

Waldemar WÓJCIK, Piotr KISAŁA, Sławomir CIĘSZCZYK
POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA ELEKTRONIKI

Czujnik rozkładu naprężenia ze światłowodową siatką Bragga

Dr hab. inż. Waldemar WÓJCIK

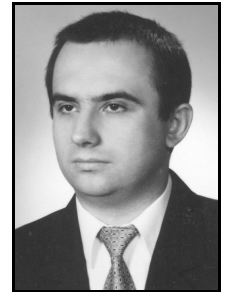
Ukończył studia na Politechnice Wrocławskiej - Wydział Elektroniki (1975), doktorat obronił w Politechnice Lubelskiej (1985), a habilitację w Politechnice Lwowskiej (2001). W pracy badawczej zajmuje się optoelektroniką, automatyką, telekomunikacją i informatyką. W swoim dorobku ma 14 monografii, ponad 100 prac naukowych, 3 patenty. Obecnie pełni funkcję Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

Mgr inż. Sławomir CIĘSZCZYK

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Lubelskiej w 2001 r., odbywając jednocześnie na piątym roku podyplomowe studia z Telekomunikacji Światłowodowej. W roku tym został zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej. Działalność naukowa S. Cięszczyka dotyczy różnego rodzaju czujników optycznych oraz przetwarzania sygnałów pomiarowych.



e-mail: s.cieszczyk@pollub.pl

Mgr inż. Piotr KISAŁA

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Lubelskiej w 2002 r. W roku tym został zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej. Działalność naukowo-badawcza Piotra Kisały dotyczy zarówno telekomunikacyjnych jak i niatelekomunikacyjnych zastosowań światłowodów, zwłaszcza nad zastosowaniem światłowodowych siatek Bragga jako elementów filtrujących oraz czujników optycznych.



e-mail: p.kisala@pollub.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję czujnika do pomiaru rozkładu naprężenia przy wykorzystaniu światłowodowych siatek Bragga (FBG - ang.: Fiber Bragg Grating). Opisano wykorzystanie metody symulowanego wyżarzania, zastosowanej do rekonstrukcji światłowodowej siatki Bragga, poddanej różnym rozkładom naprężenia. Zamieszczone wyniki analizy wskazują, iż możliwe jest określenie rozkładu naprężenia na bardzo małych powierzchniach rzędu kilku milimetrów.

Słowa kluczowe: światłowodowe siatki Bragga, wyznaczanie rozkładu naprężenia, czujniki optyczne, problem odwrotny.

Strain distribution sensor based on the fiber Bragg grating

Abstract

The conception of the simulated annealing method, used to reconstruction of the fiber Bragg grating, is presented in this paper. The fiber Bragg grating was used as a distributed strain sensor. Results and conclusions, which have flown out from our article, prove us that it's possible to determine the strain distribution in the FBG element. In this work the inverse problem technique is used. The inverse problem for our grating is to pass from the grating spectra to the refractive index modulation. We use the global optimization algorithm for solution of the inverse problem. The knowledge about the refraction index modulation phase, in each point of the grating, allow direct definition of the physical quantity (in our case: the strain), which evoke this change. First, we use the transfer matrix method to calculate the reconstructed grating spectrums in different grating parameters, and then we use simulated annealing algorithm to search a reconstructed spectrum that will be in agreement with the measured spectrum.

Keywords: fiber Bragg gratings, distributed strain reconstruction, optical fiber sensors, inverse problem.

1. Wstęp

W wielu zastosowaniach istnieje potrzeba znajomości rozkładu naprężeń o dużej dokładności na małych powierzchniach (odcin-kach). W szczególności przy określeniu stopnia zużycia instalacji ciśnieniowych - chemicznych, petrochemicznych czy ciepłowniczych (z uwagi na wżery). Dokładna znajomość wartości oraz

zmian rozkładu naprężeń na bardzo małych powierzchniach jest czynnikiem determinującym prawidłowe wykonywanie badań połączeń spawanych, klejowych itp.

Dotychczasowe metody oceny stanu naprężeń – nawet potwierdzone badaniami przy wykorzystaniu tensometrów – pozwalają na razie na uzyskanie informacji uśrednionych na danej długości.

Pomiary rozkładu naprężeń wykonane najczęściej przy wykorzystaniu tensometrów, które posiadają jednak wiele wad, min. niewystarczająca już czułość i dokładność pomiaru, brak odporności na interferencje elektromagnetyczne, ograniczony zakres temperaturowy pomiaru są obciążone błędami eliminującymi często tę metodę.

Niniejszy artykuł został ukierunkowany na pomiar rozkładu naprężeń z wykorzystaniem właściwości światłowodowych siatek Bragga, które posiadają wiele ważnych z metrologicznego punktu widzenia cech, min.: zdolność reakcji na odkształcenia, (nawet wielokrotnie zróżnicowanego na długości pomiarowej), odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, zdolność pomiarowa w szerokim zakresie temperatur, zwielokrotniona czułość w stosunku do tensometrów.

W pracy omówiono konstrukcję oraz wyniki wstępnych pomiarów czujnika rozkładu naprężenia.

Dokonano opisu zbudowanego modelu czujnika rozkładu naprężenia (patrz. rozdział 3), wykorzystanego w dalszej części do obliczeń i wstępnych pomiarów. W celu uzyskania informacji o profilu naprężenia czujnika na podstawie jego widma optycznego, zastosowano metodę symulowanego wyżarzania (simulated annealing) [1]. Jest to metoda poszukiwania ekstremum globalnego funkcji celu (rozdział 4). W rozdziale 5 przedstawiony jest układ pomiarowy oraz wyniki wstępnych pomiarów i obliczeń dla zaproponowanego czujnika.

2. Założenia metody

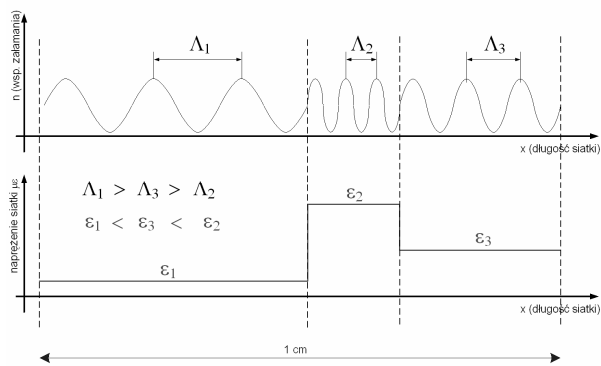
Elementem czujnika, na który działa naprężenie jest siatka Bragga. Zakładamy, że wartość owego naprężenia jest różna w różnych punktach czujnika (siatki). Wykorzystamy siatkę Bragga jako przetwornik naprężenia na widmo. Informacja o wartościach naprężenia w poszczególnych punktach czujnika zawarta jest zatem w widmie czujnika.

Tak naprawdę w widmie czujnika zawarta jest informacja o wartościach okresu w poszczególnych częściach siatki. Wiemy jednak, że wartość okresu w danym punkcie siatki określa wartość naprężenia w tym punkcie. Im większa jest wartość naprężenia rozciągającego w danym obszarze, tym większa jest wartość okresu siatki w tym obszarze. Powyższą zależność obrazuje rys. 1.

Nie istnieje bezpośrednia metoda pozwalająca na wyznaczenie rozkładu naprężenia siatki na podstawie jej widma transmisyjnego. Za pomocą metod numerycznych możemy jednak dokonać obliczenia odwrotnego – tj. wyznaczyć widmo na podstawie profilu naprężenia siatki. W tej sytuacji pojawia się tzw. problem odwrotny (ang. inverse problem). Potrzebujemy wyznaczyć profil

naprężenia mając dane widmo wiedząc, że potrafimy wyznaczyć widmo przy zadanym profilu naprężenia.

$$F = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{T_{pom} - T_{obl}}{T_{obl}} \right)^2} \quad (1)$$

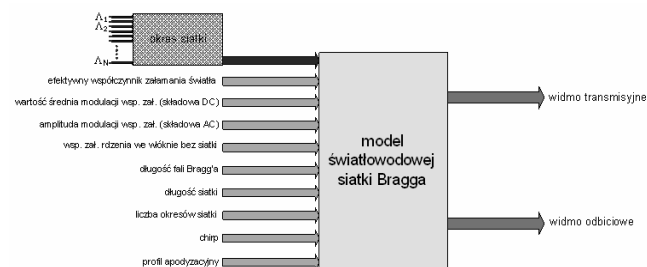


Rys. 1. Zależność wartości okresu siatki Bragga od wielkości naprężenia miejscowego czujnika
 Fig. 1. Dependence between the grating period value and the local strain value of the sensor

Zaproponowana procedura postępowania będzie zatem następująca. Czujnik poddajemy naprężeniu (zróżnicowanemu na długości). Mierzmy widmo transmisyjne czujnika (parz. układ z rys. 4). Następnie zakładamy dowolny początkowy profil naprężenia (dowolny, ponieważ nie wiemy jaki jest rzeczywisty). Dla tak założonego profilu obliczamy (wykorzystując model z rys. 2) widmo transmisyjne. Porównujemy widmo z analizatora widma (pomiarowe) z widmem obliczonym (z modelu). W przypadku różnicy pomiędzy tak otrzymanymi widmami, parametry modelu dobierane są za pomocą metody symulowanego wyżarzania. Po zmianie parametrów modelu obliczane jest widmo, które znowu poddawane jest porównaniu z widmem otrzymanym z analizatora. Sytuacja powtarza się aż do osiągnięcia założonego stopnia zgodności widm, przy którym funkcja celu (rozdział 3) osiągnie założone minimum.

3. Model czujnika naprężenia wykorzystującego siatkę Bragga

Rys. 2 przedstawia stworzony w języku programowania wysokopoziomowego model czujnika naprężenia.



Rys. 2. Model czujnika rozkładu naprężenia
 Fig. 2. The model of the strain distribution sensor

Jak widać model czujnika opiera się na przetwarzaniu wielu wejść. Osobną grupą wejść są okresy siatki oznaczone na rysunku 2 jako $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_N$. Ta grupa parametrów wyznaczana jest za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania. Wielkościami wyjściowymi modelu może być zarówno widmo transmisyjne, jak i odbiciowe.

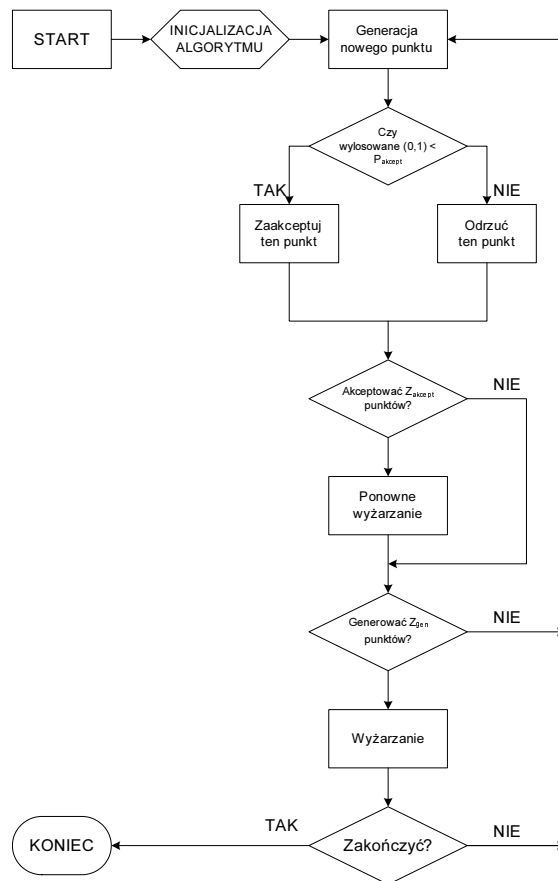
Funkcja celu jest średniokwadratowym błędem między zmierzonym i obliczonym widmem transmisyjnym czujnika o postaci:

gdzie: m - parametr określający liczbę punktów pomiarowych, T_{pom} - zmierzone jest widmo transmisyjne czujnika, T_{obl} - obliczone widmem transmisyjnym czujnika. Charakterystyka widmowa w naszym przypadku składa się z 500 punktów pomiarowych, zatem parametr $m = 500$. W każdej iteracji porównywana jest wartość T_{pom} z wartością T_{obl} i wyznaczana jest wartość funkcji celu F . Algorytm symulowanego wyżarzania dostaje informację o znaku i wartości funkcji celu i w następnym kroku iteracyjnym dobierane są „lepsze” wartości wejściowe modelu, zmniejszające wielkość funkcji celu (wartości wejściowe są wartościami rozkładu naprężenia czujnika).

4. Algorytm symulowanego wyżarzania

W algorytmach optymalizacyjnych, w tym także symulowanego wyżarzania, zakłada się, że dla każdego elementu przestrzeni rozwiązań potrafimy wyznaczyć wartość funkcji oceniającej jakoś rozwiązania. Jak wspomniano w rozdziale 3 algorytm symulowanego wyżarzania wykorzystany został do rekonstrukcji parametrów światłowodowej siatki Bragga. Interesującymi nas parametrami są wartości naprężenia siatki w kilku jej punktach. Aby zastosować metodę symulowanego wyżarzania postawiony został problem odwrotny dla światłowodowej siatki Bragga, który polegać będzie na wyznaczeniu okresu siatki na podstawie jej widma transmisyjnego [2-3].

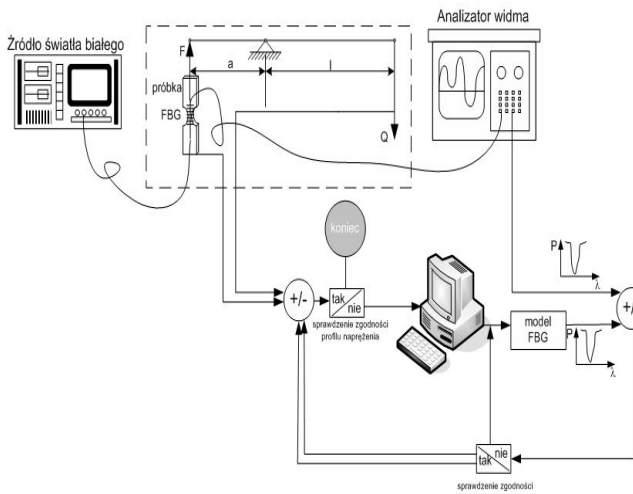
Schemat działania algorytmu przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat działania algorytmu symulowanego wyżarzania
 Fig. 3. The scheme of the simulated annealing algorithm

5. Wyniki pomiarów i obliczeń

Pomiary i obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu następującego układu pomiarowego:



Rys. 4. Schematu układu pomiarowego
Fig. 4. Measurement system

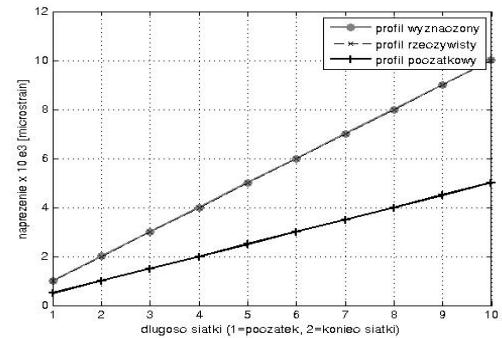
Aby potwierdzić poprawność wyznaczenia profilu napięcia konieczne było zbudowanie stanowiska pomiarowego (rys. 4).

Światło ze źródła światła białego wprowadzane jest do czujnika napięcia (FBG). Na czujnik działa siła rozciągająca F działająca na ramieniu a , spowodowana ciężarem Q działającym na ramieniu l . Wielkości F , a , Q , l są wprowadzane do modelu czujnika. Światło przemierzające naprężony czujnik rejestrowane jest za pomocą analizatora widma. Spektrum z analizatora jest porównywane z odpowiednim widmem otrzymanym z modelu czujnika i wyznaczana jest wartość funkcji celu (patrz. rozdział 3). Jeżeli wartość funkcji celu nie osiągnie założonej minimalnej wartości (w niniejszej pracy jest to wartość równa 0.018) następuje zmiana parametrów modelu zgodnie z algorytmem symulowanego wyżarzania. W oparciu o model przeliczane jest widmo w następnym kroku iteracyjnym. Proces iteracyjny zakończony będzie w przypadku osiągnięcia założonego stopnia zgodności charakterystyk spektralnych z analizatora widma i modelu czujnika. Tak wyznaczony profil napięcia został następnie porównywany z rzeczywistym, a zestawienie wyników pomiarów obliczeń i symulacji z układu z rys. 4 przedstawiają rysunki od 5 do 11.

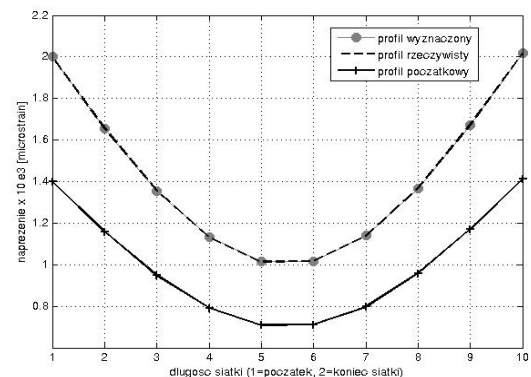
Na rysunkach od 5 do 11 zestawione zostały 3 profile napięcia: początkowy (jego kształt zakładamy na początku obliczeń), wyznaczony (obliczony za pomocą modelu) oraz rzeczywisty (z analizatora widma).

Rysunki 5, 6 i 7 zawierają kształty owych profili dla przypadku 50 000 kroków iteracyjnych metody symulowanego wyżarzania w sytuacji dobrze przewidzianego rozkładu napięcia. Zgodność kształtów profili wyznaczonych i rzeczywistych potwierdza możliwość wykorzystania przedstawionego czujnika do pomiaru rozkładu napięcia.

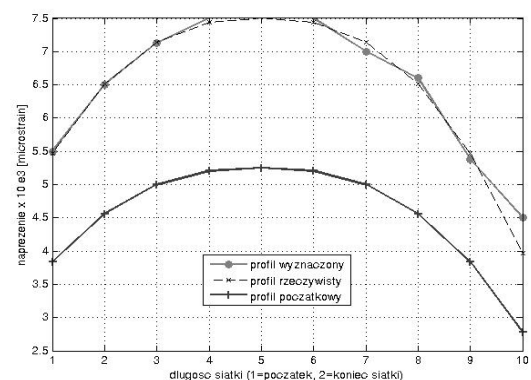
Rys. 8 przedstawia wyniki obliczeń dla 10 000 iteracji, natomiast rys. 9 wyniki obliczeń dla 5 000 kroków iteracyjnych algorytmu. Jak widać, zmniejszenie liczby iteracji ma znaczny wpływ na dokładność wyznaczenie profilu napięcia.



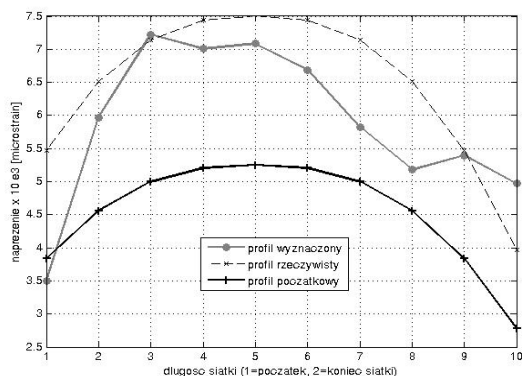
Rys. 5. Profile napięcia czujnika rozkładu napięcia. Linia czarna przerywana – profil rzeczywisty, linia czarna ciągła – profil startowy (początkowy), linia szara – profil wyznaczony przy pomocy procedury zgodnej z algorytmem symulowanego wyżarzania (50 000 iteracji, przewidziany kształt profilu rzeczywistego – dobrze dobrane warunki początkowe)
Strain profiles of the strain distribution sensor. Real profile – black dashed line, initial profile – black solid line, recovered by simulated annealing profile – grey line (50 000 iterations, well assumed real profile shape – well matched initial conditions)



Rys. 6. Profile napięcia czujnika rozkładu napięcia. Linia czarna przerywana – profil rzeczywisty, linia czarna ciągła – profil startowy (początkowy), linia szara – profil wyznaczony przy pomocy procedury zgodnej z algorytmem symulowanego wyżarzania (50 000 iteracji, przewidziany kształt profilu rzeczywistego – dobrze dobrane warunki początkowe)
Strain profiles of the strain distribution sensor. Real profile – black dashed line, initial profile – black solid line, recovered by simulated annealing profile – grey line (50 000 iterations, well assumed real profile shape – well matched initial conditions)

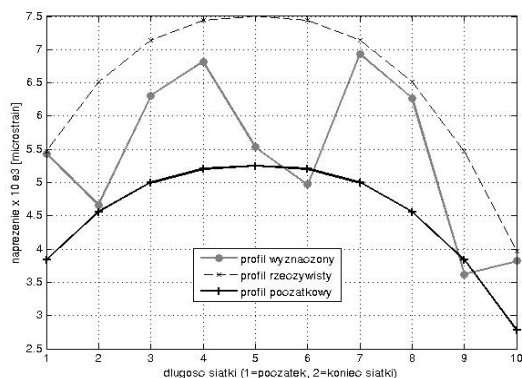


Rys. 7. Profile napięcia czujnika rozkładu napięcia. Linia czarna przerywana – profil rzeczywisty, linia czarna ciągła – profil startowy (początkowy), linia szara – profil wyznaczony przy pomocy procedury zgodnej z algorytmem symulowanego wyżarzania (50 000 iteracji, przewidziany kształt profilu rzeczywistego – dobrze dobrane warunki początkowe)
Strain profiles of the strain distribution sensor. Real profile – black dashed line, initial profile – black solid line, recovered by simulated annealing profile – grey line (50 000 iterations, well assumed real profile shape – well matched initial conditions)



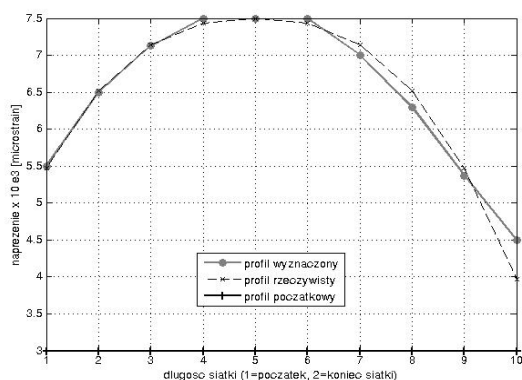
Rys. 8. Profile napężenia czujnika rozkładu napężenia. Linia czarna przerywana – profil rzeczywisty, linia czarna ciągła – profil startowy (początkowy), linia szara – profil wyznaczony przy pomocy procedury zgodnej z algorytmem symulowanego wyżarzania (10 000 iteracji, przewidziany kształt profilu rzeczywistego – dobrze dobrane warunki początkowe)

Fig. 8. Strain profiles of the strain distribution sensor. Real profile – black dashed line, initial profile – black solid line, recovered by simulated annealing profile – grey line. (10 000 iterations, well assumed real profile shape – well matched initial conditions).



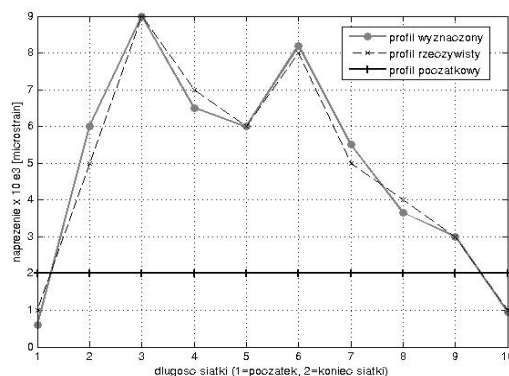
Rys. 9. Profile napężenia czujnika rozkładu napężenia. Linia czarna przerywana – profil rzeczywisty, linia czarna ciągła – profil startowy (początkowy), linia szara – profil wyznaczony przy pomocy procedury zgodnej z algorytmem symulowanego wyżarzania (5 000 iteracji, przewidziany kształt profilu rzeczywistego – dobrze dobrane warunki początkowe)

Fig. 9. Strain profiles of the strain distribution sensor. Real profile – black dashed line, initial profile – black solid line, recovered by simulated annealing profile – grey line (5 000 iterations, well assumed real profile shape – well matched initial conditions)



Rys. 10. Profile napężenia czujnika rozkładu napężenia. Linia czarna przerywana – profil rzeczywisty, linia czarna ciągła – profil startowy (początkowy), linia szara – profil wyznaczony przy pomocy procedury zgodnej z algorytmem symulowanego wyżarzania (50 000 iteracji, źle przewidziany kształt profilu rzeczywistego – źle dobrane warunki początkowe)

Fig. 10. Strain profiles of the strain distribution sensor. Real profile – black dashed line, initial profile – black solid line, recovered by simulated annealing profile – grey line. (50 000 iterations, badly assumed real profile shape – badly matched initial conditions)



Rys. 11. Profile napężenia czujnika rozkładu napężenia. Linia czarna przerywana – profil rzeczywisty, linia czarna ciągła – profil startowy (początkowy), linia szara – profil wyznaczony przy pomocy procedury zgodnej z algorytmem symulowanego wyżarzania (50 000 iteracji, źle przewidziany kształt profilu rzeczywistego – źle dobrane warunki początkowe)

Fig. 11. Strain profiles of the strain distribution sensor. Real profile – black dashed line, initial profile – black solid line, recovered by simulated annealing profile – grey line (50 000 iterations, badly assumed real profile shape – badly matched initial conditions)

Na uwagę zasługują charakterystyki z rys. 10 i 11. Zwróćmy uwagę, iż nawet w przypadku zupełnie nie trafionych (źle przewidzianych) przebiegów napężenia czujnika, jego wyznaczenie jest możliwe, pod warunkiem zapewnienia dostatecznej liczby iteracji (w tym konkretnym przypadku 50 000 kroków iteracyjnych).

6. Wnioski

Zamieszczone wyniki analizy wskazują, iż możliwe jest określenie rozkładu napężenia przy wykorzystaniu światłowodowych siatek Bragga. Rysunki przedstawiające wyniki działania algorytmu symulowanego wyżarzania wskazują, iż nie jest konieczne dokładne dobranie kształtu profilu napężenia czujnika.

Opisany czujnik może być wykorzystany do diagnozy rozkładu napężenia w wielu obszarach na bardzo małych powierzchniach. Charakter rozkładu naprężeń może być bardzo zróżnicowany. Zaproponowany układ czujnikowy posiada zdolność reakcji na dowolny kształt rozkładu naprężeń.

7. Literatura

- [1] D. Gelatt, S. Kirkpatrick, M. P. Vecchi: Optimization by simulated annealing. Science, 220:671-680, 1983.
- [2] Waldemar Wójcik, Piotr Kisała, Sławomir Ciężczyk: Recovery of information about fiber Bragg gratings in nano-measurements of physical quantities. Proceedings of SPIE Vol. 5952, p. 227-232, Optical Fibers: Applications; Leszek R. Jaroszewicz, Brian Culshaw, Anna G. Mignani; Eds. Pub. Sep 2005.
- [3] Waldemar Wójcik, Piotr Kisała, Sławomir Ciężczyk, Katarzyna Sobańska: Gradient based methods for the inverse problem solution in the fiber Bragg gratings. Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN: 83-7085-970-4, pp. 412 - 416.