

*Jan Szczepaniak, Tadeusz Pawłowski*  
*Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych w Poznaniu*

## **MODELOWANIE KOMPUTEROWE I BADANIA SYMULACYJNE MODELI MASZYN ROLNICZYCH NA PRZYKŁADZIE WAŁU WAHADŁOWEGO**

### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowano wybrane możliwości analizy zachowań kinematycznie dynamicznych modeli maszyn rolniczych na wstępnym etapie projektowania. Przedstawiono wyniki dotyczące sił występujących podczas podnoszenia i opuszczania wału uprawowego zawieszzonego na wysięgniku z przodu ciągnika oraz wpływu parametrów konstrukcji na stateczność agregatu.

**Słowa kluczowe:** modelowanie, symulacje, maszyny rolnicze

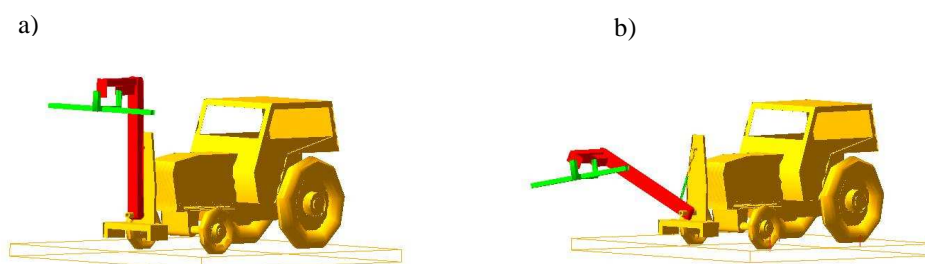
### **Wprowadzenie**

W pracy przedstawiono przebieg i wyniki analizy kinematycznych i dynamicznej podnoszenia i opuszczania wału Campbella zawieszzonego na przednim TUZ ciągnika. Analiza ta dotyczy etapu założeń konstrukcyjnych, przed budową prototypu [Kęska i in. 2003]. Do jej przeprowadzenia wykorzystano system komputerowy ADAMS [1998].

### **Opis konstrukcji wału i jego zawieszenia dla potrzeb tworzenia modelu obliczeniowego**

Konstrukcja zawieszenia wału uprawowego na przednim TUZ ciągnika składa się z czterech podstawowych zespołów połączonych ze sobą obrotowo lub przesuwnie. Głównym elementem jest wał talerzowy typu Campbella przeznaczony do rozdrabniania grud ziemi powstałych podczas orki. W celu umożliwienia orki dwukierunkowej, wał podwieszono na przechylnym ramieniu, pozwalającym na jego pracę po obu stronach ciągnika. Przechył realizowany jest za pośrednictwem siłownika hydraulicznego. W położeniu transportowym ramię konstrukcji znajduje się w pozycji pionowej (rys. 1).

Z uwagi na wstępny etap opracowania projektu model konstrukcji zawieszenia wału został znacznie uproszczony. Pominięto elementy, które nie wywierają istotnego wpływu na wyniki przeprowadzonych symulacji. Uproszczeniem objęto również wał, który nie podlega analizie, ale jego uwzględnienie jest konieczne ze względu na generowanie przezeń sił bezwładnościowych. Reprezentuje go tylko belka zawieszona na ramieniu wysięgnika o odpowiedniej masie i parametrach bezwładnościowych (rys. 1).



Rys. 1. Model zawieszenia wału wraz z ciągnikiem: a) w położeniu transportowym, b) podczas opuszczania ramienia wysięgnika

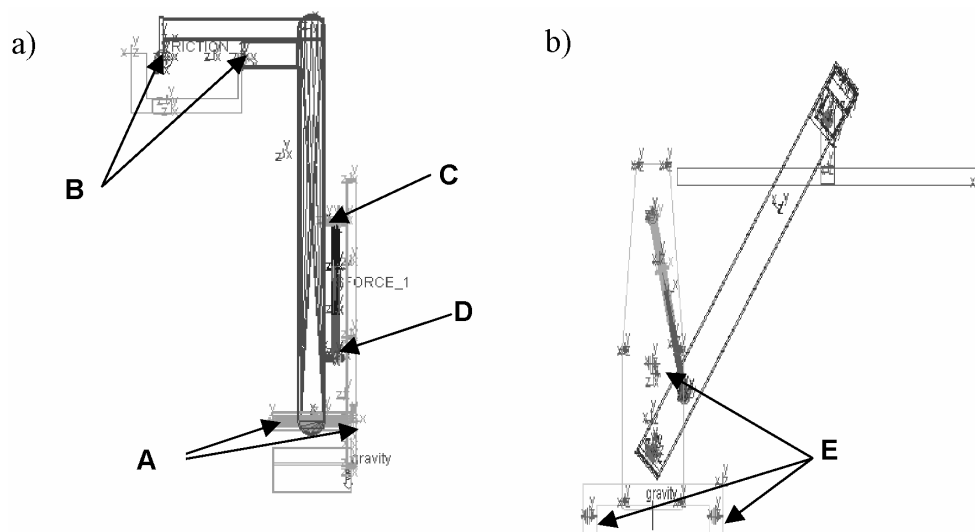
Fig. 1. Model of roller mounting and tractor: a) in transport position b) during arm lowering

Kolejne uproszczenia dotyczyły kształtu elementów konstrukcji. Uproszczenia te, w systemie ADAMS, wpływają na wyniki obliczeń symulacyjnych jedynie w niewielkim stopniu, gdyż istotniejsze są położenia markerów, więzów i innych elementów modelu. Masy poszczególnych elementów modelu są zgodne z ich wielkościami rzeczywistymi.

Możliwie dokładnie odwzorowano natomiast sposób utwierdzenia, połączenia między częściami (bryłami sztywnymi) oraz siły występujące w modelu, tak by zachować ich fizyczny sens. Szczególną uwagę poświęcono zamodelowaniu siły występującej w siłowniku podnoszącym i opuszczającym ramię z zawieszonym wałem [Dreszer, Dubowski, Pawłowski, Szczepaniak 2005; Garbacik 1997; Osiecki 2004; Stryczek 1997].

W modelu konstrukcji uwzględniono także model ciągnika. Wartości parametrów modelu ciągnika (rozstaw kół, rozstaw osi, masa, ciśnienie i wydatek układu hydraulicznego) przyjmowano na podstawie danych zawartych w [Woźniak 2002].

Na rys. 2 przedstawiono model konstrukcji zawieszenia wału. Ramię wysięgnika przymocowane jest obrotowo do nieruchomej ramy za pomocą dwóch połączeń kulistych (A). Do wysięgnika z kolei, podwieszona jest na specjalnej ramie reprezentująca wał Campbella. Wykorzystano do tego dwa połączenia kuliste (B). Ramię wysięgnika poruszane jest przez siłownik, którego część górna zamocowana jest do ramy głównej (C), a dolna do wysięgnika (D). Oba te połączenia zostały zamodelowane za pomocą połączeń kulistych. Między obiema częściami siłownika znajduje się połączenie suwliwe. Siła generowana w siłowniku przez układ hydrauliczny ciągnika działa właśnie na to połączenie. Całe urządzenie podwieszone jest do ciągnika za pomocą trzech połączeń kulistych (E).



Rys. 2. Elementy modelu ramienia z zawieszonym wałem a) widok z boku b) widok z tyłu

Fig. 2. Elements of arm and suspended roller model a) end view b) rear view

### Wyniki symulacji komputerowych

W czasie badań symulacyjnych badanego urządzenia wykonywano głównie analizy dynamiczne. Przyjęto, że w modelu, oprócz siły grawitacji i związanych z nią obciążeń od masy własnej, działa siła generowana przez zasilany przez układ hydrauliczny siłownik powodujący opuszczanie i podnoszenie ramienia z zawieszonym wałem Campbella. Siła ta została zdefiniowana w postaci funkcji zależnej od podstawowych parametrów hydrauliki ciągnika. Na podstawie

informacji zawartych w [Woźniak 2002] przyjęto, że parametry wykorzystywane-go układu hydraulicznego będą wynosić co najmniej:

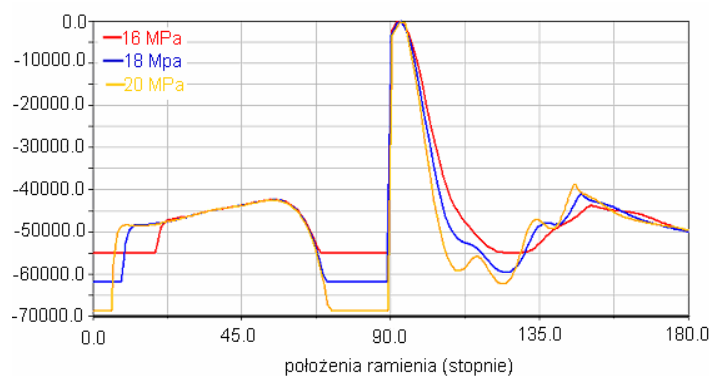
- ciśnienie w układzie – 16 MPa,
- wydatek –  $2/3 \text{ dm}^3/\text{s} = 40 \text{ l/min}$ .

Symulacje podnoszenia i opuszczania ramienia wysięgnika z wałem Campbella, których wyniki prezentowane są poniżej, przeprowadzano zawsze w ten sposób, że w położeniu początkowym ramię było opuszczone na prawą stronę (położenie  $0^\circ$ ), następnie było podnoszone i opuszczane na lewą stronę, zatem zataczało ono kąt  $180^\circ$ .

### Oszacowanie sił występujących podczas podnoszenia i opuszczania ramienia wysięgnika

Siła, z jaką działa tłok w czasie podnoszenia i opuszczania wysięgnika z zawieszonym wałem Campbella, zależy od parametrów cieczy hydraulicznej doprowadzanej do siłownika oraz od jego wymiarów geometrycznych, głównie średnic tłoka i tłoczyska. Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że niezależnie od dokładnych wartości siły w siłowniku, jej zmiana podczas podnoszenia i opuszczania ramienia wysięgnika ma zawsze podobny charakter.

Przykładowe przebiegi przedstawiające zmianę siły dla różnych wartości ciśnienia nominalnego na wejściu siłownika charakteryzują wykresy na rys. 3.



Rys. 3. Zmiany wartości sił w siłowniku hydraulicznym podczas podnoszenia i opuszczania ramienia wysięgnika, w zależności od kąta jego pochylenia dla różnych wartości ciśnienia (przyjęto wydatek równy  $2/3 \text{ dm}^3 = 40 \text{ l/min}$ )

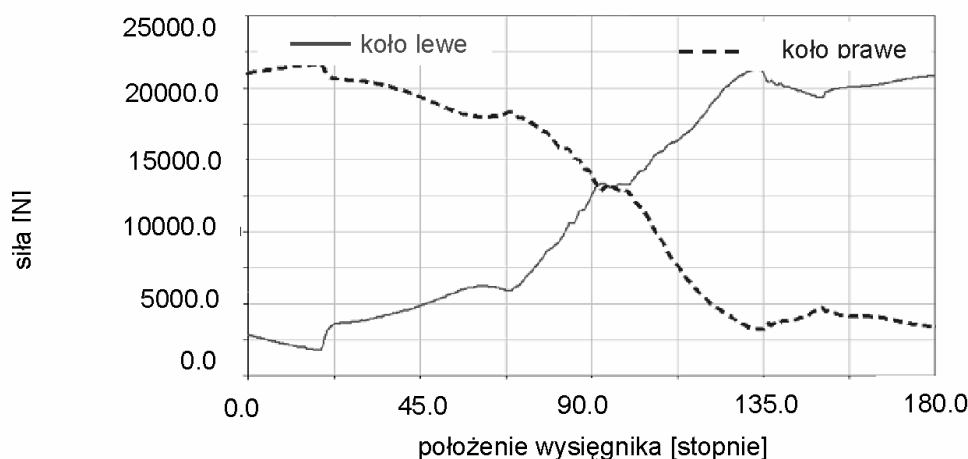
Fig. 3. Force value variation in hydraulic servo versus its slope during its lifting and lowering for various pressure values

Należy zwrócić uwagę na wystąpienie nieregularności wykresów w końcowym etapie ruchu wysięgnika spowodowane przez siły bezwładności pochodzące od zawieszanego wału Campbella. Zjawisko to bardzo niekorzystnie wpływa na wytrzymałość konstrukcji, szczególnie w miejscach zamocowania siłownika do ramienia wysięgnika i ramy głównej oraz całego wysięgnika.

### Badanie wpływu ruchu wysięgnika na stateczność ciągnika

Jednym z istotnych problemów związanych z eksploatacją maszyn rolniczych zawieszonych na ciągnikach jest stateczność całego agregatu (zestawu) w przypadku najazdu na przeszkodę lub jazdy nam skłonach (po pochyłości). W przypadku analizowanego zestawu dochodzi jeszcze do tego niebezpieczeństwo utraty stateczności podczas podnoszenia i opuszczania wysięgnika. W celu określenia stopnia niebezpieczeństwa utraty stateczności oraz określenia wartości parametrów agregatu zapewniających bezpieczną pracę wykonano szereg symulacji przyjmując niekorzystne wartości masy ciągnika i masy wału (rys. 4 i 5).

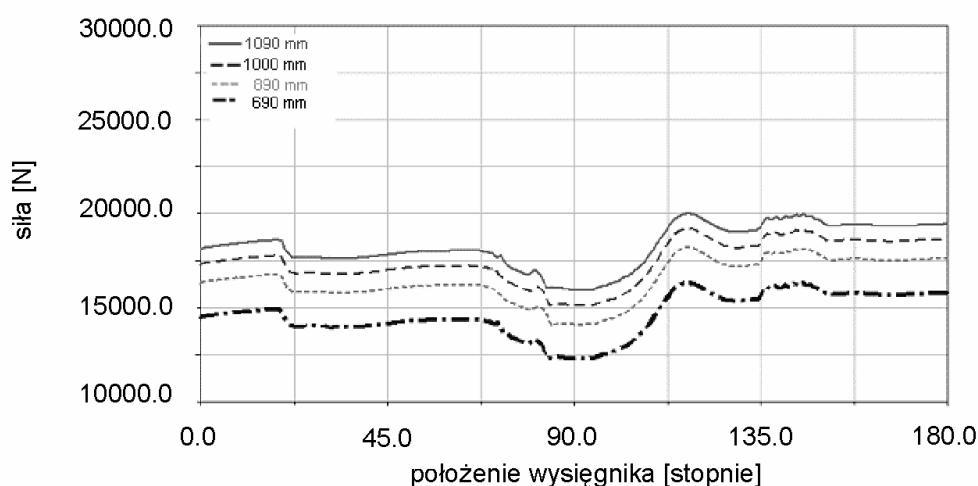
Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki nacisków na koła tylnej osi dla zestawu o podstawowych parametrach. Analiza wykresów pozwala stwierdzić, że dla osi tylnej, w skrajnych położeniach wysięgnika, nacisk na koło przeciwległe do aktualnej pozycji wysięgnika jest stosunkowo niski, co przy pewnych zaburzeniach może prowadzić do utraty stateczności zestawu.



Rys. 4. Nacisk na tylne koła ciągnika, w czasie podnoszenia i opuszczania wału Campbella

Fig. 4. Tractor rear wheels load during Campbell roller lifting and lowering

Natomiast na rys. 5 scharakteryzowano wpływ zmiany położenia środka ciężkości ciągnika na nacisk na przednie lewe koło ciągnika (liczby w legendzie oznaczają odległość środka ciężkości od tylnej osi ciągnika w milimetrach). Z charakterystyk tych wynika, że zmiana obciążenia jest w przybliżeniu proporcjonalna do przesunięcia środka ciężkości.



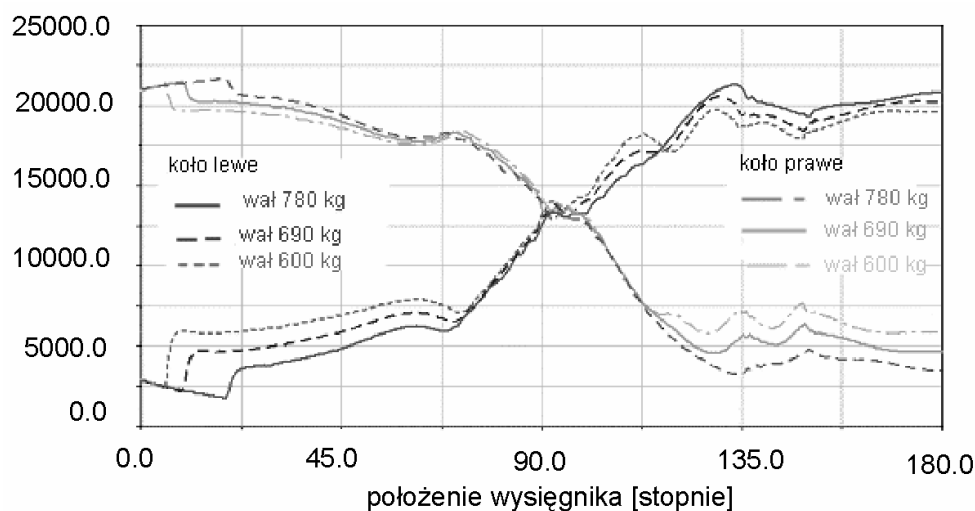
Rys. 5. Nacisk na przednie lewe koło ciągnika, w czasie podnoszenia i opuszczania wału Campbella, w zależności od zmiany położenia środka ciężkości ciągnika wzdłuż jego osi podłużnej (od 1090 mm do 690 mm od osi kół tylnych ciągnika)

Fig. 5. Tractor front wheel load during Campbell roller lifting and lowering for various center of gravity position along tractor rool axis (from 1090 mm to 690 mm from tractor rear axle)

W przypadku ciągników o masie o wartości bliskiej 5000 kg, korzystne wydaje się dodanie dodatkowych obciążników z tyłu pojazdu. Spowoduje to zwiększenie obciążenia osi tylnej i zwiększenie stateczności agregatu.

Badano także wpływ na naciski na koła ciągnika wywierany przez zmiany masy wału Campbella (rys. 6). Stwierdzono, że zmniejszenie masy wału ma stosunkowo niewielki wpływ na obciążenie kół ciągnika. Powoduje ono pewne zmniejszenie obciążenia kół przedniej osi dla całego zakresu ruchu wysięgnika z zawieszonym wałem. Natomiast dla osi tylnej w czasie podnoszenia do pozycji ok. 70°, zmniejszenie masy wału powoduje wzrost obciążenia koła lewego oraz zmniejszenie obciążenia koła prawego. Dla pochylecia ramienia wału w zakresie od 70° do 120° obciążenie kół tylnych w zasadzie nie zależy od zmiany masy wału. W końcowej

części ruchu wysięgnika sytuacja odwraca się i wraz ze zmniejszeniem masy wału następuje zwiększenie obciążenia koła prawego i zmniejszenie obciążenia koła lewego.



Rys. 6. Nacisk na tylne koła ciągnika w czasie podnoszenia i opuszczania wału Campbella dla różnych mas wału

Fig. 6. Tractor rear wheels load during Campbell roller lifting and lowering for various roller mass

### Optymalizacja miejsca mocowania siłownika podnoszącego ramię wysięgnika

Siłownik podnoszący i opuszczający ramię wysięgnika z zawieszonym wałem Campbella jest jednym z istotniejszych elementów całej konstrukcji. Miejsca jego mocowania do ramy głównej i ramienia wysięgnika są miejscami występowania koncentracji naprężeń. Na omawianym etapie prac analizowano tylko siły podnoszenia wysięgnika. Ich minimalizacja miała na celu obniżenie wspomnianych naprężeń występujących w miejscach mocowania siłownika. Istotne znaczenie dla wartości badanych sił miało miejsce mocowania siłownika, a szczególnie miejsce mocowania siłownika do ramienia wysięgnika.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że odsunięcie punktu mocowania siłownika do ramienia wysięgnika od osi obrotu o 50 mm powoduje, że siła niezbędna do podniesienia ramienia z zawieszonym wałem maleje o ponad 11%. Przesunięcie o 100 mm powoduje zmniejszenie siły o 20% w stosunku do

wartości początkowej. Dalsze przesuwanie punktu mocowania siłownika jest jednak niemożliwe, gdyż powoduje ono zwiększenie wielkości siłownika, który przestaje mieścić się między zaczepem siłownika do ramy a osią obrotu ramienia. Rozwiązaniem umożliwiającym większe odsunięcie punktu mocowania od osi obrotu ramienia wysięgnika jest podniesienie górnego punktu mocowania siłownika do ramy głównej. Przeprowadzone symulacje wykazały, że samo podnoszenie tego punktu nie wpływa w istotny sposób na wartości sił niezbędnych do podniesienia wału Campbella. Nie wpływa ono także na stateczność zestawu.

### **Podsumowanie**

Przeprowadzone analizy miały na celu oszacowanie wpływu wybranych cech konstrukcyjnych zestawu na jego zachowanie dynamiczne i kinematyczne. Dzięki wykonaniu symulacyjnych badań matematycznego modelu wału wahadłowego zawieszanego na przednim TUZ ciągnika stało się możliwe:

1. Określenie minimalnej wartości wydatku i ciśnienia nominalnego instalacji hydraulicznej ciągnika wykorzystywanego w zestawie.
2. Wyznaczenie wartości sił niezbędnych do podniesienia ramienia z zawieszonym wałem oraz wyznaczenie charakterystyki zmian jej wartości w czasie pracy siłownika dla różnych wartości parametrów dotyczących hydrauliki oraz geometrii urządzenia.
3. Wskazanie na możliwość obniżenie siły podnoszenia wału zawieszanego na ramieniu wysięgnika dzięki odsunięciu punktu mocowania siłownika od osi obrotu ramienia.
4. Przeprowadzenie analizy wpływu wybranych czynników na stateczność badanego zestawu.

### **Bibliografia**

Dreszer K., Dubowski A., Pawłowski T., Szczepaniak J. 2005. Napędy hydrostatyczne w maszynach rolniczych, BOIN-PIMR, Poznań.

Garbacik A. 1997. Studium projektowania układów hydraulicznych, Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Kraków.

Kęska W. i in.. 2003. Modelowanie matematyczne agregatu uprawowego i jego symulacja w aspekcie kinematycznym i dynamicznym, celem oceny prawidłowości doboru głównych parametrów konstrukcyjnych, PIMR, Poznań.

Mechanical Dynamics Inc. 1998. Using ADAMS/View version 9.



Osiecki A. 2004. Hydrostatyczny napęd maszyn, WNT, Warszawa.

Stryczek S. 1997. Napęd hydrostatyczny t1 i 2. wyd. IV, WNT, Warszawa.

Szczepaniak J., Rutkowski J. 2004. Typoszereg wałów uprawowych o szerokościach roboczych 9,12 i 15 metrów. Zadania 2,3,4, PIMR, Poznań.

Woźniak W. 2002. Ciągniki i maszyny rolnicze. Budowa i przeznaczenie 2001/2002. Branżowy Ośrodek Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej PIMR.

### **COMPUTER MODELLING AND SIMULATION TEST OF AGRICULTURAL MACHINES VIRTUAL MODELS ON THE EXAMPLE OF CAMPBELL ROLLER**

Some possibilities of agricultural machine model kinematic and dynamic behaviour on initial designing stage are presented in the paper. The results concerned forces acting during Campbell roller arising and lower and influence of tractor-roller combination parameter on itself stability.

**Key words:** modelling, simulation, agricultural machine