

## ZASTOSOWANIE NAPĘDU ELEKTRYCZNEGO W BEZZAŁOGOWYCH APARATACH LATAJĄCYCH

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane aspekty wykorzystania napędu elektrycznego w obiektach latających, w szczególności w bezzałogowych aparatach latających. Dokonano porównania napędu elektrycznego z napędem opartym na silniku tłokowym, przedstawiono wady i zalety takich rozwiązań. Omówione zostały również charakterystyczne cechy i właściwości stosowanych w lotnictwie silników elektrycznych (w tym ich charakterystyk zewnętrznych) oraz źródeł energii elektrycznej, wykorzystywanych do zasilania tych silników.

### WSTĘP

Implementacja nowych rozwiązań w branży lotniczej zawsze była procesem przebiegającym powoli i z dużą dozą ostrożności. Wiąże się to nierozdzielnie z licznymi restrykcjami, wynikającymi z aspektów bezpieczeństwa użytkowania obiektów latających. Nie powinna zatem dziwić dużo mniejsza aktywność w zakresie wprowadzania nowych typów zespołów napędowych do lotnictwa, w stosunku do niekwestionowanego lidera w tym obszarze – branży motoryzacyjnej.

Do niedawna podstawowymi i dominującymi jednostkami napędowymi, stosowanymi w statkach powietrznych, były silniki turbino-we i silniki tłokowe. Te pierwsze stosowane są na ogół w lotnictwie wojskowym, transportowym i dużych samolotach pasażerskich. Te drugie zaś wykorzystywane są głównie w lotnictwie lekkim, akrobacyjnym, a także w szkoleniu podstawowym, zastosowaniach agrolotniczych oraz w szeroko pojętej technice modelarskiej.

To właśnie branża modelarska i intensywnie rozwijający się obszar lotnictwa bezzałogowego, stały się główną siłą napędową dla poszukiwania nowych rozwiązań w dziedzinie napędu statków powietrznych. Dodatkowo, z uwagi na skalę rozmiarów wykorzystywanych obiektów, obszary te stanowią dobrą platformę doświadczalną w ujęciu ekonomiki i bezpieczeństwa testowanych rozwiązań.

### 1. PORÓWNANIE NAPĘDU TŁOKOWEGO I ELEKTRYCZNEGO

Silniki tłokowe są stosowane w lotnictwie począwszy od pierwszego w historii samolotu wyposażonego w silnik, którym był Flyer I, skonstruowany przez braci Wright w 1903r [7]. Przez lata ten rodzaj jednostki napędowej ewoluował i został gruntownie poznany oraz

dostosowany dla potrzeb lotnictwa.

Również zminiaturyzowana wersja silnika tłokowego od wielu lat znana jest w branży modelarskiej, jako podstawowe źródło napędu zdalnie sterowanych jednostek latających. Naturalną kolejną rzeczą było więc przeniesienie doświadczeń wynikających ze stosowania napędu tłokowego do intensywnie rozwijającej się dziedziny bezzałogowych aparatów latających (BAL).

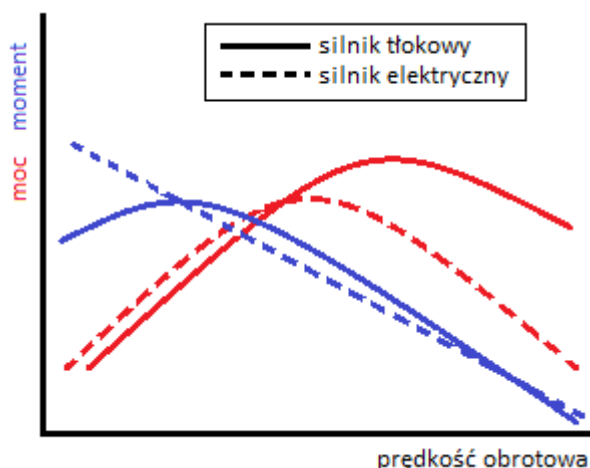
Z drugiej strony, od kilkunastu lat obserwowany jest silny rozwój źródeł energii elektrycznej (w tym akumulatorów elektrochemicznych – dużą rolę odgrywa tu branża elektroniki użytkowej), jak i elektrycznych zespołów napędowych, będących obecnie istotnym obszarem zainteresowania czołowych marek przemysłu motoryzacyjnego. Dzięki temu rozwojowi, napęd elektryczny na stałe zagościł i upowszechnił się najpierw w środowisku modelarskim, a następnie w obiektach klasy BAL i stanowi ciekawą alternatywę dla klasycznego napędu tłokowego.

Porównanie zalet i wad obydwóch rodzajów zespołów napędowych pod kątem zastosowania w jednostkach latających, przedstawione zostało w tabeli 1.

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczone charakterystyki zewnętrzne silnika tłokowego i elektrycznego. Widać wyraźnie, że największy moment obrotowy silnik elektryczny osiąga przy prędkości obrotowej bliskiej zeru. Różnice w charakterystykach napędowych silników, mogą być częściowo zniwelowane, poprzez odpowiedni dobór śmigła.

Tab. 1. Porównanie napędu tłokowego i elektrycznego [źródło własne]

	Napęd tłokowy	Napęd elektryczny
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> <li>- duży zasięg i długotrwałość lotu</li> <li>- zadowalające osiągi</li> <li>- znane i sprawdzone rozwiązanie</li> <li>- niska wrażliwość na zakłócenia elektromagnetyczne i mała emisja elektromagnetyczna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- łatwość obsługi i wysoka precyzja sterowania (bezproblemowa stabilizacja parametrów pracy)</li> <li>- brak emisji produktów spalania paliw węglowodorowych</li> <li>- niewielki poziom hałasu</li> <li>- szeroka dostępność rozwiązań na rynku</li> <li>- łatwość zabudowy na płatowcu</li> </ul>
Wady	<ul style="list-style-type: none"> <li>- emisja zanieczyszczeń do atmosfery</li> <li>- duży poziom hałasu</li> <li>- wrażliwość na parametry otoczenia (temperatura, ciśnienie, wilgotność powietrza)</li> <li>- niska sprawność silnika (duża emisja ciepła)</li> <li>- trudności eksploatacyjne (zwłaszcza w warunkach polowych)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- niewielki zasięg i mała długotrwałość lotu</li> <li>- duża masa akumulatorów</li> <li>- wrażliwość akumulatorów na zmiany temperatury (spadek pojemności elektrycznej w niskich temperaturach)</li> <li>- emisja elektromagnetyczna (możliwy negatywny wpływ na pracę urządzeń awioniki)</li> </ul>



**Rys. 1.** Porównanie charakterystyk zewnętrznych silnika tłokowego i elektrycznego [źródło własne – na podst. 1,2]

## 2. CHARAKTERYSTYKA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W NAPĘDZIE STATKÓW POWIETRZNYCH

Silniki elektryczne stanowią grupę urządzeń, których zadaniem jest zamiana energii elektrycznej na pracę mechaniczną. Istnieje wiele różnych typów takich maszyn, różniących się sposobem zasilania (prąd stały lub przemienny), rodzajem uzwojenia, konstrukcją elementów wirujących i stałych, itd. Zdecydowana większość typów silników elektrycznych nie nadaje się do napędu aparatów latających, głównie ze względu na niewystarczający stosunek mocy do masy, ale także na niską sprawność czy niekorzystne charakterystyki zewnętrzne.

Niemniej jednak, jeden typ silnika elektrycznego zdominował duży obszar techniki modelarstwa lotniczego i jest coraz powszechniej stosowany w lotnictwie bezzałogowym. Jest to bezszczotkowy silnik o magnesach trwałych [1],[2],[6].

Silnik ten to trójfazowa maszyna synchroniczna, zasilania prądem przemiennym, jednak z uwagi na to, że razem z silnikiem stosuje się sterownik dużej mocy, zasilany prądem stałym, najczęściej bezpośrednio z akumulatora elektrochemicznego, zwana jest zwyczajowo bezszczotkowym silnikiem prądu stałego.

Zastosowanie wydajnych magnesów neodymowych w konstrukcji wirnika, pozwoliło wyeliminować szczotki i przyczyniło się do uzyskania bardzo dużej sprawności silnika, sięgającej 80-90%, w szerokim zakresie wartości prądu zasilania [6]. Zasadniczo dostępne są dwie konfiguracje silnika:

- silniki typu *inrunner* – charakteryzują się większą maksymalną prędkością obrotową i mniejszym momentem obrotowym
- silniki typu *outrunner* – większy moment obrotowy, mniejsza prędkość maksymalna

Do współpracy ze śmigłem, lepszym rozwiązaniem są silniki typu *outrunner*. Przykład takiego silnika, do zastosowań lotniczych pokazano na rys. 2.



**Rys. 2.** Silnik elektryczny typu outrunner – model AXI GOLD 5345/18 [6]

## 3. LOTNICZY ELEKTRYCZNY ZESPÓŁ NAPĘDOWY

Zespół napędowy oparty na bezszczotkowym silniku o magnesach trwałych, składa się z następujących elementów:

- Źródło energii elektrycznej (najczęściej akumulator elektrochemiczny)
- Sterownik silnika elektrycznego
- Silnik bezszczotkowy
- Śmigło

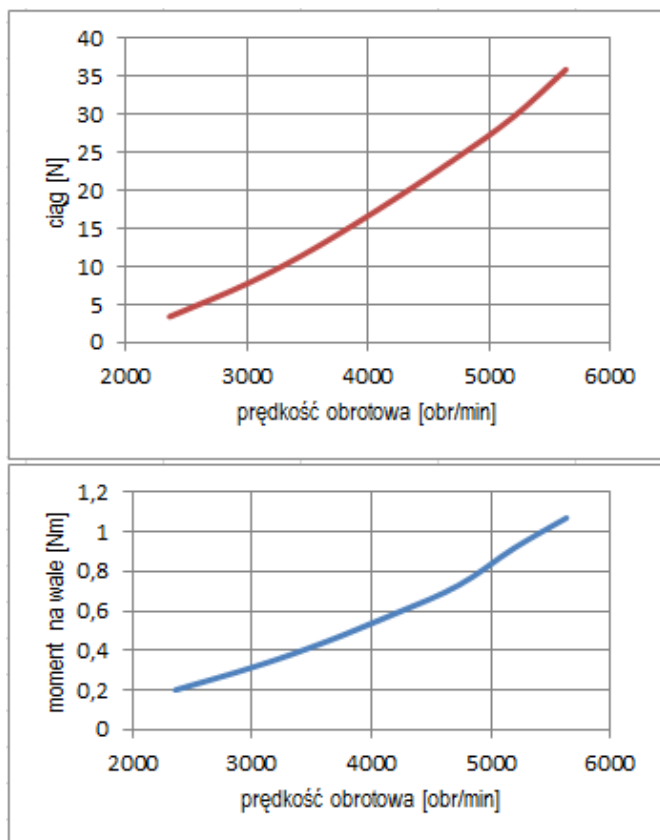
Schemat elektrycznego zespołu napędowego został pokazany na rysunku 3. Niebieskie strzałki symbolizują przepływ energii elektrycznej, pomarańczowa strzałka – przepływ energii mechanicznej, zaś zielona strzałka – impulsy pochodzące z odbiornika sygnału ze stacji naziemnej.



**Rys. 3.** Schemat lotniczego zespołu napędowego z silnikiem elektrycznym [źródło własne]

Sterownik ma za zadanie przetworzyć prąd stały z akumulatora na impulsy elektryczne dla poszczególnych faz silnika. Jest on również podłączony do odbiornika sygnału sterującego ze stacji naziemnej, co umożliwia zmianę parametrów jego pracy, a przez to zmianę prędkości obrotowej silnika.

Współpraca silnika ze śmigłem polega na zrównoważeniu momentu oporowego generowanego przez śmigło, momentem obrotowym silnika. W warunkach ustalonej równowagi momentów, śmigło wytwarza określoną siłę ciągu (zależną bardzo mocno od prędkości poruszania się obiektu latającego względem powietrza). Przykładowe charakterystyki eksperymentalne zespołu śmigło-silnik zostały pokazane na rysunku 4. Są to charakterystyki ciągu i momentu na wale silnika, w funkcji prędkości obrotowej, dla warunków stacjonarnych (zerowa prędkość lotu), dla śmigła APC C-2 16x14" w układzie pchającym, napędzanego silnikiem AXI, pokazanym na rys. 2.



**Rys.4.** Charakterystyka siły ciągu (*u góry*) i momentu na wale silnika (*u dołu*) w funkcji prędkości obrotowej, dla zespołu śmigło-silnik elektryczny [źródło własne]

Pomimo bardzo wysokiej sprawności samego silnika, efektywność pracy zespołu napędowego jest mocno ograniczona ze względu na sprawność sterownika trójfazowego i samego źródła energii elektrycznej. W porównaniu z napędem tłokowym, zespół elektryczny charakteryzuje się możliwością precyzyjnego sterowania i znikomym wpływem zmiany wysokości (powodującej zmianę parametrów otoczenia) na parametry pracy układu (z wyjątkiem znaczącego wpływu temperatury na możliwości akumulacji energii w baterii ogniw elektrochemicznych).

#### 4. ŹRÓDŁA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Zasadniczym problemem, w znaczący sposób ograniczającym możliwości wykorzystania napędów elektrycznych w lotnictwie, jest brak źródeł energii, zapewniających długotrwałą pracę i wysoką wydajność. Jest to związane ze stosunkowo niewielką energią właściwą i gęstością energii materiałów wykorzystywanych przy produkcji ogniw galwanicznych i innego typu ogniw elektrycznych. Powoduje to niekorzystny stosunek mocy do masy w przypadku akumulatorów elektrochemicznych [3]. Pod tym względem konwencjonalne paliwa węglowodorowe (pochodne ropy naftowej), okazują się być lepszym rozwiązaniem, nawet biorąc pod uwagę niewielką sprawność silnika tłokowego.

Zasadniczymi rodzajami źródeł energii elektrycznej, mogącymi znaleźć zastosowanie w elektrycznych zespołach napędowych dla bezzałogowych aparatów latających są:

- akumulatory elektrochemiczne
- ogniwa paliwowe
- ogniwa fotowoltaiczne
- super- i ultrakondensatory

#### 4.1. Akumulatory elektrochemiczne

Zasadniczo, są to baterie ogniw galwanicznych, połączonych najczęściej w konfiguracji szeregowo-równoległej (łączenie szeregowe powoduje wzrost napięcia pakietu, łączenie równoległe powoduje zwiększenie pojemności elektrycznej).

W tabeli 2 przedstawione zostały właściwości wybranych ogniw, mających potencjalne zastosowanie w zespołach napędowych aparatów latających.

**Tab. 2.** Właściwości ogniw elektrochemicznych [na podst. 1,3]

Typ ogniwa	Napięcie nominalne ogniwa, [V]	Gęstość energii, [Wh/dm <sup>3</sup> ]	Energia właściwa, [Wh/kg]	Sprawność (maksymalna) [%]
Niklowo-wodorkowe	1,25	130-240	60-120	70
Litowo-jonowe	3,6	220-350	80-150	95
Litowo-polimerowe	3,7	220-400	150-200	95
Litowo-fosforanowe	3,3	~220	90-120	95

Do upowszechnienia się akumulatorów elektrochemicznych przyczynił się niewątpliwie rozwój elektroniki użytkowej, w szczególności tzw. urządzeń mobilnych. Akumulatory dedykowane do zastosowań w zespołach napędowych charakteryzują się jednak dużo większą obciążalnością prądową i znacznie wyższymi dopuszczalnymi wartościami prądu ładowania, a także większą stabilnością temperaturą pracy. Pomimo tego, niska energia właściwa w porównaniu do paliwa węglowodorowego sprawia, że maksymalny czas lotu obiektu wyposażonego w napęd elektryczny jest kilkakrotnie krótszy niż dla obiektu podobnej wielkości (masy) i mocy silnika, napędzanego jednostką tłokową.

#### 4.2. Ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe są źródłem energii działającym podobnie od akumulatorów elektrochemicznych – tutaj także następuje wymiana jonów między elektrodami. Zasadnicza różnica polega na konieczności doprowadzenia paliwa (wodoru), niezbędnego do podtrzymania reakcji utleniania, umożliwiającej przepływ elektronów [1],[3].

Spośród wielu różnych typów ogniw paliwowych, z uwagi na zakresy temperatury pracy takich urządzeń, jedynie tzw. ogniwa z membraną wymiany elektronów wydają się być właściwe dla zastosowań w napędzie aparatów latających. Przykładem takiego ogniwa jest urządzenie Aeropak, firmy Horizon Energy System Company, przedstawione na rysunku 5. Urządzenie charakteryzuje się sprawnością na poziomie 50%, masą 470g i nadzwyczaj długim czasem pracy ciągłej – nawet do 500 godzin [5], co nie jest osiągalne nawet dla konwencjonalnych zespołów napędowych z silnikiem tłokowym.

Poważnym ograniczeniem, związanym ze stosowaniem tego typu rozwiązania, jest stosunkowo niewielka moc wyjściowa urządzenia (200W mocy ciągłej) i mała odporność na dynamiczne zmiany obciążenia ogniwa [5]. Te aspekty sprawiają, że obszar wykorzystania ogniwa paliwowego w bezałogowych aparatach latających musi być zawężony do niewielkich i lekkich obiektów o dużej doskonałości aerodynamicznej, wykonujących loty ustalone w spokojnej (nie-mal bezwietrznej) atmosferze, bez gwałtownych manewrów. Dodatkowo może zachodzić konieczność wspomaganie startu takich statków powietrznych, z uwagi na duże chwilowe zapotrzebowanie mocy w tej fazie lotu.



**Rys. 5.** System Aeropak – ogniwo paliwowe do zastosowań w bezzałogowych aparatach latających [5]

### 4.3. Ogniwa fotowoltaiczne

Ogniwa słoneczne (fotowoltaiczne) znane są przede wszystkim ze stacjonarnych instalacji do wytwarzania energii elektrycznej. Są również powszechnie stosowane w technice kosmicznej. Niestety niska sprawność energetyczna tego typu urządzeń sprawia, że łączna powierzchnia pokrycia ogniwami słonecznymi, niezbędna do uzyskania wymaganej ilości energii, jest dużo większa niż powierzchnia płatowca, wynikająca z aspektów aerodynamicznych (minimalna siła nośna). Stąd konieczność projektowania statków powietrznych o nietypowych kształtach, w celu zapewnienia minimum energetycznego do utrzymania czynnego lotu [4]. Niesie to za sobą komplikacje zarówno technologiczne i konstrukcyjne – między innymi ze względu na sztywność struktury obiektu, jak również aerodynamiczne i pilotażowe.

Przykład takiej nietypowej konstrukcji płatowca przedstawiony został na rysunku 6.



**Rys. 6.** Bezzałogowy aparat latający zasilany ogniwami fotowoltaicznymi [źródło własne]

Rozwiązaniem pośrednim, może być zastosowanie podwójnego źródła zasilania – akumulatora elektrochemicznego w połączeniu z układem opartym na ogniwach słonecznych.

### 4.4. Super- i ultrakondensatory

Są to urządzenia przypominające budową ogniwa elektrochemiczne – posiadają elektrody i wypełnione są elektrolitem, magazynującym jony, jednak w odróżnieniu od ogniw galwanicznych, posiadają jeszcze separator, uniemożliwiający zachodzenie reakcji chemicznych wewnątrz urządzenia. Zatem, z uwagi na sposób działania, są to kondensatory elektryczne. W odróżnieniu od klasycznych kondensatorów, charakteryzują się dużo większą pojemnością i wyższą gęstością energii, porównywalną do akumulatorów elektrochemicznych [1].

Mogą być również rozładowywane i ładowane dużymi prądami (w bardzo krótkim czasie), co powoduje, że ich potencjalnym obszarem zastosowań są układy zasilania w sytuacjach wymagających chwilowego zwiększonego poboru mocy (np. wspomaganie fazy

startu obiektu latającego, lub wykonanie gwałtownego manewru w powietrzu).

## PODSUMOWANIE

Zasadniczym problemem dla szerokiego wykorzystania elektrycznych zespołów napędowych w technice lotniczej, jest niewystarczająca wydajność dostępnych źródeł energii elektrycznej. Niemniej jednak, można znaleźć obszary, w których napęd elektryczny sprawdzi się lepiej niż napęd tłokowy. Przykładem są tzn. multicoptery, czyli bezzałogowe aparaty latające wyposażone w wiele zespołów śmigło-silnik, wirujących w płaszczyźnie poziomej, a więc spełniających rolę wirników nośnych obiektu. Zastosowanie bezszczotkowych silników elektrycznych pozwala na precyzyjne sterowanie położeniem multicoptera w locie i bardzo dokładną stabilizację (np. podczas zawisu).

Utrzymanie ogólnoświatowego trendu rozwoju nowych źródeł energii, powinno spowodować w najbliższej przyszłości dalszy wzrost zainteresowania napędami elektrycznymi w dziedzinie lotnictwa, zwłaszcza w obszarze bezzałogowych aparatów latających.

## BIBLIOGRAFIA

1. Ehsani M. et al.: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press 2005
2. Jakubowski R., Orkisz M., Wołoszyn T.: Identification of the electric brushless motor characteristics, in Scientific aspects of unmanned mobile vehicle, Kielce University of Technology, Kielce 2010
3. Linden D., Reddy T. B.: Handbook of Batteries 3rd Edition, McGraw-Hill 2002
4. Noth A.: Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight, ETH Zurich 2008
5. [www.horizonfuellcell.com](http://www.horizonfuellcell.com)
6. [www.modelmotors.cz](http://www.modelmotors.cz)
7. [www.wright-brothers.org](http://www.wright-brothers.org)

## APPLICATION OF ELECTRIC PROPULSION IN UNMANNED AERIAL VEHICLES

### Abstract

*The paper presents selected issues of implementing the electric propulsion in flying crafts, particularly in unmanned aerial vehicles. A comparison between electric and piston engine-based systems has been presented. The paper also discusses the properties of electric motors and electrical energy sources for aviation applications.*

Autorzy:

dr inż. **Robert Jakubowski** – Politechnika Rzeszowska  
mgr inż. **Tomasz Wołoszyn** – Politechnika Rzeszowska