych, poprzez uaktywnienie w pierwszej kolejności wyłączników odpalania, a następnie zwiększanie napięcia od 0 do około 160 V DC (prądu stałego) w ciągu około 2–3 sekund. Zapalnik RED odpali w trakcie nagłego przyrostu napięcia do wartości 160 V DC, w zakresie pomiędzy 126 a 154 V (napięcie nominalne wynosi 140 V DC). Zapalnik ten jest czuły na biegunowość napięcia, dlatego też, by mógł on prawidłowo

działać, dodatnie napięcie musi być przyłożone na dodatni przewód zapalnika.

Ponieważ zapalnik RED jest urządzeniem inicjowanym napięciowo, idealnie nadaje się on do operacji związanych z użyciem kabli geofizycznych o dużej rezystancji, albo w gorących, głębokich otworach, gdzie pojawiają się efekty indukowanego termicznie wzrostu rezystancji w długich liniach strzałowych. W takich sytuacjach przepływ prądu w kablu strzałowym jest utrudniony, co często stanowi problem operacyjny w przypadku urządzeń inicjowanych prądowo, takich jak zapalniki z mostkiem drutowym lub oporowe. Z uwagi na swoją unikatową metodę działania, zapalniki RED pozwalają całkowicie wyeliminować ten problem.

#### Dostępne konfiguracje

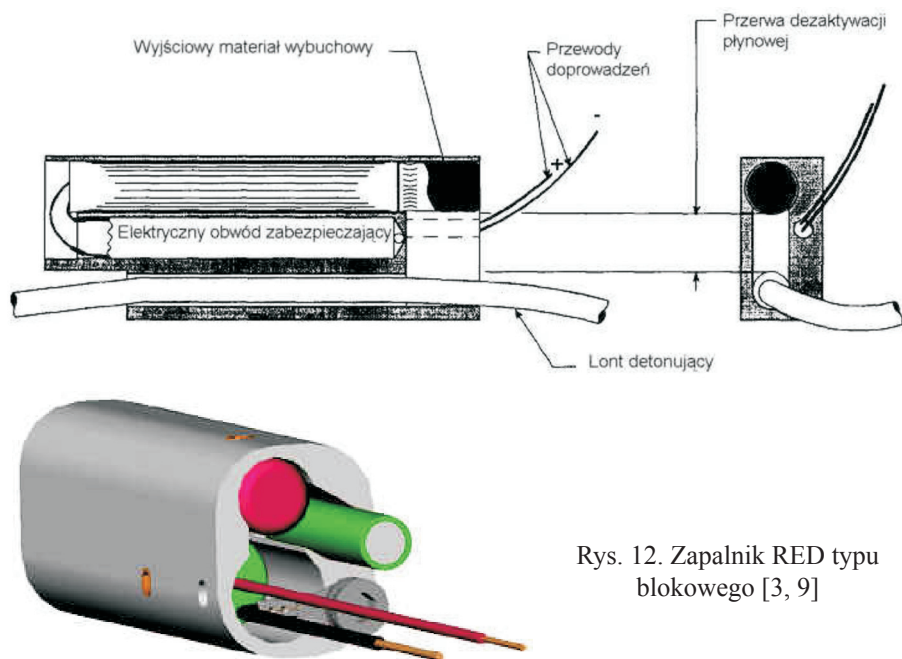
Z uwagi na dużą różnorodność zastosowań materiałów wybuchowych, środowisk pracy i współpracujących urządzeń, rodzina zapalników RED rozwinęła się w trzy różne konfiguracje. Są to:

- 1) odpalana od dołu wersja blokowa,
- 2) wersja odpalana od góry,
- 3) wersja do perforatorów z ładunkami zamkniętymi.

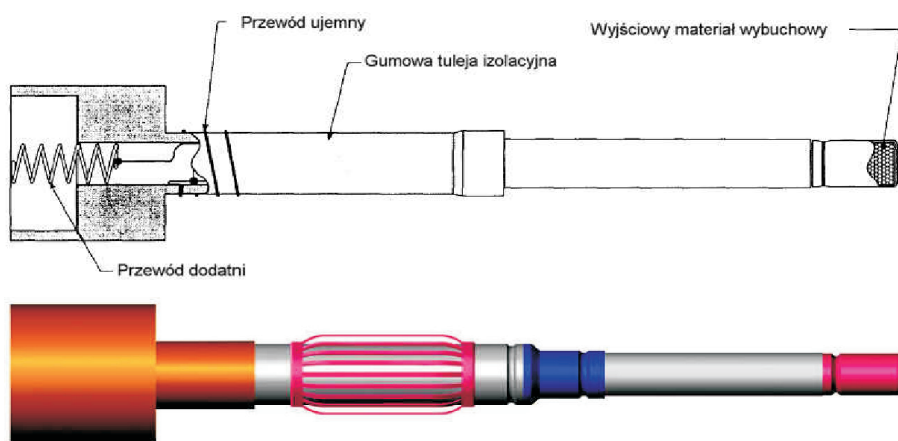
Wersje te przedstawiono odpowiednio na rysunkach 12, 13 i 14.

Zapalnik RED typu blokowego jest stosowany w perforatorach korpusowych odpalanych od dołu (ogólnie z korpusem przeznaczonym do wielokrotnego stosowania). Jego odporność termiczna wynosi 190°C przez 1 godzinę, a po zanurzeniu w płynie ulega dezaktywacji. Jest przeznaczony do współpracy z lontem detonującym o gęstości zaprasowania materiału RDX lub HMX 80 gram/stopę (17 g/m). Długości przewodów zapalnika wynoszą 18 cali (0,46 m), przewód czerwony to biegun dodatni, a czarny to biegun ujemny.

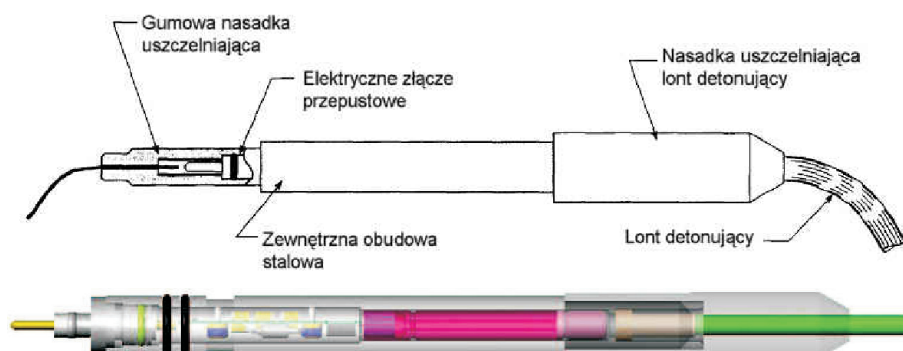
Zapalnik RED typu odpalnego od góry jest stosowany przede wszystkim w odpalanych od góry perforatorach korpusowych, jak również w obcinaczach rur okładzinowych i wydobywczych. Odporność termiczna tej wersji wynosi 190°C przez jedną godzinę. Centralny przewód sprężysty jest biegunem dodatnim, zaś przewód zewnętrzny jest ujemny. Wersja odpalana od góry jest wersją najbardziej wszechstronną, ponieważ może ona być stosowana we wszystkich obcinaczach rur wydobywczych i okładzino-



Rys. 12. Zapalnik RED typu blokowego [3, 9]



Rys. 13. Zapalnik typu RED odpalany od góry [3, 9]



Rys. 14. Zapalnik RED typu zamkniętego [3, 9]

Zapalnik RED typu zamkniętego to zapalnik wysokociśnieniowy, wysokotemperaturowy, wykorzystywany w zastosowaniach otwartych na oddziaływanie środowiska roboczego, takich jakie występują w perforatorach bezkorpusowych. Środkowy hermetyczny styk jest biegunem dodatnim, a obudowa to biegun ujemny. Ta wersja ma odporność 190°C i 103 MPa przez jedną godzinę.

**Porównanie względnego bezpieczeństwa różnych rozwiązań**

Względne bezpieczeństwo różnych typów elektrycznych urządzeń strzałowych można porównać przez obliczenie progowej mocy chwilowej wymaganej do odpalenia tego urządzenia. Dla urządzeń inicjowanych prądowo, takich jak zapalniki z mostkiem drutowym i oporowe, moc chwilowa jest obliczana ze wzoru  $P = I^2 R$ , gdzie  $I$  jest minimalnym prądem odpalającym, zaś  $R$  to nominalna rezystancja obwodu mostka. W przypadku zapalników, które są odpalane poprzez wyładowanie pojemnościowe (takich jak urządzenia EBW i EFI), moc jest obliczana ze wzoru  $P = E/t$ , gdzie  $E$  jest energią zmagazynowaną w kondensatorze ( $E = \frac{1}{2} CV^2$ ), natomiast  $t$  oznacza czas, w jakim ta energia zostaje dostarczona. Obliczeniowe progi mocy chwilowej dla typowych urządzeń zestawiono w tabelicy 2.

Korzystając z wyników tego porównania można stwierdzić, że względny wskaźnik bezpieczeństwa dla zapalników oporowych jest ponad 50-krotnie większy

wych, ładunkach o działaniu pionowym (do rozbijania przeszkód) oraz w przyrządach do rozdzielania połączeń przewodu wiertniczego, jak również w perforatorach korpusowych z osłabieniami korpusu od wielkości 1<sup>9</sup>/<sub>16</sub> do 7 cali.

niż w przypadku urządzeń z mostkiem drutowym, zaś w przypadku zapalnika typu RED – 13-krotnie przewyższa wskaźnik dla zapalnika oporowego. Warto podkreślić, że zapalniki z drutem grzejnym były bezpiecznie wykorzy-



Tablica 2. Porównanie mocy progowych niezbędnych do zainicjowania różnych elektrycznych urządzeń strzałowych [3]

Urządzenie	$I$ [A]	$R$ [Ω]	$C$ [F]	$V$ [V]	$E$ [J]	$t$ [s]	Moc progowa	Względne bezpieczeństwo
Mostek drutowy	0,5	1					0,25 W	1
Oporowe	0,5	55					13,8 W	55
RED	-	-	$20 \times 10^{-6}$	16,73	$2,8 \times 10^{-3}$	$15 \times 10^{-6}$	187 W	748
EBW	-		$1,0 \times 10^{-6}$	500	0,125	$1 \times 10^{-6}$	125 kW	$5 \times 10^5$
EFI	-	-	$0,66 \times 10^{-6}$	1500	0,74	$0,5 \times 10^{-6}$	1,5 MW	$6 \times 10^6$

stywane w pracach strzałowych górnictwa naftowego przez ponad 40 lat – przy niewielkiej ilości stwierdzonych wypadków, z których większość można przypisać błędowi człowieka. Niemniej jednak, wprowadzenie urządzeń strzałowych, które z racji swojej budowy wymagają do odpalenia większej mocy zmniejsza prawdopodobieństwo zajścia wypadków wskutek oddziaływania zagrożeń elektrycznych i elektromagnetycznych. Jest to szczególnie

istotne w warunkach współczesnego środowiska pola naftowego, gdzie zagrożenia elektryczne w podłożu oraz pochodzące od środków łączności są znacznie wyższe niż miało to miejsce jeszcze kilkanaście lat temu.

Jak pokazano w tablicy 2, moce progowe dla zapalników typu EBW i EFI są tak wysokie, że bezpieczeństwo ich stosowania nie podlega dyskusji. Jak jednak wcześniej stwierdzono, ich podstawową wadą jest bardzo wysoki koszt.

Artykuł nadesłano do Redakcji 24.05.2010 r. Przyjęto do druku 23.06.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

## Literatura

- [1] *Safety guide for the prevention of radio frequency radiation hazards in the use of Commercial electric detonators*, publikacja Institute of Makers of Explosives, Waszyngton, USA, lipiec 2001.
- [2] *Recommended Practices for Radio Silence when Conducting Wireline Services Involving the Use of Explosives*, Institute of Petroleum, Londyn, październik 1984.
- [3] Motley, M., Barker, J.: *Unique electrical detonator enhances safety in explosive operations: Case histories*. Publikacja SPE nr 36637, 1996.
- [4] Baginski, T.A., Thomas, K.A.: *A RF – Insensitive Electro-Explosive Device with 500 V Standoff Capability*. Wydawnictwo IEEE, 2008.
- [5] Bickes, R.W., Jr., Greenway, D. i in.: *HERO Resistant Semiconductor Bridge Igniter*, JANNAF Interagency Propulsion Committee Combustion Meeting, Hampton, Virginia (19–23 październik, 1992).
- [6] McAfee J.M.: *Characterization of High-Explosive Initiation and Safety at Los Alamos*. Journal de Physique IV, Colloque C4, supplement au Journal de Physique III, Volume 5, maj 1995.
- [7] Dicks, R.: *Explosives Safety: Safety Strategies for Operating Electroexplosive Devices in Radio-Frequency Environment*. Publikacja SPE 74178, 2002.
- [8] Huber, K.B., Pease, J.M.: *Safe Perforating Unaffected by Radio and Electric Power*, publikacja SPE 20635, 1990.
- [9] RED® RF Safe Detonators. Karta katalogowa Jet Research Center.



Mgr inż. Antoni FRODYMA – absolwent Wydziału Wiertniczo-Naftowego AGH w Krakowie. Pracuje w Zakładzie Techniki Strzelniczej Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie jako starszy specjalista inżynierjno-techniczny, zajmując się konstruowaniem sprzętu strzałowego do otworów wiertniczych i technologią jego stosowania. Współautor kilku patentów i wzorów użytkowych.