

## OPROGRAMOWANIE WSPOMAGAJĄCE PROJEKTOWANIE PRZEKŁADNI PASOWYCH

*Mariusz Łoboda, Zbigniew Dworecki, Adam Krysztofiak, Mateusz Goszczurny*  
*Instytut Inżynierii Biosystemów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu*

**Streszczenie.** Celem pracy było wytworzenie aplikacji komputerowej do obliczania geometrii, kinematyki i dynamiki przekładni pasowych. Określono stosowne wymagania funkcjonalne i нефункционалне tworzonego programu oraz przeprowadzono modelowanie obiektowe. Aplikację wykonano w środowisku *Visual Studio.NET*. System umożliwia projektowanie przekładni pasowych o dwóch i trzech kołach przy współpracy koła trzeciego z wewnętrzną i zewnętrzną stroną pasa. Obsługa programu jest intuicyjna, a w przypadku wątpliwości użytkownik może na bieżąco korzystać z możliwości wyświetlenia okien pomocy. Program ma zabezpieczenie przed wprowadzaniem niewłaściwych danych wejściowych. Dużym ułatwieniem dla użytkownika są schematy zamieszczone na formularzach, ilustrujące obliczane wielkości. Dodatkowe komunikaty w sytuacjach wyjątkowych pozwalają na szybką lokalizację i usunięcie problemu. Budowa modułowa wytworzonego systemu komputerowego umożliwia dalszą jego rozbudowę, np. o inne układy geometryczne kół w przekładni.

**Słowa kluczowe:** przekładnia pasowa, koło pasowe, obliczenia inżynierskie, program komputerowy

### Wprowadzenie

W napędach, w których zachodzi konieczność zredukowania (lub zmnożenia), prędkości obrotowej, często stosuje się różne konstrukcje przekładni pasowych. Efektywność przekazania momentu obrotowego w rozwiązaniach niesynchronicznych (bazujących tylko na sprzężeniu ciernym pasów z kołami) zależy od prawidłowego napięcia wstępnego pasa, zachowania odpowiedniej wartości współczynnika tarcia między pasem a kołami i wymaganych kątów opasania na poszczególnych kołach [Branowski 2007; Dudziak 1997; Osiński 2002; Żółtowski 2004]. Niewłaściwe wartości tych parametrów powodują pojawianie się poślizgów przeciążeniowych i przedwczesne zużycie pasów i kół [Gates 2010].

W maszynach rolniczych, w których bardzo często stosuje się napędy pasowe, nierzadko mamy do czynienia z modernizacjami i adaptacjami istniejących rozwiązań konstrukcyjnych. Często konieczna jest korekta układu geometrycznego przekładni (średnice i rozstawy kół) lub wręcz całkowita zmiana konstrukcji (wprowadzenie dodatkowych kół

odbiorników mocy i rolek napinaczy). W takich przypadkach nowe rozwiązanie należy przeliczyć pod względem wytrzymałościowym oraz funkcjonalnym. Mimo iż zależności geometryczne typowego układu kinematycznego przekładni dla fachowca nie są szczególnie skomplikowane, to jednak w przypadku, gdy proces optymalizacji konstrukcji wymaga wielokrotnego powtarzania procedury obliczeniowej, rachunki te stają się czasochłonne i uciążliwe. Sytuacja taka często ma miejsce, gdy stosujemy pasy klinowe (ewentualnie wieloklinowe), które produkowane są w określonym typoszeregu długości. Wówczas niezbędne jest dopasowywanie średnic, odległości i usytuowania poszczególnych kół w przekładni. Przydatną w takiej sytuacji byłaby stosowna aplikacja komputerowa ukierunkowana na te obliczenia. Ponadto taki program uzupełniałby obliczenia konstrukcyjne realizowane w innych systemach dotyczących np. wałów i osi [Łoboda i in. 2006] czy przegubów [Łoboda i in. 2011].

W przypadku, gdy wystarczą wyniki podstawowych obliczeń kinematycznych, można skorzystać z prostych kalkulatorów obliczeniowych dla przekładni pasowych, dostępnych w elektronicznych poradnikach mechanika, np. [www.softdis.pl]. Wymaga to niestety stosownej rejestracji użytkownika. Wartą przytoczenia jest też aplikacja firmy *Design Flex Pro* [www.gates.com/designflex], która mimo rozbudowanej formy może być bardzo pomocna w obliczeniach i doborze parametrów przekładni. W tym przypadku również konieczna jest rejestracja użytkownika rozszerzona o pytania natury finansowej. Jest to zrozumiałe biorąc pod uwagę, iż wytwórca tego oprogramowania – firma *Gates Corporation* – jest równocześnie wiodącym producentem pasów.

## Cel pracy

Celem pracy jest wytworzenie takiego narzędzia, które wspomagałoby pracę inżyniera na etapie konstruowania lub modernizowania przekładni pasowych. Cel ten sprowadza się do wytworzenia aplikacji komputerowej do obliczenia geometrii, kinematyki i dynamiki przekładni pasowych. Aplikacja ta powinna posiadać: prosty i intuicyjny interfejs z opisem poszczególnych kroków obliczeniowych, przejrzystą prezentację wyników z komentarzami, zabezpieczenie przed wprowadzaniem niewłaściwych danych wejściowych oraz rozbudowaną pomoc użytkownika. Konstrukcja programu powinna umożliwiać stosunkowo łatwą implementację dodatkowych funkcji i rozbudowę powstałego programu.

### Algorytmy obliczeniowe

Podstawowymi wielkościami w przekładniach pasowych są siły w cięgnach przekładni warunkujące możliwości przeniesienia mocy. Obciążenie przyłożone do napędzanego (lub napędzanych) kół powoduje zmianę sił w cięgnach przekładni. Początkowa wartość napięcia w pasie  $S_o$  w cięgnie biernym spada do  $S_2$ , a w cięgnie czynnym wzrasta o tę samą wartość do  $S_l$ . Różnica  $(S_l - S_2)$  jest siłą użyteczną  $S_u$  – siłą tarcia między pasem a kołem. Analiza sił w pasie i kole dla granicznych warunków tarcia prowadzi do zależności (wzór Eulera):

$$S_1 = S_2 \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \quad (1)$$

gdzie:

- $S_1$  – siła w cięgnię czynnym,
- $S_2$  – siła w cięgnię biernym,
- $e$  – podstawa logarytmu naturalnego,
- $\mu$  – współczynnik tarcia pasa o koło,
- $\alpha$  – kąt opasania.

Uwzględniając wzór Eulera, siłę użyteczną można uzależnić od napięcia wstępnego:

$$S_u = (S_1 - S_2) \cdot \frac{(S_1 + S_2)}{2} \cdot \frac{2}{(S_1 + S_2)} = (S_2 \cdot e^{\mu \cdot \alpha} - S_2) \cdot S_o \cdot \frac{2}{(S_2 \cdot e^{\mu \cdot \alpha} + S_2)} = 2 \cdot S_o \cdot \left( \frac{e^{\mu \cdot \alpha} - 1}{e^{\mu \cdot \alpha} + 1} \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $S_u$  – siła tarcia między pasem a kołem,
- $S_o$  – początkowa wartość napięcia w pasie.

Pozwala to już wprost określić graniczną relację pomiędzy kątem opasania koła i napięciem wstępnym w cięgnach, a wartością przenoszonej mocy obliczeniowej  $N_o$ :

$$N_o = S_u \cdot V = 2 \cdot S_o \cdot V \cdot \left( \frac{e^{\mu \cdot \alpha} - 1}{e^{\mu \cdot \alpha} + 1} \right) \quad (3)$$

gdzie:

- $N_o$  – moc obliczeniowa przenoszona przez pas,
- $V$  – prędkość obwodowa na kole.

Zależność ta wskazuje na decydujący wpływ (o wyraźnie nieliniowym charakterze) kąta opasania  $\alpha$  na możliwość przekazania mocy pomiędzy pasem a danym kołem. W przypadku stosowania pasów klinowych – ze względu na szczególny rozkład sił – w miejsce współczynnika tarcia należy wprowadzić pozorną jego wartość (około trzykrotnie większą).

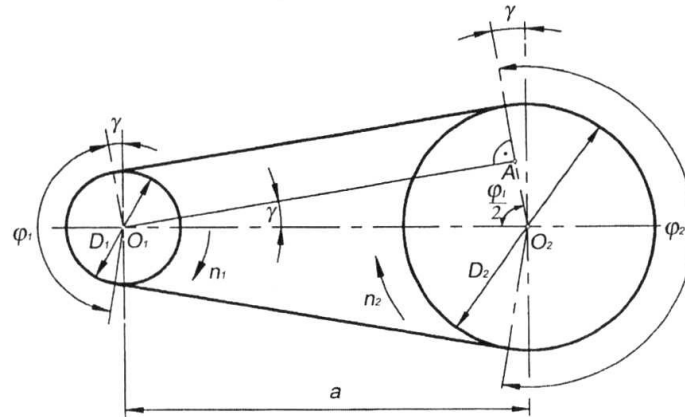
Algorytmy obliczeń geometrycznych, kinematycznych i dynamicznych są dostosowane do poszczególnych układów geometrii przekładni. W obliczeniach nie uwzględnia się ewentualnego poślizgu przeciążeniowego oraz zjawisk aerodynamicznych (tworzenie się poduszki powietrznej od strony nabiegania pasa na koło i podciśnienia przy zbieganiu).

Procedura obliczeń układu geometrycznego przekładni zbudowanej z dwóch kół pasowych (rys. 1) wymaga przyjęcia przez projektanta następujących danych wejściowych:

- współrzędnych środków każdego koła,
- średnic skutecznych kół.

Na podstawie tych wielkości oraz stosownych zależności geometrycznych (rys. 1) wyliczane są:

- odległość między środkami kół,
- kąty opasania,
- długość pasa,
- przełożenie geometryczne przekładni.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 1. Przykładowy układ geometrii przekładni pasowej o dwóch kołach:  $\varphi$  – kąty opasania,  $\gamma$  – kąt rozwarcia cięgien pasa,  $n$  – prędkości obrotowe kół,  $a$  – odległość między osiami kół,  $D$  – średnice skuteczne kół

Fig. 1. An exemplary system of two – pulley belt transmission geometry:  $\varphi$  – rim angles,  $\gamma$  – angle of flare of belt bands,  $n$  – rotational speed of pulleys,  $a$  – distance between axes of pulleys,  $D$  – effective diameters of pulleys

Obliczenia zagadnień kinematyczno-eksploatacyjnych sprowadzają się do wyznaczenia:

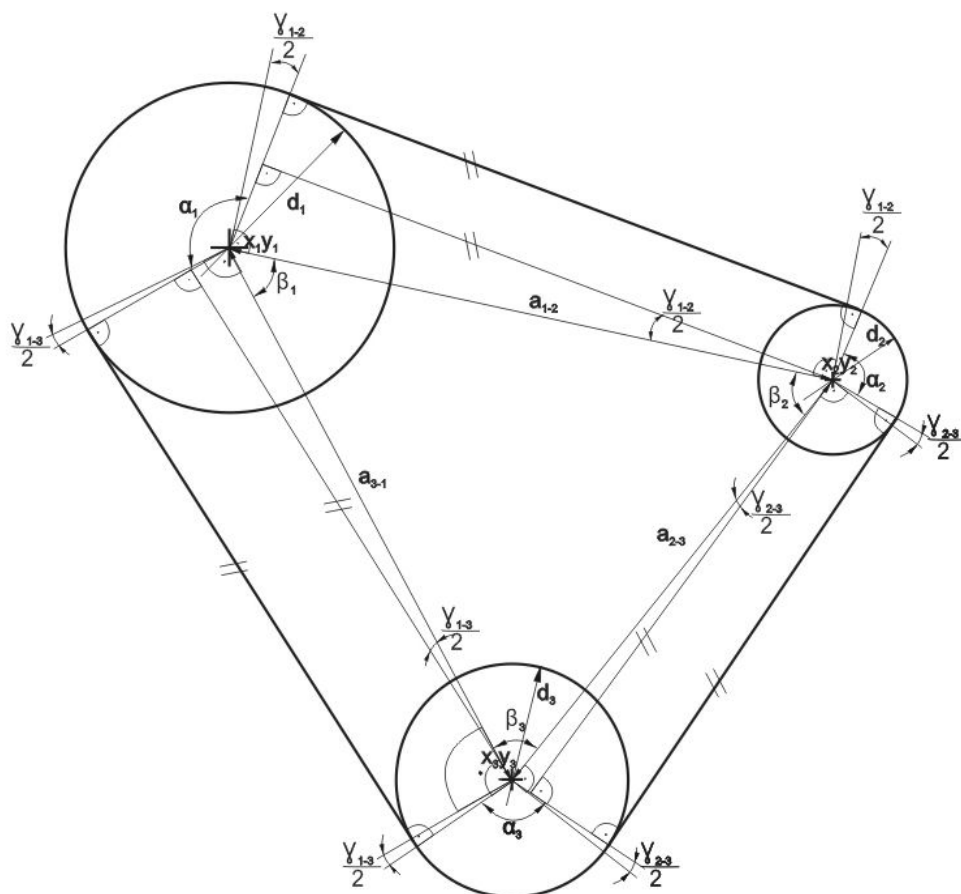
- momentów obrotowych kół,
- przełożenia geometrycznego,
- obrotów koła napędzanego,
- minimalnego napięcia wstępnego pasa.

W przekładni o trzech kołach możliwe są dwa warianty współpracy trzeciego koła: współpraca z wewnętrzną stroną pasa (rys. 2) oraz z zewnętrzną (rys. 3). Podobnie jak w przekładni zbudowanej z dwóch kół, konstruktor powinien przyjąć współrzędne środków kół i ich średnice skuteczne. Odległości między środkami kół są obliczane automatycznie.

Wyznaczenie kątów opasania poszczególnych kół wymaga dokładnej analizy zależności geometrycznych oraz etapowego wyliczenia. Pierwszym etapem jest wyliczenie kątów  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  między trzema prostymi przechodzącymi przez środki kół. Następnie obliczane są kąty rozwarcia cięgien pasa  $\gamma_i$ . Aby dostosować procedurę obliczeniową do każdego możliwego układu geometrycznego, kąty te należy w programie podzielić i ukierunkować. Dopiero po przejściu powyższych etapów możliwe jest wyliczenie kątów opasania  $\alpha_i$  i dokładnej długości pasa.

Dalsze obliczenia wymagają wprowadzenia mocy wejściowej oraz prędkości koła czynnego (domyślnie  $n_1$ ). Umożliwia to wyznaczenie:

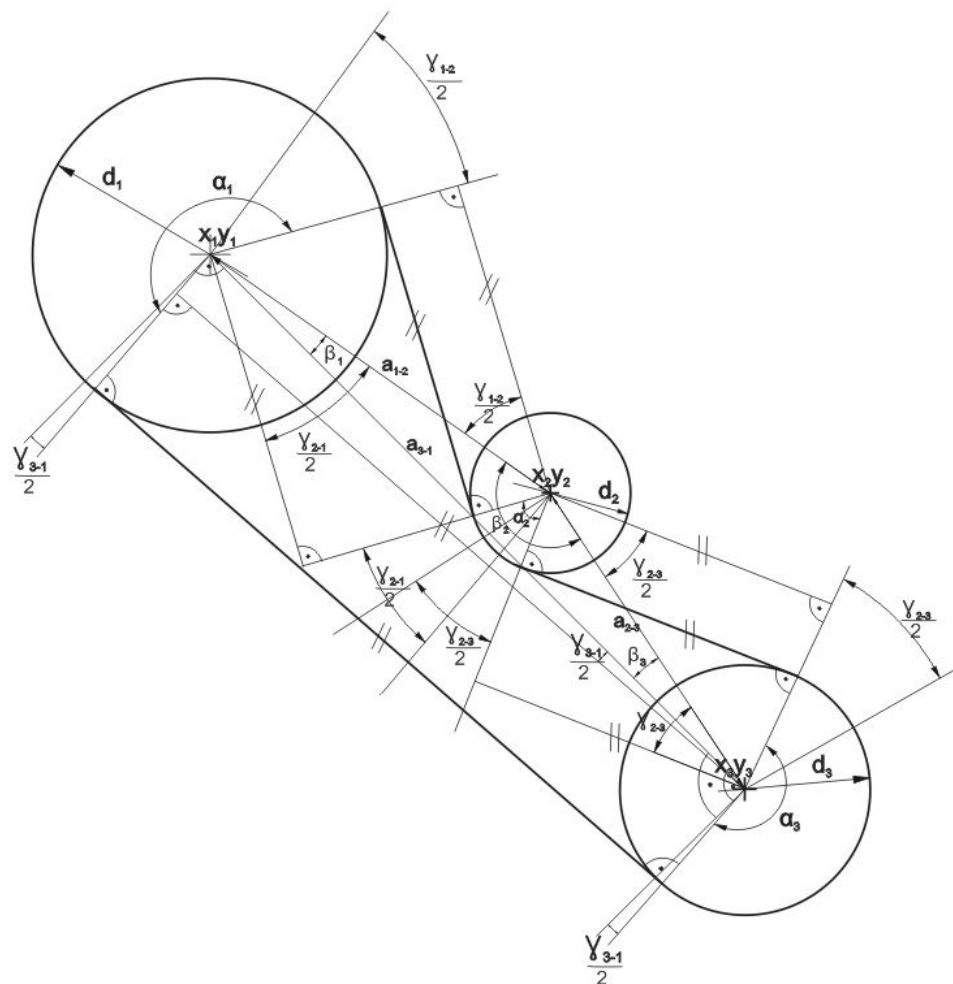
- prędkości obrotowych pozostałych kół układu,
- momentów obrotowych możliwych do uzyskania na wszystkich kołach pasowych.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 2. Przykładowy układ geometrii przekładni pasowej o trzech kołach:  $\alpha$  – kąty opasania,  $\beta$  – kąty rozstawu osi kół,  $\gamma$  – kąty rozwarcia cięgien pasa,  $a$  – odległości między osiami kół,  $d$  – średnice skuteczne kół

Fig. 2. An exemplary system of three - pulley belt transmission geometry:  $\alpha$  – rim angles,  $\beta$  – spacing angle of pulley axes,  $\gamma$  – angle of flare of belt bands,  $a$  - distance between axes of pulleys,  $d$  – effective diameters of pulleys



Źródło: opracowanie własne

- Rys. 3. Przykładowy układ geometrii przekładni pasowej z kołem współpracującym z zewnętrzną stroną pasa:  $\alpha$  – kąty opasania,  $\beta$  – kąty rozstawu osi kół,  $\gamma$  – kąty rozwarcia cięgien pasa,  $a$  – odległości między osiami kół,  $d$  – średnice skuteczne kół
- Fig. 3. Exemplary system of geometry of a belt transmission with a pulley cooperating with the outside side of the belt:  $\alpha$  – rim angles,  $\beta$  – spacing angle of pulley axes,  $\gamma$  – angle of flare of belt bands,  $a$  – distance between axes of pulleys,  $d$  – effective diameters of pulleys

### Budowa i opis działania wytworzonej aplikacji

Jak przedstawiono powyżej, algorytmy procedury obliczeniowej opracowano indywidualnie, dla przedstawionych trzech układów geometrii przekładni. Następnie korzystając z zasad inżynierii oprogramowania [Jaszkiewicz 1997], określono stosowne wymogi funkcjonalne i нефunkcjonalne tworzonego programu oraz przeprowadzono modelowanie obiektowe [Schmuller 2003; Wrycza i in. 2006]. Aplikację wykonano w środowisku *Visual Studio.NET* [www.microsoft.com/visualstudio].

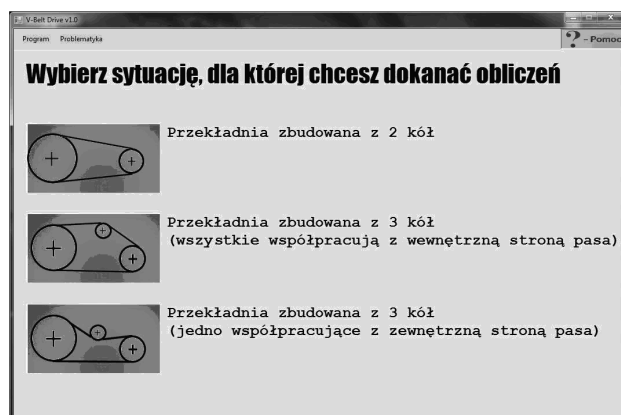
Po uruchomieniu programu pojawia się okno startowe (rys. 4).



Rys. 4. Okno startowe aplikacji  
Fig. 4. Launch window of the application

Źródło: opracowanie własne

Aktywowanie przycisku *Start* powoduje przejście do formularza wyboru układu kół w przekładni (rys. 5).



Rys. 5. Formularz wyboru układu współpracujących kół w przekładni  
Fig. 5. Selection form of the system of cooperating pulleys in a transmission

Źródło: opracowanie własne

Wybierając odpowiedni układ geometryczny przekładni (przykładowy na rys. 6.) można w krótkim czasie dokonać obliczeń dla szeregu testowanych wartości parametrów i wybrać wariant przekładni najbardziej pasujący do projektowanego rozwiązania.

**Podaj:**

	x [mm]	y [mm]	d [mm]
Koło pierwsze (napędzające)	500	1300	600
Koło drugie	1200	900	200
Koło trzecie	600	500	400

Obroty wejściowe [obr/min]

**Przelicz**

**Wyniki:**

Odległość 1 - 2 [mm]	806,23
Odległość 2 - 3 [mm]	721,11
Odległość 3 - 1 [mm]	806,23
Kąt opasania $\alpha_1$ [°]	148,35
Kąt opasania $\alpha_2$ [°]	94,23
Kąt opasania $\alpha_3$ [°]	117,41
Długość pasa [mm]	3646,26
Przełożenie 1-2 [-]	0,33
Przełożenie 2-3 [-]	2
Przełożenie 1-3 [-]	0,67
Obroty drugiego koła [obr/min]	3030,3
Obroty trzeciego koła [obr/min]	1492,54

Źródło: opracowanie własne

Rys. 6. Przykładowy formularz obliczeniowy dla trzech kół – wszystkie współpracujące z wewnętrzną stroną pasa

Fig. 6. An exemplary calculation form for three pulleys – all cooperating with an inner side of the belt

Danymi wejściowymi z reguły są średnice skuteczne kół, moc wchodząca, obroty na koło napędzającym i odległości między osiami lub – w przyjętym układzie – współrzędne środków kół. Wyliczeniu podlegają obroty kół napędzanych, przełożenia geometryczne, długość pasa i, przede wszystkim, kąty opasania poszczególnych kół, mające bezpośredni wpływ na graniczne wartości sił użytecznych – a tym samym – na zdolność przekładni do przeniesienia określonej mocy z koła napędzającego na poszczególne koła napędzane.

Każde pole, które użytkownik wypełnia podczas użytkowania programu, jest zabezpieczone przed wprowadzeniem niewłaściwych danych. We wszystkich można wpisać tylko cyfry, a w niektórych przecinek dziesiętny oraz znak minus. Pozostawienie pustego pola uniemożliwia przejście do kolejnej fazy obliczeń projektowych, wyświetlając odpowiedni komunikat.

Dodatkowo program posiada obsługę sytuacji wyjątkowych, tzn. w momencie rozpoznania błędu wyświetlany jest stosowny komunikat, pozwalający na szybką lokalizację i usunięcie problemu (rys. 7).





*Źródło: opracowanie własne*

Rys. 7. Okna przykładowych komunikatów  
Fig. 7. Windows of exemplary messages [source:author's own study]

Po dokonaniu wszystkich obliczeń w wybranym układzie geometrycznym istnieje możliwość wydrukowania raportu wynikowego.

Podczas weryfikacji i walidacji systemu uzyskano pozytywny wynik testów. Analiza kodu źródłowego nie wykazała błędów w zaimplementowanym algorytmie. Również podczas uruchamiania aplikacji i wprowadzania parametrów testowych nie stwierdzono nieprawidłowości w funkcjonowaniu programu.

## Podsumowanie

1. Wytworzona aplikacja spełnia postawione w celu pracy zadania – w sposób łatwy i przejrzysty wspomaga obliczenia przekładni pasowych. Dużym ułatwieniem dla użytkownika są schematy zamieszczone na formularzach, ilustrujące obliczane wielkości.
2. System umożliwia projektowanie przekładni pasowych o dwóch i trzech kołach przy współpracy koła trzeciego z wewnętrzną lub zewnętrzną stroną pasa.
3. Obsługa programu jest intuicyjna, a w przypadku wątpliwości użytkownik może na bieżąco korzystać z możliwości wyświetlenia okien pomocy.
4. Dodatkowe komunikaty w sytuacjach wyjątkowych pozwalają na szybką lokalizację i usunięcie problemu.
5. Budowa modułowa wytworzonego systemu komputerowego umożliwia dalszą jego rozbudowę, np. o inne układy geometryczne kół w przekładni.

## Bibliografia

- Branowski B.** (red.) (2007): Podstawy konstrukcji napędów maszyn. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 978-83-7143-347-4.
- Dudziak M.** (1997): Przekładnie cięgnowe. PWN Warszawa, ISBN 83-01-12276-5.
- Jaskiewicz A.** (1997): Inżynieria oprogramowania. Helion, Gliwice, ISBN: 8371970072.
- Łoboda M., Krysztofiak A., Dworecki Z., Przybył J.** (2006): Oprogramowanie wspomagające projektowanie wałów i osi. Inżynieria Rolnicza, 13(88), 323-332.

- Łoboda M., Krysztofiak A., Dworecki Z., Rosa P.** (2011): Aplikacja wspomagająca proces projektowania przegubów Cardana. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. 56 (1), 92-95.
- Osiński Z.** (2002): Podstawy konstrukcji maszyn. PWN. Warszawa, ISBN 83-01-12806-2.
- Schmuller J.** (2003): UML dla każdego. Helion, Gliwice, ISBN: 837361107X
- Wrycza S., Marcinkowski B., Wyrzykowski K.** (2006): Język UML 2.0 w modelowaniu systemów informatycznych. Helion, Gliwice, ISBN: 8373618929
- Żółtowski J.** (2004): Podstawy konstrukcji maszyn. Przekładnie. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, ISBN: 83-7207-365-1
- Gates Corporation (2010): Przedwczesne usterki pasków układu pomocniczego. *Technical Bulletin 032*, [dostęp 11-08-2011], Dostępny w Internecie: [http://www.auto-land.pl/pliki/gates\\_4.pdf](http://www.auto-land.pl/pliki/gates_4.pdf)
- Gates Corporation – program obliczeniowy Design Flex Pro, [dostęp 12-10-2012], Dostępny w Internecie: <http://www.gates.com/designflex/>
- Kalkulatory obliczeniowe, [dostęp 12-10-2012], Dostępny w Internecie: <http://www.softdis.pl/>
- Program Visual Studio, [dostęp 12-10-2012], Dostępny w Internecie: <http://www.microsoft.com/visualstudio>

## SUPPORT SOFTWARE FOR DESIGNING BELT TRANSMISSIONS

**Abstract.** The purpose of the work was to create a computer software for calculating geometry, kinematics and dynamics of belt transmissions. Suitable functional and non-functional requirements of the created software were determined and object modelling was carried out. The software was created in *Visual Studio.NET* environment. The system enables designing two and three-pulley belt transmissions with cooperation of the third pulley with an inner and outer side of the belt. Handling the software is intuitive and in case of doubts a user may systematically use the help windows. The programme is protected against introduction of improper input data. Schemes placed on forms, illustrating calculated numbers are a considerable facilitation. Additional messages in exceptional situations allow fast problem localisation and removal. A module structure of the created computer system allows its further development e.g. adding other geometrical systems of pulleys in a transmission.

**Key words:** belt transmitter, belt pulley, engineering calculations, application software

**Adres do korespondencji:**

Mariusz Łoboda; e-mail: [loboda@up.poznan.pl](mailto:loboda@up.poznan.pl)  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
ul. Wojska Polskiego 28  
60-637 Poznań