

Henryk Passia

ANEMOMETRIA LASEROWA DO STOSOWANIA W ATMOSFERZE WYBUCHOWEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiono strukturę i podstawowe charakterystyki metrologiczne anemometrów: laserowego-konwencjonalnego (typowego dopplerowskiego i interferencyjnego) oraz światłowodowego, opracowanych w Laboratorium Techniki Laserowej GIG. Na podstawie warunków geometrycznych prowadzenia skupionych wiązek laserowych w otoczeniu punktu pomiarowego oraz eksperymentalnie wyznaczonych charakterystyk sygnału pomiarowego w anemometrze dopplerowskim, przeprowadzono analizę potencjalnego zagrożenia wybuchowego wynikającego z występowania, w każdej z prezentowanych wersji urządzenia, skupionych wiązek laserowych w atmosferze wybuchowej, zawierającej cząstki ciała stałego unoszone przez medium, którego prędkość jest mierzona. Wykazano, że wielkość absorbowanej energii wiązki laserowej rozkłada się na około 10 000 cząstek, które mogą się jednocześnie znajdować w otoczeniu punktu pomiarowego konwencjonalnego anemometru laserowego. Powoduje to możliwość istotnego obniżenia jakiegokolwiek progu eksplozywności optycznej podawanego w literaturze. Podobne wnioski wyciągnięto w odniesieniu do anemometru światłowodowego, w którym obniżenie progu eksplozywności optycznej można uzyskać przez zmniejszenie mocy wiązki wyprowadzanej ze światłowodu i zwiększenie średnicy rdzenia światłowodu.

Laser anemometry in application for explosive atmosphere

Summary

The paper presents the structure and principal metrological characteristics of laser anemometers-conventional (typical Doppler and interference ones) and fibre-optic anemometer developed by the Central Mining Institute' Laser Technology Laboratory. On a basis of geometrical conditions of focused laser beams propagation in the surroundings of the measuring point, and of experimentally determined characteristics of the measuring signal in the Doppler anemometer, an analysis was performed of potential explosion hazard resulting from the presence, in each of the presented versions, of focused laser beams in the explosive atmosphere, containing airborne dust particles in the medium, the velocity of which is measured. It has been found that the amount of absorbed energy of the laser beam is distributed over ca. 10 000 particles that are simultaneously met in the vicinity of the measuring point of the conventional laser anemometer. This results in the possibility to depart considerably from any optical explosion limit quoted in the literature. Similar conclusions were drawn in relation to the fibre-optic anemometer, in which the effect of lowering the optical explosion limit can be obtained through reducing the power of the beam launched from the fibre, and through increasing the core diameter of the fibre.

1. WSTĘP

Na początku lat dziewięćdziesiątych w Laboratorium Techniki Laserowej GIG zakończono cykl badań, których wynikiem było opracowanie anemometru laserowego do stosowania w kopalniach zagrożonych wybuchem metanu. Anemometr ten, typu GAL 5, o konstrukcji ognioszczelnej został poddany próbom w kopalni i w warunkach

symulujących warunki kopalniane, w sztolni doświadczalnej Kopalni Doświadczalnej „Barbara”. W próbach tych porównano charakterystyki urządzenia uzyskane w czasie prób ze szczegółowymi charakterystykami metrologicznymi wyznaczonymi w warunkach laboratoryjnych.

Anemometr laserowy GAL 5 działa jako typowy anemometr dopplerowski, w którym prędkość przepływu wyznacza się z wielkości przesunięcia częstotliwości monochromatycznego promieniowania optycznego będącego konsekwencją rozpraszania tego promieniowania na makrocząstkach unoszonych wraz z poruszającym się medium – gazem lub cieczą. Oprócz tej wersji anemometru opracowano dwa rodzaje anemometrów interferencyjnych z rozpraszaniem wstecznym, w których prędkość przepływu wyznacza się z rejestracji czasu przejścia makrocząstek przez strukturę prążków interferencyjnych utworzoną przez dwie wiązki laserowe w ognisku soczewki głównej, a rejestrowaną jako zaburzenie tej struktury rzutowane wstecz, tj. w kierunku optycznego układu nadawczego. Charakterystyki obydwu rodzajów anemometrów dość szczegółowo omówiono w publikacjach autora i zespołu Laboratorium Techniki Laserowej GIG [1, 2].

W połowie lat dziewięćdziesiątych, w Laboratorium Techniki Laserowej, zaprojektowano anemometr światłowodowy. Zasadę działania tego anemometru, w którym wykorzystano efekt odginania sprężystej płytki pod wpływem ciśnienia wywieranego przez przepływające powietrze, przedstawiono w publikacji [3].

Konstrukcja anemometru typu GAL 5 (i jego modyfikacji), a także konstrukcja anemometru światłowodowego spełniają wymagania przeciwwybuchowości w zakresie zabezpieczenia obwodów elektrycznych tych urządzeń, czy to przez zastosowanie odpowiednich obudów nadajnika i detektora, czy też przez zastosowanie wyłącznie elementów optycznych (światłowodów) w atmosferze potencjalnie wybuchowej. Konstrukcje obydwu rodzajów anemometrów zostały opatentowane [4, 5].

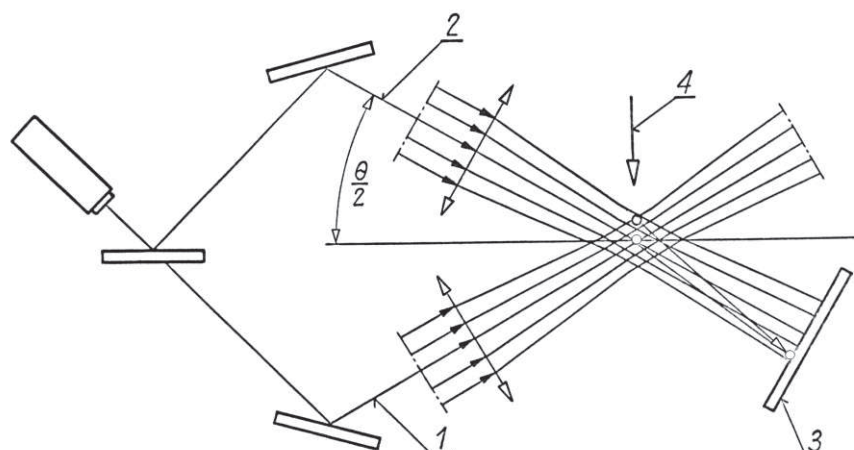
W publikacjach światowych w ostatnich latach analizowany jest jednak problem iskrobezpieczeństwa optycznego, w odniesieniu do występowania skupionych wiązek laserowych w atmosferze potencjalnie wybuchowej i jednocześnie zawierającej cząstki stałe, które mogą być skupionymi centrami absorbującymi energię optyczną, co może spowodować gwałtowny wzrost ich temperatury i ewentualnie wywołać zapalenie się mieszanki wybuchowej, w której te cząstki są unoszone. Przypadek występowania skupionych wiązek dotyczy zarówno „konwencjonalnego” jak i światłowodowego anemometru laserowego.

2. PODSTAWOWA STRUKTURA ANEMOMETRU KONWENCJONALNEGO I ŚWIATŁOWODOWEGO

Zasadę działania anemometru konwencjonalnego przedstawiono na rysunku 1. Uwidoczniono na nim przecinające się skupione wiązki laserowe tworzące punkt pomiarowy.

W anemometrze laserowym typu GAL 5, nadajnik laserowy i detektor umieszczone są w dwóch obudowach ognioszczelnych lasera miniaturowego LM 2. Jest to

możliwe dzięki zastosowaniu dodatkowych elementów kierujących wiązkę laserową wychodzącą z obudowy nadajnika laserowego [3].



Rys. 1. Podstawowa struktura anemometru dopplerowskiego: 1 – wiązka oświetlająca, 2 – wiązka referencyjna, 3 – powierzchnia fotokatody detektora, 4 – kierunek przepływu medium (cieczy lub gazu) unoszącego cząstki rozpraszające

Fig. 1. Basic structure of a Doppler anemometer: 1 – illuminating beam, 2 – reference beam, 3 – detector photocatode area, 4 – direction of flow of the medium (liquid or gas) carrying scattering particles

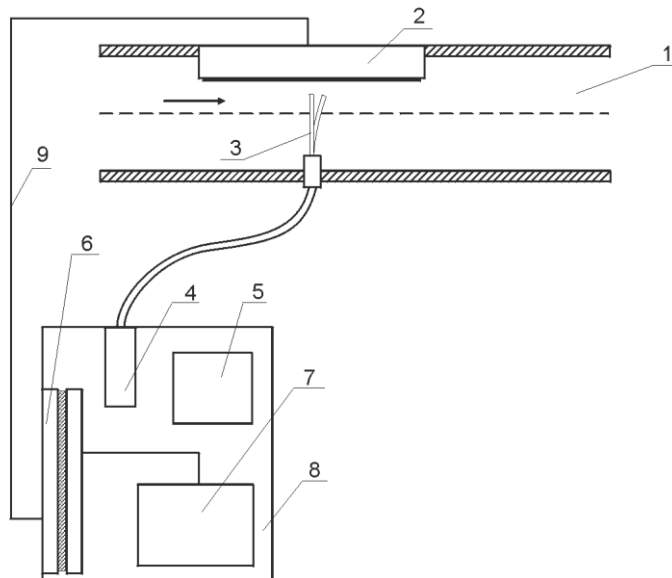
W modernizowanym obecnie anemometrze laserowym przeznaczonym do sterowania procesem spalania w kotłach ciepłowniczych opalanych metanem (typu GAL 5) zastosowano obudowy ognioszczelne nadajnika laserowego EW-3 produkowanego w Laboratorium Techniki Laserowej. Zamiast stosowanego dotąd lasera He-Ne zastosowano laser Nd:YAG (z kryształem KTP), emitujący drugą harmoniczną (SHG) o długości fali 532 nm.

W wersji dopplerowskiej anemometru laserowego jedna z wiązek, referencyjna, padając wprost na powierzchnię czynną detektora, jest osłabiana w przybliżeniu 100 razy, podczas gdy w anemometrze interferencyjnym podział mocy wiązek wynosi 1:1. Omówienie podstawowych wersji anemometru dopplerowskiego i interferencyjnego przedstawiono między innymi w publikacji [6].

Schemat anemometru światłowodowego przedstawiono na rysunku 2.

Widoczne są na nim podstawowe elementy anemometru: światłowód doprowadzający wiązkę laserową, płytka odginana przez przepływ powietrza i linijka światłowodowa odbierająca wiązkę odbitą.

We wszystkich wymienionych wyżej wersjach anemometru stosuje się laser o działaniu ciągłym (He-Ne lub Nd:YAG-SHG) o mocy wyjściowej poniżej 5 mW.



Rys. 2. Schemat anemometru światłowodowego: 1 – kanał pomiarowy, 2 – linijka światłowodowa, 3 – światłowód, 4 – nadajnik laserowy, 5 – układ zasilania, 6 – zestaw fotodetektorów, 7 – układ analizujący, 8 – obudowa, 9 – wiązka światłowodów

Fig. 2. Scheme of fibre-optic anemometer: 1 – measuring channel, 2 – linear fibre array, 3 – optical fibre, 4 – laser emitter, 5 – power supply unit, 6 – photodetector array, 7 – signal analysing unit, 8 – casing, 9 – bundle of fibers

3. PROPAGACJA WIĄZEK W OTOCZENIU PUNKTU POMIAROWEGO ANEMOMETRU DOPPLEROWSKIEGO

Z zasady działania anemometru dopplerowskiego (i interferencyjnego) wynika, że w punkcie pomiarowym, utworzonym przez dwie skupione wiązki, powinny znajdować się makrocząsteczki rozpraszające światło laserowe w kierunku detektora. Jak wspomniano, stosunek podziału mocy wiązek jest w przypadku anemometru dopplerowskiego i interferencyjnego inny.

Termin „makrocząstka” oznacz taką cząstkę, dla której spełniony jest warunek energetyczny

$$1/2 mv^2 \gg kT \quad (1)$$

gdzie:

- m – masa cząstki,
- v – prędkość cząstki (i przepływającego medium),
- k – stała Boltzmanna,
- T – temperatura bezwzględna.

W każdym przypadku większa część mocy z nadajnika laserowego jest doprowadzana do punktu pomiarowego, resztę stanowią straty na elementach pośrednich kierujących wiązką laserowe.

W przypadku anemometru światłowodowego nie jest wymagana obecność cząstek rozpraszających, jednak jego zasadniczym przeznaczeniem jest praca w atmosferze potencjalnie wybuchowej zawierającej cząstki rozpraszające.

Wynikiem analiz teoretycznych (np. [7]) jest matematyczny opis propagacji wiązki w ognisku soczewki.

W przypadku, gdy na idealną soczewkę pada w kierunku osi optycznej (z) wiązka o profilu gaussowskim i mocy całkowitej I_t , w ognisku otrzymuje się następujący rozkład natężenia wiązki

$$I(z,r) = I_t (\pi w_0^2 + \pi \alpha^2 z^2)^{-1} \exp - [r^2 / (w_0^2 + \alpha^2 z^2)] \quad (2)$$

gdzie:

$$\alpha = a/L,$$

a – promień plamki laserowej na soczewce,

r – odległość od osi z ,

L – ogniskowa soczewek,

w_0 – jest promieniem (e^{-1}) przewężenia wiązki w ognisku.

Zatem, w punkcie pomiarowym anemometru dopplerowskiego cząstka rozpraszająca znajduje się w strefie oddziaływania dwóch wiązek o gaussowskim rozkładzie natężenia.

Z warunków generacji sygnału dopplerowskiego wynika, że objętość pomiarowa, z której uzyskiwany jest sygnał jest elipsoidą o osiach [8]

$$x_D = 2w_0\tau/\cos\theta, y_D = 2w_0\tau/\sin\theta, z_D = 2w_0\tau \quad (3)$$

gdzie:

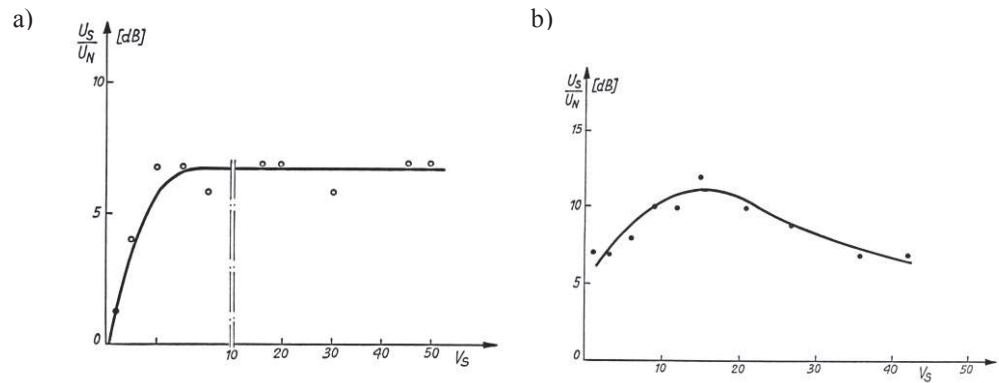
t – jest w przybliżeniu równe 2,

w_0 – jest w przybliżeniu równe długości fali wiązki lasera.

Wynika z tego, że największy wymiar elipsoidy wynosi około 40 μm . Wartość ta została potwierdzona przez autora w eksperymentalnej analizie szerokości połówkowej widm dopplerowskich. Ma ona istotne znaczenie w przypadku dalszej analizy możliwości przekazania większej części energii optycznej niesionej przez wiązkę laserową cząstkom znajdującym się w ognisku (punkcie pomiarowym). Lokalizację takiej cząstki przedstawiono schematycznie na rysunku 1.

Od liczby cząstek znajdujących się w objętości pomiarowej zależą parametry uzyskiwanego sygnału informacyjnego. Typowe zależności stosunku sygnału do szumu dla dwóch rodzajów wymiarów monodispersyjnych cząstek rozpraszających, o średnicach 0,8 i 0,45 μm , przedstawiono na rysunku 3. Widoczne jest na nim występowanie stanu nasycenia ze wzrostem liczby cząstek, w rezultacie konkurencyjnie działających procesów rozpraszania i absorpcji promieniowania optycznego.

W celu zilustrowania lokalności pomiaru za pomocą anemometru dopplerowskiego, na rysunku 4 przedstawiono profil prędkości laminarnego przepływu powietrza w rurze. Wykres ten wyraźnie ilustruje możliwości pomiarowe anemometru.

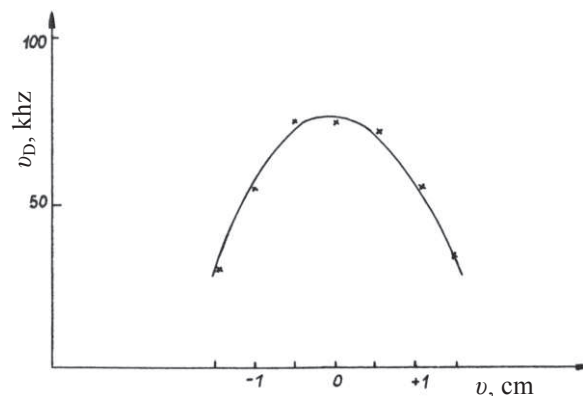


Rys 3. Eksperymentalna zależność stosunku sygnału dopplerowskiego U_S/U_N do szumu U_S/U_N dla cząstek o średnicach 0,8 i 0,45 μm ; standardowa objętość V_S zawiera około 10^7 cząstek

Fig. 3. Experimental relationship of Doppler signal to noise ratio U_S/U_N for particles with diameters of 0,8 μm and 0,45 μm respectively; standard volume V_S contains ca. 10^7 particles

Przedstawiona analiza oceny wielkości objętości pomiarowej została przeprowadzona dla wersji dopplerowskiej anemometru. Sposób wprowadzania wiązek do punktu pomiarowego w anemometrze interferencyjnym jest jednak zupełnie podobny (pomijając proporcje mocy wiązek), zatem należy uznać, że wielkość objętości pomiarowej jest w przybliżeniu ta sama.

W przypadku anemometru światłowodowego, obszar wzajemnego oddziaływania cząstek z wiązką laserową jest w przybliżeniu cylindrem o średnicy o średnicy równej średnicy rdzenia światłowodu i może wynosić w przybliżeniu 100 μm . Długość tego cylindra jest równa odległości między wyjściem światłowodu oświetlającego i linijką światłowodów rejestrujących.



Rys. 4. Zmierzony profil prędkości (wyrażonej w częstotliwości dopplerowskiej) przepływu powietrza w cylindrycznym kanale pomiarowym: r – odległość od osi kanałów

Fig. 4. Measured velocity profile (in terms of Doppler frequency) of the air flow in a cylindrical measuring channel: r – distance from the channel axis

4. ISKROBEZPIECZEŃSTWO OPTYCZNE A MOŻLIWOŚĆ PRZEKAZANIA ENERGII WIĄZKI LASEROWEJ CZĄSTKOM ZNAJDUJĄCYM SIĘ W OBJĘTOŚCI POMIAROWEJ ANEMOMETRU

W ostatnich latach prowadzi się zakrojone na szeroką skalę badania (mając na uwadze liczbę pojawiających się publikacji) nad potencjalnym efektem wybuchowym, który może spowodować skupiona wiązka laserowa przechodząca przez atmosferę wybuchową i zaabsorbowana przez cząstkę ciała stałego znajdującą się w jej ognisku. Efekt ten był dotąd analizowany przede wszystkim w odniesieniu do układów światłowodowych zlokalizowanych w atmosferze wybuchowej [9, 10]. Określono na przykład progowe wartości mocy lasera (erbowego) dla różnych rodzajów cząstek stanowiących zapylenie. Podobne pomiary wykonywano również w Laboratorium Techniki Laserowej z wykorzystaniem lasera He-Ne i źródeł nielaserych dużej mocy.

Problem ten nie dotyczy tylko światłowodowych systemów pomiarowych stosowanych w atmosferze metanowej, na przykład kopalnianej [11], ale także łączności światłowodowej, zasilania urządzeń pomiarowych energią świetlną itp. Trwają również prace nad określeniem wartości progowych mocy i sformalizowania wymagań dotyczących optyki światłowodowej [12].

Progowe dopuszczalne wartości mocy skupionej wiązki podawane w publikacjach są rozbieżne, na przykład podawana jest wartość 35 mW dla światłowodu o średnicy rdzenia 50 μm , w innym przypadku wynosi ona 1 mW.

W anemometrii laserowej są stosowane z zasady skupione wiązki laserowe, zatem do oceny ewentualnego potencjalnego zagrożenia wybuchowego, generowanego przez wiązkę laserową, istotna jest wielkość obszaru oddziaływania wiązki laserowej z makrocząstkami znajdującymi się w tym obszarze. W przypadku anemometru dopplerowskiego, liniowa wielkość obszaru przecinania się wiązek laserowych, z którego uzyskuje się sygnał informacyjny wynosi około 40 μm , co daje w przybliżeniu objętość 60 000 μm^3 . Przy objętości pojedynczej cząstki wynoszącej około 1 μm^3 , w objętości pomiarowej może się znaleźć około 10^4 cząstek o średnicy 1 μm .

Z powyższego wynika, że wielkość energii, którą pojedyncza cząstka może zaabsorbować w obszarze czynnym anemometru powinna być podzielona przez taką liczbę. Daje to w efekcie sprowadzenie poziomu absorbowanej mocy optycznej do wielkości znacznie poniżej jakiegokolwiek poziomu dopuszczalnego. Taką samą analizę można przeprowadzić dla anemometru interferencyjnego.

W przypadku anemometru światłowodowego pojedyncza cząstka może się znaleźć, przynajmniej z zasady, bezpośrednio na wyjściu światłowodu, jednak możliwe jest zmniejszenie efektu absorpcji przez zwiększenie średnicy rdzenia światłowodu i/lub zmniejszenie mocy wiązki z niego wychodzącej. Obniżony poziom mocy na wyjściu światłowodu może wynieść poniżej 1 mW, co w połączeniu ze zwiększeniem średnicy rdzenia światłowodu spowoduje zejście znacznie poniżej poziomu uznawanego za niebezpieczny.

5. PODSUMOWANIE

Z zasady działania konwencjonalnych (dopplerowskich i interferencyjnych) oraz światłowodowych anemometrów laserowych wynika konieczność stosowania skupionych wiązek laserowych, inaczej niż w przypadku innych laserów, na przykład mierniczych lub metanometrycznych.

Przedstawiona analiza schematów strukturalnych laserowych urządzeń metanometrycznych pozwala na wyciągnięcie wniosku o braku zagrożenia wybuchowego w przypadku stosowania anemometrów laserowych w atmosferze potencjalnie wybuchowej i zapyłonej.

Problem ten będzie rozpatrzony bardziej szczegółowo w momencie podania ujednoliconych (np. w postaci normy) wartości dopuszczalnych poziomów mocy na wyjściu światłowodu lub w innej sytuacji stosowania skupionych wiązek laserowych. Laboratorium Techniki Laserowej GIG może odegrać w tym zakresie ważką rolę.

Literatura

1. Passia H.: *Dopplerowskie anemometry laserowe i ich zastosowanie do pomiarów prędkości cieczy i gazów*. Katowice, Wydaw. Ośr. Post. Techn. 1977 nr 53, s. 1–22.
2. Passia H., Pawlak J., Piasecki S., Zawadzki Z.: *Laboratory tests on a back-scattering laser anemometer*. CMI, Annual Report 1973.
3. Passia H., Szade A., Motyka Z., Bochenek W.: *Technical solutions and experience in laser anemometry for underground mining, other industrial and biomedical applications*. Proc. SPIE, Vol. 4827 2002.
4. Patent GIG 125835. Górniczy anemometr laserowy. 1980.
5. Patent GIG 176998. Anemometr laserowy zwłaszcza do pomiaru przepływu powietrza zawierającego metan. 1995.
6. Passia H., Pawlak J., Piasecki S.: *Lasery w górnictwie*. Katowice, Wydaw. Śląsk 1978.
7. Ready J.F.: *Effects of High Power Laser Radiation*. New York – London, Academic Press 1971.
8. Adrian R.J., Goldstein R.J.: *Analysis of a Laser Doppler Anemometer*. J. Phys. 1971 E4.
9. Tortoishell G.: *Safety of Fibre Optic Systems in Flammable Atmospheres*. Proc. SPIE 1990 Vol. 1226.
10. Zhang D.K. i inni: *Experimental Studies of Ignition Behaviour and Combustion Reactivity of Pulverised Coal Particles*. Fuel 1991.
11. Kumar V., Prasad G.: *Fibre Optic Sensors for Mines*. Ming Tech. 1989 Vol. 187.
12. Petersen S., Sliney D.: *Toward The Development of Laser Safety Standards for Fibre Optic Communication Systems*. Appl. Opt. 1986 Vol. 25.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan