

Filip Kutt, Mieczysław Ronkowski  
Politechnika Gdańska, Gdańsk

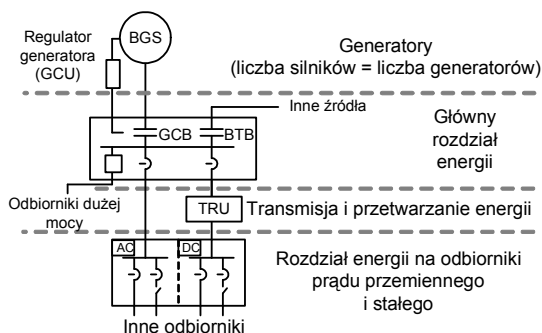
## KONCEPCJA I SYMULACJA POŁOWA GENERATORA O ZMIENNEJ CZĘSTOTLIWOŚCI. ZASTOSOWANIE W AUTONOMICZNYCH SYSTEMACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

### CONCEPTION AND FIELD SIMULATIONS OF A VARIABLE FREQUENCY GENERATOR. APPLICATION FOR AUTONOMOUS POWER GENERATION SYSTEM

**Abstract:** This paper covers a conception and simulation results for a brushless synchronous generator working with variable speed in an autonomous energy generation system (e.g. airplane power grid, hybrid vehicle, micro-CHP). The paper has two parts: presentation of the generator conception used in modern autonomous energy generation systems, and simulation results using filed model elaborated in Flux2D software. The obtained simulation results have proved that the assumed generator topology and electromagnetic loading are adequate for the required generator performance parameters.

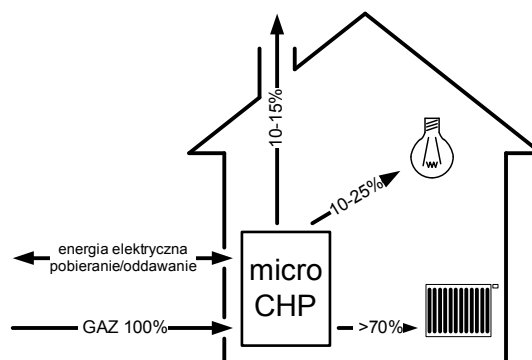
#### 1. Wstęp

Problematyka autonomicznych systemów elektroenergetycznych (ASE) jest obecnie bardzo aktualna. W szczególności dotyczy to systemów pokładowych pojazdów samochodowych i samolotów, budowanych wg koncepcji „more electric vehicle” lub „more electric aircraft” (rys. 2) [4], a także systemów do rozproszonej kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej (micro-Combined Heat and Power – micro-CHP) na potrzeby gospodarstw domowych (rys.2) [5].



Rys. 1. System elektroenergetyczny na pokładzie nowoczesnego samolotu

Jednym z kluczowych elementów ASE jest generator energii elektrycznej napędzany turbiną gazową lub silnikiem spalinowym w przypadku systemów micro-CHP. Natomiast w systemach pokładowych źródłem energii mechanicznej („prime mover”) jest silnik odrzutowy samolotu lub silnik spalinowy pojazdu.



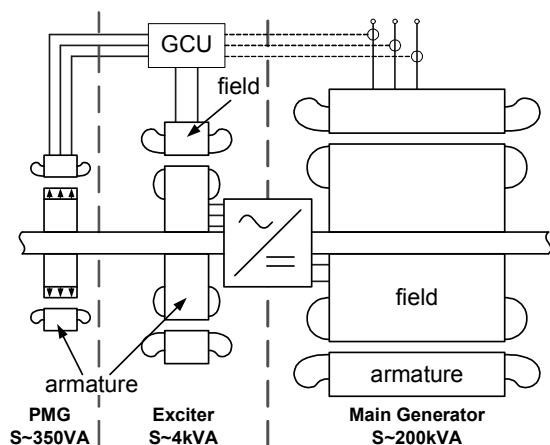
Rys. 2. System kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej (micro-CHP) w indywidualnym gospodarstwie domowym

Współczesne ASE stawiają przed projektantami maszyn elektrycznych nowe wyzwania. Wymagają one zastosowania bezszczotkowych generatorów synchronicznych (BGS) pracujących ze zmienną prędkością obrotową (częstotliwością). Na ogół wymagany zakres moc BGS zawiera się w przedziale od 1 kW – w przypadku systemów micro-CHP, do 250 kW – w przypadku systemów pokładowych w samolotach. Przy doborze BGS szczególnie ważna jest jego praca przy zwiększonej częstotliwości znamionowej – pozwala to znacznie zmniejszyć gabaryty (masę) ASE. Celem referatu jest przedstawienie koncepcji budowy BGS i jego sparametryzowanego modelu symulacyjnego w ujęciu połowym. Do budowy modelu symulacyjnego zastosowano program Flux2D. Opracowany model może być wykorzystany do analizy,

projektowania i optymalizacji BGS stosowanych w nowoczesnych ASE.

## 2. Nowoczesny generator w ASE

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną oraz większe oczekiwania względem sprawności ASE, wymagają zastosowania do budowy BGS nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych i technologicznych. Na rys. 3 przedstawiono strukturę nowoczesnego BGS składającego się z trzech maszyn: przedwzbudnicy z magnesami trwałymi (PMG), wzbudnicy (exciter) oraz generatora głównego (main generator). Główny generator jest maszyną synchroniczną pracującą ze zmienną częstotliwością/prędkością obrotową (variable frequency generator VFG).



Rys. 3. Struktura bezszczotkowego generatora synchronicznego pracującego ze zmienną częstotliwością [3,4]

Ze względu na warunki pracy BGS w nowoczesnych ASE – praca przy wysokiej częstotliwości i zmiennej prędkości obrotowej (znacznie odbiegających od warunków w systemach klasycznych – praca przy niskiej częstotliwości i stałej prędkości obrotowej), konieczne jest opracowanie modeli polowo-obwodowych generatora uwzględniających zjawiska pojawiające się w tych warunkach pracy.

## 3. Założenia projektowe i koncepcja BGS

Założenia do projektu BGS opracowano na podstawie danych znamionowych generatora VFG przeznaczonego do pracy na pokładzie nowoczesnego samolotu, który zbudowano w ramach realizacji projektu MOET [7]. Dane znamionowe generatora VFG są następujące: moc 200 kVA, napięcie 230V, zakres częstotliwości od 400 do 800Hz, trzy pary biegunów.

Moc znamionowa projektowanego BGS została obniżona do 120kVA. Wynika to przede wszystkim z przyjętego sposobu chłodzenia maszyny. W rozwiązaniach komercyjnych generatory pokładowe chłodzone są poprzez spryskiwanie połączeń czołowych olejem. W przypadku projektowanego generatora założono, że ciepło będzie odbierane poprzez wymuszony przepływ powietrza. Szczegółowe założenia projektowe BG przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe założenia projektowe BGS

Parametr	Wartość
Moc znamionowa	120 kVA
Napięcie znamionowe	400/230 V
Prąd znamionowy	173 A
Współczynnik mocy	0,75
Liczba par biegunów	3
Prędkość znamionowa	8000 obr/min
Częstotliwość znamionowa	400 Hz
Moment znamionowy	107 Nm

Przyjęto również: maksymalną gęstość prądu twornika i wzbudzenia, wynoszącą odpowiednio  $8 \text{ A/mm}^2$  i  $10 \text{ A/mm}^2$ ; obład prądowy twornika równy  $50 \text{ kA/m}$ . Ze względu na trwające prace projektowe w artykule zaprezentowano wstępną wersję BGS. Dla przyjętych założeń projektowych opracowano koncepcję generatora przedstawioną na rys. 4 [1, 6].

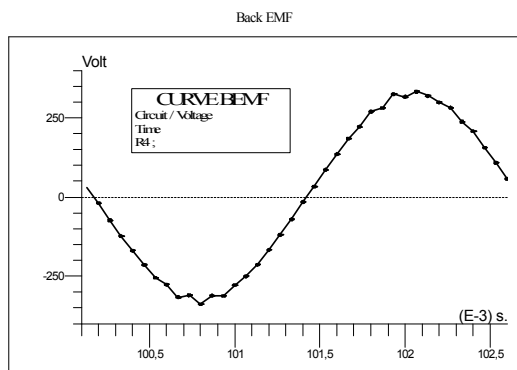
Wstępne wymiary geometryczne obliczone na podstawie przyjętych założeń projektowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe parametry BGS

Wymiar	Wartość
Średnica zewnętrzną wirnika	200mm
Szczelina powietrzna	1,5mm
Średnica zewnętrzna stojana	290mm
Długości pakietu	200mm
Ilość żłobków stojana	54
Ilość żłobków wirnika	48

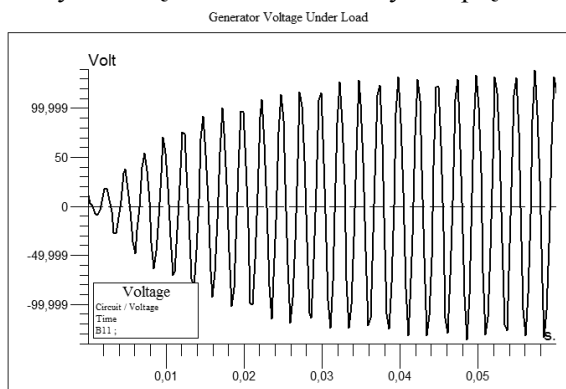
Dane podane w tabeli 2 mogą ulec jeszcze zmianie, ponieważ proces projektowania generatora nie dobiegł jeszcze końca. Jednak wyniki wstępnej analizy polowej BGS, uzyskanej w programie polowym Flux2D, wskazują, że ewentualne różnice wymiarów końcowych nie powinny znacznie się różnić od tych przedstawionych na rys. 4 i w tabeli 2.



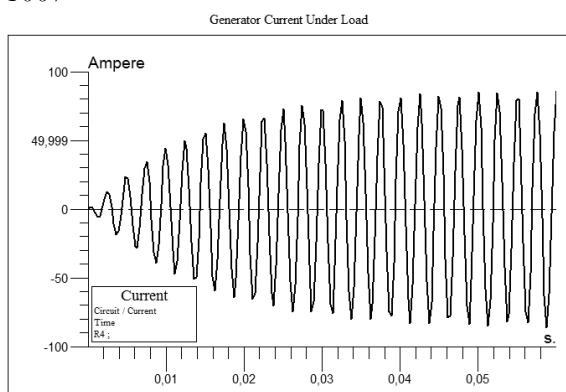


Rys. 7. Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika przy prędkości  $n=8000\text{obr/min}$  i wzbudzeniu  $I_f=30\text{A}$

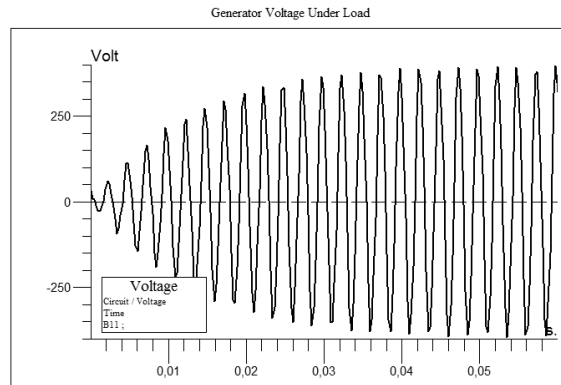
Rys. 8 i 9 przedstawiają przebiegi napięcia i prądu generatora przy znamionowym obciążeniu i prądzie wzbudzenia analogicznym, jak dla stanu jałowego ( $I_f = 30\text{A}$ ). Podczas pracy przy znamionowym obciążeniu napięcie równe napięciu biegu jałowego zostało uzyskane przy prądzie wzbudzenia  $I_f = 90\text{A}$ . Rys. 10 i 11 przedstawiają pracę generatora przy znamionowym obciążeniu i znamionowym napięciu.



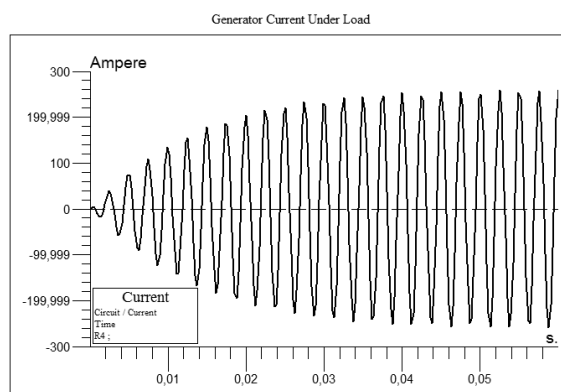
Rys. 8. Napięcie generatora przy obciążeniu znamionowym ( $n=8000\text{obr/min}$ ,  $I_f=30\text{A}$ ). Wartość skuteczna napięcia w stanie ustalonym  $100\text{V}$



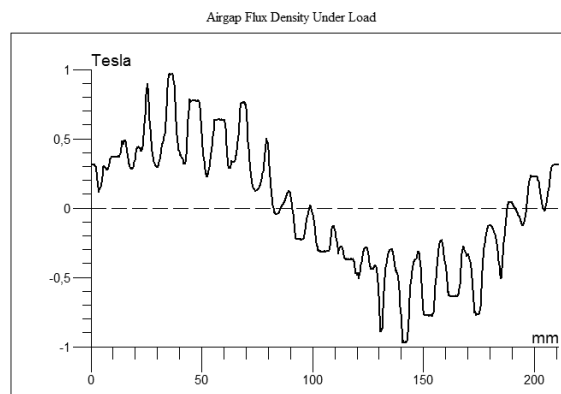
Rys. 9. Prąd twornika BGS przy obciążeniu znamionowym ( $n=8000\text{obr/min}$ ,  $I_f=30\text{A}$ )



Rys. 10. Prąd twornika BGS przy obciążeniu znamionowym ( $n=8000\text{obr/min}$ ,  $I_f=90\text{A}$ )



Rys. 11. Prąd generatora przy obciążeniu znamionowym ( $n=8000\text{obr/min}$ ,  $I_f=90\text{A}$ )



Rys. 12. Rozkład indukcji (wektor normalny) w szczelinie roboczej BGS – praca przy obciążeniu znamionowym

Rys. 6 i 12 przedstawiają wektor normalny indukcji magnetycznej w szczelinie maszyny odpowiednio przy pracy jałowej i przy obciążeniu znamionowym ( $\cos\varphi=0,75$ ).

Charakterystyczne wartości indukcji w elementach BGS zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Charakterystyczne wartości indukcji BGS

Element	Wartość
Ząb wirnika	1,6T
Ząb stojana wart. maksymalna	1,7T
Ząb stojana wart. średnia	0,9T
Jarzmo stojana wart. maks.	1,5T
Jarzmo wirnika wart. maks.	1,85T

ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel. (058) 347 1939, fax. (058) 341 0880  
fkutt@ely.pg.gda.pl

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń analitycznych i badań symulacyjnych można przyjąć, że zaprojektowany BGS wstępnie spełnia założone wymagania w zakresie parametrów elektrycznych. Kolejnym etapem weryfikującym będą obliczenia strat mocy i ciepłne projektowanego BGS. Wyniki te pozwolą na ocenę projektu z punktu widzenia dopuszczalnych temperatur pracy BGS.

## 6. Literatura

- [1]. Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Warszawa, Wyd. Nauk.-Techn., 1981.
- [2]. Delhasse F. and Biaisi F.: *High power starter generators for airliners*. Changes In Aeronautical And Space Systems. Challenges for on-Board Energy JUNE 26-28, 2006, Avignon, France
- [3]. Gieras J.F.: *Advancements in Electric Machines*. Heidelberg, Springer 2009.
- [4]. Moir I., Seabridge A.: *Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration*. John Wiley & Sons 2008
- [5] Patel-Predd P.: *A power plant for home*. IEEE Spectrum, April 2007.
- [6]. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V.: *Design of rotating electric al machines*. John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
- [7]. <http://www.eurtd.com/moet/home.html> - MOET (More Open Electrical Technologies).

Artykuł zawiera częściowe wyniki prac prowadzonych w ramach projektu badawczego promotorskiego NN 510 328 937, pt.: *Modele bezszczotkowego generatora synchronicznego do badania autonomicznego systemu elektroenergetycznego*.

### Autorzy

Mgr inż. Filip KUTT  
Dr hab. inż. Mieczysław RONKOWSKI,  
prof. nadzw. PG  
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych,  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki,  
Politechnika Gdańska