

## SIMULATIONS AND ANALYSIS OF VIRTUAL COMPUTER MODELS IN APPLICATION TO SERIES OF TYPES OF AGRICULTURAL ROLLERS

### Summary

*In the paper presented is the method of strength and dynamic analysis of agricultural rollers. Presented are there also the selected forms of showing the simulation results, that is stresses, forces displacements etc. The practical method of carrying out the computer simulations is as well shown. The descriptions of these methods are extensive enough to show the aspects of costs and time reductions when carrying out these types of analyses.*

## SYMULACJE I OBLICZENIA KOMPUTEROWE MODELI WIRTUALNYCH TYPOSZEREGU WAŁÓW UPRAWOWYCH

### Streszczenie

*W artykule zaprezentowano sposób przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej i dynamicznej konstrukcji typoszerogu wałów uprawowych. Zaprezentowano także w postaci graficznej wybrane formy przedstawiania wyników symulacji: mapy naprężeń, rozkład sił, wykresy itp. W artykule zostało obszernie wyjaśnione praktyczne podejście do tego typu obliczeń, ze zwróceniem szczególnej uwagi na możliwości skrócenia ich czasu i kosztów.*

### 1. Wstęp

Obliczenia i symulacje dotyczyły konstrukcji wałów uprawowych o szerokościach roboczych 9, 12 i 15 m. Prezentowane zagadnienie obejmuje złożony proces obliczeń konstrukcji, z jakim każdy inżynier–projektant ma do czynienia w trakcie tworzenia nowych maszyn i urządzeń. W artykule zaprezentowano taki proces na przykładzie zaawansowanej konstrukcyjnie maszyny rolniczej. Do obliczeń symulacyjnych wykorzystano system obliczeniowy I-DEAS.

W przypadku maszyn rolniczych, oprócz typowych kryteriów oceny stanu technicznego (wytrzymałościowych i funkcjonalnych), duży nacisk stawia się na uwzględnienie nietypowych i trudnych do przewidzenia przeciążeń przypadkowych, związanych z charakterem środowiska pracy maszyny oraz przeciążeń wynikających z przypadkowych sytuacji eksploatacyjnych związanych z czynnikiem ludzkim. O ile charakterystyka środowiska pracy jest w większym lub mniejszym stopniu przewidywalna, o tyle zachowania ludzkie i związane z tym błędne decyzje eksploatacyjne są już mniej przewidywalne. Toteż dokonywanie oceny przydatności maszyny do eksploatacji, pod kątem wytrzymałościowym, związane jest ze stosowaniem dużych współczynników bezpieczeństwa lub wymaga dużej pewności przeprowadzanych obliczeń. Z tego względu całkiem uzasadnione staje się stosowanie do analiz konstrukcji maszyn rolniczych zaawansowanych systemów komputerowych.

Analityczne obliczenia inżynierskie, przeprowadzane na etapie projektowania, są stosunkowo proste i szybkie, ale ilość dostarczanych informacji o konstrukcji jest uboga i w obecnej sytuacji rynkowej często niedostateczna. Obliczenia takie nie są w stanie dostarczyć np. pełnych informacji o rozkładzie naprężeń w konstrukcji, a zwłaszcza ich lokalnych koncentracji. Informacje takie są bardzo przydatne i wręcz niezbędne dla przeprowadzenia optymalizacji konstrukcji, której celem jest uzyskanie pożądanego wytrzymałości

ści konstrukcji, przy minimum użytego materiału do budowy maszyny. Obliczenia analityczne wymagają ponadto przeprowadzenia badań eksperymentalnych, nieraz bardzo długotrwałych, w trakcie których często wymagane są przekonstruowania maszyny. W przypadku zastosowania wytrzymałościowych analiz komputerowych, w oparciu o metodę elementów skończonych, badania prototypu zostają ograniczone do minimum i w zasadzie mają jedynie charakter sprawdzający.

Oszczędność czasu potrzebnego do zaprojektowania i obliczeń typoszerogu maszyn można uzyskać przez wykorzystanie ich podobieństwa geometrycznego i obciążeniowego. Znając wyniki z symulacji obciążenia pojedynczej maszyny oraz wykorzystując zależności pomiędzy wymiarami konstrukcji, obciążeniem i wynikami analiz wytrzymałościowych można przewidywać stan wyężenia pozostałych konstrukcji w typoszerogu maszyn. Podejście takie wykorzystano podczas pracy nad wałami uprawowymi. Wał 12 m wymagał przeprowadzenia kilkudziesięciu przebiegów symulacji, w efekcie których uzyskano optymalną konstrukcję maszyny. Wykorzystując wyniki z analiz wału 12 m, na podstawie podobieństwa konstrukcji, zaprojektowano kształt i wymiary konstrukcji dla kolejnych wałów, tj. 9 i 15 m. W efekcie przeprowadzone obliczenia wytrzymałościowe tych wałów miały jedynie charakter sprawdzający i nie zachodziła konieczność wprowadzania zmian konstrukcyjnych.

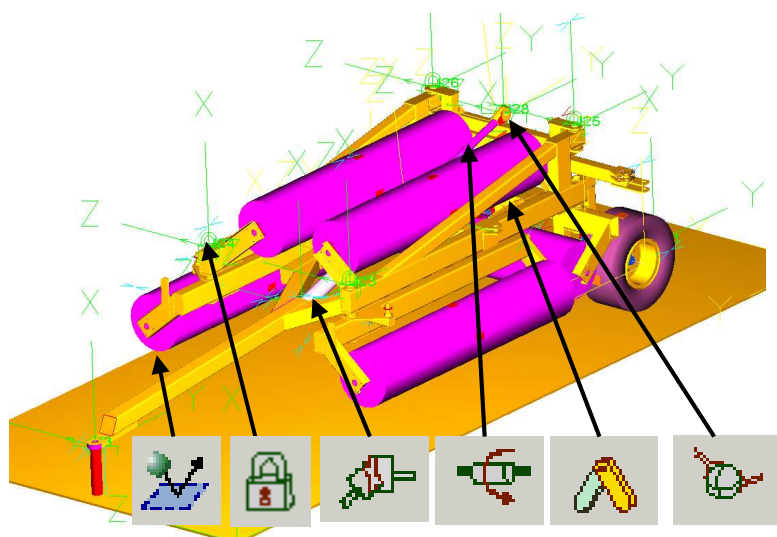
### 2. Charakterystyka konstrukcji

Konstrukcja analizowanych wałów uprawowych składa się z sześciu głównych zespołów roboczych (rys. 1):

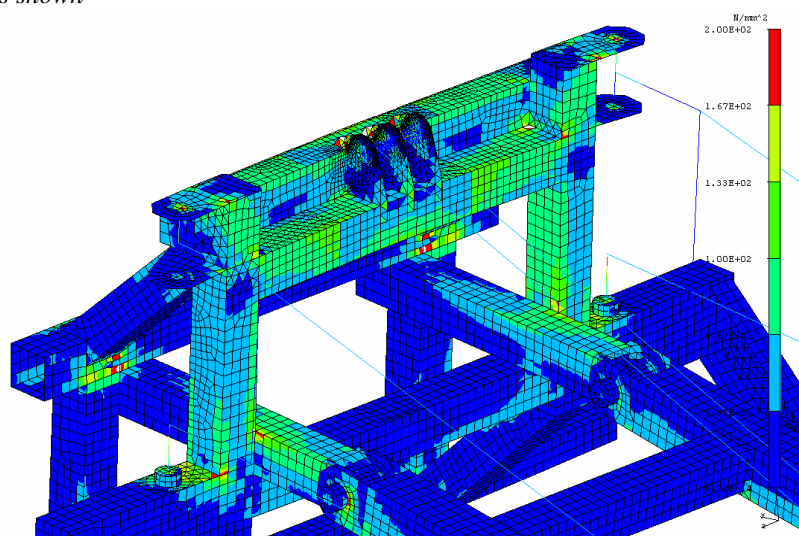
- dyszla,
- wózka jezdnej,
- dwóch ramion bocznych wewnętrznych w kształcie trójkąta,
- dwóch ramion bocznych zewnętrznych.



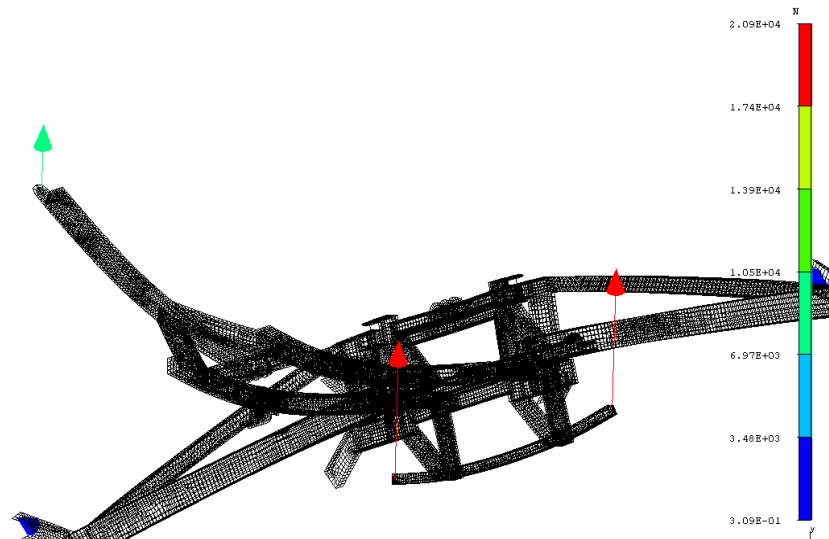
Rys. 1. Wał uprawowy o szerokości 12 m  
 Fig. 1. The 12-meter agricultural roller



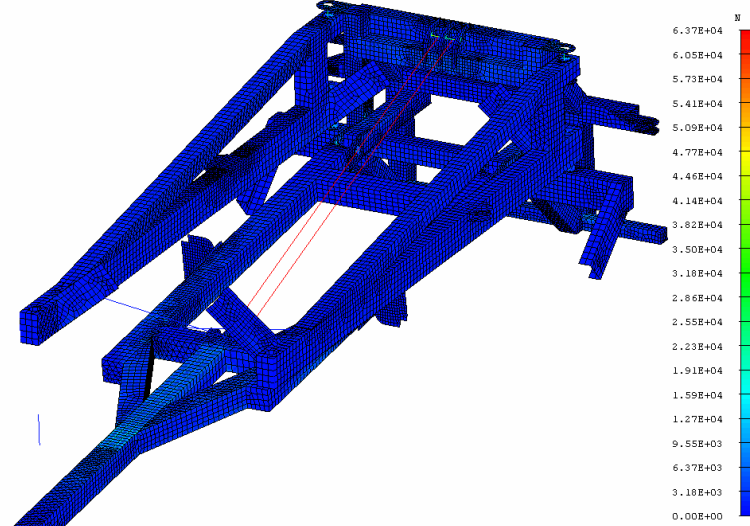
Rys. 2. Model konstrukcyjny wału 12 m zastosowany w symulacjach kinematycznych z zaznaczeniem zastosowanych rodzajów więzów kinematycznych, np.: kontakt kula/płaszczyzna, połączenie sztywne, przegub krzyżakowy, więz przesuwny, więz obrotowy, przegub kulowy  
 Fig. 2. The constructional model of 12 m-roller applied to the cinematic simulations. In the figure the kinematic joints adapted in the model was shown



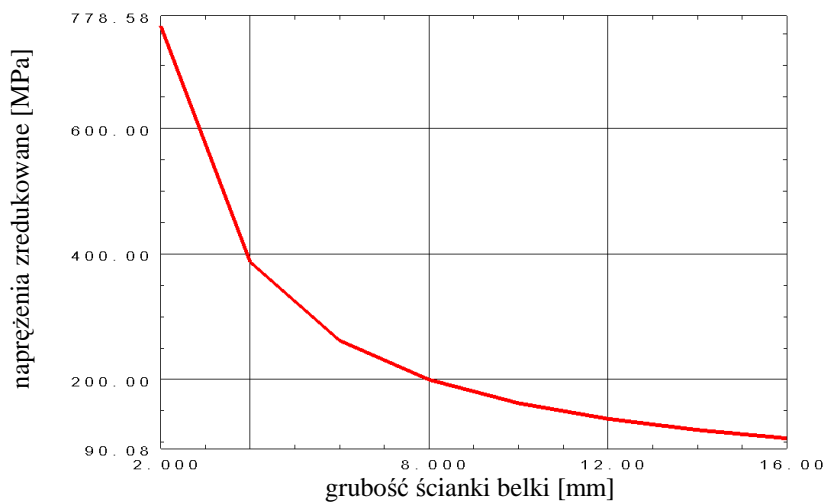
Rys. 3. Obliczenia MES – wyznaczenie naprężeń zredukowanych  
 Fig. 3. FEM simulations – Von Misses stresses



Rys. 4. Obliczenia MES – reakcje  
 Fig. 4. FEM simulations – reactions



Rys. 5. Obliczenia MES – wyznaczenie sił na siłownikach centralnych  
 Fig. 5. FEM simulations – forces in central cylinders



Rys. 6. Obliczenia MES, optymalizacja matematyczna – wykres zależności naprężeń zredukowanych od grubości ścianki belki dla wybranej belki w dyszlu maszyny  
 Fig. 6. FEM simulations, optimization – Von Misses stresses vs thickness of beam sheet

Zespoły połączone są w jedną całość za pomocą sworzni, a ich ruch sterowany jest siłownikami hydraulicznymi i współpracującym z nimi układem cięgien mechanicznych. Do budowy zespołów wykorzystano kształtowniki hutnicze o profilu prostokątnym zamkniętym oraz blachy o różnych grubościach. Na ramionach bocznych i na wózku jezdnym podwieszono sekcje uprawowe (zespoły pierścieni wałujących), osadzone na wspólnych osiach, łożyskowanych w zespołach łożyskowych (łożysko + obudowa).

### 3. Obliczenia

Obliczenia konstrukcji wału 12 m podzielono na trzy etapy. Pierwszy etap obejmował wstępne, uproszczone obliczenia inżynierskie metodami analitycznymi. W ramach tych obliczeń wyznaczono siły w węzłach kinematycznych oraz siły przenoszone przez siłowniki hydrauliczne. Wyniki tych obliczeń porównywano następnie z wynikami symulacji komputerowych, co pozwoliło na bieżącą kontrolę poprawności tych symulacji.

Etap drugi dotyczył symulacji kinematycznych i zrealizowany został na modelach obliczeniowych konstrukcyjnych (rys. 2). W ich efekcie uzyskano informacje o wielkości sił działających w węzłach kinetycznych i siłownikach hydraulicznych.

Etap trzeci obejmował symulacje wytrzymałościowe bazujące na metodzie elementów skończonych, przeprowadzone na modelach obliczeniowych powierzchniowych, zdyskretyzowanych siatką elementów skończonych.

Model obliczeniowy kinematyczny bazował na modelu konstrukcyjnym, tworzonym równoległe z obliczeniami w ramach projektowania konstrukcji. Model ten wykonywany wirtualnie w skali 1:1 umożliwiał na bieżąco dobór wymiarów i kształtu konstrukcji, był zatem nośnikiem informacji o cechach funkcjonalnych i mechanicznych konstrukcji. Przypisanie własności materiałowych do modelu objętościowego umożliwiło obliczenie przez system masy konstrukcji oraz innych parametrów mechanicznych, potrzebnych ze względu na analizy kinematyczne. Charakterystyczną cechą modelu obliczeniowego kinematycznego jest nadawanie wiązań pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcji. Zadaniem takich wiązań jest odbieranie odpowiednich stopni swobody pomiędzy elementami złożenia tak, aby uzyskać pożądane efekty zachowań kinematycznych i dynamicznych. Wykorzystane w modelu wałów uprawowych więzy przedstawiono na rys. 3, wraz z zaznaczeniem przykładowych miejsc ich zastosowania.

Symulacje wytrzymałościowe przeprowadzono w oparciu o metodę elementów skończonych (MES) na bazie przygotowanego docelowo modelu powierzchniowego, z naniesioną na niego siatką elementów skończonych płytowych typu THIN SHELL (rys. 3-5). W ramach analiz wytrzymałościowych zbadano rozkład i wartości naprężeń w konstrukcji (rys. 3), zlokalizowano słabe miejsca i odczytano wielkości reakcji na kołach i zaczepie dyszla (rys. 4) oraz siły w siłownikach hydraulicznych (rys. 5). W trakcie prowadzenia analiz wytrzymałościowych zoptymalizowano ostatecznie kształt i wymiary poszczególnych zespołów wału uprawowego, wykorzystując do tego również specjalizowane narzędzia do optymalizacji matematycznej (rys. 6).

Obciążenie konstrukcji w symulacjach wytrzymałościowych pochodziło przede wszystkim od ciężaru własnego konstrukcji, zaimplementowanego w postaci globalnego przyspieszenia grawitacyjnego ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ) działającego

na model obliczeniowy. Nadwyżki dynamiczne i przeciążenia przypadkowe uwzględniono przy ocenie stanu wyężenia konstrukcji, przyjmując odpowiedni poziom naprężeń dopuszczalnych.

Poziom naprężenie dopuszczalnych przyjęto w odniesieniu do granicy plastyczności  $Re=235 \text{ MPa}$ . Wartość  $Re$  zmniejszona została jedynie o wartość nadwyżek dynamicznych, czyli o ok. 40 %, przez co uzyskano bezpieczny poziom naprężeń równy  $ke=140 \text{ MPa}$ . Wpływ osłabienia materiału w miejscach występowania spawów pominięto. Takie podejście w wyznaczaniu naprężeń dopuszczalnych w analizie MES można uznać za słuszne, ponieważ obliczenia te są zbliżone do metody tensometrycznej na modelach rzeczywistych. Są to informacje na tyle wiarygodne i pewne, a ponadto dokładne, że w większości konstrukcji maszyn rolniczych można nie uwzględniać już osobno współczynnika bezpieczeństwa. Wnioski te oparte są na wieloletnich badaniach konstrukcji rolniczych przeprowadzanych w PIMR w Poznaniu, w ramach których obliczone metodą elementów skończonych konstrukcje sprawdza się eksperymentalnie metodami tensometrycznymi. Wyniki badań potwierdzają słuszność opisanego podejścia w analizach wyników MES i przy ustalaniu współczynników bezpieczeństwa. W konstrukcjach, co do których istnieje niepewność poprawności zaimplementowania obciążenia w modelu obliczeniowym, lub od których wymaga się dużego bezpieczeństwa użytkownika, ze względu np. na zagrożenie dla zdrowia lub życia człowieka, współczynniki bezpieczeństwa powinny być stosowane i dobierane zależnie od potrzeb.

### 4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych obliczeń i symulacji komputerowych uzyskano bogaty zbiór wyników w postaci danych liczbowych i rysunków rozkładu naprężeń w konstrukcji. Największą jednak korzyścią było zoptymalizowanie konstrukcji w aspekcie wytrzymałościowym. Dzięki zastosowaniu opisanych technik komputerowej analizy stało się możliwe wypracowanie projektu maszyny rolniczej o wysokiej jakości. Badania wykonanego prototypu potwierdziły poprawność uzyskanych wyników symulacyjnych, a sam prototyp nie wymagał już dodatkowych poprawek wynikających z błędów konstrukcyjnych i obliczeniowych.

Tab. 1. Porównanie wybranych wyników wyznaczania sił z różnych typów symulacji dla wału 12 m

Tab. 3. Selected results of calculations (forces and reactions) for featured types of analysis (12m-roller)

	Pozycja wypręgu		
	Obliczenia analityczne	Obliczenia kinematyczne	Obliczenia MES
Sumaryczna siła na siłownikach centralnych	175 000 N	185 000 N	208 000 N
Reakcja na kołach (pojedyncza)	15 000 N	22 000 N	19 000 N
Reakcja na końcu dyszla	19 000 N	18 500 N	20 000 N

Dla porównania poszczególnych analiz inżynierskich, tj. obliczeń analitycznych i symulacji komputerowych kinematycznych i wytrzymałościowych, zestawiono w postaci tabeli (tab. 1) wybrane wyniki wyznaczania sił w elementach konstrukcji wałów uprawowych. Wyniki te w dużym stopniu pokrywają się ze sobą, wykazując tym samym, że w niektórych zastosowaniach, jak przykładowe wyznaczanie sił, opisane metody są zamiennie. Dodać jednak należy, że poprawność uzyskania wyników zależy od poprawności przygotowania modelu obliczeniowego i przyjętych uproszczeń. Taka ocena jakościowa modelu często jest utrudniona, stąd możliwość przebadania konstrukcji wielowariantowo zwiększa pewność wyników i umożliwia ich weryfikację.

Każdy z modeli obliczeniowych, czy to analityczny, czy numeryczny, opiera się na pewnych uproszczeniach. Najdokładniejsze są symulacje komputerowe, zwłaszcza w przypadku konstrukcji o dużym skomplikowaniu. Symulacje takie są czasochłonne, jednak stają się opłacalne w miarę komplikacji badanej maszyny. Raz przygotowany model można poddawać wielorakim analizom, których jakość i ciężar gatunkowy są nieporównywalnie większe od przeprowadzonych tradycyjną analizą inżynierską.

#### Literatura

- [1] Rutkowski J., Szczepaniak J. Modelowanie węzłów kinematycznych w wytrzymałościowej analizie dynamicznej konstrukcji wybranej maszyny rolniczej. *Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych*, nr 48 (4), Poznań 2003,
- [2] Rutkowski J., Szczepaniak J. Optymalizacja numeryczna wybranego elementu konstrukcyjnego ramienia sprzęgowego wału zawieszonoego z przodu ciągnika. *Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych*, nr 48 (4), Poznań 2003,
- [3] Szczepaniak J. i in.: Typoszereg wałów uprawowych o szerokościach roboczych 9, 12 i 15 metrów. *Zad. 2, 3, 4, 7 i 8. PIMR*, Poznań 2004,
- [4] Pawłowski T., Rutkowski J., Szczepaniak J., Wietrzyk M. Zgłoszenie patentowe P.368256 z dn. 31.05.2004,
- [5] Kromulski J., Mac J., Pawłowski T., Szczepaniak J. Metoda identyfikacji eksploatacyjnej postaci drgań dla potrzeb weryfikacji i walidacji modeli maszyn rolniczych. *Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej*, Zeszyt nr 23, str. 245 – 252, Gliwice,
- [6] Zienkiewicz O. C. *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1972,
- [7] Lawry M. H. *I-DEAS Master Series. Student guide*. SDRC, Milford, USA, 2000,
- [8] I-DEAS. *Help library bookshelf. Tutorials*. Pliki pomocy do systemu I-DEAS.