

Bogdan SZYBIŃSKI¹

MODELOWANIE MES I NUMERYCZNA OPTYMALIZACJA SYSTEMU PODPARCIA UKŁADU SOCZEWEK MAGNETYCZNYCH

Streszczenie. W pracy zaproponowano ramowy układ do mocowania zestawu czterech soczewek magnetycznych zaprojektowanych dla ogólnoeuropejskiego projektu High Intensity Neutrino Oscillation EURONu Project [1]. Następnie konstrukcja została przeanalizowana numerycznie za pomocą MES i przeprowadzono optymalizację wybranych parametrów geometrycznych ramy. Po raz pierwszy w proponowanym rozwiązaniu technicznym przeznaczonym do eksperymentalnego badania problemu oscylacji neutrin zastosowano układ współpracujących czterech soczewek magnetycznych. Są one przeznaczone do skupienia wiązki cząstek elementarnych – pionów i kaonów – będących produktem uderzenia rozpędzonej wiązki protonów w grafitowy cel. Każda z soczewek jest złożoną powłoką obrotowo-symetryczną, obciążoną złożonym, zmiennym układem sił magnetycznych, termicznych oraz ciężarem własnym. Zaproponowany w pracy system mocowania soczewek spełnia wymagania montażowe, zapewnia dostateczną sztywność, a częstość drgań własnych dostatecznie różni się od częstości zewnętrznych impulsów obciążenia.

Słowa kluczowe: soczewki magnetyczne, modelowanie MES, optymalizacja numeryczna, układ ramowy

NUMERICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF SUPPORTING SYSTEM FOR FOUR HORNS ASSEMBLY

Summary. In the paper the supporting frame for four horns design for the High Intensity Neutrino Project EURONu [1] is proposed and numerically investigated. The whole set is designed for the experimental investigations of the neutrino oscillations. In the proposed design the system of four horns in one assembly is introduced. These magnetic horns serve for focusing of elementary particles – pions and kaons, which are the products of the interaction of the accelerated protons with the graphite target inserted into the horn. Each horn has the form of a complex shell, which is subjected to the complex system of loadings, like magnetic, thermal and the own weight. The proposed system of supports fulfills the assembly conditions, provides the reasonable stiffness and exhibits the natural frequencies distant enough from the excitation frequency.

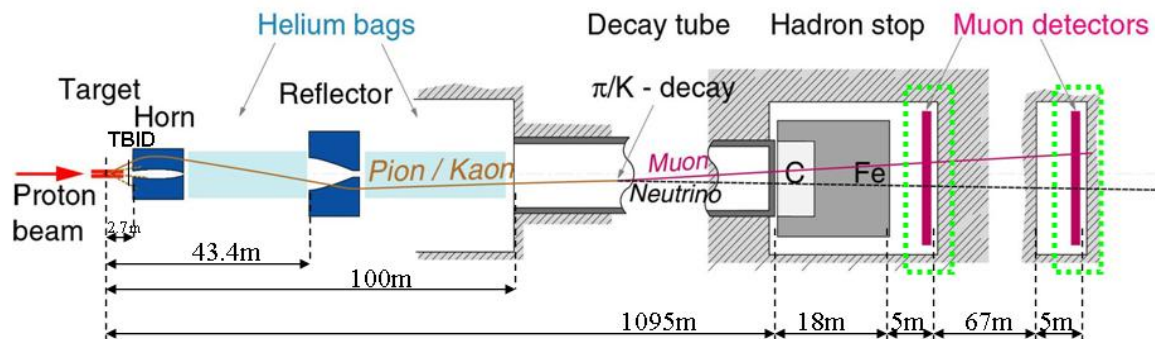
Keywords: magnetic horns, finite element modeling, numerical optimization, frame system

¹ Mechanical Department, Cracow University of Technology, Kraków, Poland, e-mail: boszyb@mech.pk.edu.pl.

1. WPROWADZENIE

Badania eksperymentalne zjawiska oscylacji neutrin przeprowadza się na szeroką skalę od końca XX wieku. Pierwsze profesjonalne eksperymenty zostały przeprowadzane w Japonii (eksperyment K2K w latach 1999 – 2004 r. [2]) oraz w Stanach Zjednoczonych AP (MiniBooNE [3] od 2002 r. i NuMI [4] od 2004 r. – oba w laboratorium Fermilab). Instalacja, CNGS [5], która została uruchomiona w 2006 r., była europejską odpowiedzią na realizowane w Japonii i Stanach Zjednoczonych eksperymenty. Najnowszym, uruchomionym w 2009 r. projektem do badań własności neutrin jest eksperyment T2K, znajdujący się w Japonii [6]. Wszystkie wymienione instalacje mają unikatowy i skomplikowany kształt, a szczegółowe informacje można zaczerpnąć z oficjalnych stron internetowych odpowiednich projektów [2÷6].

Jednym z głównych zespołów wymienionych instalacji są tzw. soczewki magnetyczne (ang. *horns*). Służą one do skupiania wiązki cząstek (pionów i kaonów, które ulegają przemianie w neutrina) powstających w czasie zderzeń rozpędzonej wiązki protonów z grafitowym celem umieszczonym wewnątrz soczewki magnetycznej. W czasie przelotu od miejsca zderzeń do strefy detekcji neutrina mogą samorzutnie zmieniać swój typ – zjawisko to nazywa się oscylacją neutrin, ma charakter kwantowy i jest wciąż intensywnie badane. Na ogół przeprowadza się dwa rodzaje eksperymentów – z tzw. krótką (około 200 m) lub długą (powyżej 1000 km) bazą pomiarową. W celu zwiększenia prawdopodobieństwa obserwacji neutrin konieczne jest odpowiednie skupienie wiązki w soczewkach magnetycznych, dlatego też soczewki poddaje się obciążeniu impulsami prądowymi o wysokim natężeniu (w przewidywanym projekcie – 350 kA z częstotliwością 12,5 Hz). Przykładowy schemat eksperymentu do pomiaru oscylacji neutrin (z tzw. krótką bazą pomiarową) pokazuje rys. 1.

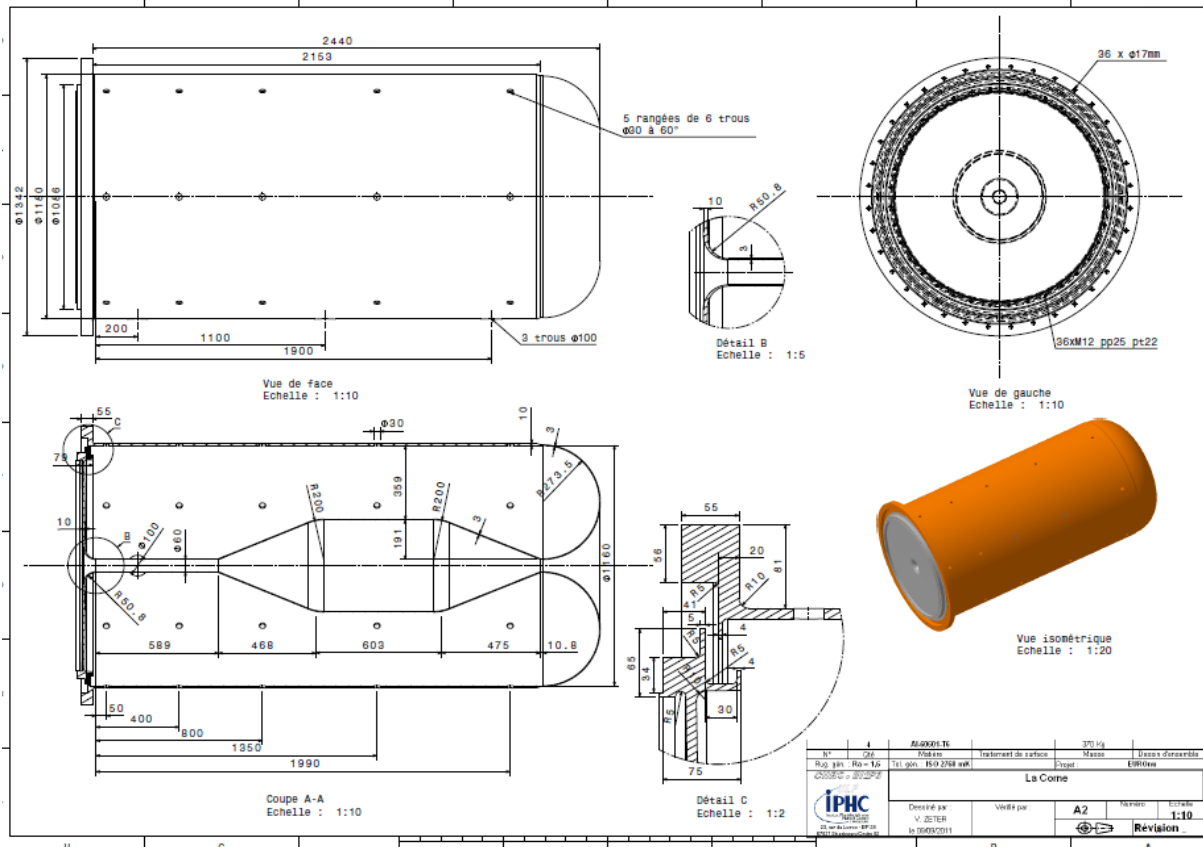


Rys. 1. Fragment toru pomiarowego do badania oscylacji neutrin

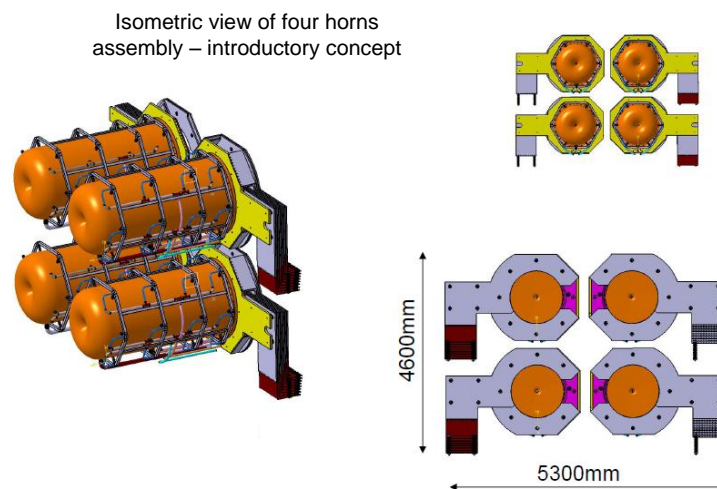
Fig. 1. Typical beam line for the neutrino oscillation experiment

Na rys. 2 przedstawiono natomiast szczegółowo konstrukcję przewidzianą w projekcie pojedynczej soczewki magnetycznej, która ma być wykonana ze stopu aluminium 6082 T6. Soczewkę zaprojektowano jako powłokę obrotowo-symetryczną o dwóch różnych grubościach ścianki – 3 mm (w części wewnętrznej i dnie o kształcie toroidalnym) oraz 10 mm (w walcowym płaszczu zewnętrznym). Płaska tarcza soczewki, połączona z wewnętrzną częścią powłoki, jest odizolowana elektrycznie od kołnierza płaszczu zewnętrznego za pomocą wykonanego z materiału izolującego pierścienia, a następnie płaszcz i tarcza połączone są izolowanym złączem śrubowym. Walcowy kanał znajdujący się w centralnej części powłoki służy do umieszczenia grafitowego celu (ang. *target*) bombardowanego rozpędzonymi protonami. Z celu emitowane są produkty zderzeń m.in. w postaci pionów i kaonów. W celu zwielokrotnienia efektów pomiarowych w projektowanym eksperymencie przewidziano pracę czterech soczewek magnetycznych położonych wg schematu przedsta-

wionego na rys. 3. Zderzeniom zachodzącym w celu towarzyszy emisja energii cieplnej, dlatego każda z soczewek ma układ otworów służących do przyłączenia eżektorów wody przeznaczonej do chłodzenia powłok w trakcie zderzeń i przepływu impulsów prądu o wysokim natężeniu. Na rys. 3 pokazano również schemat układu doprowadzenia wody chłodzącej do każdej z soczewek.



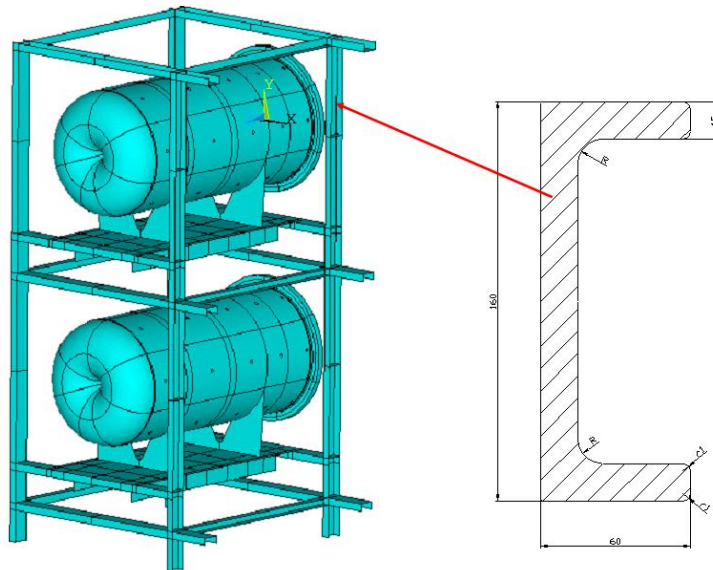
Rys. 2. Rysunek konstrukcji pojedynczej soczewki magnetycznej [7, 8]
 Fig. 2. Single horn designs – dimensions and the details of shape [7, 8]



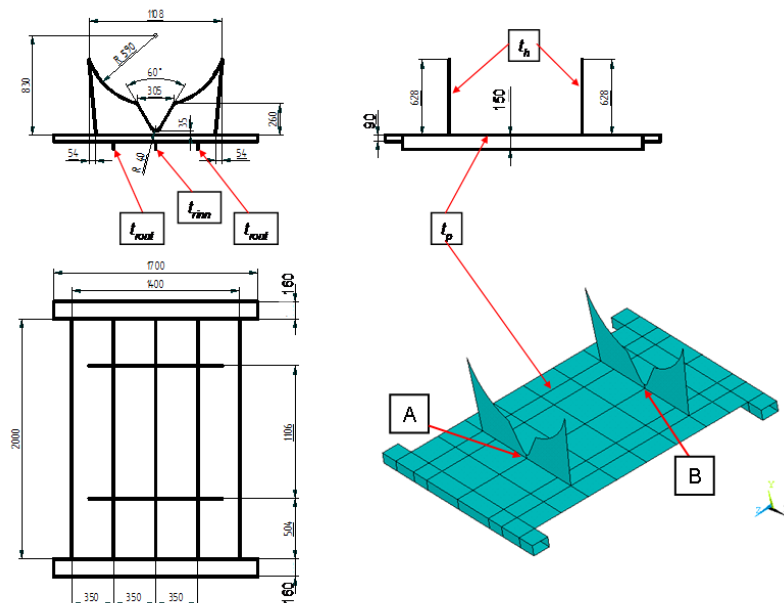
Rys. 3. Aranżacja czterech soczewek magnetycznych w projektowanym eksperymencie [7, 8]
 Fig. 3. Four horns arrangement in proposed experiment [7, 8]

2. RAMOWY UKŁAD PODPARCIA DLA CZTERECH SOCZEWEK, ANALIZA MES I OPTYMALIZACJA

Podparcie dla układu czterech soczewek magnetycznych zaproponowano w formie spawanej ramy złożonej ze standardowego ceownika o wymiarach przekroju poprzecznego: $b \times s \times t = 160 \times 60 \times 15$ mm, wykonanej ze stopu aluminium 6082 T6 lub ze stali konstrukcyjnej. Dwa identyczne układy ramowe położone w pobliżu końców soczewek przyspawane są do poziomych paneli podpierających soczewki oraz poziomych łączników w formie kątowników (6 sztuk). Proponowaną koncepcję rozwiązania ramy ilustruje rys. 4 poniżej, a na rys. 5 przedstawiono system podparcia pojedynczej soczewki [9].



Rys. 4. Symetryczna połowa ramowego układu wsporczygo dla czterech soczewek magnetycznych
Fig. 4. Symmetric half of frame supporting system for four horns system

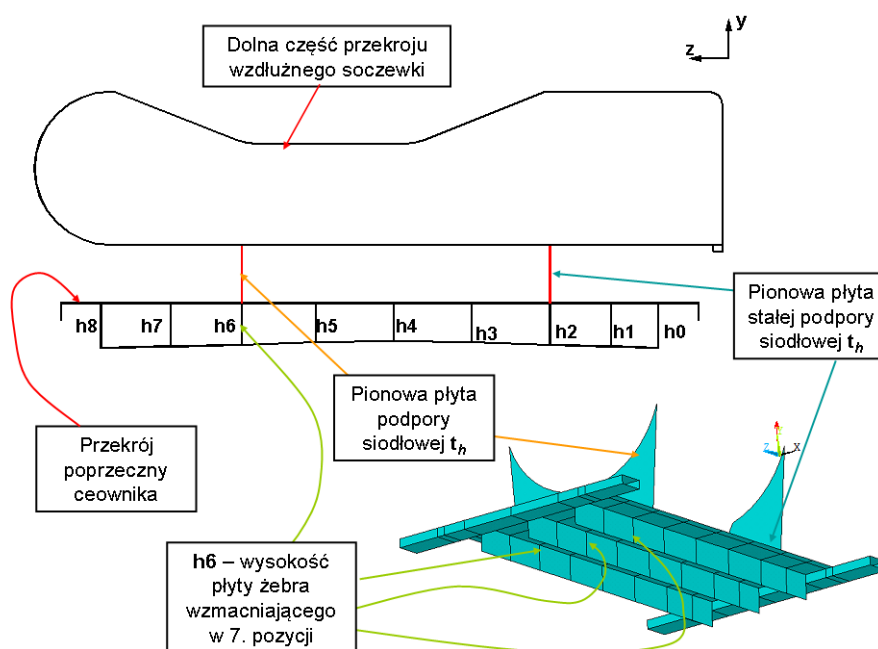


Rys. 5. Podparcie pojedynczej soczewki
Fig. 5. Supporting system for single horn

Dla zaproponowanego układu podparć zbudowano model powłokowy MES ramy i elementów podparcia [10] oraz przeprowadzono wstępne obliczenia numeryczne, zakładając wykonanie ramy, płyt podpierających i soczewki z tego samego materiału, tj. aluminium 6082 T6. Przeprowadzono wiele testów numerycznych, które pozwoliły ustalić wstępne wartości grubości poszczególnych elementów podparcia dla pojedynczej soczewki:

- grubość horyzontalnej płyty podpierającej (obie płyty) $t_p = 20$ mm;
- grubości podpór siodłowych (każda) $t_h = 12$ mm;
- grubość żeber zewnętrznych $t_{rout} = 15$ mm;
- grubość żeber wewnętrznych $t_{rim} = 0$ mm (brak żebra wewnętrznego);
- wysokość każdego z żeber $h_r = 200$ mm.

Otrzymane wyniki analizy statycznej MES konstrukcji obciążonej ciężarem własnym okazały się satysfakcjonujące z punktu widzenia uzyskanych maksymalnych wartości naprężeń zastępczych w soczewkach ($\sigma_{z1}^{max} = 5,2$ MPa) oraz naprężeń w ramie wsporczej ($\sigma_{z2}^{max} = 29,5$ MPa). Analiza ugięć nie dała jednak zadowalających wyników – wartość bezwzględna maksymalnego pionowego ugięcia przekroczyła wymagane 0,5 mm, osiągając $|u_y^{max}| = 0,83$ mm. Oznacza to zbyt małą sztywność konstrukcji wsporczej. Z tego powodu zdecydowano się na wzmocnienie konstrukcji ramy przez wprowadzenie dodatkowego żebra środkowego pod każdą z obu płyt poziomych podpierających soczewki (wg rys. 5). Analiza rozkładu pionowych przemieszczeń w konstrukcji (większe ugięcia dolnej soczewki) sugeruje ponadto konieczność zróżnicowania wartości grubości płyt podpierających dla soczewek górnej i dolnej. W ten sposób liczba parametrów – zmiennych decyzyjnych – określających parametry podparcia wzrasta do ośmiu. Z uwagi na zmienny moment gnący wzdłuż współrzędnej „z” płyty podpierającej, do analizy można wprowadzić kolejne zmienne – wysokości żeber podpierających. Rysunek 6 przedstawia propozycję wprowadzenia zmiennych wysokości w 9 przekrojach (założono ten sam kształt i tę samą wysokość wszystkich żeber w odpowiednich przekrojach) [9, 11].



Rys. 6. Przekrój wzdłużny horna (dolna część) wraz z żebrzem wzmacniającym płytę poziomą
Fig. 6. Horn cross-section (lower part) with horizontal plate reinforcing rib

Tak więc poszukiwanie optymalnych parametrów dla podparcia pojedynczej soczewki magnetycznej wymaga określenia optymalnych wartości co najmniej 12 parametrów (3 grubości płyt t_{roub} , t_{rinn} , t_h i 9 wysokości $h0$ – $h8$ żeber). Wobec rozmiaru zadania numerycznego – pojedyncza soczewka wraz z podparciem powyżej 500 tys. równań do rozwiązania – poszukiwanie optimum w standardowej procedurze optymalizacji parametrycznej staje się zadaniem dość czasochłonnym. Z kolei nie wszystkie z wprowadzonych parametrów geometrycznych są równie ważne z punktu widzenia założonego kryterium optymalizacji. Dlatego też zasadniczy proces optymalizacji parametrycznej poprzedzono analizą wrażliwości konstrukcji na zmiany rozważanych parametrów. Określenie wpływu poszczególnych zmiennych umożliwia moduł *PDS (Probabilistic Design of Structures)* wbudowany w program ANSYS. Szczegółowe badania wpływu poszczególnych wymiarów przeprowadzono dla podanych niżej kryteriów:

- minimalizacja różnicy ugięć podpór pionowych soczewki określona w środku dolnej krawędzi obu podpór siodłowych (w punktach A i B – rys. 5):

$$\Delta u_y = |u_{y_p1} - u_{y_p2}| \quad (1)$$

- minimalizacja maksymalnej wartości bezwzględnej przemieszczeń pionowych, dodatkowo:

$$|u_y|_{\max} \leq 0,5 \text{ mm} \quad (2)$$

- minimalizacja objętości układu podparcia (konstrukcja lekka):

$$V_p = \min \quad (3)$$

- minimalizacja maksymalnego naprężenia zastępczego w konstrukcji wsporczej i soczewce, dodatkowo:

$$\sigma_z^{\max} \leq 20 \text{ MPa} \quad (4)$$

Wyniki przeprowadzonej w systemie MES ANSYS [9÷11] analizy wrażliwości prezentuje tabela 1.

Tabela 1

Wyniki analizy wrażliwości konstrukcji pojedynczego horna z podparciem

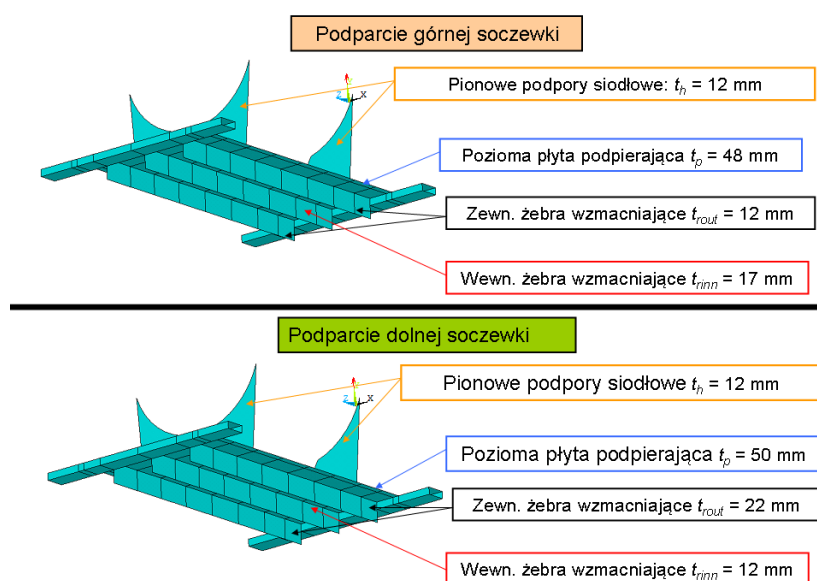
Wielkość kontrolna	Parametr o wpływie istotnym	Parametr o wpływie pomijalnym
Bezwzględna wartość różnicy ugięć w punktach A i B (rys. 5)	$t_p, h6$	$t_h, t_{roub}, t_{rinn}, h0, h1, h2, h3, h4, h5, h7, h8$
Maksymalne ugięcie konstrukcji pojedynczej soczewki	$t_p, h4, h3, h2, t_{roub}$	$t_{rinn}, t_h, h0, h1, h5, h7, h8$
Maksymalne naprężenie zastępcze w analizowanej konstrukcji	$t_p, t_{roub}, t_{rinn}, h2,$	$h0, h1, h3, h4, h5, h7, h8$
Całkowita masa konstrukcji wsporczej	t_p, t_h	$h0, h1, h2, h3, h4, h5, h7, h8, t_{roub}, t_{rinn}$

Po analizie rezultatów przedstawionych w tabeli 1, do końcowej procedury optymalizacji podparcia pojedynczej soczewki wybrano 4 zmienne decyzyjne, tj. t_p – grubość płyty poziomej, t_{rinn} – grubość żebra wewnętrznego, t_{rout} – grubości (te same) żeber zewnętrznych.

Wpływ zróżnicowania poszczególnych wysokości $h0$ do $h8$ na badane wyniki okazał się być mniej ważny. Wysokość żeber $h2$, $h3$, $h4$ okazała się istotna w przypadku wpływu na całkowite przemieszczenie badanej konstrukcji. Z kolei wysokość $h6$ jest istotna w przypadku zastosowania kryterium (1). Ostatecznie wpływ wysokości żeber postanowiono uwzględnić, wprowadzając jako czwartą zmienną decyzyjną stałą wysokość żeber h . W dalszej kolejności, na bazie prób numerycznych, ustalono dopuszczalny obszar zmienności wartości optymalizowanych parametrów:

- grubość płyty poziomej: $t_p \in \langle 20,50 \rangle$ mm
- grubość żebra środkowego: $t_{rinn} \in \langle 10,25 \rangle$ mm
- grubość żeber zewnętrznych: $t_{rout} \in \langle 10,25 \rangle$ mm
- wysokość żeber podpierających: $h0 \in \langle 180,250 \rangle$ mm

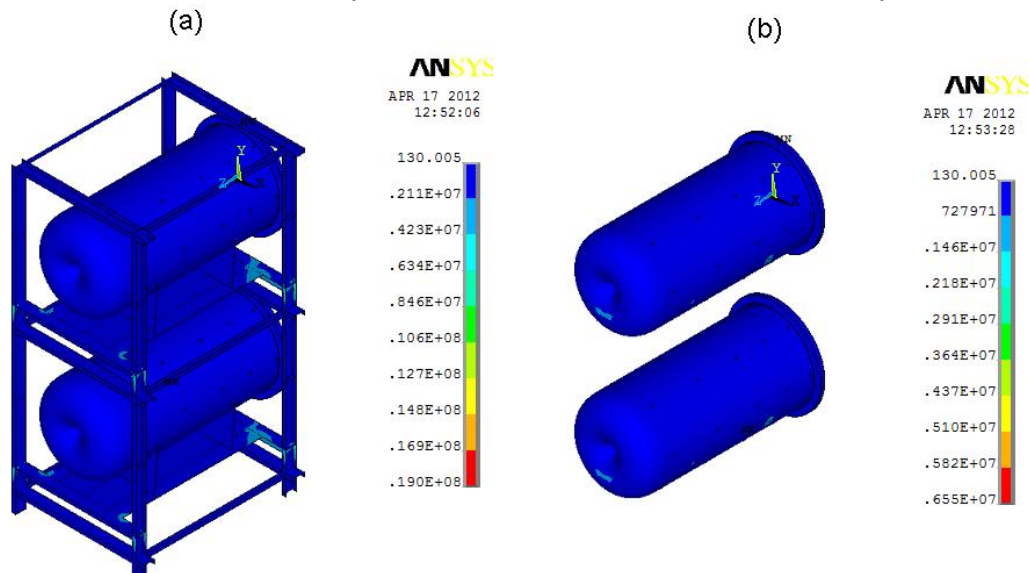
Optymalizację numeryczną przeprowadzano w systemie MES ANSYS z uwagi na proponowane kryteria (1÷4), a w pracy prezentowane są wyłącznie wyniki obliczeń przeprowadzonych dla funkcji celu podanej w równaniu (1). W pierwszym kroku optymalizacji otrzymano następujące wyniki (w rozwiązaniu uwzględniono całkowite wartości): $t_p = 48,0$ mm, $t_{rout} = 12,0$ mm, $t_{rinn} = 17,0$ mm, $h = 200$ mm. Podane wartości parametrów geometrycznych należy traktować jako optymalne dla podparcia górnej soczewki magnetycznej. W kolejnym kroku przeprowadzono optymalizację konstrukcji złożonej z dwóch soczewek – górnej i dolnej – zabudowanych w analizowanym układzie ramowym, co odpowiada analizie symetrycznej połowy całej konstrukcji. W tej analizie jako początkowe grubości i wysokości dla systemu podparcia górnej i dolnej soczewki przyjęto optymalne wartości otrzymane w pierwszym kroku dla górnej soczewki. Następnie przeprowadzono procedurę optymalizacji dla czterech parametrów dolnej soczewki, pozostawiając bez zmian przyjęte wcześniej, optymalne wartości dla podparcia górnej soczewki. Otrzymane wartości parametrów podparcia obu soczewek ilustruje rys. 7. Wartości optymalne parametrów podparcia dla dolnej soczewki różnią się od wcześniej otrzymanych wartości w optymalizacji dla górnej soczewki.



Rys. 7. Optymalne wartości parametrów elementów podparcia

Fig. 7. Optimal values of design parameters for supporting elements

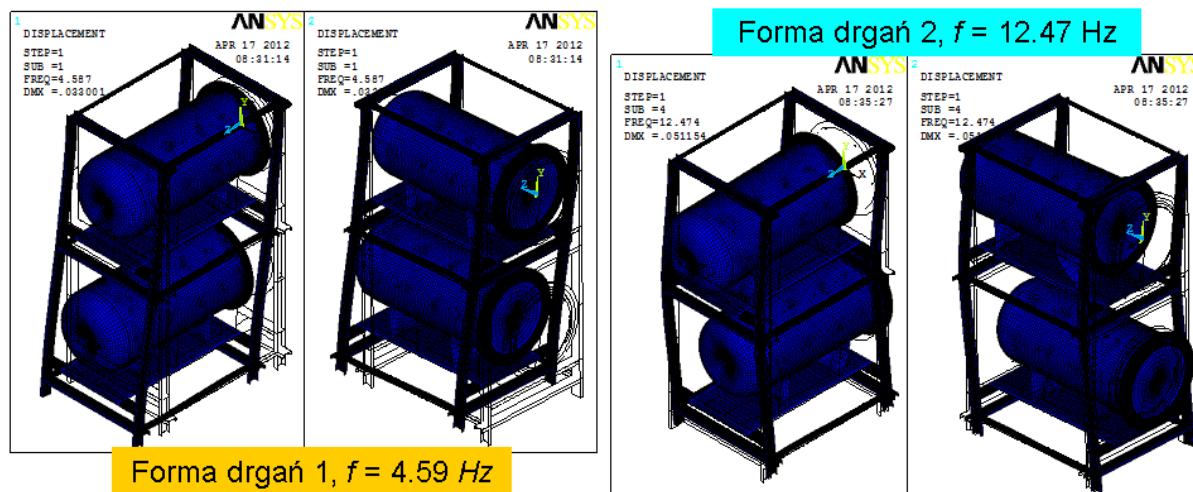
Podział obliczeń optymalizacyjnych na dwa etapy jest uzasadniony rozmiarem zadania numerycznego dla rozważanej połowy konstrukcji. Analizowany problem wymaga wielokrotnego rozwiązywania w pojedynczej pętli optymalizacyjnej zadania zawierającego ponad 1 mln równań liniowych, co jest dość czasochłonne. Otrzymane wyniki analizy statycznej dla konstrukcji o zoptymalizowanych wartościach parametrów są następujące: maksymalne przemieszczenia pionowe wynoszą: 0,496 mm, maksymalne naprężenia zastępcze (rys. 8) w soczewkach: $\sigma_z^{\max} = 6,55$ MPa, a w ramie wsporczej: $\sigma_z^{\max} = 19,0$ MPa.



Rys. 8. Rozkłady naprężeń zastępczych w Pa, w 1/2 analizowanej konstrukcji oraz w soczewkach magnetycznych

Fig. 8. Distribution of equivalent stress in 1/2 of analyzed structure and in magnetic horns

Uzyskane wyniki są satysfakcjonujące z punktu widzenia statyki konstrukcji i wymagają weryfikacji z uwagi na zewnętrzne obciążenie impulsami prądowymi powtarzającymi się z częstotliwością 12,50 Hz. Przeprowadzona numerycznie analiza częstości drgań pozwoliła określić wartości częstości drgań własnych i odpowiadające im formy drgań. Pierwsza z częstości wyniosła: $f_1 = 4,59$ Hz, a druga: $f_2 = 12,47$ Hz. Formy drgań towarzyszące obu pierwszym częstościom drgań prezentuje rys. 9. Różnica wartości częstości wymuszenia (12,50 Hz) i drugiej z otrzymanych częstości drgań własnych jest zbyt mała, aby zapewnić bezpieczną pracę rozważanej konstrukcji (ryzyko wystąpienia rezonansu konstrukcji i możliwego przedwczesnego zniszczenia układu wsporczo soczewek). Konieczne są zatem modyfikacje układu podparcia, pozwalające zwiększyć różnicę pomiędzy częstością wymuszenia a częstością drgań własnych. Po wnikliwej analizie form drgań skojarzonych z odpowiednimi częstościami zdecydowano się w pierwszej kolejności zwiększyć grubość ścianki ceownika ramy wsporczej z 15 mm do 20 mm, spowodowało to wzrost częstości f_2 do wartości 15,79 Hz. Kolejna z zaproponowanych poprawek polegała na zwiększeniu grubości płyt podpór siodłowych soczewek t_h z 12 mm na 16 mm, co zaowocowało kolejnym wzrostem wartości f_2 do 17,37 Hz. Wynik jest w pełni satysfakcjonujący z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji. W trakcie obliczeń kontrolowane były również zmiany wartości pierwszej częstości drgań własnych, która po zmianach wzrosła do 5,09 Hz, co nie wprowadza ryzyka wystąpienia rezonansu. Po wprowadzeniu zmian przeprowadzono końcową analizę statyczną konstrukcji. Uzyskano maksymalną wartość bezwzględną przemieszczenia pionowego wynoszącą $|u_y|_{\max} = 0,440$ mm i maksymalne naprężenie zastępcze w konstrukcji wynoszące: $\sigma_z^{\max} = 10,30$ MPa.



Rys. 9. Częstości i formy drgań własnych 1/2 konstrukcji ramy – pierwsze dwie wartości
 Fig. 9. Frequencies and modes of 1/2 of analyzed construction – first two values

3. RAMA WSPORCZA DLA CZTERECH SOCZEWEK MAGNETYCZNYCH WYKONANA ZE STALI KONSTRUKCYJNEJ

Zmiana grubości ścianki aluminiowego ceownika ramy wsporczej jest powodem zmiany technologii wykonania ramy. Wówczas ramę należy wykonać ze spawanych płaskowników, co zwiększa koszt wykonania konstrukcji ramy (ceownik o wymiarach przekroju poprzecznego: $b \times s \times t = 160 \times 60 \times 20$ mm nie jest produkowany seryjnie). W tej sytuacji zaproponowano zastosowanie stali konstrukcyjnej do wykonania ramy wsporczej i pozostałych elementów podparcia soczewek [11]. Przeprowadzono analogiczny do przedstawionego w punkcie 2 proces badania wrażliwości konstrukcji, a następnie dwuetapową optymalizację parametrów ramy obciążonej statycznie. W kolejnym kroku wykonano analizę częstości drgań własnych dla zoptymalizowanej konstrukcji. W wyniku analizy otrzymano następujące wartości optymalne dla poszczególnych elementów wsporczych (tabela 2).

Tabela 2

Optymalne wartości grubości elementów podparcia ze stali

	Stal konstrukcyjna, dane w mm
Podpory siodłowe górnego horna t_{h1}	11,0
Płyta pozioma górnego horna t_{p1}	28,5
Grubość żeber zewnętrznych górnego horna t_{rout1}	10,0
Grubość żebra wewnętrznego górnego horna t_{rinn1}	12,0
Podpory siodłowe dolnego horna t_{h2}	14,5
Płyta pozioma dolnego horna t_{p2}	32,5
Grubość żeber zewnętrznych dolnego horna t_{rout2}	10,0
Grubość żebra wewnętrznego dolnego horna t_{rinn2}	13,0

Dla wartości poszczególnych parametrów konstrukcyjnych podanych w tabeli 2 otrzymano następujące wyniki statycznej analizy wytrzymałościowej: maksymalne (co do wartości bezwzględnej) przemieszczenia pionowe wynoszą 0,349 mm, a maksymalne naprężenia

zastępcze w analizowanej części konstrukcji: $\sigma_z^{\max} = 18,0$ MPa. Wartości przemieszczeń i naprężeń w pełni spełniają narzucone wcześniej ograniczenia dla przemieszczeń i naprężeń dopuszczalnych. Przeprowadzona analiza częstości drgań konstrukcji ramy wykonanej ze stali nie wskazuje na możliwość wystąpienia rezonansu w całej konstrukcji. Otrzymane wartości częstości drgań własnych to odpowiednio: $f_1 = 5,87$ Hz oraz $f_2 = 17,84$ Hz i dostatecznie różnią się one od częstości wymuszenia.

4. PODSUMOWANIE

W prezentowanej pracy przedstawiono koncepcję rozwiązania ramowego układu podparcia czterech soczewek magnetycznych przewidzianych do badania problemu oscylacji neutrin. Dla wstępnie przyjętego rozwiązania postaci ramy przeprowadzono optymalizację parametrów geometrycznych elementów podparcia – płyt i żeber. Z uwagi na możliwość pojawienia się rezonansu wskutek przyłożenia impulsowego obciążenia prądowego, w kolejnym kroku przeprowadzono analizę częstości drgań własnych dla zoptymalizowanej konstrukcji. W przypadku konstrukcji wsporczej wykonanej z aluminium 6082 T6, druga z częstości drgań różniła się w niewielkim stopniu od częstości wymuszenia, co spowodowało konieczność zmiany grubości wybranych elementów podparcia. Druga z analizowanych konstrukcji wsporczych została wykonana ze stali konstrukcyjnej. W tym przypadku zoptymalizowana z uwagi na obciążenie statyczne konstrukcja wykazała częstości drgań dostatecznie odległe od częstości wymuszenia impulsowego. Tak więc w przypadku ramy wsporczej wykonanej ze stali nie zachodzi konieczność zmiany grubości żadnego z uzyskanych w optymalizacji wymiarów. Jedną z wad konstrukcji stalowej ramy wsporczej jest jej około dwukrotnie większa waga (2900 kg) od konstrukcji wykonanej z aluminium (1470 kg) w końcowej wersji.

Bibliografia

1. High Intensity Neutrino Oscillation in Europe EURONu, project no. 212372 (2009 – 2012)
2. Informacje na oficjalnej stronie internetowej K2K, <http://neutrino.kek.jp/>
3. Informacje na oficjalnej stronie internetowej MiniBooNE, <http://www-boone.fnal.gov>
4. The NuMI Technical Design Handbook, <http://www-numi.fnal.gov/numwork/tdh>, 2007.
5. Informacje na oficjalnej stronie internetowej CNGS, <http://www.cern.ch/proj-cngs>
6. Informacje na oficjalnej stronie internetowej T2K, <http://www.t2k-experiment.org/>
7. Zeter V.: Single Horn Documentation. CNRS, Strasbourg 2011.
8. Wilcox D.: Target Station Concept for EUROnu. Rutherford Appleton Laboratory, 2011.
9. Szybiński B., Cupiał P.: Four horns support system – static and dynamic performance. Fourth EUROnu Annual Meeting, Paris, June 13-15 2012.
10. ANSYS ver.12 for Academic Research, Swanson Analysis System Inc. 2010.
11. Szybiński B.: The aluminium and the steel supporting system for the horns assembly in the High Intensity Neutrino Oscillation Project. Key Engineering Materials, Vol. 542 (2013), p. 205-217.