

ANNA SOŁTYS

**Metodyka doboru opóźnień milisekundowych  
w celu minimalizacji oddziaływania drgań  
wzbudzanych robotami strzałowymi na obiekty budowlane**

## **Streszczenie**

Przedmiotem niniejszej monografii jest problematyka doboru opóźnień milisekundowych z zastosowaniem programów komputerowych wspomagających projektowanie robót strzałowych. Pozwala to na pełne wykorzystanie do urabiania skał najnowocześniejszych systemów odpalania ładunków MW.

W pierwszych rozdziałach przedstawiono rys historyczny technologii wykonywania robót z użyciem materiałów wybuchowych ze szczególnym uwzględnieniem strzelania milisekundowego i postępu technicznego, jaki dokonywał się na świecie w zakresie systemów inicjowania ładunków MW. Wprowadzenie metody długich otworów, zwłaszcza w kopalniach odkrywkowych, w otoczeniu których znajdują się zabudowania mieszkalne, nasiliło potrzebę poszukiwania nowych sposobów odpalania ładunków. Dlatego w latach 40. ubiegłego stulecia w Stanach Zjednoczonych wdrożono strzelanie milisekundowe, co pozwoliło z jednej strony na zmniejszenie oddziaływania robót strzałowych na otoczenie, a z drugiej na poprawę efektywności pracy MW przez współpracę między ładunkami odpalonymi w odstępach czasu. W tym samym kraju przeprowadzono również pierwsze badania nad oddziaływaniem robót strzałowych na otoczenie i zasadnością wprowadzenia strzelania milisekundowego. Dzięki temu – w późniejszym okresie – wypracowano reguły i procedury, które do dziś stanowią podstawę dla projektujących roboty z użyciem MW. Rezultatem przeprowadzonych prac badawczych było wytyczenie kierunków rozwoju systemów inicjowania ładunków MW oraz zmian w technologii materiałów wybuchowych i w technice prowadzenia robót strzałowych.

Analiza historycznych badań nad opóźnieniami milisekundowymi przeprowadzonych w Polsce w latach 80. i 90. ubiegłego stulecia wyraźnie wskazuje na zależność struktury drgań wzbudzanych w czasie robót strzałowych od jakości podłoża. Zwraca także uwagę na możliwość modyfikacji struktury tych drgań przez dobór odpowiedniego opóźnienia milisekundowego. W pracach badawczych nad opóźnieniem milisekundowym wprowadzono – po

raz pierwszy w Polsce – odpalenie pojedynczych ładunków MW jako sposób na budowanie bazy danych o strukturze drgań wzbudzanych w różnych punktach w otoczeniu kopalń (metoda *signature hole*). Zauważono również, że przez zmianę struktury drgań podłoża można wpływać na mechanizm przenoszenia drgań do fundamentu budynku. Jest to kluczowy wniosek w kontekście minimalizacji i prowadzenia ocen oddziaływania drgań wzbudzanych robotami strzałowymi na budynki, z zastosowaniem polskiej normy i skal SWD. Wnioski płynące z tych badań były genezą i ważnym argumentem przemawiającym za wyborem tematyki badawczej przedstawionej w monografii.

W ostatnich latach w prowadzeniu robót strzałowych zaszły bardzo istotne zmiany zarówno technologiczne, jak i organizacyjne. Należy zwrócić szczególną uwagę na rozwój systemów odpalania ładunków MW. Postęp ten był ukierunkowany na stworzenie możliwości odpalania jak największej liczby ładunków w seriach, regulowanie schematu odpalania w celu uzyskania odpowiedniej granulacji urobku oraz minimalizację oddziaływania na otoczenie. Przejście od systemu lontowego do elektrycznego, później nieelektrycznego, a kończąc na elektronicznym umożliwia osiągnięcie wskazanych powyżej celów. Najnowocześniejsze systemy elektroniczne charakteryzują się nie tylko bardzo wysoką precyzją inicjowania, ale przede wszystkim dają szerokie możliwości projektowania odpalania siatek wielootworowych pod kątem zarówno jakości urobku, jak i minimalizowania oddziaływania robót z użyciem MW na otoczenie. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu do projektowania robót strzałowych programów komputerowych, które w większości przypadków do symulacji wykorzystują metodę *signature hole*. Algorytm pracy tych programów pozwala na wyszukiwanie optymalnych rozwiązań w zakresie doboru opóźnień milisekundowych dla konkretnych warunków geologiczno-górnicznych i lokalizacji projektowanej siatki ładunków. W większości przypadków optymalizacja ta polega na badaniu wartości szczytowej prędkości drgań (PPV).

Jednakże uwzględniając specyfikę wymagań polskiej normy co do oceny oddziaływania drgań na budynki, należało wprowadzić do procedury projektowania dodatkowe analizy w dziedzinie czasu i częstotliwości (analiza tercjowa i analiza MP) oraz badania wartości wskaźnika WODB. To skutkowało opracowaniem innowacyjnej procedury wyboru optymalnego rozwiązania. Procedura ta została wykorzystana w ponad 100 projektach robót strzałowych, które zostały przeprowadzone w ramach realizowanego programu badawczego.

Bardzo ważnym elementem procesu projektowania odpalania serii ładunków MW jest weryfikacja przyjętego rozwiązania na podstawie pomiaru drgań w wybranym punkcie. Z jednej strony pozwala to na kontrolę wyników symulacji, a z drugiej strony na poszerzenie wiedzy i doświadczenia projektanta oraz systematyczne uzupełnianie bazy danych. Program z założenia oferuje szereg rozwiązań, z których projektant musi wybrać odpowiedni wariant. Jest to jeden z trudniejszych elementów projektowania, dlatego też dopracowanie procedury wyboru i opracowanie pewnych wskaźników czy współczynników ułatwia wybór rozwiązania, które spełni założenia przyjęte na wstępie. Prace badawcze z zastosowaniem programu do projektowania milisekundowego odpalania serii ładunków MW systemem elektronicznym przeprowadzono w dwóch kopalniach wydobywających różne surowce z wykorzystaniem istotnie różniących się techniki wykonywania robót strzałowych.

Należy jeszcze raz pokreślić znaczenie metody *signature hole*, czyli rozpoznania – na podstawie analizy efektu sejsmicznego odpalania pojedynczych ładunków MW – parametrów drgań propagowanych do otoczenia jako bazy dla programów komputerowych wspierających projektowanie robót strzałowych. Uwzględnienie w projekcie lokalnych warunków geologiczno-górnicznych kopalni i otoczenia, a także określenie charakterystyki i struktury wzbudzanych drgań oraz interakcji układu budynek–podłoże pozwalają na podniesienie jakości i bezpieczeństwa wykonywanych robót strzałowych.



ANNA SOŁTYS

**Methodology of selecting millisecond delays  
in order to minimize the impact of ground vibrations  
induced by blasting works on building structures**

## **Summary**

The subject of this monograph is the selection of millisecond delays using computer programs that support the design of blasting works. This allows for the full application of the most recent explosive charges firing systems for quarrying rocks.

The first chapters present a historical overview of the technology of carrying out works with the use of explosives, with a particular emphasis on the millisecond firing and the technical progress that has been made in the field of charges explosives initiation systems. The introduction of the long borehole method, especially in surface mines surrounded by residential buildings, intensified the need for exploration of new ways of firing charges. Hence, the millisecond firing was implemented in the United States in the 1940s. That allowed, on the one hand, to reduce the impact of blasting operations on the environment, and on the other hand, to improve the efficiency of explosives – through the cooperation between charges fired at intervals. The United States are also the country where first studies on the impact of blasting works on the environment and the validity of introducing millisecond firing were carried out. In the following years, rules and procedures were developed that are the basis for modern-day engineers designing works with the use of explosives. The analysis of this research has set the trends for the development of systems for initiating charges of explosives and changes in the explosives' as well as blasting works' technologies.

The analysis of historical research on millisecond delays that were carried out in Poland in the 1980s and 1990s clearly shows that the structure of vibrations induced during blasting works depends on the quality of the ground. It also indicates the possibility of modifying the structure of these vibrations by selecting the appropriate millisecond delay. In the research on the millisecond delay, the firing of single charges of explosives was introduced for the first time in Poland as a way to build a database of the structure of vibrations induced at various points in the vicinity of mines (signature hole method). It was also noticed that changing the structure of the ground vibrations has an impact on the mechanism of transferring vibrations to the building's foundation. This is a key conclusion in the context of minimizing and assessing the impact of vibrations induced by blasting works on buildings, with the application of the Polish standard and SWD scales. The conclusions drawn from these studies were the

genesis and the important argument in favor of choosing the research topic presented in the monograph.

Blasting operations have undergone significant technological and organizational changes in recent years. A particular attention should be paid to the development of firing systems for explosives' charges. This development was aimed at creating the option of firing the highest possible number of charges in series, regulating the firing pattern in order to obtain the appropriate fragmentation of the spoil and minimizing the impact on the environment. The transition from the detonating cord system, through the electric, non-electric, to the electronic one makes it possible to achieve the above goals. The most modern electronic systems are characterized not only by a very high precision of initiation, but most of all they provide a wide range of design options for multiple row firing patterns – in terms of both the quality of the excavated material and minimizing the impact of works with the use of explosives on the environment. It is possible due to the use of computer programs for the design of blasting works, which in most cases use the signature hole method for simulations. The algorithm of these programs allows to find the optimal solutions to the selection of millisecond delays for specific geological and mining conditions and the location of the designed pattern of charges. In most cases, this optimization is based on the study of the peak vibration velocity (PPV).

However, taking into account the specificity of the Polish standard's requirements regarding the assessment of the vibrations' impact on buildings, it was necessary to introduce to the design procedure additional analyses of time and frequency (1/3 octave filtering and MP algorithm) and testing the value of the WODB index. That resulted in the development of the innovative procedure for selecting the optimal solution. This procedure has been used in over 100 blasting projects that were carried out as part of the research program.

The verification of the adopted solution, based on the measurement of vibrations at a selected point, is a very important element of the process of design the firing of a series of explosives' charges. On the one hand it allows to control the simulation's results, on the other hand it expands the knowledge and experience of the designer and systematically supplements the database. By design, the program offers a number of solutions from which the designer must select the appropriate variant. It is one of more difficult elements of design, therefore the refinement of the selection procedure and the development of certain indicators or coefficients makes it easier to choose the solution that will meet the assumptions made at the beginning. Research works with the use of the program for designing the millisecond firing of a series of explosives' charges with an electronic system were carried out in two mines extracting various raw materials using significantly different techniques of blasting works.

The significance of the signature hole method should be emphasized once again, which is the recognition (based on the analysis of the effect of the seismic firing of single charges of explosives) of the vibration parameters propagated to the environment as the basis for computer programs supporting the design of blasting works. Inclusion of the local geological and mining conditions of the mine and its surroundings in the project, as well as determining the characteristics and the structure of induced vibrations and the interaction of the building-ground layout, allow to increase the quality and safety of the blasting works.