

*maszyny elektryczne, magnesy trwałe, konstrukcja,
generatory synchroniczne, prądnice tarczowe,
obliczenia, magnetowody, elektrownie wiatrowe*

Bogusław KAROLEWSKI*, Paweł LUDWICZAK*,
Tomasz WALSZCZAK*

BUDOWA MODELU PRĄDNICY TARCZOWEJ

Przedstawiono wyniki obliczeń i pomiarów modelu prądnicy tarczowej bez rdzenia w stojanie, która przy prędkości obrotowej 200 obr/min wytwarza moc rzędu 3 kW. W modelu zastosowano zmodyfikowane uzwojenie typu SEMA, co zapewnia dobre wypełnienie miedzią przestrzeni pomiędzy magnesami trapezowymi na dwu tarczach wirnika. Prądnica posiada bardzo mały moment rozruchowy. Jest przystosowana do współpracy z turbinami wiatrowymi, zwłaszcza wolnobieźnymi o osi pionowej.

1. WPROWADZENIE

Elektrownie wiatrowe są coraz popularniejszym źródłem energii odnawialnej. Jednak instalowanie elektrowni wiatrowych o dużych mocach w systemie elektroenergetycznym stwarza wiele problemów, które w pewnym stopniu hamują ich rozwój. Poza dużymi kosztami inwestycyjnymi, główną przyczyną zmniejszenia zainteresowania dużymi turbinami wiatrowymi są kłopoty ze zmiennością i trudnościami prognozowania produkcji energii. Również zarządzanie i sterowanie pracą źródeł rozproszonych w systemie energetycznym jest trudnym zadaniem.

Chęć pozyskiwania taniej energii spowodowała wzrost zainteresowania małymi elektrowniami wiatrowymi, o mocy od 0,1 kW do 10 kW, często wykorzystującymi turbiny z pionową osią, które nie stwarzają wymienionych problemów. Zalety takich mini elektrowni wiatrowych to niewielkie rozmiary, niezależność od kierunku wiatru, odporność na warunki atmosferyczne, cicha praca, brak zagrożenia dla ludzi i zwierząt.

W budynkach nowych oraz tych, które podlegają gruntownemu remontowi, zaleca się uwzględnienie wykorzystania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych (OZE).

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, boguslaw.karolewski@pwr.wroc.pl

Ponieważ małe elektrownie wiatrowe mogą działać praktycznie wszędzie, dobrze nadają się do spełnienia tego warunku. Elektrownie takie mogą służyć jako dodatkowe źródło energii, które w pewnym stopniu uniezależnia odbiorców od sieci lokalnego dystrybutora energii elektrycznej. Dobrze sprawdzają się zwłaszcza jako zasilanie budynków pasywnych – bardzo dobrze ocieplonych, które potrzebują małej ilości energii.

Mała elektrownia wiatrowa może dostarczać prąd na potrzeby odbiorcy wydzielonego, działającego niezależnie od sieci elektroenergetycznej. Brak współpracy z siecią pozwala uniknąć konieczności spełnienia szeregu rygorystycznych warunków i użytkowania odpowiednich zezwoleń. Odbiorem może być:

- wydzielony obwód w domu (np. obwód oświetleniowy, grzania wody lub ogrzewania podłogowego wspomagającego ogrzewanie budynku), działający niezależnie od pozostałej instalacji elektrycznej domu – zasilanej z sieci elektroenergetycznej,
- cała instalacja domowa, niepołączona do sieci elektroenergetycznej lub odłączana od tej sieci na czas korzystania z energii wytworzonej przez przydomową elektrownię.

W małych przydomowych elektrowniach można wykorzystywać wolnobieżne prądnice synchroniczne o magnesach trwałych. Rozwijającą się odmianą tych prądnic są wykonania tarczowe, uzyskujące moc znamionową przy prędkości obrotowej nawet rzędu 200 obr/min. Generatory tarczowe zaczynają produkować energię przy prędkościach znacznie niższych. Dzięki temu możliwe jest wyeliminowanie drogiej i hałaśliwej przekładni mechanicznej pomiędzy turbiną a prądnicą, nawet w przypadku wykorzystywania wolniejszych turbin o osi pionowej. Wadą takiej prostej prądnicy jest generowanie napięcia o zmiennej wartości skutecznej i częstotliwości. Parametry te są funkcją prędkości turbiny, a więc w przypadku prostych wykonania – bez stabilizacji prędkości – funkcją prędkości wiatru.

Niektórzy wytwórcy prądnic jako prędkość znamionową podają wartość odpowiadającą obniżonej częstotliwości napięcia zasilającego – np. 20 Hz. Prędkość odpowiadająca częstotliwości sieciowej jest w tym przypadku 2,5 krotnie wyższa od podawanej.

W przypadku zasilania oświetlenia, silników czy innych odbiorników wymagających zachowania określonych parametrów jakości energii, konieczne jest wykorzystywanie zasobników wytworzonej energii – np. akumulatorów. W celu ograniczenia maksymalnego prądu ładowania akumulatorów stosuje się kontrolery ładowania. Z kolei z akumulatorów zasila się falowniki przetwarzający napięcie stałe na zmienne i transformatory dopasowujące poziom napięcia do wymaganego przez odbiorniki. Wszystkie te elementy znacznie podrażają koszt układu zasilającego.

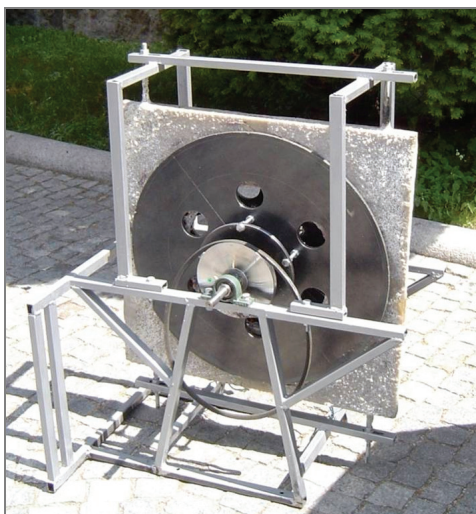
Znacznie prostsze urządzenia pośredniczące pomiędzy generatorem a odbiornikiem można wykorzystywać w przypadku zasilania grzejników. Zmiany częstotliwości nie mają w tym przypadku większego znaczenia. Odbiornik wykonuje się jako układ

grzałek. Przy niewielkim napięciu człony odbiornika łączy się równolegle, a w miarę wzrostu napięcia przełącza się grzałki w układy szeregowe. W bardziej zaawansowanych konstrukcjach, zamiast układów przekaźnikowo-stycznikowych, można wykorzystać regulator półprzewodnikowy.

Opis działania prądnic tarczowych, stosowanych w elektrowniach wiatrowych, przedstawiono w artykułach [1], [3], [4], [6], [12], a wyniki badań różnych modeli prądnic w [2], [5], [7]–[9]. Wśród wykonanych prądnic tarczowych wiele zalet mają prądnice bez rdzenia w stojanie. Są tańsze od rdzeniowych i nie wytwarzają momentu zaczepowego. Dlatego w pracy [10] zestawiono parametry kilku wariantów modeli prądnic bezrdzeniowych. Z porównania wynika, że wykorzystanie uzwojeń typu SEMA daje możliwość uzyskania największej mocy wyjściowej przy danych rozmiarach prądnicy bezrdzeniowej. W niniejszym artykule opisano kolejny model takiej prądnicy.

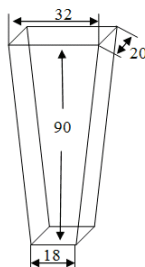
2. PARAMETRY PRĄDNICY

Projektowany generator jest trójfazową prądnicą synchroniczną, wolnoobrotową, bez rdzenia w stojanie, o prędkości znamionowej $n = 200$ obr/min., która odpowiada indukowaniu się napięcia o częstotliwości 50 Hz [6]. Prądnicę przedstawiono na rys. 1.

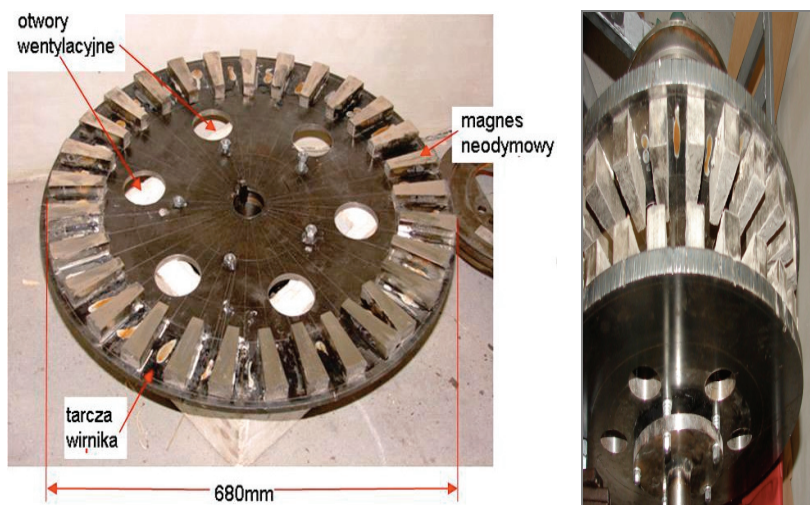


Rys. 1. Model prądnicy
Fig. 1. Model of the generator

Na dwóch jednakowych stalowych tarczach wirnika znajduje się po 30 magnesów trwałych o kształcie trapezowym (rys. 2), co daje 15 par biegunów prądnicy. Budowę wirnika ilustruje rys. 3.

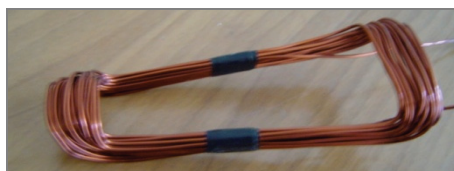
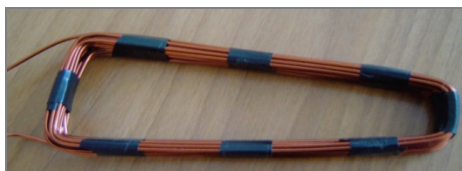


Rys. 2. Wymiary magnesu
Fig. 2. Dimensions of the magnet

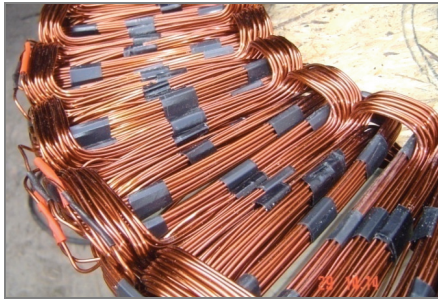


Rys. 3. Tarcza wirnika z magnesami i cały wirnik osadzony na osi
Fig. 3. Rotor disc with magnets and the whole rotor embedded on the axis

Każda z faz stojana składa się z 30 cewek typu SEMA [1], [6], [10], mających po 20 zwojów nawiniętych drutem o średnicy $d = 1,8$ mm. W jednej fazie umieszczono cewki proste, a w dwóch wywinięte w przeciwne strony (rys. 4). Ułożenie cewek pokazano na rys. 5, a cały stojan, zalany żywicą na rys. 6.



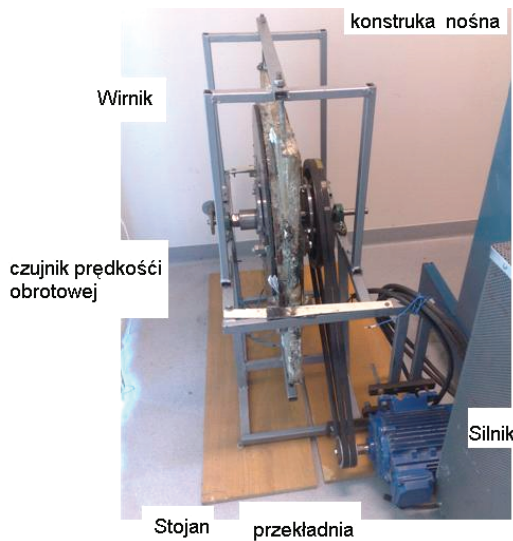
Rys. 4. Cewki projektowanej prądnicy – prosta i wywinięta
Fig. 4. The coils of designed generator – simple and brandished



Rys. 5. Ułożenie cewek w stojanie
Fig. 5. Arrangement of coils in the stator



Rys. 6. Stojan zalany żywicą
Fig. 6. Stator spilled with resin



Rys. 7. Prądnicą wolnobieźną wraz z silnikiem napędzającym
Fig. 7. Slow speed generator with driving motor

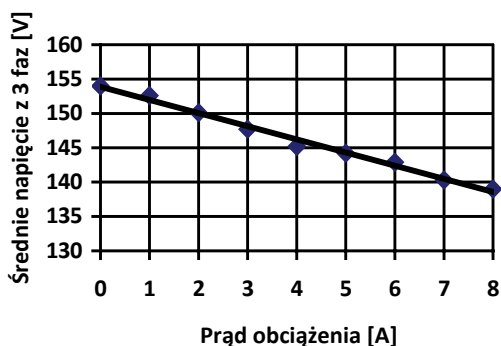
3. WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystując uproszczone wzory, na etapie projektu prądnicy wyznaczono parametry pola magnetycznego (natężenie pola i indukcję w magnesie $H_m = 367$ A/m, $B_m = 0,71$ T oraz w szczeliny pomiędzy magnesami (gdzie znajdują się cewki) $H_p = 565$ A/m, $B_p = 0,71$ T. Indukcja w stalowych tarczach wirnika o zaplanowanej grubości 10 mm $B_{Fe} = 1,77$ T. Ponieważ osiągnięta wartość indukcji przekracza próg nasycy-

nia stali konstrukcyjnej, indukcję w szczelinie skorygowano do wartości $B'_p = 0,56$ T. Amplituda strumienia skojarzonego z cewką $\Phi_p = 1,26 \cdot 10^{-3}$ Wb. Wartość skuteczna napięcia fazy powinna wynosić 168 V. Obliczeniowa rezystancja uzwojenia fazy wynosi $R_f = 1,8 \Omega$, a reaktancja przy pracy znamionowej $X_f = 0,98 \Omega$. Przy przyjętym maksymalnym prądzie obciążenia prądnicy na poziomie 8 A, napięcie fazowe prądnicy spadnie do 153,6 V, czyli maksymalna moc trójfazowej prądnicy przy rezystancyjnym obciążeniu nie przekroczy 3,7 kW.

4. WYNIKI POMIARÓW

Po wykonaniu modelu prądnicy, wykonano pomiary jej parametrów. Przebieg zmian średniego napięcia z 3 faz prądnicy w funkcji prądu obciążenia, uzyskaną przy prędkości 200 obr/min przedstawiono na rys. 8. Średnie napięcie fazowe na biegu jałowym przy 200 obr/min wyniosło 154 V, czyli jest o 14 V niższe od obliczeniowego. Spadek napięcia przy obciążeniu znamionowym wynosi 15,0 V, co jest wartością bardzo zbliżoną do obliczonej 14,4 V. Napięcie fazowe obciążonej prądnicy przy prędkości znamionowej wyniosło 139 V. Oznacza to obniżenie o około 10% w stosunku do wartości wyliczonej. Zmierzona moc znamionowa prądnicy trójfazowej wynosi 3,3 kW (względny błąd obliczeń 12%).



Rys. 8. Charakterystyka zewnętrzna uzyskana przy prędkości 200 obr/min

Fig. 8. The external characteristic obtained at a speed 200 rpm

5. PODSUMOWANIE

Wykonany model posiadał masę ponad 100 kg i jego wykonanie w warunkach przeciętnie wyspecjalizowanego warsztatu było dość trudne. Wydaje się, że moc rzędu 3 kW przy prędkości obrotowej 200 obr/min stanowi górny pułap w przypadku poje-

dynczej bezrdzeniowej prądnicy tarczowej wolnobieżnej przeznaczonej do zastosowań domowych.

Uzyskana zgodność wyników obliczeń i pomiarów jest wystarczająca do wstępnego doboru parametrów prądnicy.

LITERATURA

- [1] CIERZNIIEWSKI P., *Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe COMEL – Maszyny Elektryczne, 2007, nr 77.
- [2] DĄBAŁA K., KRZEMIENI Z., *Prądnica o małej prędkości obrotowej, przeznaczona do stosowania w odnawialnych źródłach energii*, Zeszyty Problemowe KOMEL – Maszyny Elektryczne, 2009, nr 84.
- [3] GLINKA T., *Prądnice dla małych elektrowni wiatrowych*, Wiadomości Elektrotechniczne, 2002, nr 10/11.
- [4] GORYCA Z., *Prądnica do małej bezprzekładniowej elektrowni wiatrowej*, Zeszyty Problemowe COMEL – Maszyny Elektryczne, 2010, nr 86.
- [5] GORYCA Z., *Wolnoobrotowy generator tarczowy do małej elektrowni wiatrowej*, Zeszyty Problemowe COMEL – Maszyny Elektryczne, 2008, nr 80.
- [6] KAROLEWSKI B., LIGOCKI P., *Rodzaje prądnic tarczowych*, Wiadomości Elektrotechniczne, 2008, nr 8.
- [7] KAROLEWSKI B., LIGOCKI P., *Badania modelu prądnicy tarczowej rdzeniowej o nietypowej konstrukcji*, Wiadomości Elektrotechniczne, 2008, nr 10.
- [8] KAROLEWSKI B., LIGOCKI P., *Badania modelu prądnicy tarczowej bezrdzeniowej z kołowymi cewkami*, Wiadomości Elektrotechniczne, 2008, nr 11.
- [9] KAROLEWSKI B., *Badanie wolnoobrotowej prądnicy przeznaczonej do małej elektrowni wiatrowej*, Pr. Nauk. Inst. Masz., Nap. i Pom. El. Politechn. Wrocławskiej, 2010, nr 64, Studia i Materiały nr 30.
- [10] KAROLEWSKI B., *Parametry modeli bezrdzeniowych prądnic tarczowych*, ElektroInfo, 2011, nr 6.
- [11] KAROLEWSKI B., SŁAPCZYŃSKI P., HALA Z., *Badanie modeli prądnic tarczowych rdzeniowych*, ElektroInfo, 2011, nr 6.
- [12] KRÓL E., ROSSA R., *Nowoczesne maszyny elektryczne z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, nr 12.

THE DISC GENERATOR MODEL CONSTRUCTION

Presents the results of the calculations and measurements of disc generator model without core in stator, which produces a power of 3 kW at the rotary speed of 200 RPM. The model uses a modified winding type of SEMA, which ensures a good fill in copper space between trapezoid magnets on two discs of the rotor. Generator has very little starting torque. It is adapted for cooperation with wind turbines, especially about vertical axis.