

*Tadeusz Pawłowski, Ryszard Grzechowiak, Janusz Rutkowski, Jan Szczepaniak  
Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu*

## **MODELE OBLICZENIOWE W PROCESIE PROJEKTOWANIA I WERYFIKACJI KONSTRUKCJI TYPOSZEREGU WAŁÓW UPRAWOWYCH O SZEROKOŚCIACH ROBOCZYCH 9, 12 I 15 M**

### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowano wybrane etapy realizacji procesu projektowo-wdrożeniowego wału uprawowego o szerokości roboczej od 9 do 15 m. Na poszczególnych etapach realizacji projektu wykorzystywano nowoczesne metody analiz komputerowych, począwszy od modelowania zjawisk kinematycznych i dynamicznych, a skończywszy na symulacjach wytrzymałościowych dla celów optymalizacji konstrukcji. Wykorzystano do tego celu systemy komputerowe I-DEAS i ADAMS (analizy na etapie projektu) oraz oprogramowanie Matlab (analizy wyników badań eksperymentalnych prototypu). W konstrukcji wałów zastosowano nowatorski system rozkładania wału z pozycji transportowej do pozycji roboczej, którego wybrane elementy konstrukcyjne zgłoszono do ochrony patentowej [Pawłowski i in. 2004].

**Słowa kluczowe:** maszyny rolnicze, projektowanie, modelowanie, badania

### **Wstęp i cel pracy**

Prowadzenie obliczeń na etapie projektu maszyny rolniczej wymaga wielokrotnych i wielorakich analiz. Z wielu możliwych do wykorzystania sposobów realizacji takich obliczeń wybiera się najczęściej tradycyjne, analityczne obliczenia inżynierskie oraz różnorodne symulacje komputerowe. Te ostatnie obecnie są praktycznie nieodzownym narzędziem pracy współczesnego inżyniera projektanta.

Celem artykułu jest przedstawienie etapów projektowania i badania konstrukcji wałów uprawowych o dużych szerokościach roboczych na przykładzie wykorzystanych w tym celu modeli obliczeniowych. Wśród modeli wyróżniono trzy podstawowe: analityczny (strukturalny), kinematyczny (bryłowy) i model MES. W artykule ograniczono się jedynie do pokazania i omówienia cech poszczególnych modeli, nie podając szczegółów przeprowadzanych obliczeń i symulacji. W końcowej fazie projektu przeprowadzono także badania polowe na prototypie, których wyniki wykorzystano do weryfikacji modeli obliczeniowych.

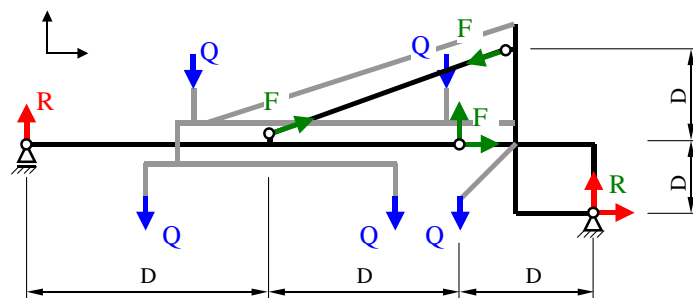
Przebieg symulacji i obliczeń projektowanych wałów uprawowych zaprezentowano na dwóch konkretnych przykładach: wyznaczania sił w siłownikach centralnych i wyznaczania naprężeń zredukowanych w belce wózka jezdnego.

## Opis konstrukcji wałów

Konstrukcja analizowanych wałów uprawowych składa się z sześciu głównych zespołów roboczych: dyszla, wózka jezdnego, dwóch ramion bocznych wewnętrznych w kształcie trójkąta, dwóch ramion bocznych zewnętrznych. Zespoły połączone są w jedną całość za pomocą połączeń sworzniowych. Ruch zespołów sterowany jest siłownikami hydraulicznymi i układem cięgien mechanicznych. Na ramionach bocznych i na wózku jezdnym podwieszono sekcje uprawowe (zespoły pierścieni wałujących), osadzone na wspólnych osiach, łożyskowane w zespołach łożyskowych (łożysko + obudowa) [Szczepaniak i in. 2004].

## Model analityczny

Model analityczny (rys. 1) znajduje swoje zastosowanie w początkowej fazie projektu, po sformułowaniu założeń. Charakteryzuje się on schematycznym, strukturalnym ujęciem konstrukcji, jej wymiarów i działających obciążeń. Cechuje się więc znaczną łatwością przebudowy i niewielką liczbą wymaganych danych początkowych. Z tego względu pozwala w prosty sposób analizować konstrukcję i zdobywać informacje na drodze prostych obliczeń, potrzebne w kolejnych etapach projektu.



Rys. 1. Schemat konstrukcji wału będący podstawą modelu analitycznego  
Fig. 1. Roller structure diagram as a base of analytical model

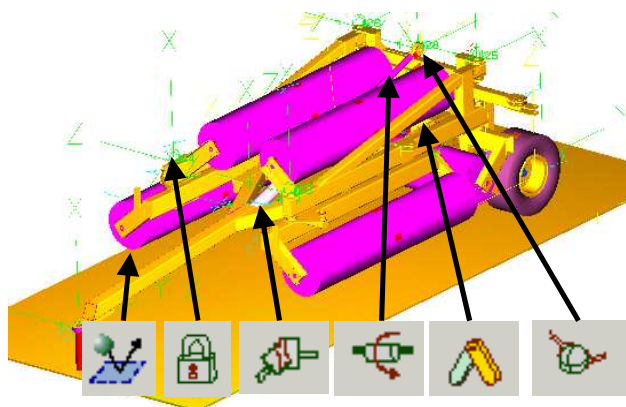
W przypadku wałów uprawowych wykorzystano taki model m.in.: do wstępnego ustalenia podstawowych wymiarów konstrukcji, obliczenia wartości reakcji na dyszlu i kołach a przede wszystkim do wyznaczenia sił działających w poszcze-

gólnych węzłach kinematycznych maszyny, w tym sił i momentów tarcia. Dzięki takim obliczeniom był możliwy wstępny dobór siłowników i ogumienia kół jezdnych. Po przeprowadzeniu bardziej szczegółowych obliczeń możliwe było także wstępne wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych wybranych elementów konstrukcji, np. sworzni i cięgien w układzie otwierania ramion bocznych.

### Model kinematyczny

W miarę rozwoju projektu i wykorzystywania systemów komputerowych 3D powstają stopniowo modele wirtualne maszyny. Stwarzają one nowe możliwości dla prowadzenia obliczeń konstrukcji, np. w kierunku wyznaczania parametrów kinematycznych i dynamicznych.

Modele kinematyczne (rys. 2) można budować na podstawie modeli 3D projektowanej maszyny. Zawierają one strukturalny zapis wiązań elementów konstrukcji, koniecznych do implementacji własności mechanicznych oraz obciążeń. Wykonuje się także modele zawierające bardzo uproszczoną geometrię, gdyż w modelu kinematycznym nie jest istotne odwzorowanie dokładnego kształtu i liczby części tworzących konstrukcję (choć jest to możliwe), a jedynie zachowanie ich fizycznego i mechanicznego sensu. Ważne jest więc zachowanie charakterystycznych wymiarów, mas, położenia środków ciężkości i momentów bezwładności [1994].



Rys. 2. Schemat modelu do analiz kinematycznych i dynamicznych. Na dole przedstawiono symbole stosowanych więzów kinematycznych

Fig. 2. Diagram of model for kinematical and dynamic analysis. Symbols of using kinematic constraints are presented below

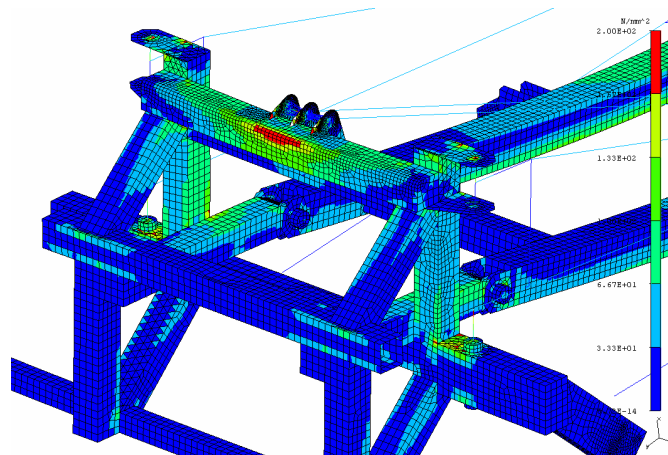
Zaletą obliczeń kinematycznych jest możliwość analizy ruchu maszyny z włączeniem szczegółowej obserwacji parametrów ruchu takich jak: przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia. Możliwe jest także obliczanie sił w węzłach. Wyniki analiz dostępne są w postaci animacji ruchu maszyny oraz wykresów obserwowanych parametrów.

## **Model MES**

Następnym etapem prac projektowych jest zbadanie zjawisk występujących wewnątrz elementów konstrukcji i ich wpływu na pracę maszyny. W tym celu wykorzystywane są modele MES. Pozwalają one analizować przemieszczenia, naprężenia i siły zarówno w ujęciu globalnym jak i lokalnym, z uwzględnieniem sztywności konstrukcji [Lawry 2000]. Omawiając modele MES należy zwrócić uwagę także na ich wady, a więc: pracochłonność przygotowania modeli i trudności dokładnego odwzorowania rzeczywistych warunków pracy maszyny. Pracochłonność wynika m. in. z konieczności przebudowy modeli w związku z wprowadzaniem zmian konstrukcyjnych lub aktualizacji warunków brzegowych dla każdego nowego przypadku obciążenia. Jakość i dokładność otrzymywanych wyników MES zależy w znacznym stopniu od sposobu odwzorowania warunków rzeczywistych pracy maszyny. Przygotowanie modelu oraz implementacja obciążeń i utwierdzeń wymaga więc dużej staranności. Szczególnie ważne i następczące wiele problemów jest odwzorowanie naturalnej sztywności zespołów (złóżek) konstrukcji [Rutkowski i in. 2003].

Zaletą obliczeń MES jest możliwość przeprowadzenia optymalizacji konstrukcji. Oprócz operacji polegających na przebudowie modelu obliczeniowego, dostępne są w systemach komputerowych specjalizowane narzędzia matematyczne do parametrycznej optymalizacji konstrukcji. W efekcie możliwe jest np. zbadanie wrażliwości konstrukcji na zmianę wybranych parametrów i na ich podstawie dokonanie zmian konstrukcyjnych. Obliczenia optymalizacyjne są jednak czasochłonne, co jest ich podstawową wadą.

W obliczeniach MES projektowanego wału uprawowego wyznaczano m.in. naprężenia zredukowane von Misesa (rys. 3), przemieszczenia, reakcje oraz siły w elementach (siłowniki centralne). Przeciężenia dynamiczne uwzględniano przez dodawanie odpowiednich współczynników. Specjalistyczna analiza dynamiczna następcza wiele problemów modelowych i korzysta się z niej rzadko. Ponadto w konstrukcjach o złożonej strukturze dokładność takich obliczeń jest nieduża, co wynika z ograniczonych możliwości prawidłowego odwzorowania w modelu zjawisk dynamicznych, a szczególnie wymuszeń.



Rys. 3. Model MES wału uprawowego: mapa naprężeń zredukowanych von Misesa  
Fig. 3. Agricultural roller FEM model: von Mises stress map

### Badania na obiekcie rzeczywistym

Analizy rzeczywistej konstrukcji wałów obejmowały badania eksperymentalne prototypu wału uprawowego 12 m (rys. 4), zbudowanego w oparciu o przeprowadzone obliczenia i symulacje. W ramach weryfikacji doświadczalnej metodami pośrednimi przeprowadzono pomiary naprężeń zredukowanych oraz sił w siłowniach hydraulicznych.

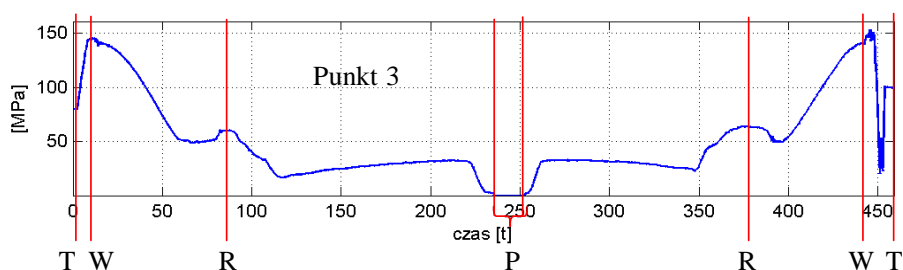


Rys. 4. Wał uprawowy o szerokości 12 m  
Fig. 4. Agricultural roller 12 m width

Pomiary naprężeń wykonano za pomocą tensometrów (rys. 5) oraz specjalistycznej aparatury do akwizycji danych. Aby otrzymać wyniki pomiarów w czytelnej i dogodnej postaci uzyskane sygnały są przeliczane za pomocą oprogramowania do analizy danych i prezentowane w formie wykresów (rys. 6) [Szczepaniak i in. 2004; Kromulski i in. 2004].



Rys. 5. Tensometry naklejone na belce wózka jezdnego  
Fig. 5. Strain gauges stick on roller chassis beam



Rys. 6. Zmiany naprężeń w belce wózka jezdnego podczas rozkładania i składania wału  
Fig. 6. Stress value in roller chassis beam during roller unfolding and folding

## Wyniki analiz i badań

Podsumowując wyniki pomiarów i analiz zebrano niektóre z nich w postaci tabeli (tab. 1). Wyniki te w dużym stopniu pokrywają się ze sobą, a możliwość wielowariantowego przebadania konstrukcji zwiększa ich pewność i umożliwia wzajemne

sprawdzenie. Występuje duże podobieństwo uzyskanych na drodze obliczeń wyników, szczególnie w przypadku naprężeń zredukowanych. Przy analizie tak złożonych obiektów, jak maszyny rolnicze uzyskanie zbieżności na poziomie 20 – 30 % jest wynikiem zadowalającym.

Na jakość wyników składa się bowiem szereg aspektów, takich jak np.: uproszczenia obliczeniowe i niemożność dokładnego odwzorowania w modelach własności obiektów oraz obciążeń eksploatacyjnych. Czynniki te zakłócają proces obliczeniowy i są źródłem rozbieżności wyników. Stąd uzyskane wyniki można uznać za dobre. W maszynach rolniczych stosuje się ponadto odpowiednie współczynniki bezpieczeństwa, co pokrywa w pewnym stopniu niepewność obliczeniową.

*Tabela 1. Porównanie wybranych wyników uzyskanych w różnych etapach analiz (wał 12 m)*

*Table 1. Comparison of chosen results obtained from various analysis stage (roller 12 m)*

Metoda \ Parametr	Siła w siłowniku centralnym (sumaryczna) [N]	Naprężenia zredukowane w belce wózka jezdnego [MPa]
Obliczenia analityczne	175000	nie liczono
Analiza kinematyczne	185000	-
Analiza MES	208000	133 - 167
Badania polowe	226000	150

Pomimo czasochłonności i dużych kosztów symulacji nakłady na obliczenia szybko zwracają się na etapie prototypowania i wdrażania zaprojektowanej maszyny do produkcji. Raz przygotowany model można poddawać wielorakim analizom, których jakość i ciężar gatunkowy są nieporównywalnie większe od tradycyjnej analizy inżynierskiej. Dla potwierdzenia przydatności opisywanych obliczeń w projektowaniu maszyn można podać przykład negatywny wykonania prototypu wału o szerokości 15 m, przy budowie którego nie uwzględniono wszystkich wyników obliczeń i który w efekcie uległ uszkodzeniu podczas badań eksperymentalnych (ugięcie elementów konstrukcji, rys. 7). Przykład pokazuje, jakich problemów można uniknąć przy poprawnym wykorzystaniu symulacji komputerowych i obliczeń. Pokazuje również, że mimo tak zaawansowanych technik obliczeniowych ostateczna weryfikacja doświadczalna konstrukcji nadal znajduje swoje praktyczne zastosowanie, bo pozwala wykryć to co często się określa jako „błąd ludzki”.



*Rys. 7. Efekt zlekceważenia wyników obliczeń wytrzymałościowych (prototyp wału 15 m)*

*Fig. 7. The effect of stress calculation results disregard (prototype of roller 15 m)*

## **Wnioski**

W wyniku przeprowadzonych obliczeń i symulacji komputerowych uzyskano bogaty zbiór wyników w postaci danych liczbowych i map rozkładu naprężeń w konstrukcji. Największą jednak korzyścią była możliwość zoptymalizowania konstrukcji w aspekcie wytrzymałościowym. Dzięki zastosowaniu opisanych modeli obliczeniowych stało się możliwe wypracowanie projektu maszyny rolniczej o wysokiej jakości. Badania wykonanego prototypu potwierdziły poprawność uzyskanych wyników symulacyjnych, a sam prototyp (wał 12 m) nie wymagał większych poprawek wynikających z błędów konstrukcyjnych i obliczeniowych.

## **Bibliografia**

Kromulski J., Mac J., Pawłowski T., Szczepaniak J. 2004. 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.

Lawry M. H. 2000. I-Deas Master Series. Student Guide. SDRC. Milford. USA.



Rutkowski J., Szczepaniak J. 2003. Modelowanie węzłów kinematycznych w wytrzymałościowej analizie dynamicznej konstrukcji wybranej maszyny rolniczej. Journal of Research and Application in Agricultural Engineering. Nr 48(4). Str. 60-64. Poznań

Pawłowski T., Rutkowski J., Szczepaniak J., Wietrzyk M. 2004. Zgłoszenie patentowe P.368256 z dn. 31.05.2004.

Szczepaniak J. i in. 2004. Typoszereg wałów uprawowych o szerokościach roboczych 9,12 i 15 metrów”. Zad. 2, 3, 4, 7 i 8. PIMR. Poznań.

1994. ADAMS/Solver Reference Manual. Mechanical Dynamics, Inc.

## **ANALYSING MODELS USING IN DESIGNING AND VERIFICATION OF THE CONSTRUCTION OF AGRICULTURAL ROLLERS OF 9, 12 AND 15 M WIDTH**

### **Summary**

Selected methods applied in designing and implementation of agricultural rollers of 9–15 m width were presented in the paper. Modern methods of computer simulation (kinematic, dynamic, FEM, optimization) were used during conduction of analysing,. The simulations and analysis were conducted in I-DEAS and ADAMS systems (designing) and program Matlab (post processing of experimental measurements). In construction of rollers innovative system of unfolding the machine between transport and work position was applied. The system was application for the patent protection.

**Key words:** agricultural machine, design, modelling, tests