

Wybrane zagadnienia analizy wytrzymałościowej linopędni maszyn wyciągowych metodą elementów skończonych MES

dr inż. Krzysztof Turewicz
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Selected problems of strength analysis of Koepe pulleys in hoisting machines by the FEM method

Streszczenie:

Linopędnie maszyn wyciągowych są jednymi z najistotniejszych elementów górniczych wyciągów szybowych. Ze względu na ich istotność w bezpieczeństwie użytkowania dąży się do doskonalenia ich metod obliczeń. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia analizy wytrzymałościowej linopędni przeprowadzone metodą elementów skończonych. Zdefiniowano statyczne i dynamiczne warunki brzegowe. Modelowanie dynamicznych warunków brzegowych omówiono na podstawie autorskiej metody obliczeń obciążeń linopędni. Wyniki obliczeń numerycznych MES zweryfikowano z pomiarami na obiektach rzeczywistych.

Abstract:

Koepe pulleys of the hoisting machines are the most important components of mine shaft hoists. As they are important element of shaft hoisting system safety, the method for improvement of their calculations is necessary. The selected problems of Koepe pulley strength analyses by the FEM method are given. Static and dynamic boundary conditions are defined. Modelling of dynamic boundary conditions are discussed basing on the method for Koepe pulley load calculations developed by the authors. The results FEM numerical calculations were verified by the measurements taken on the real objects.

Słowa kluczowe: maszyny wyciągowe, linopędnie, obliczenia wytrzymałościowe MES

Keywords: hoisting machines, koepe pulleys, FEM numerical calculations

1. Wstęp

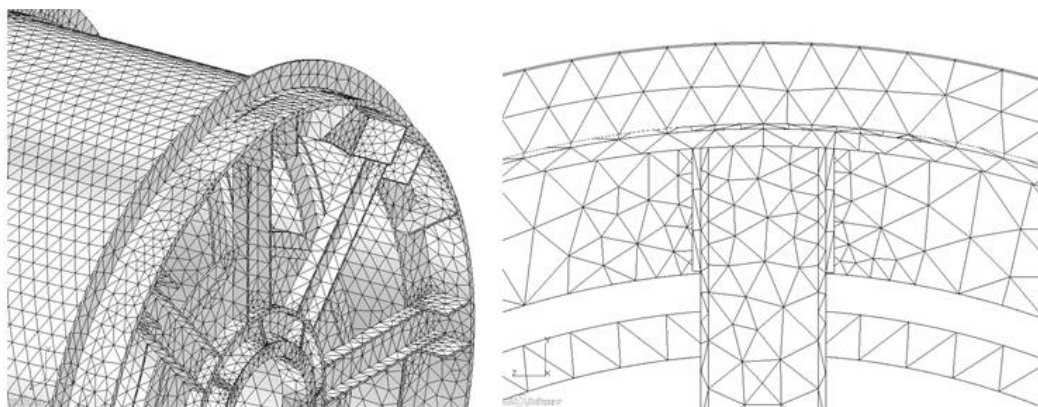
Obliczenia wytrzymałościowe linopędni maszyn wyciągowych są zadaniem skomplikowanym. Przykłady analitycznych obliczeń wytrzymałościowych można znaleźć m. in. w pracy [1]. Obecnie obliczenia linopędni prowadzi się z reguły za pomocą Metody Elementów Skończonych MES. Najszybszy sposób budowy modelu obliczeniowego MES polega na utworzeniu przestrzennego modelu geometrycznego w programie CAD, a następnie wyeksportowaniu geometrii do odpowiedniego preprocesora, w którym przygotowuje się model obliczeniowy. Przygotowanie modelu obliczeniowego polega na budowie siatki elementów skończonych oraz zdefiniowaniu odpowiednich warunków brzegowych i początkowych. Model obliczeniowy poddawany jest analizie za pomocą solvera obliczeniowego. Analiza i przeglądanie wyników obliczeń wymaga ich importu do postprocesora. W ITG KOMAG model geometryczny linopędni budowany jest z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor, natomiast do budowy modelu obliczeniowego, czyli pre i post procesora stosowane jest oprogramowanie MSC.Patran. Jako solver obliczeniowy wykorzystuje się najczęściej MSC.Nastran.

Na każdym z etapów budowy modelu obliczeniowego dokonywane są uproszczenia, w odniesieniu do modelu geometrycznego, pozwalające uzyskać odpowiednią dokładność obliczeń. Uproszczenia wiążą się z dyskretyzacją, czyli budową siatki elementów skończonych w taki sposób, aby była ona jak najbardziej jednorodna. Uzyskuje się to poprzez pominięcie mało istotnych, pod względem wytrzymałościowym elementów konstrukcyjnych

jak np.: małe otwory, promienie, fazy itp. Istotne z punktu widzenia dokładności obliczeń jest również zastosowanie właściwego typu elementów skończonych do analizowanego obiektu.

2. Budowa siatki MES linopędni

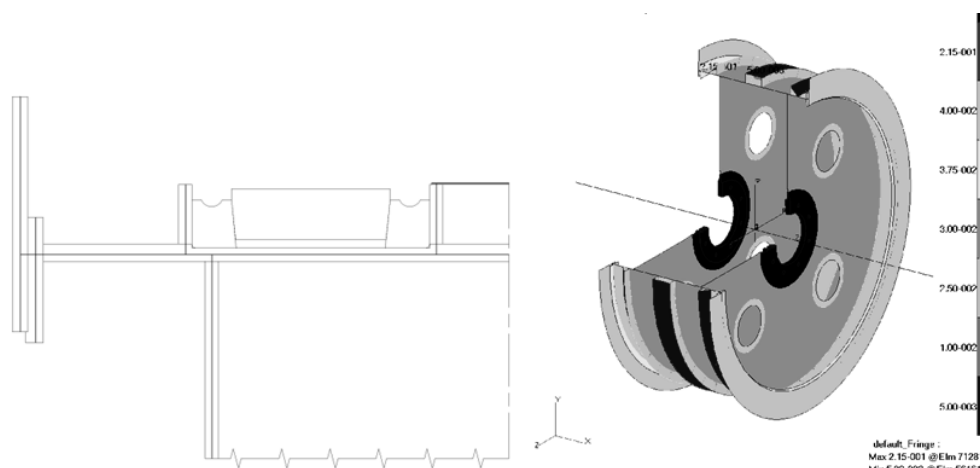
W odniesieniu do linopędni maszyn wyciągowych, charakteryzujących się dużymi gabarytami, przy niewielkich grubościach blach, zastosowanie bryłowych elementów skończonych powoduje wygenerowanie dużej liczby elementów skończonych, co istotnie wpływa na czas obliczeń i stosowanie dużej mocy obliczeniowej. Z kolei zastosowanie zbyt rzadkiej siatki powoduje otrzymywanie niedokładnych wyników obliczeń. Przykład zastosowania bryłowych dziesięcio-węzłowych elementów bryłowych typu tet10, w odniesieniu do bębna nawojowego, pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Model MES linopędni z elementami 3D typu tet10. [opracowanie własne]

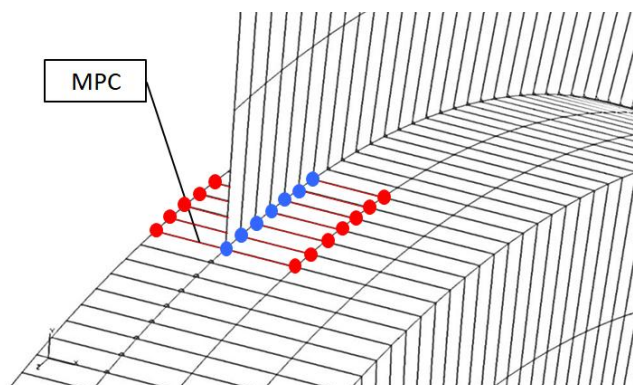
Widoczna siatka elementów skończonych (rys. 1) jest nieregularna, a na grubości blach widoczne są pojedyncze zdegradowane elementy skończone. Wyniki analizy takiego modelu są bardzo przybliżone.

Dla tego typu konstrukcji, najbardziej odpowiednim sposobem modelowania MES wydaje się być zastosowanie płaskich elementów 2D, które składają się na model płytowo – powłokowy. Modele budowane są na podstawie płaszczyzn środkowych blach, natomiast grubość podawana jest w postaci parametru elementu skończonego. Wyniki analiz pozwalają na wyznaczenie mapy naprężeń na obu stronach blach. Na rysunku 2 pokazano przykład płytowo – powłokowego modelu linopędni maszyny wyciągowej z zaznaczonymi grubościami blach.



Rys. 2. Model płytowo-powłokowy 2D z elementami typu quad4 oraz tri3. [opracowanie własne]

Większość analizowanego modelu linopędni składa się z elementów płaskich. Z reguły są to elementy czterowęzłowe typu quad. Natomiast w odniesieniu do piasty linopędni, której przekrój poprzeczny jest duży, najwłaściwsze jest zastosowanie elementów bryłowych ośmiowęzłowych typu hex lub dziesięciowęzłowych typu tet. W celu poprawności obliczeń bryłowe elementy piasty oraz płaskie elementy tarcz bocznych linopędni muszą być połączone ze sobą w odpowiedni sposób. Wynika to z różnicy stopni swobody, jaką posiadają elementy typu quad i typu hex. Elementy typu quad posiadają sześć stopni swobody, natomiast typu hex tylko trzy. W związku z tym w miejscu ich styku stosowane są bezmasowe elementy pośrednie typu MPC (rys. 3).



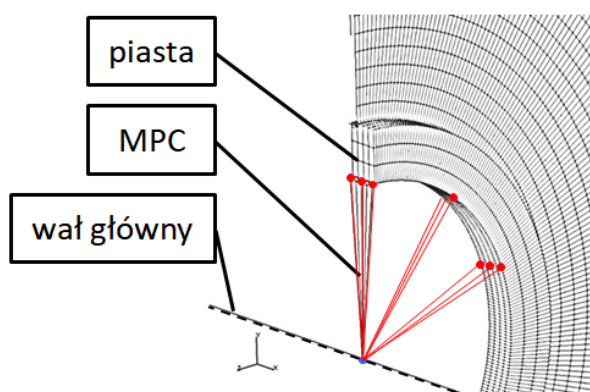
Rys. 3. Modelowanie połączenia elementów 2D (tarcza linopędni) z elementami 3D (piasta linopędni)
[opracowanie własne]

3. Definiowanie warunków brzegowych

Prawidłowo zbudowana siatka elementów skończonych jest tylko jednym z elementów modelu obliczeniowego. Aby model był kompletny należy uzupełnić go o warunki brzegowe. Warunki brzegowe można podzielić na podparcia i wymuszenia. Podobnie jak podczas budowy siatki elementów skończonych, w trakcie definiowania warunków brzegowych, stosowane są różne uproszczenia. Należy jednak dążyć do jak najdokładniejszego odzwierciedlenia rzeczywistych warunków podparć i obciążeń. W odniesieniu do modelu obliczeniowego zastawu wału głównego można wyszczególnić bezpośrednio podparcie linopędni na sztywno lub z uwzględnieniem podatności wału głównego. Podparcie rozumiane jest, jako odebranie węzłom odpowiednich stopni swobody translacyjnych i rotacyjnych.

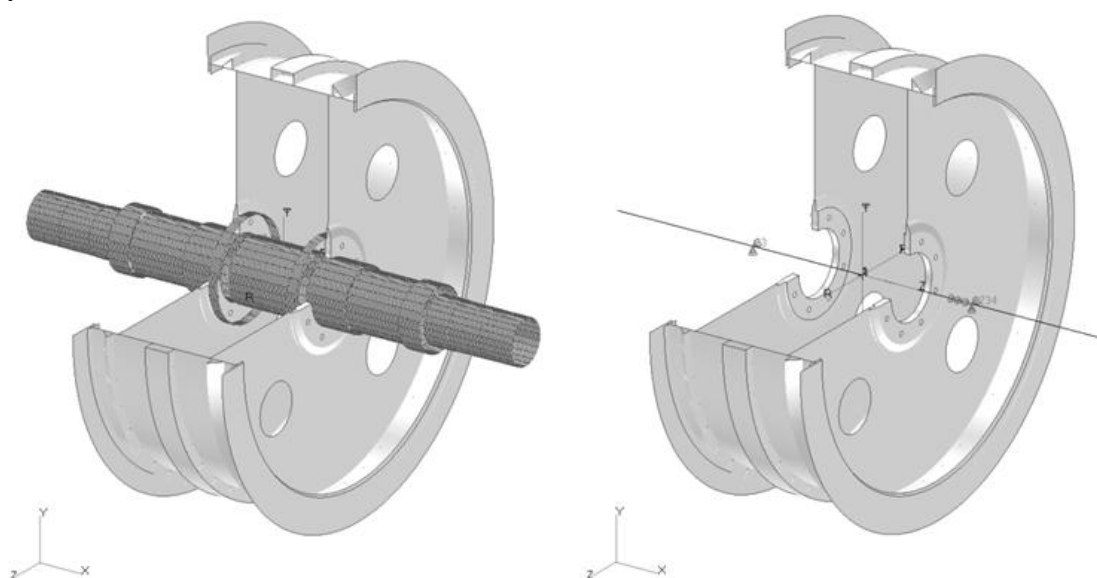
W odniesieniu do podparcia na sztywno odbierane są stopnie swobody linopędni w miejscach piast lub otworów służących do łączenia linopędni z wałem głównym. W tym przypadku wał główny nie jest uwzględniany w analizie. Ten sposób definiowania podparcia przyspiesza czas budowy modelu obliczeniowego, ponieważ nie ma konieczności uwzględnienia wału głównego. Należy jednak rozważyć czy na takie uproszczenie można sobie pozwolić z punktu widzenia dokładności obliczeń.

Drugim sposobem definiowania podparć linopędni jest uwzględnienie podatności wału głównego. Wymaga to zbudowania dyskretnego modelu linopędni oraz wału głównego. Wał główny modelowany jest wówczas za pomocą elementów jednowymiarowych 1D typu beam. Linopędnie łączą się z wałem głównym za pomocą specjalnych elementów pośrednich MPC (rys. 4).



Rys. 4. Modelowanie wału głównego za pomocą elementów belkowych i MPC RBE2
[opracowanie własne]

W miejscach modelu wału odpowiadających osiom łożysk odbierane są odpowiednie stopnie swobody. Ten sposób modelowania jest w prawdzie bardziej pracochłonny niż poprzedni, natomiast bardziej oddaje rzeczywisty charakter analizowanego obiektu. Kompletny model MES linopędni wykonanej z zastosowaniem elementów 2D i piastą z elementów 3D oraz wału głównego wykonanego za pomocą elementów 1D przedstawiono na rysunku 5.



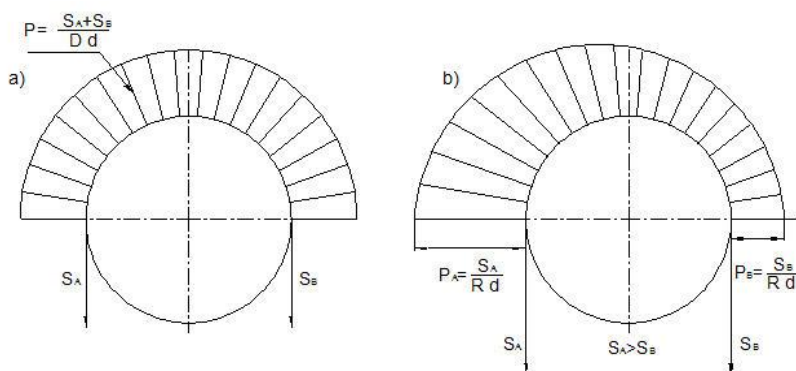
Rys. 5. Model MES linopędni i wału głównego [opracowanie własne]

Linopędnie maszyn wyciągowych, zgodnie z wytycznymi przepisów, muszą spełniać warunki wytrzymałościowe w odniesieniu o warunków ruchowych, dotyczących normalnej pracy maszyny wyciągowej oraz warunków awaryjnych dotyczących zerwania lin(y) nośnych. Główne obciążenie linopędni związane jest z naciskiem lin nośnych na płaszczyznę. Obciążenie to można podzielić na:

- normalne do powierzchni linopędni – modelowane najczęściej w postaci ciśnienia, uwzględniające nacisk lin nośnych na linopędnię,
- styczne do powierzchni linopędni – modelowane w postaci sił węzłowych stycznych do powierzchni linopędni, uwzględniające różnicę sił w gałęziach lin i powodujące skręcanie linopędni,
- poosiowe – modelowane w postaci sił węzłowych stycznych do linopędni i skierowanych w kierunku osi wału głównego (wyłącznie w przypadku bębnowych co wynika z kąta nabiegu liny nośnej na bęben),

- obrzeży stref nawojowych – modelowane w postaci sił węzłowych przyłożonych na obwodzie obrzeży w kierunku osi wału głównego (uwzględniane w przypadku wielowarstwowego nawijania liny na bęben nawojowy).

Najprostszy sposób modelowania obciążeń linopędni polega na przyjęciu statycznych wartości. Wartości statyczne obciążeń wyznaczane są na podstawie parametrów wyciągu szybowego i uwzględniają m.in. masy: ładunków, naczyń, lin, zawiesi itp.. Mogą uwzględniać również siły dynamiczne pojawiające się podczas rozruchu. Wyznaczona wartość obciążeń, zazwyczaj maksymalna, przeliczana jest na poszczególne składowe i definiowana na modelu obliczeniowym linopędni w postaci nacisków i sił węzłowych. Statyczne wartości obciążeń mogą być definiowane jako wartości średnie (rys. 6a) lub w sposób liniowy (rys. 6b), uwzględniając różnicę sił w gałęziach lin.



Rys. 6. Rozkład obciążeń na linopędni [opracowanie własne]

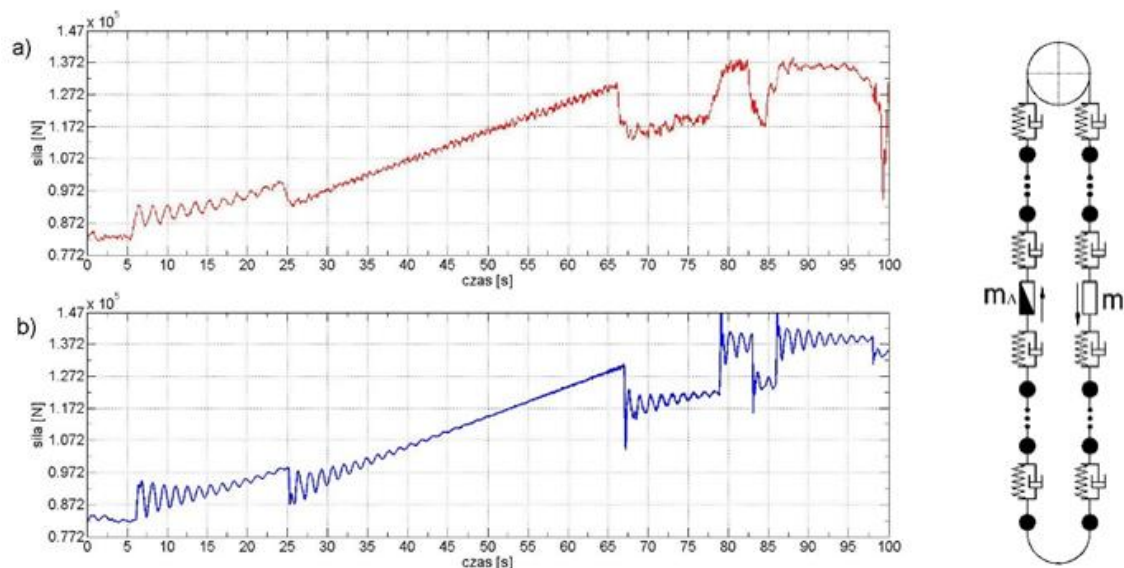
4. Definiowanie warunków brzegowych z uwzględnieniem dynamiki

Bardziej zaawansowany sposób modelowania obciążeń linopędni uwzględnia dynamiczne zmiany obciążeń linopędni, związane z drganiami wzdłużnymi liny i ich oddziaływanie na linopędnię. Niestety definiowanie warunków brzegowych w modelu MES, w postaci zmiennych w czasie obciążeń linopędni, jest zagadnieniem złożonym. Ponieważ wartość nacisku liny nośnej na linopędnię jest zmienna w czasie, ze względu na dynamiczne zmiany sił w linach nośnych jakie występują podczas pracy górniczego wyciągu szybowego. Ponadto, podczas pracy lina nośna przewija się cyklicznie przez linopędnię (lub nawija na linopędnię w przypadku bębnow nawojowych), powodując obciążanie różnych obszarów płaszcza w kolejnych chwilach czasu.

Podczas obliczeń MES zjawisko to można uwzględniać na dwa sposoby. Pierwszy polega na dyskretyzacji linopędni i liny nośnej. Między linopędnią a liną zakładane są wówczas kontaktowe warunki brzegowe. Jest to bardzo kłopotliwe z punktu widzenia obliczeń MES, ze względu na konieczność uwzględniania zjawiska kontaktowego.

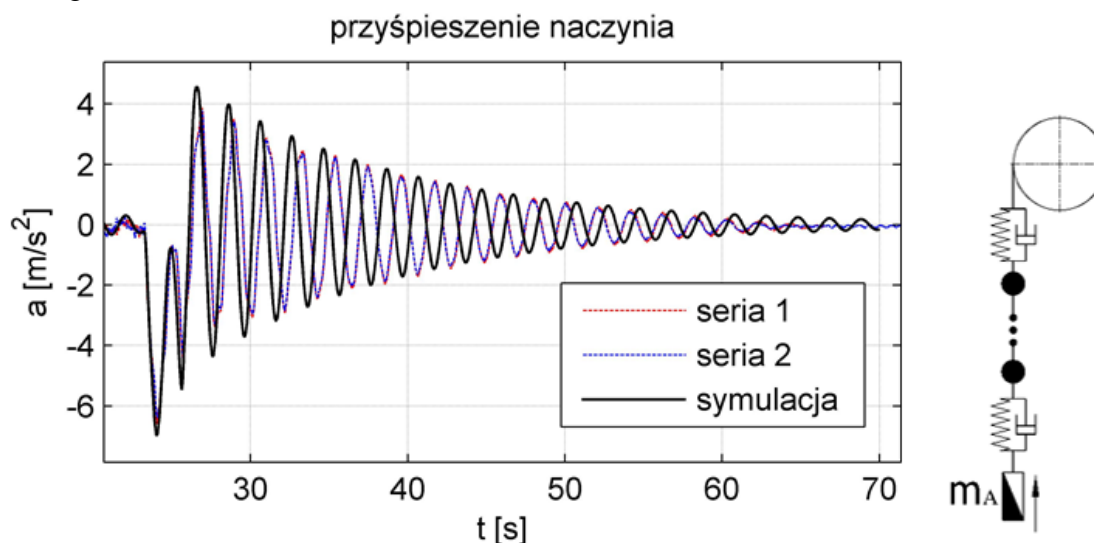
Opracowana w ITG KOMAG metoda modelowania obciążeń uwzględnia zmiany wartości sił w linach nośnych, jak i zmianę występowania obciążenia na linopędni, w odniesieniu do całego cyklu jazdy maszyny wyciągowej, bez konieczności stosowania zjawiska kontaktowego. Metoda ta wymaga zastosowania matematycznych modeli dynamicznych górniczego wyciągu szybowego [2]. Jednym z takich modeli jest opracowany w ITG KOMAG wielomasowy model górniczego wyciągu szybowego. Model składa się z dyskretnych elementów masowych linopędni i naczyń wyciągowych oraz lin nośnych i wyrównawczych, połączonych nieważkimi elementami sprężysto tłumiącymi. Model

uwzględnia zmianę parametrów sztywności i tłumienia lin nośnych oraz wyrównawczych, związanych ze zmianą długości lin. Umożliwia wyznaczenie przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń każdego dyskretnego elementu modelu oraz wartości sił w linach, w odniesieniu do całego cyklu jazdy maszyny wyciągowej. Za pomocą modelu możliwa jest analiza normalnej pracy wyciągu oraz procesu tzw. „hamowania bezpieczeństwa”. W odniesieniu do wyciągów jednokońcowych i dwukońcowych opracowany model zweryfikowano z wynikami pomiarów na obiektach rzeczywistych. Na rysunku 7 pokazano przykładowe porównanie pomiarów sił w linach nad naczyniem wyciągowym, w odniesieniu do wyciągu dwukońcowego, z wynikami symulacji wykonanej za pomocą wielomasowego modelu dynamiki górniczego wyciągu szybowego.



Rys. 7. Porównanie rozkład sił w linach nośnych nad naczyniem wyciągowym
a) na obiekcie rzeczywistym, b) w wyniku symulacji numerycznej [opracowanie własne]

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie pomiarów przyspieszeń naczynia podczas hamowania bezpieczeństwa, w odniesieniu do wyciągu jednokońcowego, z wynikami symulacji wykonanej za pomocą wielomasowego modelu dynamiki górniczego wyciągu szybowego.



Rys. 8. Jazda pełnym naczyniem do góry, hamowanie na poziomie ok. 1000 [m] [opracowanie własne]

Wyniki pomiarów przeprowadzonych na obiektach rzeczywistych oraz wyniki obliczeń numerycznych, wykonanych za pomocą modelu wielomasowego, cechuje duża zgodność, co potwierdza poprawność utworzonego modelu numerycznego. Na dokładność obliczeń numerycznych bardzo duży wpływ mają również przyjęte parametry masowe oraz sprężysto tłumiące lin. Wyznaczone wartości sił dynamicznych wykorzystano do definiowania obciążeń linopędni w modelu MES. Założono, że nacisk lin nośnych na linopędni jest zmienny w czasie oraz zmiennie jest miejsce występowania nacisku na linopędni (co wynika ze zmian obciążeń i ruchu obrotowego linopędni). W odniesieniu do nacisku średniego dla danej chwili na kącie opasania liny nośnej na linopędni, wartość nacisku $P(t)$ jest średnia i stała.

$$P(t) = \left(\frac{S_A(t) + S_B(t)}{D \cdot SzW} \right) \quad (1)$$

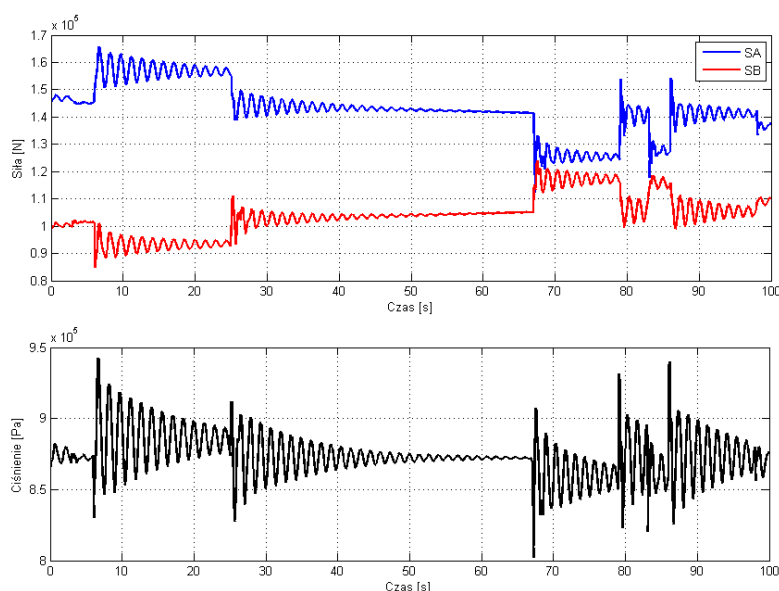
W przypadku nacisku liniowego na kącie opasania liny nośnej na linopędni wartość nacisku ma charakter liniowy i osiąga maksimum po stronie nadwagi i minimum po stronie przeciwnej.

$$P_A(t) = \left(\frac{S_A(t)}{R \cdot SzW} \right), P_B(t) = \left(\frac{S_B(t)}{R \cdot SzW} \right) \quad (2)$$

gdzie:

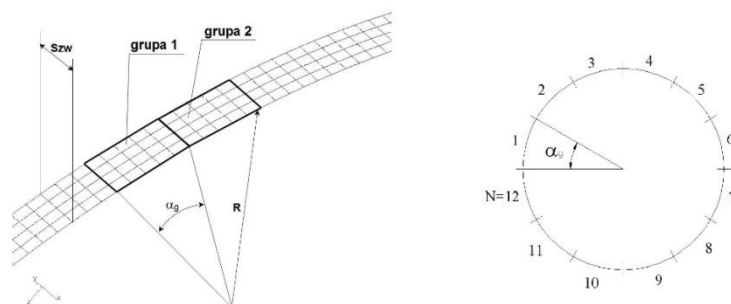
- S_A, S_B – siła w linach nośnych, N
- D – średnica lino pędni, m
- R – promień lino pędni, m
- SzW – szerokość wykładziny, m

Chwilowe wartości obciążeń linopędni $S_A(t)$ i $S_B(t)$ wyznaczono na podstawie wyników obliczeń wykonanych za pomocą wielomasowego modelu górniczego wyciągu szybowego. Na rysunku 9 przedstawiono siły w elementach sprężystych przy linopędni, wyznaczone za pomocą modelu wielomasowego, odpowiadające siłom w linach nośnych, oraz nacisk średni, jaki wywierają one na płaszcz, w odniesieniu do całego cyklu jazdy maszyny wyciągowej.



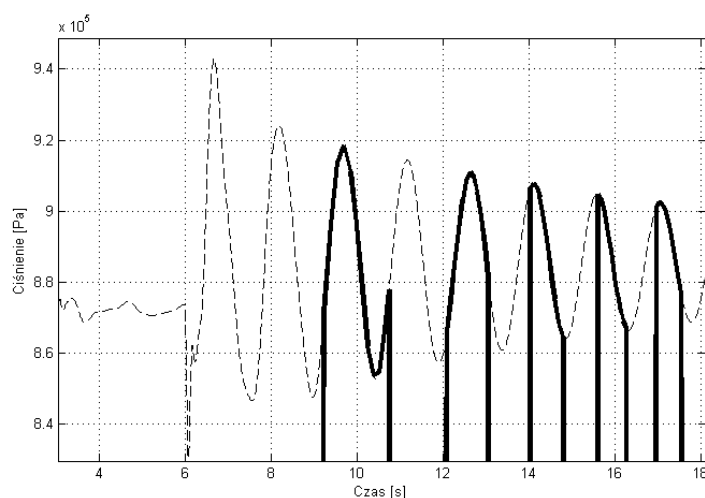
Rys. 9. Siły w linach oraz nacisk na linopędni wyznaczone za pomocą modelu wielomasowego [opracowanie własne]

Chwilowe wartości obciążeń zależne są od przyjętej dyskretyzacji obciążenia na modelu MES linopędni. Dyskretyzacja obciążenia odnosi się do miejsca styku wykładziny z płaszczem linopędni, które podzielono kątoowo na N grup (rys. 10). W skład jednej grupy wchodzi odpowiednie elementy i węzły modelu.



Rys. 10. Podział modelu MES linopędni na grupy obciążeń [opracowanie własne]

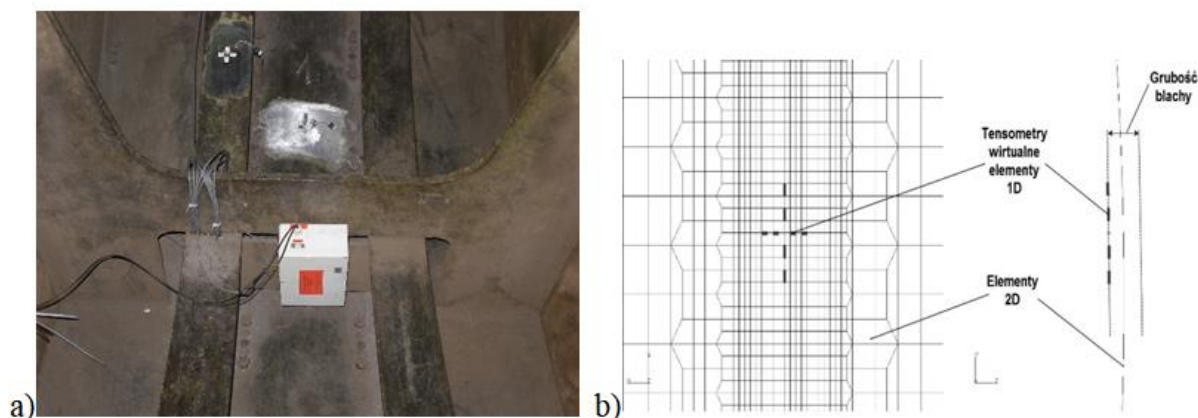
W odniesieniu do każdej z grup (od 1 do N) przypisano im odpowiednie obciążenie, uwzględniające obciążenia dynamiczne płaszcza oraz obrót linopędni. W tym celu "pocięto" ciągły wykres zmiany obciążenia, przedstawiony na rysunku 9, na odcinki. Otrzymano od 1 do N wykresów, które mają wartości niezerowe, w odniesieniu do chwil, w których dana grupa jest obciążona (nacisk lin na linopędnię), natomiast w chwilach, w których nie jest obciążona przyjmują one wartości zerowe. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowy, początkowy fragment wykresu obciążenia pojedynczej grupy. Grubą linią zaznaczono czasy, w których dana grupa pod linopędnią jest obciążona, natomiast linią cienką chwile nieobciążające danego obszaru (grupy) linopędni.



Rys. 11. Początkowy fragment obciążenia pojedynczej grupy modelu MES [opracowanie własne]

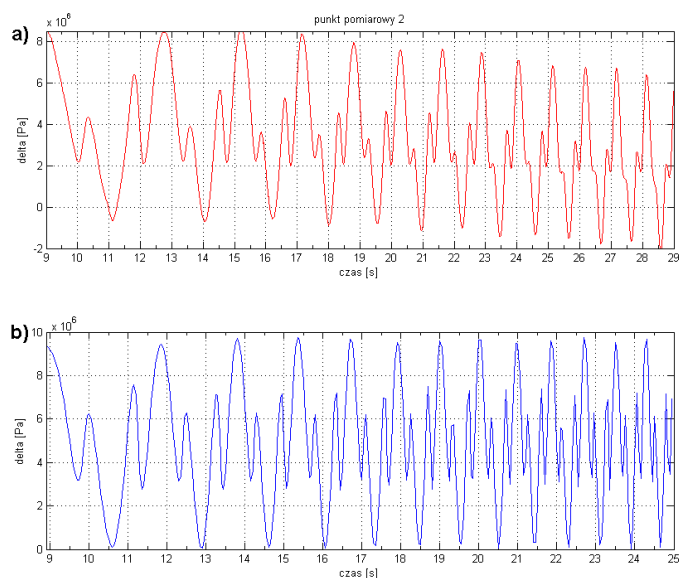
Budując podobne wykresy dla każdej z utworzonych grup otrzymano ciągłą i przemieszczającą się po linopędni wartość obciążenia płaszcza linopędni.

Przedstawiony sposób modelowania obciążeń w odniesieniu do linopędni zweryfikowano z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym (rys. 12). Podczas pomiaru rejestrowano naprężenia wyznaczone na podstawie pomiarów tensometrycznych, w wybranych miejscach linopędni, podczas normalnej pracy maszyny wyciągowej (rys. 12a). Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń numerycznych linopędni. Tensometrom pomiarowym odpowiadały zastosowane w modelu MES tensometry wirtualne, którymi były jednowymiarowe elementy belkowe typu beam (rys. 12b).



Rys. 12. Pomiar naprężeń lino pędni: a) na obiekcie rzeczywistym, b) na modelu MES [opracowanie własne]

Porównanie zmierzonych wartości naprężeń na obiekcie rzeczywistym i wyznaczonych w wyniku obliczeń MES, w odniesieniu do przykładowego punktu pomiarowego, przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. a) Naprężenia zmierzone na obiekcie rzeczywistym, b) naprężenia uzyskane w wyniku obliczeń MES [opracowanie własne]

Na rysunku 13 przedstawiono charakter zmian i wartości naprężeń zmierzone na obiekcie rzeczywistym, w porównaniu z uzyskanymi wyniku obliczeń MES. Widać dużą zgodność, co dowodzi o poprawności przyjętego sposobu modelowania linopędni, zarówno pod względem budowy siatki elementów skończonych, jak i przyjętego sposobu modelowania warunków brzegowych. Uzyskane wyniki obliczeń dynamicznych MES linopędni mogą być wykorzystane, jako dane wejściowe do dalszych analiz, np. zmęzeniowych.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z budową modeli obliczeniowych linopędni maszyn wyciągowych, z zastosowaniem metody elementów skończonych MES. Zaprezentowano przykładowe wyniki, opracowanej w ITG KOMAG,

metody umożliwiające powiązanie wyników analizy wykonanej za pomocą modelu dynamiki górniczego wyciągu szybowego z analizą wytrzymałościową MES konstrukcji linopędni. Takie powiązanie może stanowić podstawę do prowadzenia analiz zmęczeniowych na podstawie podstawowych informacji związanych z parametrami górniczego wyciągu szybowego takimi jak: masy naczyń, masa transportowanego ładunku, głębokość ciągnięcia, parametry liny lub lin nośnych oraz parametry ruchowe: prędkość ruchu, przyspieszenia przy rozruchu i opóźnienia podczas zwalniania. Umiejętność prognozowania obciążeń konstrukcji w trakcie ruchu, na podstawie podstawowych informacji o obiekcie, ma istotne znaczenie ze względu na różnorodność górniczych wyciągów szybowych, i w większości przypadków, jednostkowego wykonania maszyny wyciągowej dedykowanej pod konkretne oczekiwania zamawiającego.

Przedstawione w artykule wyniki obliczeń numerycznych MES są wynikiem prac badawczo – rozwojowych prowadzonych przez ITG KOMAG. Przedstawione obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej (Calculations were carried out at the Academic Computer Centre in Gdańsk).

Literatura

- [1] Bućko St.: Analiza wytrzymałościowa nowej konstrukcji płytowo-powłokowej na przykładzie wielolinowego bębna pędnego, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Mechanika nr 86, Kraków 2001
- [2] Tejszerska D., Turewicz K.: Obliczenia wytrzymałościowe linopędni maszyn wyciągowych z uwzględnieniem wybranych obciążeń dynamicznych, Prace Naukowe – Monografie ITG KOMAG nr 30, Gliwice 2009
- [3] Tejszerska D.: Modelowanie sprzężonych drgań poprzeczno-wzdłużnych układu wyciągowego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika nr 124, Gliwice 1995
- [4] Tejszerska D., Turewicz K.: Modelowanie lin pędni obciążonej dynamicznie. W: Materiały Konferencyjne NT „Transport szybowy”, Zakopane 2006
- [5] Tejszerska D., Turewicz K., Helmrich P., Niedworok A.: Modelowanie i badania weryfikacyjne elementów górniczego wyciągu szybowego", ZNT Katedry Transportu Linowego AGH nr 41, Kraków 2007
- [6] Turewicz K., Tejszerska D.: Analiza wytrzymałościowa linopędni – pomiary naprężeń na obiekcie i weryfikacja modelu MES. W: Mat. Konf. NT „Transport szybowy”, Szczyrk 2007