

KONSTRUKCJA REDUKTORÓW NAPĘDU GŁÓWNEGO ŚMIGŁOWCÓW PRODUKOWANYCH W EUROPIE WSCHODNIEJ

Jacek SOWA¹
Adam MARCINIEC²

STRESZCZENIE

Publikacja ta przybliży czytelnikowi rozwiązania konstrukcyjne stosowane w reduktorach przekładni głównych stosowanych w śmigłowcach konstruowanych w Europie wschodniej. Publikacja prezentuje schematy kinematyczne oraz podstawowe informacje o warunkach pracy reduktorów na wybranych przykładach.

1. WPROWADZENIE

Podstawową funkcją przekładni głównej w śmigłowcu jest przekazanie mocy z poziomo ułożonych silników na pionowo skierowany wirnik. Moment obrotowy, jaki przekazuje wał główny podczas lotu na wirnik śmigłowca powoduje powstawanie sił reakcyjnych od siły nośnej rotora, oraz reakcji pochodzącej od momentu obrotowego. Siły te, poprzez wał główny, przenoszone są na przekładnię, a następnie na elementy strukturalne śmigłowca.

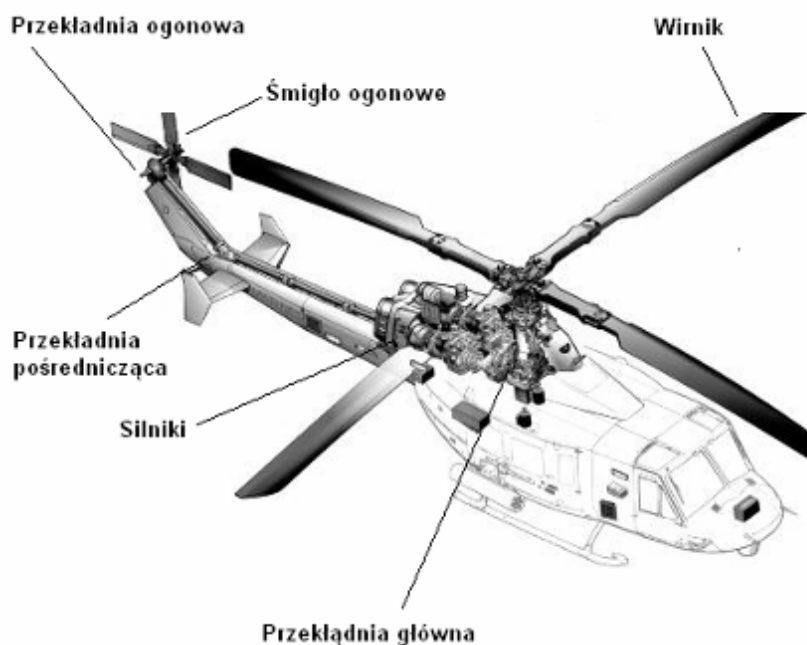
Przekładnia główna cechuje się zazwyczaj dużą redukcją obrotów, co skutkuje zamianą relatywnie małego momentu przy dużej prędkości obrotowej silnika na ogromny moment przy małej prędkości obrotowej wirnika śmigłowca. Prędkość obrotowa wirnika śmigłowca jest funkcją jego średnicy. Im wyższa prędkość wirnika tym mniejsza jego średnica. Celem takiego działania jest

¹ mgr inż. Jacek Sowa – Dział Konstrukcji Silników WSK „PZL-Rzeszów” S.A.

² dr hab. inż., prof. PRz. Adam Marciniak – Katedra Konstrukcji Maszyn, Politechnika Rzeszowska

utrzymanie właściwej prędkości strugi powietrza na końcu łopaty wirnika. Przekroczenie prędkości dźwięku powodowałoby oderwanie strug powietrza i utratę nośności. Jednocześnie średnica wirnika śmigłowca, ilość łopat w wirniku oraz szerokość każdej z łopat musi zapewnić odpowiednią powierzchnię nośną, która będzie na tyle duża, aby umożliwić wznoszenie śmigłowca.

W konwencjonalnym śmigłowcu moment reakcyjny powstały od momentu obrotowego wirnika głównego jest kompensowany momentem, jaki powstaje od śmigła ogonowego. Ponieważ śmigło ogonowe śmigłowca jest oddalone w znacznej odległości od śmigła wirnika głównego, to dla zrównoważenia reakcji może ono być mniejsze. Zazwyczaj ma ono również mniejszą średnicę, co pozwala kręcić się mu ze znacznie wyższą prędkością.

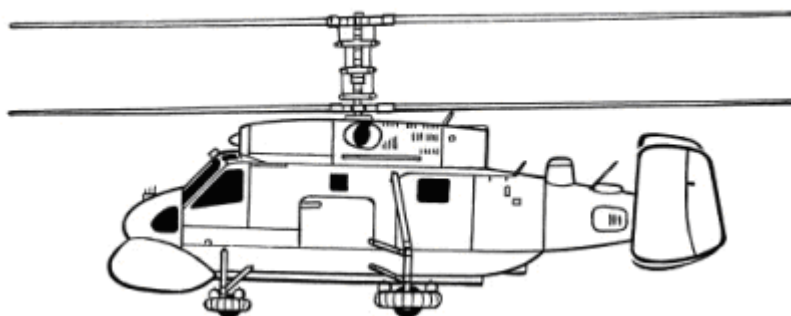


Rys 1. Typowy układ napędowy w śmigłowcu jednowirnikowym.

W śmigłowcach dwuwirnikowych nie ma potrzeby wprowadzania śmigła ogonowego, ponieważ reakcje od przeciwbieżnych współosiowych wirników równoważą się. Poza redukcją prędkości obrotowej przekładnia główna jest również odpowiedzialna za zbieranie mocy od kilku jednostek napędowych.

W małych śmigłowcach o masie startowej do ok. 3 ton stosuje się zazwyczaj napęd jednosilnikowy, ale w śmigłowcach cięższych stosuje się układ dwusilnikowy lub nawet trzysilnikowy.

Ważnym elementem przekładni są również sprzęgła jednokierunkowe umieszczone na wałach wejściowych w przekładni głównej. Mają one za podstawowe zadanie odłączanie silnika niepracującego w przypadku jego awarii tak, aby silnik pracujący nie musiał go napędzać i przez to tracić dodatkową moc. Inną ważną cechą przekładni głównych jest bezpośrednie sprzęgnięcie mechaniczne pomiędzy wirnikiem głównym a śmigłem ogonowym. Jest to warunek konieczny do wykonania autorotacji. Autorotację wykonuje się przy całkowitej utracie napędu od silników w śmigłowcu. Polega ona na rozkręcaniu rotora poprzez opadanie śmigłowca. Sprzęgnięcie mechaniczne pomiędzy oboma wirnikami zapewnia, iż śmigłowiec nie będzie się kręcił wokół własnej osi podczas opadania. Oczywiście zaistniały przypadek nie ma zastosowania do śmigłowców dwuwirnikowych o przeciwbieżnych obrotach.



Rys 2. Typowy układ wirników w śmigłowcu dwuwirnikowym

Kluczowym elementem przy konstrukcji przekładni jest wprowadzenie kilkustopniowego kąta pochylenia wału wirnika w stosunku do idealnego pionu. Pochylenie to wprowadza się po to, aby uzyskać siłę składową pochodzącą od siły nośnej, która będzie wymuszać na śmigłowcu lot do przodu.

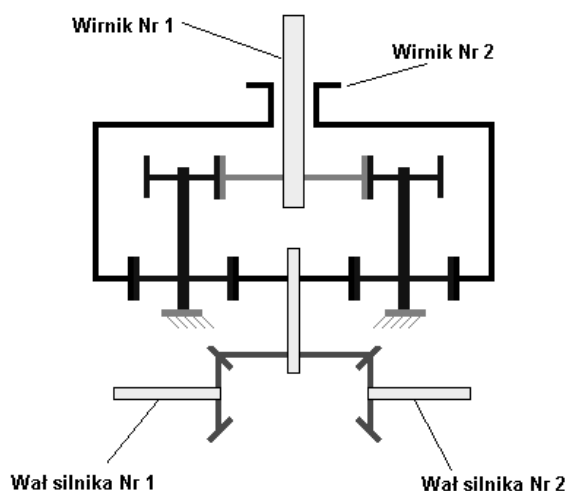
Obecna publikacja została poświęcona tylko śmigłowcom opracowanym w krajach Europy wschodniej ze względu na ograniczoną ilość informacji w tym zakresie. Budowa przekładni głównych śmigłowców konstruowanych w krajach Europy zachodniej oraz Ameryki Północnej zostaną poświęcone kolejne publikacje.

2. PRZEKŁADNIE GŁÓWNE ŚMIGŁOWCÓW LEKKICH

2.1. ŚMIGŁOWIEC KAMOW KA-26

Śmigłowiec KA-26 wszedł do produkcji w roku 1966 w Związku Radzieckim. Głównym zastosowaniem tego śmigłowca są prace rolnicze ze względu na jego małą prędkość przelotową ok. 150 km/h. Podstawowe dane o napędzie śmigłowca przedstawiono w tabeli 1.

Układ kinematyczny przekładni głównej śmigłowca przedstawiono na rysunku 3. Śmigłowiec napędzany jest dwoma silnikami tłokowymi. Pierwszy stopień przekładni stanowią dwa zębniaki stożkowe zazębiane ze wspólnym kołem zbiorczym. W celu napędu dwóch wałów wykorzystano przekładnię o zazębieniu wewnętrznym. Przekładnia jest dość lekka ok. 200kg, wynika to z małych mocy silnika i niskiego przełożenia przekładni 2,94, wystarczającego dzięki zastosowaniu niskoobrotowych silników tłokowych.



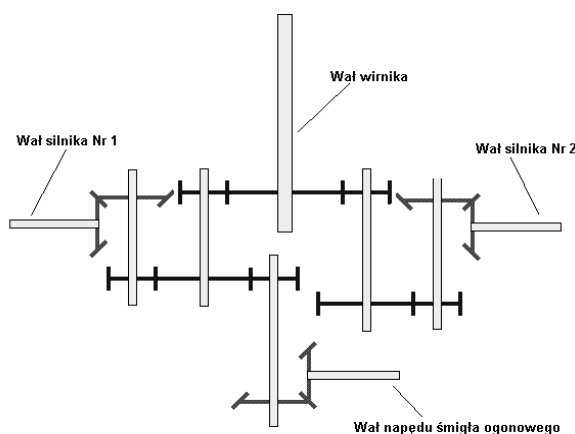
Rys 3. Układ kinematyczny przekładni R-26

Tabela 1. Podstawowe parametry napędu śmigłowca KA-26.

Śmigłowiec Kamow KA-26								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Wedenejew	KM	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
3200	M-14W-26	325	865	13	294	R-26	2,94	200

2.2. ŚMIGŁOWIEC PZL MI-2

Śmigłowiec Mi-2 został przekazany do produkcji przez Moskiewskie biuro konstrukcyjne Mil w roku 1965. Produkcja jego odbywała w oparciu o licencję wyłącznie w polskich zakładach WSK PZL Świdnik.. Wykorzystywany był głównie jako śmigłowiec dyspozycyjny. Podstawowe dane o napędzie śmigłowca przedstawiono w tabeli 2. Śmigłowiec jest napędzany dwoma silnikami turbowałowymi. Silniki dzięki wbudowanemu reduktorowi wstępnemu mają dość niską prędkość obrotową na wale wyjściowym na poziomie 5900 obr/min. Wskutek tego przełożenie przekładni jest dość niskie i wynosi 23,98. Schemat kinematyczny przekładni przedstawiono na rysunku 4. Ze względu na zastosowanie klasycznej przekładni walcowej o osiach równoległych, mimo niskiego przełożenia na poziomie 23,98, masa przekładni jest dość duża, bo wynosi ok. 300kg.



Rys 4. Układ kinematyczny przekładni WR-2

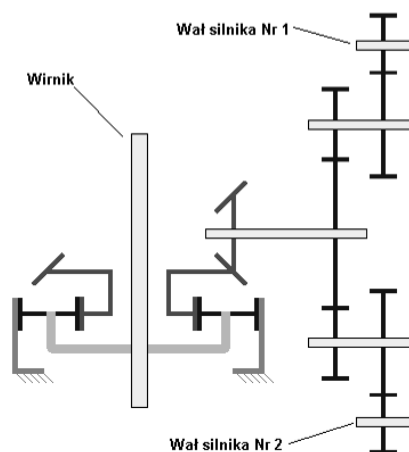
Tabela 2. Podstawowe parametry napędu śmigłowca Mi-2

Śmigłowiec Mi-2								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Izotow	KW	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
3700	GTD-350	430	5900	14,56	246	WR-2	23,98	300

3. PRZEKŁADNIE GŁÓWNE ŚMIGŁOWCÓW ŚREDNIEJ WIELKOŚCI

3.1. ŚMIGŁOWIEC PZL W-3 SOKÓŁ

Śmigłowiec sokół jest napędzany dwoma silnikami PZL10W. Jest to pierwsza całkowicie Polska konstrukcja budowana w zakładach PZL w Świdniku. Śmigłowiec został wprowadzony do użytkowania w roku 1985. Podstawowe dane o napędzie śmigłowca umieszczono w tabeli 3. Ze względu na większą moc silników niż w śmigłowcach lekkich typowo w tej klasie stosuje się silnik z napędem bezpośrednim, tzn. silnik nie jest wyposażony w reduktor wstępny. Umożliwia to uzyskanie dosyć małych momentów na wejściu do przekładni, ale konsekwencją tego jest duży stopień redukcji samej przekładni. Stopień redukcji w przekładni wynosi 87,92. Tak znaczny stopień redukcji oraz duża moc przenoszona przez napęd wymagały zastosowania przekładni planetarnej na ostatnim stopniu reduktora. Pozwoliło to na obniżenie masy przekładni oraz utrzymanie kompaktowej konstrukcji. Schemat kinematyczny przekładni przedstawiono na rysunku 5.



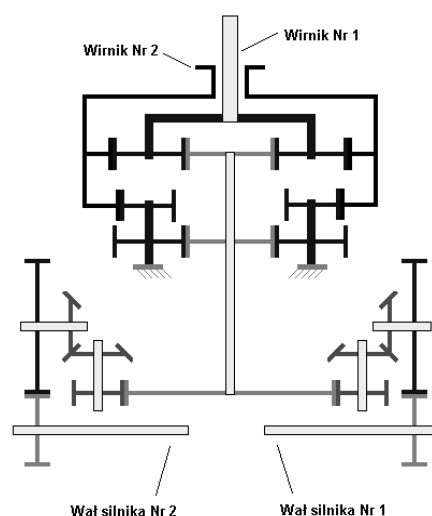
Rys 5. Układ kinematyczny przekładni WR-3

Tabela 3. Podstawowe parametry napędu śmigłowca W-3A Sokół

Śmigłowiec PZL-W3A								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	PZL Rzeszów	KW	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
6400	PZL-10W	900	22490	15,7	256,75	WR-3	87,92	465

3.2. ŚMIGŁOWIEC KAMOW KA-25

Śmigłowiec Kamow KA-25 został wprowadzony do użytkowania przez radzieckie zakłady Kamowa w roku 1966 jako śmigłowiec ratownictwa morskiego oraz zwalczania okrętów podwodnych stacjonujący na pokładzie statków floty morskiej. Jak prawie wszystkie konstrukcje Kamowa jest to śmigłowiec dwuwirnikowy. Podstawowe dane napędu śmigłowca KA-25 przedstawiono w tabeli 4.



Rys 6. Układ kinematyczny przekładni RW-3F

Schemat kinematyczny przekładni śmigłowca jest jednym z najbardziej złożonych. Układ przeciwbieżnych wałów oraz duża moc wymagały znacznego rozbudowania przekładni, co odbiło się na jej wadze. Przekładnia waży ponad 560 kg oraz ma przełożenie 80,1.

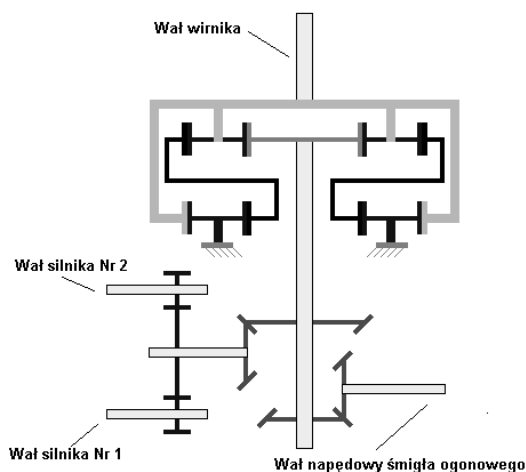
Tabela 4. Podstawowe parametry napędu śmigłowca KA-25.

Śmigłowiec Kamow KA-25								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Glusznikow	KM	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
7500	GTD-3F	887	18900	15,7	237	RW-3F	80,1	560

3.3. ŚMIGŁOWCE Z RODZINY MI-8,

Śmigłowiec Mi-8 wprowadzono do produkcji w roku 1967. Jest to również konstrukcja Moskiewskiego biura konstrukcyjnego Mil. Został on podstawowym śmigłowcem transportowym w wielu krajach. Wyprodukowano również kilka modyfikacji tego śmigłowca. Pierwszą była Mi-17, z przeznaczeniem na eksport, a następną Mi-14 z modyfikacją dolnej części kadłuba na kształt łodzi umożliwiającą lądowanie na wodzie.

Silniki śmigłowców z rodziny Mi-2 posiadają dużą moc i stosunkowo niskie obroty, jednocześnie ze względu na masę śmigłowca średnica wirnika musiała znacznie wzrosnąć. Wymagało to znacznej redukcji w przekładni na poziomie 62,5. Wszystkie te czynniki powodują znaczny wzrost masy samej przekładni tj. ok. 785kg. Podstawowe dane napędu śmigłowców z rodziny Mi-8 przedstawiono w Tabeli 5.



Rys 7. Układ kinematyczny przekładni WR-8

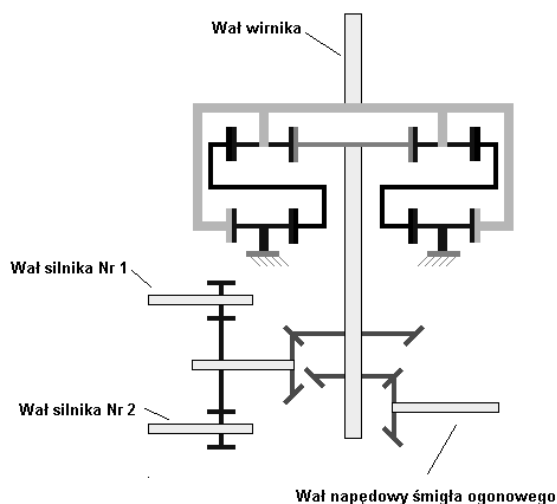
Duża moc przy znacznej redukcji wymagała wprowadzenia dwustopniowej przekładni planetarnej dziesięcioma kołami satelit na każdym stopniu. Schemat kinematyczny przekładni przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 5. Podstawowe parametry napędu śmigłowców z rodziny Mi-8.

Śmigłowiec MI M-8/M-14/M-17								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Izotow	KW	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
12000	TW3-117	1700	12000	21,91	192	WR-8	62,5	785

3.4. ŚMIGŁOWIEC Mi-24

Śmigłowiec Mi-24 został wprowadzony do służby w roku 1972. Jest to radziecki śmigłowiec szturmowy przeznaczony do zwalczania czołgów oraz innych celów naziemnych. Konstrukcyjne, wywodzi się on bezpośrednio z konstrukcji śmigłowca Mi-8. Śmigłowiec Mi-24 ma bardzo podobnie rozwiązany reduktor przekładni głównej. Schemat kinematyczny śmigłowca przedstawiono na rysunku 8. Jedyną zmianą jest zmniejszenie średnicy rotora dla poprawy możliwości manewrowania śmigłowcem na polu walki. Ponieważ masa śmigłowca jest podobna jak w Mi-8, tak więc aby uzyskać właściwą siłę nośną zwiększono prędkość obrotową wirnika, co wymagało modyfikacji w przełożeniu w przekładni głównej. Podstawowe parametry napędu śmigłowca Mi-24 przedstawiono w tabeli 6.



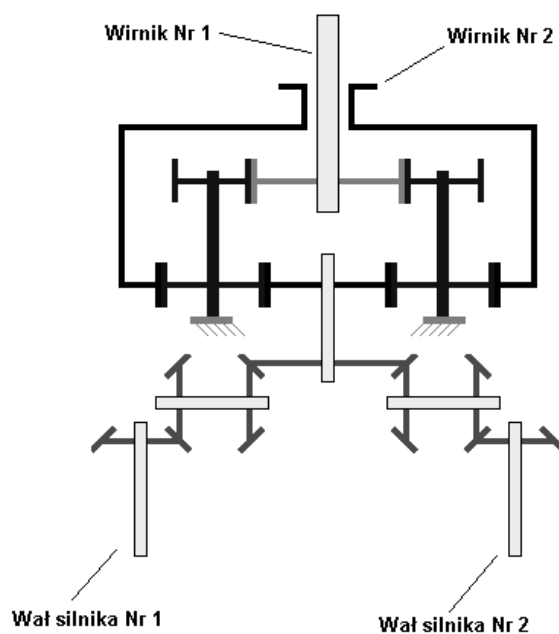
Rys 8. Układ kinematyczny przekładni WR-24

Tabela 6. Podstawowe parametry napędu śmigłowca Mi-24.

Śmigłowiec Mi M-24/Mi-28								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Izotow	KW	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
11500	TW3-117	2200	12000	17,3	240	WR-24	50	690

3.5. ŚMIGŁOWIEC KA-32

Śmigłowiec KA-32 produkcji zakładów Kamova został wprowadzony do użytkowania w 1982 roku jako cywilna wersja śmigłowca wojskowego KA-27 stosowanego w marynarce wojennej jako śmigłowiec do zwalczania statków podwodnych. Schemat kinematyczny przekładni przedstawiono na rysunku 9. Jest to podobne rozwiązanie jak w śmigłowcu KA-26 z tym, że przenoszona moc jest znacznie większa oraz zastosowano tutaj silniki turbowałowe. Podstawowe parametry napędu śmigłowca przedstawiono w tabeli 7.



Rys 9. Układ kinematyczny przekładni WR-252.

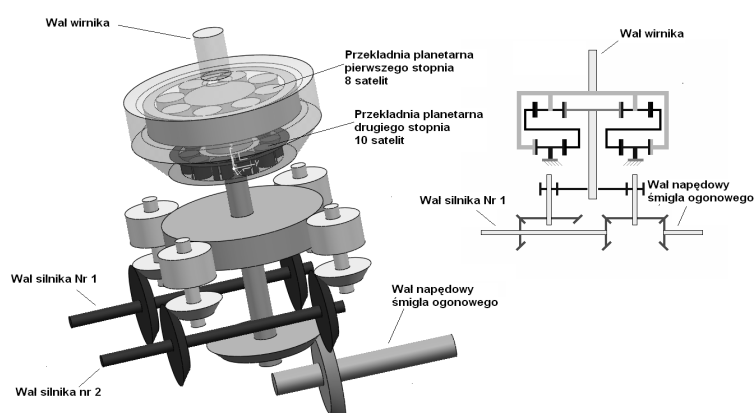
Tabela 7. Podstawowe parametry napędu śmigłowca KA-32.

Śmigłowiec Kamow KA-32								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Klimov	KM	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
12000	TW3-117	2200	12000	15,8	257	WR-252	46,7	720

4. PRZEKŁADNIE GŁÓWNE ŚMIGŁOWCÓW CIĘŻKICH

4.1. ŚMIGŁOWIEC MI-6

Śmigłowiec ten został wprowadzony do użytkowania w 1962. W owym czasie był to największy śmigłowiec transportowy świata, mogący przewozić do 12 ton ładunku. Ze względu na ogromne moce silników skrzynia przekładniowa została skonstruowana z podziałem momentu obrotowego oraz z dwustopniowym reduktorem planetarnym. Schemat kinematyczny śmigłowca przedstawiono na rysunku 10.



Rys 9. Układ kinematyczny przekładni R-7.

Charakterystycznym jest zastosowanie przekładni stożkowych rozdzielających moment z jednego silnika na dwie pary zębate na pierwszym stopniu przekładni, aby zminimalizować siły przenoszone przez to zazębienie a w konsekwencji siły poosiowe mające znaczący wpływ na dobór łożysk.

Tabela 7. Podstawowe parametry napędu śmigłowca Mi-6.

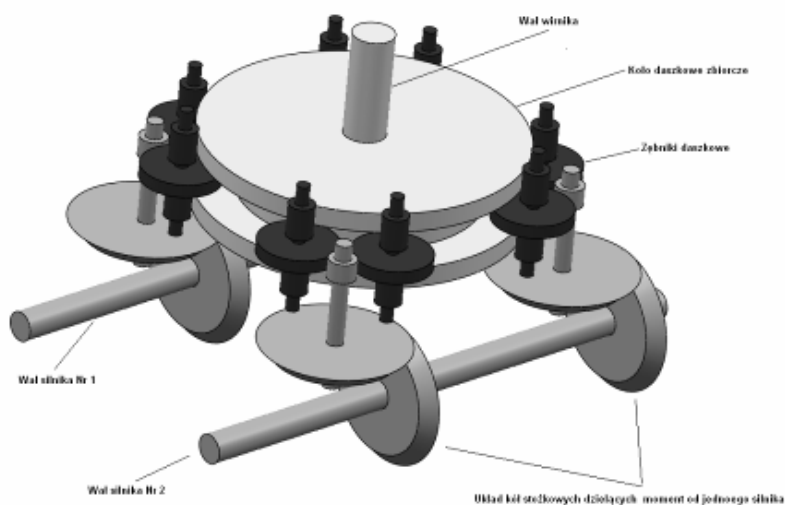
Śmigłowiec MI M-6/M-10								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Solowjow	KW	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
42500	D-25W	5500	8300	35	120	R-7	69,16	3200

Parametry napędu śmigłowca Mi-6 przedstawiono w tabeli 7. Duży stopień redukcji w przekładni wynoszący 69,16 oraz ogromna moc powodują iż przekładnia główna tego śmigłowca waży ok. 3200kg. Jest to oczywiście również funkcją ogromnej masy startowej śmigłowca jak i ogromnej średnicy jego wir-

nika. Na podstawie tego płatowca powstał również śmigłowiec Mi-10 mający udźwig 15 ton.

4.2. ŚMIGŁOWIEC MI-26

Rosyjski śmigłowiec Mi-26 jest obecnie największym śmigłowcem budowanym seryjnie na świecie. Został on wprowadzony do użytkowania w 1983 roku. Posiada on ogromny 32 metrowy ośmiołopatowy wirnik, który obraca się z prędkością 132 obr/min. Jest on tylko nieznacznie cięższy od swojego poprzednika Mi-6, ale dzięki lepszemu napędowi i nowemu wirnikowi może przewozić aż do 20 ton ładunku. W tym śmigłowcu jak i w jego pierwowzorze zastosowano również mechanizm podziału momentu obrotowego poprzez koła stożkowe, z tym że zamiast reduktora planetarnego wprowadzono reduktor walcowy składający się z jednego koła zbiorczego oraz ośmiu zębników. Dodatkowo koło zbiorcze oraz zębniki zbudowano w układzie dwuwieżkowym ze skośną linią zęba. Dzięki temu otrzymano koła daszkowe, które nie wytwarzają reakcji poposiowej. Pozwala to na zastosowanie łożysk wałeczkowych o dużej nośności. Schemat kinematyczny przekładni przedstawiono na rysunku 10.



Rys 10. Układ kinematyczny przekładni WR-26.

Również układ napędowy tego śmigłowca jest pod każdym względem wyjątkowy. Śmigłowiec ten posiada największe budowane seryjnie silniki turbowałowe o mocy 11400KM każdy. Przekładnia główna tego śmigłowca waży

3639 kilogramów. Podstawowe parametry układu napędowego śmigłowca zebrano w tabeli 8.

Tabela 8. Podstawowe parametry napędu śmigłowca Mi-26.

Śmigłowiec Mi Mi-26								
Maksymalna masa startowa	Silnik	Moc silnika	Obroty silnika	Średnica wirnika	Prędkość obrotowa wirnika	Przekładnia główna	Przełożenie przekładni	Masa przekładni
kg	Łotariew	kW	obr/min	m	obr/min	Typ		kg
56000	D-136	11400	8300	32	132	WR-26	63	3639

5. WNIOSKI

Przekładnie główne śmigłowców są mechanizmami pracującymi pod wysokimi obciążeniami. Jednocześnie ich niezawodność jest kluczowym elementem bezpieczeństwa lotu śmigłowca. Duże moce przenoszone przez przekładnie wymagają precyzyjnych obliczeń kół zębatach, łożysk układu olejowego, oraz samych kadłubów nośnych. Z drugiej strony masa przekładni stanowi poważny udział procentowy w masie całego śmigłowca. Dlatego też zaprojektowanie lekkich elementów spełniających wymagania bezpieczeństwa lotu wymaga wiele praktyki oraz sprawnych metod obliczeniowych. Jednym z kluczowych elementów, które występują w każdej przekładni głównej napędzanej silnikiem turbinowym jest para zębata stożkowa. Właściwe zrozumienie warunków pracy, dokładny aparat obliczeniowy, ściśle przestrzegane warunki produkcji i staranny montaż tych elementów decyduje o jakości i trwałości produkowanych przekładni.

LITERATURA

[1] Praca zbiorowa pod red. Kazimierza Szabelskiego, Wiesława Łucjana. Wstęp do konstrukcji śmigłowców. WKŁ Warszawa 2008.

DESIGN OF MAIN GEARBOX FOR HELICOPTER PRODUCED BY EASTERN EUROPE COUNTRIES

SUMMARY

This article presents designs of main gearboxes applied in helicopter transmission developed in Eastern Europe. The paper presents kinematical schemes, and basic information of operating conditions for selected helicopters