

# Praktyczne zastosowania innowacyjnych projektów maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi

Stanisław Gawron

## 1. Wprowadzenie

Zastosowanie magnesów trwałych w maszynach elektrycznych spowodowało, że projektowane silniki elektryczne lub prądnice znacząco polepszyły swoje parametry eksploatacyjne. Zastosowanie magnesów trwałych jako źródła stałego pola magnetycznego wyeliminowało szczotki oraz komutator, przez co maszyny te, silniki lub prądnice, są zazwyczaj prostej budowy. Występują różne konstrukcje mechaniczne, jednak najczęściej spotykane są rozwiązania, w których część zewnętrzna, zwana potocznie stojanem, jest nieruchoma, natomiast część wewnętrzna, zwana wirnikiem, obraca się. Maszyny z magnesami trwałymi charakteryzują się najlepszymi właściwościami elektromechanicznymi wśród wszystkich typów przetworników energii mechanicznej na elektryczną [2, 8] i odwrotnie. Najważniejsze zalety to:

- najwyższa sprawność energetyczna;
- największa gęstość mocy;
- brak pierścieni ślizgowych oraz szczotek.

Główne zastosowania:

- prądnice w elektrowniach wiatrowych i wodnych;
- w napędach różnego typu pojazdów i urządzeń, w których wymagana jest zmiana prędkości obrotowej w szerokim zakresie;
- w innych urządzeniach, w których wymagana jest niska masa lub objętość.

Ze względu na zastosowanie maszyny z magnesami trwałymi można podzielić na silniki oraz prądnice (generatory). Kolejnym podziałem jest ich konstrukcja. W podziale konstrukcyjnym maszyn z magnesami trwałymi istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych obwodu elektromagnetycznego stojana, ale również i kształtu wirnika [8]. Dalszy podział konstrukcyjny wirnika polega na różnych rozwiązaniach umiejscowienia magnesów trwałych, np.: typ SPM (*Surface Permanent Magnet*) lub typ IPM (*Interior Permanent Magnet*).

Jeszcze innym podziałem silników z magnesami trwałymi jest podział ze względu na sposób zasilania i sterowania:

- PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor* (silniki synchroniczne);
- PMDCBMSC – *Permanent Magnet Direct Current Brushless Motor with Sine Control* (silniki bezszczotkowe prądu stałego z komutatorem elektronicznym sterowane sinusoidalnie);
- PMDCBMTTC – *Permanent Magnet Direct Current Brushless Motor with Trapez Control* (silniki bezszczotkowe prądu stałego z komutatorem elektronicznym sterowane trapezowo).

**Streszczenie:** Dzisiejsze aplikacje, w których stosowane są silniki elektryczne, są coraz bardziej wymagające. Od stosowanych silników wymagana jest płynna regulacja, wysoki współczynnik mocy, wysoki moment obrotowy (już od najniższych prędkości obrotowych), przy jednoczesnym zachowaniu niewielkich gabarytów oraz masy maszyny. Takim wymaganiom mogą sprostać maszyny z magnesami trwałymi. Oprócz tego maszyny z magnesami trwałymi są generalnie prostej budowy i mają najwyższą sprawność energetyczną wśród maszyn wirujących. W artykule zaprezentowano i skrótkowo omówiono najciekawsze projekty maszyn z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania. Przedstawione projekty realizowano w ostatnich latach w Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.

Słowa kluczowe: napęd elektryczny, silnik z magnesami trwałymi, prądnica z magnesami trwałymi

## NEW DESIGNS OF PERMANENT MAGNET ELECTRICAL MACHINES – PRACTICAL APPLICATIONS

**Abstract:** Nowadays, demands on drives utilizing electric motors increase continuously. Smooth control, high power factor, high rotational torque (also at lowest rotational speeds) together with small dimensions and weight are required. These requirements are fulfilled by permanent magnet motors. Moreover, PM machines are generally of simple design and are characterized by highest efficiency of all rotating electrical machines. The most interesting designs of PM motors and their practical applications are presented and shortly described in the paper. These projects were carried out in Institute of Electrical Drives and Machines KOMEL during the last few years.

Keywords: electric drive, permanent magnet synchronous motor, permanent magnet synchronous generator

## 2. Zastosowania trakcyjne silników z magnesami trwałymi

Opracowane w instytucie KOMEL, m.in. w ramach projektów prototypy silników elektrycznych z magnesami trwałymi, w celu weryfikacji rzeczywistych uzyskiwanych parametrów,



Rys. 1. Samochód Re-Volt z silnikiem elektrycznym o mocy 14,9 kW



Rys. 3. Samochód elektryczny ELV001



Rys. 2. Pojazd elektryczny Elipsa w wersji VERSTYLE

zostały zamontowane w konkretnych pojazdach, które jeżdżą do dnia dzisiejszego. Nadal są przeprowadzane badania i testy, pomimo że pojazdy niejednokrotnie mają już przejechane ponad 50 tys. km. W dalszej części artykułu przedstawiono najciekawsze zastosowania trakcyjne silników z magnesami trwałymi.

### 2.1. Samochód elektryczny Re-Volt

Pod koniec 2005 roku, na zlecenie zagranicznej firmy, został zaprojektowany, a następnie wykonany elektryczny napęd do dwuosobowego samochodu, tzw. Re-Volt [5]. Docelowo opracowano napęd składający się z silnika o mocy 14,9 kW oraz przekładni mechanicznej o stałej wartości przełożenia.

Wyprodukowano kilkaset sztuk pojazdów z silnikami produkcji KOMEL – ale głównie na rynek niemiecki oraz szwajcarski – które jeżdżą po dziś dzień.

Silnik elektryczny do samochodu Re-Volt był pierwszym zakończonym późniejszym wdrożeniem elektrycznym napędem trakcyjnym opracowanym i wykonanym w instytucie KOMEL.

### 2.2. Pojazd Elipsa

Pojazdy Elipsa służą głównie do wewnętrznego transportu ludzi oraz towarów w bardzo wielu zakładach produkcyjnych. Z założenia projektowego pojazdy te są wyposażone w dwa silniki elektryczne z magnesami trwałymi [23] o mocy 2,2 kW każdy i napięciu zasilania 48 V DC. Silniki zostały zaprojektowane i wdrożone do produkcji w KOMEL. Cechą charakterystyczną silników jest ich duża wytrzymałość i trwałość. W omawianym układzie napędowym funkcję dyferencjału mechanicznego realizuje przekształtnik energoelektroniczny zasilający oba silniki [6]. Cicha i bezmisyjna praca silników zwiększa możliwości zastosowania Elipsy na obszarach zamkniętych dla ruchu pojazdów spalinowych, np. w dużych halach, budynkach lub magazynach.

### 2.3. Prototyp samochodu elektrycznego „ELV001”

W samochodzie „ELV001”, podobnie jak w przypadku pojazdu Elipsa, przyjęto koncepcję napędu opartą na strukturze dwusilnikowej. Samochód napędzany jest na przednią oś poprzez podwójną przekładnię pasową dla każdego silnika/koła oddzielnie. Funkcję dyferencjału mechanicznego realizuje przekształtnik energoelektroniczny, który zasilą oba silniki.

Zastosowanie podwójnej przekładni pasowej [1] w napędzie „ELV001” nie było najkorzystniejszym rozwiązaniem w aspekcie kosztów budowy, sprawności, cichobieżności, eksploatacji i niezawodności samochodu, co w późniejszym czasie zostało poprawione. Każdy z zastosowanych silników elektrycznych z magnesami trwałymi jest chłodzony cieczą i dysponuje mocą  $P_N = 15$  kW, przy obrotach  $n_N = 3400$  obr./min. Natomiast prędkość maksymalna silników wynosi  $n_{max} = 7000$  obr./min. Napięcie zasilania falowników wynosiło  $U_{DCN} = 105$  V. Silniki w tym projekcie opracowywał i dostarczał KOMEL. Inne dane dotyczące samochodu: masa całkowita 1190 kg – w tym pojeździe 850 kg, baterii 250 kg; zasięg, przy prędkości 50 km/h około 160 km.



#### 2.4. Elektryczny układ napędowy do samochodu dostawczego Pasagon

Pod koniec 2012 r. w instytucie KOMEL opracowano hybrydowy bimodalny układ napędowy samochodu Pasagon. Innowacyjny układ napędowy składa się z napędu spalinowego oraz dodatkowo zabudowanego na wale kardana silnika elektrycznego [11, 12]. Napęd bimodalny charakteryzuje się tym, że silnik spalinowy i silnik elektryczny mogą pracować wyłącznie indywidualnie [10] i żaden nie może wspomagać drugiego. Silnik elektryczny zasilany jest z baterii akumulatorów poprzez przekształtnik energoelektroniczny, który równocześnie umożliwia zwrot energii elektrycznej do baterii, np. podczas hamowania odzyskowego, niezależnie od tego, czy włączony jest tryb pracy silnika spalinowego, czy elektrycznego. W celu zwiększenia gotowości eksploatacyjnej przy pracy silnika spalinowego silnik na wale kardana może pracować jako prądnica, ładując akumulatory pokładowe.

Na rysunku 5 przedstawiono schematyczny układ rozmieszczenia poszczególnych elementów hybrydowego napędu. Najważniejsze parametry samochodu hybrydowego:

- moc silnika elektrycznego 70 kW;
- maksymalny moment silnika – 520 Nm;
- pojemność energetyczna akumulatora trakcyjnego – 21 kWh;
- maksymalny zasięg jazdy – 100 km;
- prędkość maksymalna dla napędu elektrycznego – 70 km/h;
- czas ładowania baterii – ok. 3 godzin, dla ładowarki 3-fazowej.

#### 2.5. Samochód osobowy Fiat Panda

W czasie trwania projektu hybrydowego napędu Pasagona w instytucie KOMEL realizowano równolegle projekt pt.: „Bezemisyjny napęd elektryczny nowej generacji (E-Kit) do samochodów osobowych i dostawczych o masie całkowitej do 3,5 t”.

Projekt został ukończony w 2013 roku, a podstawowym jego celem było opracowanie i wdrożenie kompleksowego rozwiązania w pełni elektrycznego napędu samochodów osobowych lub dostawczych, będącego zamiennikiem dla fabrycznie montowanych napędów spalinowych [19, 20].

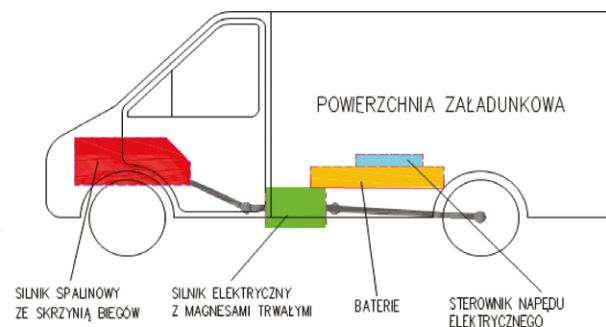
Założenia projektu obejmowały jak najmniejszą ingerencję w seryjne samochody. W związku z tym w miejsce silnika spalinowego zastosowano wysoko sprawny silnik elektryczny z magnesami trwałymi, który jest zasilany za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego. Dalszy układ przeniesienia napędu z wału silnika elektrycznego na koła został tak przeprojektowany, aby w możliwie dużym stopniu wykorzystać elementy oryginalne pojazdu. W miejsce zbiornika paliwa oraz w komorze silnika zamontowano nowoczesne zespoły bateryjne. Pozostałe układy pomocnicze samochodu, m.in. wspomaganie układu kierowniczego, hamulcowego itp., zostały dostosowane do specyfiki napędu elektrycznego. W ramach projektu wykonano konwersję dwóch samochodów: osobowego i dostawczego (małego).

Najważniejsze dane silnika z magnesami trwałymi w napędzie elektrycznym samochodu Panda:

- moc silnika elektrycznego 62 kW;
- moment maksymalny 180 Nm;
- prędkość obrotowa znamionowa 3300 obr./min;
- typ chłodzenia: cieczą.



Rys. 4. Samochód o napędzie hybrydowym bimodalnym spalinowo-elektrycznym



Rys. 5. Schemat hybrydowego napędu spalinowo-elektrycznego



Rys. 6. Samochód elektryczny Fiat Panda z silnikiem elektrycznym o mocy 41 kW

#### 2.6. Samochód osobowo-towarowy Fiat Fiorino

Podobnie jak Fiat Panda, samochód osobowo-towarowy Fiat Fiorino został opracowany w ramach projektu pt.: „Bezemisyjny napęd elektryczny nowej generacji (E-Kit) do samochodów osobowych i dostawczych o masie całkowitej do 3,5 t”. Istotne szczegóły konwersji opisano w punkcie 2.5, natomiast znacznie szerzej w innych publikacjach [19, 20].



Rys. 7. Samochód elektryczny Fiat Fiorino

Najważniejsze parametry silnika napędowego, zastosowanego do napędu miejskiego samochodu osobowo-dostawczego Fiata Fiorino:

- silnik z magnesami trwałymi chłodzony cieczą;
- moc silnika 84 kW;
- moment maksymalny 180 Nm;
- prędkość obrotowa znamionowa  $4400 \text{ min}^{-1}$ .

### 2.7. Elektryczne pojazdy sportowo-rekreacyjne

W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają pojazdy sportowo-rekreacyjne. Pojazdy te są wykorzystywane do rekreacyjnego przemieszczania się po polach golfowych, parkach lub innych terenach, gdzie wymagany jest napęd na dwa lub cztery koła.

Pojazdy sportowo-rekreacyjne z napędem elektrycznym ze względu na szereg zalet zyskują coraz większy udział w rynku oraz mają coraz więcej zastosowań [9, 13].

Podstawowe zalety:

- niewielki hałas;
- wysoka dynamika pojazdu, szczególnie przy niskich prędkościach;
- niskie koszty eksploatacji;
- brak emisji spalin.



Rys. 8. Pojazd sportowo-rekreacyjny [24] napędzany silnikiem z magnesami trwałymi



Rys. 9. Prototypowa paralotnia plecakowa z napędem elektrycznym

W ramach konsorcjum z firmą EleDriveCo powstał pojazd eBuggy o parametrach [24]:

- silnik o mocy 14,9 kW;
- napięcie zasilania 90 V DC;
- chłodzenie cieczą;
- zasięg 100 km;
- prędkość maksymalna 110 km/h;
- moment obrotowy 75 Nm;
- bateria trakcyjna Li-Po, 9,5 kWh.

### 2.8. Napędy elektryczne do lekkich statków powietrznych

W latach 2008–2009 w Instytucie KOMEL zrealizowano, jako pierwszy w Europie, projekt napędu elektrycznego do załogowego statku powietrznego [25]. Projekt wymagał opracowania silnika elektrycznego do paralotni plecakowej. Układ napędowy składa się z silnika z magnesami trwałymi, specjalnego zasilania oraz bezprzekładniowego przeniesienia napędu na śmigło.

Opracowany układ napędowy przeszedł pozytywnie badania laboratoryjne, a następnie zamontowano go bezpośrednio w paralotni. Na rysunku 9 przedstawiono moment startu oblatywacza paralotni, a w rogu pokazano (nie w skali) zdjęcie silnika. Pierwsze loty zakończono sukcesem, jednak ze względu na sporą masę baterii (masa paralotni z baterią – 37 kg) paralotnia nie znalazła wielkiego uznania wśród potencjalnych użytkowników.

Parametry paralotni plecakowej:

- moc znamionowa: 3,0 kW;
- moc startowa: 8,0 kW;
- napięcie zasilania: 60 V DC;
- prędkość obrotowa śmigła: 2400 obr./min;
- czas lotu z włączonym silnikiem elektrycznym: 50 min;
- masa paralotni z baterią: 37 kg.

Ze względu na dużą masę startową paralotni plecakowej w ramach dalszego rozwoju projektu opracowano elektryczny układ napędowy do 2-osobowej paralotni, pokazanej na rysunku 10.





Rys. 10. Paralotnia 2-osobowa, moment startu

Na tym samym rysunku widać start paralotni, która również przeszła pozytywne próby lotnicze.

Najważniejsze parametry paralotni wózkowej 2-osobowej:

- moc znamionowa: 15 kW;
- moc startowa: 23 kW;
- max. ciąg: 100 kg;
- czas lotu z włączonym silnikiem elektrycznym: 60 min;
- startowa prędkość obrotowa śmigła: 2450 obr./min;
- nowoczesna bateria polimerowo-litowa o pojemności: 7 kWh;
- masa paralotni z baterią: 125 kg.

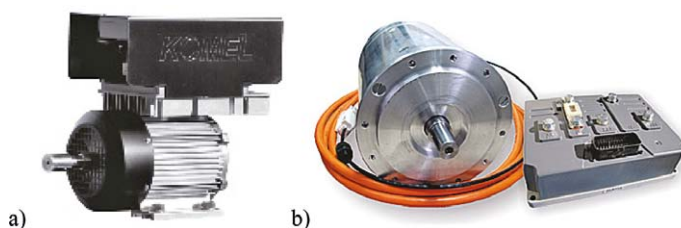
### 2.9. Elektryczne zespoły napędowe do jednostek pływających

Ekologiczne i wysoko sprawne silniki elektryczne cechuje cicha praca i brak emisji spalin [25]. Zaprojektowane i wykonane w KOMEL-u elektryczne silniki napędowe z magnesami trwałymi charakteryzują się wysoką efektywnością energetyczną oraz korzystnym stosunkiem mocy do masy.

Zastosowany w napędzie łodzi silnik cechuje niska prędkość obrotowa (1500 obr./min), co umożliwia bezpośrednie połączenie jego wału z wałem śruby napędowej, bez konieczności redukcji prędkości obrotowej.

Przykładowo silnik o mocy 2,3 kW (4,5 kW moc maksymalna), w jednostce o długości 6 m i wyporności 1,2 tony, pozwala na rozwinięcie prędkości ok. 6 węzłów (ok. 11 km/h).

Poniżej, na rysunku 11, przedstawiono przykładowe konstrukcje silników do napędu łodzi.



Rys. 11. Silniki z magnesami trwałymi stosowane w napędach łodzi: a) z zabudowanym falownikiem; b) z falownikiem umieszczonym oddzielnie



Rys. 12. Kolejka GAD-1 z silnikiem z magnesami trwałymi

### 2.10. Elektryczne napędy do górniczej kolejki transportowej

Ciągnik GAD-1 jest jednym z najnowocześniejszych ciągników akumulatorowych na świecie. Swoje uznanie zdobył ze względu na zastosowane innowacyjne rozwiązania, głównie w zakresie systemu bateryjnego, układu zasilania oraz silnika z magnesami trwałymi. Ciągnik może pracować w strefach zagrożonych wybuchem gazów, co jest jego główną zaletą. Opracowany przez KOMEL napęd elektryczny cechuje się niskim poziomem hałasu, wysoką sprawnością, odzyskiwaniem energii podczas zjazdu na nachyleniach oraz podczas hamowania [7, 14].

W zestawie ciągnika GAD-1 zastosowanych jest 8 szt. silników o parametrach:

- moc znamionowa 10,8 kW;
- napięcie zasilania 150 V DC;
- moment obrotowy 115 Nm;
- prędkość obrotowa 900 obr./min;
- sprawność – powyżej 91%.

### 2.11. Napędy specjalne do górniczych lokomotyw transportowych

Pod koniec 2006 roku opracowano i wdrożono do produkcji w instytucie KOMEL nowy silnik z magnesami trwałymi. Silnik ten zastosowano do napędu lokomotyw kopalnianych typu Ld-31EM, w miejsce awaryjnego i nisko sprawnego silnika prądu stałego typu LDa 327a. W nowym silniku, w porównaniu ze stosowanym dotychczas silnikiem prądu stałego, zwiększono moc mechaniczną o ponad 30%, zwiększono sprawności o ponad 9%, przy równoczesnym obniżeniu masy nowego silnika o 15%. Ze względu na układ montażowy gabaryt silnika z magnesami trwałymi musiał pozostać identyczny, jak w silniku prądu stałego.

Podstawowe parametry nowego silnika z magnesami trwałymi [25]:

- moc znamionowa 60 kW;
- prąd znamionowy 380 A;
- sprawność do 97%;
- prędkość obrotowa 1080 obr./min;
- moment maksymalny 620 Nm.

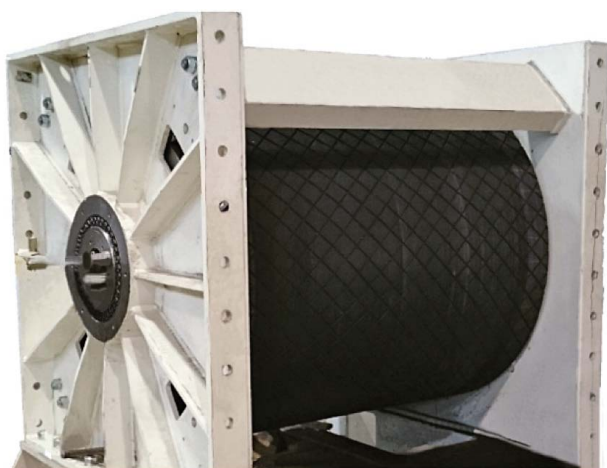


Rys. 13. Silnik z magnesami trwałymi w zastosowaniu w bardzo trudnych warunkach eksploatacji

### 2.12. Bezprzekładniowe elektryczne napędy do przenośników taśmowych

W 2015 roku, wspólnie z firmą NAFRA, zakończono realizację projektu bezprzekładniowego górniczego silnika do przenośników taśmowych. Jest to godny uwagi projekt, gdyż pokazuje wszechstronne możliwości stosowania silników z magnesami trwałymi. Zrealizowany bezprzekładniowy elektryczny układ napędowy jest bardzo wymagający pod względem konstrukcyjnym oraz pod względem konieczności uzyskania bardzo wysokich parametrów elektromechanicznych.

Technologiczna prędkość znamionowa przenośnika wynosi ok. 3,2 m/s, co w przeliczeniu na obroty silnika daje wartość 45 obr./min. Ze względów eksploatacyjnych napęd powinien mieć możliwość regulacji prędkości obrotowej. Stąd też silnik jest zasilany z energoelektronicznej przetwornicy częstotliwości, która z kolei zasilana jest napięciem 1000 V. Odpowiednio zaprojektowane i wykonane zasilanie z przekształtnika energoelektronicznego umożliwia płynną regulację prędkości obrotowej silnika od 0 do 55 obr./min [22]. Warto zaznaczyć, że znamionowy moment obrotowy silnika wynosi 53 000 Nm, natomiast moment maksymalny to aż 110 000 Nm.



Rys. 14. Prototypowy silnik z wirnikiem zewnętrznym o mocy 250 kW [22]

### 3. Rozwiązania konstrukcyjne dla OZE (Odnawialne Źródła Energii)

Produkcja energii elektrycznej powinna odbywać się z jak najwyższą sprawnością. Z tego względu maszyny z magnesami trwałymi, ze względu na swoje cechy odnośnie do sprawności, znalazły szerokie zastosowanie w urządzeniach do produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii. Maszyny te bardzo dobrze sprawdzają się w elektrowniach wiatrowych, gdzie kluczowym parametrem jest sprawność, ale również masa i możliwość generowania energii elektrycznej w jak najszerszym zakresie prędkości obrotowej silnika wiatrowego. W niniejszym punkcie zaprezentowano praktyczne zastosowania prądnic z magnesami trwałymi, opracowanych w KOMEL-u do odnawialnych źródeł energii.

#### 3.1. Elektrownie wiatrowe o poziomej osi obrotu

Pierwsze doświadczenia z prądnicami z magnesami trwałymi do elektrowni wiatrowej instytut KOMEL zdobywał już w 2003 roku, kiedy na dachu laboratorium powstała mała doświadczalna elektrownia wiatrowa o poziomej osi obrotu. Początkowo była to elektrownia wielołopatowa (12 łopatek), później ewoluowała do rozwiązania konstrukcyjnego 3-łopatowego, który pokazano na rysunku 15.

Najważniejsze parametry techniczne:

- system bezprzekładniowy – zastosowano niskoobrotową prądnicę z magnesami trwałymi;
- średnica koła wiatrowego 5,8 m;
- moc maksymalna elektrowni wiatrowej 6 kW.

Elektrownia była tak projektowana, aby była możliwość samodzielnego jej wykonania metodą gospodarczą [3, 4]. W KOMEL-u dostępna jest dokumentacja konstrukcyjna, wg której samodzielnie można wykonać taką siłownię wiatrową. Dokumentację można nabyć na zasadzie umowy licencyjnej.

W późniejszym czasie omawianą elektrownię, w dalszych celach badawczych, zastąpiono elektrownią o pionowej osi obrotu, której cechy opisano w kolejnym punkcie.



Rys. 15. Doświadczalna elektrownia wiatrowa z prądnicą z magnesami trwałymi o mocy 6 kW





Rys. 16.  
Przykładowe  
zastosowanie  
prądnicy  
z magnesami  
trwałymi  
z wirnikiem  
zewnętrznym



Rys. 17.  
Bezprze-  
kładniowy  
zespół  
prądotwórczy  
w elektrowni  
wodnej z ge-  
neratorem  
z magnesami  
trwałymi  
(kolor zielony - genera-  
tor)

### 3.2. Elektrownia wiatrowa o pionowej osi obrotu

Możliwości i zastosowania maszyn z magnesami trwałymi są bardzo szerokie. W ramach rozwoju konstrukcji prądnic z magnesami trwałymi opracowano prądnicę o konstrukcji dedykowanej do elektrowni wiatrowej o pionowej osi obrotu [18]. Z uwagi na specyfikę turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu opracowano i wykonano prądnicę z wirnikiem zewnętrznym, który jest równocześnie elementem konstrukcyjnym całej siłowni wiatrowej. Takie podejście znacznie zmniejsza ilość zastosowanych komponentów i wpływa na bezpieczeństwo całej elektrowni. Dzięki wirnikowi zewnętrznemu łopatki turbiny mogą być mocowane bezpośrednio do kadłuba prądnicy, co powoduje, że cały układ jest bezprzekładniowy.

Moc elektrowni wynosi 2,5 kW, przy prędkości obrotowej wirnika  $n_N = 90$  obr./min. Przy tych parametrach moc znamionowa prądnicy wynosi  $P_N = 2$  kW ( $f_N = 30$  Hz,  $U_N = 230$  V).

Na rysunku 16 pokazano fotografię elektrowni wykonaną na tle bloków mieszkalnych. Stosowanie tego typu konstrukcji jest estetyczne i w minimalnym zakresie wpływa na komfort ludzi mieszkających w sąsiedztwie takich elektrowni.

### 3.3. Elektrownie wodne - nowe systemy do wytwarzania energii elektrycznej

W ramach współpracy w konsorcjum ZM EMIT SA, ENEL-PC Sp. z o.o. oraz KOMEL opracowano koncepcję, wykonano prototyp i przeprowadzono badania nowego zespołu prądotwórczego [15, 21], dedykowanego do elektrowni wodnych.

Głównym wyzwaniem w projekcie było zwiększenie sprawności energetycznej nie tylko generatora, poprzez jego wymianę, ale całego zespołu prądotwórczego.

Na rysunku 17 przedstawiono fotografię zespołu prądotwórczego pracującego od 2015 roku w elektrowni wodnej

w Bydgoszczy. Elektrownia usytuowana jest na rzece Brda w Bydgoszczy, na Wyspie Młyńskiej.

Zwiększenie sprawności całego zespołu zrealizowano poprzez:

- wprowadzenie płynnej regulacji prędkości obrotowej turbiny wodnej w szerokim zakresie, stosownie do aktualnych warunków wodnych, w jakich pracuje turbina;
- zastąpienie generatora asynchronicznego z wirnikiem klatkowym generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi;
- wyeliminowanie przekładni mechanicznej (multiplikatora prędkości) między turbiną wodną a generatorem;
- możliwość programowego sterowania współczynnikiem i oddawanie mocy do sieci przy wysokim współczynniku mocy  $\cos\varphi = 1$ ;
- bezproblemowe przyłączanie generatora do sieci przesyłowej (wyeliminowanie problemów związanych z koniecznością synchronizacji generatora z siecią);
- możliwość programowej kontroli i ograniczania zawartości harmonicznych w napięciu wyjściowym przemiennika;
- możliwość pracy hydroelektrowni na „słabej” sieci oraz autonomicznie w sieciach wydzielonych (zamkniętych).

Na kolejnym rysunku 18 przedstawiono przykład amatorskiego wykonania małej elektrowni wodnej. Elektrownia została zbudowana ok. 2000 roku, jednak dopiero z początkiem 2004 roku zainstalowano tam niezawodną prądnicę z magnesami trwałymi produkcji KOMEL, o mocy 1,5 kW. Elektrownia, jak widać na fotografii, zbudowana jest na niewielkim cieku wodnym znajdującym się w Miliku koło Muszyny. Wyprodukowana w ten sposób energia elektryczna, o zmiennych parametrach, uzależnionych od prędkości przepływu wody, jest bezpośrednio zużywana do ogrzewania ciepłej wody użytkowej oraz dogrzewania domu (czasem do zaparzenia herbaty).



Rys. 18. Mała przydomowa elektrownia wodna w wykonaniu amatorskim o mocy 1,5 kW

Zastosowana w elektrowni prądnica pracuje bezawaryjnie już ponad 13 lat.

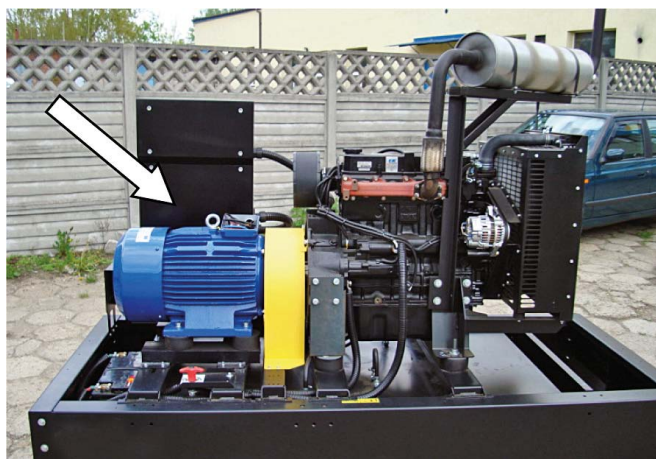
### 3.4. Wysoko sprawne prądnice do bioagregatów prądotwórczych

Innymi urządzeniami, ze względu na możliwości aplikacyjne zastosowania prądnic z magnesami trwałymi, są agregaty spalinowe prądotwórcze nowej generacji. Agregaty tego typu mogą być zasilane np. biogazem pozyskiwanym z procesu gazyfikacji biomasy. Na rysunku 19 przedstawiono spalinowy agregat prądotwórczy, który był obiektem badań w instytucie. W agregacie tym zainstalowano wysoko sprawną prądnicę z magnesami trwałymi [16].

Podczas realizacji projektu opracowano ponad 20 konstrukcji prądnic z magnesami trwałymi, dedykowanych w szczególności do zastosowań w agregatach prądotwórczych. Agregaty te, przy odpowiednim zasilaniu, np. biogaz, mogą pracować w systemach odnawialnych źródeł energii. Bardzo istotną cechą opracowanych urządzeń była poprawa energetyczna skuteczności przetwarzania energii mechanicznej w elektryczną. W porównaniu do obecnie stosowanych prądnic ze wzbudzeniem elektromagnetycznym uzyskano średnią poprawę sprawności o ok. 4%. Poprawa sprawności jest bardzo istotna, gdyż daje realnie większe zyski ze sprzedaży energii elektrycznej. Na przykład w elektrowni gazowej o mocy 100 kW, jeśli podniesiemy jej sprawność o 4%, w ciągu roku można wyprodukować ponad 35 000 kWh energii elektrycznej więcej. W skali roku daje to dodatkowe przychody na poziomie prawie 15 tys. zł (założono, że 1 kWh kosztuje 40 groszy).

### 4. Podsumowanie

W ciągu ostatnich kilku lat w Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL zrealizowano wiele ciekawych projektów aplikacyjnych. We wszystkich zaprezentowanych projektach zastosowano maszyny z magnesami trwałymi, silniki lub prądnice. Wszystkie zaprezentowane i opracowane konstrukcje zostały wdrożone do produkcji.



Rys. 19. Agregat spalinowo-elektryczny o mocy znamionowej 30 kVA i prędkości 1500 obr./min [16]

Zagadnienia związane z maszynami z magnesami trwałymi są ciągle rozwojowe. Wymagania klientów odnośnie do zmniejszenia gabarytów, zmniejszania masy, przy równoczesnym zwiększeniu momentów obrotowych i mocy, wymuszają dalszą kontynuację prac B+R nad tego typu maszynami. Aby skutecznie uzyskać poprawę parametrów elektromechanicznych, nie wystarczy już dokładne projektowanie maszyny, należy jeszcze szukać możliwości zastosowania nowych materiałów, np. blach elektrotechnicznych o bardzo niskiej stratności i wysokim współczynniku nasycenia.


Podsumowując, podstawowym celem niniejszej publikacji było pokazanie praktycznych możliwości stosowania maszyn z magnesami trwałymi. Skupiono się głównie na najważniejszych parametrach eksploatacyjnych oraz na wizualnym zaprezentowaniu wyników projektów.

### Literatura

- [1] ADAMCZYK D., MICHNA M., RONKOWSKI M., KUTT F., BERNATT J., PISTELOK P., KRÓL E., KUCHARSKI Ł., KWIATKOWSKI M., BYRSKI Ł., KOZIOŁ M.: *Koncepcja, modelowanie i symulacja układu napędowego prototypu samochodu elektrycznego ELV001*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 92/2011.
- [2] BERNATT J.: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*. Monografia BOBRME Komel, Katowice 2010.
- [3] BERNATT J., GAWRON S., KRÓL E.: *Energia wiatru jako źródło taniego ciepła*. „Śląskie Wiadomości Elektryczne” (58)01/2005.
- [4] BERNATT J., GAWRON S., KRÓL E.: *Wykorzystanie energii wiatru do efektywnego dogrzewania pomieszczeń gospodarczych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 72/2005.
- [5] BERNATT J., KRÓL E.: *Comparison of Two Versions of Electric Motors Used in a Drivetrain of an Electric Car*. The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, EVS-25 Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010.
- [6] BODORA A., BISKUP T., DOMORACKI A.: *Dwustrefowy napęd małego pojazdu elektrycznego z silnikami BLDC*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 12/2010.



- [7] DUKALSKI P., BRYMORA L.: *Nowa koncepcja silnika trakcyjnego wzbudzanego magnesami trwałymi, przeznaczonego do zastosowania w napędach kopalń*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2(99)/2013.
- [8] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 2002.
- [9] KRÓL E.: *Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2/2014.
- [10] KRÓL E., BIAŁAS A.: *Koncepcja napędu hybrydowego przeznaczonego do samochodu dostawczego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 1/2012.
- [11] KRÓL E., GAWRON S., SKĘCZEK W.: *Autobus miejski z napędem spalinowo-elektrycznym – aspekty społeczno-ekonomiczne wyników badań drogowych*. „Logistyka” 4/2015.
- [12] KRÓL E., SKĘCZEK W.: *Autobus miejski z napędem spalinowo-elektrycznym. Wyniki badań drogowych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1/2015.
- [13] KRÓL E., MACIĄŻEK M.: *Wpływ algorytmu sterowania przekształtnika na właściwości napędu z silnikiem*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2/2013.
- [14] MRÓZ J., SKUPIEŃ K., DRWIĘGA A., BUDZYŃSKI Z., POLNIK B., CZERNAK D., DUKALSKI P., BRYMORA L.: *Gentle accumulator drive (GAD) – new directions of development for the mining industry*. „Przegląd Elektrotechniczny” 06/2013.
- [15] PISTELOK P., ROSSA R.: *Generatory synchroniczne z magnesami trwałymi dedykowane dla małych elektrowni wodnych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(106)/2015.
- [16] PISTELOK P.: *Jednostka prądowórcza z generatorem z magnesami trwałymi – wyniki badań*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1(101)/2014.
- [17] ROSSA R.: *Zaawansowane rozwiązania techniczne w napędzie elektrycznym E-Kit dla miejskiego samochodu osobowego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(102)/2014.
- [18] ROSSA R., BIAŁAS A.: *Prądnica synchroniczna z magnesami trwałymi o wirniku zewnętrznym do przydomowych elektrowni wiatrowych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 89/2011.
- [19] ROSSA R., BIAŁAS A.: *Napęd elektryczny e-Kit miejskiego pojazdu dostawczego – rozwiązania techniczne*. „Logistyka” 6/2014.
- [20] ROSSA R., KRÓL E.: *Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „E-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 4(97)/2012.
- [21] ROSSA R., PISTELOK P.: *Małe elektrownie wodne jako źródło energii odnawialnej*. „Rynek Energii” 2(111)/2014.
- [22] WOLNIK T., KRÓL E.: *Optymalizacja obwodu elektromagnetycznego silnika do bezprzekładniowego napędu górniczego przenośnika taśmowego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(110)/2016.
- [23] [www.elipsavehicle.com](http://www.elipsavehicle.com).
- [24] [www.eledriveco.pl/](http://www.eledriveco.pl/).
- [25] [www.komel.katowice.pl](http://www.komel.katowice.pl).

 dr inż. Stanisław Gawron – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL; e-mail: [s.gawron@komel.katowice.pl](mailto:s.gawron@komel.katowice.pl)

artykuł recenzowany