

# Optymalizacja generatora do małej przydomowej elektrowni wiatrowej

**Streszczenie.** W artykule podjęto próbę optymalizacji konstrukcji małego generatora opartego na przelączalnej maszynie reluktancyjnej, wykorzystanego w małej przydomowej elektrowni wiatrowej. Cała konstrukcja nie przekracza swoimi gabarytami trzech metrów, co pozwala według obecnych przepisów na instalację takiej elektrowni wiatrowej bezpośrednio na budynku, bez konieczności uzyskania pozwolenia ani zgłoszenia budowy. W badaniach porównano wyniki uzyskane w czasie optymalizacji konstrukcji generatora i sposobu jego sterowania algorytmem genetycznym w wyniku zastosowania trzech różnych funkcji celu.

**Abstract.** The article attempts to optimize the design of a small generator based on a switched reluctance machine, used in a small home wind power plant. The entire structure does not exceed three meters in size, which allows, according to current regulations, the installation of such a wind power plant directly on a building, without the need to report the construction. The research compared the results obtained during the optimization of the generator design and the method of its control with a genetic algorithm as a result of using three different objective functions. (**Optimization of a generator for a small home wind power plant**)

**Słowa kluczowe:** optymalizacja konstrukcji, elektrownia wiatrowa, przelączalna maszyna reluktancyjna, SRG, algorytmy genetyczne.  
**Keywords:** construction optimization, wind power plant, switched reluctance machine, SRG, genetic algorithms.

## Wprowadzenie

Od 2021 roku maksymalny wskaźnik odnoszący się do rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną nieodnawialną dla budynków został określony na 70 kWh/m<sup>2</sup>/rok. Wymaga to stosowania coraz droższych materiałów budowlanych i technologii. Nowa dyrektywa EPBD z 2024 roku wprowadza jeszcze bardziej rygorystyczne wymagania, dotyczące od 2030 roku projektowania budynków zeroemisyjnych.

Obliczanie charakterystyki energetycznej budynku uwzględnia zapotrzebowanie na energię użytkową, końcową oraz pierwotną. Instalując panele fotowoltaiczne oraz elektrownię wiatrową można znacząco zredukować zapotrzebowanie na energię pierwotną, a tym samym podnieść klasę energetyczną budynku. O ile w zakresie fotowoltaiki można zaobserwować duży jej rozwój, to obecnie uruchomiony program dofinansowania do przydomowych elektrowni wiatrowych dopiero otwiera drogę do szerszego ich stosowania w Polsce. Szczególnie interesujący w wykorzystaniu obu tych źródeł energii odnawialnej jest uzupełniający się ich rozkład produkcji energii. Popularność mikroelektrowni fotowoltaicznych wiąże się też ostatnio, w przypadku dużego nasłonecznienia, z przekroczeniem dopuszczalnego napięcia w sieci. W takim przypadku falownik przestaje oddawać energię do sieci. Elektrownie wiatrowe z reguły generują energię głównie w czasie zwiększonego zachmurzenia i pracują również w nocy. W przypadku instalacji małej przydomowej elektrowni wiatrowej można, z wykorzystaniem układu dopasowującego podłączyć się do wolnego wejścia falownika instalacji fotowoltaicznej, co ogranicza koszt całej instalacji.

W dalszej części artykułu jako generator do elektrowni wiatrowej wybrano maszynę reluktancyjną (Switched Reluctance Generator - SRG). Tematyka poruszana w publikacjach związana z badaniami małych generatorów SRG jest dość różnorodna, od badań odnośnie optymalizacji geometrii [1], doboru różnych konfiguracji uzwojeń oraz liczby biegunów [2, 3], aż po zagadnienia związane ze sterowaniem maszynami reluktancyjnymi [4 - 7]. Typowe generatory samowzbudne pracują zgodnie z własną charakterystyką i zazwyczaj muszą być indywidualnie dopasowane do danej turbiny. W przypadku generatora SRG możliwość sterowania prądem wzbudzenia pozwala na dopasowanie się do charakterystyki danej turbiny [8 - 10].

## Koncepcja elektrowni wiatrowej

Obecne przepisy budowlane pozwalają na montaż elektrowni wiatrowej do konstrukcji budynku mieszkalnego bez konieczności uzyskania pozwolenia, czy zgłoszenia tego faktu, jeżeli jej wysokość nie przekracza trzech metrów ponad kalenicę. Dotyczy to elektrowni o mocy do 50 kW. W przypadku budowy elektrowni wiatrowej na osobnym fundamencie, konieczne jest pozwolenie na budowę oraz pozwolenie na użytkowanie.

Wychodząc z tych warunków założeniem projektu było opracowanie konstrukcji generatora wiatrowego, który byłby połączony z trójłopatową turbiną wiatrową o średnicy 2,8 m. Badania mają na celu maksymalizację ilości energii możliwej do uzyskania w ciągu roku poprzez optymalizację konstrukcji generatora. Zaprojektowane konstrukcje zostaną zoptymalizowane pod względem gabarytów oraz parametrów uzwojenia.

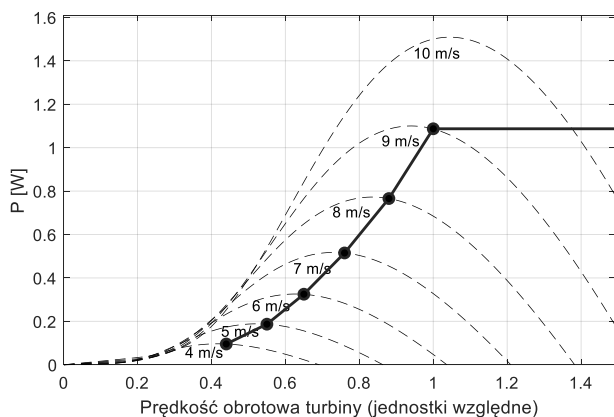
Moc  $P$  dostarczana do turbiny przez wiatr określona jest wzorem

$$(1) \quad P = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda) v^3$$

gdzie:  $\rho$  jest gęstością powietrza,  $S$  powierzchnią zakreślaną przez łopaty turbiny,  $v$  prędkością wiatru, a  $C_p(\lambda)$  współczynnikiem efektywności turbiny. Maksymalna teoretyczna wartość współczynnika  $C_p(\lambda)$  wynosi 0,592. Dla uproszczenia w obliczeniach przyjęto stałą wartość tego współczynnika równą 0,4.

W celu wyznaczenia parametrów pracy takiego generatora konieczne jest określenie lokalizacji i związanego z nią rocznego rozkładu prędkości wiatru. Przyjęto, że miejscem instalacji elektrowni wiatrowej będzie okolica Ustki. Jest to dość korzystna lokalizacja w stosunku do pozostałej części kraju. Na podstawie zależności (1) wyznaczono rodzinę charakterystyk wyjściowych mocy turbiny dla różnych wartości prędkości wiatru (rys. 1). Odpowiednie ukształtowanie łopat turbiny pozwala na dostosowanie charakterystyki turbiny do założonej prędkości znamionowej, powodując utrzymanie stałej mocy na wyjściu turbiny powyżej prędkości znamionowej.

W rozpatrywanym przypadku przyjęto, że prędkość znamionową generator będzie osiągał przy prędkości wiatru równej 9 m/s. Linią ciągłą zaznaczona została charakterystyka pracy turbiny przy założonej średnicy.



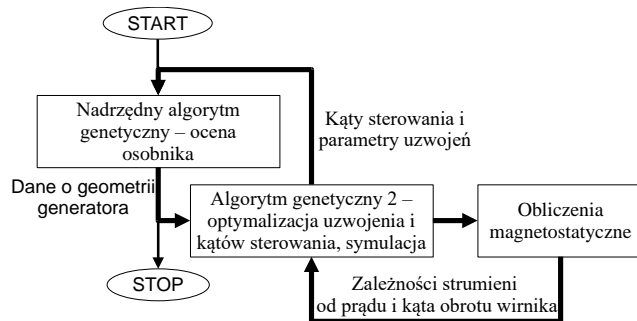
Rys.1. Rodzina charakterystyk mocy wyjściowej turbiny dla różnych prędkości wiatrów przy założonej średnicy turbiny

### Obliczenia

Do badań wybrano trójfazowy przełączalny generator reluktancyjny. Jest to maszyna bez uzwojeń w wirniku, który składa się głównie z blach elektromagnetycznych. Maszyna taka wzbudzana jest przez układ energoelektroniczny, który jest jej integralną częścią. Strumień wzbudzenia wytwarzany jest z zewnętrznego źródła zasilania, najczęściej tego samego, do którego oddaje się generowaną energię. Jednym z najważniejszych parametrów przy sterowaniu taką maszyną jest przedział wzbudzenia pasm (uzwojeń fazowych), w zależności od położenia kąтового wirnika  $\varphi$  względem stojana. Przedział ten ograniczają dwa parametry, kąt załączenia napięcia wzbudzenia  $\alpha_{on}$  oraz kąt jego wyłączenia  $\alpha_{off}$ . Wytworzony w ten sposób prąd pełni funkcję prądu wzbudzenia. Po wyłączeniu zasilania, dalszy przepływ prądu pozwala na generację energii, która jest uzależniona od prędkości obrotowej wirnika generatora oraz wartości prądu pasma i kąta  $\varphi$ , przy którym nastąpiło wyłączenie wzbudzenia.

Do ustalenia wymiarów konstrukcji takiej maszyny wykorzystano algorytm genetyczny. Wykorzystano do tego dwuetapowy algorytm (rys.2), który w pierwszym etapie dobiera geometrię przekroju stojana i wirnika SRG, a w drugim przeprowadza optymalizację uzwojenia oraz kątów załączenia i wyłączenia wzbudzenia jego pasm. W pierwszym etapie nadrzędny algorytm genetyczny po ustaleniu wymiarów takich, jak: średnica zewnętrzna maszyny, szerokość zębów wirnika i stojana, promień szczeliny powietrznej, grubość jarzma stojana, wyznaczał z modelu polowego zależności strumienia i momentu elektromagnetycznego od kąta obrotu wirnika oraz prądu pasma. Szerokość szczeliny powietrznej nie ulegała zmianie i przyjęto ją jako wartość stałą równą 0,4 mm, tak samo, jak długość czynna pakietu blach generatora, która była przyjęta na stałym poziomie 160 mm. Odległość szczeliny powietrznej od osi obrotu nie była w żaden sposób determinowana. Średnica krawędzi zewnętrznej stojana została ograniczona do 180 mm.

Bazując na odrębnym algorytmie genetycznym (przedstawionym na rysunku 2 jako algorytm genetyczny 2) w drugim etapie obliczeń wykorzystane są wcześniej wyznaczone zależności w modelu polowym. Na podstawie modelu obwodowego (model symulacyjny), w którym obliczono parametry pracy SRG, optymalizowano uzwojenia pasm oraz wartości kątów  $\alpha_{on}$  i  $\alpha_{off}$ , w celu uzyskania żądanych punktów pracy. Optymalizacja uzwojeń obejmowała dobór liczby zwojów w cewkach pasm oraz dobór średnicy drutu nawojowego. Model symulacyjny uwzględnia nieliniową charakterystykę magnesowania blach, ale nie uwzględniono w nim strat histerezy i wiropądowych.



Rys. 2. Uproszczona struktura algorytmu obliczeń optymalizacyjnych

Do obliczeń wykorzystano algorytm genetyczny z pakietu Matlab, z domyślnymi parametrami mutacji i krzyżowania przy zdefiniowanej liczbie osobników w populacji liczącej 40 osobników w pierwszym etapie optymalizacyjnym i 60 w drugim. Warunkiem zatrzymania obliczeń było ustabilizowanie się wartości funkcji celu z zadaną dokładnością. Liczba generacji wynosiła średnio 120 dla pierwszego etapu oraz 60 dla drugiego etapu optymalizacji.

Podczas badań do obliczeń zastosowano trzy funkcje celu uwzględniające: wyznaczoną wartość momentu elektromagnetycznego w punkcie prędkości znamionowej  $T_{GN}$ , oczekiwaną wartość momentu elektromagnetycznego punkcie prędkości znamionowej  $T_{oN}$ , sprawność generatora  $\eta_N$  przy prędkości znamionowej oraz pole powierzchni przekroju poprzecznego generatora  $S_G$  lub wartość promienia zewnętrznego generatora  $r_G$ . Ostatnie parametry miały na celu ograniczenie gabarytów generatora. Przyjęte funkcje celu w nadrzędnym etapie obliczeniowym określały wyrażenia:

$$(2) \quad f_1 = -\eta_N \frac{1 - \left(\frac{T_{GN} - T_{oN}}{T_{oN}}\right)}{\sqrt{S_G}}$$

$$(3) \quad f_2 = -\eta_N \frac{1 - \left(\frac{T_{GN} - T_{oN}}{T_{oN}}\right)}{\sqrt{r_G}}$$

$$(4) \quad f_3 = -\eta_N \frac{1 - \left(\frac{T_{GN} - T_{oN}}{T_{oN}}\right)}{r_G}$$

Etap drugi optymalizujący kąty sterowania SRG, zawiera inną funkcję celu, pozwalającą na optymalizację kątów komutacji oraz doboru średnicy drutu nawojowego uzwojenia w pasmach w celu uzyskania momentu elektromagnetycznego najbardziej zbliżonego do wartości zadanej w punkcie znamionowym, przy jednoczesnym maksymalizowaniu sprawności oraz minimalizowaniu strat w układzie energoelektronicznym i w miedzi. W celu ograniczenia strat oraz temperatury w uzwojeniach ustalona została funkcja kary określająca maksymalną wartość prądu pasma w zależności od przekroju drutu nawojowego. Dla wartości prądu wynoszącego więcej niż 8 A/mm<sup>2</sup> funkcja kary powoduje zmianę wynikowej funkcji celu danego osobnika, zmniejszając jego szanse na utrzymanie się w kolejnej populacji. W trakcie obliczeń algorytm minimalizował funkcję celu. Szczegółowe informacje odnośnie samego algorytmu obliczeniowego oraz organizacji obliczeń zostały opublikowane we wcześniejszej publikacji [11].

Do przyspieszenia obliczeń wykorzystano opracowany do tego celu klaster komputerowy, składający się z pięciu jednostek opartych o procesor i5-13500. Pomimo równoleglenia obliczeń optymalizacja konstrukcji trwała około 11 dni.

Algorytmy genetyczne należą do klasy algorytmów typu heurystycznego, w związku z tym obliczenia dla każdej funkcji celu wykonano dwukrotnie, a zaprezentowane

zostaną wyniki tych, dla których uzyskano większą wartość funkcji celu.

Do określenia prędkości obrotowej wirnika generatora SRG wykorzystano zależność:

$$(5) \quad n = \frac{\lambda v}{2 \pi r}$$

gdzie:  $r$  jest promieniem turbiny, a  $\lambda$  jest współczynnikiem szybkobieżności. W literaturze można spotkać znaczne rozbieżności odnośnie optymalnej wartości współczynnika lambda. Spotykane wartości w literaturze dla turbiny trójłopatowej oscylują od 3,5 do 10 [12, 13], przy czym ostatnio spotyka się propozycje bliższe dolnej granicy tego zakresu. Jest to ściśle związane z profilem zastosowanych w turbinie łopatek. Dla potrzeb niniejszego artykułu przyjęto ten współczynnik równy 7.

Przyjęto, że znamionowa prędkość wiatru będzie wynosić 9 m/s, co daje przy przyjętej wartości lambda, prędkość obrotową wirnika równą 7,16 obr/s ( $n_N$ ). Typowo przyjmuje się znamionową wartość prędkości wiatru na poziomie 10-12 m/s. Przyjęte założenie miało na celu lepsze wykorzystanie istniejących warunków wietrznych. Założono również maksymalną prędkość wiatru, przy której będzie występowała generacja energii (prędkość odcięcia) na poziomie 18 m/s, co daje prędkość obrotową wirnika równą 14,3 obr/s. W tym przypadku kierowano się rozkładem rocznym wiatru w wytypowanej lokalizacji. Częstość występowania wiatru o określonej prędkości w cyklu rocznym dla Ustki została zaprezentowana w tabeli 2.

Moc przekazywana przez wiatr przy założonej prędkości znamionowej 9 m/s, dla turbiny o średnicy 2,8 m, wynosi w zaokrągleniu 1100 W. Zakładając sprawność układu mechanicznego turbiny na poziomie 97 %, moc na wale turbiny przy tym wietrze będzie wynosić 1067 W. Założono, że moc ta powyżej wartości znamionowej wiatru będzie stała, aż do prędkości odcięcia. Określono w ten sposób wartości momentu obrotowego na wale dla dwóch prędkości obrotowych, które również są parametrami wejściowymi dla algorytmu genetycznego. Algorytm ten będzie dążył do wyznaczenia geometrii obwodu magnetycznego oraz parametrów sterowania SRG w taki sposób, aby osiągnąć zadaną wartość momentu przy prędkości znamionowej oraz prędkości odcięcia.

### Uzyskane wyniki

Uzyskane wyniki obliczeń zaprezentowano między innymi w tabeli 1. Zawiera ona wybrane parametry obwodu magnetycznego oraz parametry uzwojenia pasma, w zależności od zadanej funkcji celu, dla dwóch serii obliczeń.

Tabela 1. Parametry geometrii obwodu magnetycznego oraz uzwojeń uzyskane w wyniku obliczeń optymalizacyjnych

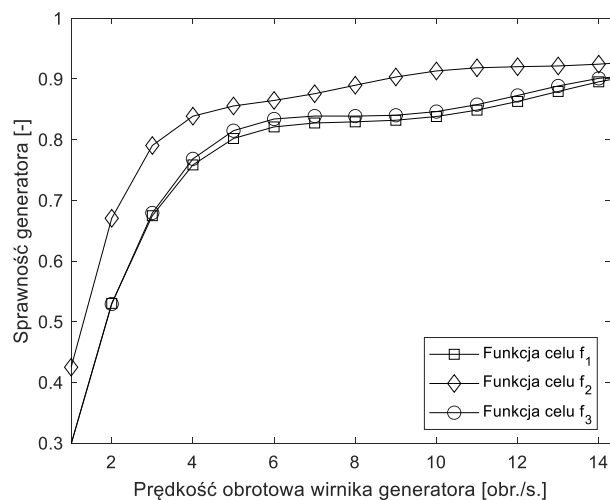
	$f_1$		$f_2$		$f_3$	
	seri a 1	seri a 2	seri a 1	seri a 2	seri a 1	seri a 2
średnica generatora [mm]	146	142	170	172	145	144
długość pakietu [mm]	160	160	160	160	160	160
promień środka szczeliny [mm]	71,2	75,8	88,6	97,4	82,4	80,8
liczba zwojów	648	552	550	484	598	504
średnica drutu [mm]	1	1	1,18	1,18	0,9	1
sprawność w punkcie $n_N$ [%]	75,5	78,1	88,3	88,9	78,8	79,7

Wzory określające funkcje celu różnią się między sobą wyrażeniem w mianowniku. Pierwsza funkcja celu  $f_1$  zawiera informację o powierzchni czynnej przekroju generatora. W skład powierzchni wchodzi również szerokości zębów stojana i wirnika. Funkcja ta może służyć, oprócz poszukiwania rozwiązania z maksymalną sprawnością, do minimalizowania masy generatora.

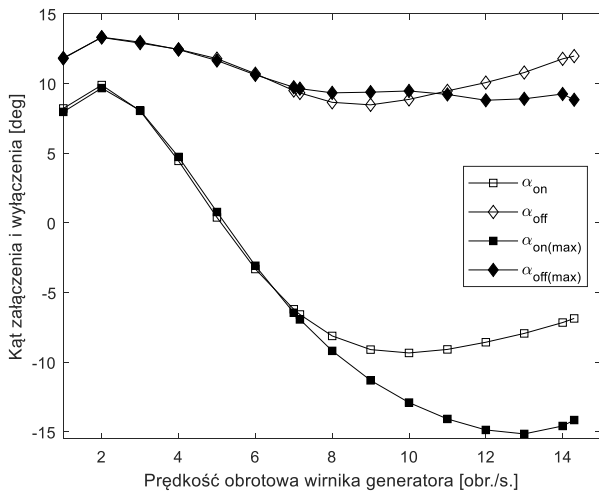
Funkcje  $f_2$  i  $f_3$  zawierają w mianowniku odpowiednio pierwiastek z promienia zewnętrznego generatora oraz sam promień  $r_G$ . W tym przypadku wpływ na wartość funkcji celu ma sam zewnętrzny wymiar generatora, bez szczegółów konstrukcyjnych w jego przekroju. Algorytm genetyczny przy wykorzystaniu funkcji  $f_3$  znalazł podobne rozwiązanie jak dla funkcji  $f_1$ , przy czym wartości sprawności generatora były nieznacznie wyższe. Wyniki z zastosowania funkcji  $f_2$  były zdecydowanie najlepsze. W tym przypadku, w wyniku optymalizacji, uzyskano rozwiązanie o większej średnicy, które posiada szczelinę powietrzną umieszczoną w większej odległości od środka obrotu wirnika oraz uzwojenie, w którym drut nawojowy ma większą średnicę. Zmniejszyło to między innymi straty cieplne w uzwojeniu i uzyskana wartość sprawności generatora była najwyższa. W związku z większą średnicą wadą tego rozwiązania jest jego większa masa.

Na kolejnych rysunkach przedstawiono wybrane charakterystyki generatorów. Na rysunku 3 zaprezentowano charakterystyki sprawności uzyskanych konstrukcji generatorów. Charakterystyka dla  $f_2$  w całym zakresie prędkości posiada większe wartości sprawności niż uzyskane w pozostałych podejściach.

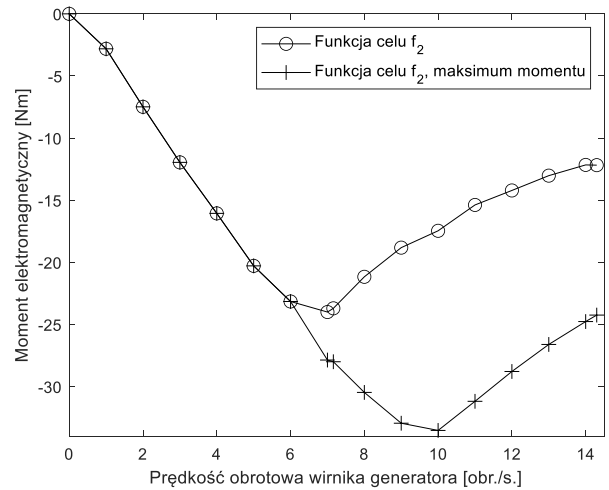
Ze względu na dużą wrażliwość punktu pracy generatora SRG na parametry sterowania, ponieważ obliczenia były prowadzone z całkowitymi wartościami kątów  $\alpha_{on}$  i  $\alpha_{off}$ , uzyskane charakterystyki, prezentowane na rysunku 4, są aproksymowane. Charakterystyki te są przedstawione tylko dla funkcji  $f_2$ , przy czym są to charakterystyki  $\alpha_{on}$  i  $\alpha_{off}$  uzyskane wprost dla najlepszego osobnika z algorytmu oraz wyznaczone dla tego przypadku  $\alpha_{on(max)}$  i  $\alpha_{off(max)}$  w celu uzyskania maksymalnej możliwej wartości momentu elektromagnetycznego dla danej prędkości obrotowej. Wartość maksymalna momentu pozwala na uzyskanie informacji o nadwyżce momentu przy danej prędkości, co pozwoli w przypadku porywów wiatru lub przy innych zdarzeniach, na awaryjne zatrzymanie generatora lub wspomaganie hamulca mechanicznego. Charakterystyki momentu elektromagnetycznego opracowanych konstrukcji zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys.3. Charakterystyki sprawności zoptymalizowanych konstrukcji generatorów w funkcji prędkości obrotowej wirnika generatora



Rys.4. Charakterystyki aproksymowanych wartości kątów  $\alpha_{on}$  i  $\alpha_{off}$  w funkcji prędkości obrotowej generatora oraz kątów  $\alpha_{on(max)}$  i  $\alpha_{off(max)}$ , przy których uzyskiwana jest maksymalna wartość momentu elektromagnetycznego, uzyskane dla funkcji celu  $f_2$



Rys.5. Charakterystyki momentu elektromagnetycznego uzyskane w wyniku optymalizacji z wykorzystaniem funkcji celu  $f_2$  dla parametrów sterowania uzyskanych z algorytmu oraz dla kątów sterowania dobranych w celu uzyskania maksymalnego momentu

Tabela 2. Wartości energii uzyskane w cyklu rocznym w zależności od osiągniętego rozwiązania z wykorzystaniem zaproponowanych funkcji celu

Prędkość wiatru	Częstość występowania wiatru w cyklu rocznym	Moc mechaniczna turbiny	Energia przekazana przez turbinę	Prędkość obrotowa generatora	Energia wygenerowana, (funkcja $f_1$ )	Energia wygenerowana (funkcja $f_2$ )	Energia wygenerowana, (funkcja $f_3$ )
m/s	h	kW	kWh/rok	obr./s.	kWh/rok	kWh/rok	kWh/rok
0	24	0,0	0,0	0,0	0	0	0
1	369	1,5	0,5	0,8	0,1	0,2	0,1
2	1140	11,7	13,3	1,6	5,1	6,9	5,1
3	1639	39,5	64,8	2,4	33,8	42,6	33,8
4	1686	93,7	157,9	3,2	98,4	117,5	98,8
5	1308	182,9	239,3	4,0	166,0	189,4	167,6
6	862	316,1	272,5	4,8	201,9	222,3	204,6
7	593	501,9	297,6	5,6	229,4	246,3	233,1
8	336	749,2	251,7	6,4	198,5	210,0	201,7
9	279	1066,8	297,6	7,2	237,4	250,0	241,2
10	158	1066,8	168,5	8,0	135,2	142,8	137,1
11	149	1066,8	158,9	8,8	127,8	136,1	129,4
12	88	1066,8	93,9	9,5	75,6	81,3	76,4
13	61	1066,8	65,1	10,3	52,5	56,9	53,0
14	26	1066,8	27,7	11,1	22,5	24,5	22,7
15	18	1066,8	19,2	11,9	15,6	17,0	15,8
16	14	1066,8	14,9	12,7	12,3	13,3	12,4
17	8	1066,8	8,5	13,5	7,1	7,6	7,2
18	2	1066,8	2,1	14,3	1,8	1,9	1,8
Suma			2154,3		1621,0	1766,5	1641,7

## Wnioski

W przypadku trzyosobowego gospodarstwa domowego, w zależności od źródła informacji, przyjmuje się zużycie energii elektrycznej na poziomie 1,2-3,5 MWh rocznie. W dość korzystnej lokalizacji jaką jest Ustka, uzyskano w wyniku optymalizacji konstrukcji generatora SRG, w przypadku najlepszego rozwiązania około 1,76 MWh rocznie. Jest to istotne uzupełnienie energii pochodzącej z innych źródeł odnawialnych w bilansie energetycznym budynku mieszkalnego.

Zaproponowane funkcje celu pozwalają na uzyskanie rozwiązań o podobnych wartościach rocznej oczekiwanej produkcji energii. Różnice wynoszą poniżej 10 %. W zależności od wyboru funkcji celu uzyskuje się rozwiązanie albo z mniejszą masą SRG, albo z większą sprawnością.

Różnica pomiędzy uzyskanymi konstrukcjami, wynikające z obliczeń przy wykorzystaniu różnych funkcji celu, jest niewielka, ale istotna. Wynika to z zastosowania

podobnego podejścia optymalizacyjnego dla uzyskanych konstrukcji. W dalszym etapie należałoby porównać uzyskane wyniki z ogólnie dostępnymi generatorami, wymaga to jednak dokładnej znajomości charakterystyki sprawności od prędkości obrotowej. Prezentacja takich danych nie jest ogólnie przyjętą praktyką w przypadku mikroelektrowni wiatrowych.

Mocowanie elektrowni wiatrowej do konstrukcji budynku mieszkalnego ze względu na drgania należy rozważyć już na etapie projektu budynku. W późniejszym czasie można rozważyć montaż elektrowni do ściany z wyprowadzeniem ponad dach.

**Autorzy:** dr inż. Krzysztof Wróbel, dr inż. Artur Śliwiński, Politechnika Opolska, Katedra Automatyki Napędów i Robotyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: kwrobel@po.edu.pl, a.sliwinski@po.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Shin H. U., Lee K. B.: Optimal design of a switched reluctance generator for small wind power system using a genetic algorithm, *International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*, Korea (South), (2015), 2209-2214, doi: 10.1109/ICPE.2015.7168083
- [2] RamKumar M., Latha K.: Selection of Pole Numbers for a 1 kW Switched Reluctance Generator for Wind Energy Conversion by Electromagnetic Considerations, *Systems and Information Processing (ICESIP)*, Chennai, India, (2019), 1-6, doi: 10.1109/ICESIP46348.2019.8938210
- [3] Méndez S., Martínez A., Millán W., Montaña C. E., Pérez-Cebolla F.: Design, Characterization, and Validation of a 1-kW AC Self-Excited Switched Reluctance Generator, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (2013), vol. 61, no. 2, 846-855, doi: 10.1109/TIE.2013.2254098
- [4] Omaç Z., Cevahir C., Control of switched reluctance generator in wind power system application for variable speeds, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 12, Issue 3, (2021), pp 2665-2672, DOI: 10.1016/j.asej.2021.01.009
- [5] Bouklata A., Oubouaddi H., Brouri A., Mosaad M. I., Giri F., Advanced Control Strategy of Switched Reluctance Generator-Based Wind Energy Conversion Systems Using Backstepping and Extremum Seeking Techniques, *IFAC-PapersOnLine*, (2024), Vol 58, Issue 13, 593-598, DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.547.
- [6] Tomczewski K., Wach P., Control characteristics for quasi-optimal operation of switched reluctance motors, *Electrical Engineering*, (2003), nr vol.85, nr 5, 275-281, DOI:10.1007/s00202-003-0174-6
- [7] Powrózek A., Bogusz P., Stabilizacja napięcia wyjściowego generatora reluktancyjnego przełączalnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), R. 90 NR 3/2014, DOI:10.12915/pe.2014.03.38
- [8] Han Z., Ohyama K., Yao Y., Design to Harmonize Output Characteristics of Wind Turbines and Switched Reluctance Generators, *ICEMS*, Hamamatsu, Japan, (2020), 1308-1311, DOI: 10.23919/ICEMS50442.2020.9291147
- [9] Zhao H., Lingzhi Y., Hanmei P., Kunyan Z., Research and control of SRG for variable-speed wind energy applications, *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference*, China, (2009), 2238-2243, doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157775
- [10] Choi D. -W., Byun S. -I., Cho Y. -H., A Study on the Maximum Power Control Method of Switched Reluctance Generator for Wind Turbine, *IEEE Transactions on Magnetics*, (2014), vol. 50, no. 1, 1-4, doi: 10.1109/TMAG.2013.2274174
- [11] Wróbel K., Tomczewski K., Śliwiński A., Tomczewski A., Optimization of a Small Wind Power Plant for Annual Wind Speed Distribution, *Energies*, (2021), vol. 14, nr 6, 1-18, DOI:10.3390/en14061587
- [12] Cetin N., Yurdusev M. A., Ata R., Özdamar A., Assessment of Optimum Tip Speed Ratio of Wind Turbines, *Mathematical and Computational Applications*, (2005), nr vol.10, nr 1, 147-154, DOI: 10.3390/mca10010147
- [13] Hosseini A., Cannon D.T., Vassel-Be-Hagh A., Tip Speed Ratio Optimization: More Energy Production with Reduced Rotor Speed, *Wind*, (2022), 2(4), 691-710. DOI: 10.3390/wind2040036