

Marek SIKOŃ<sup>1</sup>, Michał PRAĆCIK<sup>2</sup>

## METODA POMIARU CIŚNIENIA W UKŁADACH HYDRAULICZNYCH I PNEUMATYCZNYCH Z ZASTOSOWANIEM ŚWIATŁA LASEROWEGO

**Streszczenie.** W pracy opisano metodę bezkontaktowego pomiaru ciśnienia z zastosowaniem światła laserowego. Przedstawiono stosowane aktualnie rozwiązania dotyczące tego tematu. Podstawy teoretyczne proponowanej metody zaprezentowano w formie zależności pomiędzy obciążeniem i geometrycznym ugięciem okna pomiarowego, zależności optyki geometrycznej oraz prawa absorpcji światła. Przedstawiono wyniki badań testowych, potwierdzające możliwości stosowania metody. Wykazano konkurencyjność zaproponowanego rozwiązania względem innych tego typu urządzeń. Wskazano na możliwość adaptacji metody w różnych działach techniki.

**Słowa kluczowe:** światło laserowe, optyka geometryczna, płyty kołowo-symetryczne

## METHOD OF MEASUREMENT OF THE PRESSURE IN HYDRAULIC AND PNEUMATIC SYSTEMS WITH LASER BEAM APPLICATION

**Summary.** In the paper, non-contact method of measurement of the pressure with laser beam application is described. Actual solution associated with the topic is shown. Theoretical background of the introduced method is presented in the form of the formulae connecting load and geometrical deflection of the window, formula of the geometrical optics and law of the light absorption. Results of the experimental study confirm possibilities of presented method. Competitiveness of proposed method is demonstrated. Possibility of the application of the introduced method in different sections of the technique is presented.

**Keywords:** laser, geometrical-optics, circular-symmetrical plate

### 1. WPROWADZENIE

Przedmiotem badań jest sposób pomiaru ciśnienia w układach hydraulicznych lub pneumatycznych, polegający na zastosowaniu światła laserowego do bezkontaktowego pomiaru zmian ciśnienia w badanych układach, zwłaszcza w dynamicznych układach wysokociśnieniowych.

Metody bezkontaktowego pomiaru ciśnienia płynów oparte są na różnych prawach fizycznych. Wiązkę światła laserowego wykorzystuje się w okulistyce, w rozwiązaniach tech-

---

<sup>1</sup> Faculty of Mechanics, Cracow University of Technology, Cracow, Poland, e-mail: sikon@mech.pk.edu.pl.

<sup>2</sup> Faculty of Mechanics, Cracow University of Technology, Cracow, Poland, e-mail: pracik@mech.pk.edu.pl.

nicznych oftalmometrów, znanych np. z patentu [2], lub tonometrów, znanych np. z patentu [1], gdzie stosuje się jednocześnie światło laserowe i fale akustyczne. W tych rozwiązaniach ciśnienie wewnątrz gałki ocznej jest określane jako odpowiedź na impuls ciśnienia powietrza działającego na rogówkę. Złożony układ optyczny pozwala na obrazie ocenić reakcję oka i ciśnienie płynu wewnątrz gałki ocznej. W zastosowaniach przemysłowych metody te mogłyby być wykorzystane jedynie przy bardzo niewielkich ciśnieniach, przy mikroziornikach o bardzo podatnych ściankach.

Spośród metod bezkontaktowych znana jest metoda pomiaru ciśnienia oparta na zjawisku fizycznym rozpraszania światła na cząsteczkach gazu w przestrzeni pomiarowej. Ze zgłoszenia japońskiego [3] znany jest sposób bezkontaktowego, dokładnego pomiaru ciśnienia gazu lub gęstości cząsteczek gazu. W metodzie tej wykorzystane jest zjawisko rozpraszania Rayleigha, zachodzące na cząsteczkach gazu znajdującego się w dodatkowo dołączonej komorze pomiarowej. Układ optyczny skupiający wiązkę rozproszonych fotonów, dalej przetwarzaną na sygnał elektryczny, zbiera tę wiązkę przez wziernik-okno, które jest traktowane jako nieodkształcalne. Także zwierciadło odbijające, umiejscowione naprzeciwko wziernika, jest sztywne i sztywno zamocowane. Załączone do opisu wyniki pomiarów dotyczące zależności związanych z badanymi doświadczalnie ciśnieniami, pozwalają stwierdzić, że wprowadzie napięcie sygnału rozpraszania Rayleigha w funkcji ciśnienia jest zmienne liniowo, ale zakres mierzonych ciśnień nie przekracza 8 kPa.

## 2. ISTOTA METODY

Istota rozwiązania [4, 5], charakteryzuje się tym, że w badanym układzie wydziela się przestrzeń pomiarową z co najmniej jednym odkształcalnym sprężyste oknem przepuszczającym światło i/lub lustrem odbijającym światło. Kalibruje się optyczny układ pomiarowy dla promienia laserowego przechodzącego przez okna/okno i/lub odbitego od lustra, przyporządkowując kalibrowanej wielkości natężenia światła znaną wielkość różnicy ciśnień panującą w kalibrującym układzie, względem stałego ciśnienia otoczenia. Wyznacza się w ten sposób współczynnik kalibracji  $K$ . Następnie mierzy się za pomocą skalibrowanego układu optycznego natężenie światła proporcjonalne do ciśnienia panującego w badanym układzie, przy zachowaniu stałego ciśnienia otoczenia, po czym na podstawie zmierzonej wartości natężenia światła wyznacza się ciśnienie wewnątrz badanego układu, zgodnie ze wzorem:

$$p = KI, \quad (1)$$

gdzie:

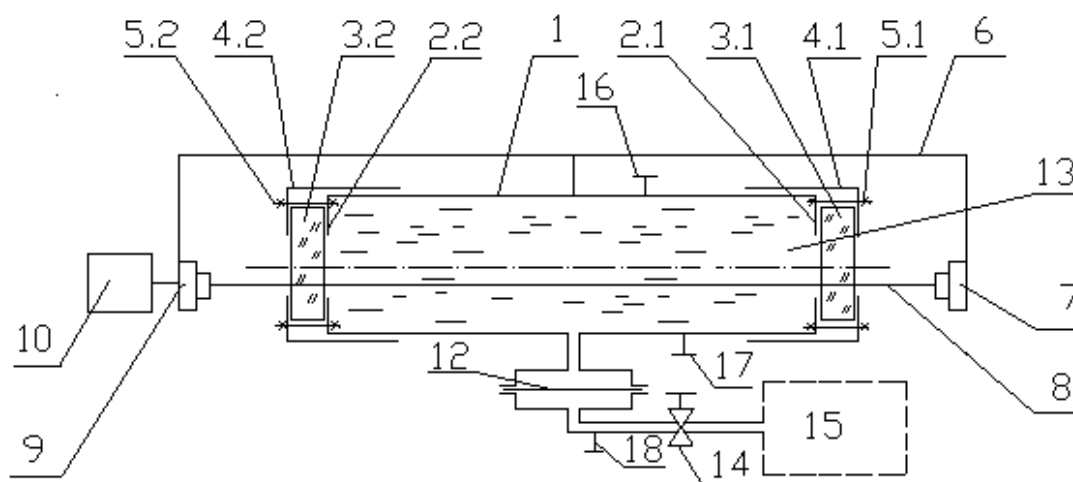
$p$  – mierzone ciśnienie [MPa],

$K$  – współczynnik kalibracji [MPa/V],

$I$  – natężenie światła [V].

## 3. OPIS ROZWIĄZANIA DLA ŚWIATŁA PRZECHODZĄCEGO

Schemat urządzenia optycznego do bezkontaktowego pomiaru zmian ciśnienia jest przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy urządzenia do bezkontaktowego pomiaru ciśnienia

Fig. 1. Schematic diagram of the device for non-contact measurements of the pressure

Ciśnienie przekazywane jest z układu (15) przez zawór (14) i przeponę (12) do cylinderka (1) wypełnionego cieczą (13) przepuszczającą światło. Właściwe wypełnienie przez medium objętości pod przeponą (12) zapewnia zawór odpowietrzający (18). Wstępne, całkowite napełnianie cylinderka następuje przez zawory (16), (17). Cylinder (1) zakończony jest z obydwu stron kołnierzami (2.1), (2.2), do których przylegają przepuszczające światło okna (3.1), (3.2), które są odkształcalne sprężysto pod wpływem ciśnienia cieczy (13). Okna (3.1), (3.2) wraz z pokrywami (4.1), (4.2) i śrubami (5.1), (5.2) tworzą połączenia kołnierzowe zapewniające szczelność pomiędzy cylinderkiem a wziernikami. Cylinderk tworzy jedną całość z układem optycznym zamocowanym na ramie kątovej (6). W skład układu optycznego wchodzi źródło światła laserowego (7) kierujące wiązkę światła (8) przez okno (3.1), ciecz (13) i okno (3.2) do układu rejestrującego (9) i dalej do układu zbierającego oraz przetwarzającego dane (10). Zmiana ciśnienia cieczy (13), proporcjonalna do zmiany ciśnienia w układzie hydraulicznym (15), powoduje zmianę warunków geometrycznych przechodzenia światła na drodze: źródło światła (7), okno (3.1), ciecz (13), okno (3.2), co powoduje zmianę natężenia światła rejestrowanego przez układ (9). Dalej zmiany te są przetwarzane przez układ (11).

W urządzeniu zastosowanym do układów pneumatycznych zbędne jest stosowanie przepony (12).

Traktując okna (3.1), (3.2) jak utwierdzone wzdłuż obwodu tarcze obciążone w sposób ciągły ciśnieniem z jednej strony [6], można zapisać zależność pomiędzy obciążeniem a ugięciem okna wg wzoru:

$$p = -\frac{4Eh^3}{3(1-\nu^2)(r^3 - R^2r)} \bar{\alpha}, \quad (2)$$

gdzie:

$p$  – mierzone ciśnienie,

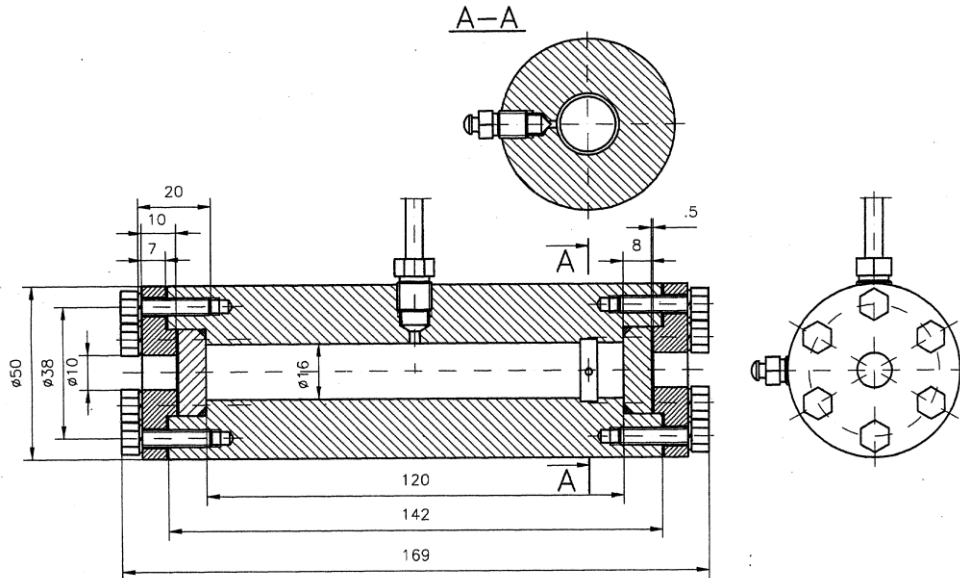
$E, \nu$  – stałe materiałowe okna,

$r$  – promień bieżący na powierzchni środkowej okna,

$R$  – promień części okna przepuszczającej światło,

$\bar{\alpha}$  – miara łukowa kąta padania światła laserowego na okno.

Dla okien wykonanych z polimetakrylanu metylu, wg wymiarów jak na rys. 2, obliczono kąt padania światła laserowego dla stosowanych podczas pomiaru ciśnień, wg wzoru (2). Dla ciśnienia 10 MPa kąt ten wynosi  $0,015^\circ$ .



Rys. 2. Cylinder pomiarowy w urządzeniu do bezkontaktowego pomiaru ciśnienia  
Fig. 2. Measuring cylinder of the device for non-contact measurements of the pressure

Współczynnik transmisji  $T$  fali światła wyraża się wzorem [7]:

$$T = \frac{I^{\text{zal}}}{I^{\text{pad}}} = \frac{I_p^{\text{zal}} + I_s^{\text{zal}}}{I_p^{\text{pad}} + I_s^{\text{pad}}} = \frac{T_p I_p^{\text{zal}} + T_s I_s^{\text{zal}}}{I_p^{\text{pad}} + I_s^{\text{pad}}}, \quad (3)$$

$$T_p = \frac{4 \cos^2 \alpha \sin \alpha \sin \beta}{\sin^2(\alpha + \beta) \cos^2(\alpha - \beta)}, \quad T_s = \frac{4 \cos^2 \alpha \sin \alpha \sin \beta}{\sin^2(\alpha + \beta)}, \quad (4)$$

gdzie:

$I^{\text{zal}}, I^{\text{pad}}$  – odpowiednio natężenie światła fal załamanej i padającej,

$I_p^{\text{zal}}, I_s^{\text{zal}}$  – odpowiednio składowe natężenia fali załamanej w płaszczyźnie padania i prostopadle do niej,

$T_p, T_s$  – składowe współczynniki transmisji światła w płaszczyznach jak poprzednio (na podstawie wzorów Fresnela),

$\alpha, \beta$  – kąty padania i załamania.

Uwzględniając kolejne elementy na drodze optycznej od źródła światła (7) do elementu rejestrującego (9) (rys. 1), całkowity współczynnik transmisji światła  $T_c$  policzymy wg wzoru:

$$T_c = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \quad (5)$$

gdzie kolejne składniki sumy oznaczają współczynniki transmisji:

$T_1$  – na wejściu światła do okna 3.1, rys. 1,

$T_2$  – przy przejściu światła z okna 3.1 do cieczy 13 zawartej w cylindrze 1, rys. 1,

$T_3$  – na wejściu światła do okna 3.2, rys. 1,

$T_4$  – przy przejściu światła z okna 3.2 na zewnątrz, w kierunku układu rejestrującego.

Współczynniki  $T_1, T_2, T_3, T_4$  liczymy wg wzorów (2) i (4). Parametrem wejściowym do obliczeń będzie kąt  $\alpha$  padania światła na okno 3.1, liczony wg wzoru (2).

Zjawiska wywołane absorpcją światła opisuje prawo Bouguera [7]:

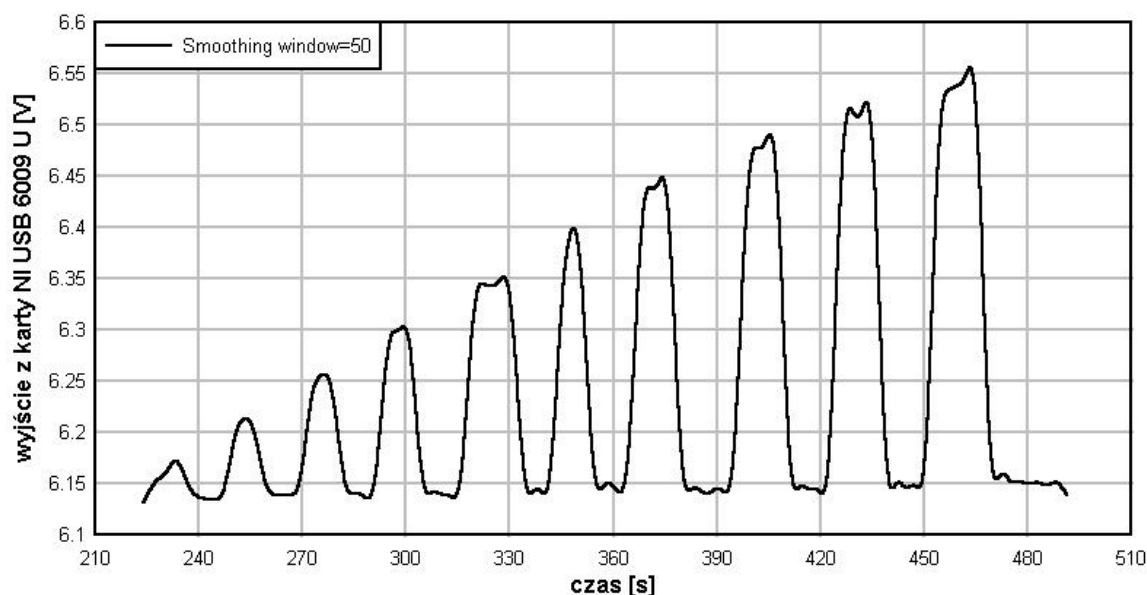
$$I(x) = I^{\text{pad}} e^{-\phi x}, \quad (6)$$

gdzie:

$\phi$  – współczynnik absorpcji (pochłaniania) światła, stały dla danej substancji i stały dla światła o ustalonym składzie widmowym, zależny od długości fali światła,  
 $x$  – droga geometryczna światła, zmienna wraz ze zmianą ciśnienia.

#### 4. BADANIA TESTOWE

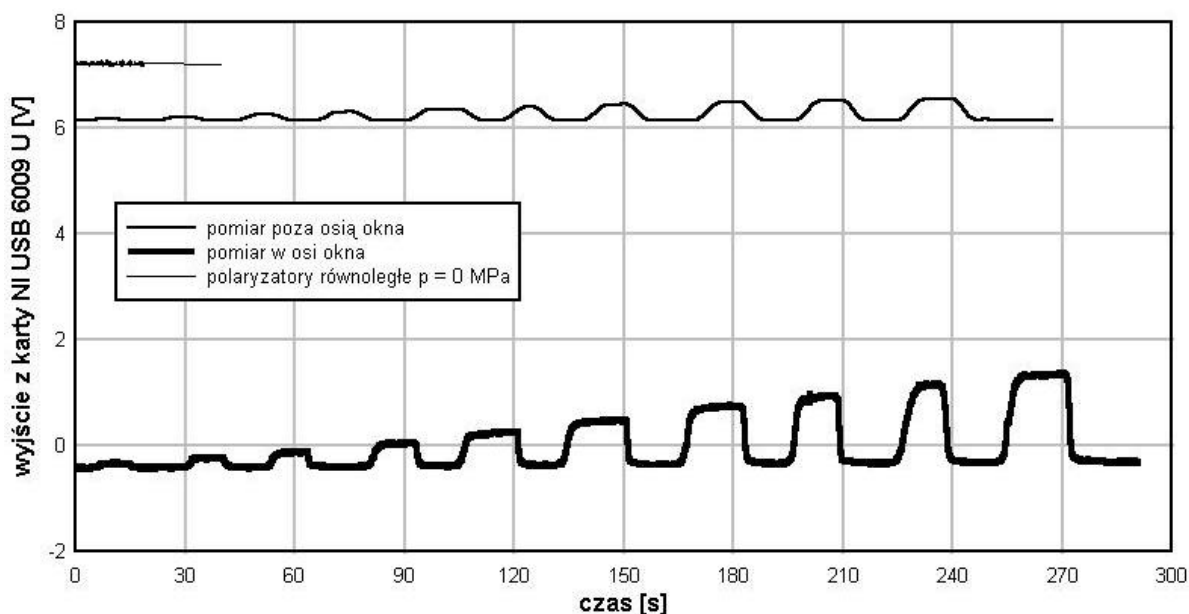
Celem weryfikacji zależności pomiędzy natężeniem światła laserowego rejestrowanym w układzie akwizycji danych pomiarowych a ciśnieniem cyklicznie zwiększającym o 1 MPa, przeprowadzono badania doświadczalne na prototypowym układzie pomiarowym w zbiorniku testowym (z cyklicznym odciążaniem). Wyniki pomiarów przedstawione są na rys. 3.



Rys. 3. Wyniki pomiarów zmian natężenia światła przy cyklicznych zmianach ciśnienia (rejestracja na wyjściu napięciowym głowicy laserowej LD 1605-20)

Fig. 3. Results of measurements of the light intensity changes at the cyclic pressure excitation (voltage output recorded from the laser head type LD 1605-20)

Zbadano również wpływ ustawienia głowicy laserowej w stosunku do osi zbiornika na jakość pomiarów. Wyniki przedstawione są na rys. 4.



Rys. 4. Wpływ ustawienia głowicy laserowej w stosunku do osi okna w cylindrze  
 Fig. 4. Influence of positioning of the laser head versus the cylinder window axis

Kolejne doświadczenia, przeprowadzane na tym samym układzie, dotyczące identyfikacji możliwości proponowanego rozwiązania, dowiodły jego przydatności w zakresie pomiarów dynamicznych.

## 5. WNIOSKI

Przedstawiono metodę wykorzystującą światło laserowe do bezkontaktowego pomiaru ciśnienia w układach hydraulicznych lub pneumatycznych, a pomiar dokonywany jest względem ciśnienia panującego na zewnątrz układu.

Proponowany sposób pomiaru uwzględnia zmiany parametrów geometrycznych przejścia światła laserowego do/z przestrzeni pomiarowej przez odkształcalne sprężyste okna oraz zmianę drogi geometrycznej światła w obszarze pomiarowym, w przypadku ugięcia i przesunięcia.

Otrzymaną doświadczalnie liniową zależność pomiędzy przyrostami ciśnień a natężeniem światła, przy silnie nieliniowych wzorach na współczynniki transmisji i odbicia oraz przy nieliniowym charakterze prawa absorpcji, autorzy wyjaśniają niewielką wartością kąta ugięcia płaszczyzny środkowej okien pomiarowych w zakresie setnych części stopnia przy ciśnieniu 10 MPa i tym samym niewielką wartością kąta padania światła oraz niewielką zmianą drogi geometrycznej światła pod wpływem ciśnienia.

Przedstawiona metoda cechuje się szerokim zakresem pomiarowym ciśnień oraz pozwala na pomiar zmian ciśnienia zarówno wewnątrz obszaru zamkniętego, jak i na zewnątrz.

Rozwiązanie zapewnia:

- większy poziom bezpieczeństwa pracy przy mediach podatnych na wybuch niż w przypadku znanych czujników parametrycznych albo generujących, mierzących ciśnienie w mieszkach wybuchowych – eliminacja możliwości jakiegokolwiek kontaktu ładunku elektrycznego z medium,
- separację źródeł zakłóceń EMI oddziałujących bezpośrednio na płyn,
- stosowność w układach stacjonarnych i mobilnych.

Przedstawione urządzenie znajdzie zastosowanie do pomiaru zmian ciśnienia w różnych instalacjach typu hydraulicznego lub pneumatycznego, stacjonarnych i mobilnych.

Prezentowane rozwiązanie nie ma wad, jakie mają dotychczas znane czujniki przetwarzające zmiany ciśnienia na wielkości sygnałów elektrycznych, jak np. czujniki tensometryczne, piezoelektryczne lub piezorezystywne.

Przetworniki tensometryczne charakteryzują się stosunkowo niskimi częstotliwościami drgań własnych, co ogranicza ich zakres zastosowania przy dynamicznych zmianach ciśnienia oraz wysokich częstotliwościach tych zmian.

Piezoelektryczne przetworniki ciśnienia, z uwagi na zasadę działania (prosty efekt piezoelektryczny), nie mogą prawidłowo przetwarzać wolnozmiennych przebiegów ciśnienia. Dodatkowo są wrażliwe na pola zmiennych przyspieszeń drgań mechanicznych.

W praktyce żaden z aktualnie stosowanych czujników – przetworników ciśnienia na wielkość elektryczną (ładunek elektryczny, napięcie) – nie zapewnia w pełni bezpieczeństwa w przypadku montażu w układzie wypełnionym płynem lub gazem o dużej podatności na wybuch inicjowany przepływem ładunku elektrycznego w tym układzie. Zagrożenie wybuchem istnieje ze względu na fakt, że czujniki typu parametrycznego, np. tensometryczne, są zasilane prądem, a w czujnikach typu generującego, np. piezoelektrycznych, są indukowane ładunki elektryczne.

Przedstawione urządzenie charakteryzuje brak wymienionych wad, nie ma zasadniczych ograniczeń zakresu stosowalności, może być stosowane przy dynamicznych zmianach ciśnienia, przy wysokich częstotliwościach tych zmian oraz przy wolnozmiennych przebiegach ciśnienia. W części pomiarowej, tj. w cylinderku (1) nie przepływają ani też nie indukują się ładunki elektryczne i przez to przedstawione urządzenie zapewnia większe bezpieczeństwo przy pomiarach zmian ciśnienia w układach wypełnionych bądź transportujących płyny lub mieszanki wybuchowe.

## Bibliografia

1. Hayafuji M.: Noncontact tonometr. Japanese Patent, JP3305430B, 2002.
2. Kenjirou K.: Ophthalmological instrument for cornea curvature and pressure measurement. United States Patent, US5131739A (In.CL<sup>5</sup>. A61B3/00, A61B3/100), 1992.
3. Muraoka K., Uchino K.: Gas pressure measuring apparatus employing light scattering. Japanese Patent, JP8094475 (A), (In.Cl.<sup>6</sup> G01L21/00, G01L21/47), 1996.
4. Sikoń M., Prącik M.: Sposób pomiaru ciśnienia w układach hydraulicznych lub pneumatycznych. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Biuletyn Urzędu Patentowego, nr 20, ISSN – 0137 – 8015, Warszawa 2012, s. 29.
5. Sikoń M., Prącik M.: Ciśnieniomierz laserowy. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Biuletyn Urzędu Patentowego, nr 23 (1014), Warszawa 2012, s. 26.
6. Walczak J.: Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. Tom II i III. PWN, Warszawa – Kraków 1971.
7. Encyklopedia fizyki współczesnej. PWN, Warszawa 1983.