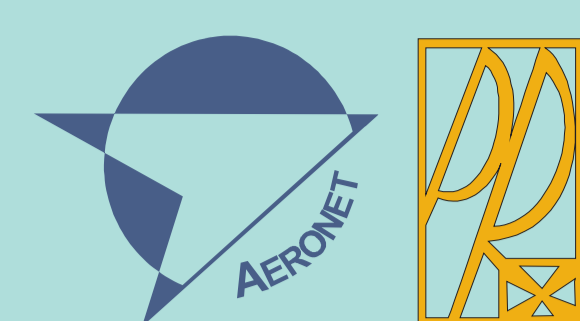


# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry



## Materiały inteligentne oraz bazujące na nich systemy zespolone do zastosowania w lotnictwie

### Smart Materials & smart embedded systems in aerospace applications

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Instytut Lotnictwa w Warszawie, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska, Politechnika Warszawska

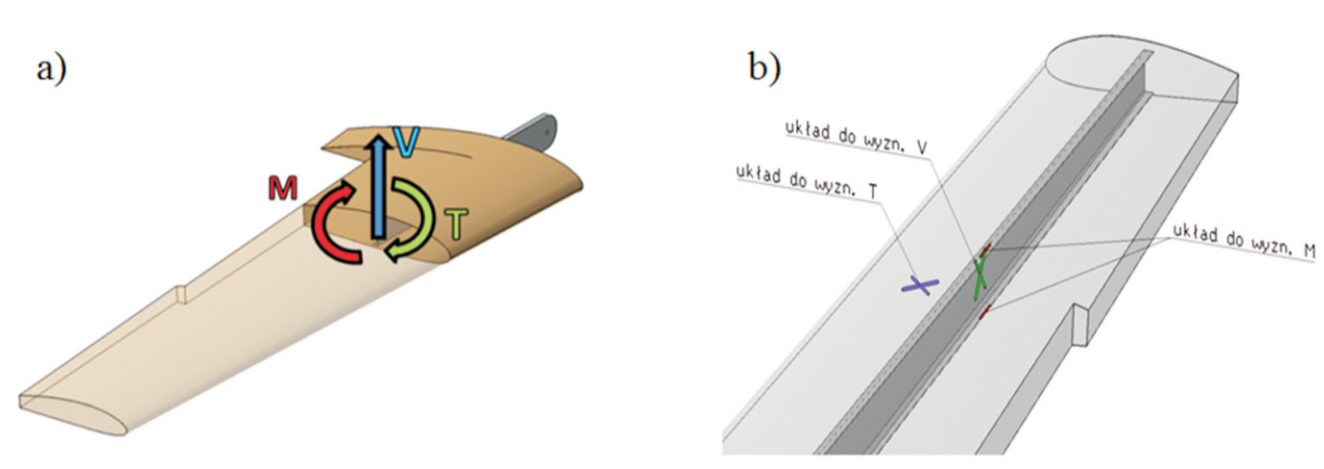
#### Wyniki badań Results

Zagadnienia kalibracji układu do pomiaru stanu obciążenia kompozytowego skrzydła samolotu bezzałogowego z zastosowaniem tensometrii światłowodowej i elektrooporowej

#### Cel i zakres badań Target and range of experimental examinations

W przedstawionej pracy omówiono zagadnienia kalibracji układu pomiarowego realizującego jednoczesny pomiar trzech wielkości tj. siły tnącej, momentu gnącego oraz momentu skręcającego przy użyciu trzech zestawów czujników. Z uwagi na fakt, iż możliwe są również pomiary tych wielkości indywidualnie, podjęto próbę określenia poziomu dokładności wskazań, w zależności od ilości użytych czujników. Zagadnienie takie wydaje się istotne ze względu na koszty wytworzenia układu pomiarowego oraz możliwość obniżenia jego masy w przypadku stosowania mniejszej liczby czujników.

The work discusses issues of calibration of the measurement system performing simultaneous measurement of three sizes ie: shear force, bending moment and torque with use of three sets of sensors. Due to the fact that it is also possible to measure these forces and moments individually, attempt to determine the level of accuracy depending on the number of sensors was made. Such a problem seems to be important due to the cost of manufacture of the measurement system and the possibility of reducing the weight in the case of the use of fewer sensors.



Rys.1 Obciążenie przekroju skrzydła oraz typowe rozmieszczenie czujników tensometrycznych  
Fig.1 Wing section load and typical distribution of strain gages

#### Stanowisko badawcze i badana struktura

Na potrzeby badań wytworzono jednodźwigarowe, wolnoosne skrzydło kompozytowe o stałym profilu aerodynamicznym NACA 4415. Dźwigar, o przekroju ceowym, zbudowano z tkaniny węglowej wzmocnionej dodatkowo, w miejscach styku półek i ścianek, rowingiem węglowym. Pokrycie skrzydła stanowiła powłoka przelaskowa wykonana z czterech warstw tkaniny węglowej, o konfiguracji osiowej ±45°, wewnątrz której zastosowano wypełnienie w postaci pianki poliuretanowej. Całość pokryto jedną warstwą tkaniny szklanej. Połączenie skrzydła z kadłubem BSL zrealizowano poprzez bagnetową część dźwigara zawierającą dwa okucia, których zadaniem jest odebranie reakcji w postaci siły tnącej oraz momentu gnącego. Aby wyeliminować możliwość obrotu skrzydła wokół osi pochylającej samolotu zastosowano trzecie okucie w tylnej części skrzydła, na wysokości ścianki przeciwklapowej. Szczegóły rozwiązania prezentuje rysunek 2.

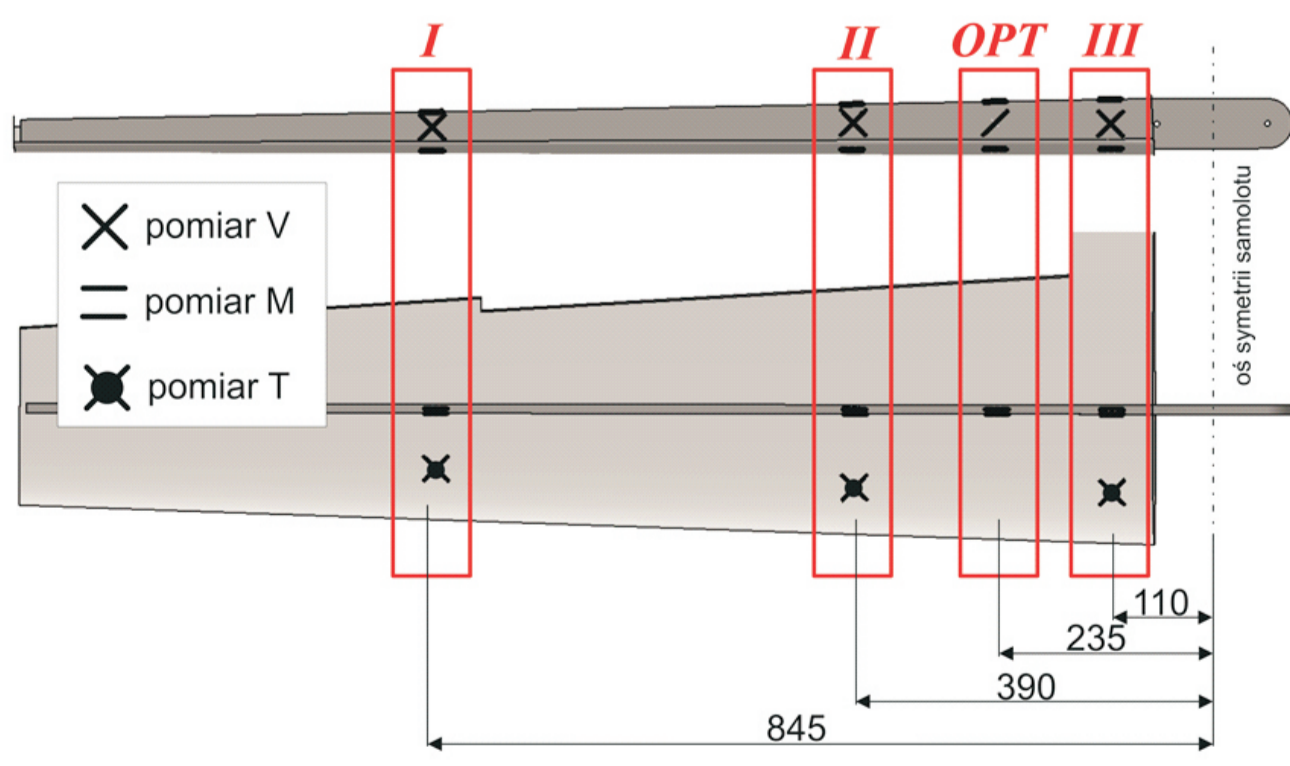


Rys.2 Geometria CAD badanego skrzydła oraz szczegóły zamocowania  
Fig.2 CAD geometry of tested wing and details of attachments

#### Układ pomiarowy

Zastosowany układ pomiarowy zbudowano w oparciu o czujniki tensometryczne elektrooporowe oraz światłowodowe. Czujniki pomiaru odkształceń zgrupowano w czterech przekrojach pomiarowych (rys.3). Układy I, II i III składały się z trzech mostków tensometrycznych. Pomiar siły tnącej (układ pełnego mostka) realizowano z wykorzystaniem czujników umieszczonych na ściance dźwigara uznając iż jej zasadniczym zadaniem, jest przeniesienie sił poprzecznych. Wystąpienie momentu gnącego związane jest z obciążeniem pasów dźwigara siłami normalnymi, toteż na powierzchni tych elementów umieszczano czujniki w układzie pół-mostka. Elementy pokrycia skrzydła, zgodnie z ideą pracy struktury półskorupowej, poddawane są jedynie obciążeniom w postaci wydatku stycznego. Przednia część skrzydła ograniczona dźwigarem tworzy keson, którego zadaniem jest przeniesienie momentu skręcającego. W celu określenia tej wielkości zastosowano układy pełnego mostka zespolone z pokryciem. W sumie układy I, II i III składały się z 30 tensometrów elektrooporowych (rys.3).

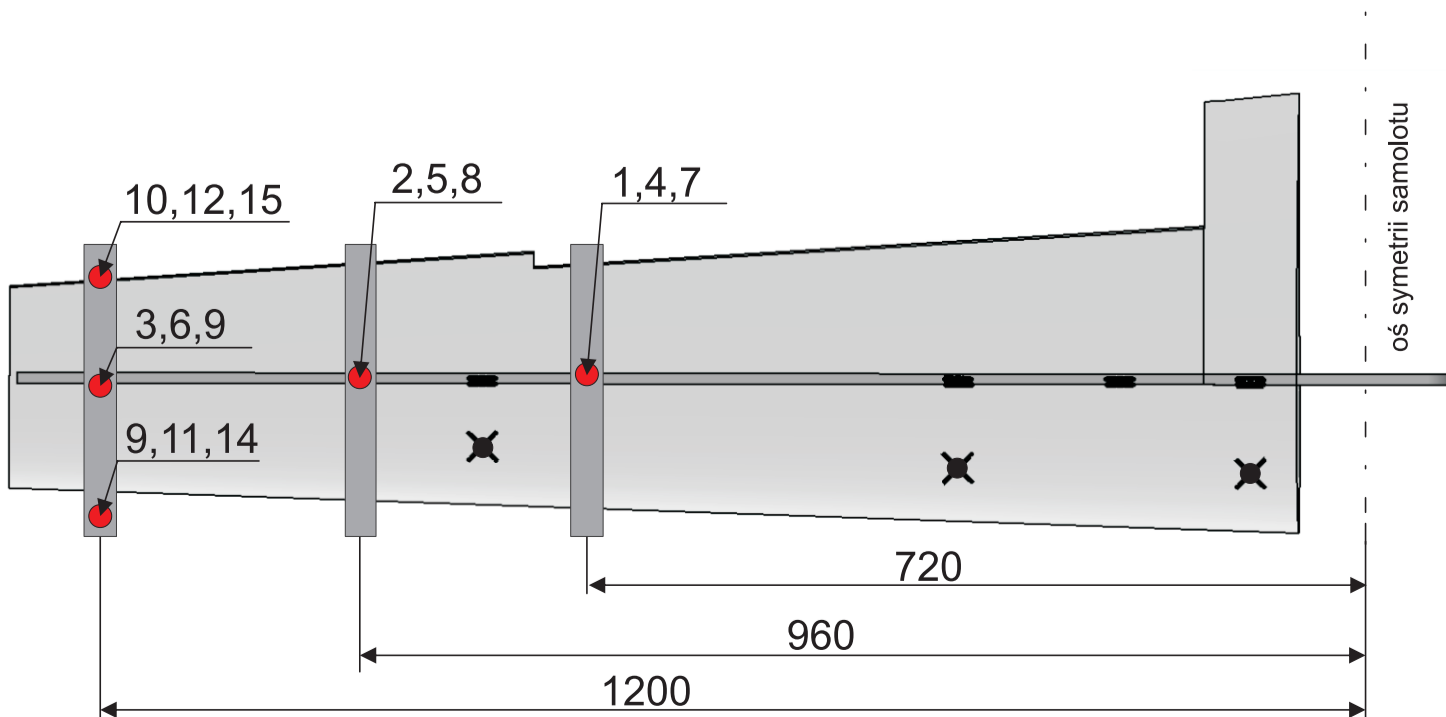
W przypadku struktur BSL, jak już zaznaczono kluczową rolę odgrywa masa systemu pomiarowego, dlatego też z badaną konstrukcją dodatkowo zespolono tensometry światłowodowe (przekrój OPT - rys.2). System akwizycji danych pomiarowych składał się ze wzmacniacza tensometrycznego Quantum MX848 oraz interlogatora SI405 produkcji firmy HBM. Obydwa urządzenia podłączono do komputera klasy PC. Rozmieszczenie przekrojów pomiarowych (rys.3) dobrano w taki sposób aby możliwym stało się ustalenie dokładności wskazań dla różnych wielkości odkształceń występujących wzdłuż rozpiętości badanego skrzydła.



Rys.3 Umieszczenie czujników tensometrycznych wewnątrz struktury skrzydła (wymiary w mm)  
Fig.3 Location of strain gauges inside the wing structure (dimensions in mm)

#### 4. Proces kalibracji układu pomiarowego

Kalibracji układu pomiarowego dokonano poprzez przykładanie obciążenia skupionego kolejno, w pięciu punktach wzdłuż rozpiętości skrzydła oraz długości cięciwy (rys.4). Zrealizowano w ten sposób 15 przypadków obciążenia (tablica 1) o różnych stosunkach wielkości siły tnącej (V), momentu gnącego (M) oraz momentu skręcającego (T) działającego na badane skrzydło. W tablicy 1 każdą wartość obciążenia odniesiono do wielkości siły tnącej oraz momentu gnącego, który wystąpił w pierwszej fazie obciążenia w przekroju III.



Rys.4 Punkty przyłożenia siły (cyfry na rysunku odpowiadają numerowi przypadku obciążenia w tablicy 1)

Fig.4 Force application points (numbers in the figure correspond to the number of load case in Table 1)

Tablica 1. Realizowane eksperymentalnie przypadki obciążenia  
Table 1. Experimentally realized load cases

Przypadek obciążenia	PRZEKROJ II			PRZEKROJ III			PRZEKROJ OPT		
	V [N]	M [Nm]	T [Nm]	V [N]	M [Nm]	T [Nm]	V [N]	M [Nm]	T [Nm]
1	1.0 V	1.0 M	0.0	0.5 M	0.0	0.0	0.8 M	0.0	0.0
2	1.0 V	1.4 M	0.0	1.0 M	0.0	0.0	1.2 M	0.0	0.0
3	1.0 V	1.8 M	0.0	1.5 M	0.0	0.0	1.6 M	0.0	0.0
4	1.6 V	1.6 M	0.0	0.8 M	0.0	0.0	1.2 M	0.0	0.0
5	1.6 V	2.2 M	0.0	1.5 M	0.0	0.0	1.9 M	0.0	0.0
6	1.6 V	2.8 M	0.0	2.1 M	0.0	0.0	2.5 M	0.0	0.0
7	2.2 V	2.2 M	0.0	1.1 M	0.0	0.0	1.7 M	0.0	0.0
8	2.2 V	3.8 M	0.0	2.8 M	0.0	0.0	3.4 M	0.0	0.0
9	2.2 V	3.1 M	0.0	2.0 M	0.0	0.0	2.6 M	0.0	0.0
10	1.0 V	1.8 M	0.2 M	1.5 M	0.2 M	0.0	1.6 M	0.2 M	0.0
11	1.0 V	1.4 M	-0.2 M	1.0 M	-0.2 M	0.0	1.2 M	-0.2 M	0.0
12	1.6 V	2.8 M	0.4 M	2.1 M	0.4 M	0.0	2.5 M	0.4 M	0.0
13	1.6 V	2.2 M	-0.4 M	1.5 M	-0.4 M	0.0	1.9 M	-0.4 M	0.0
14	2.2 V	3.8 M	0.5 M	2.8 M	0.5 M	0.0	3.4 M	0.5 M	0.0
15	2.2 V	3.1 M	-0.5 M	2.0 M	-0.5 M	0.0	2.6 M	-0.5 M	0.0

Zarejestrowane w trakcie badań pomiary odkształceń posłużą do kalibracji układy czyli wyznaczenia współczynników  $\beta$  ze wzorów:

$$\{V_n\} = \|\mu_{nj}\| \{\beta_{1j}\}$$

$$\{M_n\} = \|\mu_{nj}\| \{\beta_{2j}\}$$

$$\{T_n\} = \|\mu_{nj}\| \{\beta_{3j}\}$$

Po odpowiednich przekształceniach otrzymujemy wielkości  $\beta$  według zależności:

$$\{\beta_{1j}\} = \left[ \|\mu_{nj}\|^T \|\mu_{nj}\| \right]^{-1} \left\{ \|\mu_{nj}\|^T \{V_n\} \right\}$$

$$\{\beta_{2j}\} = \left[ \|\mu_{nj}\|^T \|\mu_{nj}\| \right]^{-1} \left\{ \|\mu_{nj}\|^T \{M_n\} \right\}$$

$$\{\beta_{3j}\} = \left[ \|\mu_{nj}\|^T \|\mu_{nj}\| \right]^{-1} \left\{ \|\mu_{nj}\|^T \{T_n\} \right\}$$

gdzie, w przypadku jednego mostka  $j=1$ , dwóch mostków  $j=1,2$ ; natomiast w przypadku pełnego układu pomiarowego (trzy mostki)  $j=1,2,3$ .

#### Wyniki pomiarów

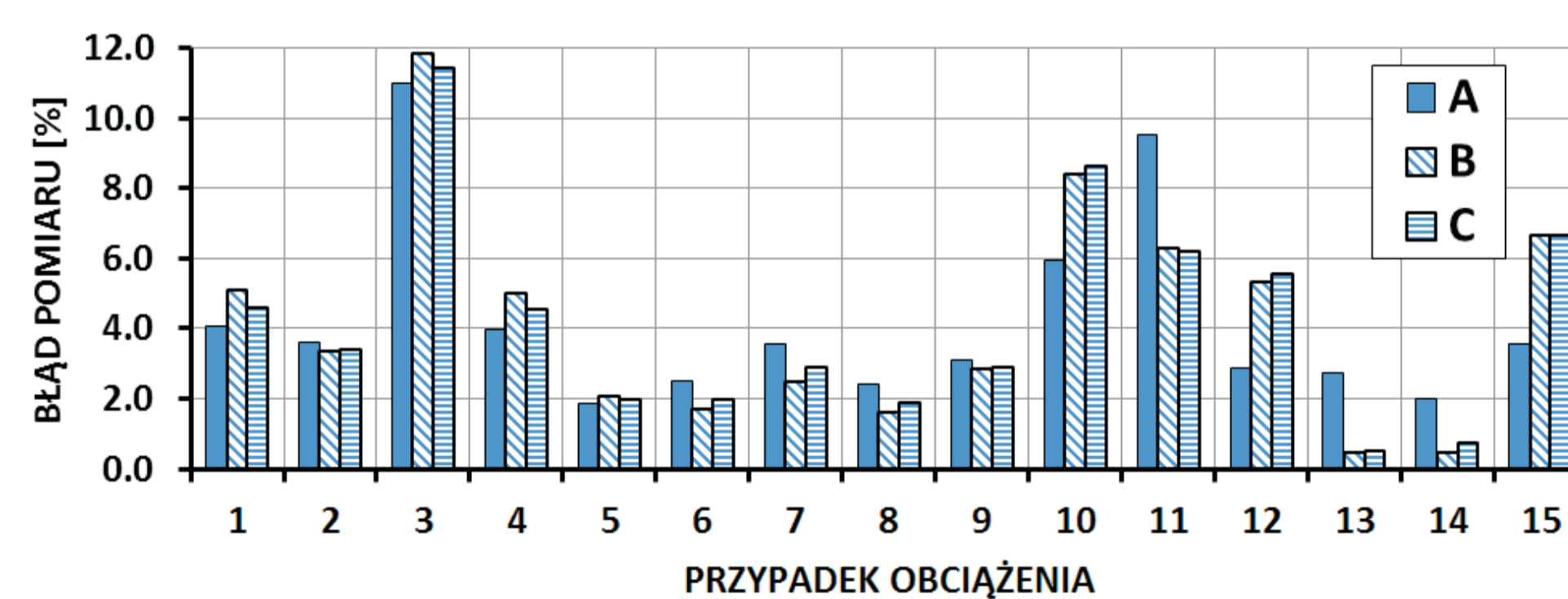
Uzyskane w trakcie badań wyniki wykorzystano do rozpatrzenia trzech przypadków kalibracji:

- Kalibracja z wykorzystaniem pełnego układu pomiarowego - układ A.
- Kalibracja z wykorzystaniem tylko mostków do pomiaru siły tnącej oraz momentu gnącego - układ B.
- Kalibracja z wykorzystaniem poszczególnych mostków - indywidualne pomiary siły tnącej, momentu gnącego oraz momentu skręcającego - układ C.

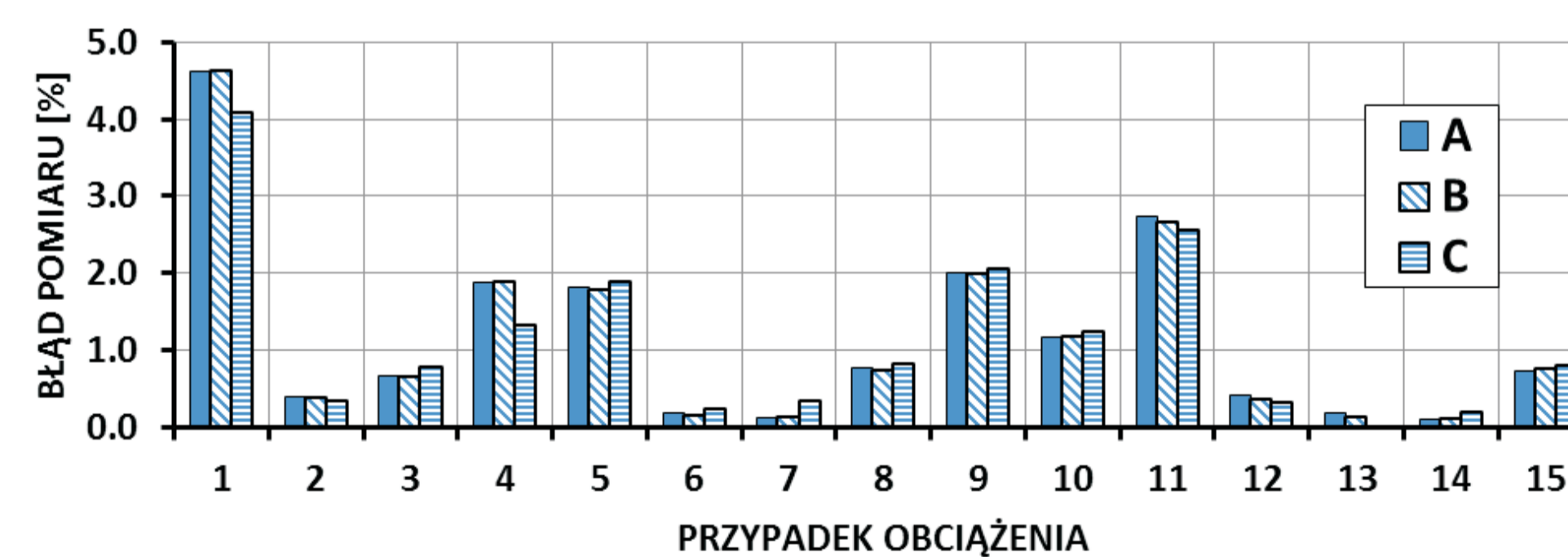
Każdy przypadek prowadził do obliczenia, zgodnie ze podanymi wyżej wzorami, współczynników  $\beta$  oraz wyznaczenia wartości sił i momentów przekrojowych. Poniżej zestawiono graficzne porównanie błędów pomiarowych (wartości bezwzględne) dla każdego realizowanego przypadku obciążenia.

#### 5.1 Kalibracji układu w przekrojach II i III

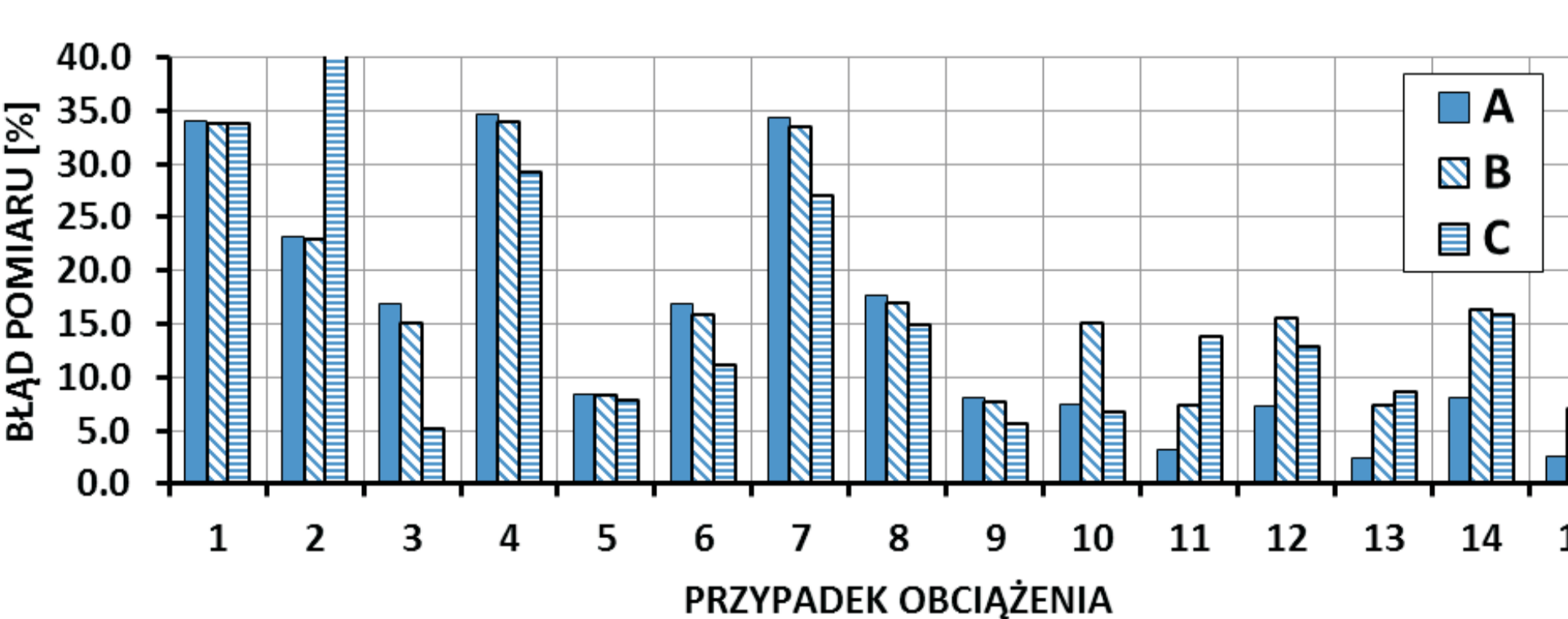
Rysunki 5 do 8 prezentują rozkład błędów wskazań czujników tensometrycznych dla przekrojów oznaczonych jako II i III. Analiza wyników prowadzi do wniosku, iż zastosowane układy oraz numeryczna procedura kalibracji pozwala na uzyskanie informacji o wielkości działającego w przekroju momentu gnącego z wartością błędu nie przekraczającą 5%. Wyniki kalibracji dowodzą również, iż dokładność mierzone wielkości w niewielkim stopniu zależy od zastosowanego układu pomiarowego. W przypadku wyznaczenia wielkości siły tnącej błędy dla przekroju II nie przekroczyły 12%, natomiast pomiar w przekroju III obciążony był błędami sięgającymi 40%. Analizując wykresy przedstawione na rysunkach 6 i 8 można wywnioskować, iż tylko w przypadku kilku pomiarów błędy znacznie odbiegają od średniej wielkości. Rysunki 9 i 10 prezentują wyniki kalibracji przeprowadzonej po usunięciu pomiarów 3,10 i 11 (układ A1). Wyeliminowanie wyraźnie niepoprawnych wskazań wpłynęło pozytywnie na proces kalibracji, jednakże zaznaczyć należy, iż wzrosło średnie odchylenie kwadratowe błędu dla całej serii pomiarów. Ocena otrzymanych wyników prowadzi również do wniosku, iż rozkład błędów pomiarowych ma charakter przypadkowy, wynikający raczej z umocowania matematycznego metody niż z realizowanych przypadków obciążenia.



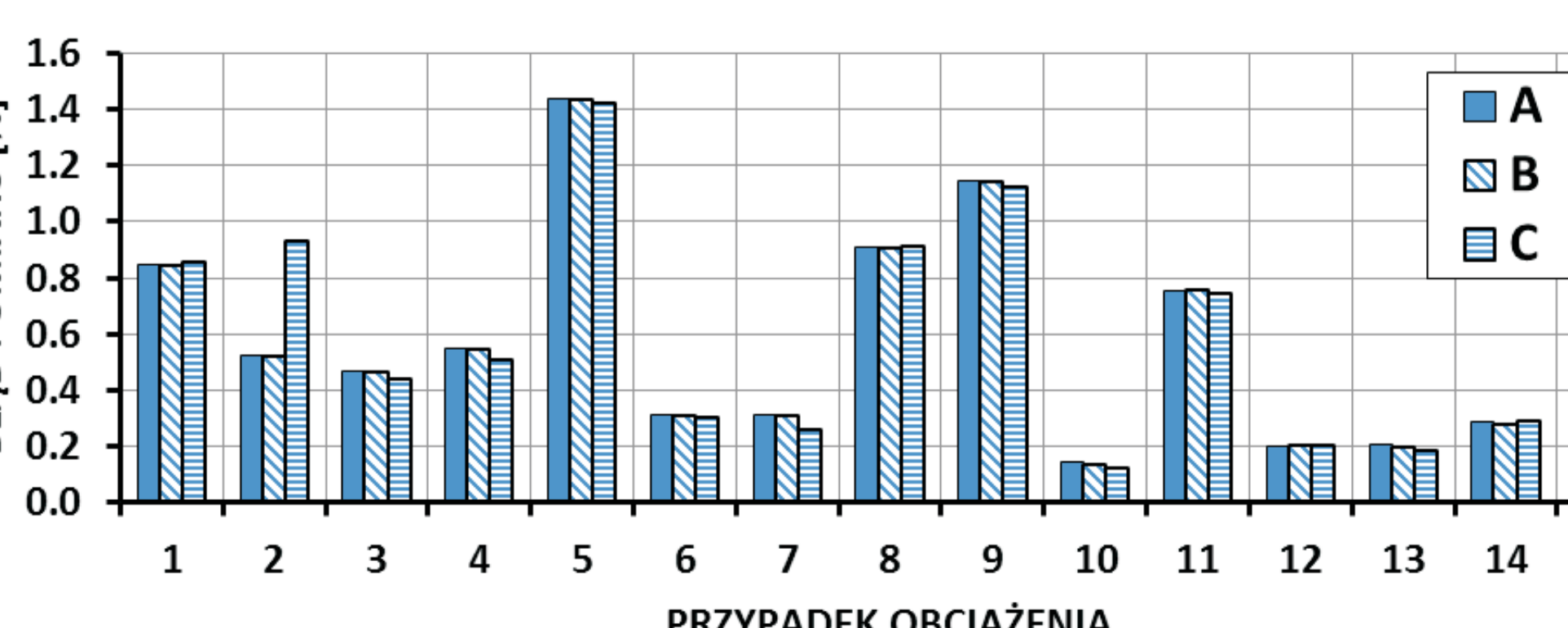
Rys.5 Błąd pomiaru siły tnącej - przekrój II  
Fig.5 Shear force measurement errors - section II



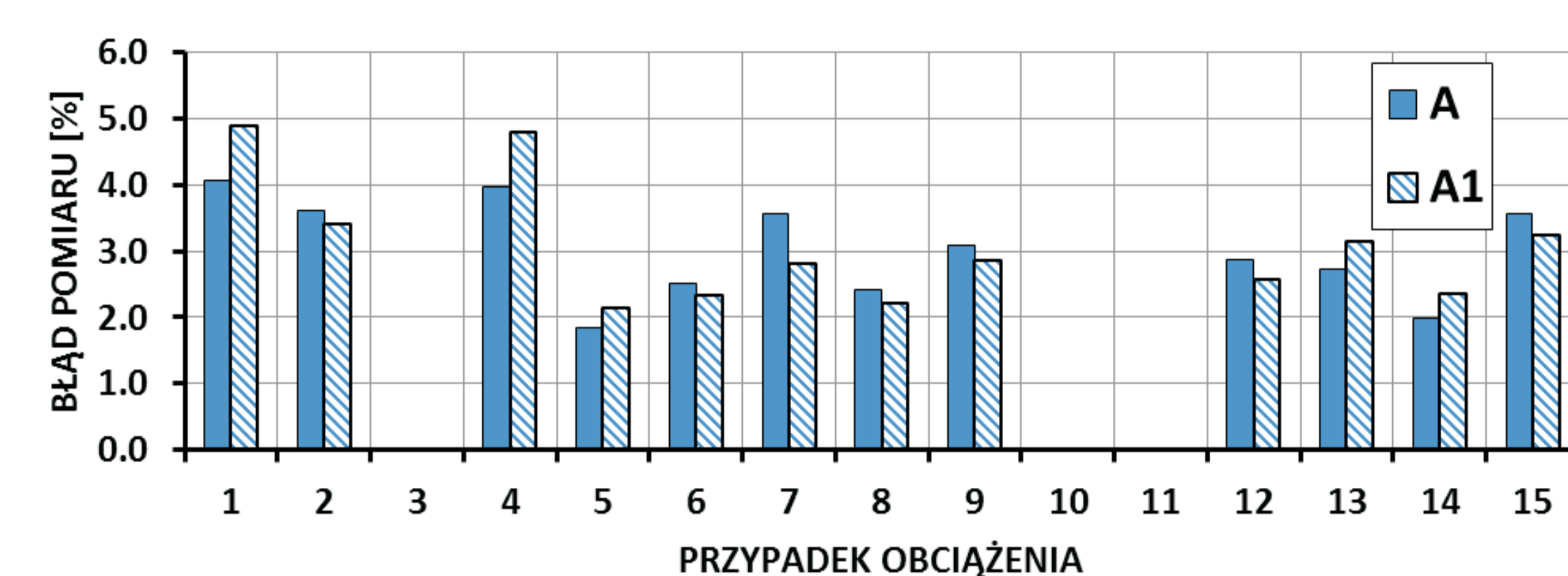
Rys.6 Błąd pomiaru momentu gnącego - przekrój II  
Fig.6 Bending moment measurement errors - section II



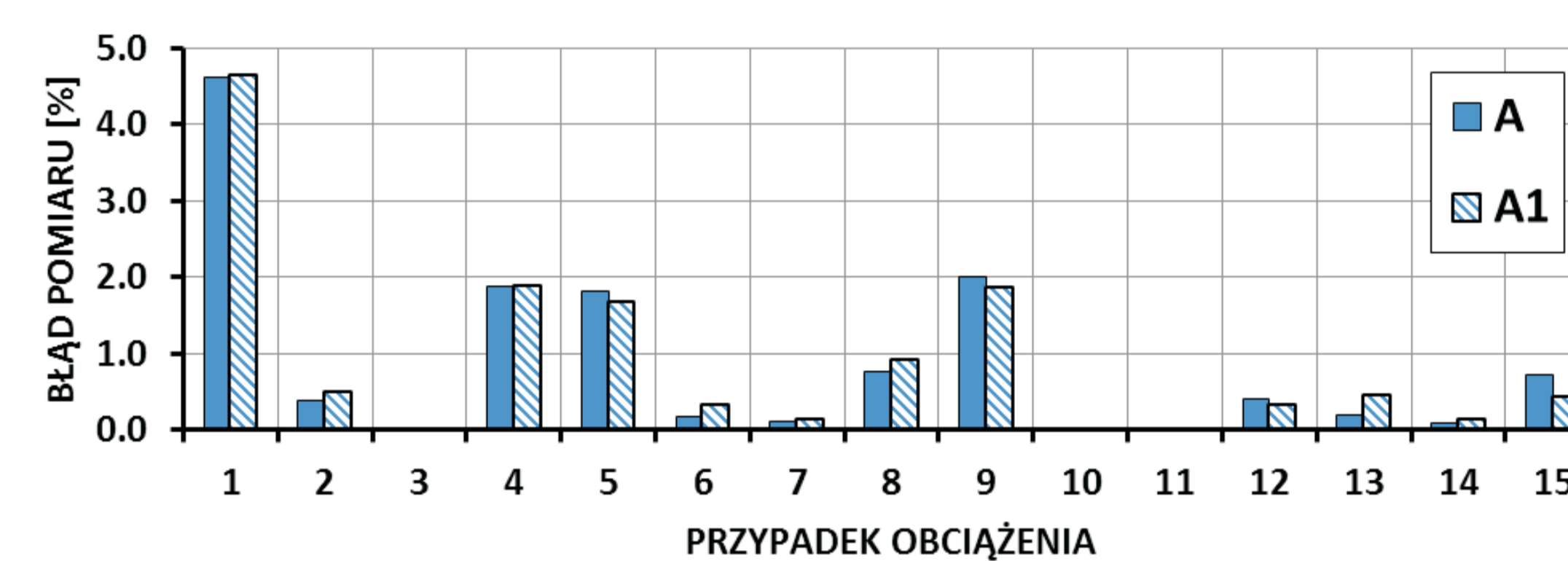
Rys.7 Błąd pomiaru siły tnącej - przekrój III  
Fig.7 Shear force measurement errors - section III



Rys.8 Błąd pomiaru momentu gnącego - przekrój III  
Fig.8 Bending moment measurement errors - section III



Rys.9 Błąd pomiaru siły tnącej - przekrój II  
Fig.9 Shear force measurement errors - section II



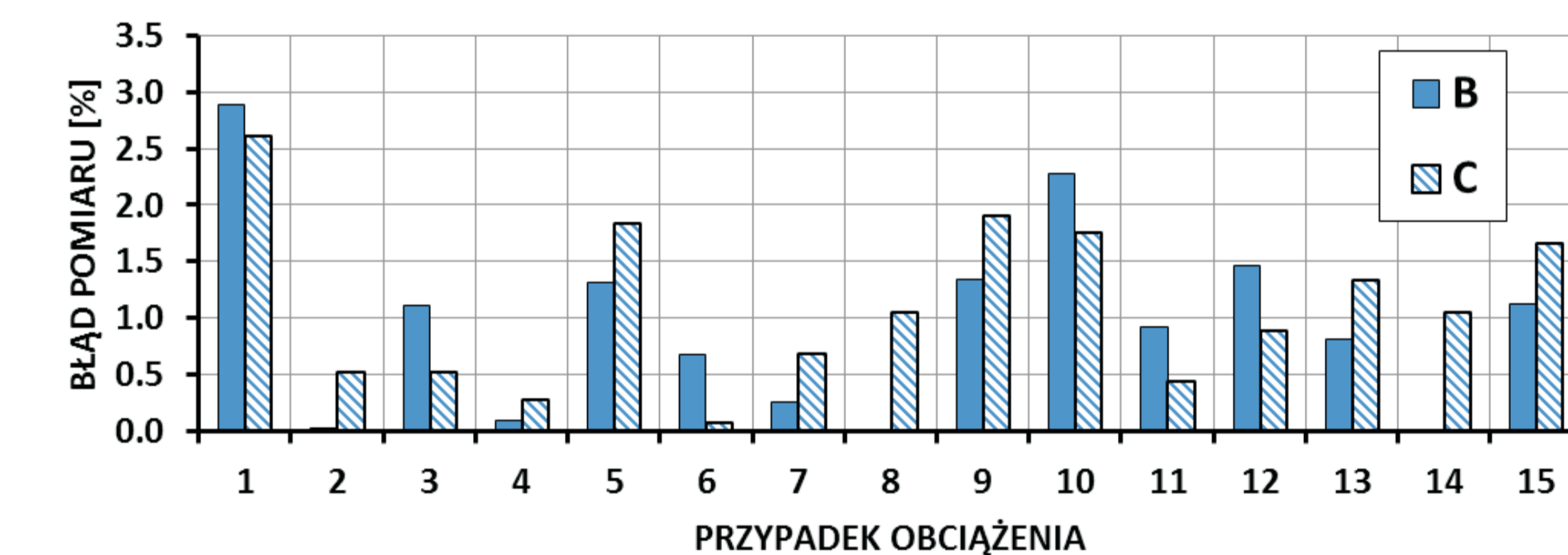
Rys.10 Błąd pomiaru momentu gnącego - przekrój III  
Fig.10 Bending moment measurement errors - section III

#### Kalibracja układu w przekroju OPT

Wyniki kalibracji czujników światłowodowych zaprezentowano na rysunkach 11 i 12. Wyniki pomiaru siły tnącej dla układu B wykazują błędy rzędu 40%. Zaznaczyć należy jednak, iż pomiary wykonane z wykorzystaniem tylko jednego czujnika, co zapewne wpłynęło na dokładność pomiarów. Zastosowanie do kalibracji wskaźnika jedynie czujnika naklejonego na ściance dźwigara (układ C) prowadzi do rozbieżności w wartościach rzeczywistych i mierzonych rzędu 140% (poza skalą na rysunku 11). Rysunek 12 przedstawia wyniki pomiaru momentu gnącego. Zarówno rezultaty dla układu B jak i C uznać należy za zadowalające (błąd poniżej 3%).



Rys.11 Błąd pomiaru siły tnącej - przekrój OPT  
Fig.11 Shear force measurement errors - section OPT



Rys.12 Błąd pomiaru momentu gnącego - przekrój OPT  
Fig.12 Bending moment measurement errors - section OPT

#### Wnioski Conclusions

#### 6. Wnioski (Conclusions)

W pracy zaprezentowano wyniki kalibracji układów pomiarowych wykorzystanych do wyznaczenia sił i momentów przekrojowych w skrzydle samolotu bezzałogowego. Do pomiarów zastosowano zarówno czujniki elektrooporowe, jak i światłowodowe oparte o metodę działania siatki Bragga. Analiza wyników pomiaru siły tnącej wskazuje na znaczne rozbieżności w stosunku do wartości rzeczywistych (błąd między 12% a 40% w zależności od rozpatrywanego przekroju pomiarowego). Wyznaczenie wielkości momentu skręcającego skrzydła jest możliwe tylko w przypadku zastosowania pełnego układu pomiarowego. Przeprowadzone badania dowodzą, iż w przypadku pomiaru momentu gnącego nie ma konieczności stosowania pełnego układu pomiarowego. Układ zbudowany jedynie z czujników zespolonych z pasami dźwigara skrzydła umożliwia przeprowadzenie pomiarów o dokładności wystarczającej do oceny zachowania struktury w trakcie eksploatacji. Wniosek taki w połączeniu z faktem, iż moment gnący w większości przypadków jest obciążeniem wymiarującym konstrukcję skrzydła jest podstawą do budowy układów pomiarowych o prostej budowie i względnie niskich kosztach wytworzenia. Ograniczenie liczby czujników pomiarowych jest szczególnie istotne w przypadku technologii światłowodowej. Zaznaczyć należy, iż na chwilę obecną koszt jednego czujnika z siatką Bragga jest około piętnastokrotnie wyższy niż koszt tensometru elektrooporowego.

The paper presents results of the calibration of the measurement systems used to determine the forces and moments in the UAV wing. Measurement were conducted with use of both the electrical and FBG strain gages. Analysis of the results of the shear force measurement indicates a much discrepancy in relation to the actual values (error between 12% and 40% depending on the measurement section under consideration). Determining the size of the torque of the wing is only possible when using the full measurement system. The study shows that in the case of measuring the bending moment there is no need for a full measurement system. The system built only with sensors attached to the wing spar belts allows to perform measurements with an accuracy sufficient to assess the behavior of the structure during operation. Such a proposal in conjunction with the fact that the bending moment in most cases is a critical load for construction enables to build measuring systems with a simple structure and relatively low cost of production. Limiting the number of sensors is particularly important in the case of FBG strain gages. It should be noted that at the moment the cost of a Bragg grating sensor is about fifteen times higher than the cost of the electrical strain gauge.