



Zestaw i sposób do określania ciśnienia w czasie rzeczywistym w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia

Przedmiotem wynalazku jest sposób określania ciśnienia w czasie rzeczywistym w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia poprzez wykorzystanie światłowodowego układu pomiarowego.

W artykułach: Liang, Neeharika, V.; Pattnaik, P.K. Optical MEMS Pressure Sensors Incorporating Dual Waveguide Bragg Gratings on Diaphragms. IEEE Sens. J. 2016, 16, 681–687, DOI: [10.1109/JSEN.2015.2482944](https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2482944), Vorathin, E.; Hafizi, Z.M.; Aizzuddin, A.M.; Lim, K.S. a natural rubber diaphragm based transducer for simultaneous pressure and temperature measurement by using a single FBG. Opt. Fiber Technol. 2018, 45, 8–13, DOI: [10.1016/j.yofte.2018.05.011](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.05.011), Leal-Junior, A.; Frizzera, A.; Díaz, C.; Marques, C.; Ribeiro, M.; Pontes, M.J. Material features based compensation technique for the temperature effects in a polymer diaphragm-based FBG pressure sensor. Opt. Express 2018, 26, 20590–20602, DOI: [10.1364/OE.26.020590](https://doi.org/10.1364/OE.26.020590), Hegde, G.; Prasad, M.V.N.; Asokan, S. Temperature compensated diaphragm based Fiber Bragg Grating (FBG) sensor for high pressure measurement for space applications. Microelectron. Eng. 2021, 248, 111615, DOI: [10.1016/j.mee.2021.111615](https://doi.org/10.1016/j.mee.2021.111615), Wang, L.; Wang, Y.; Wang, J.; Li, F. a High Spatial Resolution FBG Sensor Array for Measuring Ocean Temperature and Depth. Photonic Sens. 2019, 10, 57–66, DOI: [10.1007/s13320-019-0550-0](https://doi.org/10.1007/s13320-019-0550-0), Jia, Z.; Fan, Q.; Feng, D.; Yu, D.; Zhao, X.; Yang, K. Design and investigation of the fiber Bragg grating pressure sensor based on square diaphragm and truss-beam structure. Opt. Eng. 2019, 58, 097109, DOI: [10.1117/1.OE.58.9.097109](https://doi.org/10.1117/1.OE.58.9.097109), Fan, Q.; Jia, Z.; Feng, D.; Yong, Z. Highly sensitive FBG pressure sensor based on square diaphragm. Optik 2021, 225, 165559, DOI: [10.1016/j.ijleo.2020.165559](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165559), Liu, Z.; Zeng, L.; Xu, K.; Li, Z.; Chen, H.; Qiao, Z.; Qu, Y.; Liu, G.; Li, L. Design of a Fiber Bragg Grating Pressure Sensor Based on a Metal Diaphragm and Lever Structure. Sensors 2022, 22, 5096, DOI: [10.3390/s22145096](https://doi.org/10.3390/s22145096), przedstawiono wyniki prac badawczych związanych z opracowaniem światłowodowego czujnika umożliwiającego prowadzenie diagnostyki próżniowych komór gaszeniowych w trybie on-line oraz prognozowane kierunki rozwoju technik pomiarowych, które mogą posłużyć do opracowania sposobu określania ciśnienia w urządzeniach próżniowych w czasie rzeczywistym, szczególnie w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia, *ponad to pracy D. Harasima pod tytułem: "Wieloparametrowe czujniki wykorzystujące światłowodowe skośne siatki Bragga" ukazane zostały istotne aspekty prowadzenia pomiarów przy pomocy światłowodowych siatek Bragga*. Tabela 1 ukazuje podstawowe parametry układów pomiarowych opisanych w wymienionych artykułach.

Tabela1. Wykaz parametrów technicznych układów do określania ciśnienia

Parametr	Zakres ciśnienia [kPa]	Zakres temperatury [°C]	Czułość na ciśnienie [pm/kPa]	Powtarzalność [%]	Błąd pomiaru ciśnienia [kPa]
Układ Q. Fan'a	0 - 200	20 – 55	3,402	98,80	5,53
Układ J. J. Huang'a	0 – 1*10 ³	20 – 90	1,57	99,40	17,2
Układ M. Liang'a	0 – 10*10 ³	5 – 70	0,34	-	92
Układ V. Pachav'y	0 - 207	-	31,9	99,91	-
Układ F. Gu'a	0 – 16* 10 ³	25 – 65	6,94*10 ⁻²	99,71	-
Układ Q. Fan'a	0 – 2*10 ³	-	6,227*10 ⁻¹	99,72	1,46
Układ Vorathin'a	0 – 10	27,5 - 52,5	1,007*10 ²	-	-
Układ G. Hegde'a	0,4 – 70*10 ³	-40 – 90	3,64 *10 ⁻²	99,98	12,6
Układ L. Wang'a	0 - 1000	1 – 35	1,611	99,98	-

Z opisu zgłoszenia wynalazku [WO2008031181A1](#) znany jest Światłowodowy czujnik ciśnienia z siatką Bragga zawiera światłowód z wtopioną siatką. Światłowód jest połączony z rurkami, tworząc komorę. Siatka jest początkowo naprężona. Wzrost ciśnienia zmniejsza naprężenie siatki, co zmienia długość fali odbicia o $\lambda/2$. Siatka temperaturowa pozwala także mierzyć temperaturę, umożliwiając skorygowany pomiar ciśnienia. w jednym przykładzie wykonania wynalazkiem może być całkowicie szklany czujnik zdolny do pracy pod wysokim ciśnieniem (> 15 kpsi) i wysokiej temperaturze (> 150°C.). Wynalazek sprawdzi się również równie dobrze w innych zastosowaniach, niezależnych od rodzaju środowiska. Natomiast z opisu patentowego [US4932263A](#) znany jest światłowodowy czujnik ciśnienia z kompensacją temperatury o niewielkich rozmiarach składający się z komory utworzonej z dwóch elementów wykonanych z mikroobrobionego krzemu lub podobnej substancji. Człony wyznaczają komorę z co najmniej jedną membraną wrażliwą na nacisk i światłowodem rozciągającym się przez komorę równolegle do membrany. Ponadto patent o numerze [CN106225965A](#) ukazuje mikroczujnik wysokiej czułości typu interferencyjnego z włóknem światłowodowym i jego sposób wytwarzania. Według opisu czujnika ciśnienia jako materiał wrażliwy na nacisk stosowana jest folia z materiału wrażliwego 2D zawierająca membranę grafenową lub membranę z dwusiarczku molibdenu, a dzięki metodzie interferencji włókien uzyskuje się wykrywanie sygnału ciśnienia. Tymczasem, mając na uwadze krzyżowy wpływ temperatury na sygnały pomiaru ciśnienia, wprowadza się siatkę Bragga, a łącząc metody projektowania wrażliwej struktury czujnika, hermetyzacji wnęki interferencyjnej, korekcji błędów temperatury i tym podobnych, osiągnięta jest kompensacja czujnika ciśnienia. Dlatego czujnik ciśnienia jest korzystny dzięki prostej konstrukcji, niewielkim rozmiarom, pomiarowi podwójnych parametrów ciśnienia / temperatury, wysokiej czułości, zdolności zapobiegania zakłóceniom elektromagnetycznym i tym podobnym, i może być stosowany do pomiaru ciśnienia o wysokiej czułości w mikroskali w dziedzinie biomedycyny, lotnictwa, pomiarów i kontroli w czasie procesów przemysłowych i tym podobne.

Przedstawione pozycje literaturowe oraz wynalazki opisują inny sposób rozwiązania problemu jakim jest określanie ciśnienia w próżniowej komorze gaszeniowej średniego napięcia wykonywany w czasie rzeczywistym. w prezentowanych pracach zastosowano inne konstrukcje i metody określania ciśnienia, w większości przypadków stosowany jest światłowód połączony z elementem odkształcalnym

5 – znane są prace ukazujące sposób określania ciśnienia przy zastosowaniu elementów grzejnych, jednak działają one w innym zakresie ciśnienia bądź nie umożliwiają prowadzenia pomiarów w czasie rzeczywistym.

Celem wynalazku jest określanie ciśnienia w czasie rzeczywistym w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia, stosowanych w urządzeniach łączeniowych i rozdzielczych

10 w elektroenergetyce, przy zachowaniu pełnego zakresu działania urządzenia.

Problemem, do rozwiązania jest to, że ciśnienie robocze komór próżniowych średniego napięcia, które są obecnie stosowane w urządzeniach elektroenergetycznych, wynosi mniej niż $1,0 \times 10^{-3}$ Pa. Elementy pracujące przy tak niskich wartościach ciśnienia są narażone na różnego rodzaju wycieki,

15 które mogą być spowodowane nieszczelnościami rzeczywistymi lub pozornymi. Nieszczelności rzeczywiste mogą wynikać z przecieków gazu przez ścianki komory, niedostatecznej szczelności połączeń lub pęknięć elementów próżniowych. Nieszczelności pozorne powstają na skutek desorpcji gazów z wewnętrznych powierzchni komory lub uwalniania gazów z nakładek stykowych na elektrodach. Szczególnie trudne może być utrzymanie szczelności w urządzeniach o dużych

20 gabarytach. Istotnym problemem użytkowania próżniowych komór gaszeniowych średniego napięcia jest ich rozszczelnienie do momentu, w którym ciśnienie wewnątrz komory osiąga wartość pośrednią pomiędzy ciśnieniem sprawnej komory, a ciśnieniem atmosferycznym. Ciśnienie to na poziomie pojedynczych paskali nazywane jest „dołkiem” tzw. krzywej Paschena. w takim przypadku wytrzymałość dielektryczna przerwy międzystykowej jest na tyle mała, że w łączniku elektroenergetycznym

25 znajdującym się w pozycji otwartej może nastąpić trwałe snopienie, a tym samym przeniesienie wysokiego potencjału elektrycznego z jednej elektrody na drugą. Wystąpienie takiej sytuacji może spowodować porażenie elektryczne osób prowadzących eksploatację urządzenia, co w najgorszym przypadku może zakończyć się śmiercią.

30 Przedmiotem wynalazku jest zestaw i sposób do określania ciśnienia w czasie rzeczywistym w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia.

Zestaw do określania ciśnienia w czasie rzeczywistym w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia posiadający światłowody, zamocowane swoimi końcami w próżniowej komorze gaszeniowej podłączonej do układu próżniowego. Pomędzy pierwszymi końcami światłowodów

35 znajduje się badany element. Pierwszy światłowód podłączony jest swoim drugim końcem do źródła światła, natomiast drugi światłowód podłączony jest swoim drugim końcem do analizatora widma optycznego. Jego istotą jest to, że końcowe części światłowodów ułożone są równolegle tudzież na końcowej części drugiego światłowodu znajduje się siatka Bragg.

Istotą sposobu określania ciśnienia w czasie rzeczywistym w próżniowej komorze gaszeniowej w której

40 panuje ciśnienie w zakresie od $5,0 \times 10^{-2}$ Pa do $1,0 \times 10^5$ Pa, jest to, że badaną próbkę nagrzewa się za

5 pomocą wiązki światła dostarczanej przez pierwszy światłowód, do temperatury w do 170°C, typowo 160°C oraz za pomocą drugiego światłowodu z siatką Bragg mierzy się temperaturę po czym otrzymane wyniki pomiarów temperatury przyporządkowuje się panującemu w próżniowej komorze gaszeniowej ciśnieniu.

5

Korzystnym skutkiem wynalazku jest możliwość zastosowania opracowanego sposobu monitoring ciśnienia w czasie rzeczywistym w próżniowej aparaturze łączeniowej średniego napięcia, co pozwoli na zwiększenie niezawodności i poprawę bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń i sieci elektroenergetycznych. Zastosowanie wynalazku będzie miało wymierny wpływ na bezpieczeństwo 10 prac prowadzonych na liniach energetycznych poprzez dostarczanie w trybie ciągłym informacji o poziomie ciśnienia w urządzeniu oraz na poprawę ciągłości dostaw energii elektrycznej poprzez predykcje potencjalnych uszkodzeń urządzeń łączeniowych i rozdzielczych systemu energetycznego.

15 Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania jest uwidoczniony na rysunkach, na którym poszczególne figury przedstawiają:

Fig.1. - Stanowisko eksperymentalno-testowe,

Fig.2. - Schemat optyczny układu pomiarowego,

Fig.3. - Wykres zależności mocy optycznej w funkcji długości fali optycznej dla wybranych ciśnień,

Fig.4. - Wykres zależności mocy optycznej od ciśnienia panującego w badanym układzie.

20

Przykład wykonania

Sposób określania ciśnienia w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia polegał na tym, że do rozłącznikowej komory próżniowej średniego napięcia SN 4, wprowadzono dwa światłowody 4.1, 4.2, które połączono na końcu za pomocą materiału termoprzewodzącego 25 stanowiącego mieszaninę dwuskładnikowego kleju termoprzewodzącego z sadzą techniczną w proporcji 1:1. Pierwszy ze światłowodów 4.1 stanowi element grzejny, który ogrzewa element termoprzewodzący 4.3, natomiast drugi 4.2 z wypaloną światłowodową siatką Bragga 4.4 odpowiada za pomiar temperatury. Sposób określania bazuje na znanej zasadzie izolacji cieplnej, która powoduje, iż wraz ze wzrostem ciśnienia w układzie wzrasta zdolność elementu termoprzewodzącego 4.3 do 30 odprowadzania ciepła. Zmiany temperatury elementu termoprzewodzącego 4.3 zostały przyporządkowane panującym w rozłącznikowej komorze próżniowej SN ciśnieniom. Opracowany sposób określania ciśnienia zwłaszcza w rozłącznikowych komorach próżniowych SN umożliwia detekcję zmian ciśnienia w zakresie od $5,0 \times 10^{-2}$ Pa do $1,0 \times 10^5$ Pa.

Prace badawcze prowadzono wykorzystując próżniową komorę gaszeniową SN 4, typu HVKR 35 24/400 wykonaną przez Sieć Badawczą Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radio Techniczny. Próżniową komorę gaszeniową SN poddano testom zmian ciśnienia w zakresie od $5,0 \times 10^{-3}$ Pa do $1,0 \times 10^5$ Pa, dokonując weryfikacji poprawności działania układu zarówno podczas powolnego jak i gwałtownego wzrostu ciśnienia we wspomnianej komorze.

Wykorzystując stanowisko laboratoryjne (Fig.1), którego układ zasilania tworzą: programowalny pulpit sterowniczy 1 połączony przewodami zasilającymi z transformatorem probierczym 2 o napięciu wyjściowym 50 kV oraz pojemnościowym dzielnikiem napięcia 3, zintegrowano z układem próżniowym 12 składającym się z zestawu pompowego 11 zawierający pompę wstępną i turbomolekularną osiagających wydajność 90 l/s i ciśnienie na poziomie $5,0 \times 10^{-4}$ Pa, próżniomierza Piarniego 10 do pomiaru ciśnienia odniesienia oraz precyzyjnego zaworu dozującego 9, odpowiedzialnego za zapowietrzanie układu.

Stosując układ do analizy widma optycznego 8 utworzonego dzięki połączeniu stabilizowanego źródła światła z diodą superluminescencyjną 7. Cyrkulator optyczny 5 stanowiący światłowodowy łącznik między badaną próżniową komorą gaszeniową SN 4, a światłowodowym układem do określania ciśnienia. Wspomniany układ do określa ciśnienia utworzony z światłowodu grzejnego 4.1 oraz światłowodu pomiarowego 4.2, na którym wytworzona została światłowodowa siatka Bragga 4.4 połączonych ze sobą termoelementem 4.3 wytworzonym poprzez zmieszanie dwuskładnikowego kleju termoprzewodzącego z sadzą techniczną i naniesienie przedmiotowej mieszaniny w postaci kulki o średnicy nie większej niż 1mm u zakończenia światłowodów 4.1 i 4.2. Zmiany widma optycznego wywołane zmianami ciśnienia panującego w próżniowej komorze gaszeniowej 4 odczytywano przy użyciu analizatora widma optycznego 6. Ponadto schemat układu światłowodowego do określania ciśnienia szczególnie w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia ukazany został na rysunku Fig. 2, na którym oznaczono stabilizowane źródło światła SLD, analizator widma optycznego OSA oraz głowicę układu pomiarowego – sensor head.

Realizując sposób według wynalazku przeprowadzono pomiary z zastosowaniem tej samej komory próżniowej, dla tych samych wartości ciśnień oraz odległości międzystykowych.

Metodyka badań polega na wykonaniu odpowiednich połączeń przewodowych elementów elektrycznych jak i połączeń kanałów próżniowych, dokonaniu konfiguracji parametrów stanowiska badawczego i przeprowadzeniu pomiarów dla próżniowej komory gaszeniowej średniego napięcia wyposażonej w światłowodowy układ do określania ciśnienia w taki sposób, że po uzyskaniu w próżniowej komorze gaszeniowej średniego napięcia ciśnienia na poziomie 10^{-4} Pa, uruchamiane jest stabilizowane źródło światła 7 o centralnej długości fali optycznej 1550 nm, które poprzez jednomodowy światłowod 4.1 o średnicy 125 μm , ogrzewa przedmiotowy termoelement grzejny 4.3 na końcu światłowodów do temperatury nie wyższej niż 170°C , typowo 160°C . Następnie uruchamiane jest stabilizowane źródło światła 7 o centralnej długości fali optycznej 1550 nm połączone poprzez cyrkulator optyczny 5 z jednomodowym światłowodem 4.2 o średnicy 125 μm w którym światłowodowa siatka Bragga 4.4 wytworzona została metodą maski fazowej w układzie lasera ekscymerowego o długości fali naświetlania 248nm i okresie maski fazowej 1068,97nm. Długość struktury Bragga wynosi 12mm, a współczynnik reflektancji wynosi ok. 0,5, a szerokość połówkowa 0,07nm. Przy pomocy zewnętrznego termometru mierzona jest temperatura pomieszczenia, w którym wykonywane są pomiary następnie element termoprzewodzący ogrzewany jest do wspomnianej temperatury. Przy pomocy precyzyjnego zaworu dozującego 9 następuje powolne rozszczelnienie układu. Na etapie prac laboratoryjnych zmiany widma optycznego wywołane zmianami temperatury w pod wpływem zmian ciśnienia, obserwowane były na analizatorze widma optycznego. Wraz ze zmianami ciśnienia panującego w próżniowej komorze

gaszeniowej średniego napięcia zmienia się temperatura termoelementu grzejnego 4.3. Znając czułość światłowodowej siatki Bragga na temperaturę określa się temperaturę termoelementu grzejnego 4.3. Otrzymane wartości temperatury powiązano z odpowiadającymi im ciśnieniami zmierzonymi za pomocą próżniomierza 10. Wykresy mocy optycznych odczytanych dla wybranych ciśnień ukazuje rysunek Fig.3. Natomiast rysunek Fig.4 ukazuje liniowy charakter układu do określania ciśnienia w próżniowych komorach gaszeniowych średniego napięcia. Sposób określania ciśnienia można stosować w próżniowych komorach średniego napięcia w stanie pracy beznapięciowej jak i pod napięciem, zarówno w stanie pracy normalnej jak i zakłóceniewej.

RZECZNIK PATENTOWY

Maciej Nowicki
mgr inż. Maciej Nowicki
Nr wp. 3476

Wykaz oznaczeń:

- 1 – pulpit sterowniczy,
- 2 – transformator zasilający,
- 3 – dzielnik pojemnościowy,
- 4 – badana komora próżniowa wraz z układem światłowodowym,
- 4.1 – Światłowód grzejny
- 4.2 – Światłowód pomiarowy z siatką Bragga,
- 4.3 – Termoelement grzejny
- 4.4 – Światłowodowa siatka Bragga (FBG),
- 5 – cyrkulator optyczny,
- 6 – analizator widma optycznego,
- 7 – stabilizowane źródło światła,
- 8 – układ do analizy widma optycznego,
- 9 – precyzyjny zawór dozujący,
- 10 – próżniomierz do pomiaru wartości odniesienia,
- 11 – zestaw pompowy,
- 12 – układ próżniowy

SLD – superluminescent diode – dioda superluminescencyjna

OSA – optical spectrum analyzer – analizator widma optycznego

Sensor head – głowica układu pomiarowego