



Układ i sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przesyłanego przez wodowe

5 Przedmiotem wynalazku jest układ i sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przesyłanego przez włókno światłowodowe, odporny na zakłócenia zewnętrzne w tym elektromagnetyczne, optyczne i promieniowanie, nie wprowadzający zanieczyszczeń ani zakłóceń do układu.

10 Powszechnie znane są różne metody pomiaru kąta obrotu, wykorzystujące czujniki optyczne, sensory oparte na zjawisku Halla, układy elektroniczne, indukcyjne oraz mechaniczne rozwiązania. w przypadku czujników optycznych najczęściej stosuje się źródło światła, którego promieniowanie kierowane jest na obracającą się wraz z elementem ruchomym tarczę z wyciętymi otworami. Obrót tarczy powoduje naprzemienne blokowanie i przepuszczanie światła, co jest wykrywane przez fotodetektor. Detektor rejestruje impulsy świetlne, a znajomość geometrii otworów umożliwia określenie kąta obrotu. Tego typu rozwiązania są jednak podatne na zanieczyszczenia, które mogą zasłonić otwory, uniemożliwiając prawidłowe przechodzenie promieniowania.

15 Mechaniczne czujniki opierają swoje działanie na różnego rodzaju przekładniach sprzężonych z obracającym się elementem. Ich zastosowanie wpływa na kinematykę układu, ponieważ generowany opór powoduje spowolnienie ruchu. Czujniki magnetyczne wykorzystują zjawisko Halla, które wynika z oddziaływania pola magnetycznego na półprzewodniki. Wymagają one zasilania elektrycznego i są podatne na zakłócenia pochodzące od zewnętrznych pól elektromagnetycznych. z kolei czujniki indukcyjne działają na zasadzie odbierania energii z pola magnetycznego generowanego przez cewkę. Ich funkcjonowanie może być zakłócanie przez niepożądane pola elektromagnetyczne oraz zanieczyszczenia. One same są również źródłem zakłóceń w układzie.

25 Systemy do pomiaru kąta obrotu są wykorzystywane w układach pomiarowych oraz powiązanych z nimi systemach sterowania i pozycjonowania. Odgrywają również kluczową rolę w urządzeniach mierzących kąt obrotu ruchomych części maszyn.

30 Ze zgłoszenia patentowego [US20150036144A1](#) znane są bezdotykowy układ i metoda pomiaru kąta obrotu wykorzystujące układ laserowy pracujący w trybie interferometrycznym. Układ składa się z enkodera obrotowego, który mierzy kąt obrotu obracającego się wału. Układ składa się ze wspornika odniesienia pozwalającego na wykrywanie kąta względnego. Obrót tego wspornika jest regulowany w ustalonym zakresie w dowolnym kierunku. Układ składa się również z napędowego korpusu obrotowego połączonego z podporą odniesienia, podpartego osiowo tak, że może się obracać dookoła względem podpory odniesienia. w celu wykonania pomiaru z dużą dokładnością należy podczas zestawiania układu zminimalizować błąd przesunięcia początkowego i precyzyjnie zamontować wał enkodera na obracającym się ruchomym wale, aby wyeliminować mimośrodowość osiową.

35 Z opisu patentowego [CN106525099B](#) znany jest czujnik prędkości i przyspieszenia kątownego wykorzystujący pomiar siły pomiędzy strumieniem magnetycznym a obrotową główką z magnesem trwałym oraz zwykle, proste siatki Bragga FBG do przetworzenia tej siły w sygnał optyczny. Czujnik może realizować pomiar prędkości kątownej i przyspieszenia kątownego w szerokim zakresie w trybie bezkontaktowym.

40 Z dokumentu ochronnego [DE4244126C1](#) znany jest optyczny system pomiaru długości lub kąta polegający na odczycie skali w postaci siatki dyfrakcyjnej z wykorzystaniem czujnika poruszającego się w jednym kierunku w stosunku do skali. System wykorzystuje układ optyczny posiadający soczewkę cylindryczną, która dzięki skupieniu światła, zawęża zakres skanowanej części podziałki. System może być wykorzystany do pomiaru zarówno długości jak i kąta obrotu. Układ charakteryzuje się zmniejszoną czułością na przechylenie zespołu optycznego względem mierzonego obiektu. Światło ze źródła światła LED jest kolimowane przez soczewkę kondensującą i soczewkę cylindryczną i w efekcie skupione na podziałce prostopadłej do kierunku pomiaru. Jeżeli ogniskowa soczewki cylindrycznej jest mniejsza niż ogniskowa soczewki kondensującej, wówczas wiązka źródła

światła jest odwzorowywana na skali, przy czym szerokość oświetlanego obszaru skali jest zminimalizowana. w układzie optycznym stosuje się dodatkowe elementy optyczne takie jak rozdzielacze wiązki lub pryzmaty, aby promienie odbite o zerowym rzędzie dyfrakcyjnym nie wracały do źródła światła i nie powodowały niepotrzebnych odbić na fotoelementach.

5 Z opisu patentowego [KR101102107B1](#) znane jest urządzenie do monitorowania obracającego się obiektu. Wynalazek dotyczy urządzenia do monitorowania korpusu obracającego się wokół wału, zawierającego włókno światłowodowe, na którym znajdują się siatki Bragga. Włókno to jest rozciągnięte na obwodzie obracającego się korpusu po jego zewnętrznej stronie. Układ składa się z dwóch elementów kolimacyjnych. Pierwszy połączony jest fizycznie z końcem pierwszego światłowodu rozciągającego się na zewnętrznej powierzchni obwodowej wału obrotowego, natomiast drugi element kolimacyjny jest oddalony od jednostki obrotowej i jest skierowany w stronę elementu kolimacyjnego pierwszego i jest z nim połączony bezkontaktowo. Sygnał świetlny pochodzący z czujników Bragga z kolimatora pierwszego do drugiego jest przesyłany bez fizycznego połączenia pomiędzy nimi. Pierwsze włókno światłowodowe z siatkami Bragga pełni funkcję odbijania światła o określonej długości fali przez modulację współczynnika załamania światła. Dzięki zapisaniu na nim zwykłych, jednorodnych siatek Bragga ma ono niską tłumienność wtrąceniową oraz charakteryzuje się wysoką selektywnością długości fali. Drugie włókno światłowodowe łączy drugi element kolimacyjny z jednostką obliczeniową. w rozwiązaniu tym dzięki zamontowaniu końca pierwszego światłowodu na zewnętrznej powierzchni obwodowej wału obrotowego uzyskuje się korzyść polegającą na tym, że korpus obrotowy może być monitorowany bez połączenia fizycznego z wałem obrotowym.

10 Z opisu zgłoszenia patentowego [WO2013083192A1](#) znany jest układ koderza kąta służący do określania kąta obrotu części obrotowej względem części statycznej. Układ zawiera pierścień magnetyczny, układ do pomiaru pola magnetycznego i obwód elektroniczny. Pierścień magnetyczny posiada dwa bieguny magnetyczne i jest przymocowany do obracającej się części. Do części statycznej przymocowany jest układ do pomiaru pola magnetycznego. Układ elektroniczny jest przystosowany do określania kąta obrotu na podstawie zmierzonego pola magnetycznego. Niniejszy wynalazek dotyczy również zespołu łożyskowego w koderze kąta. Elementy układu do pomiaru pola magnetycznego są przymocowane do części statycznej i zawierają światłowód, źródło światła i czujnik optyczny. Światłowód zawiera światłowodową siatkę Bragga pokrytą materiałem magnetostrykcyjnym. Źródło światła i czujnik optyczny są zarówno optycznie połączone ze światłowodem, jak i elektronicznie połączone z obwodem elektronicznym. Układ elektroniczny jest przystosowany do określania kąta obrotu na podstawie zmierzonych sygnałów z czujnika optycznego. Gdy jedno włókno światłowodowe zawiera wiele światłowodowych siatek Bragga, powinny one być rozmieszczone tak, aby odbijały światło o różnych długościach fal, aby umożliwić czujnikowi optycznemu wykrycie, na które z nich miało wpływ pole magnetyczne. Można to uzyskać, zapisując różne światłowodowe siatki Bragga o różnych okresach.

20 Z opisu zgłoszenia patentowego [KR20190123506A](#) znane jest urządzenie do pomiaru kąta obrotu wykorzystującego światłowód. Może ono mierzyć kąt obrotu przy użyciu światłowodu zawierającego światłowód z prostą jednorodną siatką Bragga, którego jeden koniec jest przymocowany do obracającego się wału i połączony ze wspornikiem przymocowanym do drugiego końca. Specjalna płyta obrotowa jest nachylona pod określonym kątem do obracającego się wału, utworzonego z elastycznego materiału, który może ulegać deformacji wskutek siły rozciągającej. Urządzenie do pomiaru sygnału odbiera odbite z czujników światło, które zmienia się w zależności od stopnia krzywizny wywołanego przez siłę rozciągającą generowaną przez ciężarek, który styka się z górną powierzchnią obracającej się płyty zgodnie z jej obrotem. Kąt obrotu członu obrotowego wyznacza się na podstawie różnicy faz światła odbitego i wprowadzanego.

35 Z opisów patentowych [PL446546A1](#), [PL446548A1](#) oraz zgłoszeń patentowych [PL446547A1](#) i [PL446545A1](#) znany jest sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła i jej zastosowania w pomiarze położenia i pozycjonowaniu elementów obrotowych. Pomiar kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła realizowany jest w układzie zawierającym skośną siatkę Bragga oraz analizator. Światło spolaryzowane docierające do skośnej siatki Bragga jest modyfikowane poprzez odbicie części światła. Widmo światła

propagującego przez skośną siatkę Bragga jest następnie mierzone przez analizator widma optycznego i przetwarzane za pomocą metody polegającej na analizie zmian wartości współczynników szybkiej transformaty Fouriera. Na podstawie wartości tychże współczynników wyznaczane są potencjalne kąty obrotu, na podstawie których zgrubnie obliczany jest kąt obrotu, który to następnie doprecyzowywany jest poprzez analizę wartości potencjalnych kątów obrotu różniących się o nie więcej niż 2 stopnie od zgrubnie wyznaczonego kąta obrotu. Metoda ta zapewnia pomiar o uśrednionym błędzie pomiaru MAE wynoszącym  $0,072^\circ$ . Jej słabością jest konieczność udziału specjalisty w kalibrowaniu układu, który to w przypadku każdego układu musi ocenić i wybrać współczynniki szybkiej transformaty Fouriera, które będą używane w procesie pomiaru. Jest to proces czasochłonny i podatny na pomyłki, które skutkują znaczącym spadkiem precyzji pomiaru. Ponadto dobór współczynników dokonywany jest subiektywnie na podstawie doświadczenia operatora – trudno jest więc uzyskać deklarowaną dokładność pomiaru. Konieczność kalibracji spowodowana jest niską powtarzalnością wykonania elementów układu optycznego i siatek Bragga. Dodatkowo metoda charakteryzuje się zwiększonym poziomem błędów dla kątów obrotu zbliżonych do  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$  i  $315^\circ$ .

Z opisu patentowego [WO2008037089A1](#) znany jest układ do zapisu siatek Bragga składający się z układem zapisującego strukturę Bragga w rdzeniu światłowodu, w którym laserowe źródło światła UV naświetla włókno światłowodowe poprzez układ optyczny zawierający soczewki, modulator, migawkę, przesłonę i maskę fazową. Przez naświetlany światłowód przesyłane jest światło z dodatkowego źródła światła do splittera, który to rozdziela je na dwie wiązki i kieruje do analizatora widma oraz fotodetektora. Urządzenia te pozwalają na bieżącą kontrolę procesu wytwarzania siatki Bragga.

Z opisu patentowego [JPH07218740A](#) znane jest urządzenie do polaryzowania światła propagującego przez światłowód oraz urządzenie pomiarowe do pomiaru natężenia prądu. Opisywane urządzenie jest skośną siatką Bragga o kącie nachylenia struktur wynoszącym  $45^\circ$ . Dobranie takiego kąta nachylenia struktury powoduje swobodne przenikanie światła o polaryzacji typu „P”. Fale świetlne o innej polaryzacji są odbijane w stronę płaszcza światłowodu, przy czym odbicie jest tym silniejsze im bardziej kąt polaryzacji fali światła różni się od polaryzacji typu „P”. Następnie polaryzator ten wykorzystywany jest do polaryzowania światła propagującego przez światłowód. Dookoła światłowodu owinięty został przewód, przez który przesyłany jest prąd o nieznanym natężeniu. Przepływ prądu wywołuje efekt Faradaya powodujący zmianę kąta polaryzacji światła propagującego przez światłowód, przy czym zmiana ta jest proporcjonalna do natężenia prądu płynącego przez przewód. Następnie światło propaguje przez kolejny polaryzator i finalnie dociera do fotodetektora, gdzie mierzone jest jego natężenie. Zmiana natężenia światła jest proporcjonalna do natężenia prądu płynącego w przewodzie i na tej podstawie możliwe jest pośrednie zmierzenie natężenia prądu przepływającego przez przewód.

Z pracy „[Rotation and twist measurement using tilted fibre bragg gratings](#)” znany jest układ i sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego przez światłowód, przy czym układ pomiarowy składa się z pojedynczej skośnej siatki Bragga i analizatora widma a kąt obrotu mierzony jest pośrednio poprzez zmierzenie mocy światła dla fali światła o określonej długości, przy czym długość ta musi być dobrana tak, by znajdowała się w minimum modu płaszczyzowego. Zmiana kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła powoduje zmianę mierzonej mocy światła. Opisowany układ charakteryzuje się niską precyzją oraz wąskim zakresem pomiarowym  $30^\circ$ - $70^\circ$  a także brakiem możliwości rozróżnienia kierunku obrotu.

Z opisu patentowego [JPS59221618A](#) znany jest układ do pomiaru kąta obrotu elementu mechanicznego zawierający źródło światła spolaryzowanego przesyłanego światłowodem utrzymującym polaryzację do obracającej się głowicy, w której zamontowano element dwójłomny obracający się razem z głowicą. Następnie światło kierowane jest do układu pomiarowego zawierającego kolejny element dwójłomny, w którym wiązka światła rozdzielana jest na dwie niezależne wiązki, których moc jest mierzona a stosunek tychże mocy jest proporcjonalny do kąta obrotu głowicy.

Z opisu patentowego [CN111812061A](#) znany jest układ pomiaru współczynnika refrakcji cieczy, składający się z diody superluminescencyjnej, kolimatora, pryzmatu prawoskrętnego, kanału zawierającego badaną ciecz,

polaryzatora, płytki ćwierćfalowej, matrycy CCD oraz komputera. Uzyskanie wyniku pomiaru następuje w wyniku obliczenia natężenia światła i współrzędnych środka punktu świetlnego padającego na matrycę CCD.

Z opisu patentowego [US2006262307A1](#) znany jest polarymetr światłowodowy zbudowany z dwójmownego światłowodu, w którym wytworzono szeregowo dwie siatki Bragga obrócone względem siebie o  $90^\circ$ . Pomiedzy nimi wytworzono płytkę 8/4 poprzez wytworzenie zgięcia światłowodu w odpowiednim kierunku. W bezpośrednim sąsiedztwie siatek Bragga zamieszczono detektory mierzące moc światła odbitego w stronę płaszcza przez siatki Bragga. Moc światła odbitego przez siatki Bragga zależy od kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Na podstawie mocy zmierzonej przez detektory określana jest polaryzacja światła i obliczany jest jej kąt.

Zastosowanie zewnętrznych detektorów powoduje wrażliwość na zanieczyszczenia oraz wpływ otoczenia zewnętrznego na światło emitowane przez ściany boczne światłowodu do detektorów. Wpływ ten nie może zostać pominięty, gdyż, jak sami autorzy wskazują w treści patentu, moc światła odbitego przez siatki Bragga jest mała. Z tego więc względu rozwiązanie to nie może być stosowane w środowiskach zanieczyszczonych, wykazujących zmienną tłumienność fal świetlnych czy też ekspozowanych na zewnętrzne źródło światła.

Rozwiązanie to działa na takiej samej zasadzie jak zaproponowane i przebadane w artykule "[Rotation and twist measurement using tilted fibre bragg gratings](#)" gdzie wykazano, że w opisywany sposób nie można rozróżnić kierunku obrotu a zwiększona dokładność możliwa jest do osiągnięcia w wąskim zakresie przedziału. Dodatkowo trudne jest wykonanie siatek obróconych względem siebie o  $90$  stopni. Wymaga to zaawansowanej kontroli położenia światłowodu i nie daje gwarancji sukcesu ze względu na skłonność włókna do skręcania się i znaczną trudność uzyskania powtarzalności procesu wytwarzania struktur Bragga

Jak podano w opisie patentowym [US2006262307A1](#), dokładność przyrządu może się różnić i jest zależna od wyznacznika macierzy przyrządu. Macierz ta ustala zależność pomiędzy prądami zmierzonymi przez detektory a parametrami Stokesa, na podstawie których oblicza się kąt obrotu.

Problemem technicznym do rozwiązania jest wytworzenie czujnika kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przesyłanego przez włókno światłowodowe, który będzie działał w warunkach promieniowania i zakłóceń elektromagnetycznych, nie stwarzając zagrożenia wybuchem ani nie wpływając na działanie systemu pomiarowego. Urządzenie powinno umożliwiać pomiar kąta obrotu w zakresie  $0^\circ$ – $360^\circ$  z wysoką precyzją oraz oferować automatyczną, optymalną kalibrację bez udziału człowieka.

Przedmiotem wynalazku jest układ i sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przesyłanego przez włókno światłowodowe. W układzie do czoła obudowy zamocowane jest złącze światłowodowe, do którego przyłączony jest światłowód, zaś z drugiej strony światłowodu przyłączony jest splitter. **Istotą układu jest to, że** po przeciwnej stronie splittera przyłączone są drugi światłowód i trzeci światłowód z wytworzonymi w ich rdzeniach skośnymi siatkami Bragga. Każdy z drugich końców drugiego światłowodu i trzeciego światłowodu podłączony jest do osobnego analizatora widma optycznego, które połączone są z modułem obliczeniowym. Kąt obrotu siatek Bragga względem siebie wynosi od  $15^\circ$  do  $30^\circ$ .

W sposobie wykorzystuje się powyżej opisany układ i w kalibracji:

- Do układu pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przez złącze światłowodowe przyłącza się źródło światła spolaryzowanego, z którego wysyła się do układu światło spolaryzowane,
- polaryzację mierzonego światła ustawia się w pozycji początkowej, dla której kąt obrotu -  $K_{obr}$  równy jest  $0^\circ$ ,
- mierzone światło przesyła się przez złącze światłowodowe do światłowodu, z którego przesyła się je do splittera.

W pomiarze mierzone światło przesyła się przez złącze światłowodowe do światłowodu, z którego światło przesyła się do splittera,

**Istotą sposobu jest to, że** w kalibracji dzieli się światło w splitterze na dwie wiązki i przesyła do drugiego światłowodu i trzeciego światłowodu ze światłowodowymi skośnymi siatkami Bragga obróconymi względem siebie o kąt w zakresie od  $15^\circ$  do  $30^\circ$ , w których to siatkach zmienia się widmo światła. Światło z drugiego światłowodu przesyła się do pierwszego analizatora widma optycznego, w którym mierzy się moc światła dla poszczególnych

5 długości fali. Światło z trzeciego światłowodu przesyła się do drugiego analizatora widma optycznego, w którym mierzy się moc światła dla poszczególnych długości fal. Wartości mocy zmierzone w analizatorach przesyła się do modułu obliczeniowego, w którym otrzymane wartości przelicza się na serię wartości charakterystycznych dla

10 ustawionego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczenie odbywa się poprzez obliczenie współczynników szybkiej transformaty Fouriera – FFT z wartości zmierzonych w analizatorach widma mocy światła dla poszczególnych długości fali światła. Obliczone współczynniki - FFT zapisuje się wraz z odpowiadającym im

kątem obrotu płaszczyzny polaryzacji światła oraz numerem siatki Bragga użytej do zarejestrowania mocy światła

$$FC_i = \{(FC_{1j}, K_{obr\_j}, G), (FC_{2j}, K_{obr\_j}, G), \dots, (FC_{ij}, K_{obr\_j}, G), \dots, (FC_{nj}, K_{obr\_j}, G)\},$$

- gdzie  $FC_{ij}$  oznacza i-ty współczynnik transformaty zmierzony dla kąta obrotu wynoszącego j stopni,  
 $K_{obr\_j}$  oznacza kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła równy j stopni,  
 15 n oznacza połowę liczby wszystkich uzyskanych współczynników transformaty, w przypadku gdy n nie jest liczbą całkowitą zaokrągla się tę liczbę w dół,  
 G oznacza numer siatki Bragga, z której uzyskano widmo światła,
- płaszczyznę polaryzacji światła obraca się o zadany, stały kąt,
  - wykonuje się obrót płaszczyzny polaryzacji światła do momentu, w którym uzyska się pełny obrót płaszczyzny
  - 20 polaryzacji światła,
  - z obliczonych współczynników  $FC_{ij}$  tworzy się funkcje –  $C_{ig} = F(K_{obr\_j}, G)$  zależności wartości i-tego współczynnika FFT od kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, w taki sposób, że dla widm światła zarejestrowanych przez każdy z analizatorów widma optycznego, dla każdego współczynnika  $FC_{ig}$ , gdzie i jest numerem współczynnika i optymalnie jest nie większe niż 100 zaś g jest numerem siatki Bragga, odczytuje się jego wartość dla
  - 25 wszystkich kątów obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, dla których wykonano kalibrację, a następnie z odczytanych wartości tworzy się funkcję ciągłą poprzez wyznaczenie funkcji liniowych łączących odczytane wartości współczynnika dla kolejnych kątów obrotu, następnie wyznaczone funkcje łączy się i w ten sposób tworzy funkcje (charakterystyki) -  $C_{ig} = F(K_{obr\_j}, G)$  dla wszystkich współczynników,
  - dla każdej funkcji  $C_{ig}$  przeprowadza się automatyczną ocenę zaszumienia poprzez zapisanie jej
  - 30 znormalizowanych wartości  $FC_i$  w wektorze  $WC_i$ , podzielenie wszystkich wartości funkcji wektora  $WC_i$  na grupy po 6 współczynników, obliczenie regresji liniowej każdej z grup i obliczenie błędu średniokwadratowego (MSE) pomiędzy wartościami z grupy a ich regresją liniową. Oblicza się sumę wartości MSE wszystkich grup, która jest miarą zaszumienia funkcji  $C_{ig}$ ,
  - spośród wszystkich funkcji  $C_{ig}$  wybiera się od 20 do 80 o najniższej mierze zaszumienia i zapisuje się je trwale
  - 35 w układzie obliczeniowym, poprzez zapisanie wszystkich zmierzonych wartości tworzących funkcję  $FC_i$ , numeru współczynnika FFT oraz numeru siatki Bragga, za pomocą której zmierzono moce światła użyte do wyznaczenia funkcji  $C_i$ .

W pomiarze światło ze splittera dzieli się na dwie wiązki i przesyła je do światłowodów ze światłowodowymi skośnymi siatkami Bragga obróconymi względem siebie o kąt od  $15^\circ$  do  $30^\circ$ , w których to siatkach zmienia się widmo światła.

40 Światło z drugiego światłowodu przesyła się do pierwszego analizatora, w którym mierzy się moc światła dla różnych długości fali. Światło z trzeciego światłowodu przesyła się do drugiego analizatora, w którym mierzy się moc światła dla różnych długości fali. Wartości mocy zmierzone w analizatorach przesyła się do modułu obliczeniowego, w którym otrzymane wartości przelicza się na serię wartości charakterystycznych dla ustawionego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczanie odbywa się poprzez obliczenie współczynników szybkiej transformaty

45 Fouriera – FFT z wartości zmierzonych w analizatorach widma mocy światła dla poszczególnych długości fali światła. Spośród obliczonych współczynników FFT wybiera się te, dla których utworzono funkcje  $C_{ig}$  podczas

kalibracji układu a następnie oblicza się wartości kątów obrotu – PKO, dla których funkcja  $C_{ig}$  przyjmuje zmierzoną wartość współczynnika FFT. Kąty obrotu obliczone na podstawie funkcji  $C_{ig}$  zapisuje się w zbiorze obliczonych kątów obrotu – OKO, z którego tworzy się histogram, dzieląc zakres od najmniejszego do największego kąta obrotu ze zbioru OKO na przedziały – optymalnie 2880 przedziałów, następnie zlicza się liczbę wartości w każdym z przedziałów. z wartości zawartych w najliczniejszym przedziale oblicza się medianę, która jest zmierzoną wartością kąta obrotu.

Korzystnym skutkiem zastosowania wynalazku jest to, że rozwiązanie pozwala na zastosowanie w pełni autonomicznej procedury kalibracji układu pomiarowego bez udziału człowieka z procesu kalibracji, co gwarantuje powtarzalność wyników uzyskiwanych dla różnych układów. Zastosowanie dwóch obróconych względem siebie skośnych siatek Bragga pozwala na uzyskanie wysokiej precyzji w całym przedziale pomiarowym – średni błąd pomiaru wynosi  $0,062^\circ$ , co jest niemożliwe do uzyskania przy zastosowaniu pojedynczej skośnej siatki Bragga, ze względu na niewielkie zmiany odpowiedzi siatki dla kątów zbliżonych do  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$  i  $315^\circ$ . Ponadto zastosowanie elementów światłowodowych pozwala na uzyskanie odporności elementów pomiarowych na trudne warunki środowiskowe takich jak pole elektromagnetyczne czy promieniowanie, w tym kosmiczne, co pozwala na wykonywanie pomiarów w trudnych środowiskach, w tym w przestrzeni kosmicznej. Dodatkowo, rozwiązanie nie generuje żadnych zakłóceń oraz nie generuje zagrożenia w środowiskach zagrożonych wybuchem i pożarem.

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

Fig. 1 – schemat wykonania układu,

Fig. 2 – diagram blokowy metody kalibracji,

Fig. 3 – diagram blokowy metody pomiaru.

Układ i sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przesyłanego przez włókno światłowodowe, według wynalazku w przykładzie wykonania składa się z obudowy 1 do której zamocowane jest złącze światłowodowe 2 – SC podłączone do światłowodu 3 – SMF-28, do którego przyłączony jest splitter 4 – TD1315R5F1, z którego drugiej strony przyłączone są światłowody 5 i 6 – SMF-28 z wytworzonymi w ich rdzeniach światłowodowymi skośnymi siatkami Bragga 7 i 8 o kącie struktury wewnętrznej wynoszącym  $7^\circ$ . Światłowód 5 – SMF-28 podłączony jest do analizatora widma optycznego 9 – Yokogawa AQ6730D, który połączony jest z modułem obliczeniowym 11 w postaci komputera klasy PC. Światłowód 6 – SMF-28 podłączony jest do analizatora widma optycznego 10 – Yokogawa AQ6730D, który połączony jest z modułem obliczeniowym 11.

Sposób pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przesyłanego przez włókno światłowodowe z wykorzystaniem światłowodów jednomodowych i dwóch siatek Bragga przy użyciu wyżej opisanego układu zrealizowano według procedury opisanej poniżej.

Przeprowadzono kalibrację układu według następujących kroków:

- a) polaryzację mierzonego światła ustawiono w pozycji początkowej, dla której kąt obrotu -  $K_{obr}$  równy jest  $0^\circ$ ,
- b) mierzone światło przesłano przez złącze światłowodowe 2 do światłowodu 3, z którego światło zostało przesłane do splittera 4, który podzielił światło na dwie wiązki i przesłał je do światłowodów 5 i 6 ze światłowodowymi skośnymi siatkami Bragga 7 i 8 obróconymi względem siebie o kąt  $22$  stopni, w których to siatkach zmieniło się widmo światła. Światło ze światłowodu 5 zostało przesłane do analizatora 9, w którym zmierzono moc światła dla fal z zakresu  $1548 - 1554\text{nm}$  z krokiem  $0,004\text{nm}$ . Światło ze światłowodu 6 zostało przesłane do analizatora 10, w którym zmierzono moc światła dla fal z zakresu  $1548$

- 1554nm z krokiem 0,004nm. Wartości mocy zmierzone w analizatorach 9 i 10 przesłano do modułu obliczeniowego 11, w którym otrzymane wartości zostały przeliczone na serię wartości charakterystycznych dla ustawionego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczenie odbyło się poprzez obliczenie współczynników szybkiej transformaty Fouriera – FFT z wartości zmierzonych w analizatorach widma 9 i 10 mocy światła dla poszczególnych długości fali światła. Obliczone współczynniki - FFT zapisano wraz z odpowiadającym im kątem obrotu płaszczyzny polaryzacji światła oraz numerem siatki Bragga użytej do zarejestrowania mocy światła  $FC_i = \{(FC_{1j}, K_{obr\_j}, G), (FC_{2j}, K_{obr\_j}, G), \dots, (FC_{ij}, K_{obr\_j}, G), \dots, (FC_{nj}, K_{obr\_j}, G)\}$ , gdzie  $FC_{ij}$  oznacza i-ty współczynnik transformaty zmierzony dla kąta obrotu wynoszącego j stopni,  $K_{obr\_j}$  oznacza kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła równy j stopni, n oznacza połowę liczby wszystkich uzyskanych współczynników transformaty, w przypadku gdy n nie jest liczbą całkowitą zaokrągla się tę liczbę w dół, G oznacza numer siatki Bragga, z której uzyskano widmo światła,
- 5
- 10
- c) płaszczyznę polaryzacji światła obracano o zadany, stały kąt, równy  $2^\circ$  i powtarzano krok b)
- d) wykonywano obrót płaszczyzny polaryzacji światła i powtarzano krok b) do momentu, w którym uzyskano pełny obrót płaszczyzny polaryzacji światła,
- 15
- e) z obliczonych współczynników  $FC_{ij}$  utworzono funkcje –  $C_{ig} = F(K_{obr\_j}, G)$  zależności wartości i-tego współczynnika FFT od kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, w taki sposób, że dla widm światła zarejestrowanych przez każdy z analizatorów widma optycznego 9 i 10, dla każdego numeru współczynnika  $FC_i$ , z zakresu od 1 do 100, g jest numerem siatki Bragga, odczytano jego wartość dla wszystkich kątów obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, dla których wykonano kalibrację. Następnie z odczytanych wartości utworzono funkcję ciągłą poprzez wyznaczenie funkcji liniowych łączących odczytane wartości współczynnika dla kolejnych kątów obrotu. Następnie wyznaczone funkcje połączono i w ten sposób utworzono funkcje (charakterystyki) -  $C_{ig} = F(K_{obr\_j}, G)$  dla wszystkich współczynników,
- 20
- f) dla każdej funkcji  $C_{ig}$  przeprowadzono automatyczną ocenę zaszumienia poprzez zapisanie jej znormalizowanych wartości  $FC_i$  w wektorze  $WC_i$ , podzielenie wszystkich wartości funkcji wektora  $WC_i$  na grupy po 4 do 10 współczynników, korzystnie 6, obliczenie regresji liniowej każdej z grup i obliczenie błędu średniokwadratowego (MSE) pomiędzy wartościami z grupy a ich regresją liniową. Następnie obliczono sumę wartości MSE wszystkich grup, która jest miarą zaszumienia funkcji  $C_{ig}$ ,
- 25
- g) spośród wszystkich funkcji  $C_{ig}$  wybrano 40 o najniższej mierze zaszumienia i zapisano je trwale w układzie obliczeniowym, poprzez zapisanie wszystkich zmierzonych wartości tworzących funkcję -  $FC_i$ , numeru współczynnika FFT oraz numeru siatki TFBG, za pomocą której zmierzono moce światła użyte do wyznaczenia funkcji  $C_{ig}$ .
- 30

Pomiar polegał na tym, że mierzone światło przesłano przez złącze światłowodowe 2 do światłowodu 3, z którego światło zostało przesłane do splittera 4, który podzielił światło na dwie wiązki i przesłał je do światłowodów 5 i 6 ze światłowodowymi skośnymi siatkami Bragga 7 i 8 obróconymi względem siebie o kąt 22 stopni, w których to siatkach zmieniło się widmo światła. Światło ze światłowodu 5 zostało przesłane do analizatora 9, w którym zmierzono moc światła dla fal z zakresu 1548 - 1554nm z krokiem 0,004nm. Światło ze światłowodu 6 zostało przesłane do analizatora 10, w którym zmierzono moc światła dla fal z zakresu 1548 - 1554nm z krokiem 0,004nm.

35

40

Wartości mocy zmierzone w analizatorach 9 i 10 przesłano do modułu obliczeniowego 11, w którym otrzymane wartości zostały przeliczone na serię wartości charakterystycznych dla ustawionego kąta płaszczyzny polaryzacji światła. Przeliczenie odbyło się poprzez obliczenie współczynników szybkiej transformaty Fouriera – FFT z wartości zmierzonych w analizatorach widma 9 i 10 mocy światła dla poszczególnych długości fali światła.

Spośród obliczonych współczynników FFT wybrano te, dla których utworzono funkcje  $C_{ig}$  podczas kalibracji układu a następnie obliczono wartości kątów obrotu – PKO, jakie mogły być przez nie identyfikowane. Dokonano tego poprzez obliczenie dla jakich wartości kąta obrotu wartość funkcji  $C_{ig}$  osiąga wartość równą zmierzonej

45

wartości odpowiadającego jej współczynnika. Kąty obrotu obliczone na podstawie funkcji  $C_{ig}$  zapisano w zbiorze obliczonych kątów obrotu – OKO.

5 Ze zbioru OKO utworzono histogram, dzieląc zakres od najmniejszego do największego kąta obrotu ze zbioru OKO na 2880 przedziałów, następnie zliczono liczbę obliczonych kątów w każdym z przedziałów. z wartości zawartych w najliczniejszym przedziale obliczono medianę, która jest zmierzoną wartością kąta obrotu, która wynosiła 21,04 stopnia.

RZECZNIK PATENTOWY

*Maciej Nowicki*  
mgr inż. Maciej Nowicki  
Nr wp. 3476

#### Wykaz oznaczeń

1. Obudowa
2. Złącze światłowodowe
3. Światłowód jednomodowy
4. Splitter 50:50
5. Światłowód jednomodowy
6. Światłowód jednomodowy
7. Światłowodowa skośna siatka Bragga TFBG1
8. Światłowodowa skośna siatka Bragga TFBG1
9. Analizator widma optycznego OSA1
10. Analizator widma optycznego OSA2
11. Komputer PC z oprogramowaniem