

Adam Gozdowiak, Piotr Kisielewski
KISIELEWSKI Sp. z o.o., Ligota Wolczyńska / Wrocław

HYDROGENERATOR MODUŁOWY DLA MAŁYCH ELEKTROWNI WODNYCH

MODULAR HYDROGENERATOR FOR SMALL WATER POWER PLANTS

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt i budowę uniwersalnego hydrogeneratora modułowego. Maszyna ta spełnia oczekiwania rynku co do trendu wzrostowego produkcji energii elektrycznych z odnawialnych źródeł energii, w szczególności z małych elektrowni wodnych. Generator modułowy posiada trzy identyczne segmenty, każdy o mocy 40 kVA. Segmenty te mogą być dokładane lub odejmowane dzięki czemu moc generowana ulega zwiększeniu lub zmniejszeniu. Uzyskano szeroki zakres prędkości obrotowej oraz generowanej mocy poprzez konfigurację połączeń uzwojenia stojana oraz zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego. Wykonane testy pomiarowe wykazały słuszność zakładanych założeń.

Abstract: This article presents the design and construction of an universal modular hydrogenerator. This machine meets the market expectations regarding the upward trend in the production of electricity from renewable energy sources, in particular from small hydropower plants. The modular generator has got three identical segments, each with a power of 40 kVA. These segments can be added or subtracted so that the generated power is increased or decreased. A wide range of rotational speed and generated power are obtained by configuring the connections of the stator winding and the use of a power electronic converter. The performed measurement tests proved that the assumptions were correct.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, hydrogenerator, konstrukcja, elektrownie wodne, energia odnawialna
Keywords: electrical machines, hydrogenerator, construction, water power plants, renewable energy

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich lat widoczny jest silny wzrost produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE) [1]. Nastąpił znaczący wzrost cen energii elektrycznej i skrócenie czasu zwrotu z inwestycji nowo budowanych elektrowni. Coraz większe znaczenie odgrywają małe instalacje OZE o mocach od 50 do 1000 kW. Szczególnie po ostatnim kwartale 2021 roku, kiedy to zmieniono definicję małej instalacji odnawialnego źródła energii. Nowa definicja poszerzyła zakres mocy elektrowni z 50-500 kW do 50-1000 kW. Ten zabieg pozytywnie wpłynął na osoby/podmioty posiadające elektrownie w takich mocach. W przypadku małych instalacji OZE nie ma konieczności uzyskania koncesji. Wymagany jest jedynie wpis do rejestru wytwórców prowadzonego przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki. Uzyskanie wpisu jest procesem mniej czasochłonnym i sformalizowanym w porównaniu z procedurą uzyskania koncesji na wytwarzanie energii elektrycznej. Ponadto małe instalacje OZE korzystają z systemu świadectw pochodzenia, bądź objęte są systemami wsparcia w postaci stałych taryf gwarantowanych (FIT) lub systemem dopłat do ceny rynkowej (FIP).

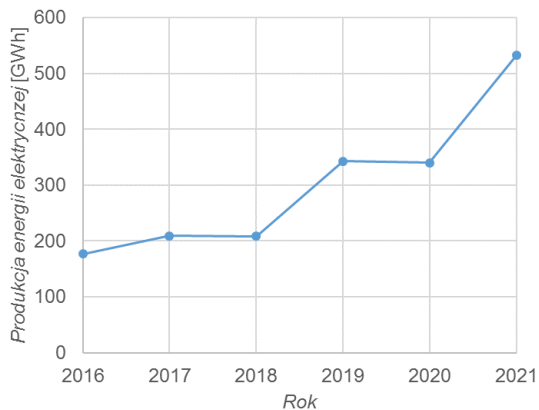
Według Urzędu Regulacji Energetyki (URE) [2] liczba instalacji OZE (o mocy od 50 do 1000 kW) wyniosła 1932 (stan na 31.12.2021). Moc zainstalowana w tych instalacjach wyniosła 1050 MW. Zestawienie instalacji OZE z podziałem na rodzaj źródła pokazuje tabela 1.

Tab. 1. Małe instalacje OZE w podziale na rodzaj źródła

Rodzaj instalacji OZE	Liczba instalacji	Moc zainstalowana [MW]
Hydroenergia (WO)	375	77,1
Energia wiatru (WI)	1128	758,5
Energia promieniowania słonecznego (PV)	132	43,3
Biogaz (GB)	294	170,9
Biomasa (BM)	3	0,7
Łącznie:	1932	1050,5

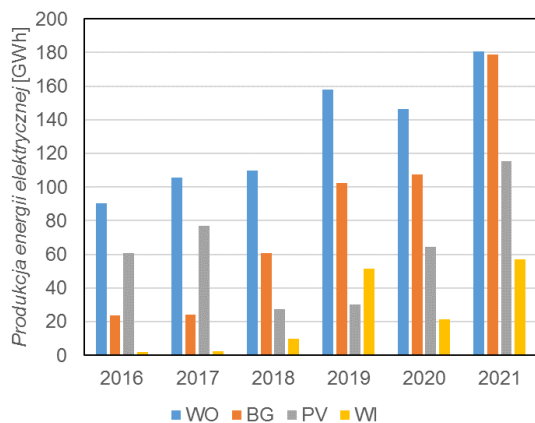
URE śledzi tempo rozwoju OZE i przedstawia wyniki w corocznych raportach [2]. Na ich po-

stawie sporządzono przebieg produkcji energii elektrycznej z małych instalacji OZE (rys. 1). Jednocześnie widać trend wzrostowy produkcji energii elektrycznej z tych źródeł.



Rys. 1. Przebieg produkcji energii elektrycznej w małych instalacjach OZE w latach 2016-2021

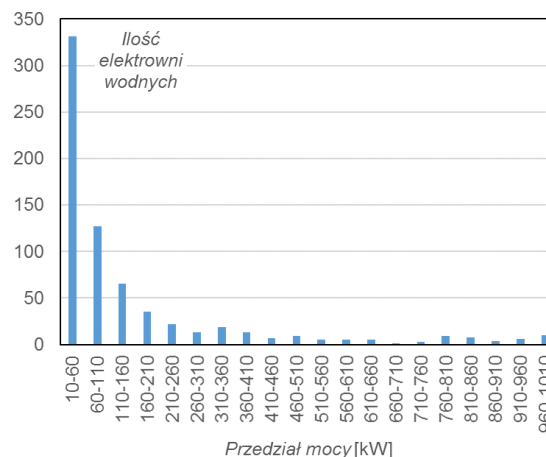
W 2021 roku najwięcej energii elektrycznej wyprodukowały małe elektrownie wodne (ponad 180 GWh), co stanowiło ok. 34 % energii wytworzonej przez wszystkie instalacje OZE. Jednocześnie w ostatnich latach odnotowano produkcyjny trend wzrostowy we wszystkich rodzajach instalacji OZE (rys. 2).



Rys. 2. Produkcja energii w małych instalacjach OZE w podziale na źródła w latach 2016-2021

Najwięcej wyprodukowanej energii sprzedali wytwórcy z instalacji wykorzystujących hydroenergię, co stanowiło ok. 93% energii wytworzonej. Natomiast najwięcej, bo aż 98% energii wyprodukowanej sprzedały instalacje wykorzystujące energię wiatru. Różnica między energią wyprodukowaną, a sprzedaną stanowiły potrzeby własne.

Najwięcej elektrowni wodnych w Polsce posiada stosunkowo małą moc zainstalowaną (rys. 3). Z wykazu małych instalacji OZE pokazanych w Raplocie Prezesa URE [2] można dostrzec, że aż ok. 82 % elektrowni posiada moc zainstalowaną w przedziale od 20 do 250 kW.



Rys. 3. Liczby elektrowni wodnych w zależności od wybranych przedziałów mocy zainstalowanej w zakresie od 10 do 1000 kW

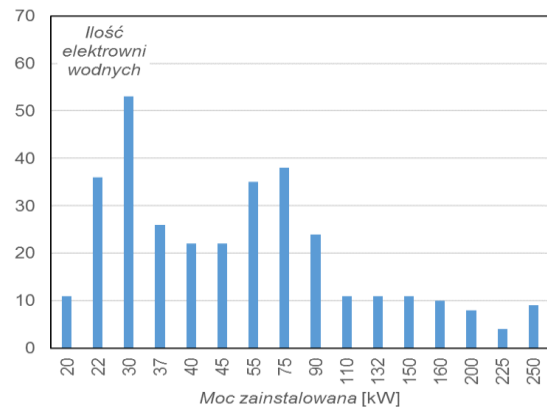
Niejednokrotnie w jednej elektrowni znajduje się kilka zespołów wytwórczych o różnych mocach. Większość jednostek wytwórczych to klatkowe generatory indukcyjne. Wybór tej maszyny jest nieprzypadkowy, ponieważ pochodzi ona z produkcji wielkoseryjnej, więc jest relatywnie tania i nie wymaga zastosowania układów regulacji wzbudzenia. Niejednokrotnie są to silniki indukcyjne o nowym, przezwojonym uzwojeniu stojana. Niestety poza wspomnianymi zaletami, posiada znacznie więcej wad takich jak: niska sprawność (ok. 85 % dla znamionowego punktu pracy), brak regulacji współczynnika mocy, słaba stabilność, brak odporności na prędkości robiegowe od turbin wodnych (Francisa, Kaplana) oraz posiadają małą liczbę biegunów, przez co ich prędkość znamionowa jest kilkukrotnie większa od znamionowej prędkości turbiny przez co wymuszone jest zastosowanie przekładni. Ponadto niski współczynnik mocy wymusza zastosowanie dodatkowych baterii kondensatorów wraz z układem automatyki.

Przekładnie obok generatorów indukcyjnych stwarzają największe problemy eksploatacyjne i są planowane do modernizacji. Przekładnie są dość uciążliwe, poprzez zbyt wysoki hałas. Posiadają one łożyska wymagające częstych przeglądów i napraw. Głównymi problemami generatorów są natomiast łożyska oraz zbyt wysoka

temperatura uzwojeń i kadłuba, skracające żywotność jednostki wytwórczej. Problemy z łożyskami wynikają z niedostosowania ich gabarytów do sił pochodzących od turbiny oraz praca generatora zarówno w pozycji poziomej, jak i pionowej. Natomiast wysoka temperatura jest efektem pracy generatorowej maszyny indukcyjnej, w której indukują się znacznie powyżej dopuszczalnej wartości prądu wirowe w klatce wirnika. Oprócz tego istotny wpływ na wzrost temperatury ma wzrost strat w żelazie, łożyskach oraz strat dodatkowych. Wszystkie wspomniane problemy wskazują na nieefektywne przetworzenie energii wody jako źródła w produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu istniejących rozwiązań. Dlatego zasadnym jest zastosowanie takiej konstrukcji generatora elektrycznego posiadającego wysoką sprawność w dużym zakresie mocy generowanej, dużej liczbie biegunów, a tym samym małej prędkości obrotowej, aby wyeliminować przekładnię. Odpowiednio dobrane łożyska umożliwią pracę zarówno w pozycji poziomej (posadowienie na łapach), jak i pionowej (montaż kołnierkowy). Pożądanym byłoby zaprojektowanie tylko jednej uniwersalnej maszyny, która umożliwi generowanie mocy w całym zakresie mocy jednostek wytwórczych oraz w pełnym zakresie prędkości obrotowej w małych instalacjach OZE. Przez co znacząco zredukowałyby się koszty związane z zaprojektowaniem, wykonaniem dokumentacji technicznej oraz przeprowadzenia niezbędnych testów ruchowych. To te koszty odgrywają kluczową rolę w produkcji jednostkowych, nisko-mocowych maszyn elektrycznych.

2. Dane znamionowe uniwersalnego generatora modułowego

Sprostanie wymagań stawianych generatorowi uniwersalnemu wspomnianemu we wstępie jest niełatwe ze względu na szeroki zakres mocy i prędkości obrotowej. Wiedząc, że ok. 82 % małych instalacji OZE posiada moc zainstalowaną nie większą niż 250 kW, zbadano jakie moce wytwórcze są dostępne w tych elektrowniach. Na rysunku 4 zaprezentowano moce zainstalowane, które pokrywają się z typoszeregiem silników indukcyjnych producentów maszyn elektrycznych. Udział maszyn wykazanych w przedziale od 20 do 250 kW stanowi 64 % wszystkich maszyn. Dobitnie to pokazuje, że wspomniane instalacje OZE są wyposażone w maszyny katalogowe.



Rys. 4. Liczby elektrowni wodnych w zależności od mocy zainstalowanej od 20 do 250 kW pokrywających się z typoszeregiem silników indukcyjnych

Ze względu na niski spadek polskich elektrowni wodnych, prędkość obrotowa turbin wodnych waha się w zakresie od 150 do 519 obr/min. Nie jest możliwe zbudowanie generatora pracującego w tak szerokim zakresie prędkości obrotowej. Jest za to możliwe przyłączenie generatora do sieci elektroenergetycznej za pośrednictwem przekształtnika energoelektrycznego, którego zadaniem jest utrzymywanie stałej wartości napięcia, częstotliwości oraz współczynnika mocy. Nieuzasadnionym ekonomicznie byłoby zastosowanie generatora o mocy znamionowej równej największej mocy instalacji OZE z przedziału mocy 20-250 kW. Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie takiej konstrukcji maszyny, która umożliwi zmianę mocy znamionowej w zależności od mocy turbiny utrzymując przy tym wysoką sprawność. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu maszyny synchronicznej wzbudzonej magnesami trwałymi o budowie modułowej. Każdy moduł posiadałby osobny kompletny stojan i wirnik. Taki zabieg pozwoli dodawać kolejne moduły w zależności od zapotrzebowania elektrowni. Sprostanie postawionych powyżej wymagań jest możliwe do zrealizowania poprzez zastosowanie sześciu modułów, każdy o mocy $S=40$ kVA (tab. 2). Wyeliminowanie przekładni między turbiną wodną a generatorem uzyskano poprzez odpowiedni dobór prędkości znamionowej maszyny. Prędkość ta jest zdefiniowana przez liczbę par biegunów oraz częstotliwość. W celu ograniczenia strat dodatkowych oraz w żelazie, założono, że częstotliwość będzie nie większa niż 100 Hz dla $n=600$ obr/min. Zdefiniowano, że znamionowa prędkość będzie dla $f=50$ Hz, a to wymusiło liczbę biegunów równą $2p=20$.

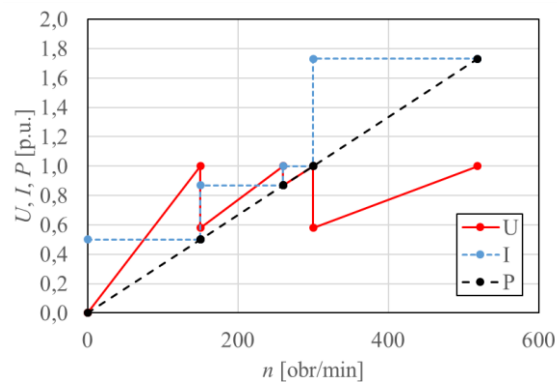
Tab. 2. Dane znamionowe pojedynczego segmentu generatora modułowego

Wielkość fizyczna	Wartość	Jednostka
S_N	40	kVA
U_N	400	V
$\cos\varphi_N$	0,99	-
I_N	57,7	A
n_s	300	obr/min
$2p$	20	-
f_N	50	Hz
M_N	1260,5	Nm
Połączenie faz uzwojenia stojana	Y / Δ / YY / $\Delta\Delta$	-

Generatory w małych hydroelektrowniach OZE posiadają napięcie na zaciskach stojana równe 400 V. Dlatego też, taka wartość napięcia została przyjęta. Niestety maszyna wzbudzana magnesami trwałymi wraz ze zmianą prędkości obrotowej wirnika zmienia wartość indukowanej siły elektromotorycznej (SEM) na zaciskach twornika. Chcąc nie doprowadzić do degradacji, przyspieszonego efektu starzeniowego, a nawet przebicia izolacji uzwojenia twornika zastosowano przełączalne uzwojenie faz w konfiguracji: Y/YY/ Δ / $\Delta\Delta$. Taki zbieg uniemożliwia pracę generatora z napięciem nie większym niż U_N . Praca w poszczególnych zakresach prędkości obrotowej wymaga przekonfigurowania uzwojeń zgodnie z tabelą 3. Maksymalna wartość mocy generatora jest zależna od konfiguracji uzwojeń i waha się od 50% P_N dla najmniejszych prędkości aż do 175% P_N dla prędkości maksymalnej. Graficzna interpretacja maksymalnych wartości napięć, prądów i mocy w funkcji prędkości obrotowej jest przedstawiona na rysunku 5.

Tab. 3. Rekonfiguracje uzwojenia generatora

konf.	n [obr/min]	I [p.u.]	U [p.u.]	P [p.u.]
Y	0	0,5	0	0
	150	0,5	1	0,5
Δ	150	0,87	0,58	0,5
	260	0,87	1	0,87
YY	260	1	0,87	0,87
	300	1	1	1
$\Delta\Delta$	300	1,73	0,57	1
	519	1,73	1	1,73



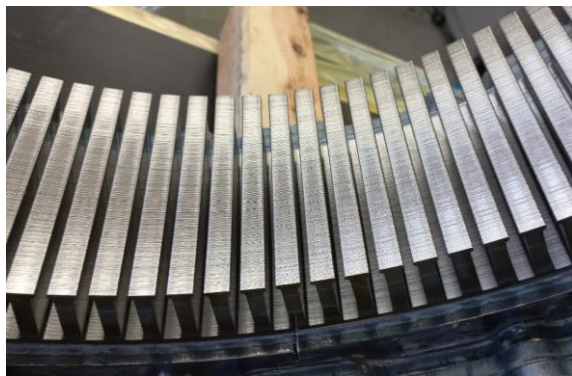
Rys. 5. Zakresy napięć, prądów i mocy generatora w zależności od prędkości obrotowej turbin

3. Konstrukcja generatora modułowego

Firma KISIELEWSKI Sp. z o.o. zaprojektowała, wykonała oraz przetestowała prototyp 3-segmentowego hydrogeneratora modułowego. W fazie koncepcji wytypowane zostały następujące wymagania co do budowy maszyny:

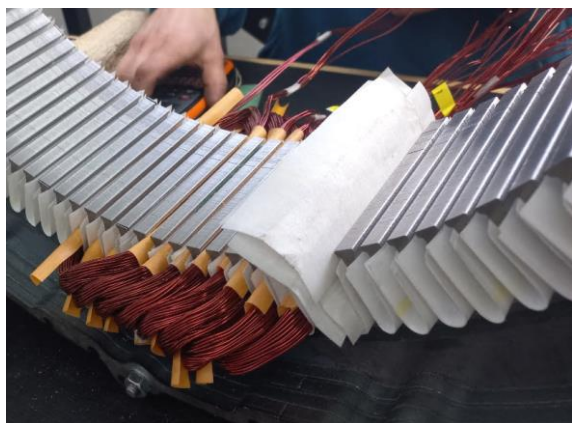
- wykonanie bliźniaczych stojanów i wirników,
- wał umożliwiający montaż 3-ech segmentów, przenoszący moment, $M=3 M_N$ z różną konfiguracją prędkości obrotowej,
- wspólny rodzaj łożyskowania dla każdej konfiguracji łączenia faz uzwojenia stojana,
- montaż generatora w pozycji pionowej, jak i poziomej,
- możliwość rekonfiguracji poprzez zwiększanie i zmniejszanie liczby segmentów,
- zapewnienie wyważenia wirnika dla prędkości roboczej turbin wodnej wynoszącej 2,4 prędkości znamionowej.

Przyjętym rozwiązaniem konstrukcyjnym spełniającym powyższe wymagania jest koncepcja łączenia segmentów stojana oraz wirnika na wspólnym wale poprzez płytki skęczone szpilekami. Elementy stojana są wycięte z blach elektrotechnicznych i stali konstrukcyjnej. Blacha elektrotechniczna o grubości 0,5 mm stanowi część czynną segmentu, natomiast stal konstrukcyjna o grubości 10 mm służy jako pierścień do zabudowy połączeń czołowych uzwojenia stojana. Wykonalność takiego rozwiązania okazała się możliwa dzięki zastosowaniu nowatorskiego cięcia laserowego elementów stalowych. Uzyskanie niskiej wysokości zadziórów i gratów, niewyczuwalnych dotykem, znacząco przysłużyły się dokładnemu spakietowaniu rdzeni stojana i wirnika. Fragmenty spakietowanego stojana przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Widok fragmentów spakietowanego stojana

Po spakietowaniu segmentu, uzwojono stojan (rys. 7). W tym celu wykonano cewki pętlicowe, a następnie wsypano je do żłobków, układając w dwie warstwy.



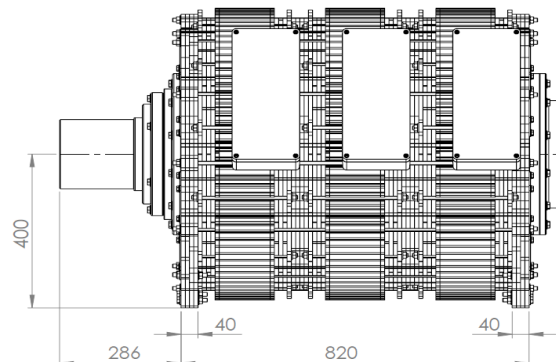
Rys. 7. Proces uzwojania uzwojenia stojana

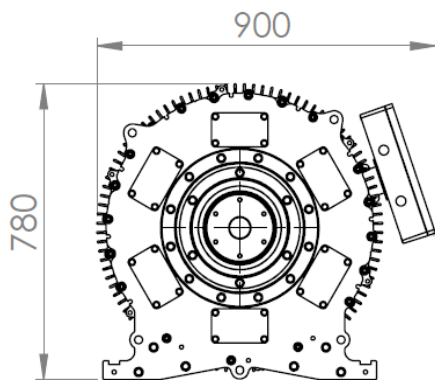
Wirnik generatora modułowego posiada magnesy trwałe. Konstrukcja wirnika uwzględnia również pierścienie chroniące magnesy przed wypadnięciem. Odpowiednio dobrany zespół łożysk po obu stronach wału, pozwala na prace

generatora w dowolnej pozycji: pionowej, poziomej lub skośnej (dla np. turbiny Archimedeasa), co czyni go uniwersalnym dla modernizacji elektrowni, jak i nowych obiektów. Podstawowym sposobem chłodzenia generatora jest konwekcja swobodna. Skuteczność tego sposobu chłodzenia zwiększona została przez uźbrowanie korpusu generatora. Duża powierzchnia oddawania ciepła gwarantuje, że ciepło wydzielające się wewnątrz maszyny (głównie w stojanie i łożyskach) zostanie odprowadzone. Taki zabieg pozwolił na wyeliminowanie wentylatora, przez co ograniczono straty mechaniczne oraz hałas. Generator segmentowy dedykowany jest dla hydroenergetyki. Będzie on sprzęgnięty bezpośrednio do turbiny wodnej, gdzie sposób montażu jest z reguły kołnierzowy. W prezentowanym rozwiązaniu wykorzystano łapy umożliwiające łatwe zestawienie generatora z układem napędowym w pozycji poziomej czy pośredniej ukośnej. Widok złożonej maszyny jest pokazany na rysunku 8. Zbudowany hydrogenerator waży ok. 1800 kg. Jego wymiary to: długość 1200 mm, wysokość 780 mm oraz szerokość 900 mm (rys. 9).



Rys. 8. Widok złożonego hydrogeneratora przed malowaniem

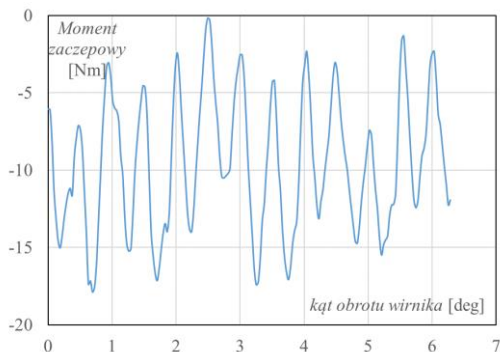




Rys. 9. Szkic wymiarowy hydrogeneratora

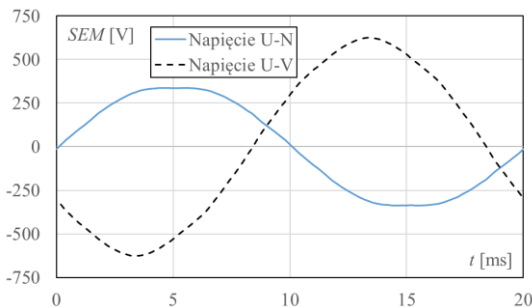
4. Wyniki pomiarów

Zbudowany prototyp hydrogeneratora modułowego poddano próbie wytrzymałości na zwyżkę obrotów. Maszyna przeszła pozytywnie test z prędkością $2n_s$. Następnie zmierzono rezystancję uzwojenia stojana na postoju oraz wartości napięć indukujących się od magnesów trwałych w stanie jałowym. Zmierzone wielkości fizyczne pokrywały się z wartościami obliczonymi w fazie projektowania. Kolejną próbą był pomiar momentu zaczepowego. Próbę tą wykonano za pomocą klucza dynamometrycznego.



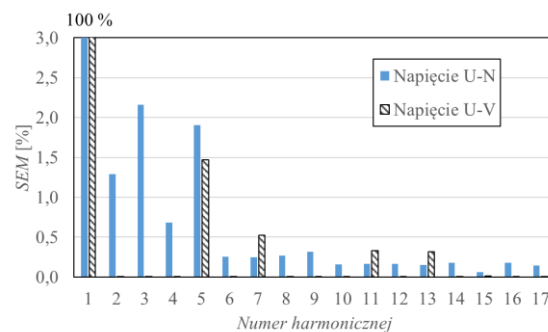
Rys. 10. Obliczony moment zaczepowy trzech segmentów w funkcji położenia wirnika

Zmierzona wartość maksymalna momentu zaczepowego wynosi ok. 17,5 Nm (1,4 % M_N) dla 3-ech segmentów i pokrywa się z wartością obliczoną (rys. 10). Następnie zmierzono wartość skuteczną i kształt napięcia indukowanego podczas biegu jałowego dla prędkości synchronicznej. Różnica wartości napięć skutecznych na różnych zaciskach przy skojarzeniu gwiazda z gałęziami równoległymi (YY) wynosi 0,4 %. Przebieg indukowanego napięcia fazowego (U-N) i międzyfazowego (U-V) przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Przebieg indukowanego napięcia fazowego i międzyfazowego dla $n=n_s$

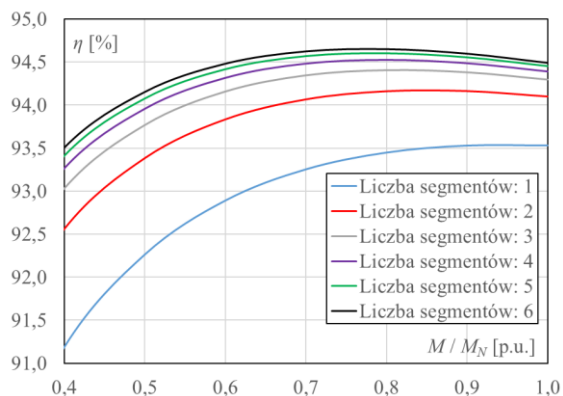
Z rozkładu napięć na wyższe harmoniczne (rys. 12) odczytano współczynnik THD (z ang. *Total Harmonic Distortion*). Dla napięcia międzyfazowego oraz fazowego wynosi on odpowiednio 1,64 % i 3,33 %. Otrzymany wsp. THD dla napięcia międzyfazowego jest na zadawalającym poziomie ($< 5\%$) [3].



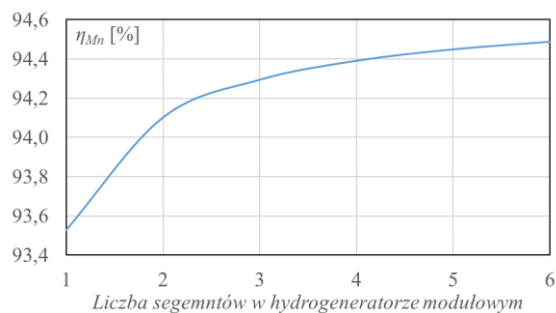
Rys. 12. Rozkład napięć na wyższe harmoniczne

Istotną wartością jest 3-cia harmoniczna napięcia fazowego. Im większa, tym większe prądy wyrównawcze w konfiguracji uzwojeń stojana w Δ i $\Delta\Delta$. Dlatego w fazie obliczeń elektromagnetycznych dążono do jej ograniczenia. Otrzymane wartości prądów wyrównawczych nie przekraczają wartości granicznych uniemożliwiających pracę generatora w różnych konfiguracjach faz stojana. Dlatego też możliwa jest praca w pełnym zakresie prędkości obrotowej. Kolejny test dotyczył pomiaru temperatury uzwojenia stojana. Przepuszczono prąd o wartości znamionowej przez uzwojenie twornika do momentu ustalenia się temperatury. Odczytane przyrosty temperatury nie przekraczały klasy izolacji B ($< 80\text{ K}$), co uznano za bardzo dobry wynik zważywszy na brak wentylatora. Zachowano przy tym zapas klasy izolacji, ponieważ hydrogenerator jest wykonany w klasie F. Ostatnia próba dotyczyła wyznaczenia sprawności hydrogeneratora z różną liczbą segmentów. Na postoju wyznaczono rezystancję uzwojenia stojana, a na biegu jałowym str-

ty mechaniczne oraz w żelazie. Przyjęto, że straty dodatkowe stanowią 0,5 % mocy generowanej. Rezystancję uzwojenia twornika przeliczono na temperaturę 95 °C. Otrzymane w ten sposób wyniki sprawności dla różnych momentów na wale przedstawiono na rysunku 13. Najmniejszą sprawność posiada hydrogenerator posiadający tylko jeden segment. Wynika to z faktu, że straty w łożyskach są stałe i niezależne od liczby segmentów. Łożyska te są jednak tak dobrane, aby wytrzymać pracę maszyny z pełnym zakresie obciążenia i prędkości obrotowej. Pozostałe straty (w uzwojeniu stojana, rdzeniu i dodatkowe) są proporcjonalne do liczby segmentów. Można dostrzec, że generator z liczbą modułów 2 i więcej posiada wysoką sprawność w szerokim zakresie obciążenia. Na rysunku 14 zaprezentowano sprawności hydrogeneratora dla znamionowego momentu na wale w zależności od użytej liczby segmentów.



Rys. 13. Sprawność w funkcji momentu na wale dla różnych segmentów



Rys. 14. Sprawność dla $M=M_N$ dla różnej liczby segmentów

5. Wnioski

Przetestowany uniwersalny hydrogenerator modułowy potwierdził założenia projektowe. Może on być stosowany w małych elektrow-

niach wodnych bez konieczności stosowania przekładni. Różne konfiguracje połączeń wyproawdzeń uzwojenia stojana umożliwiają pracę generatora z różną mocą, prędkością obrotową oraz napięciem. Budowa plastrowa, standaryzacja wielkości łożysk oraz tarcz łożyskowych umożliwia produkcję dedykowaną dla danego odbiorcy bez względu na rodzaj posadowienia (łapy lub kołnierze). Odpowiednia budowa oraz szeroki zakres pracy sprawiają, że maszyna staje się uniwersalna i dedykowana do szerokiego grona odbiorców. Wysoka sprawność w szerokim zakresie momentu na wale gwarantuje, że moc mechaniczna na wale będzie efektywnie zamieniana na elektryczną.

6. Literatura

- [1]. "Informacja statystyczna o energii elektrycznej", Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Agencja Rynku Energii S.A, za lata 2020-2022.
- [2]. "Wytwarzanie energii elektrycznej w Polsce w małych instalacjach OZE", Raport Prezesa URE, Warszawa, za lata 2016-2022.
- [3]. „IEC 60034-1-2010 Rotating electrical machines, part 1: Rating and performance”.
- [4]. „IEC 60034-2-1-2007 Standards methods for determining losses and efficiency from tests”.
- [5]. „IEEE Standard for cylindrical-rotor 50 Hz and 60 Hz synchronous generators rated 10 MVA and above”.
- [6]. M. Dąbrowski, „Konstrukcja maszyn elektrycznych”, WNT, 1977.
- [7]. M. Dąbrowski, „Projektowanie maszyn prądu przemiennego”, WNT, 1988.

Autorzy

dr inż. Adam Gozdowiak
adam.gozdowiak@kisielewski.pl
dr inż. Piotr Kisielewski
piotr@kisielewski.pl

KISIELEWSKI Sp. z o.o.
www.kisielewski.pl

