

# Wielofunkcyjne zestawy napędowe

Łukasz Kubik

## 1. Wstęp

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL z siedzibą w Katowicach jest, od 69 lat, wiodący w Polsce w zakresie projektowania, konstruowania i badania maszyn elektrycznych. Instytut opracował wiele nowych rozwiązań maszyn elektrycznych seryjnie produkowanych i maszyn specjalnych dostosowanych do konstrukcji maszyn roboczych z uwzględnieniem warunków eksploatacji. Projektanci i konstruktorzy Instytutu są autorami unikalnych algorytmów obliczeniowych i programów komputerowych. Laboratorium maszyn elektrycznych opracowało oryginalne metody badań stanowiskowych i diagnostycznych maszyn elektrycznych w przemyśle. Zakład wdrożeniowy Instytutu ma w dorobku dziesiątki wykonań unikalnych rozwiązań maszyn elektrycznych, w tym także wielofunkcyjnych zestawów napędowych. Instytut pierwszy w Polsce prowadził badania maszyn z magnesami trwałymi, a także ich produkcję z przeznaczeniem do pojazdów elektrycznych, elektrowni wiatrowych i wodnych, traktacji górniczej i innych aplikacji. Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi mają dużą gęstość mocy, najwyższą sprawność i dużą przeciążalność momentem, są to najnowocześniejsze odmiany maszyn elektrycznych. Produkcja maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi w Instytucie KOMEL została zapoczątkowana w roku 2004, a od 2007 roku do oferty Instytutu zostały wprowadzone laboratoryjne oraz przemysłowe zestawy napędowe z wykorzystaniem tych maszyn. Na przestrzeni tych lat zostało wykonanych kilkadziesiąt zestawów napędowych o różnych konfiguracjach. Propozycja ta cieszy się coraz większym zainteresowaniem ze strony zakładów przemysłowych, uczelni technicznych,

szkół zawodowych oraz technicznych. Poniżej zostanie przedstawionych kilka z tych rozwiązań.

## 2. Wielofunkcyjne zestawy napędowe

### 2.1. Zestaw emulujący działanie rzeczywistych elektrowni, elektrociepłowni zawodowych oraz hydrozespołów odwracalnych

Zestaw składa się z:

1. Silnika indukcyjnego klatkowego – o parametrach: 100 kW,  $3 \times 400/3 \times 690$  V (170/98 A)  $\Delta/Y$ , 50 Hz, 1488 obr./min (maksymalna prędkość obrotowa 1800 obr./min), praca S1, współczynnik mocy 0,9, sprawność 94,6%, masa 875 kg, chłodzenie obce – który jest emulatorem turbiny. Silnik wyposażony jest w enkoder inkrementalny optoelektroniczny 4096 imp./obr., izolowane łożyska oraz przystosowany jest do zasilania z przekształtnika.
2. Generatorsynchronicznego o parametrach: 100 kVA,  $3 \times 400$  V (144 A) Y, 50 Hz, 1500 obr./min, praca S1, współczynnik mocy 0,8, sprawność 91%, napięcie uzwojenia wzbudzenia 40 V (18 A), masa 880 kg, chłodzenie własne, wyposażonego w regulator turbiny.

Obydwie maszyny są połączone sprzęgłem: sztywnym, bezluzowym i bezobsługowym, dostosowane do obrotów, mocy i momentu obrotowego obu maszyn. Sprzęgło umożliwia pracę zespołu z momentem udarowym  $\leq 200\%$  momentu znamionowego, z kompensacją odchyłek kątowych  $\leq 1^\circ$  oraz osiowych i promieniowych  $\leq 2$  mm.

Całość usytuowana jest na ramie z wibroizolatorami (rys. 1).

**Streszczenie:** Wielofunkcyjne zestawy napędowe umożliwiają prowadzenie, na modelach fizycznych, eksperymentów o różnych konfiguracjach układów napędowych, w tym m.in. bloków elektroenergetycznych elektrowni: ciepłych, wodnych i wiatrowych. Artykuł opisuje przykładowe wielofunkcyjne zestawy napędowe produkowane przez Instytut KOMEL, które odgrywają znaczącą rolę i które są instalowane w zakładach przemysłowych, laboratoriach uczelni wyższych, a także szkołach zawodowych i technicznych. Wielofunkcyjne zestawy napędowe idealnie nadają się do szkolenia kadry technicznej i do prowadzenia badań weryfikujących symulacje komputerowe.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, zestawy napędowe, zespoły elektromaszynowe, stanowisko badawcze

### MULTIFUNCTIONAL DRIVES UNITS

**Abstract:** Multifunctional drives units allow carrying on models of the physical blocks, experimentation various configurations of drive systems inter alia blocks power plants: thermal, hydro and wind. The article describes an example of multifunctional drives units manufactured by the Institute KOMEL, which play a significant role and are installed in industrial plants, laboratories, higher education institutions and vocational and technical schools. Multifunctional drives units are ideal for training technical staff and to conduct research verifying computer simulations.

## 2.2. Zestaw emulujący działanie rzeczywistej elektrowni wiatrowej z wielobiegunowym generatorem synchronicznym ze wzбудzeniem z magnesami trwałymi

Zestaw składa się z:

1. Silnika indukcyjnego klatkowego o parametrach: 75 kW,  $3 \times 400/3 \times 690$  V (128/74 A)  $\Delta/Y$ , 50 Hz, 1488 obr./min (maksymalna prędkość obrotowa 1800 obr./min), praca S1, współczynnik mocy 0,9, sprawność 94,2%, masa 678 kg, chłodzenie obce. Silnik wyposażony w enkoder inkrementalny optoelektroniczny 4096 imp./obr. Silnik jest przystosowany do zasilania z przekształtnika i symuluje turbinę wiatrową.
2. Przekładni mechanicznej zębatej o parametrach: moc maksymalna 190 kW, przełożenie  $i = 5$ , maksymalne obroty wejściowe 1600 obr./min, masa 430 kg, obniżającej prędkość obrotową silnika do prędkości obrotowej generatora synchronicznego.
3. Generatora synchronicznego z magnesami trwałymi o parametrach: 60 kW,  $3 \times 480$  V (72,2 A), 45 Hz, współczynnik mocy 1, prędkość obrotowa 300 obr./min (maksymalna 320 obr./min), praca S1, sprawność 96,2%, masa 1883 kg. Prądnicą wyposażoną jest w enkoder absolutny.

Maszyny są połączone ze sobą poprzez sprzęgło: bezluzowe i bezobsługowe, dostosowane do prędkości obrotowej,



Rys. 1. Zestaw emulujący pracę rzeczywistych elektrowni, elektrociepłowni zawodowych oraz hydrozespołów odwracalnych



Rys. 2. Zestaw emulujący działanie rzeczywistej elektrowni wiatrowej z wielobiegunowym generatorem synchronicznym ze wzbudzeniem z magnesami trwałymi

mocy i momentu obu maszyn. Sprzęgło umożliwia pracę zespołu z momentem uderowym  $\leq 200\%$  momentu znamionowego, z możliwością kompensacji

odchyłek kątowych  $\leq 1^\circ$  oraz osiowych i promieniowych  $\leq 2$  mm.

Całość usytuowana jest na ramie z wibroizolatorami (rys. 2).

reklama

reklama

### 2.3. Zestaw emulujący działanie rzeczywistej elektrowni wiatrowej z generatorem indukcyjnym pierścieniowym – maszyną dwustronnie zasilaną

Zestaw składa się z:

1. Silnika indukcyjnego klatkowego o parametrach: 75 kW,  $3 \times 400/3 \times 690$  V (128/74 A)  $\Delta/Y$ , 50 Hz, 1488 obr./min (maksymalna prędkość obrotowa 2000 obr./min), praca S1, współczynnik mocy 0,9, sprawność 94,2%, masa 678 kg, chłodzenie obce. Silnik jest przystosowany do zasilania z falownika, wyposażony jest w enkoder inkrementalny optoelektroniczny 4096 imp./obr. i symuluje rzeczywistą turbinę wiatrową.
2. Prądnica indukcyjna pierścieniowa o parametrach: 55 kW,  $3 \times 400$  V (97 A), 50 Hz, prędkość obrotowa 1467 obr./min (maksymalna 2250 obr./min), praca S1, współczynnik mocy 0,88, sprawność 93%, napięcie wirnika 750 V (46 A), masa 620 kg, chłodzenie obce. Prądnica jest wyposażona dodatkowo w enkoder absolutny.

Maszyny są połączone sprzęgłem: bezluzowym i bezobsługowym, dostosowanym do prędkości obrotowej, mocy i momentu obu maszyn. Sprzęgło umożliwia pracę maszyn z momentem udarowym  $\leq 200\%$  momentu znamionowego, z możliwością kompensacji odchyłek kątowych  $\leq 1^\circ$  oraz osiowych i promieniowych  $\leq 2$  mm.

Całość usytuowana jest na ramie z wibroizolatorami (rys. 3).

### 2.4. Zestaw elektromaszynowy do badania prądnicy obcowzbudnej prądu stałego

Zestaw składa się z:

1. Silnika indukcyjnego klatkowego 3-fazowego o parametrach: 0,75 kW, 1390–500 obr./min,  $3 \times 400$  V, chłodzenie własne powietrzne.
2. Falownika o napięciu zasilania  $3 \times 400$  V, 50 Hz z przewodem zakończonym wtyczką 3-fazową do zasilania silnika z poz. 1. Falownik umożliwia rozruch oraz regulację prędkości obrotowej silnika w zakresie 1390–500 obr./min. Falownik

zabudowany jest w obudowie wraz z aparaturą zabezpieczającą. Przewody zasilające silnik indukcyjny są doprowadzone do skrzynki z zaciskami laboratoryjnymi.

3. Prądnicy prądu stałego obcowzbudnej o parametrach:  $\sim 0,3$  kW, 230 V,  $\sim 1500$ –500 obr./min, wzbudzenie obce 200 V DC, wentylacja własna.
4. Transformatora regulacyjnego 230 V/0–260 V, łącznie z mostkiem prostowniczym umożliwiającym regulację napięcia prądnicy w zakresie  $230 \div \sim 50$  V. Elementy zabudowane w obudowie z wyprowadzonymi zaciskami umożliwiającymi podłączenie przyrządów pomiarowych oraz połączenie prądnicy z rezystorem, poz. 5.

5. Rezystora obciążającego prądnicę z poz. 3.

Maszyny połączone są ze sobą poprzez sprzęgło, a całość usytuowana jest na wspólnym korpusie z wibroizolatorami (rys. 4).

Zestaw umożliwia:

- pomiar charakterystyki obciążenia prądnicy z poz. 3  $U_{pr} = f(I_{obc})$  dla prędkości obrotowych  $\sim 1500 \div 500$  obr./min i prądów obciążenia prądnicy 0,25–1,5  $I_{npr}$ ;
- pomiar charakterystyki zewnętrznej prądnicy z poz. 3  $U_{pr} = f(i_w)$  przy  $n_{pr} = \text{const.}$ ;  $I_{obc} = 0$  A;
- pomiar charakterystyki obciążenia silnika z poz. 1  $n = f(I_{obc})$ .



Rys. 3. Zestaw emulujący działanie rzeczywistej elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym pierścieniowym – maszyną dwustronnie zasilaną



Rys. 4. Zestaw elektromaszynowy do badania prądnicy obcowzbudnej prądu stałego



Rys. 5. Zestaw elektromaszynowy, napędzany silnikiem obcowzbudnym prądu stałego, do badania prądnicy 3-fazowej synchronicznej z magnesami trwałymi prądu przemiennego

### 2.5. Zestaw elektromaszynowy, napędzany silnikiem obcowzbudnym prądu stałego, do badania prądnicy 3-fazowej synchronicznej z magnesami trwałymi prądu przemiennego

Zestaw składa się z:

1. Silnika prądu stałego o parametrach:  $\sim 0,36$  kW, 200 V DC, 2 A, ok. 1500–300 obr./min, wzbudzenie obce 200 V DC.
2. Prądnicy 3-fazowej synchronicznej z magnesami trwałymi prądu przemiennego o parametrach: 0,4 kW, 1500–300 obr./min,  $\sim 3 \times 230$  V ( $\Delta$ ), chłodzenie własne powietrzne.
3. Rezystora obciążającego prądnicę z poz. 2.
4. Mostka prostowniczego włączonego w obwód główny prądnicy z poz. 2. Mostek jest umieszczony w obudowie z wyprowadzonymi zaciskami umożliwiającymi podłączenie przyrządów pomiarowych oraz połączenie prądnicy z rezystorem.
5. Transformatora regulacyjnego 230 V / 0–260 V i mostka prostowniczego AC/DC do regulacji napięcia silnika z poz. 1, które umożliwiają regulację prędkości obrotowej silnika poz. 1 w zakresie  $\sim 1500 \div 300$  obr./min. Elementy te są zabudowane w obudowie z wyprowadzonymi zaciskami umożliwiającymi podłączenie przyrządów pomiarowych oraz przyłączenie sieci zasilającej z transformatorem.

Maszyny połączone są ze sobą poprzez sprzęgło, a całość usytuowana jest na wspólnym korpusie z wibroizolatorami (rys. 5).

Zestaw umożliwia:

- pomiar charakterystyki obciążenia prądnicy z poz. 2  $U_{pr} = f(I_{obc})$  dla prędkości obrotowych

prądnicy w zakresie ok. 1500–300 obr./min i prądów obciążenia prądnicy  $0,25-1,5 I_{npr}$ ;

- pomiar charakterystyki obciążenia silnika z poz. 1  $n = f(I_{obc})$  dla  $U_{wzb} = 200$  V DC = const. dla prędkości obrotowych w zakresie ok. 1500–300 obr./min dla prądów obciążenia silnika  $0,25-1,5 I_{nsil}$ .

### 2.6. Zestaw elektromaszynowy, napędzany silnikiem indukcyjnym klatkowym, do badania prądnicy 3-fazowej synchronicznej z magnesami trwałymi prądu przemiennego

Zestaw składa się z:

1. Silnika indukcyjnego klatkowego 3-fazowego o parametrach: 0,75 kW, 1400 obr./min,  $3 \times 400$  V, 50 Hz, praca ciągła S1, chłodzenie własne powietrzne.
2. Falownika do silnika z poz. 1 zabudowanego w szafie wraz z: zabezpieczeniem zwarciowym falownika, wyłącznikiem głównym, klawiaturą sterującą do falownika na elewacji szafy, przyciskiem zadawania prędkości lewo/prawo, przyciskiem stop oraz przyciskiem bezpieczeństwa. Napięcie zasilania falownika  $3 \times 400$  V, 50 Hz. Szafa wyposażona w przewód zasilający zakończony wtyczką 3-fazową oraz przewód do zasilania silnika z poz. 1.
3. Prądnicy 3-fazowej synchronicznej z magnesami trwałymi prądu przemiennego o parametrach: 575 W, 1500 obr./min,  $3 \times 400$  V (Y), 50 Hz, praca ciągła S1, chłodzenie własne powietrzne. Prądnicę można obciążyć w sposób ciągły prądem znamionowym, tj. 0,83 A w zakresie prędkości obrotowej 700–1500 obr./min. Dodatkowo prądnicą

została wyposażona w rozłącznik obciążenia z poz. 4.

- Trzech 3-fazowych rezystorów obciążających wraz z przewodami do prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi. Zakres regulacji obciążenia od  $\sim 0,25 \cdot I_n$  do  $1,2 \cdot I_n$ .

Maszyny połączone ze sobą poprzez sprzęgło, a całość usytuowana jest na wspólnym korpusie z wibroizolatorami (rys. 6).



Rys. 6. Zestaw elektromaszynowy, napędzany silnikiem indukcyjnym klatkowym, do badania prądnicy 3-fazowej synchronicznej z magnesami trwałymi prądu przemiennego

## 2.7. Zestaw napędowy z silnikiem PMSM bezszczotkowym o sterowaniu sinusoidalnym

Zestaw składa się z:

- Silnika synchronicznego PMSM z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz rdzenia wirnika, o parametrach:
  - moc znamionowa – 1 kW;
  - praca ciągła S1;
  - prędkość znamionowa – 1500 obr./min;
  - napięcie znamionowe dopasowane do układu energoelektronicznego;
  - chłodzenie – własne.
 Silnik wyposażony jest w enkoder.
- Prądnicy (hamownicy) prądu stałego:

Moc znamionowa [kW]	1,2	2,4
Prędkość znamionowa [obr./min]	1500	3000
Znamionowe napięcie twornika [V]	115	230
Prąd znamionowy twornika [A]	10,4	10,4
Rodzaj wzbudzenia: obce [V]	200	200
Chłodzenie	własne	
Przeciążalność prądnicy	1,6 $I_n$ przez 30 s	

- Energoelektronicznego układu zasilająco-sterującego z możliwością oddawania energii do sieci, sterowany enkoderem osadzonym na wale silnika, umożliwiającą:
  - regulację prędkości w obydwu kierunkach w zakresie  $-2n_N \leq n \leq 2n_N$ , z możliwością odczytu wartości prędkości i wskazań nastawy;
  - pomiar i obserwację przebiegów prądów po stronie DC i AC;
  - regulację wartości prądów w osi d i q;

- pracę w zakresie osłabiania pola i chwilowe przeciążenie prądem z możliwością nastawy ograniczenia. Układ zasilająco-sterujący wyposażony jest w dodatkowe zaciski do pomiarów napięć (rys. 7).
- Przetwornika momentu obrotowego sprzęgniętego poprzez elektromagnetyczne sprzęgło tarczowe (24 V DC) rozłączne z wałem silnika i sprzęgło membranowe z wałem prądnicy, umożliwiającą:
  - pomiar wartości średniej, chwilowej i maksymalnej momentu;
  - rejestrację przebiegu czasowego momentu obciążenia.
 Zestaw zamontowany jest na konstrukcji montażowej z wibroizolatorami (rys. 8) i jest wyposażony w ekranowane kable zasilające i sygnałowe enkodera i momentomierza.

## 2.8. Zestaw napędowy z silnikiem BLDC bezszczotkowym o sterowaniu sinusoidalnym

Zestaw składa się z:

- Silnika synchronicznego BLDC z magnesami trwałymi osadzonymi na powierzchni rdzenia wirnika, o parametrach:
  - moc znamionowa – 1 kW;
  - rodzaj pracy – praca ciągła S1;
  - prędkość znamionowa – 1500 obr./min;
  - napięcie znamionowe dopasowane do układu energoelektronicznego;
  - chłodzenie – własne.
 Silnik wyposażony w enkoder halotronowy umieszczony wewnątrz silnika.

- Prądnicy (hamownicy) prądu stałego o parametrach:
  - moc znamionowa – 1,2 kW;
  - prędkość znamionowa – 1500 obr./min;
  - znamionowe napięcie twornika – 115 V;
  - prąd znamionowy twornika – 10,4 A;
  - rodzaj wzbudzenia obce – 200 V;
  - chłodzenie – własne;
  - przeciążalność prądnicy –  $1,6 I_N$  przez 30 s.
- Energoelektronicznego układu zasilająco-sterującego umożliwiającą:
  - regulację prędkości w obydwu kierunkach w zakresie  $-n_N \leq n \leq n_N$ , z możliwością odczytu wartości prędkości i wskazań nastawy;
  - pomiar i obserwację przebiegów prądów po stronie DC i AC;
  - regulację wartości prądu w osi q;
  - chwilowe przeciążenie prądem z możliwością nastawy ograniczenia.



Rys. 7. Energoelektroniczny układ zasilająco-sterujący do silnika synchronicznego z magnesami trwałymi



**Rys. 8.** Zestaw napędowy z silnikiem PMSM sterowanym sinusoidalnie i z silnikiem BLDC sterowanym trapezowo

stale jest aktualizowana i rozszerzana o nowe urządzenia, podzespoły.

Elektromaszynowe stanowiska badawczo-dydaktyczne idealnie nadają się do szkolenia kadry technicznej w zakresie eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych, a także do prowadzenia badań stanowiskowych różnych zdarzeń eksploatacyjnych.

### Literatura

- [1] GAWRON S., TOMASZKIEWICZ W.: *Dydaktyczne zestawy badawcze*. „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne” 82/2009, wyd. BOBRME Komel, s. 17–20.
- [2] KUBIK Ł., TOMASZKIEWICZ W.: *Wielofunkcyjne zespoły napędowe*. „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne” 89/2011, wyd. BOBRME Komel, s. 75–78.
- [3] KUBIK Ł.: *Wielofunkcyjne zespoły napędowe*. „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne” 110/2016, wyd. INiME Komel, s. 65–69.

Układ zasilająco-sterujący wyposażony jest w dodatkowe zaciski do pomiarów napięć.

4. Przetwornika momentu obrotowego sprzęgniętego, poprzez sprzęgło tarczowe rozłączne elektromagnetyczne (24 V DC), z wałem silnika i sprzęgło membranowe z wałem prądnicy, umożliwiającego:

- pomiar wartości średniej, chwilowej i maksymalnej momentu;
- rejestrację przebiegu czasowego momentu obciążenia.

Zestaw zamontowany jest na konstrukcji montażowej z wibroizolatorami (rys. 8), który jest wyposażony w ekranowane kable zasilające i sygnałowe halotronów i momentomierza.

### 3. Podsumowanie

Projektowanie i wykonywanie zestawów napędowych jest jedną ze

specjalności Instytutu KOMEL, która ciągle się rozwija i rozszerza swój zakres. Opisane w artykule przykładowe zespoły napędowe obrazują część możliwości wykonawczych Zakładu Wdrożeniowego Instytutu. Zestawy te mogą być tworzone w różnych konfiguracjach, typach maszyn, parametrach znamionowych, formach wykonania, chłodzenia itp. Są one dopasowywane pod potrzeby klientów.

Głównymi odbiorcami stanowisk są: zakłady przemysłowe, uczelnie techniczne, szkoły zawodowe.

Dzięki technice *know-how*, bardzo dobrej jakości produktów i wysokiej sprawności maszyn. Instytut stał się w kraju wiodącym dostawcą zestawów napędowych. Instytut KOMEL posiada potencjał naukowo-techniczny i wykonawczy, którym może spełnić każde zapotrzebowanie zamawiającego. Oferta

mgr inż. Łukasz Kubik – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice  
e-mail: zaklad@komel.katowice.pl

artykuł recenzowany