

# Przekładnia planetarna do napędu śmigła w nowej generacji modeli latających

## Planetary transmission for propeller propulsion in the new generation of flying models

JAKUB SIKORSKI  
WITOLD PAWŁOWSKI  
ŁUKASZ KACZMAREK  
MARIUSZ STEGLIŃSKI  
SEBASTIAN LIPA  
MAREK KLICH\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.4.36>

W artykule przedstawiono projekt przekładni planetarnej, która w połączeniu z silnikiem elektrycznym zapewni zwiększony moment obrotowy, umożliwiający napędzanie dużych, wysoko sprawnych śmigieł nowoczesnych modeli latających. Zaproponowane rozwiązanie pozwala na zastosowanie standardowych wysokoobrotowych silników prądu stałego lub silników bezszczotkowych. Dodatkowo nowatorska konstrukcja przekładni gwarantuje wysoką sztywność mechanizmu, niezbędną do przeciwdziałania efektom żyroskopowym generowanym przez duże śmigło. Zastosowanie stopu aluminium o wysokiej wytrzymałości przyczynia się do utrzymania niskiej masy całego mechanizmu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przekładnia planetarna, projekt przekładni, silnik, stop aluminium

*The article presents a planetary gear design, which in combination with an electric motor will allow to obtain an increased torque enabling the propulsion of large, high-performance propellers of modern flying models. The proposed solution allows the use of standard high-speed DC or brushless motors. In addition, the innovative design of the transmission provides high stiffness of the mechanism necessary to counteract the gyroscopic effects generated by the large propeller. The use of high-strength aluminum alloy ensures low weight of the entire mechanism.*

**KEYWORDS:** planetary transmission, design of planetary gear, engine, aluminum alloy

### Wprowadzenie

Człowieka od zawsze fascynowała możliwość latania, o czym świadczy duża różnorodność maszyn latających stworzonych podczas rozwoju technicznego ludzkości. Budowano zarówno duże konstrukcje latające, jak i małe urządzenia wykorzystywane do praktycznego sprawdzania nowych pomysłów. Równolegle konstruowano modele służące wyłącznie do zabawy, które jednak przez długi czas były skomplikowanymi konstrukcjami, wymagającymi sporej wiedzy technicznej i doświadczenia – zarówno na etapie budowy, jak i późniejszego wykonywania lotów. W ostatnim czasie rozwój techniki pozwolił na znaczne uproszczenie konstrukcji modeli latających i tym samym na ich upowszechnienie. Znalazło to odbicie w ofercie

urządzeń umożliwiających zabawę lataniem, a przede wszystkim dronów.

Współczesny elektryczny model latający składa się z kilku podstawowych elementów. Najważniejsze z nich to: rama – najczęściej wykonana z lekkich materiałów, wysoko zintegrowana elektronika sterująca, nowoczesne lekkie baterie, umożliwiające przechowywanie dużej ilości energii, oraz silnik napędowy (a często kilka silników napędowych).

Silniki modelarskie również przeszły ostatnio poważną ewolucję. Dotyczy to zwłaszcza wprowadzenia silników bezszczotkowych, czyli synchronicznych silników prądu stałego, które mają możliwość rozwijania dużej mocy przy niezwykle niskiej masie i niewielkich wymiarach konstrukcyjnych. Niestety, silniki odpowiednio do zastosowania w małych modelach są zazwyczaj wysokoobrotowe i jako takie nie nadają się do efektywnego napędu śmigła – pod tym względem korzystniejsze byłyby silniki wolnoobrotowe, jednak mają one zbyt duże gabaryty [2]. Należałoby więc połączyć silnik elektryczny z niewielką przekładnią obniżającą obroty i tym samym zwiększającą moment obrotowy napędzający śmigło. Obecnie takie przekładnie spotyka się niemal wyłącznie w modelach helikopterów. Wykorzystuje się w nich przekładnie walcowe, kątowe lub pasowe [1]. Mają one wiele wad, takich jak: brak możliwości przenoszenia dużego momentu obrotowego, niewielka sztywność węzłów łożyskowych czy duża masa.

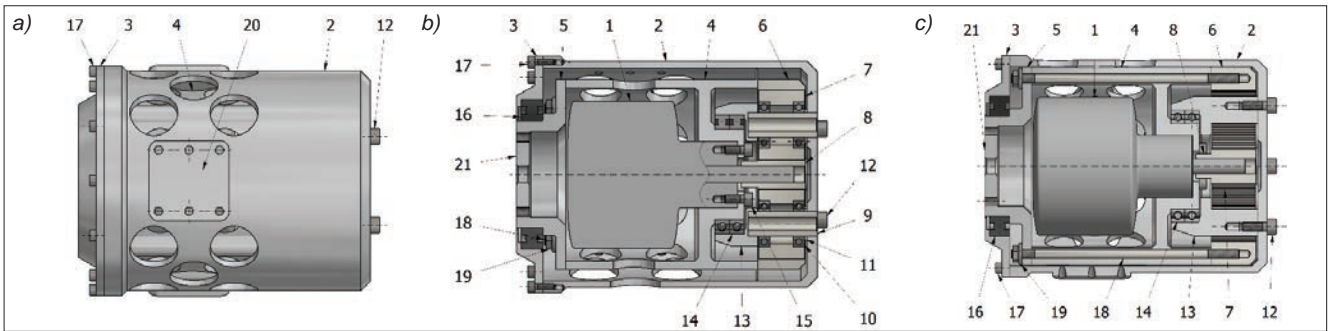
Częściowym rozwiązaniem tych problemów może być zastosowanie przekładni planetarnej, w której moment obrotowy jest rozdzielany na kilka kół satelitarnych [4]. Taka konstrukcja, wzbogacona o nowe rozwiązania techniczne i wykonana z lekkich stopów aluminium, może się przyczynić do powstania nowej generacji modeli latających.

W artykule przedstawiono nowatorski projekt przekładni planetarnej połączonej z silnikiem elektrycznym, pozbawionej wad typowych dla obecnie stosowanych przekładni.

### Opis konstrukcji

Mechanizm został zaprojektowany w programie Autodesk Inventor Professional. Jest to parametryczny program pozwalający na trójwymiarowe projektowanie części, które następnie mogą być wirtualnie składane w podzespoły i gotowe maszyny. Ten program ma wiele

\* Mgr inż. Jakub Sikorski ([jakub.sikorski@p.lodz.pl](mailto:jakub.sikorski@p.lodz.pl)), <https://orcid.org/0000-0001-5979-0498> – Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Politechnika Łódzka, Łódź, Polska  
Dr hab. inż. Witold Pawłowski, prof. TUL ([witold.pawlowski@p.lodz.pl](mailto:witold.pawlowski@p.lodz.pl)), <https://orcid.org/0000-0002-1846-3615> – Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Politechnika Łódzka, Łódź, Polska  
Dr hab. inż. Łukasz Kaczmarek, prof. TUL ([lukasz.kaczmarek@p.lodz.pl](mailto:lukasz.kaczmarek@p.lodz.pl)), <https://orcid.org/0000-0002-6163-3608> – Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka, Łódź, Polska  
Dr inż. Mariusz Stegliński ([mariusz.stegliński@p.lodz.pl](mailto:mariusz.stegliński@p.lodz.pl)), <https://orcid.org/0000-0002-0014-7147> – Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka, Łódź, Polska  
Dr inż. Sebastian Lipa ([sebastian.lipa@p.lodz.pl](mailto:sebastian.lipa@p.lodz.pl)), <https://orcid.org/0000-0002-8971-3685> – Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka, Łódź, Polska  
Mgr inż. Marek Klich ([marek.klich@p.lodz.pl](mailto:marek.klich@p.lodz.pl)), <https://orcid.org/0000-0002-2840-2920> – Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka, Łódź, Polska



Rys. 1. Przekładnia planetarna: a) widok ogólny, b) przekrój, c) przekrój obrócony o 45°. Oznaczenia: 1 – silnik elektryczny, 2 – korpus zewnętrzny, 3 – pokrywa, 4 – korpus wewnętrzny, 5 – pokrywa silnika, 6 – koło pierścieniowe, 7 – satelita, 8 – koło słoneczne, 9 – oś, 10 – łożysko, 11 – podkładka dystansowa, 12 – śruba, 13 – kosz przekładni planetarnej, 14 – łożysko główne, 15 – śruba, 16 – łożysko główne, 17 – śruba, 18 – szpilka, 19 – nakrętka, 20 – specjalne pola umożliwiające zamocowanie łopat śmigła modelu latającego, 21 – specjalne pole umożliwiające zamocowanie przekładni do modelu latającego

funkcjonalności ułatwiających proces projektowania, takich jak analiza kolizji podzespołów, kinematyki i dynamiki – do kontroli współpracy podzespołów, czy analiza wytrzymałości i analiza modalna, przeprowadzane metodą elementów skończonych [5, 7].

Mechanizm (rys. 1) zawiera przekładnię planetarną i silnik elektryczny 1, stanowiący napęd przekładni, przykręcony do korpusu wewnętrznego 4 za pomocą śrub 15. Korpus wewnętrzny 4 dopełniają pokrywa silnika 5 oraz koło pierścieniowe przekładni planetarnej 6, tworzące zespół korpusu wewnętrznego. Wszystkie trzy elementy są skręcone za pomocą szpilek 18 oraz nakrętek 19. Na pokrywie silnika 5 oraz korpusie wewnętrznym 4 są oparte bieżnie wewnętrzne łożysk głównych 14 oraz 16. Pokrywa silnika 5 ma specjalne pole 21, umożliwiające zamocowanie przekładni do modelu latającego. Bieżnie zewnętrzne łożysk głównych 16 i 14 są oparte na pokrywie 3 oraz koszu przekładni planetarnej 13. Pokrywa 3 jest przykręcona do korpusu zewnętrznego 2 za pomocą śrub 17. Kosz przekładni planetarnej 13 również jest przykręcony do korpusu zewnętrznego 2 za pomocą śrub 12. Połączenie pokrywy 3, korpusu zewnętrznego 2 oraz kosza przekładni planetarnej 13, tworzących zespół korpusu zewnętrznego, pozwala na ich obrót wokół korpusu wewnętrznego 4, a jednocześnie na przenoszenie momentu napędowego przekładni planetarnej na korpus zewnętrzny 2 [6].

Korpus zewnętrzny 2 ma specjalne pola 20, umożliwiające zamocowanie łopat śmigła modelu latającego. Przekładnia planetarna obejmuje koło słoneczne 8 współpracujące z satelitami 7 oraz kołem pierścieniowym 6. Koło słoneczne jest zamocowane na wale napędowym silnika elektrycznego 1. Satelity 7 są oparte na osiach 9 poprzez łożyska 10. Łożyska 10 są utrzymywane we właściwej pozycji wzdłużnej na osiach 9 za pomocą podkładek dystansowych 11. Osie 9 są zamocowane w koszu przekładni planetarnej 13 oraz korpusie zewnętrznym 2. Koło pierścieniowe 6 jest przykręcone do korpusu wewnętrznego 4 za pomocą szpilek 18 [6].

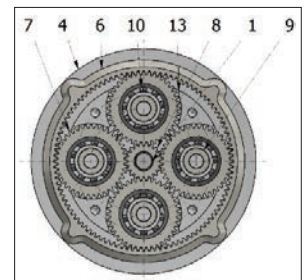
Niezwykle ważnymi elementami konstrukcji są łożyska główne 14 oraz 16. Ich duże oddalenie od siebie zapewnia sztywność całego mechanizmu przekładni. Zaproponowane umiejscowienie łożysk pozwala ponadto na zastosowanie egzemplarzy o dużej nośności. Te dwie właściwości są istotne zwłaszcza w kontekście zadań stawianych całemu mechanizmowi.

Zasada działania opisanego mechanizmu jest przedmiotem zgłoszenia patentowego [6].

### Zasada działania

Na rys. 2 przedstawiono widok przekładni planetarnej zastosowanej w opisywanej konstrukcji. Moment napę-

dowy z silnika 1 jest przenoszony na koło słoneczne 8. Satelity 7 zazębiają się z kołem słonecznym 8 oraz kołem pierścieniowym 6. Zapewnia to powstanie momentu napędowego obracającego osie 9 wokół koła słonecznego 8. Moment jest przenoszony z osi 9 na kosz przekładni planetarnej 13 oraz na połączony z nim korpus zewnętrzny 2. Dzięki temu korpus zewnętrzny 2 jest obracany momentem napędowym silnika 1, powielonym przez przełożenie przekładni planetarnej. Takie przekładnie pozwalają na uzyskanie wysokiego przełożenia, przekraczającego 8:1. Po zamocowaniu łopat śmigła modelu latającego do korpusu zewnętrznego 2 możliwe jest napędzanie śmigła wysokim momentem napędowym [6].



Rys. 2. Widok podzespołu przekładni planetarnej bez korpusu zewnętrznego

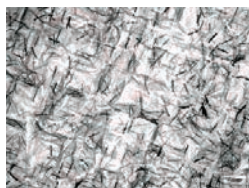
### Zastosowany materiał

Zaproponowany mechanizm ma nieco większe wymiary niż sam silnik elektryczny, a ponadto ma dodatkowe elementy mechaniczne, co powoduje niekorzystne zwiększenie masy całej konstrukcji. Aby temu zaradzić, podjęto próbę stworzenia nowego materiału, który przynajmniej częściowo wyeliminowałby wspomniane wady. Przedstawiony dalej stop aluminium opracowano z myślą o wykorzystaniu go w lekkich maszynach, ze szczególnym uwzględnieniem modeli latających. Ze względu na warunki eksploatacji przekładni badania obejmowały również zachowanie się materiału w obniżonej temperaturze.

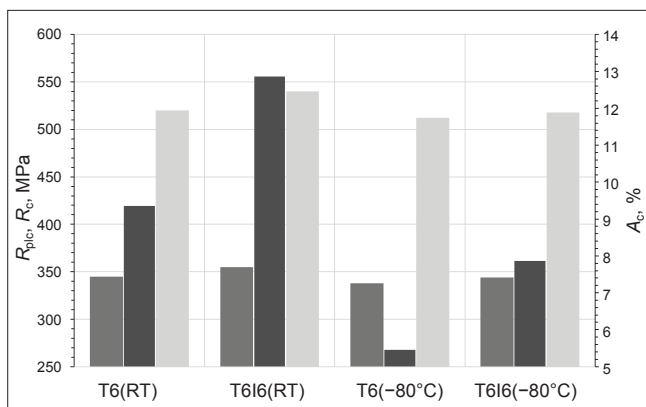
Do budowy przekładni planetarnej wykorzystano stop aluminium EN-PN 2024, który poddano opatentowanej obróbce hybrydowej, polegającej na połączeniu dwustopniowego starzenia T616 z następczą obróbką plastyczną SPD – ECAP [3]. Zastosowanie obróbki cieplnej prowadzi do wzrostu twardości stopu ze 132 HV10 do 156 HV10. Dodatkowo przeprowadzenie obróbki plastycznej po procesie T616 powoduje zmniejszenie ziarna stopu z 450  $\mu\text{m}$  do ok. 30  $\mu\text{m}$  (rys. 3) i w konsekwencji – poprawę właściwości mechanicznych stopu.

Analizę zmian wytrzymałości stopu EN-PN 2024 po procesie ECAP przeprowadzono na podstawie statycznej próby ściskania według PN-57/H-04320 w temperaturze pokojowej oraz  $-80^{\circ}\text{C}$ . Podczas badań najwyższą

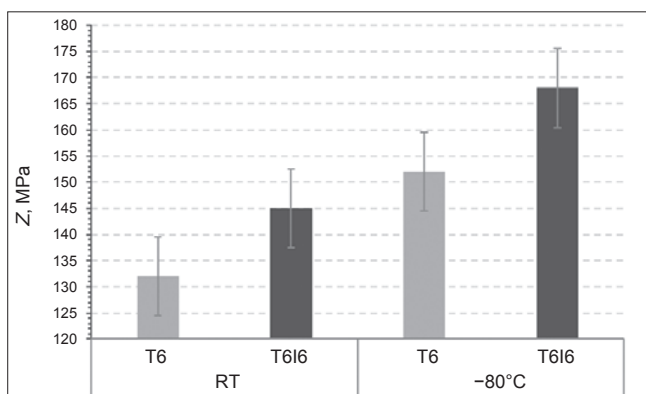
wytrzymałość uzyskano dla próbek zdeformowanych według schematu B ( $R_{plc} = 630$  MPa,  $\Delta l = 1,2$  mm), natomiast największą plastyczność – dla próbek zdeformowanych według schematów B-B ( $R_{plc} = 432$  MPa,  $\Delta l = 4,6$  mm) i B-C ( $R_{plc} = 444$  MPa,  $\Delta l = 4,7$  mm). Wyniki badań wytrzymałościowych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Obraz struktury stopu EN-PN 2024 po deformacji plastycznej metodą ECAP



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie stopu EN-PN 2024 po obróbce T6 i T616 w temperaturze pokojowej (RT) oraz  $-80^\circ\text{C}$



Rys. 5. Wytrzymałość zmęczeniowa stopu EN-PN 2024 po obróbce T6 i T616 w temperaturze pokojowej (RT) i  $-80^\circ\text{C}$

Badania wytrzymałości zmęczeniowej przeprowadzono w temperaturze pokojowej (RT) oraz  $-80^\circ\text{C}$ . Próbkę wymrażano w  $\text{LN}_2$ , a następnie badano w komorze termicznej izolującej od warunków zewnętrznych, zgodnie z normą PN-67/H-04326 (cykl wahadłowy). Wytrzymałość zmęczeniową określono dla liczby cykli  $N_G = 107$  przy ugięciu  $0,01$  mm. Stwierdzono, że obróbka T616 podniosła wytrzymałość zmęczeniową  $Z_G$  o  $10 \div 15\%$  – zarówno w temperaturze RT, jak i w temperaturze  $-80^\circ\text{C}$  ( $Z_{G\ T6(RT)} = 132$  MPa,  $Z_{G\ T616(RT)} = 145$  MPa,  $Z_{G\ T6(-80^\circ\text{C})} = 152$  MPa,  $Z_{G\ T616(-80^\circ\text{C})} = 162$  MPa). Wyniki badań zmęczeniowych przedstawiono na rys. 5.

### Dane konstrukcyjne

W opisywanej konstrukcji wykorzystano silnik bezszczotkowy o mocy  $5580$  W przy prędkości obrotowej wału  $6350$  obr/min. Jest to silnik przeznaczony do napędu dużych modeli latających, np. samolotów i dronów. W przypadku tak dużych silników producent nie ma w ofercie przekładni umożliwiającej redukcję obrotów wału, na

którym montowane jest śmigło [2]. Masa silnika wynosi  $1,45$  kg, a masa całej konstrukcji –  $3,2$  kg.

Prezentowana przekładnia planetarna ma przełożenie  $6:1$ , więc obroty wału silnika są redukowane do prędkości ok.  $1050$  obr/min, z jaką obraca się korpus przekładni. Przełożenie dobrano na podstawie informacji dotyczących oferowanych przekładni zestawianych z silnikami modeli latających – najczęściej waha się ono od  $4:1$  do  $6,7:1$ . Przy obecnych wymiarach konstrukcyjnych przekładnia teoretycznie zapewnia przeniesienie mocy  $6300$  W z silnika na śmigło. Taki nadmiar mocy jest konieczny ze względu na niemożność idealnego wymiarowego wykonania przekładni, przez co nie ma możliwości, aby każde z czterech kół satelitarnych w pełni przenosiło przypisaną mu część mocy silnika napędowego.

W przypadku dronów najczęściej stosuje się konstrukcje zawierające cztery, sześć lub osiem silników napędowych (a czasem nawet  $10$ ,  $12$  i  $16$ ), aby uzyskać większą nośność [8]. Obecnie największymi dronami są maszyny rolnicze o ładowności  $10 \div 20$  kg, przeznaczone do oprysków pól [9]. Wynika to z przepisów ograniczających stosowanie dużych dronów transportowych w terenie miejskim. Wysoki udźwig, możliwy do uzyskania przez zaproponowaną konstrukcję, predestynuje ją do zastosowania w dronach o jeszcze większej ładowności, a w przyszłości – nawet w maszynach do transportu ludzi.

### Podsumowanie

Zaproponowany projekt głowicy napędowej śmigła otwiera nowe możliwości w zakresie konstruowania dużych modeli latających, które będą miały znaczny udźwig przy niewielkim zapotrzebowaniu na energię. Zastosowanie wysoko sprawnych, wolnoobrotowych śmigieł pozwoli również na znaczne wydłużenie czasu pracy modelu na jednym zestawie baterii. Jest to bardzo ważne w przypadku dronów, których czas pracy jest ściśle powiązany z pojemnością baterii.

Dzięki zwartej budowie przekładni i zastosowaniu w niej nowoczesnych, lekkich materiałów zostanie zachowana niska masa startowa modelu. Wysoka sztywność układu łożyskowania śmigła zapewni bezawaryjną pracę pod dużymi obciążeniami, wynikającymi z wykonywania manewrów, np. szybkich zmian kierunku lotu. Odpowiednie zlokalizowanie punktów mocowania przekładni umożliwi jej zamontowanie w miejscu przewidzianym na silnik elektryczny – bez konieczności wprowadzania zmian konstrukcyjnych w ramie drona, helikoptera lub samolotu.

Wolno obracające się śmigła wyraźnie wpłyną na zmniejszenie hałasu generowanego przez lecący model, co jest istotne w razie jego wykorzystania do nagrywania filmów.

Opisane zalety proponowanej głowicy napędowej śmigła sprawiają, że może ona znaleźć zastosowanie w nowoczesnych dronach, modelach samolotów i helikopterów.

### LITERATURA

- [1] Dietrich M. „Podstawy konstrukcji maszyn”. Tom 3. WNT, 2017.
- [2] Hacker. „Brushless Motors”. 2017.
- [3] Kaczmarek Ł., Stegliński M., Sawicki J., Kula P., Kyzioł K., Batory D., Kottfer D., Klimek L. „Sposób polepszenia właściwości mechanicznych stopów aluminium”. Patent nr P. 398270, 2012.
- [4] Muller L., Wilk A. „Zębate przekładnie obiegowe”. PWN, 1996.
- [5] Munford P., Normand P. „Mastering Autodesk Inventor 2016 and Autodesk Inventor LT 2016”. Autodesk Official Press, 2016.
- [6] Sikorski J., Pawłowski W., Klich M., Kaczmarek Ł., Stegliński M. „Mechanizm przenoszenia napędu na śmigło”. Zgłoszenie patentowe nr P. 423387, 2017.
- [7] Stasiak F. „Zbiór ćwiczeń Autodesk Inventor 2017”. ExpertBooks, 2016.
- [8] The Drone Chronicles, Catalogue, 2016.
- [9] www.dji.com/pl/mg-1 (dostęp: 21.03.2019).