

Jerzy MERKISZ  
Jarosław MARKOWSKI  
Dominik KARPIŃSKI  
Marta GALANT

PTNSS–2015–3357

## Analysis of the hybrid propulsion system in the aspect of use in an unmanned aerial vehicle

*The development of unmanned aerial vehicles is focused on imposed requirements for new field of application this type of aircraft. One of them is possibility to perform of the air operation in the long term. This task is closely associated with the design of the airframe of an aircraft and the propulsion system. The paper presents the evaluation of the possibility of selecting the hybrid propulsion system for the unmanned aerial vehicle. A propeller drive consisting of an electric engine and a internal combustion engine to charging the batteries was chosen. In order to select the internal combustion engine was determined of requirements for engine power needed to power a propeller drive. On the basis of research were plotted performance characteristics for the selected engines, which were used to develop of variants of the hybrid drive system.*

Key words: *electric engine, internal combustion engine, hybrid propulsion system*

### Analiza właściwości hybrydowego układu napędowego w aspekcie zastosowania w bezzałogowym statku powietrznym

*Rozwój bezzałogowych statków powietrznych ukierunkowany jest na sprostanie wielu wymagań związanych z nowymi funkcjami zastosowania. Jednym z nich jest uzyskanie możliwie długiego czasu wykonywanej operacji lotniczej. Realizacja tego zadania ściśle wiąże się z konstrukcją płatowca oraz konstrukcją układu napędowego. W artykule przedstawiono zagadnienia oceny możliwości doboru hybrydowego układu napędowego przeznaczonego do zastosowania w bezzałogowym statku powietrznym. Wybrano napęd śmigłowy złożony z silnika elektrycznego oraz spalinowego, stanowiącego źródło zasilania akumulatorów. W celu doboru silnika spalinowego określono zapotrzebowanie na moc potrzebną do zasilania napędu śmigłowego. Na podstawie badań wykreślono charakterystyki pracy wybranych napędów, które wykorzystano do opracowania wariantów hybrydowego układu napędowego.*

Słowa kluczowe: *silnik elektryczny, silnik spalinowy, napęd hybrydowy*

### 1. Wstęp

Ograniczone zasoby paliw kopalnych oraz wzrost emisji związków szkodliwych spalin w ostatnich latach, staje się istotnym problemem w eksploatacji napędów lotniczych. Z tego powodu poszukuje się alternatywnych rozwiązań, które mogłyby częściowo lub całkowicie zastąpić rozwiązania konwencjonalne. Jako podstawowy napęd lotniczy samolotów lekkich, ultralekkich oraz małych modeli latających, można wyróżnić silnik spalinowy. W modelarstwie oraz prototypowych samolotach bezzałogowych stosowane są także napędy elektryczne stanowiące alternatywę dla silników spalinowych. Spośród innych rozwiązań środków transportu można wyróżnić układy hybrydowe, które z powodzeniem stosowane są w pojazdach drogowych. W związku z tym faktem możliwe jest poszukiwanie sposobów adaptacji tego typu napędów w innych obiektach. Przykładem takich obiektów mogą być bezzałogowe statki powietrzne. Koncepcja zastosowania napędu hybrydowego stanowi próbę połączenia zalet silnika spalinowego (duża wartość energetyczna paliwa) oraz silnika

elektrycznego (cichy napęd i wysoka sprawność przetwarzania energii) [1].

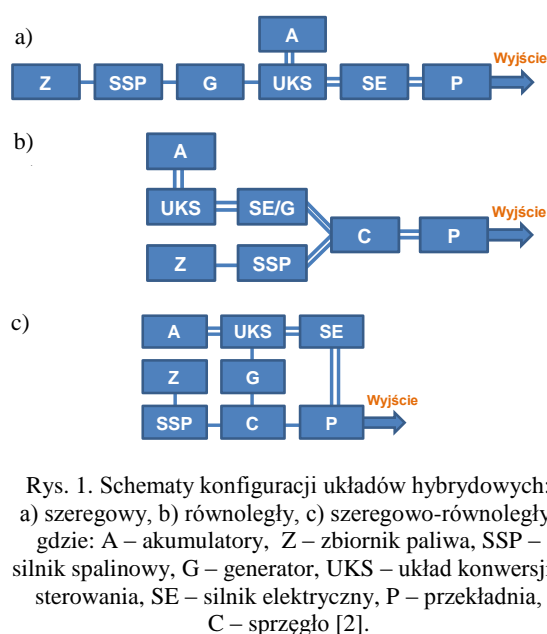
W ostatnich latach odnotowuje się coraz większe zainteresowanie badaniami nad możliwością wykorzystania układów hybrydowych w bezzałogowych statkach powietrznych, w szczególności do realizacji zadań militarnych. Spośród głównych zalet do tego typu zastosowań można wyróżnić: wydłużenie czasu lotu istotne z punktu widzenia realizowanej misji bojowej, ograniczenie emisji hałasu zmniejszające prawdopodobieństwo identyfikacji bezzałogowego statku powietrznego. Rozwój układów hybrydowych w branży lotniczej nie dotyczy wyłącznie zadań militarnych, lecz także możliwe jest ich zastosowanie w działaniach służb cywilnych, przykładowo tj. monitorowanie katastrof, pomiary geodezyjne czy meteorologiczne.

Układy hybrydowe charakteryzują się: cichą pracą przy wykorzystaniu energii zgromadzonej w akumulatorach, ładowaniem akumulatorów podczas lotu, ograniczeniem udziału silnika spalinowego w czasie fazy przelotu, posiadaniem dodatkowego źródła energii. Efektem wymienionych cech układu hybrydowego jest przede wszystkim możli-

wość zwiększenia czasu eksploatacji napędu lotniczego oraz ograniczenie zużycia paliwa. Dzięki wykorzystaniu układu hybrydowego w trybie pracy wyłącznie silnika elektrycznego zasilanego z akumulatorów możliwa jest poprawa parametrów ekologicznych napędu lotniczego w stosunku do rozwiązań zawierających pojedyncze źródło napędu w postaci silnika spalinowego [2, 3].

Ze względu na układ współpracy silnika spalinowego i elektrycznego, napęd hybrydowy można podzielić na: szeregowy, równoległy, szeregowo-równoległy. W układzie szeregowym silnik spalinowy połączony z generatorem ładuje akumulatory, zasilające silnik elektryczny napędzający śmigło. Rozwiązanie tego typu charakteryzują się sprawnością porównywalną z napędem spalinowym, jednak wymaga zastosowania oddzielnego generatora przeznaczonego do ładowania akumulatorów. Z punktu widzenia zastosowania tego typu układu w bezałogowym statku powietrznym stanowi to istotną wadę, gdyż w tego typu obiektach latających masa całego układu napędowego jest jednym z głównych wyznaczników na etapie ich konstruowania. W układzie tym cała energia zespołu silnik spalinowy-generator prądu jest zamieniana na energię elektryczną, a następnie na mechaniczną. Szeregowy układ hybrydowy charakteryzuje się niższą sprawnością w stosunku do układu równoległego, gdzie silnik spalinowy współpracuje z silnikiem elektrycznym na wspólnym wale lub przez przekładnię mechaniczną. Równoległy układ hybrydowy charakteryzuje się większą mocą maksymalną, przy wspomaganie silnika spalinowego przez silnik elektryczny. W przypadku układu szeregowo-równoległego możliwe jest najbardziej optymalne wykorzystanie zalet napędu hybrydowego [4].

Schematy poszczególnych konfiguracji przedstawiono na rysunku 1.



## 2. Koncepcja hybrydowego układu napędowego

Proponowana koncepcja dotyczy zastosowania równoległego układu hybrydowego jako zespołu napędowego bezałogowego statku powietrznego. Zaletą równoległego układu hybrydowego, w kontekście zastosowania w bezałogowym statku powietrznym, jest możliwość napędzania śmigła za pomocą silnika elektrycznego lub spalinowego, jak również wykorzystanie silnika elektrycznego jako generatora przy napędzie śmigła wyłącznie przez silnik spalinowy. W tym przypadku maszyna elektryczna pracująca jako generator wykorzystuje nadwyżkę mocy silnika spalinowego do ładowania akumulatorów. W tego typu układzie zastosowane jest sprzęgło służące do rozłączania silnika spalinowego i elektrycznego. W proponowanej koncepcji zakłada się zastosowanie sprzęgła elektromagnetycznego. Wybór tego typu sprzęgła jest podyktowany jego dużą trwałością, jak również możliwością pracy przy niesynchronizowanej prędkości obrotowej elementu napędzającego i napędzanego. Sprzęgło tego typu umożliwi także wyeliminowanie zbędnych elementów mechanicznych niezbędnych do jego obsługi.

Pracę lotniczego układu hybrydowego zastosowanego w bezałogowym statku powietrznym można podzielić, ze względu na wykonywaną fazę lotu:

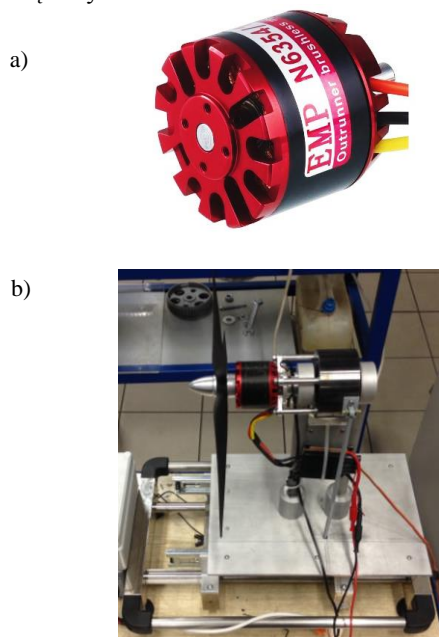
- faza startu i wznoszenia,
- faza przelotu,
- faza zniżania i lądowania.

Dla wyznaczonych faz konieczne jest określenie udziałów pracy poszczególnych silników. W proponowanej koncepcji układu hybrydowego zakłada się, że w czasie startu i wznoszenia pracuje silnik spalinowy, który może być wspomagany przez umieszczony na wspólnym wale silnik elektryczny. W tym przypadku silnik elektryczny może przyjąć rolę generatora elektrycznego, który przez układ konwersji dostarcza energię elektryczną do akumulatorów. Po ustabilizowaniu warunków lotu (prędkość i wysokość lotu), następuje unieruchomienie jednostki spalinowej, gdzie śmigło napędza wyłącznie silnik elektryczny, wykorzystujący energię elektryczną zgromadzoną w akumulatorach. W przypadku rozładowania akumulatorów do ustalonego poziomu bezpieczeństwa, następuje rozruch silnika spalinowego, który napędzając śmigło napędza także silnik elektryczny, pracujący w roli generatora, który poprzez układ konwersji energii dostarcza energię elektryczną do akumulatorów. W czasie etapu zniżania i lądowania śmigło napędza silnik elektryczny, ze względu na mniejsze zapotrzebowanie na moc (około 30% mocy maksymalnej), co wiąże się z wyższą sprawnością silnika elektrycznego, w stosunku do silnika spalinowego pracującego w warunkach małej prędkości obrotowej wału silnika.

Celem niniejszej pracy była analiza doboru elementów składowych układu do zastosowania w lotniczym układzie hybrydowym, przeznaczonym do bezzałogowego statku powietrznego. W artykule przedstawiono badania przeprowadzone dla dwóch napędów śmigłowych, gdzie w pierwszym śmigło napędzał silnik elektryczny, natomiast w drugim – silnik spalinowy. W efekcie wyznaczono charakterystyki pracy, które posłużyły do opracowania wstępnych założeń układu. Dodatkowo dokonano pomiarów prędkości obrotowej wału zespołu napędowego, siły ciągu oraz napięcia elektrycznego wygenerowanego w czasie pracy zespołu śmigło-silnik elektryczny-silnik spalinowy.

### 3. Metodyka badań

Do najbardziej rozpowszechnionych silników elektrycznych, o przeznaczeniu modelarskim, należą bezszczotkowe silniki prądu zmiennego. Zastosowanie tego typu napędu umożliwi osiągnięcie dużych sprawności, przy jednoczesnej łatwości sterowania i obsługi. Silniki tego typu charakteryzują się także dużym stosunkiem mocy do masy, jak również umożliwiają pracę w szerokim zakresie prędkości obrotowej wału silnika. Z uwagi na wymagania dotyczące napędu przeznaczonego do bezzałogowego statku powietrznego wybrany silnik elektryczny powinien charakteryzować się jak najmniejszymi wymiarami i masą oraz możliwie największą sprawnością. W związku z tym do badań wybrano trójfazowy silnik elektryczny prądu zmiennego firmy EMP N6354/13 (rys. 2), którego dane techniczne przedstawiono w tabeli 1. W celu otrzymania dużej wartości momentu przy małych gabarytach w silniku zastosowano wirnik zewnętrzny.



Rys. 2. Silnik elektryczny EMP N6354/13 (a) oraz widok silnika na stanowisku badawczym (b)

Tab. 1. Dane techniczne silnika EMP N6354/13

Parametr	Wartość
Moc [W]	2450
kV	250
Prąd bez obciążenia [A]	1,7
Opór wewnętrzny [V]	53
Średnica [mm]	63,4
Długość [mm]	57
Średnica wału wyjściowego [mm]	10
Masa silnika [g]	558

W proponowanej koncepcji układu hybrydowego zakłada się, że wspomniany silnik będzie stanowił główne źródło napędu śmigła. Do wykreślenia charakterystyk eksploatacyjnych silnika elektrycznego i jednocześnie doboru śmigła, wybrano trzy rodzaje śmigieł różniące się średnicą, profilem łopat, liczbą łopat oraz materiałem, z którego zostały wykonane (tab. 2).

Silnik elektryczny w czasie badań zasilano z dwóch akumulatorów litowo-polimerowych DesirePower o pojemności 4000 mAh. Akumulatory tego typu charakteryzują się: małą masą, dużym napięciem pracy, małą stratą pojemności w ujemnych temperaturach. Zastosowane akumulatory połączono szeregowo, w wyniku czego uzyskano napięcie zasilania równe 37 V.

Tab. 2. Dane techniczne śmigieł do zastosowania z silnikiem elektrycznym

Typ	Średnica śmigła [mm]	Skok śmigła [mm]	Materiał
EMP 18x10E (dwułopatowe)	457,2	254,0	Tworzywo sztuczne
EMP 16x8 (trójłopatowe)	406,4	203,2	Tworzywo sztuczne
Fiala 19x10 Electro	482,6	254,0	Drewno

Drugi obiekt badań wybrany jako element składowy proponowanego układu hybrydowego stanowił silnik spalinowy, dwusuwowy, w układzie bokser (rys. 3). Silnik został wyprodukowany przez firmę Zhejiang RCGF Model&Engine Co. i oznaczony symbolem RCGF 30. W proponowanej koncepcji układu hybrydowego przeznaczonego do bezzałogowego statku powietrznego uwzględniono w szczególności wymiary oraz masę elementów składowych układu. W związku z tym dokonano wyboru silnika charakteryzującego się dużym stosunkiem mocy do masy, jak również bardzo dobrym wyważeniem. Dane techniczne silnika spalinowego przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 3. Silnik RCGF 30 (a) oraz widok silnika na stanowisku badawczym (b) [4]

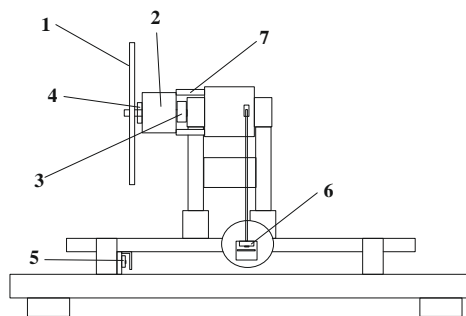
Tab. 3. Dane techniczne silnika RCGF 30 [4]

Parametr	Wartość
Pojemność skokowa silnika (cm <sup>3</sup> )	30
Moc wyjściowa [W]	2800
Zakres użytecznej prędkości obrotowej wału silnika [obr/min]	1500 - 7000
Układ zapłonowy	DC-CDI, Napięcie zasilania 4,8-6V
Zasilanie	Benzyna bezołłowia + olej syntetyczny (30:1)
Masa silnika [g]	970

Do wyznaczenia charakterystyk pracy silnika spalinowego zastosowano śmigło MM 18x10 wykonane z włókna węglowego o średnicy śmigła 457,2 mm i skoku śmigła równym 254 mm.

Głównym celem badań było wykreślenie charakterystyk wybranych silników oraz zespołu śmigło-silnik elektryczny-silnik spalinowy. W celu wykreślenia charakterystyk pracy silników wykorzystano specjalnie zaprojektowane stanowisko badawcze (rys. 4), umożliwiające pomiar następujących parametrów:

- siła ciągu,
- siła poprzeczna,
- prędkość obrotowa wału silnika,
- moc wejściowa,



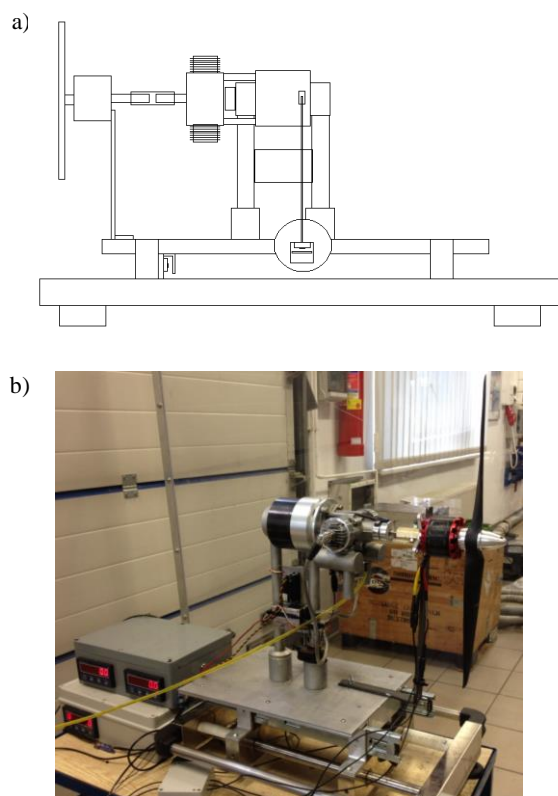
Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego: 1 – badane śmigło, 2 – silnik elektryczny/silnik spalinowy, 3 – czujnik prędkości obrotowej wału (silnik elektryczny), 4 – czujnik prędkości obrotowej wału (silnik spalinowy), 5 – czujnik siły ciągu, 6 – czujnik siły poprzecznej, 7 – flansza dystansowa

Stanowisko badawcze wyposażono w dwa czujniki tensometryczne umożliwiające przeprowadzenie pomiarów siły ciągu oraz siły poprzecznej. Do wizualizacji wyników z zastosowanych czujników wykorzystano programowalne wskaźniki MD150T firmy Wobit. Pomiar prędkości obrotowej wału silnika na przygotowanym stanowisku różnił się w zależności od badanego silnika. W przypadku pomiarów prędkości obrotowej wału silnika, przeprowadzanych dla silnika elektrycznego, pomiar wykonano za pomocą czujnika realizującego pomiar metodą optyczną, wykorzystując otwór w wale silnika. Wykonanie pomiarów wspomnianego parametru, dla silnika spalinowego, przeprowadzono wykorzystując czujnik Halla, dostarczany w komplecie z silnikiem przez producenta.

Przeprowadzone badania podzielono na trzy cykle badawcze. Pierwszy cykl dotyczył wykonania pomiarów dla silnika elektrycznego, które przeprowadzono w zakresie siły ciągu od 10 N do 50 N. Wartości otrzymane podczas tego cyklu posłużyły do wykreślenia charakterystyk pracy elektrycznego napędu śmigłowego. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów porównano także właściwości śmigieł, w celu wyboru najbardziej optymalnego pod kątem zastosowania zespołu w lotniczym układzie hybrydowym. Pomiar siły poprzecznej umożliwił wyznaczenie momentu obrotowego, który wraz ze zmierzoną prędkością obrotową posłużył do określenia mocy wyjściowej silnika.

Drugi cykl badań obejmował przeprowadzenie pomiarów dla silnika spalinowego. Pomiary wykonano w zakresie siły ciągu od 30 N do 70 N i posłużyły do wyznaczenia charakterystyk pracy spalinowego napędu śmigłowego. Przyjęty zakres badanych parametrów napędu śmigłowego uwarunkowany był możliwością zapewnienia, w tym zakresie, ustabilizowanej pracy silnika spalinowego na stanowisku pomiarowym. Podobnie jak w pierwszym cyklu, pomiar siły poprzecznej umożliwił wyznaczenie momentu obrotowego generowanego przez śmigło.

Trzeci cykl badawczy przeprowadzono w celu wyznaczenia parametrów eksploatacyjnych zespołu śmigło-silnik elektryczny-silnik spalinowy. W celu połączenia silnika elektrycznego ze spalinowym, wykonano sztywne połączenie umożliwiające przeprowadzenie badań. W cyklu tym zmierzono prędkość obrotową wału zespołu napędowego oraz siłę ciągu. Dodatkowo dokonano pomiaru napięcia elektrycznego generowanego przez silnik elektryczny, napędzany za pomocą silnika spalinowego na wspólnym wale. Zamianę napięcia prądu zmiennego na napięcie prądu stałego umożliwił przygotowany układ prostowniczy. Celem pomiaru wspomnianych parametrów była ocena możliwości zastosowania silnika elektrycznego jako generatora prądu elektrycznego do ładowania akumulatorów. Schemat i widok zaprojektowanego zespołu napędowego przedstawiono na rysunku 5.



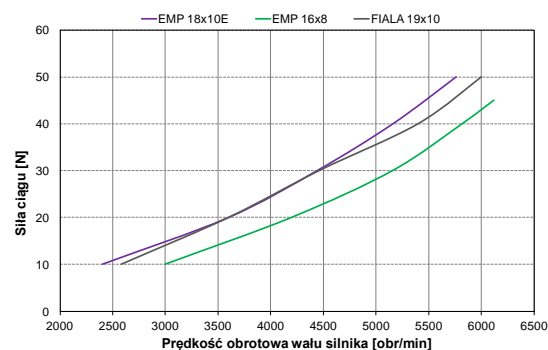
Rys. 5. Schemat zespołu napędowego (a) oraz widok zespołu na stanowisku badawczym (b)

Pomiar siły ciągu generowanej przez zespół umożliwił porównanie parametrów eksploatacyjnych silnika spalinowego pracującego indywidualnie oraz w zespole z silnikiem elektrycznym.

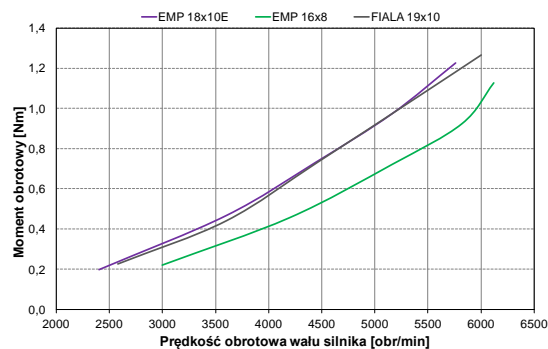
Przeprowadzone badania na stanowisku pomiarowym, umożliwiającym pomiar charakterystyk pracy zespołu, stanowiły badania wstępne na etapie opracowywania koncepcji hybrydowego układu napędowego.

#### 4. Wyniki i analiza pomiarów

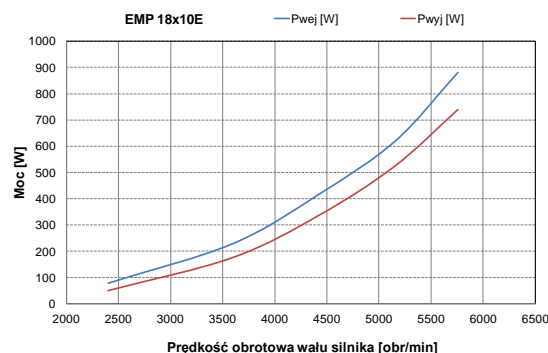
Na podstawie przeprowadzonych badań w cyklu pierwszym oraz wykonanych obliczeń wyznaczono charakterystyki przedstawiające zależności siły ciągu, momentu obrotowego, mocy wejściowej i wyjściowej od prędkości obrotowej wału silnika, przy zastosowaniu trzech typów śmigieł. Dodatkowo na podstawie zmierzonych wartości mocy wejściowej i wyjściowej wyznaczono sprawność napędu elektrycznego w zależności od momentu obrotowego. Wspomniane charakterystyki przedstawiono na rysunkach 6 – 11.



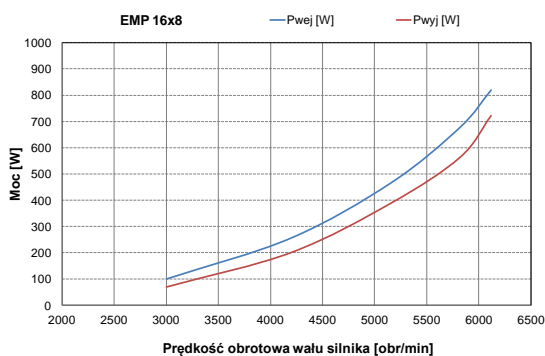
Rys. 6. Siła ciągu napędu elektrycznego w funkcji prędkości obrotowej wału silnika



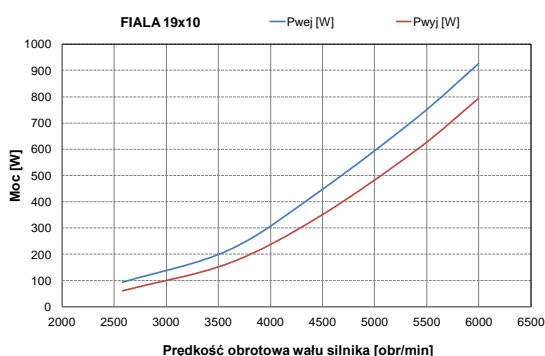
Rys. 7. Moment obrotowy silnika elektrycznego w funkcji prędkości obrotowej wału silnika



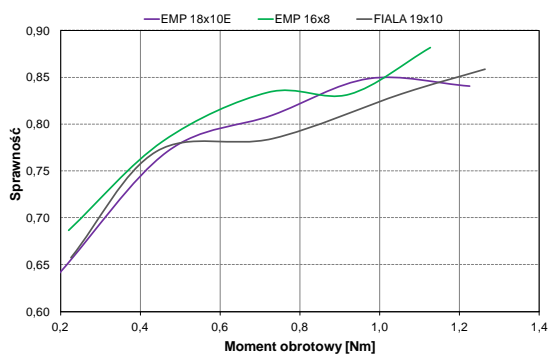
Rys. 8. Moc wyjściowa silnika elektrycznego w funkcji prędkości obrotowej wału silnika przy współpracy ze śmigłem EMP 18x10E



Rys. 9. Moc wyjściowa silnika elektrycznego w funkcji prędkości obrotowej wału silnika przy współpracy ze śmigłem EMP 16x8



Rys. 10. Moc wyjściowa silnika elektrycznego w funkcji prędkości obrotowej wału silnika przy współpracy ze śmigłem FIALA 19x10



Rys. 11. Sprawność silnika elektrycznego w funkcji momentu obrotowego

W czasie badania napędu śmigłowego, w którym zastosowano śmigła charakteryzujące się odmiennymi parametrami geometrycznymi takimi jak średnica, liczba łopat oraz ich kąt natarcia, odczytano różne prędkości obrotowe wału silnika uzyskane dla założonej wartości siły ciągu równej 50 N. Śmigła o średnicy powyżej 450 mm i skoku śmigła 254 mm oddziaływały z większym współczynnikiem oporu aerodynamicznego odpowiedzialnym za moment oporowy śmigła pokonywany przez silnik. W efekcie napęd śmigłowy współpracujący z tymi śmigłami potrzebował mniejszej prędkości obrotowej wału silnika w celu osiągnięcia siły ciągu równej 50 N, w stosunku do śmigła

trójłopatowego, gdzie pomimo wyższej prędkości obrotowej wału silnika nie osiągnięto wspomnianej wartości siły ciągu. W czasie badań silnika elektrycznego z śmigłem trójłopatowym uzyskano maksymalną siłę ciągu równą 45 N. Otrzymane przebiegi siły ciągu w zależności od prędkości obrotowej charakteryzuje wzrost przybliżony do wykładniczego.

Na kolejnej z charakterystyk przedstawiono zależność momentu obrotowego silnika elektrycznego od prędkości obrotowej wału silnika. Przeprowadzając badania w warunkach stacjonarnych uzyskano większe wartości siły ciągu oraz siły poprzecznej. W tym przypadku na silniku wywoływany jest większy opór śmigła. W czasie pomiaru zaobserwowano zwiększenie momentu obrotowego wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej wału silnika. Wykres momentu obrotowego silnika elektrycznego od prędkości obrotowej wału umożliwia ocenę wpływu zastosowanego śmigła na końcową wartość momentu obrotowego. Najwyższą wartość momentu obrotowego, dla siły ciągu równej 50 N, otrzymano podczas badania napędu śmigłowego z śmigłem FIALA 19x10, natomiast najmniejszy moment obrotowy uzyskano przy pracy silnika ze śmigłem trójłopatowym. Śmigło o większej średnicy oddziałuje z większym oporem na silnik w związku z czym w czasie prowadzonych badań otrzymano największe wartości dla śmigieł dwułopatowych charakteryzujących się większą średnicą w stosunku do śmigła trójłopatowego. Ponadto wyższa wartość momentu obrotowego uzyskana dla silnika z śmigłem wykonanym z drewna może wynikać z faktu, iż drewniane łopaty śmigła charakteryzują się zwykle grubszymi profilami, co przyczynia się do uzyskiwania maksimum doskonałości aerodynamicznej profili grubych przy mniejszych kątach natarcia w stosunku do profili cienkich.

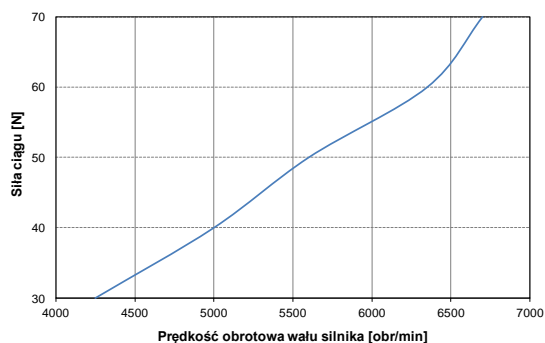
Na podstawie otrzymanych wartości mocy wyjściowej silnika elektrycznego, w zależności od prędkości obrotowej wału silnika, zaobserwowano największą energochłonność dla silnika elektrycznego, współpracującego z śmigłem EMP 18x10E, dla którego zmierzone zapotrzebowanie na moc elektryczną wyniosło 925 W przy sile ciągu równej 50 N. Najmniejszą energochłonność w zakresie badanych prędkości obrotowych wału silnika otrzymano dla silnika z śmigłem trójłopatowym. Najmniejsze zapotrzebowanie na moc silnika elektrycznego ze śmigłem EMP 16x8 wynika z właściwości geometrycznych tj. mniejszego współczynnika oporu aerodynamicznego na łopatach śmigła, co w konsekwencji uniemożliwiło osiągnięcie zakładanej wartości siły ciągu (50 N) dla badanych śmigieł. Przebiegi otrzymanych charakterystyk mocy wyjściowej w funkcji prędkości obrotowej silnika charakteryzują się przebiegiem wykładniczym.

Analizując przedstawione charakterystyki mocy wyjściowej i wyjściowej silnika elektrycznego,

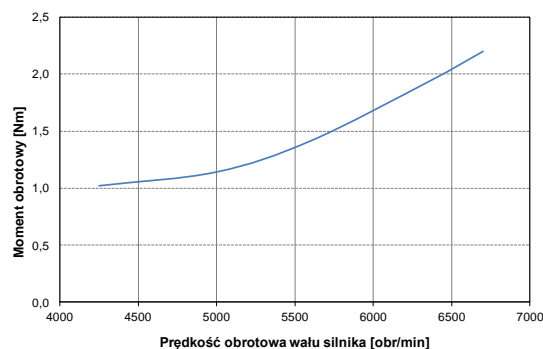
w funkcji prędkości obrotowej wału, można zaobserwować różnice pomiędzy większymi wartościami mocy elektrycznej, którą pobiera silnik, a mniejszą mocą mechaniczną uzyskaną na wyjściu z silnika. Największą moc wyjściową otrzymano dla śmigła charakteryzującego się największą średnicą, gdzie odnotowano także najwyższą moc wejściową. Wartość mocy wyjściowej silnika zgodnie ze wzorem zależna jest od momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej wału silnika. Śmigło wykonane z drewna osiągnęło najwyższą moc wyjściową przy prędkości obrotowej wału silnika wynoszącej 6000 obr/min oraz momencie obrotowym równym 1,27 Nm. W przypadku śmigła trójłopatowego zadana wyższa wartość prędkości obrotowej 6120 obr/min wału silnika nie zapewniła wyższej mocy wyjściowej ze względu na mniejszy moment obrotowy wynoszący 1,13 Nm.

Otrzymane przebiegi sprawności zawierają się w zakresie 64 – 88%. Niższe wartości sprawności wyznaczono dla małych nastaw prędkości obrotowej wału silnika. Praca silnika przy takich parametrach wiąże się z mniejszym natężeniem prądu, poniżej zakresu wysokiej sprawności silnika. Największą sprawność uzyskano dla silnika elektrycznego ze śmigłem trójłopatowym, która wyniosła 88%.

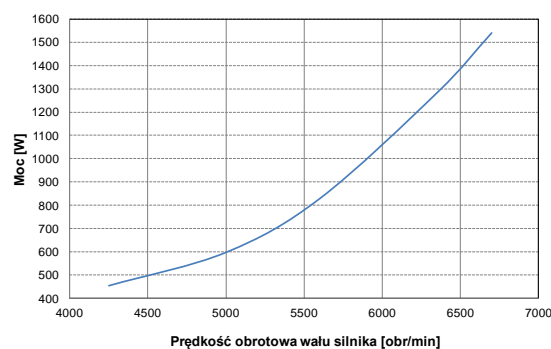
Na podstawie badań przeprowadzonych w cyklu drugim, wykreślono charakterystyki pracy silnika spalinowego ze śmigłem MM 18x10, przeznaczonym do tego typu napędu. Wyznaczone charakterystyki (rys. 12 – 15) przedstawiają zależności siły ciągu, momentu obrotowego, mocy wyjściowej od prędkości obrotowej wału silnika. Do wyznaczenia parametrów eksploatacyjnych wykorzystano śmigło zalecane dla silników spalinowych o pojemności silnika 26 – 35 cm<sup>3</sup> oraz zakresie prędkości obrotowych wału silnika 6500 – 8000 obr/min.



Rys. 12. Siła ciągu napędu spalinowego w zależności od prędkości obrotowej wału silnika



Rys. 13. Moment obrotowy silnika spalinowego w zależności od prędkości obrotowej wału silnika



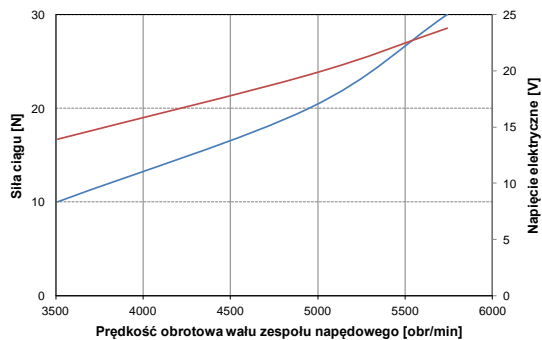
Rys. 14. Moc użyteczna silnika spalinowego w zależności od prędkości obrotowej wału silnika

W czasie badań maksymalną siłę ciągu (70 N) wygenerowaną przez napęd śmigłowy, uzyskano przy prędkości obrotowej wału silnika wynoszącej 6700 obr/min.

Na kolejnej z charakterystyk pracy silnika przedstawiono zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej wału silnika. Analizując otrzymany przebieg charakterystyki można zaobserwować wzrost momentu obrotowego wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wału silnika spalinowego. Najwyższą wartość momentu obrotowego uzyskano przy maksymalnych nastawach silnika, a jej wartość wyniosła 40 N. Otrzymaną charakterystykę momentu obrotowego silnika spalinowego w funkcji prędkości obrotowej wału silnika charakteryzuje wzrost zbliżony do wykładniczego.

Najwyższą moc użyteczną silnika uzyskano przy maksymalnej badanej prędkości obrotowej wału oraz momencie obrotowym wynoszącym 2,2 Nm. Wartość mocy użytecznej jest ściśle związana z generowanym momentem obrotowym i prędkością obrotową wału silnika. W warunkach ustalonych napędu śmigłowego moc wytwarzana w silniku musi zrównoważyć moc pochłanianą przez śmigło. W tym przypadku duże znaczenie mają właściwości geometryczne zastosowanego śmigła, jak również warunki lotu statku powietrznego.

Wyniki badań otrzymanych w czasie realizacji cyklu trzeciego przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Siła ciągu zespołu napędowego i wygenerowane napięcie prądu stałego w zależności od prędkości obrotowej wału

Na podstawie otrzymanych wyników widoczne jest zmniejszenie maksymalnej prędkości obrotowej wału silnika spalinowego w zespole w stosunku do prędkości obrotowej, uzyskanej w czasie badań dla silnika spalinowego pracującego indywidualnie. W czasie badań zespołu napędowego uzyskano także mniejszą siłę ciągu, która przy maksymalnej prędkości obrotowej wału silnika wyniosła 30 N. Na podstawie analizy wyników można zaobserwować wpływ dodatkowego obciążenia silnika spalinowego związanego z jednoczesnym napędem śmigła oraz silnika elektrycznego. Ponadto na otrzymaną maksymalną wartość siły ciągu mogło przyczynić się zastosowanie śmigła (EMP 18x10E), przeznaczone do zastosowania z silnikiem elektrycznym. Wartości siły ciągu uzyskane przy danych prędkościach obrotowych wału silnika spalinowego narzucają konieczność poszukiwania śmigła o parametrach geometrycznych, optymalnych dla obu typów silników. W czasie trzeciego cyklu zmierzono także przyrost napięcia prądu stałego, gdzie uzyskano maksymalne napięcie o wartości 23,8 V. Przyrost napięcia elektrycznego ma charakter liniowy i ściśle zależny od prędkości obrotowej wału silnika.

## 5. Wnioski i kierunki dalszych prac

W artykule zawarto badania prowadzące do wyznaczenia parametrów eksploatacyjnych silnika elektrycznego oraz silnika spalinowego, jako elementów składowych proponowanego lotniczego układu hybrydowego. Dodatkowo w celu oceny osiągnięć silnika elektrycznego dokonano porównania charakterystyk pracy, wyznaczonych w zależności od zastosowanych śmigieł. Wybrany do badań silnik elektryczny charakteryzował się dużą sprawnością, niekiedy przekraczającą 85%. Dzięki zastosowaniu śmigieł charakteryzujących się różnymi parametrami geometrycznymi, możliwe było dokonanie wyboru konfiguracji układu, z punktu widzenia uzyskiwanych osiągnięć napędu. Poza uzyskiwanymi osiągnięciami uwzględniono także energochłonność napędu śmigłowego przy wykorzysta-

niu trzech śmigieł. Spośród przebadanych śmigieł wybrano śmigło dwułopatowe, wykonane z kompozytów, z którym napęd śmigłowy wykazywał większe zapotrzebowanie na energię elektryczną w stosunku do śmigła trójłopatowego. Jednak pomimo większego zapotrzebowania uzyskiwał większe wartości siły ciągu przy jednocześnie mniejszej prędkości obrotowej wału silnika. Przeprowadzone badania umożliwiły określenie głównych wymagań, istotnych z punktu widzenia funkcjonowania układu hybrydowego. Na podstawie wyników pomiarów sprecyzowano następujące założenia:

- napięcia zasilania silnika elektrycznego  $U_{dc} = 30-37$  V,
- moc wyjściowa silnika elektrycznego nie mniejsza niż 900 W, w celu uzyskania wymaganej siły ciągu (50 N),
- parametry zastosowanych akumulatorów umożliwiające utrzymanie stałej mocy wyjściowej silnika elektrycznego na poziomie 650 W, przy założeniu że moc potrzebna do przelotu stanowi 70% mocy maksymalnej,
- wprowadzenie zabezpieczenia przed rozładowaniem akumulatorów poniżej 80% napięcia znamionowego.

W przeprowadzonych badaniach dla silnika spalinowego wykorzystano wyłącznie jedno śmigło, charakteryzujące się parametrami geometrycznymi zalecanymi przez producenta silnika. W przypadku silnika spalinowego śmigło posłużyło wyłącznie do wykreślenia charakterystyk pracy silnika. Wybór silnika podyktowany był jego współczynnikiem stosunku mocy do masy, co stanowi istotny aspekt w przypadku zastosowania napędu w bezzałogowym statku powietrznym.

Na etapie konstruowania lotniczego układu hybrydowego należy zwrócić szczególną uwagę na takie cechy układu jak:

- maksymalna efektywność energetyczna,
- minimalna masa oraz gabaryty układu (masa całkowita kompletnego układu hybrydowego nie przekraczająca 5 kg),
- prostota konstrukcji umożliwiająca łatwość obsługi i sterowania,
- ograniczone oddziaływanie ekologiczne (poziom hałasu, emisja związków szkodliwych spalin).

W celu oceny możliwości odzysku energii elektrycznej, w wyniku napędzania silnika elektrycznego przez silnik spalinowy, przeprowadzono badania zespołu napędowego złożonego z śmigła, silnika elektrycznego oraz silnika spalinowego. Pomimo osiągnięcia mniejszych parametrów użytkowych, istnieje możliwość generowania napięcia elektrycznego, przy pracy silnika elektrycznego w roli generatora. Otrzymane napięcie elektryczne umożliwia przeprowadzenie procesu ładowania jednego z dwóch stosowanych akumulatorów, niezbędnych do zasilania wybranego silnika elektrycznego.



---

W związku z tym konieczną są dalsze prace badawcze nad możliwością poprawy parametrów użytkowych zespołu oraz realizacji procesu ładowania akumulatorów.

---

### **Bibliography/Literatura**

- [1] Bogusz P., Korkosz M., Mazurkiewicz A., Prokop J.: Analiza pracy generatorowej maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi. Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 91/2011, 21 – 25, 2011.
- [2] Lieh J., Spahr E., Behbahani A., Hoying J.: Design of Hybrid Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. 47<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2011-6146, 2011.
- [3] Lee B., Park P., Kim Ch., Yang S., Ahn S.: Power managements of a hybrid electric propulsion system for UAVs. Journal of Mechanical Science and Technology 26 (8) (2012) 2291 – 2299, 2012.
- [4] Wołoszyn J., Jakubowski R., Orkisz M., Wygonik P.: Analiza możliwości integracji hybrydowego zespołu napędowego z bezzałogowym aparatem latającym dla założonej misji. V International Congress on Combustion Engines, PTNSS-2013-SC-094, 556 – 561, 2013.
- [4] <http://www.zjrcgf.com>

Prof. Jerzy Merkisz, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Prof. Jerzy Merkisz – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

e-mail: [jerzy.merkisz@put.poznan.pl](mailto:jerzy.merkisz@put.poznan.pl)



Dominik Karpiński, MSc, Eng – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Dominik Karpiński – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

e-mail: [dominik.p.karpinski@doctorate.put.poznan.pl](mailto:dominik.p.karpinski@doctorate.put.poznan.pl)



Jarosław Markowski, DSc., DEng – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Dr hab. inż. Jarosław Markowski – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej*

e-mail: [jaroslaw.markowski@put.poznan.pl](mailto:jaroslaw.markowski@put.poznan.pl)



Marta Galant, MSc, Eng – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

*Mgr inż. Marta Galant – doktorantka na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*

e-mail: [marta.m.galant@doctorate.put.poznan.pl](mailto:marta.m.galant@doctorate.put.poznan.pl)

