



**INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH**

**im. Roberta Szewalskiego**

**POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

**80-231 Gdańsk**

**ul. J. Fiszera 14**

Tel. (centr.): **058 3460881**

Fax: **058 3416144**

e-mail: **imp@imp.gda.pl**

Tel. (sekr.): **058 3416071**

**www.imp.gda.pl**

## Sprawozdanie końcowe z realizacji zadania Nr 6

*Analiza globalna charakterystyk statyczno-dynamicznych konstrukcji MES. Analiza numeryczna zaproponowanej metodyki pomiaru opartej o propagacje fal sprężystych dla krytycznych fragmentów konstrukcji.*

Okres realizacji zadania 01.2011-12.2011

Realizowanego w ramach projektu PROFAL  
pt. „System monitorowania stanu technicznego konstrukcji metodą analiz propagacji fal Lamba”

Numer projektu POIG.01.03.01-22-078/09

Zadanie zrealizowano w całości zgodnie z planem i harmonogramem realizacji. Szczegółowe informacje zawarto w treści niniejszego sprawozdania na stronach 2 do 30.

Sprawozdający:

Kierownik zespołu realizatorów zadania

.....

Odbierający:

Kierownik projektu PROFAL

.....

Gdańsk 2011



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka



REGON: **000326121**

NIP: **584-035-78-82**

POLTAX VAT-5UE: **PL5840357882**

IBAN: **PL 421090109800000000009015357**

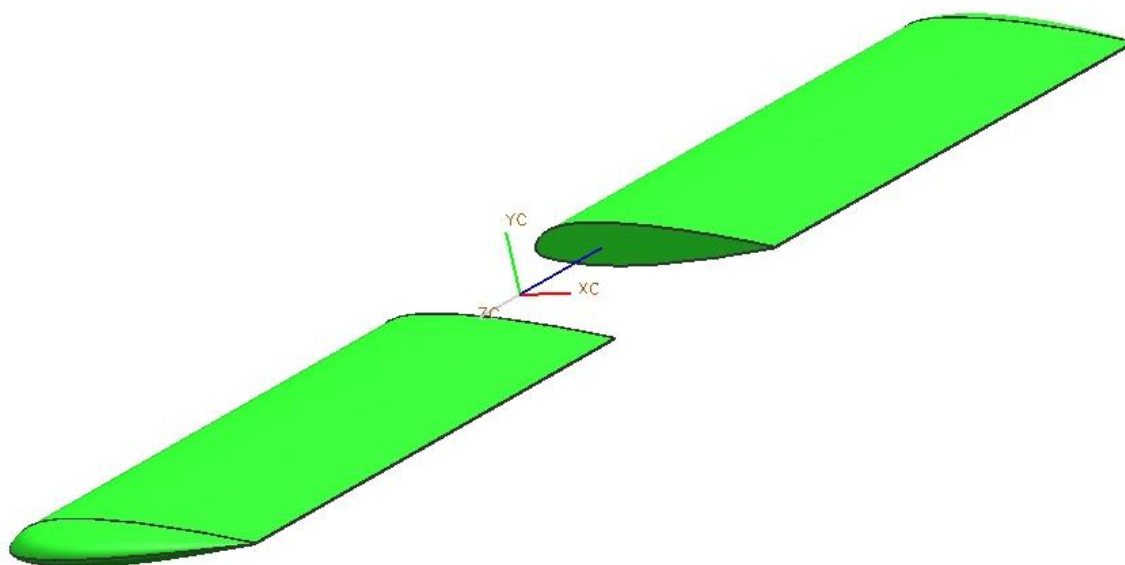
kod SWIFT: **WBKPPLPP**

Natowski Kod Podmiotu Gospodarki Narodowej **NCAGE: 0409H**

## **Analiza projektów technicznych fragmentów konstrukcji i opracowanie stosownej metodyki obliczeń numerycznych**

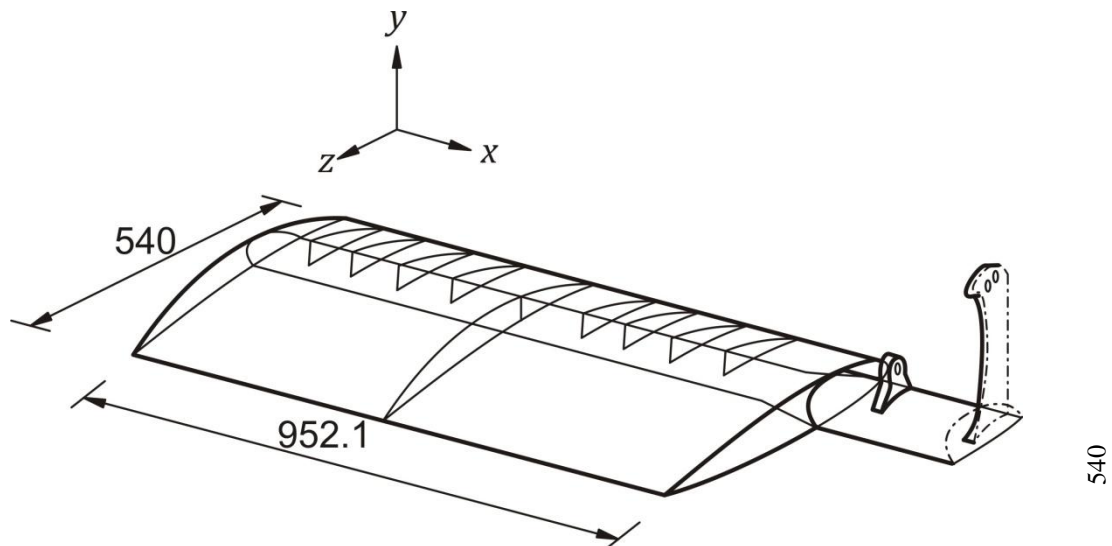
W projekcie brano pod uwagę różnego rodzaju konstrukcje, ale z uwagi na możliwości laboratoryjne wybrano dwa reprezentatywne obiekty, tj. statecznik poziomy śmigłowca oraz zbiornik hydroforowy. Obiekty te mają na tyle niewielkie gabaryty, że można było umieścić je w pomieszczeniach laboratoryjnych. Po za tym są one wykonane z różnych rodzajów materiałów oraz mają odmienną budowę, co sprawia, że są to obiekty adekwatne do opracowywania i testowania systemów monitorowania. Ponadto kształty tych obiektów są na tyle złożone, że opracowane dla nich systemy monitorowania będzie łatwo zaadoptować do struktur o prostszej budowie (np. łopat turbin wiatrowych).

### ***Statecznik poziomy śmigłowca PZL W-3A***



**Rys. 1: Widok ogólny statecznika poziomego śmigłowca PZL W-3A przyjęty do modelowania**

Widok ogólny statecznika poziomego śmigłowca PZL W-3A badanego w projekcie przedstawiono na Rys. 1. Z danych technicznych zdjęto wymiary zewnętrzne, które posłużyły do wygenerowania siatki modelu. Rys. 2 przedstawia gabaryty jednej z połówek statecznika wraz z podziałem belkowym płata.



Rys. 2. Ogólne wymiary statecznika poziomego śmigłowca PZL W-3A

- Ogólny schemat konstrukcyjny:

Struktura kompozytowa z kompozytu szklano-epoksydowego, typu skorupowego, płat z centralnym dźwigarem rurowym belkowym, dla obciążeń skręcających pracujący jak rura jednoobwodowa, dwa płaty symetrycznie zamocowane na dźwigarze, bez płyt brzegowych.

- Zabudowa na płatowcu:

Struktura mocowana poprzez wspornik do końcowej części belki ogonowej poniżej statecznika pionowego i przekładni pośredniczącej transmisji śmigła ogonowego. Płaty statecznika składają się z pokrycia górnego i pokrycia dolnego. Pokrycia płatów w części spływowej usztywnione są segmentami wypełniacza komórkowego, a w części nasadowej żebrami przekładkowymi równomiernie rozmieszczonymi na całej długości statecznika.

- Dźwigar:

Dźwigar ma kształt rury o zmiennym profilu i przekroju wzdłuż rozpiętości. Między płatami statecznika znajdują się wsporniki i dźwignia mocowane do dźwigara laminatowymi opaskami.

- Główne składowe obciążeń:

- siły aerodynamiczne generowane na całej powierzchni statecznika, składowa stała wynikająca ze stanu lotu śmigłowca dla zachowania równowagi podłużnej w locie swobodnym, składowa zmienna wynikająca z zaburzeń opływu pochodzących ze strumienia za wirnikiem nośnym, strumienia opływu za bryłą kadłuba oraz turbulencji powietrza. Krytyczne obciążenia aerodynamiczne statecznika poziomego dla lotu z prędkością  $V_{max} = 275\text{km/h}$  przy prędkości wiatru bocznego  $w = 9.2\text{m/s}$  i dla temperatury  $t = 15^{\circ}\text{C}$  wynoszą:  $F_n = 3463\text{N}$  (siła normalna działająca do góry) oraz  $F_n = -5160\text{N}$  (siła normalna działająca w dół), natomiast dla temperatury  $t = -50^{\circ}\text{C}$  odpowiednio  $F_n = 4474\text{N}$  i  $F_n = -6661\text{N}$ .
- siły inercyjne wynikające z siły ciężkości, przyspieszeń liniowych i kątowych bryły śmigłowca oraz drgań generowanych zmiennymi siłami aerodynamicznymi na stateczniku i przenoszonych na statecznik poprzez strukturę płatowca i węzły mocowania. Maksymalny współczynnik obciążenia w locie działający na statecznik poziomy, przyłożony do jego struktury w celu określenia maksymalnych obciążeń inercyjnych został przyjęty na poziomie 1.5 (FAR 29.303). Całkowity ciężar statecznika wynosi 9.3kg.
- Zakresy częstości drgań identyfikowane na stateczniku w locie śmigłowca oraz ważniejsze źródła drgań:
  - 0-5Hz – manewry śmigłowca
  - 4.3, 17, 35Hz – wirnik nośny śmigłowca
  - 28, 30Hz – częstości własne statecznika indukowane turbulencją strumienia powietrza
  - 100Hz – transmisja mocy śmigła ogonowego

W wyniku przeprowadzonych testów przez PZL Świdnik zidentyfikowano sześć postaci drgań własnych w zakresie częstotliwości do 150Hz (Tab. 1).

Tab. 1. Częstości drgań własnych statecznika śmigłowca PZL W-3A

Lp.	Częstotliwość, [Hz]	Postać drgań
1	26.5 - 27.0	drżania w płaszczyźnie mniejszej sztywności
2	32.0	drżania giętne w płaszczyźnie obrotu ze skręcaniem
3	39.0	drżania giętne w płaszczyźnie obrotu
4	49.0 – 51.0	drżania giętne w płaszczyźnie obrotu ze skręcaniem
5	74.0	drżania skrętne
6	140.0	drżania giętne w płaszczyźnie obrotu

Z opisanym fragmentem konstrukcji wiążą się wymagania systemu monitorowania, który powinien je spełniać. Następujące parametry/zdarzenia powinny być monitorowane przez system:

- Uszkodzenia struktury: pęknięcia, delaminacja itp.
- Przekroczenie obciążeń, naprężeń itp.
- Uderzenie: kamień, grad itp.

Zastosowane w systemie czujniki powinny spełniać następujące warunki:

- Trwałość czujników powinna być większa niż trwałość monitorowanych struktur lub powinna istnieć możliwość wymiany czujników;
- Niezawodność czujników powinna być na tyle duża, aby struktura z systemem SHM była równie niezawodna jak bez systemu SHM
- Masa czujników nie powinna zmieniać własności dynamicznych monitorowanych struktur;

System rejestracji i przetwarzania informacji

- System rejestracji powinien pozwalać na rejestrację danych przez okres 25 godzin;
- Przetwarzanie i analiza danych powinna odbywać się na pokładzie śmigłowca, krytyczne zdarzenia powinny być sygnalizowane załodze.

Do obliczeń numerycznych przyjęto rzeczywiste wymiary jak również w miarę możliwości dane materiałowe odpowiadające parametrom rzeczywistym. Obliczenia charakterystyk statycznych i dynamicznych przeprowadzono za pomocą komercyjnego oprogramowania

MES. Koncepcja symulacji rozchodzenia się propagacji fal jest dwutorowa. Wzbudzenie fal może znajdować się na powierzchni płata albo na którymś z usztywnień. Pierwsze z podejść może zostać zweryfikowane eksperymentalnie, natomiast drugie niestety nie, ponieważ płat jest zabudowany (system monitorowania musiałby być zainstalowany w fazie wytwarzania statecznika). Symulacje propagacji fal przeprowadzono za pomocą własnego oprogramowania.

### **Zbiornik hydroforowy**

Drugim z badanych w projekcie obiektów jest zbiornik *DE Junior 300* firmy Refix. Na Rys. 3 został przedstawiony jego schemat (materiały producenta).

Zbiornik posiada następujące cechy:

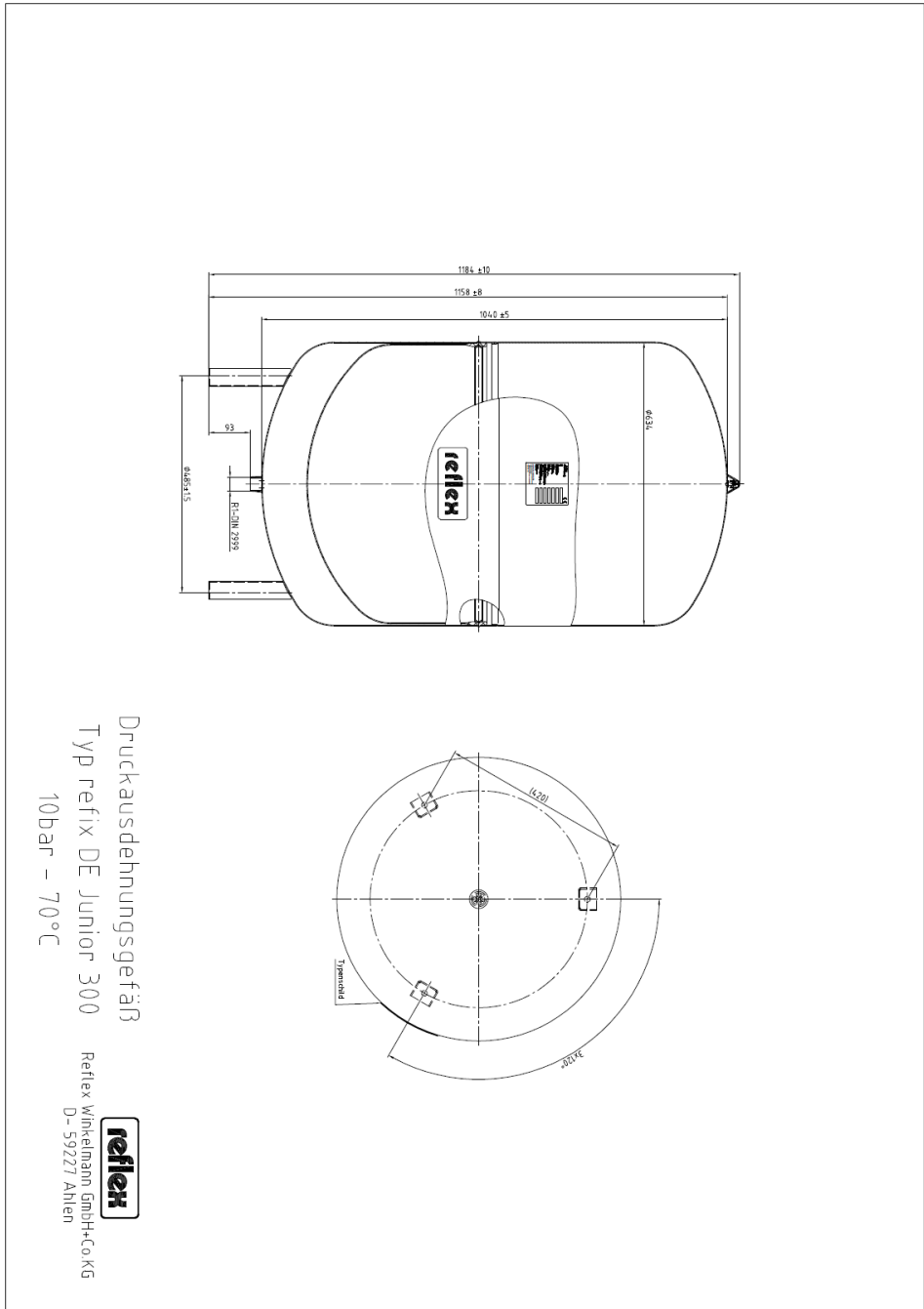
- części mające kontakt z wodą są zabezpieczone przed korozją
- dopuszczenie zgodne z dyrektywą dotyczącą urządzeń ciśnieniowych 97/23/WE
- membrana posiada atest PZH
- lakierowane na niebiesko
- ciśnienie wstępne 4,0 bar
- pojemność naczyń:
- 50 – 600 litrów przy maksymalnym ciśnieniu pracy 10 bar
- minimalna grubość blachy dennic  $1,75 \pm 0,1$  mm
- materiał, z którego wykonany jest płaszcz i dennice DD11

Analizowany zbiornik ma 1185 mm wysokości i 634 mm średnicy.

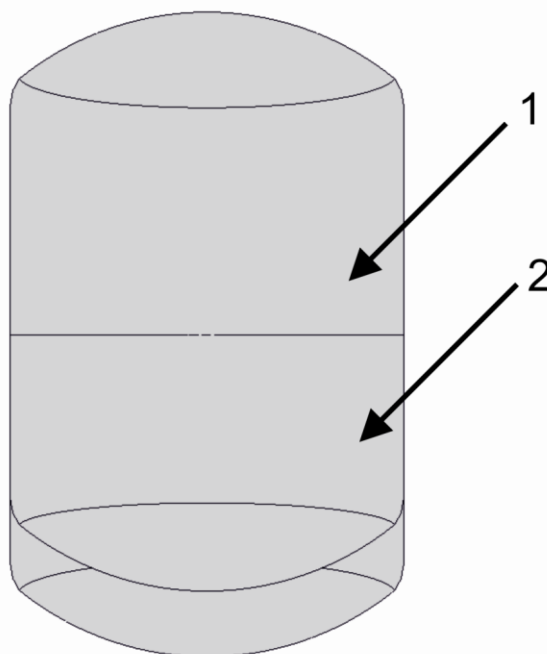
Na Rys. 4 został przedstawiony schemat budowy modelu zbiornika, który przyjęto w obliczeniach statycznych i dynamicznych. Składa się on z dwóch zasadniczych części: płaszcz wykonanego ze stali oraz membrany wykonanej z gumy. W Tab. 2 zostały zebrane wartości parametrów materiałowych dla obu części składowych konstrukcji.

Tab. 2. Parametry przyjęte w modelu

	<b>płaszcz</b>	<b>membrana</b>
<b>materiał</b>	<b>stal DD11</b>	<b>guma</b>
<b>moduł Younga [Pa]</b>	<b>2,1e11</b>	<b>8e6</b>
<b>Gęstość [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>7850</b>	<b>1200</b>



Rys. 3. Schmat zbiornika *DE Junior 300* firmy Reflex (wg danych producenta)



**Rys. 4. Model zbiornika: 1 płaszcz, 2 - membrana**

W badaniach charakterystyk statycznych uwzględniono obciążenie hydrostatyczne pochodzące od membrany, a które przenosi się na powierzchnię zewnętrzną płaszczu w miejscu zamocowania membrany na jego obwodzie.

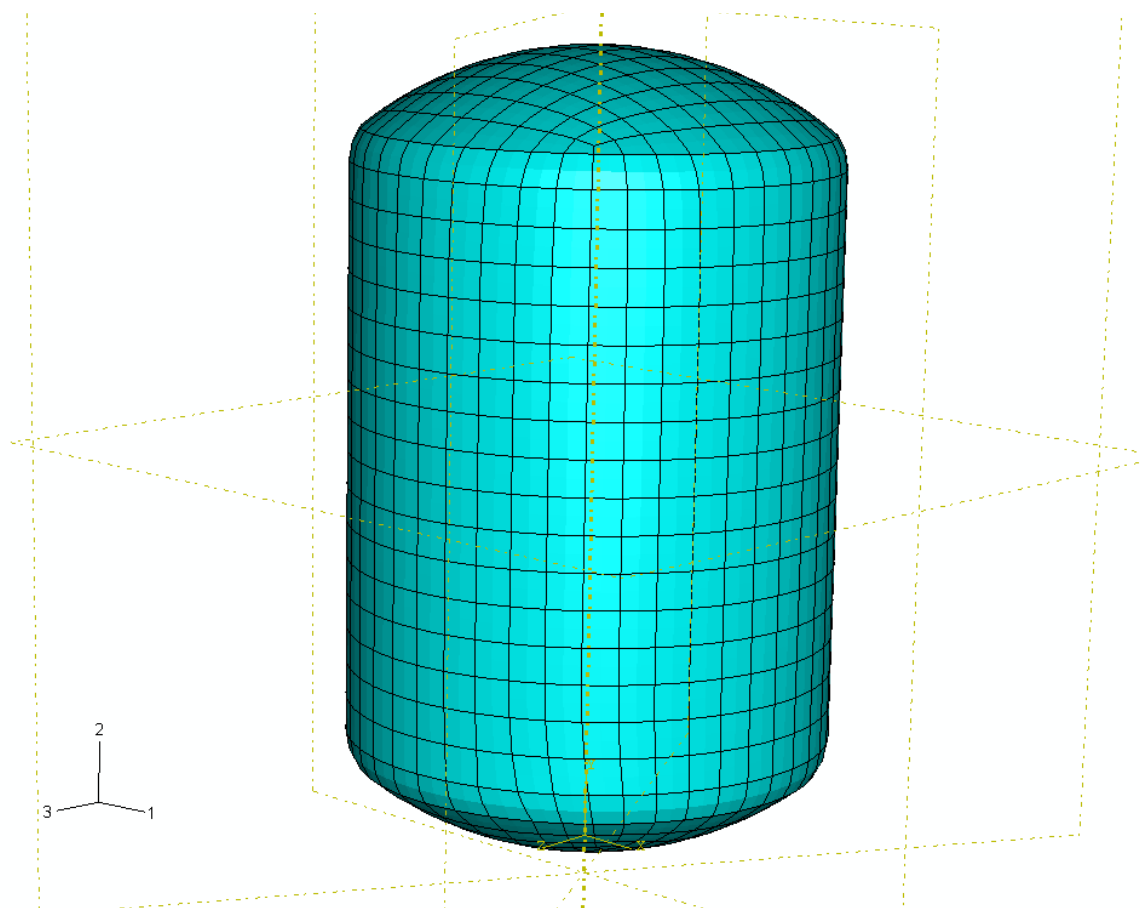
Z uwagi na budowę zbiornika przewiduje się wzbudzenie fal sprężystych w płaszczu od strony zewnętrznej. Fale sprężyste powinny rozchodzić się po całej powierzchni płaszczu. Stal, z którego wykonany jest płaszcz zbiornika odznacza się słabym tłumieniem materiałowym, a co za tym idzie należy spodziewać się słabego wytłumiania fal oraz ich interakcji po pokonaniu pełnego obwodu.

#### **Przygotowanie modeli MES wybranych konstrukcji do analiz oprogramowaniem komercyjnym**

Zdecydowano, że obliczenia Metodą Elementów Skończonych (MES) wykonane zostaną jedynie dla zbiornika, natomiast charakterystyki dynamiczne statecznika określone zostaną na drodze eksperymentalnej przy pomocy skanującego wibrometru laserowego.

Model numeryczny zbiornika (Rys. 5) składa się 2083 elementów powłokowych i ma 18444 stopni swobody. Elementy powłokowe wybrano z uwagi na cienkościenny charakter płaszczu (grubość 1.75 mm).

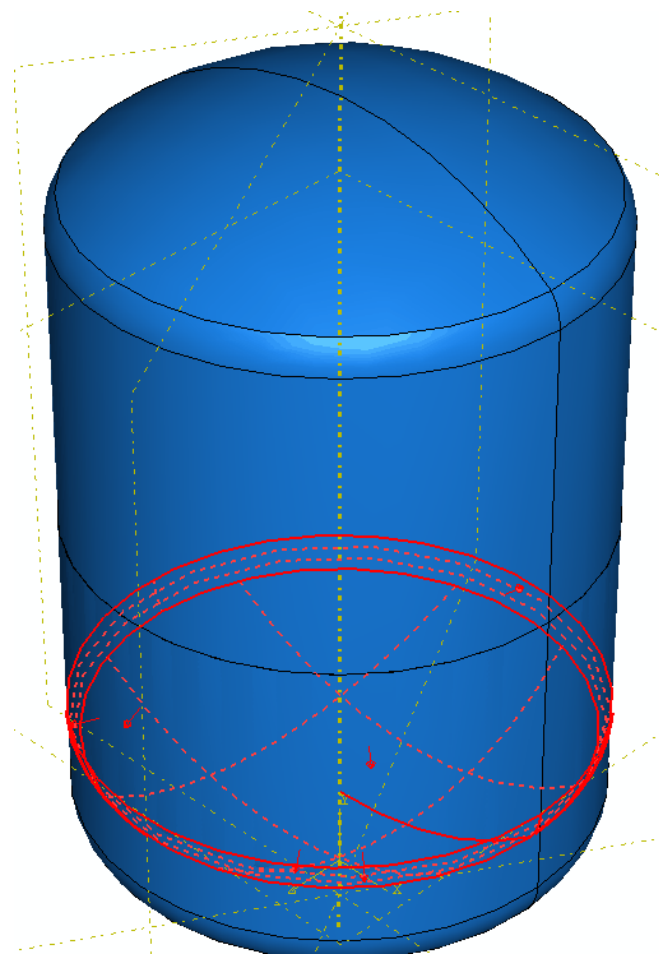




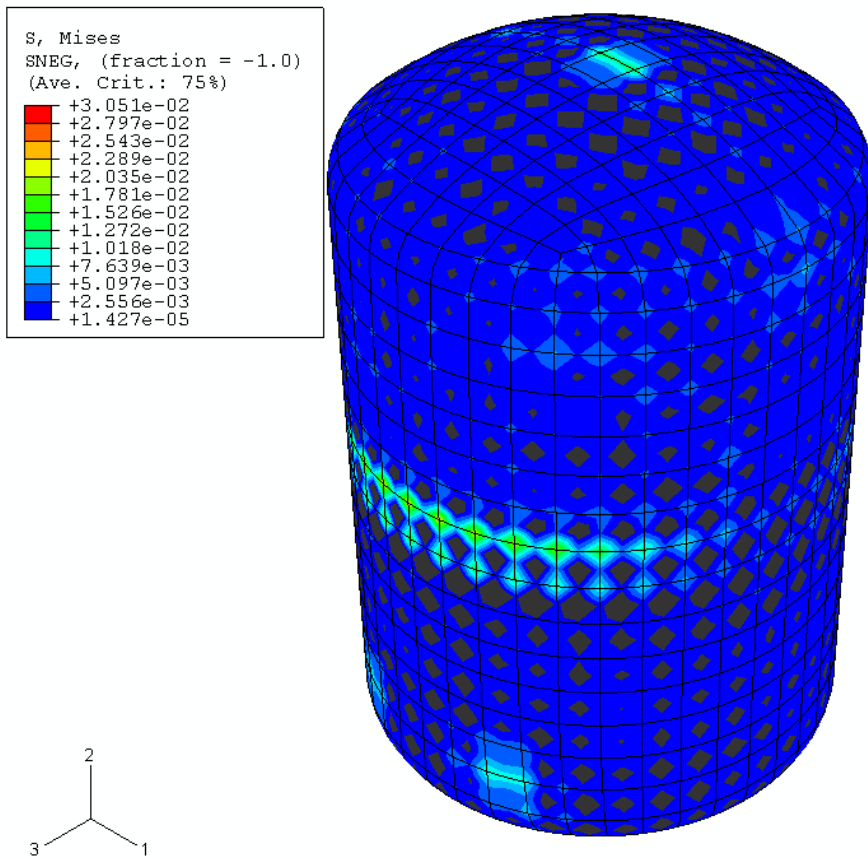
**Rys. 5. Model MES zbiornika**

### **Obliczenia globalnej wytrzymałości z wyznaczeniem niezbędnych charakterystyk statycznych**

Przeprowadzono analizę statyczną zbiornika. Zbiornik obciążono ciśnieniem wstępnym równym 4,0 bar przyłożonym na górną powierzchnię membrany (Rys. 6). Przy pomocy MES określono wartości naprężeń (Rys. 7) oraz odkształceń (Rys. 8) zbiornika.

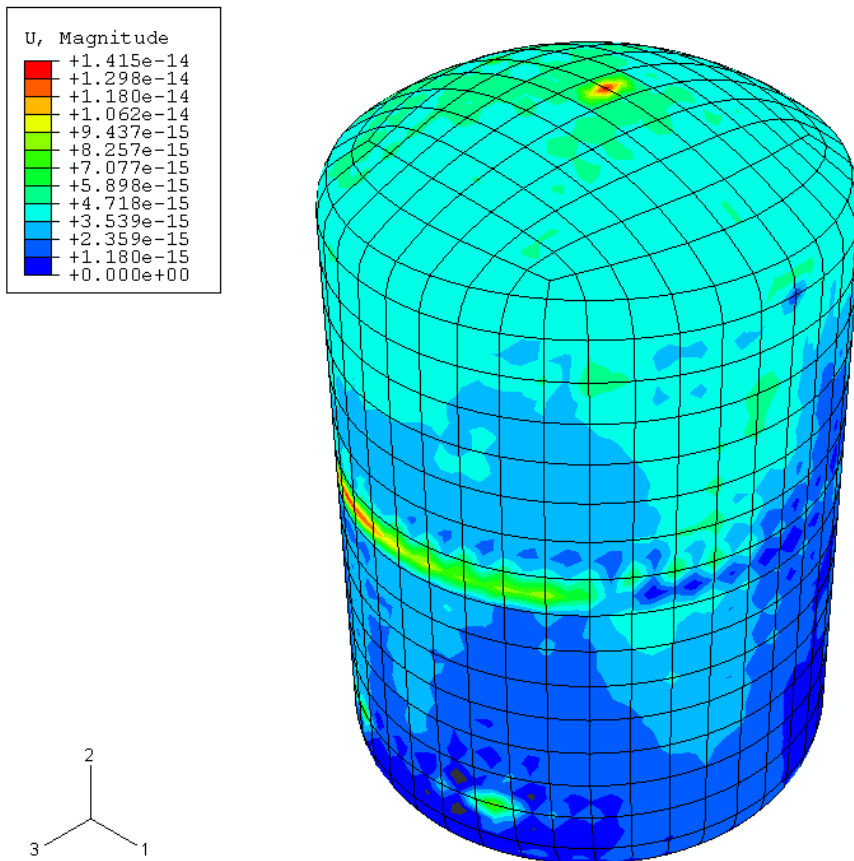


**Rys. 6. Model zbiornika z zaznaczonym miejscem przyłożenia obciążenia**



**Rys. 7. Wartości naprężeń dla modelu zbiornika po przyłożeniu obciążenia**

Najwyższe wartości naprężeń zredukowanych (Rys. 7) obliczonych wg hipotezy Hubera-Misesa znajdują się w miejscu mocowania membrany do płaszcza zbiornika jak również na środkach denek. Nieco mniejsze wartości naprężeń zredukowanych można zaobserwować w miejscach mocowania nóżek.



**Rys.8. Wartości odkształceń dla modelu zbiornika po przyłożeniu obciążenia**

Rozkład odkształceń (Rys. 8) podobny jest do rozkładu naprężeń. Szczególnie duże odkształcenia występują w miejscu mocowania membrany do płaszcza zbiornika. Należy dodać, że w rzeczywistym obiekcie na obwodzie w tym miejscu występuje wzmocnienie, które nie zostało wzięte pod uwagę w modelu. Wzmocnienie to ma istotne znaczenie z punktu widzenia propagacji fal sprężystych, gdyż generuje dodatkowe odbicia fal.

### **Analiza drgań własnych i wymuszonych konstrukcji z wyznaczeniem niezbędnych charakterystyk dynamicznych**

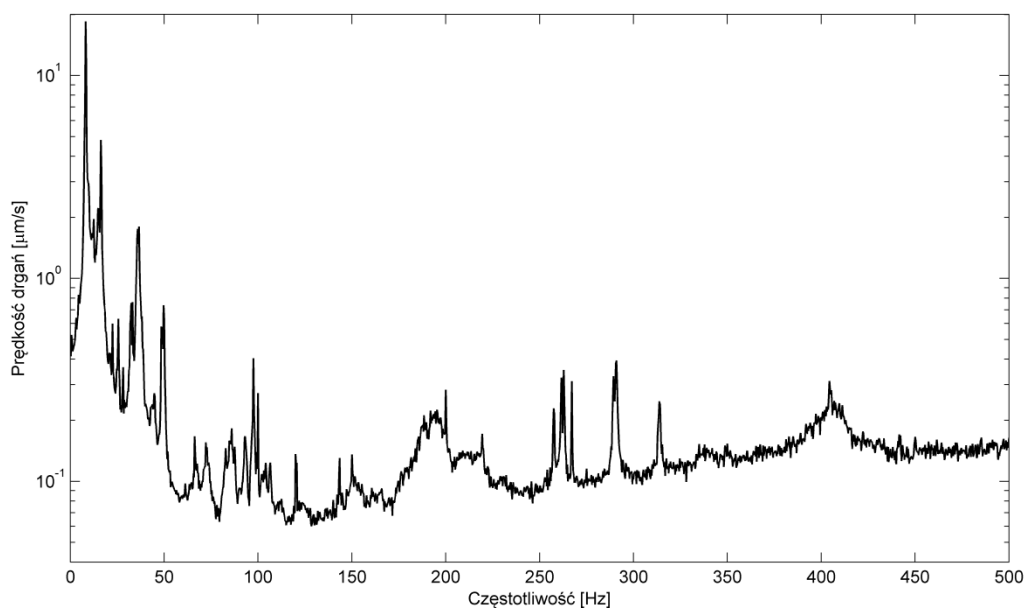
#### **Zbiornik**

Została przeprowadzona analiza dynamiczna modelu zbiornika za pomocą komercyjnego programu MES. Zostało wyznaczonych 10 pierwszych częstotliwości drgań własnych. W Tab. 1 zostały zebrane wartości częstotliwości drgań własnych. W Tab. 2 zostało zebrane 10 pierwszych postaci drgań własnych.

Tab. 1. Częstotliwości drgań własnych

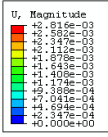
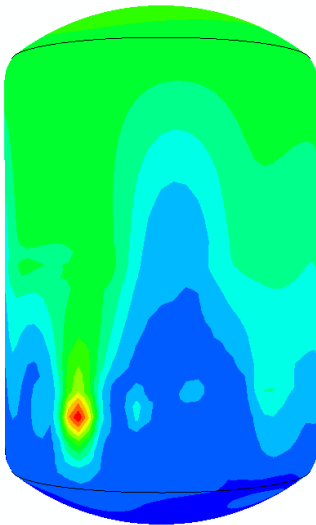
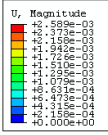
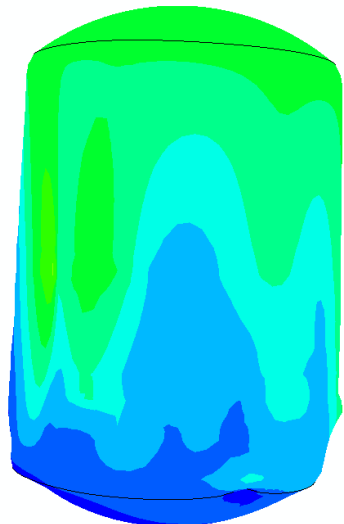
lp	częstotliwości [Hz]
<b>1</b>	<b>16,456</b>
<b>2</b>	<b>17,462</b>
<b>3</b>	<b>19,510</b>
<b>4</b>	<b>20,940</b>
<b>5</b>	<b>21,384</b>
<b>6</b>	<b>22,019</b>
<b>7</b>	<b>22,230</b>
<b>8</b>	<b>23,187</b>
<b>9</b>	<b>23,976</b>
<b>10</b>	<b>24,328</b>

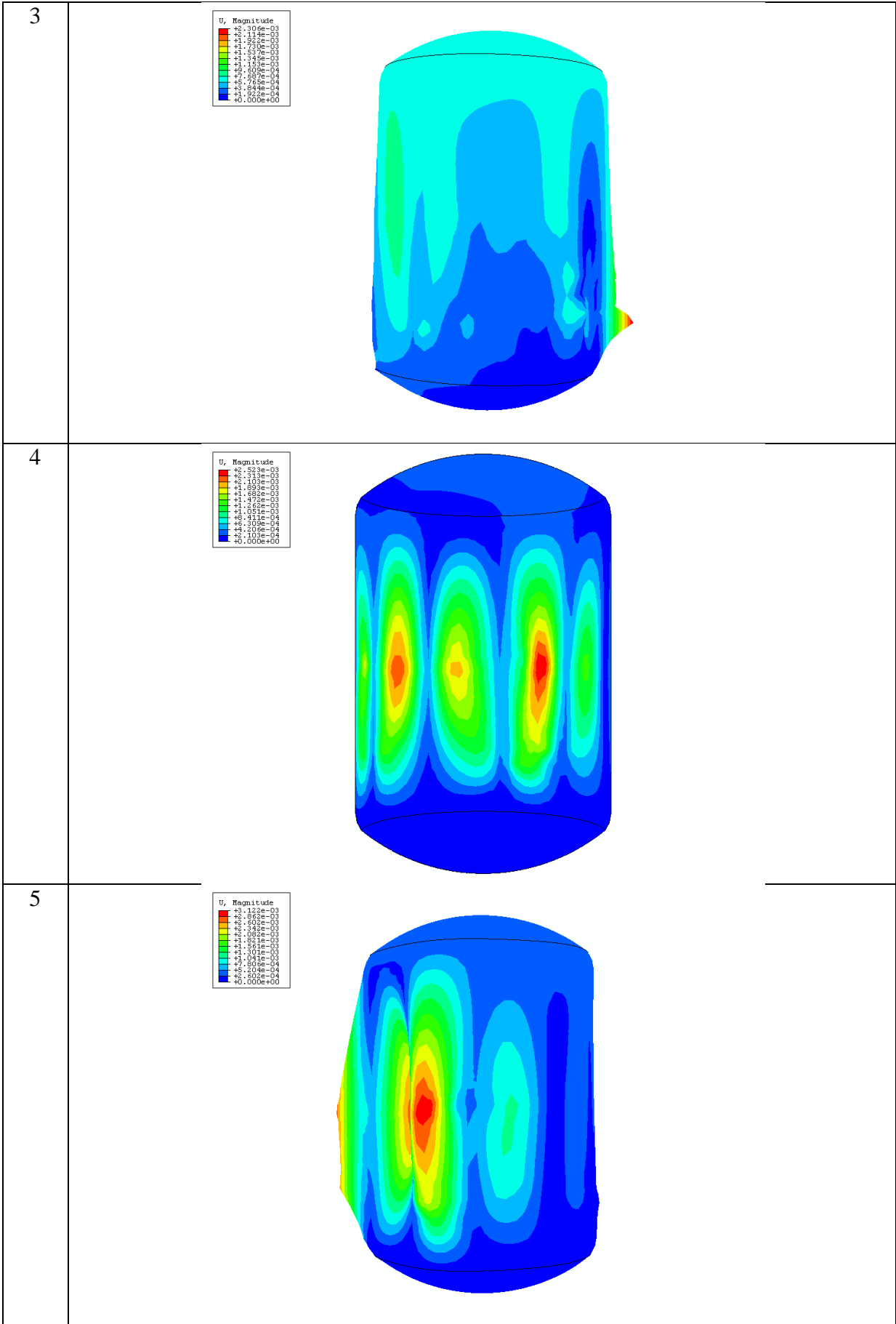
Dla porównania zmierzona odpowiedź amplitudowo-częstotliwościowa przy pobudzeniu białym szumem jest przedstawiona na Rys. 9. Pomiary wykonano skanującym wibrometrem laserowym na rzeczywistym zbiorniku.

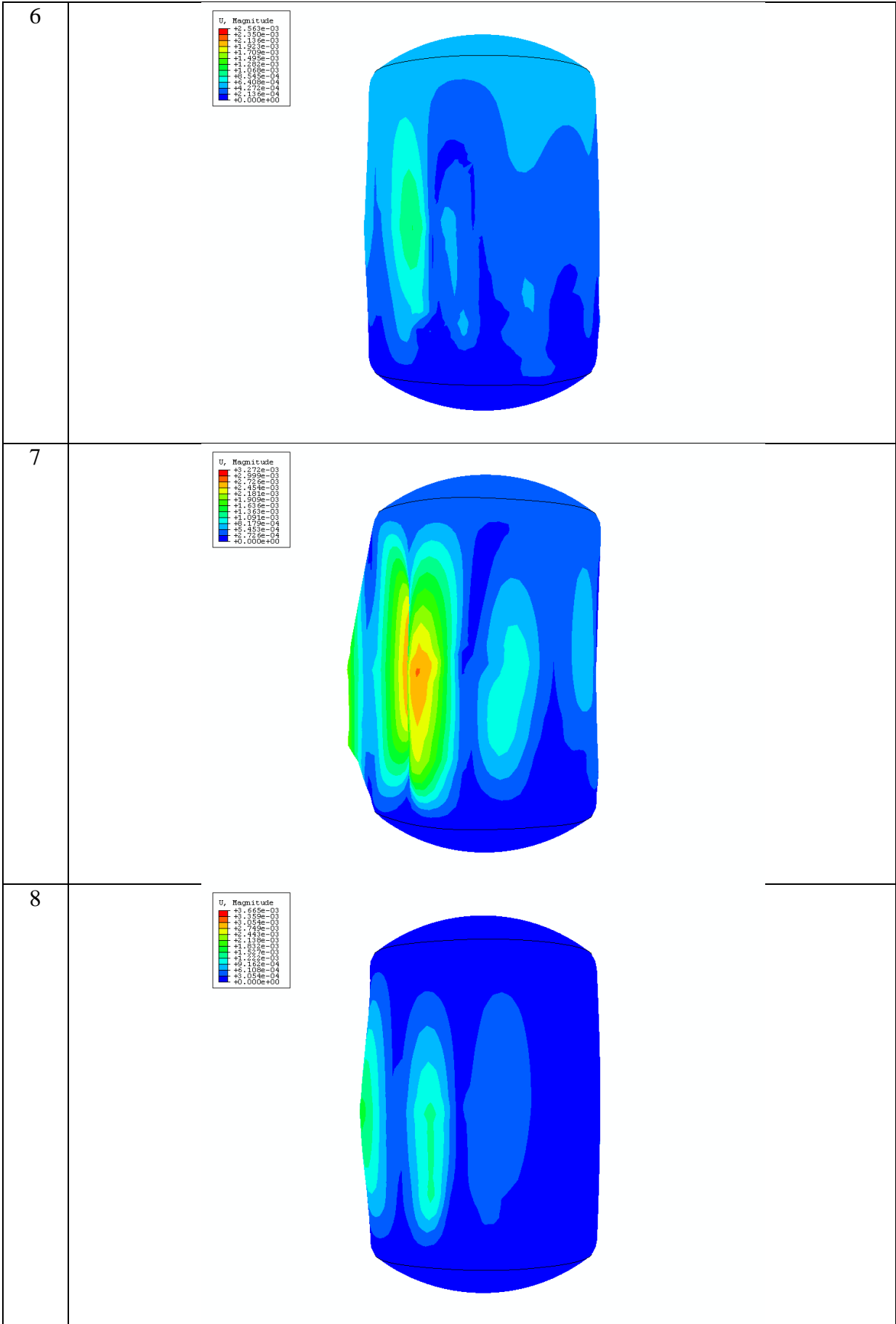


Rys. 9. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe zbiornika przy wzbudzeniu białym szumem

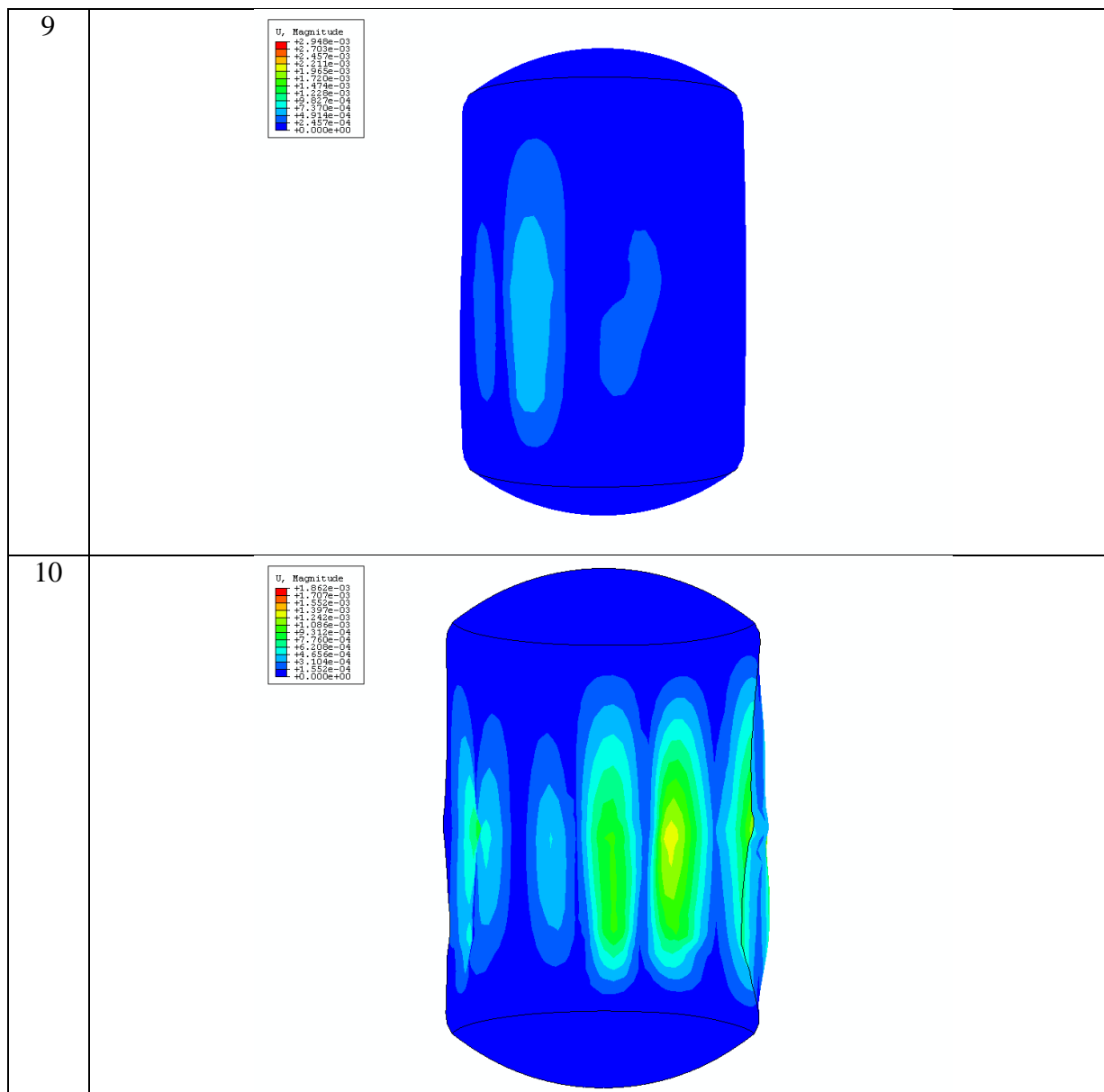
Tab. 2. Postaci drgań własnych

Lp.	Postać drgań
1	<div data-bbox="464 304 571 439" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> <p>U, Magnitude</p>  </div> <div data-bbox="679 331 995 853" style="display: inline-block; vertical-align: top;">  </div>
2	<div data-bbox="464 909 571 1043" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> <p>U, Magnitude</p>  </div> <div data-bbox="679 936 1023 1458" style="display: inline-block; vertical-align: top;">  </div>









Warto zwrócić uwagę, że maksymalne amplitudy dla postaci drgań własnych 4-10 występują w tym samym miejscu co maksymalne odkształcenia statyczne na obwodzie w miejscu mocowania membrany.

### ***Statecznik***

Charakterystyki dynamiczne wyznaczono eksperymentalnie za pomocą skanującego wibrometru laserowego PSV-400 firmy Polytec®. Do wzbudzenia drgań w pomiarach charakterystyk dynamicznych zastosowano wzbudnik elektromechaniczny TIRA S51110C zasilany ze wzmacniacza TIRA BAA 120. Sygnał wzbudzenia podawany był ze zintegrowanego generatora systemu pomiarowego PSV-400.

Powierzchnia górna statecznika pokryta została samoprzylepną retrorefleksyjną folią *Reflective Film 5500* firmy ORALITE®. Zabieg taki miał na celu zwiększenie poziomu sygnału wibrometru laserowego w każdym punkcie pomiarowym niezależnie od kąta padania wiązki pomiarowej do mierzonej powierzchni. Dzięki temu zwiększono stosunek sygnału do szumu.

Badany statecznik (numer 5) został powieszony za pomocą cienkich linek stalowych, odzwierciedlając możliwie dokładnie swobodne warunki brzegowe, co przedstawiono dokładniej na Rys. 10.

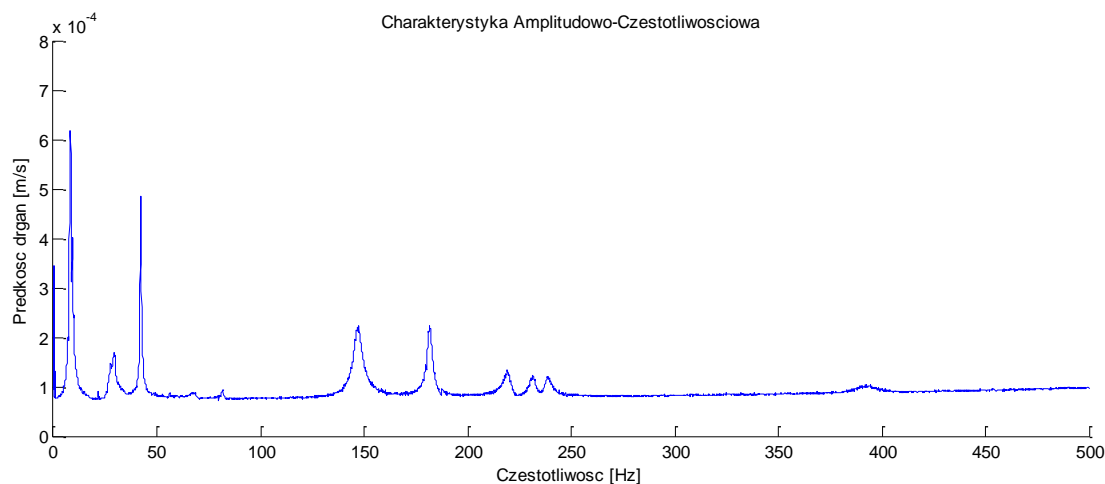


**Rys. 10. Mocowanie statecznika na linkach stalowych**

W pierwszym etapie badania dynamiki statecznika poziomego śmigłowca PZL W-3A zmierzono charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe (z ang. *Frequency Response Function* – w skrócie FRF) statecznika wzbudzając go do drgań sygnałem skompresowanym (periodic chip), używając funkcji FFT i rozdzielności 6400 linii. Pomiary wykonano dla trzech przedziałów częstotliwości, mianowicie:

- 0 – 500Hz,
- 500 – 1000Hz,
- 1000 – 2000Hz.

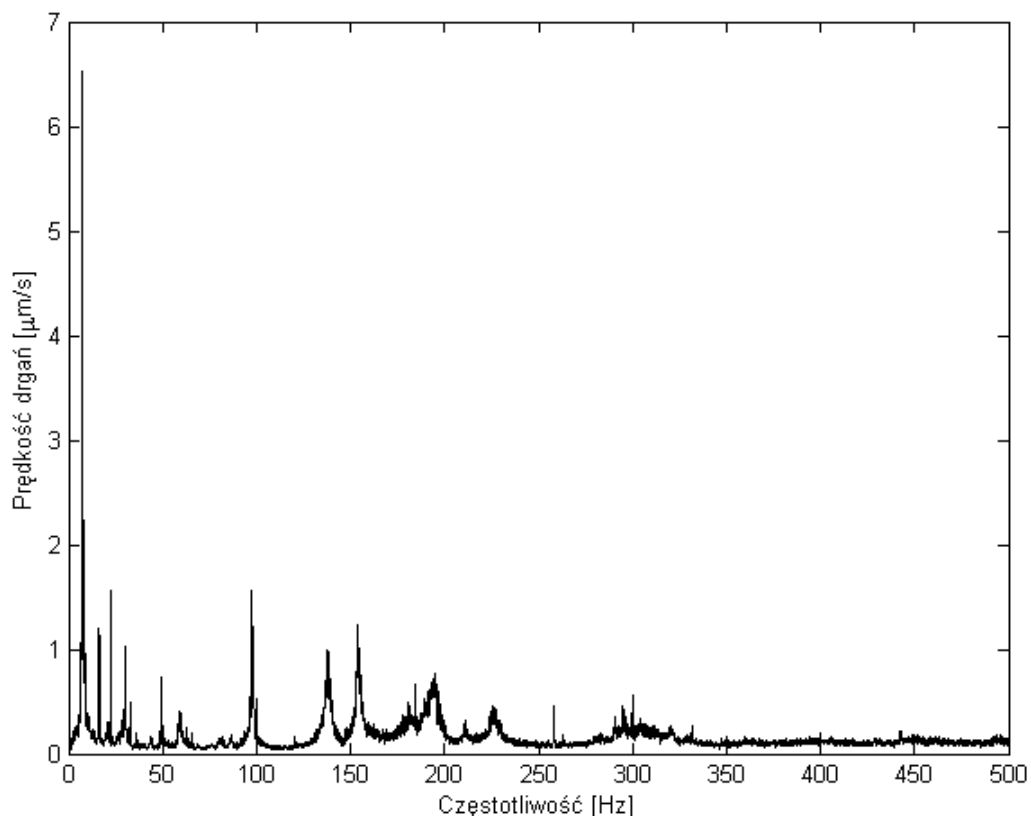
Uśrednione charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe przedstawiono na Rys. 11.



**Rys. 11. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe statecznika poziomego śmigłowca PZL W-3A w zakresie 0–500Hz**

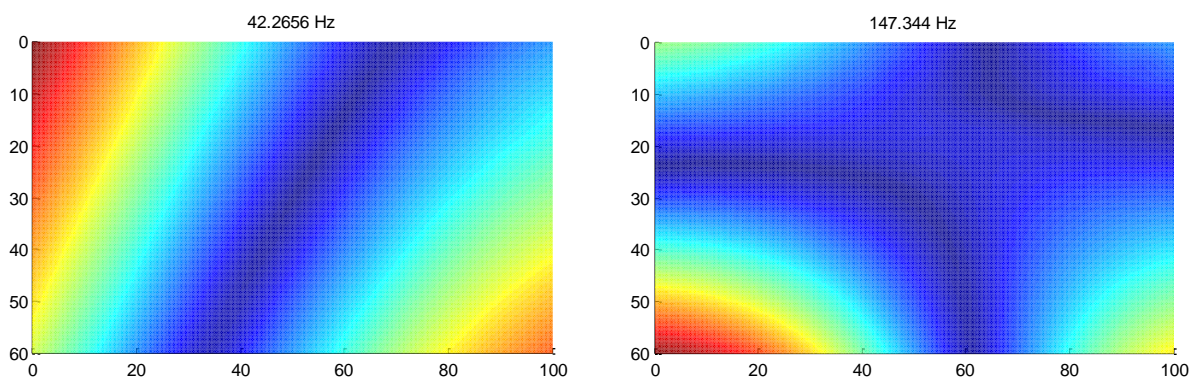
Zidentyfikowane częstotliwości drgań własnych to: 42.3 Hz, 147.3 Hz, 181.6 Hz, 219.2 Hz, 238.8 Hz, 392.2 Hz, 439.1 Hz, 488.1 Hz, 506.6 Hz, 522.2 Hz, 554.8 Hz, 610.3 Hz, 657.0 Hz, 795.5 Hz, 777.0 Hz, 866.7 Hz, 973.7 Hz, 1003.4 Hz, 1787.2 Hz. Można zauważyć, że niższe wartości częstotliwości drgań własnych zbliżone są w pewnym stopniu do zarejestrowanych podczas lotów częstotliwości drgań giętych (49 Hz, 140 Hz). Niemniej jednak nie należy tych wartości porównywać, ze względu na znacznie różne warunki brzegowo-obciążeniowe podczas lotu.

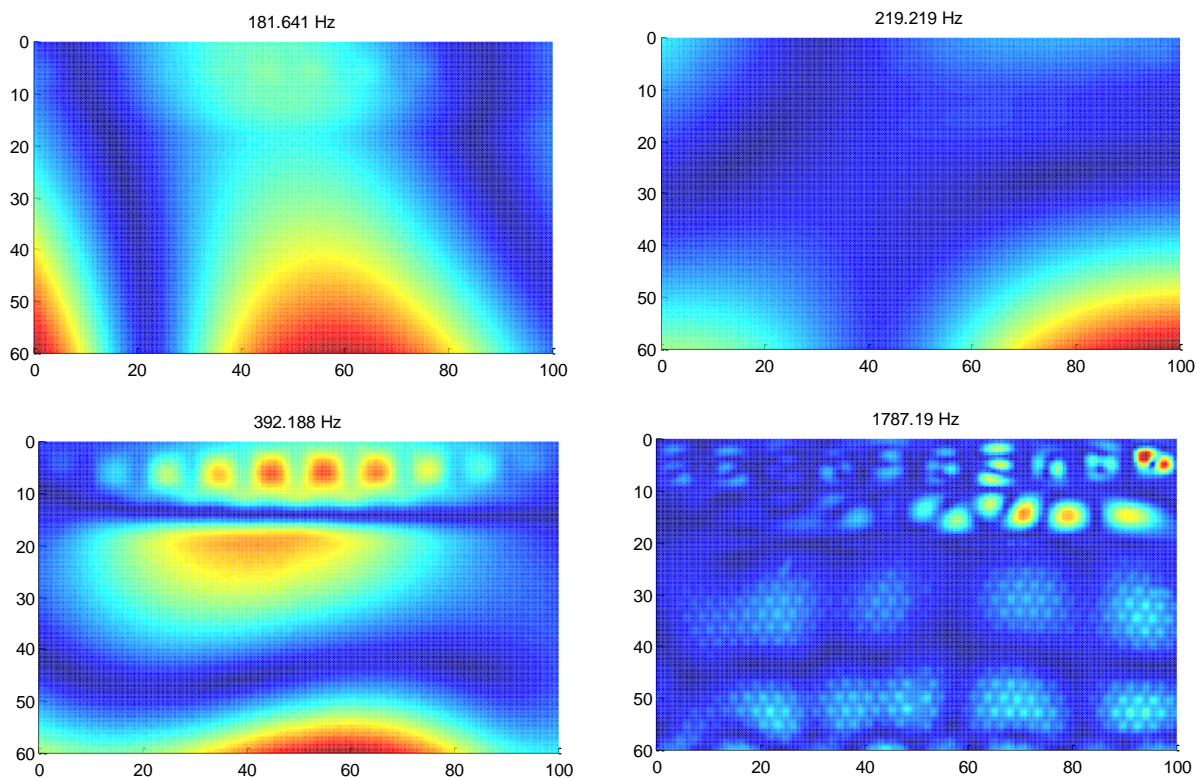
Badano również charakterystyki częstotliwościowe przy wzbudzeniu białym szumem, które przedstawiono na Rys. 12. W tym przypadku można zidentyfikować częstotliwości rezonansowe: 7.3 Hz, 16.2 Hz, 22.6 Hz, 30 Hz, 49 Hz, 97 Hz, 138 Hz, 154.1 Hz, 194.8 Hz, itd. Przy czym wartości te odpowiadają konfiguracji statecznika zamocowanego na sztywno. Wartości te uzyskano drogą pomiarową na rzeczywistym obiekcie przy użyciu wibrometru skanującego.



Rys. 12. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe statecznika poziomego śmigłowca PZL W-3A przy pobudzeniu białym szumem.

W kolejnym etapie wykorzystując częstotliwości rezonansowe wyznaczone z funkcji FRF, badany obiekt wzbudzano do drgań sygnałem sinusoidalnym i mierzono odpowiadające tym częstotliwościom postacie drgań. Pomiaru dokonywano używając funkcji „FAST SCAN” o szerokości pasma (z ang. *Bandwidth*) odpowiadającej 10% wzbudzanej częstotliwości. Zastosowano siatkę 61 na 101 równomiernie rozłożonych punktów pomiarowych (6161), a wybrane wyniki przedstawiono na Rys. 13.





**Rys. 13. Zmierzone postacie drgań statecznika poziomego śmigłowca PZL W-3A**

Z uwagi na to, że dla wyższych częstotliwości w postaciach drgań uwidacznia się struktura wypełniania obiektu w postaci plastra miodu, można wykorzystać tę zależność do identyfikacji uszkodzeń.

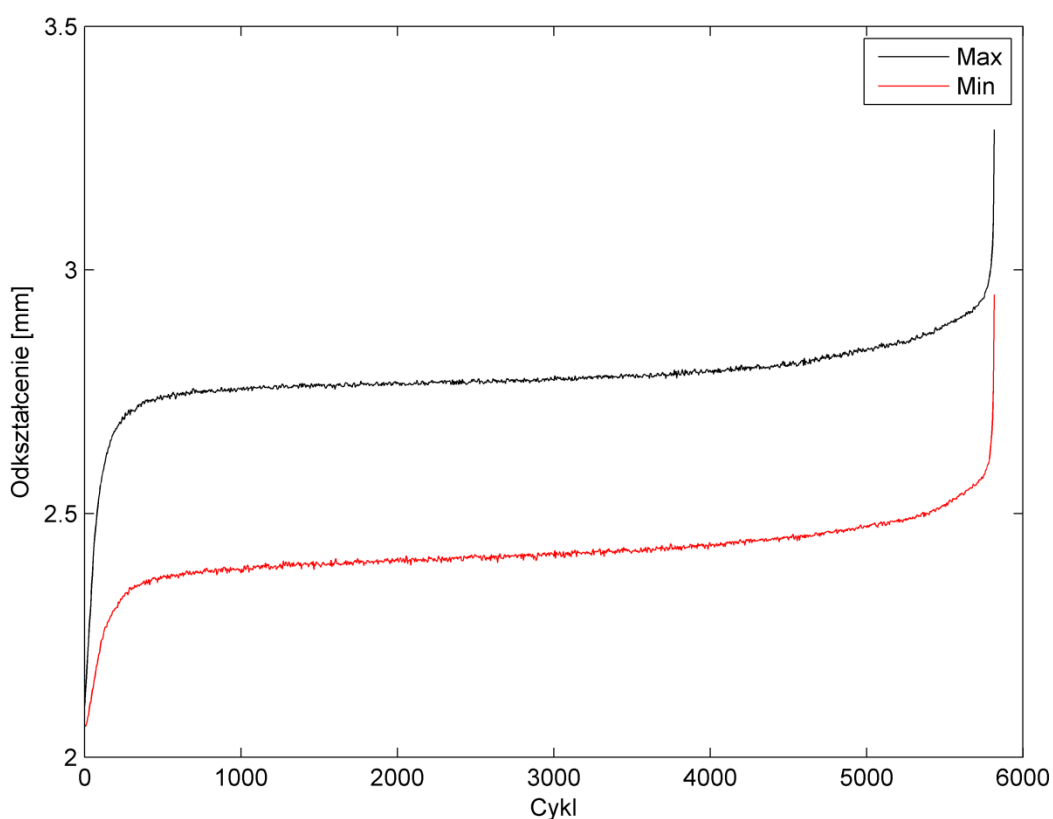
**Analiza procesów zmęczeniowych na podstawie wyników analiz statycznych i dynamicznych konstrukcji w celu określenia rejonów o najwyższym prawdopodobieństwie powstania uszkodzenia.**

Analizy statyczne i dynamiczne zbiornika wskazują na regiony koncentracji naprężeń, które mogą potencjalnie prowadzić do powstawania uszkodzeń. Z uwagi na materiał z jakiego wykonany jest zbiornik (stal) w szczególności narażony jest on na korozję i ewentualne zmęczenie materiału powstałe na skutek ciśnienia wywołanego membraną, zwłaszcza, że ciśnienie to zmienia się w pewnym zakresie.

Interesujące byłoby monitorowanie stanu naprężeń nieliniowych celem określenia żywotności poszycia zbiornika. W celu odpowiedzi na pytanie czy możliwe jest powiązanie zmian naprężeń nieliniowych wraz z liczbą cykli obciążeń przeprowadzono szereg badań

niszczących na maszynie zmęczeniowej firmy Hungta 9711 . Próbki do testów wykonane były ze stopu aluminium i miały kształt płaskowników o grubości 2 mm i szerokości 25 mm. W płaskownikach w środkowej części próbki na jej krawędzi wykonano karb mający inicjować pęknięcie. Zadawano obciążenie o charakterze sinusoidalnym przy naprężeniu wstępnym 7 kN i amplitudzie 2 kN. Z zależności pomiędzy maksymalną amplitudą przemieszczeń a liczbą cykli przedstawioną na Rys. 14 wyraźnie widać trzy obszary:

1. Obszar sprężystej deformacji niezniszczonego materiału (do 300 cykli)
2. Obszar inicjacji i stabilnego wzrostu mikropęknięć (pomiędzy 300 a 5000 cykli)
3. Obszar propagacji dominującej szczeliny (powyżej 5000 cykli)



**Rys. 14. Zmęczenie niskocyklowe**

Utworzenie dominującej szczeliny zmęczeniowej następuje po około 83-85% czasu eksploatacji, co oznacza, że jej wykrycie możliwe jest dopiero w końcowej fazie procesu zniszczenia konstrukcji. Stąd konieczne jest monitorowanie stanu odkształceń niesprężystych, aby na podstawie znanych zależności obciążeń cyklicznych przewidzieć postępy zniszczenia. Z Rys. 14 wynika, że zmiany odkształceń niesprężystych widoczne są już po około 5% czasu

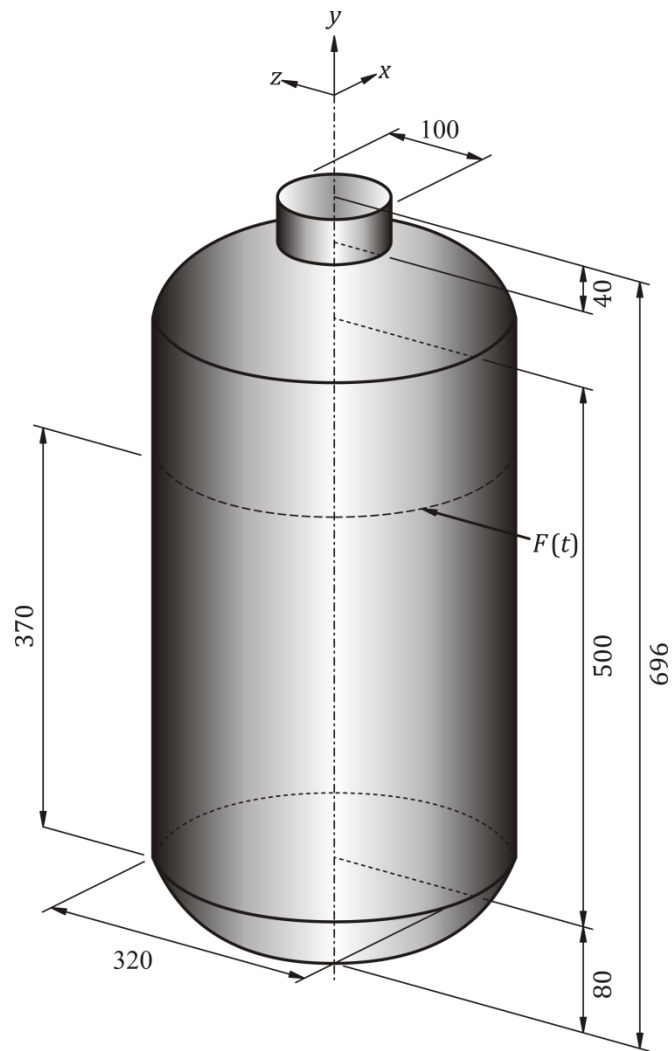
eksploatacji. Obserwacja tych zmian umożliwia radykalne zwiększenie marginesu bezpieczeństwa w trakcie eksploatacji konstrukcji już we wczesnej fazie jej użytkowania.

Ze względu na złożoność obiektu jakim jest statecznik śmigłowca, nie przeprowadzono żadnych badań zmęczeniowych.

### **Analizy wybranych, kluczowych fragmentów konstrukcji oprogramowaniem wykonanym w Zadaniu 2 i opartym na MSES**

W zadaniu tym przeprowadzono symulacje numeryczne propagacji fal sprężystych zarówno komercyjnym programem MES jak i za pomocą oprogramowania wykonanego w Zadaniu 2, które oparte jest na Metodzie Spektralnych Elementów Skończonych. Zastosowanie dwóch typów oprogramowania podyktowane było chęcią weryfikacji jakościowej powstałego oprogramowania. Skupiono uwagę na zbiorniku hydroforowym, przy czym w obliczeniach MSES zastosowano nieco bardziej skomplikowany kształt zbiornika z dodatkowym kołnierzem (Rys. 15).

Wyniki symulacji uzyskane komercyjnym programem MES zestawiono w Tab. 4, natomiast programem MSES w Tab. 5. Łatwo zauważyć, że w komercyjnym programie front propagującej się fali zachowany jest jedynie do momentu odbicia od brzegów i powtórnej interferencji fal. Po tym zdarzeniu wzór propagacji fal sprężystych nie ma sensu. W programie MSES (Tab. 5) natomiast wzór propagacji fal sprężystych zachowany jest prawidłowo, nawet po długim czasie propagacji fal. Świadczy to o przewadze zastosowanej w projekcie metody nad dostępnymi komercyjnie narzędziami takimi jak Abaqus, Ansys czy Nastran.

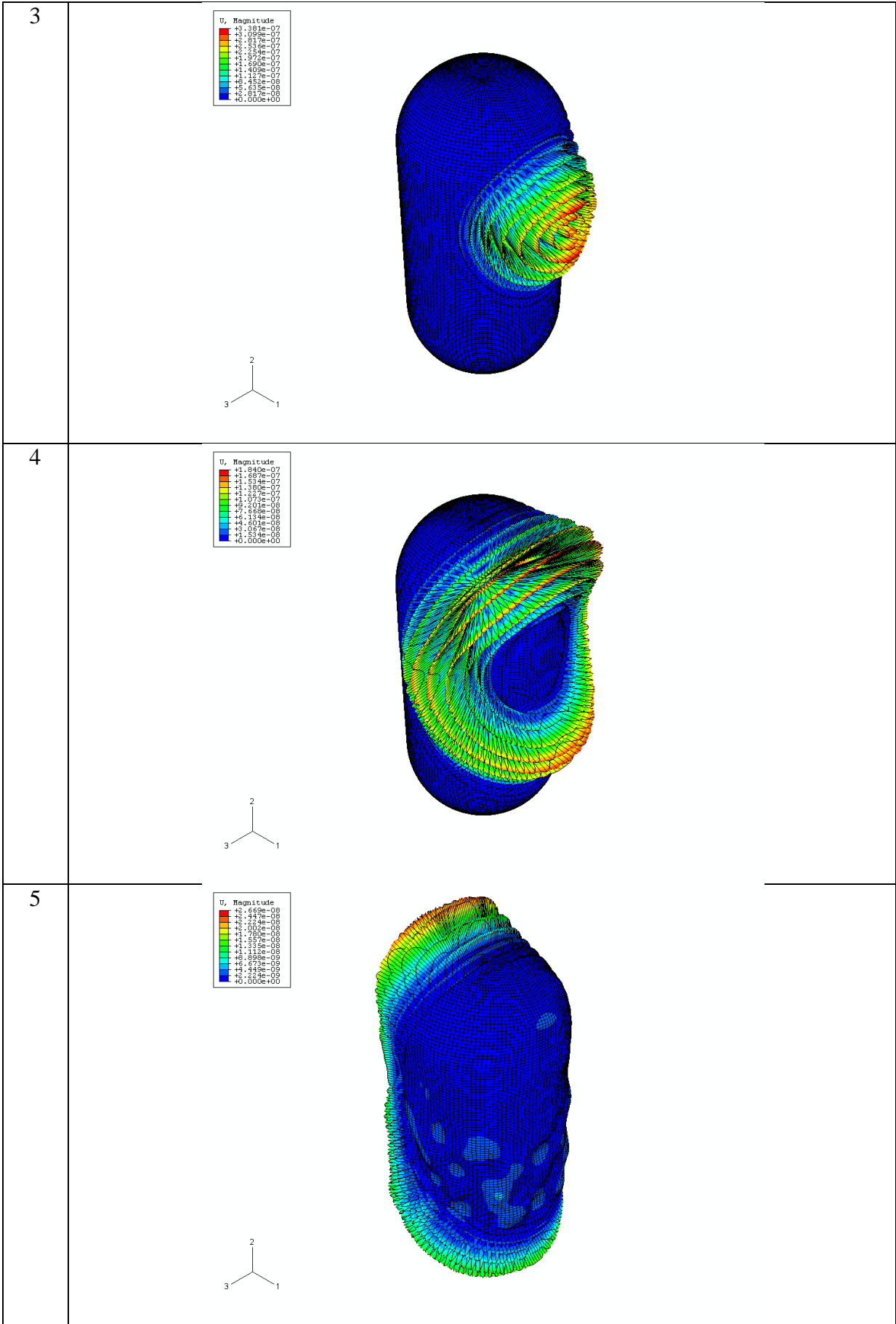


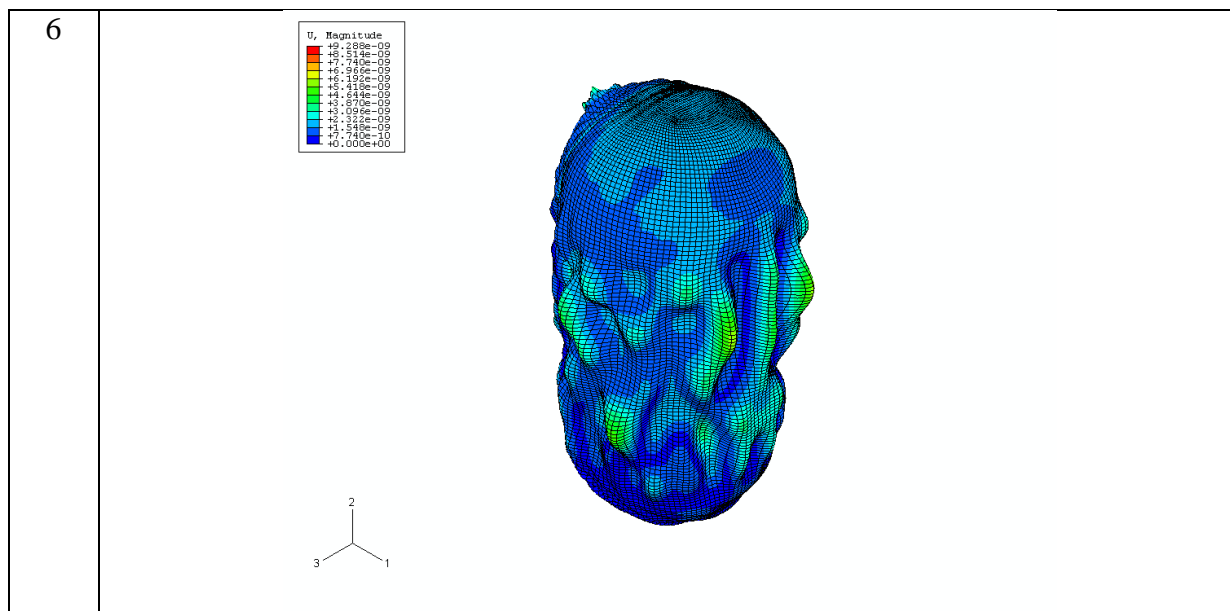
Rys. 15. Geometria zbiornika i położenie wzbudzenia przyjęte w obliczeniach numerycznych



Tab. 4. Klatki propagacji fal sprężystych w płaszczu zbiornika uzyskane programem MES

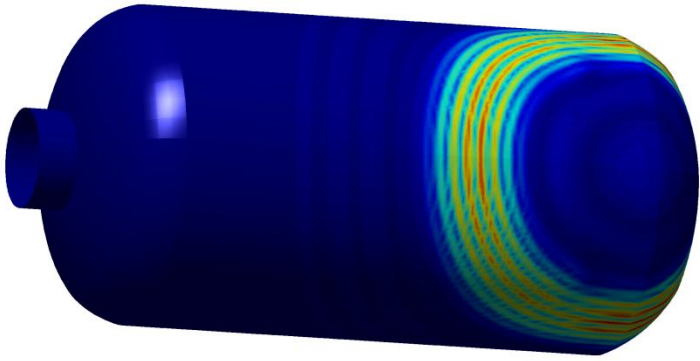
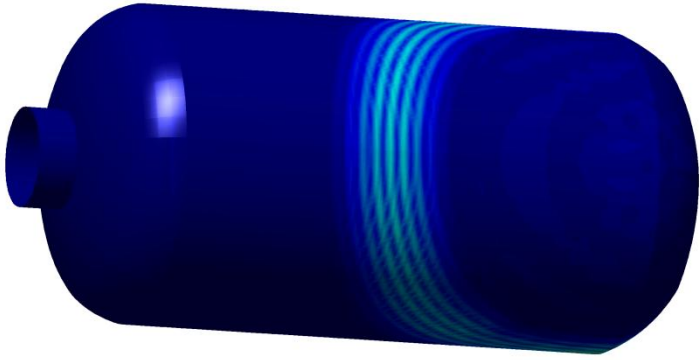
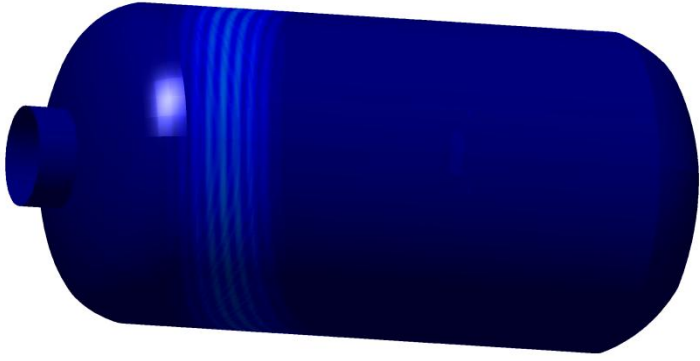
Lp.	Klatka propagacji fal																																						
1	<div data-bbox="464 257 571 387" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> <p>U, Magnitude</p> <table border="1"> <tr><td>+</td><td>1.53e-06</td></tr> <tr><td>+</td><td>1.40e-06</td></tr> <tr><td>+</td><td>1.27e-06</td></tr> <tr><td>+</td><td>1.13e-06</td></tr> <tr><td>+</td><td>1.02e-06</td></tr> <tr><td>+</td><td>9.04e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>7.94e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>6.91e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>5.95e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>5.06e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>4.24e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>3.49e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>2.81e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>2.21e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>1.68e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>1.22e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>7.36e-08</td></tr> <tr><td>+</td><td>2.50e-08</td></tr> <tr><td>+</td><td>0.00e+00</td></tr> </table> </div> <div data-bbox="715 315 965 757" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> </div> <div data-bbox="475 730 560 804" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> </div>	+	1.53e-06	+	1.40e-06	+	1.27e-06	+	1.13e-06	+	1.02e-06	+	9.04e-07	+	7.94e-07	+	6.91e-07	+	5.95e-07	+	5.06e-07	+	4.24e-07	+	3.49e-07	+	2.81e-07	+	2.21e-07	+	1.68e-07	+	1.22e-07	+	7.36e-08	+	2.50e-08	+	0.00e+00
+	1.53e-06																																						
+	1.40e-06																																						
+	1.27e-06																																						
+	1.13e-06																																						
+	1.02e-06																																						
+	9.04e-07																																						
+	7.94e-07																																						
+	6.91e-07																																						
+	5.95e-07																																						
+	5.06e-07																																						
+	4.24e-07																																						
+	3.49e-07																																						
+	2.81e-07																																						
+	2.21e-07																																						
+	1.68e-07																																						
+	1.22e-07																																						
+	7.36e-08																																						
+	2.50e-08																																						
+	0.00e+00																																						
2	<div data-bbox="464 862 571 992" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> <p>U, Magnitude</p> <table border="1"> <tr><td>+</td><td>9.14e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>8.38e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>7.62e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>6.85e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>6.09e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>5.33e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>4.57e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>3.81e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>3.04e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>2.28e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>1.52e-07</td></tr> <tr><td>+</td><td>7.62e-08</td></tr> <tr><td>+</td><td>0.00e+00</td></tr> </table> </div> <div data-bbox="715 920 965 1361" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> </div> <div data-bbox="475 1335 560 1408" style="display: inline-block; vertical-align: top;"> </div>	+	9.14e-07	+	8.38e-07	+	7.62e-07	+	6.85e-07	+	6.09e-07	+	5.33e-07	+	4.57e-07	+	3.81e-07	+	3.04e-07	+	2.28e-07	+	1.52e-07	+	7.62e-08	+	0.00e+00												
+	9.14e-07																																						
+	8.38e-07																																						
+	7.62e-07																																						
+	6.85e-07																																						
+	6.09e-07																																						
+	5.33e-07																																						
+	4.57e-07																																						
+	3.81e-07																																						
+	3.04e-07																																						
+	2.28e-07																																						
+	1.52e-07																																						
+	7.62e-08																																						
+	0.00e+00																																						

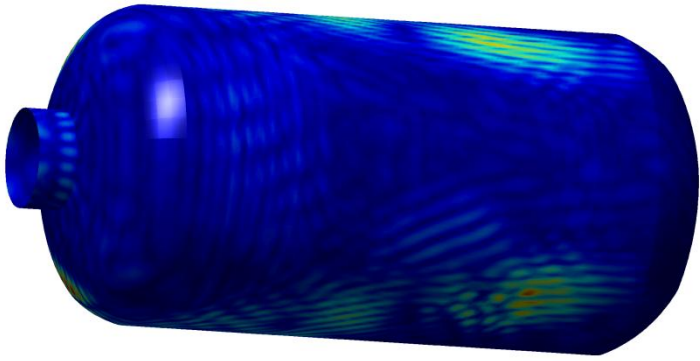
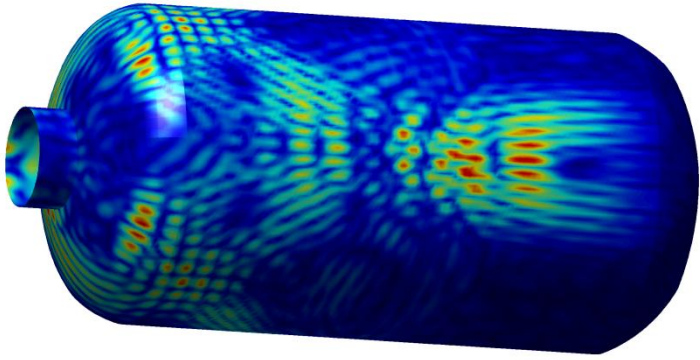
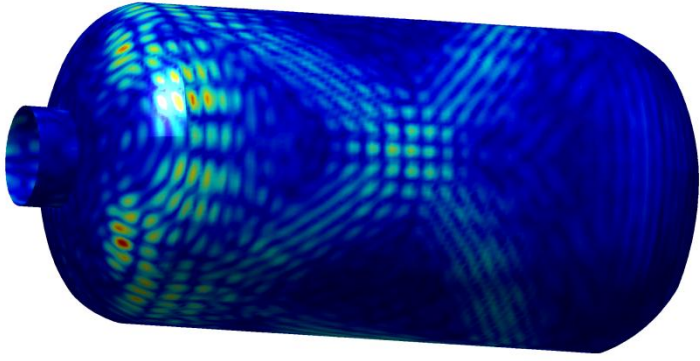




Tab. 5. Klatki propagacji fal sprężystych w płaszczu zbiornika uzyskane programem MSES

Lp.	Klatka propagacji fal
1	
2	

3	
4	
5	

6	
7	
8	

## **Opracowanie strategii doboru systemu monitorowania konstrukcji**

Z uwagi na fakt, że statecznik narażony jest na uderzenia, np. przez ptaka, w dowolnym miejscu poszycia płatu skrzydła należy brać pod uwagę monitorowanie całej powierzchni poszycia. Dodatkowo kluczowym mogą być miejsca mocowania statecznika. Należy rozpatrywać również osobne monitorowanie rury dźwigara, ponieważ wykonany jest z materiału jednorodnego, gdzie rozchodzenie się fal sprężystych ma zupełnie inny charakter niż na płatowcu. Innymi słowy najefektywniej byłoby zastosować dwie sieci czujników: jedną obejmującą aluminiową konstrukcję nośną oraz drugą do monitorowania poszycia epoksydowo-szklanego.

W przypadku zbiornika można rozłożyć czujniki wzdłuż jego obwodu w pewnej odległości od miejsca mocowania membrany (dzięki temu można uniknąć narażenia czujników na znaczne naprężenia, co by prowadziło do ich odklejenia, a jednocześnie mamy możliwość monitorowania krytycznych obszarów). Dodatkowo korzystnie byłoby zamocować czujniki na obwodzie przy denkach, ale nie jest to konieczne z uwagi na mniejsze obciążenia statyczne oraz niskie amplitudy drgań własnych w tych obszarach.

Należy zwrócić uwagę na istotne zagadnienia procesów zmęczeniowych i ukierunkowanie algorytmów i systemów pomiarowych, które umożliwiłyby nie tylko detekcję i lokalizację uszkodzeń ale również przewidywanie czasu jej bezpiecznej eksploatacji. Badania w tymi kierunku będą prowadzone w przyszłości.