

Petr Bogatyrev, Jan Golec, Stanisław Gawron

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

OPRACOWANIE I WDROŻENIE SYSTEMÓW DO WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z MAŁYCH ELEKTROWNI WODNYCH

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF SYSTEMS FOR GENERATION OF ELECTRICITY FROM SMALL HYDRO PLANTS

Streszczenie: W artykule opisano wybór konstrukcji generatora dla małej elektrowni wodnej, koncepcja którą opracowano na podstawie patentu PL 228 937 B1. Wirnik składa się z obwodu magnetycznego z magnesami trwałymi przyklejonymi do jego powierzchni (typ ang. skrót SPM). Obwód magnetyczny jest przymocowany do rury, wewnątrz której zainstalowano jest śmigło. W uzwojeniach stojana indukowane jest napięcie trójfazowe o częstotliwości 133,3 Hz.

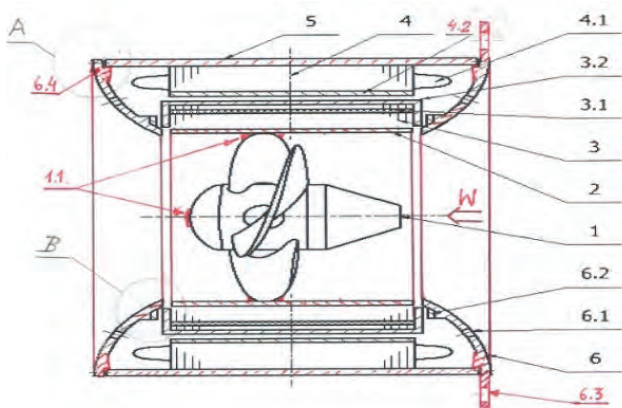
Abstract: The article describes the choice of the generator concept for a small hydropower plant, the construction of which was developed on the basis of the patent PL 228 937 B1. The rotor consists of a magnetic circuit with magnets glued to its surface (SPM type). The magnetic circuit is attached to the tube inside which the propeller is installed. A three-phase electric current with a frequency of 133.3 Hz is induced in the stator windings.

Słowa kluczowe: generator, mała elektrownia wodna, łopatki turbiny osiowej

Keywords: generator, small hydroelectric power station, axial turbine blades

1. Wstęp

W odpowiedzi na istniejącą, niezapełnioną niszę maszyn i urządzeń do wytwarzania energii elektrycznej z małych elektrowni wodnych, pojawiła się możliwość wykonania prototypowego agregatu prądowłórczego o kompaktowej budowie opartej na patencie PL228937 B1 (Rys. 1).



Rys. 1. Wodny agregat prądowłórczy; 1 – turbina, 2 – rura, 3 – wirnik z magnesami trwałymi, 4 – stojan, 5 – stojan, 6 – tarcze [1]

Ze względu na charakter realizacji projektu generator musi mieć parametry pracy: moc 20 kW, napięcie międzyfazowe 400 V i być dopasowany wymiarowo do osiowej turbiny wodnej o średnicy 300 mm

i prędkości obrotowej 1000 obr/min. W artykule przedstawiono dwa warianty rozwiązania generatora, a w Podsumowaniu wskazano jeszcze wariant trzeci.

2. Wariant 1

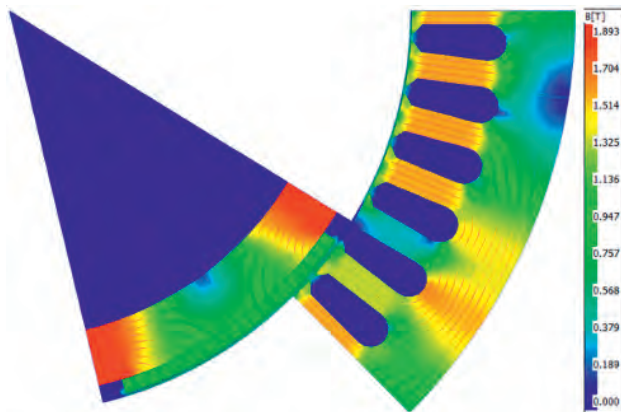
Założono generator o zewnętrznej średnicy stojana wynoszącej 540 mm (wznios osi wału 315 mm). Taka średnica stojana odpowiada średnicy rury wirnika równej 300 mm. Wykonano optymalizację średnicy stojana, znaleziono minimalną grubość jarzma wirnika przy mocy znamionowej 20 kW i napięciu międzyfazowym na zaciskach generatora 400 V. W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń elektromagnetycznych 7 modeli o różnych grubościach jarzma wirnika, które zmniejszają się od modelu nr 1 do modelu nr 6. Najlepszym wariantem z 6 modeli jest model generatora nr 3. Wariant nr 7 to model generatora nr 3, tylko zewnętrzna średnica stojana jest zmniejszona do 520 mm (Rys. 2), ponieważ maksymalna wartość indukcji pola magnetycznego (Rys. 3) w jarzmie stojana pozwala zmniejszyć rozmiar blachy. Ze względu na dużą średnicę stojana otrzymano niewielką długość generatora. W związku z tym czoła uzwojenia są większe niż część czynna. W ostatecznym modelu nr 7 nie uwzględniono układu chłodzenia generatora, a temperatury uzwojenia i magnesów przyjęto odpowiednio 120°C i 100°C.

Tabela 1. Wyniki obliczeń elektromagnetycznych 7 modeli. Optymalne modele – wyróżnione kolumny

Wstępne obliczenia parametrów generatora	nr 1	nr 2	nr 3	nr 4	nr 5	nr 6	nr 7
Temperatura uzwojenia stojana, T_{uzw} [°C]	120	120	120	120	120	120	120
Temperatura magnesów, T_{mag} [°C]	100	100	100	100	100	100	100
Prędkość, n [obr/min]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Częstotliwość, f [Hz]	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67
Liczba biegunów, $2p$ [-]	8	8	8	8	8	8	8
Średnica wewnętrzna stojana, D_{sw} [mm]	380	375	370	360	358	355	370
Średnica zewnętrzna stojana, D_{sz} [mm]	540	540	540	540	540	540	520
Długość stojana, L_{fe} [mm]	40	41	42	46	49	57	42
Średnica zewnętrzna wirnika, D_{RZ} [mm]	363	358	353	343	341	338	353
Średnica wewnętrzna wirnika, D_{RW} [mm]	300	300	300	300	300	300	300
Grubość jarzma wirnika, H_{RJ} [mm]	31,5	29	26,5	21,5	20,5	19	26,5
Liczba żłobków stojana, Q_s [-]	48	48	48	48	48	48	48
Skos stojana, β [°]	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Szczelina powietrzna, δ [mm]	2	2	2	2	2	2	2
Tętnienie momentu, M_T [Nm] (Torque Ripple MsVw)	7,5	7,4	7,4	6,9	6,9	7,2	7,4
Tętnienie momentu, [%] (Torque Ripple MsVw)	3,3	3,3	3,3	3,2	3,2	3,3	3,3
Moment mechaniczny, M_{mech} [Nm]	226,1	227,4	225,3	216,7	217,8	219,2	226,5
Moc elektryczna, P_{el} [W]	20820	20949	20784	20036	20067	20003	20892
Moc mechaniczna, P_{mech} [W]	23679	23814	23589	22694	22804	22950	23718
Napięcie międzyfazowe, U_{LL} [V]	400,2	400,2	400,4	400,8	400,2	400,8	400,5
Prąd fazowy, I_f [A]	30,19	30,38	30,18	29,51	29,92	30,84	30,43
Sprawność, η [%]	87,9	88,0	88,1	88,3	88,0	87,2	88,1
Współczynnik mocy, $\cos\phi$ [-]	1	1	1	1	1	1	1
Gęstość prądu, J [A/mm ²]	5,054	5,086	5,053	4,941	5,009	5,163	5,094



Rys. 2. Wstępny model generatora do obliczenia elektromagnetycznego. $n = 1000$ obr/min, $U_{LL} = 400$ V, $P_{el} = 20$ kW, $D_{sz} = 520$ mm



Rys. 3. Rozkład indukcji pola magnetycznego wstępnego modelu generatora w znamionowym trybie pracy

Wirnik jest umieszczony na rurze, która ma temperaturę wody. Obliczenia cieplne twornika generatora wykazały, że samo chłodzenie wirnika nie wystarczy, konieczne jest również odprowadzanie ciepła z uzwojenia stojana.

2.1. Wybór uzwojenia generatora

Długość części czołowych uzwojenia można zmniejszyć stosując uzwojenie z cewkami skupionymi. Kalkulator uzwojeń EMETOR pozwala w szybki i wygodny sposób znaleźć optymalny układ uzwojeń dla maszyn elektrycznych (Rys. 4). Dla uzwojenia z liczbą żłobków $Q_s = 48$ i liczbą biegunów $2p = 8$ otrzymano współczynnik uzwojenia 0,966 (ang. *Integer-Slot Winding*). Możliwość zastosowania uzwojenia z cewkami skupionymi przy $2p = 8$ występuje tylko dla $Q_s = 21$, a przy $2p = 16$ – tylko przy $Q_s = 45$. Natomiast dla $2p = 8$ i $Q = 48$ współczynnik z cewkami skupionymi uzwojenia ma wartość: 0,506. Z uwagi na małą wartość współczynnika uzwojenia zastosowanie cewek skupionych w generatorze: $2p = 8$, $Q_s = 48$



Rys. 4. Kalkulator uzwojeń EMETOR. Podane wartości: wiersze $2p$, kolumny Q_s

i $D_{sz} = 540$ mm lub 520 mm, nie jest możliwe. Można zastosować uzwojenie normalne jednowarstwowe lub dwuwarstwowe o rozpiętości zezwojów żłobków i współczynniku uzwojenia $0,96$. W tym rozwiązaniu $D_{sz} = 520$ mm (wariant 7) wysięg czół wynosi 70 mm. Obliczona sprawność generatora $\eta = 88,1\%$.

Do rozwiązania jest chłodzenie uzwojenia.

Jedną z opcji chłodzenia stojana jest żebrowany kadłub. W obliczeniach cieplnych generatora z żebrowanym kadłubem stwierdzono, że konieczne będzie zastosowanie wentylatora wymuszającego dodatkowy przepływ powietrza, które odbierze ciepło poprzez konwekcję wymuszoną. W takim przypadku temperatura uzwojenia generatora, w zależności od konstrukcji kadłuba, można osiągnąć wartość 120°C . W rzeczywistości warunki pracy generatora uniemożliwiają taki sposób chłodzenia, a także niepotrzebnie komplikują konstrukcję urządzenia.

Drugą z rozważanych opcji chłodzenia uzwojenia było bezpośrednie chłodzenie przewodów uzwojenia wodą, czyli przepływ wody przez żłobki stojana. Przeanalizowano zastosowanie drutu z grubą izolacją marki NSW HT4, ze względu że uzwojenie jest całkowicie zanurzone w wodzie. Gruba izolacja ($\sim 0,5$ mm) ma wpływ na wypełnienie żłobka stojana. Dla liczby żłobków $Q_s = 48$ drut z grubą izolacją nie pasuje z powodu bardzo dużego wypełnienia żłobka. Rozwiązanie bezpośredniego chłodzenia wodą zostało odrzucone.

3. Wariant 2 - stojan chłodzony wodą

Wykrój blachy stojana, uzwojenie i chłodzenie w generatorze są współzależne. Projektując układ magnetyczny i uzwojenia należy uwzględnić sposób chłodzenia.

Trzecim sposobem chłodzenia stojana, stosowanym w maszynach elektrycznych, jest chłodzenie wodą poprzez dodatkowy kanał chłodzący. Kanały chłodzące wymagają miejsca. Aby nie zwiększać średnicy kadłuba należy zmniejszyć średnicę zewnętrzną jarzm, jest to drugi wariant projektu generatora.

3.1. Zwiększenie liczby biegunów

Średnicę zewnętrzną jarzma można zmniejszyć zwiększając liczbę biegunów do $2p = 16$. Wówczas jarzmo będzie mieć mniejszą grubość, lecz częstotliwość napięcia wzrośnie do 133,3 Hz.

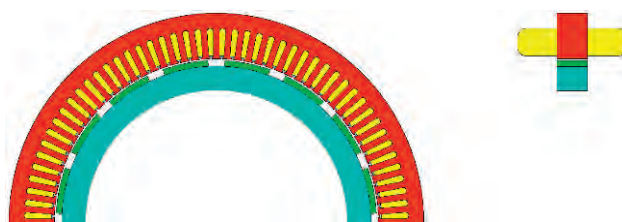
Obliczenia indukcji magnetycznej w obwodzie magnetycznym generatora pozwoliły określić minimalną wartość średnicy zewnętrznej blachy na około 470 mm (Tab. 2). W projekcie przyjęto blachę o średnicy zewnętrznej 476 mm, opracowaną w innym projekcie wykonywanym w Łukasiewicz – GIT dla liczby biegunów $2p = 16$ i liczby żłobków $Q = 96$, w tym kształt żłobków oraz średnice wewnętrzne i zewnętrzne. Liczba żłobków na biegun i fazę $q = 2$.

Dla takiej blachy pasuje drut ze zwykłą izolacją, na przykład DN2E180. Uzwojenie musi być impregnowane żywicą epoksydową ze względu na duże prawdopodobieństwo przedostania się wody. Z tego samego powodu magnesy muszą być również pokryte żywicą.

Wykonane obliczenia generatora z kanałem chłodzącym w kadłubie, przez który przepływa woda, umożliwia osiągnięcie temperatury w uzwojeniu generatora równej $\sim 70^{\circ}\text{C}$. Zdecydowano, że wybór chłodzenia wodnego poprzez osobny kanał chłodzący będzie najlepszym rozwiązaniem i zaimplementowano je do rozwiązania konstrukcyjnego.

3.2. Obliczenia elektromagnetyczne wybranej konstrukcji generatora

Według projektu optymalna konstrukcja generatora obejmuje (Rys. 5):



Rys. 5. Finalna wersja konstrukcji generatora do elektrowni wodnej. Model obliczenia elektromagnetycznego

- Stojan; średnica zewnętrzna $D_{sz} = 476$ mm (wielkość mechaniczna 280 mm), liczba żłobków $Q = 96$ i liczba biegunów $2p = 16$,
- uzwojenie rozłożone; uzwojenie i magnesy, w celu zabezpieczenia przed wnikaniem wody, są impregnowane żywicą w technologii próżniowo ciśnieniowej (VPI);
- układ chłodzenia generatora jest wodny, część wody wchodzącej do turbiny chłodzi stojan,
- wysięg czół wynosi 45 mm.

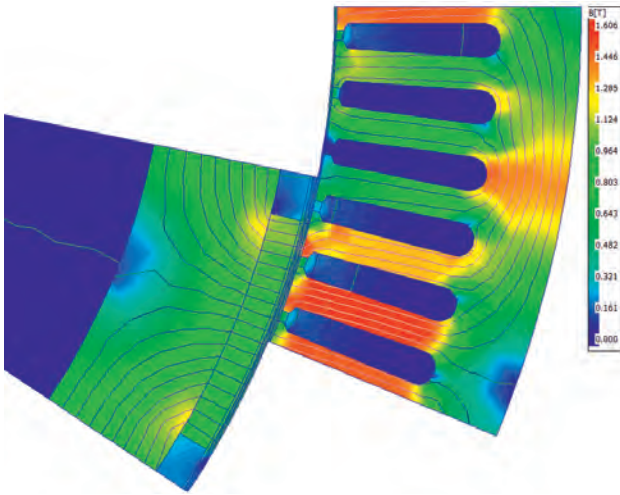
Optymalny kąt magnesu dobrano według kryterium współczynnika THD (ang. *Total Harmonic Distortion*). W stojanie generatora jest skos o jednej podziałce żłobkowej. Model obliczeń elektromagnetycznych jest przedstawiony na rys. 5. Obliczenia elektromagnetyczne wykonano dla stanu obciążenia generatora, poprzez połączenie faz uzwojenia z rezystorami $R_{LOAD} = 7,9$ Ohm. Rozkład indukcji przedstawiono na rys. 6. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebiegi czasowe prądów i napięć fazowych na zaciskach generatora przy pracy znamionowej. Wartość współczynnika THD napięcia wynosi 2,3% i spełnia założone wymagania. Tętnienie momentu obrotowego wynosi 6%. Obliczona sprawność generatora $\eta = 94,3\%$, jest większa niż sprawność modelu 1.

Analiza harmoniczna napięcia biegu jałowego wykazała, że maksymalna wartość trzeciej harmonicznej w stosunku do pierwszej wynosi 7,5% (Rys. 10).

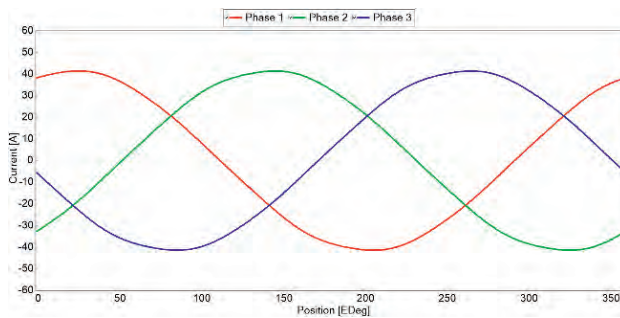
Wyniki obliczeń elektromagnetycznych (Tab. 3) wykazały, że finalna wersja konstrukcji generatora spełnia wszystkie wymagania klienta.

Tabela 2. Wyniki obliczeń elektromagnetycznych dla uzwojenia $Q_s = 96$ i $2p = 16$

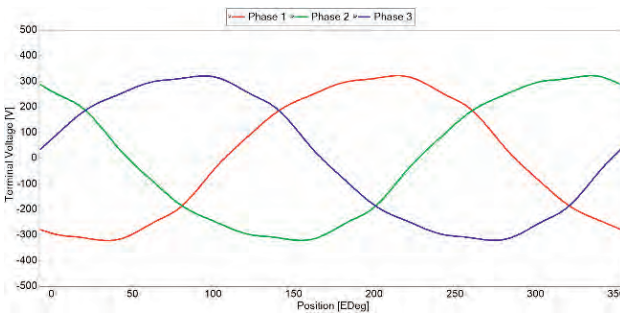
Średnica zewnętrzna stojana, D_{sz} [mm]	Średnica wewnętrzna stojana, D_{sw} [mm]	Maksymalna wartość indukcji w zębie, B_z [T]	Maksymalna wartość indukcji w jarzmie stojana, B_{DJ} [T]	Maksymalna wartość indukcji w jarzmie wirnika, B_{RJ} [T]
520	370	1,7	1,08	1,2
500	370	1,7	1	1,2
500	360	1,7	1	1,2
500	350	1,7	1,1	1,4
480	350	1,7	1,2	1,3
470	350	1,7	1,4	1,3
460	350	1,7	2	1,37
460	340	1,7	1,3	1,8



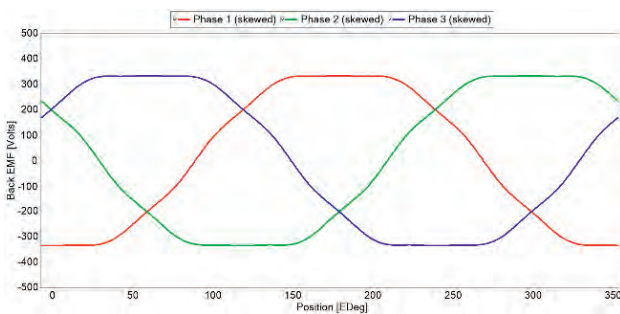
Rys. 6. Rozkład indukcji pola magnetycznego generatora w znamionowym trybie pracy, $P_{el} = 20 \text{ kW}$, $U_{LL} = 400 \text{ V}$, $n = 1000 \text{ obr/min}$, $D_{SZ} = 476 \text{ mm}$



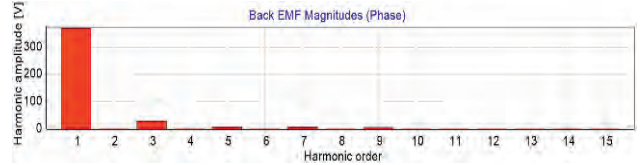
Rys. 7. Przebiegi czasowe prądów fazowych I_f na zaciskach generatora przy pracy znamionowej



Rys.8. Przebiegi czasowe napięć fazowych U_f na zaciskach generatora przy pracy znamionowej



Rys. 9. Przebiegi czasowe SEM fazowych E_f generatora na biegu jalowym przy temperaturze otoczenia 20°C



Rys. 10. Składowe harmoniczne SEM fazy E_f przy temperaturze otoczenia 20°C na biegu jalowym

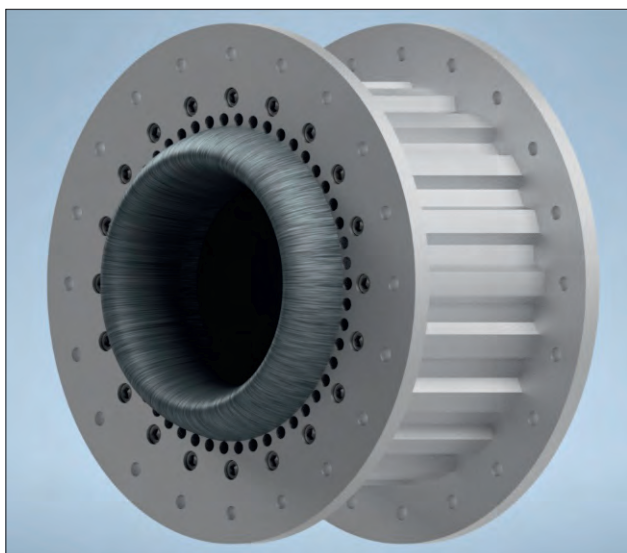
Tabela 3. Wyniki obliczeń generatora

Obliczenia parametrów generatora	Wartość
Temperatura uzwojenia stojana, $T_{uzw} [^\circ\text{C}]$	74
Temperatura magnesów, $T_{mag} [^\circ\text{C}]$	43
Prędkość, $n [\text{obr/min}]$	1000
Częstotliwość, $f [\text{Hz}]$	133,3
Liczba biegunów, $2p [-]$	16
Średnica wewnętrzna stojana, $D_{SW} [\text{mm}]$	372
Średnica zewnętrzna stojana, $D_{SZ} [\text{mm}]$	476
Długość stojana, $L_{fc} [\text{mm}]$	35
Średnica zewnętrzna wirnika, $D_{RZ} [\text{mm}]$	355
Średnica wewnętrzna wirnika, $D_{RW} [\text{mm}]$	300
Liczba żłobków stojana, $Q_s [-]$	96
Skos stojana, $\beta [^\circ]$	3,75
Szczelina powietrzna, $\delta [\text{mm}]$	2
THD napięcia międzyfazowego, [%]	2,3
Tętnienie momentu, $M_T [\%]$	6
Moment mechaniczny, $M_{mech} [\text{Nm}]$	208
Moc elektryczna, $P_{el} [\text{W}]$	20545
Moc mechaniczna, $P_{mech} [\text{W}]$	21796
Napięcie międzyfazowe, $U_{LL} [\text{V}]$	403,7
Prąd fazowy, $I_f [\text{A}]$	29,37
Sprawność, $\eta [\%]$	94,3
Współczynnik mocy, $\cos\phi [-]$	1
Gęstość prądu, $J [\text{A/mm}^2]$	5,8

4. Koncepcyjny model 3D generatora

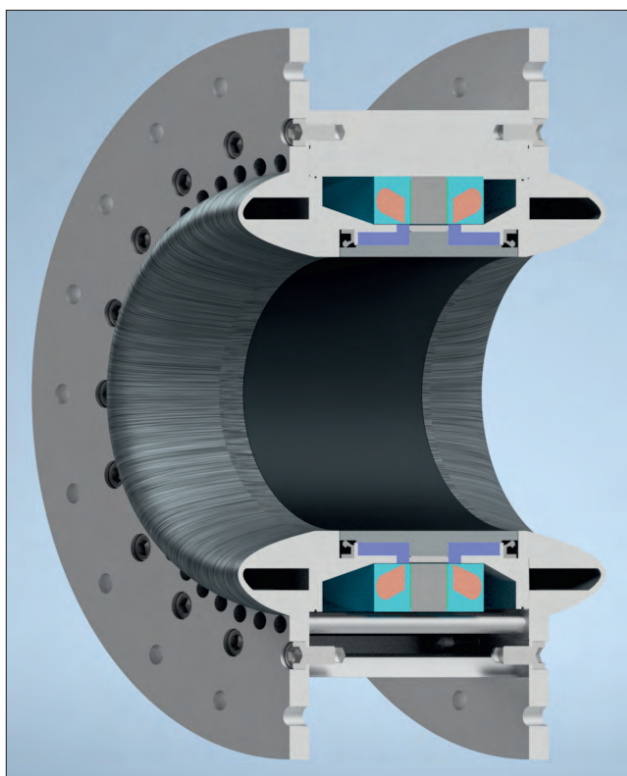
Na podstawie ostatecznych wyników obliczeń elektromagnetycznych opartych na wcześniej ustalonych założeniach dotyczących pracy generatora: średnicy zewnętrznej wirnika turbiny wodnej, sposobu chłodzenia, utworzono koncepcyjny model 3D konstrukcji generatora. Dodatkowo podczas tworzenia modelu 3D kierowano się dodatkowymi wytycznymi takimi jak: praca generatora na łożyskach ślizgowych przystosowanych do pracy w wodzie lub w warunkach suchych; możliwość zastosowania uszczelnień obrotowych wnętrza korpusu generatora; łatwy montaż do instalacji klienta; minimalna ilość elementów składowych.

Zaproponowany model koncepcyjny składa się z aluminiowego korpusu, w którym został umieszczony stojan zalany żywicą (Rys. 11). Korpus posiada osiowe otwory przelotowe stanowiące układ chł-



Rys. 11. Wizualizacja zewnętrznego koncepcyjnego modelu korpusu generatora

dzenia, wykorzystujący część wody turbiny. Korpus zamykany jest z obu stron poprzez aluminiowe tarcze łożyskowe wlotowe i wylotowe (każda tarcza łożyskowa posiada demontowaną osłonę, która pełni funkcję ochronną obrotowych uszczelnień wałowych oraz kierownicy regulującej przepływ wody na łopatki wirnika i kanały chłodzące) za pomocą śrub gniazdowych. Tarcze łożyskowe pełnią wiele funkcji: są oprawami dla łożysk ślizgowych, gniazdami obrotowych uszczelnień wałowych oraz umożliwia połącze-



Rys. 12. Przekrój koncepcyjnego modelu generatora – brak łopatek wirnika

nie całego generatora do instalacji klienta. Kolejnym elementem generatora jest wirnik, w postaci wałka drążonego osadzonego na łożyskach ślizgowych. W wewnętrznej części wału umocowano łopatki turbiny, natomiast na zewnętrznej części umieszczono magnesy, które zalano w żywicy epoksydowej. Specyficzna budowa wału generatora powoduje, że jest on jednocześnie wirnikiem turbiny i wirnikiem generatora. Na rysunku 12 przedstawiono wizualizację modelu 3D generatora.

W dalszych pracach nad rozwiązaniami konstrukcyjnymi generatora przewidziano obliczenia numeryczne przepływowe oraz cieplne.

6. Podsumowanie

W artykule opracowano koncepcję kompaktowego hydrogeneratora dla elektrowni wodnej o mocy 20 kW [1]. Generator został obliczony na podstawie wymaganych danych wejściowych klienta: średnica wewnętrzna wirnika, napięcie międzyfazowe, moc elektryczna, średnica i prędkość obrotowa turbiny. Określono optymalną średnicę zewnętrzną stojana. Rozważano różne konstrukcje generatora. Wybrano: wykrój blachy stojana $Q = 96$, uzwojenie ($q = 2$) i układ chłodzenia. Obliczenia elektromagnetyczne wykonano z wykorzystaniem analizy metodą elementów skończonych (MES), a model 3D zamodelowano w oprogramowaniu CAD.

W celu dalszej optymalizacji konstrukcji generatora należy zwrócić uwagę na uzwojenie stojana o liczbie ułamkowej $q = 2,4$. Instytut Łukasiewicz – GIT ma doświadczenie w projektowaniu generatora z uzwojeniem: $Q = 72 \cdot 2p = 10$, którego współczynnik uzwojenia wynosi 0,954. Częstotliwość napięcia przy $n=1000$ obr/min jest równa $f = 83,3$ Hz. Analiza porównawcza parametrów dwóch generatorów o $q = 2,4$ i $q = 2$ pod względem mechanicznym i elektrycznym pozwoli wybrać korzystniejszy wariant.

Literatura

- [1] S. Gawron, T. Glinka: *Wodny agregat prądotwórczy*. Patent PL 228937 z dnia 6.12.2017.
- [2] J. Bernatt: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, Wydawnictwo BOBRME KOMEL, Katowice 2010.
- [3] T. Glinka: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2018.
- [4] S. Gawron: *Innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania*, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, Nr 1/2016 (109), s. 1-10.
- [5] R. Rossa, E. Król: *Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 80/2008.

- [6] А.И. Абрамов, А.В. Иванов-Смоленский: *Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов*, Издательство: Высшая школа, 389 стр. 2001.
- [7] O. Dobzhanskyi, V. Grebenikov, R. Gouws, R. Gamalilia, E. Hossain: *Comparative thermal and demagnetization analysis of the PM Machines with neodymium and ferrite magnets*, *Energies* 2022, 15, 4484.
- [8] W.A. Krzyżanowski: *Turbiny Wodne – Konstrukcja i zasady regulacji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1971.
- [9] A. Łaski: *Elektrownie Wodne- rozwiązania i dobór parametrów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971.
- [10] Praca zbiorowa: *Mały Poradnik Mechanika, Tom 1 – Nauki Matematyczno-Fizyczne*; Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.
- [11] Materiały informacyjne <https://www.emetor.com/windings/>

Autorzy

mgr inż. Petr Bogatyrev, dr inż. Stanisław Gawron, mgr inż. Jan Golec
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188