

Optomechaniczny przetwornik do pomiaru stopnia wysunięcia kompensatorów liniowych na gazociągach przesyłowych

An optomechanical transducer for measuring the displacement of pipeline expansion joints in gas transmission networks

Wojciech Kostowski¹, Erwin Maciak², Daniel Adamecki³, Grzegorz Głuszek³, Kamil Barczak², Zbigniew Opilski², Radosław Rolf⁴, Janusz Pietruszewski⁴, Wojciech Grzegorzek³, Paweł Szufleński⁴

Słowa kluczowe: sieci przesyłowe, kompensatory, światłowody, czujnik FBG, monitoring

Streszczenie

W artykule przedstawiono opracowane rozwiązanie pozwalające na pomiar stopnia wydłużenia kompensatora rurociągu. Opracowany przetwornik działa w oparciu o technologię światłowodową, wykorzystując światłowodowe sensory z siatką Bragga (FBG), zapewniając wysoką jakość pomiaru z dokładnością nie mniejszą niż 0,93%, która została potwierdzona w trakcie przeprowadzonych testów. Przetwornik oprócz części optycznej zawiera układ mechaniczny oraz system hermetyzacji i osłony względem środowiska gruntowo-wodnego. Zastosowanie światłowodowej technologii sensorowej daje możliwość prostej multiplikacji punktów pomiarowych i odczytu zdalnego dla nawet kilkudziesięciu kompensatorów.

Keywords: transmission networks, pipeline expansion joints, optical fiber, fiber Bragg grating, monitoring

Abstract

The paper presents a dedicated solution for measuring the displacement of pipeline expansion joints. The elaborated transducer is based on fiberoptic Bragg grating sensors, providing high quality of measurements with an experimentally demonstrated accuracy no worse than 0.93%. Beyond the optical part, the transducer is also equipped with a mechanical system and an ingress protection system against the soil and water environment. The application of a fiberglass-based sensor technology enables the operator to easily multiply the measurement points and to carry out remote reading of even several dozen expansion joints at once.

1 Wprowadzenie

Sieci dystrybucyjne i przesyłowe gazu ziemnego, biegnące przez tereny niestabilne, wymagają odpowiedniego podejścia, umożliwiającego ich bezpieczną eksploatację. W celu zapewnienia bezpieczeństwa sieci gazowych stosuje się **kompensatory**, mające za zadanie ochronę gazociągów przed nadmiernym wydłużeniem osiowym 0 . Kompensatory stosowane są głównie na terenach eksploatacji górniczej i możliwej aktywności sejsmicznej – w Polsce są to przede wszystkim tereny Dolnego i Górnego Śląska.

W nomenklaturze wyróżnia się dwa typy kompensatorów, stosowanych w polskim systemie gazowniczym: **kompensatory dławicowe**, wykonywane zgodnie z normą branżową BN-73/8976-59 0 oraz kompensatory nowego typu, nazywane również **bezobsługowymi**.

Zależnie od konstrukcji, kompensatory mają różne maksymalne zakresy wsuwu i wysuwu, przy czym dla kompensatorów sieci przesyłowej, najczęściej spotykanymi wartościami są wartości z przedziału $\pm(400-630)$ mm. W trakcie bezpiecznej eksploatacji wartości te nie powinny być przekraczane. Jednakże, jako że kompensatory są elementami sieci gazowej trwale znajdującymi się w gruncie, nie ma możliwości bezpośredniej,

wizualnej weryfikacji stopnia ich wydłużenia. Skutkuje to potrzebą poszukiwania innych metod, pozwalających na określenie stanu wydłużenia kompensatora.

Znane są rozwiązania bazujące na pomiarze wielkości elektrycznych, pozwalające na **pomiar stopnia wydłużenia kompensatora**, jednak wymagają one do pomiaru zasilania w energię elektryczną, co skutkuje utrudnieniami eksploatacyjnymi związanymi z koniecznością „ręcznego” odczytu każdego kompensatora oddzielnie i duże ograniczenia w zakresie możliwości zastosowania monitoringu on-line.

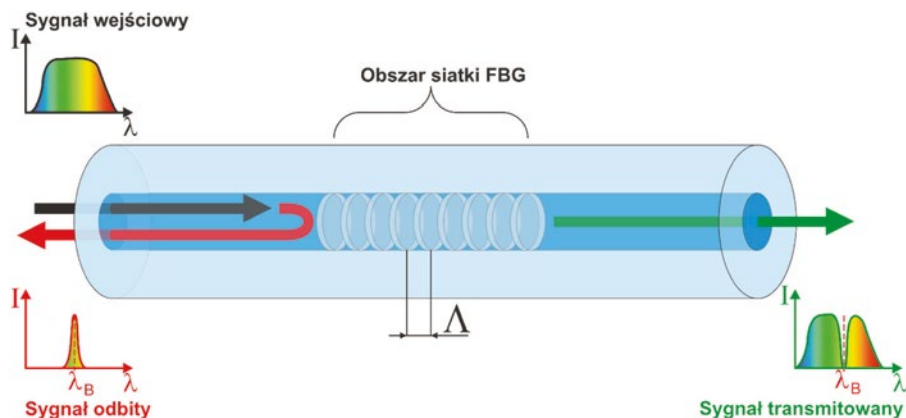
Eksploatacyjnie pożądanym jest stan, który daje możliwość szybkiego odczytu grupy co najmniej kilku–kilkunastu kompensatorów, bez konieczności wykonywania odczytu dla każdego urządzenia oddzielnie. Pożądana jest również możliwość rozbudowy do systemu monitoringu ciągłego (on-line). Biorąc pod uwagę odległości pomiędzy kompensatorami oraz trudności z zapewnieniem zasilania w energię elektryczną na terenach, gdzie są zlokalizowane kompensatory, naturalnym kierunkiem wydaje się rozwiązanie światłowodowe, pozwalające na przesył danych na znaczne odległości, bez konieczności zapewnienia dodatkowego źródła zasilania.

¹ Wojciech Kostowski – Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Techniki Ciepłej, e-mail: wojciech.kostowski@polsl.pl

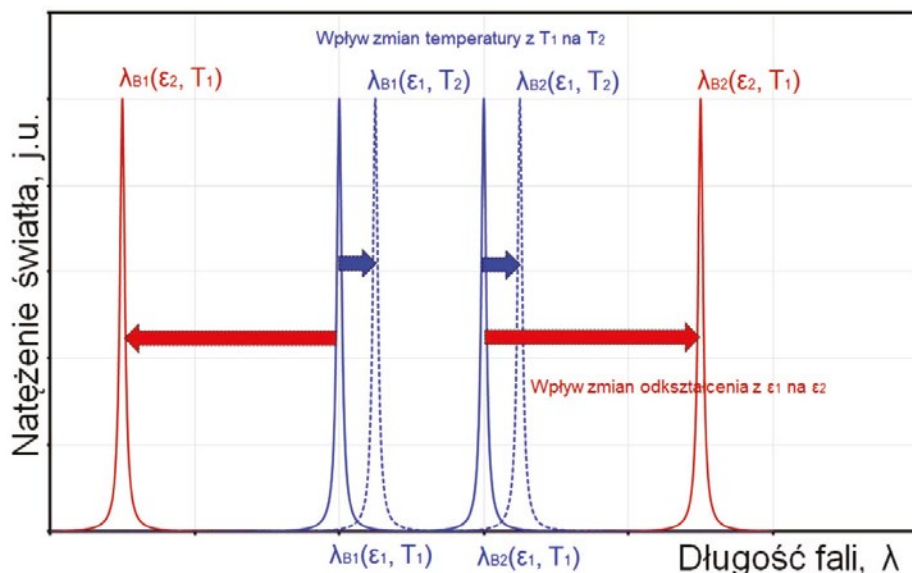
² Erwin Maciak, Kamil Barczak, Zbigniew Opilski – Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Optoelektroniki, e-mail: erwin.maciak@polsl.pl

³ Daniel Adamecki, Grzegorz Głuszek, Wojciech Grzegorzek – Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej, Katedra Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa, e-mail: daniel.adamecki@polsl.pl

⁴ Radosław Rolf, Janusz Pietruszewski, Paweł Szufleński – Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A., e-mail: radoslaw.rolf@gaz-system.pl



Rys. 1. Zasada działania czujnika FBG
Fig.1. Principle of operation of the FBG sensor



Rys. 2. Schematyczna zmiana charakterystyki światłowodowego sygnału wyjściowego (odbitego) dla systemu pomiarowego wykorzystującego dwa elementy FBG. Pokazano wpływ zmiany temperatury i odkształcenia na zmianę sygnałów sensorów FBG

Fig.2. Fig. 2. Profile change of the output (reflected) signal for the metering system with two FBG sensors. The impact of temperature variation and of the mechanical strain on the FBG sensor output signal is presented.

Wykorzystanie **światłowodowych technologii sensorowych** gwarantuje pomiary wysokiej rozdzielczości, realizowane przy użyciu relatywnie niedrogiego elementu czujnikowego jakim jest światłowód lub światłowód, wyposażony w zintegrowany z nim czujnik. Rozwiązania tego typu zapewniają dobrą i łatwą do modyfikacji gęstość potencjalnych punktów pomiarowych w przemysłowych zastosowaniach pomiaru odkształceń i/lub temperatury.

Rozwiązanie problemu pomiaru stopnia wydłużenia kompensatora, w oparciu o technologię światłowodową, opracowano w ramach projektu zrealizowanego przez Politechnikę Śląską dla GAZ-SYSTEM S.A. W pierwszym etapie projektu opracowano założenia konstrukcyjne systemu, natomiast w drugim etapie **wykonano 3 prototypy systemu pomiarowego oraz 1 demonstracyjny system pomiarowy**, wraz z kompletną osłoną od środowiska gruntowego.

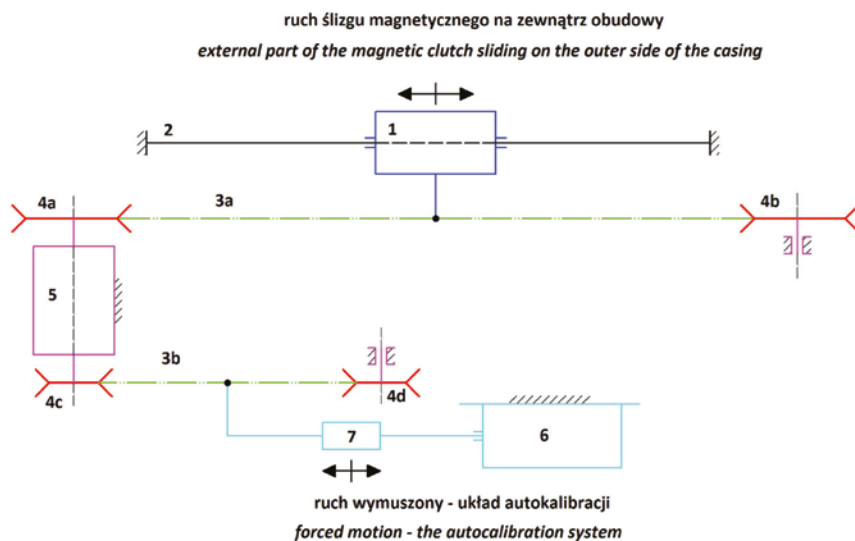
2 Budowa i zasada działania przetwornika

Światłowód zespolony mechanicznie ze strukturą materiału lub obiektem, którego stan deformacji i/lub temperaturę chcemy monitorować, służy jako struktura sensorowa, a jednocześnie jest on też medium służącym do transmitowania sygnału optycznego, doprowadzając energię fali elektromagnetycznej do punktów pomiarowych. Zdeformowany światłowód może powodować modulację wybranych parametrów fali świetlnej. Te z kolei możemy poddać analizie jakościowej i ilościowej w detektorze, przy czym detektor może znajdować się w znacznej odległości od miejsca pomiaru (deformacji światłowodu). Typowo sensory tego rodzaju pracują w obrębie telekomunikacyjnego widma promieniowania

elektromagnetycznego, co ułatwia integrację systemów pomiarowych ze światłowodową siecią telekomunikacyjną.

Do realizacji optomechanicznego przetwornika pomiarowego zastosowano dyskretną światłowodową technikę czujnikową, wykorzystującą tzw. światłowodowe siatki Bragga (ang. *Fiber Bragg Grating* – FBG). Technika ta polega na pomiarze deformacji światłowodu, w którego wnętrzu wytworzono okresowe zaburzenie współczynnika załamania światła, co przedstawiono na rys. 1. Podstawy fizyczne tej techniki pomiarowej można znaleźć np. w pracy 0. Na każdym jednostkowym zaburzeniu niewielka część energii fali świetlnej ulega odbiciu. Fale świetlne odbite od kolejnych, okresowych zaburzeń interferują ze sobą, co w konsekwencji prowadzi do wzmacniania się i wygaszania odpowiednich długości fal. Efektem jest **odbity optyczny sygnał o charakterystycznej długości fali λ_B** . Jednocześnie w widmie transmitowanym energia o wartości λ_B nie pojawia się.

Przestrzenny okres zaburzenia Λ jest ważnym parametrem siatki i jest odpowiedzialny za charakterystyczną długość fali λ_B (energii), która ulega odbiciu na elemencie FBG i służy do pomiaru stopnia odkształcenia mierzzonego obiektu. Wskutek **deformacji światłowodu, będącej wynikiem mechanicznej i/lub termicznej deformacji obiektu**, okres Λ zmienia się, co w konsekwencji powoduje przesunięcie wartości λ_B . **Zdeformowana siatka odbija inną, nieco zmienioną długość fali**, która jest przesunięta względem tej charakteryzującej siatkę niezdeformowaną. **Informacja o deformacji jest zatem zawarta w długości fali odbitej od struktury FBG**. Dokładniej to ujmując: zmiana długości fali odbitej jest wprost proporcjonalna do wartości wydłużenia. Na rys. 2 zaprezentowano ideę pomiaru odkształcenia i temperatury sensorami FBG. Przedstawiona tu konfiguracja pomiarowa polega na takim zainstalowaniu sensorów FBG



Rys. 3. Schemat kinematyczny wewnętrznego mechanizmu przetwornika pomiarowego: 1 – sprzęgło magnetyczne, 2 – obudowa przetwornika, 3a – pas zębata czynny, 3b – pas zębata bierny, 4 a, b, c, d – koła zębate, 5 – przekładnia zębata, 6 – przetwornik optomechaniczny II stopnia, 7 – układ autokalibracji (opcjonalny)
 FigFig. 3. Kinematic scheme of the inner mechanism of the measuring transducer: 1 – magnetic clutch, 2 – transducer's casing, 3a – active toothed belt, 3b – reactive toothed belt, 4 a, b, c, d – gear wheels, 5 – gear transmission, 6 – 2nd stage optomechanical transducer, 7 – autocalibration system (optional).

na obiekcie mierzonym, że w wyniku wzrostu temperatury badanego obiektu długości fali Bragga obydwu sensorów FBG: λ_{B1} i λ_{B2} przesunęły się o taką samą wartość w kierunku dłuższych fal. Deformacja mechaniczna prowadzi do ściskania jednej siatki i jednocześnie do rozciągania drugiej. Jest to zrealizowane poprzez przeniesienie deformacji obiektu punktowo w obszar między zainstalowanymi siatkami. Wówczas, gdy obiekt się np. rozciąga to ciągnie jedną siatkę, pchając jednocześnie drugą. Takie zachowanie skutkuje przesunięciem długości fali Bragga w przeciwnych kierunkach (rys. 2). Miarą odkształcenia mechanicznego badanego obiektu jest zmiana przyrostu fali Bragga sensorów $\Delta\lambda_B = \lambda_{B2} - \lambda_{B1}$. Zatem jak pokazano na rys. 2, do wyekstrahowania wpływu temperatury od mechanicznej deformacji obiektu konieczne jest zastosowanie co najmniej dwóch elementów FBG i odpowiedniej metodyki pomiaru. W opracowanym rozwiązaniu pomiarowym zastosowano właśnie taką metodologię pomiaru wydłużenia obejmującą kompensację temperaturową.

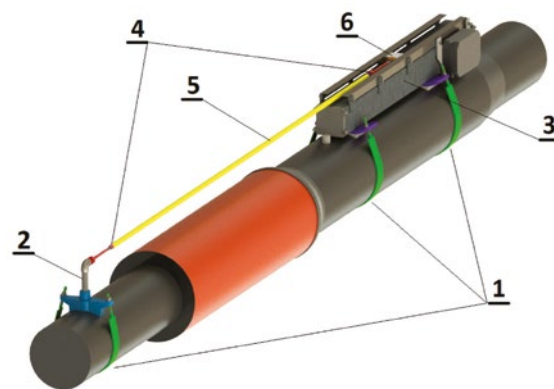
Technika ta pozwala na pomiar deformacji rurociągów umieszczonych w ziemi 0, 0, 0. Ponadto, pozwala także na pomiar ruchów samej ziemi 0, 0, 0.

Optomechaniczny przetwornik pomiarowy zmienia charakterystykę sygnału świetlnego pod wpływem deformacji sensorów FBG rzędu ułamków mm. Aby możliwe było wykorzystanie tego typu rozwiązania do pomiaru dużych przemieszczeń, koniecznym stało się wykorzystanie przekładni mechanicznych I i II stopnia, dzięki czemu możliwa była detekcja przemieszczenia rzędu setek mm.

W opracowanym rozwiązaniu zastosowano przetwornik II stopnia, w którym ruch ciągnia pomiarowego wynosi ± 25 mm. Przetwornik II stopnia posiada wewnętrzny układ redukujący ruch prostoliniowy do skali sub-milimetrowej, w której realizowane są niewielkie deformacje światłowodowych czujników FBG.

Z kolei przełożenie ruchu kompensatora, o zakresie zmian elementów ruchomych ± 630 mm lub ± 400 mm, do zakresu ruchu ciągnia przetwornika II stopnia, wymagało zaprojektowania odpowiedniego **układu mechanicznego**. Układ ten składa się z części wewnętrznej (redukcja zakresu) oraz zewnętrznej (kinematyczne przeniesienie napędu pomiędzy częściami kompensatora). Schemat kinematyczny części wewnętrznej opartej o układ przekładni mechanicznych przedstawiono na rys. 3.

Kolejnym zadaniem było opracowanie **układu kinematycznego**, umożliwiającego połączenie obu przesuwnych części kompensatora (oznaczonych umownie jako A i B). Układ ten przedstawiono na rys. 4, a jego głównym elementem jest wodzik przytwierdzony za pomocą opaski z trzpieniem (tzw. „wieżyczka”) do jednej z części kompensatora (A). Na drugim końcu wodzika zamocowany jest przegubowo tzw. *ślizg* z kasetą, zawierającą odpowiednio rozmieszczone magnesy neodymowe. Do drugiej części kompensatora (B) przymocowana jest obudowa zawierająca wewnętrzny mechanizm przetwornika. Wewnątrz obudowy znajduje się bliźniacza kasetka z magnesami, odbierająca ruch części (A), podczas gdy obudowa i pozostałe elementy mechanizmu są związane z częścią (B).

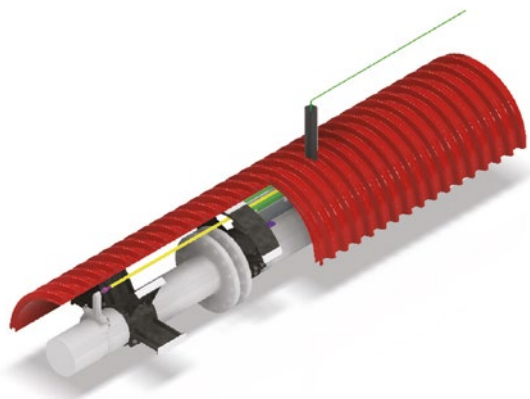


Rys. 4. System mocowań i przeniesienia ruchu dla kompensatora dławicowego DN300: 1 – opaska mocująca, 2 – trzpień („wieżyczka”), 3 – opaski mocujące, 4 – obudowa IP68, 5 – przegub kulisty, 6 – wodzik, 7 – ślizg magnetyczny
 Fig. 4. Fixing and motion transmission system for the maintenance-free DN300 pipeline expansion joint: 1 – mounting band, 2 – vertical distance pivot, 3 – IP68 casing, 4 – ball joint, 5 – connecting rod, 6 – magnetic slide

Jako, że układ przewidziany jest do pracy w środowisku gruntowym, konieczne było także jego odizolowanie od wpływu czynników zewnętrznych. Dlatego też układ kinematyczno-konstrukcyjny przetwornika zrealizowano w oparciu o podwójny system ochronny, składający się z **osłony zewnętrznej** oraz **obudowy wewnętrznej**.

Aby zabezpieczyć układ przeniesienia napędu przed naporem gruntu i zapewnić swobodny ruch elementów, konieczne było zastosowanie osłony zewnętrznej. Osłonę tę wykonano z połówki rury osłonowej przepustowej, osadzonej na specjalnie zaprojektowanych płozach dystansowo-nośnych (rys. 5). Osłona zewnętrzna ma także słupek do wyprowadzenia sygnału światłowodowego przez osłonięty przewód. Całość jest zabezpieczona rękawem wykonanym z geowłókniny (rys. 6), która ogranicza przedostawanie się gruntu pod osłonę. Na zewnątrz osłony zewnętrznej nie są zabudowane żadne urządzenia, z wyjątkiem wyjść kablowych światłowodowych.

Obudowa wewnętrzna (rys. 4 poz. 3) w postaci prostopadłościennych skrzyni ze stali nierdzewnej, zamkniętej uszczelnionymi pokrywami, izoluje przestrzeń wewnętrzną wypełnioną powietrzem lub olejem od środowiska gruntowo-wodnego i zapewnia suchą i wolną od zanieczyszczeń przestrzeń wewnętrzną przetwornika, co umożliwi prawidłową pracę precyzyjnych elementów mechanizmu. Obudowa wewnętrzna uzyskała deklarację zgodności UE w zakresie klasy korozyjności: C5I, klasy szczelności: IP68 i stopnia ochrony: IK08, natomiast całość przetwornika uzyskała pozytywną opinię iskrobezpieczeństwa wydaną przez Zakład Atestacji Katedry Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej.



Rys. 5. Widok ogólny systemu wraz z osłoną zewnętrzną
 Fig. 5. Overall view of the system with the outer shelter



Rys. 6. Widok zabudowanego przetwornika w osłonie zewnętrznej owiniętej rękawem z geowłókniny w warunkach rzeczywistych – stan bezpośrednio przed zakopaniem
 Fig. 6. The view of the transducer installed in the operating conditions with the outer shelter wrapped around with geotextile – the view directly before being covered

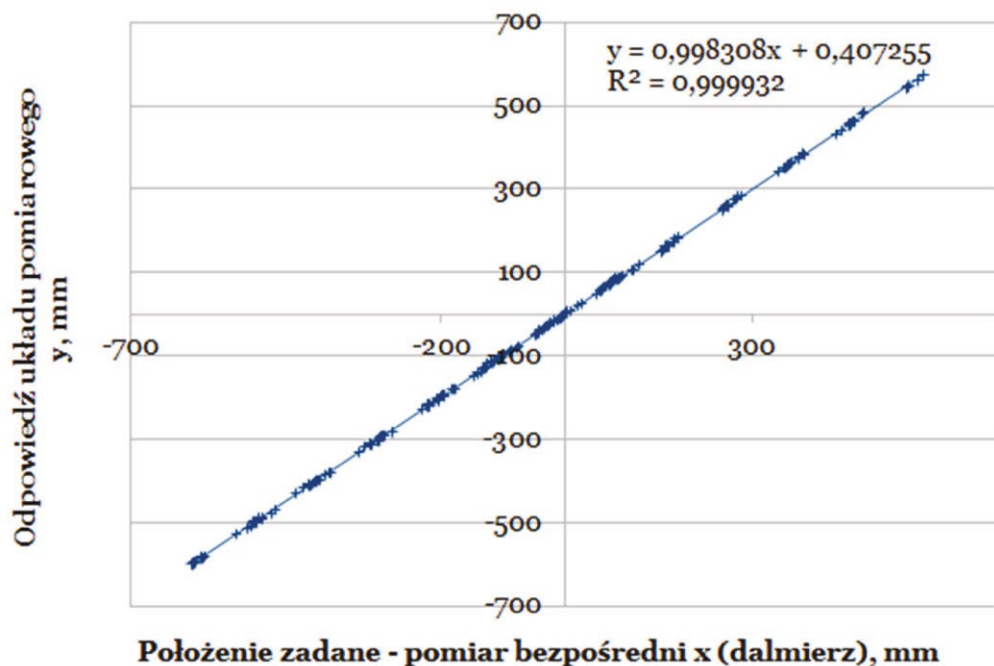
3 Stanowisko testowe i wyniki pomiarów

Po wykonaniu testów wewnętrznych w Laboratorium Technologii Fotonicznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w trakcie których oszacowano powtarzalność i rozdzielczość pomiaru, przystąpiono do realizacji pomiarów na **stanowisku demonstracyjnym** w hali technologicznej TJE Opole GAZ-SYSTEEM S.A., w warunkach operacyjnych zbliżonych do rzeczywistych. Na stanowisku tym zabudowano fragment rurociągu DN300 z kompensatorem dławicowym oraz kompensatorem bezobsługowym. Konstrukcja stanowiska umożliwiała zadawanie przemieszczeń każdego z kompensatorów w ich nominalnym zakresie pracy. Widok ogólny stanowiska przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Widok ogólny stanowiska – przetwornik zabudowany na kompensatorze dławicowym DN300
 Fig. 7. The general view of the testing site – transducer mounted on the DN300 gland-type pipeline expansion joint

W ramach badań przeprowadzono łącznie 66 serii pomiarowych, w każdej z nich rejestrowano wysunięcie kompensatora metodą referencyjną (z wykorzystaniem dalmierza laserowego) oraz wysunięcie kompensatora, uzyskane z interpretacji sygnału wyjściowego przetwornika. Przykład charakterystyki przetwornika przedstawiono na rys. 8. Widoczna **jest bardzo dobra zgodność wyników odpowiedzi**



Rys. 8. Przykładowa charakterystyka pomiarowa zaprojektowanego i wykonanego optomechanicznego przetwornika

Fig. 8. An example of the output-input response function for the designed and constructed optomechanical transducer

układu pomiarowego (wartość wysunięcia przeliczana z odpowiedzi układu optoelektronicznego) w stosunku do przemieszczenia, zmierzono bezpośrednio, tj. dalmierzem laserowym, traktowanego jako pomiar referencyjny.

Wyznaczone w trakcie badań przetworników rozdzielczość i powtarzalność miały bardzo dobre wartości – rozdzielczość 0,71 mm dla przetwornika w wersji podstawowej oraz **1,8 mm** dla przetwornika z autokalibracją; **powtarzalność** mieści się w zakresie **0,3–0,4 mm**. Nieznacznie niższa, choć wciąż na zadowalającym poziomie, rozdzielczość i powtarzalność jednego z przetworników jest efektem wbudowanego układu autokalibracji, który jako dodatkowy element wydłuża ciąg kinematyczny przekazywania ruchu.

Ponadto, dla dwóch badanych przetworników zamocowanych na kompensatorze dławicowym, możliwe było wykonanie testu ich działania na stanowisku przy kompensatorze skręconym o kąt $\pm 15^\circ$. W przypadku kompensatora bezobsługowego nie było technicznej możliwości realizacji jego skrętu. Uzyskana **dokładność pomiaru** dla badanych przetworników waha się **od 4,5 mm** dla najkorzystniejszych warunków pracy (brak skrętu, brak układu autokalibracji) do **11,7 mm** (skręt, układ autokalibracji). Wartości te są w każdym przypadku bardzo małe względem zakresu – błąd pomiaru waha się **od 0,36% do 0,93% zakresu pomiarowego**, tj. zakresu pełnego ruchu kompensatora od położenia maksymalnie wsuniętego do maksymalnie wysuniętego tj. 1260 mm. W praktyce eksploatacyjnej błąd pomiaru wysunięcia rzędu 1 cm nie ma żadnego znaczenia dla prawidłowej oceny bezpiecznych warunków pracy kompensatora.

4 Możliwości zastosowania i rozwoju

Światłowodowe systemy pomiarowe mogą obsłużyć dziesiątki lokalizacji pomiarowych na kilometr kabla światłowodowego, z rozdzielczością przestrzenną sięgającą nawet rzędu 1 mm. Sensoryka rozłożona daje możliwości pełnej charakteryzacji materiałów, obiektów i budowli, oferując możliwość kontrolowania monitorowanej struktury w określonych punktach pomiarowych lub w sposób ciągły wzdłuż światłowodu, z konfigurowalnymi przez użytkownika lokalizacjami pomiarowymi.

Opracowany system pomiarowy jest zbudowany w oparciu o najwyższej klasy sensory typu FBG. Do konstrukcji prototypu użyto najlepszej jakości materiałów, tak aby zapewnić niezawodność pracy całego systemu. Jednocześnie **system ten jest w stanie obsłużyć wszystkie rodzaje kompensatorów używanych w gazociągach przesyłowych, bez konieczności znacznych modyfikacji**. Należy jedynie dostosować obejmę mocującą do danej średnicy gazociągu. Jest zatem możliwe ponowne użycie danego przetwornika w innym miejscu oraz na innej średnicy gazociągu. Opracowane rozwiązanie cechuje się zatem dużą elastycznością aplikacyjną.

Ponadto opracowane przetworniki mogą być połączone z wykorzystaniem klasycznej infrastruktury światłowodowej. Podejście to pozwala na swobodne zastosowanie przetworników w miejscach zapewniających taki dostęp, a co za tym idzie umożliwienie zdalnego odczytu wskazań przetworników na odległościach rzędu dziesiątek kilometrów. Jak wiadomo, telekomunikacyjne kable światłowodowe zawierają wiele włókien optycznych i mają pewną liczbę zapasu (niewykorzystanych włókien), uwzględniającego potencjalny rozwój potrzeb telekomunikacyjnych. Jeden światłowod (jedno włókno optyczne) może być połączone z kilkoma lub nawet kilkunastoma przetwornikami w sposób szeregowy. Istnieje zatem możliwość łatwej multiplikacji oraz dołączania kolejnych przetworników do już istniejącej sieci optotelemetrycznej. Dzięki temu również architektura **sieci przetworników** cechuje się dużą elastycznością.

Przedstawione rozwiązanie ma również duży potencjał rozwoju. Po realizacji prezentowanego projektu, zdaniem autorów, głównym zagadnieniem i wyzwaniem jest miniaturyzacja przetwornika.

Kolejnym zadaniem będzie również rozszerzenie obszaru zastosowań na inne sieci dystrybucyjne i przesyłowe, w szczególności te bazujące na rurociągach, jak np. wodociągi. Opracowany system pomiarowy został zgłoszony do Urzędu Patentowego 0.

5 Podsumowanie

Interdyscyplinarny zespół naukowców, pod wspólnym kierunkiem dr hab. inż. Wojciecha Kostowskiego (Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Techniki Ciepłej), dr hab. inż. Erwina Maciaka (Wydział Elektryczny, Katedra Optoelektroniki) oraz dr inż. Daniela Adameckiego (Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej, Katedra Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa), zrealizował projekt „**Opracowanie systemu pomiaru stopnia wydłużenia kompensatorów w oparciu o technologię światłowodową**” dla Operatora Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A.

Projekt trwał 12 miesięcy i obejmował 2 etapy: projektowy oraz pomiarowo-badawczy, realizowany w Laboratorium Technologii Fotonicznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach, a następnie na stanowisku GAZ-SYSTEM S.A. w Opolu, w warunkach operacyjnych zbliżonych do rzeczywistych. Skonstruowany system pomiarowy charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami funkcjonalnymi (iskrobezpieczeństwo i wodoszczelność) oraz metrologicznymi. Opracowany przetwornik przekształca wysunięcie kompensatora rzędu kilkudziesięciu centymetrów na odkształcenie w skali mikro, wykrywane przez układ optyczny poprzez rejestrację przesunięcia rezonansowych długości fali sygnału odbitego od czujników światłowodowych. Dzięki odpowiedniej interpretacji tych długości, system umożliwia odczyt stopnia wysunięcia kompensatora z dokładnością nie mniejszą niż 0,93% zakresu w skrajnie niekorzystnych warunkach pomiaru (skręt $\pm 15^\circ$). Sygnał optyczny może być odczytany lokalnie lub zdalnie, co umożliwia ciągły monitoring nawet kilkudziesięciu kompensatorów poprzez linię światłowodową ułożoną wzdłuż gazociągu. ■

LITERATURA

- [1] Alias, M.A., Ismail, M.F., Sa'ad, M.S.M., (...), Reduan, S.A., Ahmad, H., A High.2022. "Precision Extensometer System for Ground Displacement Measurement Using Fiber Bragg Grating" *IEEE Sensors Journal*, 22(9): 8509-8521.
- [2] Barczyński A.2013 (red.) Vademecum Gazownika t. 2. Gaz ziemny: Infrastruktura przesyłowa i dystrybucyjna gazu ziemnego. SITPNiG, Kraków .
- [3] Campanella, C.E., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A., Passaro, V.M.N., Fibre Bragg 2018.Grating based strain sensors: Review of technology and applications, *Sensors (Switzerland)*, 18(9), 3115.
- [4] Huang, A.-B., Wang, C.-C., Lee, J.-T., Ho, Y.-T.2016. "Applications of FBG-based sensors to ground stability monitoring" *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(4): 513-520.
- [5] Kompensacja wydłużeń gazociągów ułożonych na terenach górniczych – Wymagania i badania BN-73/8976-59.
- [6] Lu, Z., Hong, C., Zhang, Y., Su, D., Fu, Y.2019. "Development of an FBG Sensor for Measuring Large Range and Multi-Directional Settlement" *IEEE Access*, 7,8786120: 107669-107677.
- [7] Magisano, D., Mastroianni, M., Leonetti, L., (...), Colloca, r., Muraca, E., A Finite. 2022. "Element Model for Monitoring the Displacement of Pipelines in Landslide Regions by Discrete FBG Strain Sensors" *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(15),7510.
- [8] Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Przetwornik pomiarowy do pomiaru przemieszczenia liniowego, układ do pomiaru przemieszczenia liniowego, zwłaszcza kompensatora rurociągu oraz sposób pomiaru przemieszczenia liniowego, zwłaszcza kompensatora rurociągu, Zgłoszenie patentowe P.441589 .
- [9] Zhu, H.-H., Shi, B., Zhang, C.-C.2017. "FBG-based monitoring of geohazards: Current status and trends" *Sensors (Switzerland)*, 17(3),452.