

*generator synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi,  
agregat prądowórczy*

Robert ROSSA\*, Paweł PISTELOK\*

## **GENERATOR Z MAGNESAMI TRWAŁYMI DO PRACY W AGREGACIE PRĄDOWÓRCZYM**

W artykule przedstawiono koncepcję agregatu spalinowo-elektrycznego z generatorem wzbudzonym magnesami trwałymi. Opisano zasadę działania agregatu w układzie buforowym pracującym w autobusie. Zaprezentowano modele obliczeniowe generatorów, pokazano widmo rozkładu indukcji dla każdej rozpatrywanej konstrukcji. Zaprezentowano przekrój poprzeczny wraz z graficzną prezentacją poziomów nasycenia w poszczególnych częściach obwodu elektromagnetycznego. W ramach pracy omówiono trzy obwody elektromagnetyczne generatorów z magnesami trwałymi gdzie zaprezentowano uzyskane charakterystyki napięcia wyjściowego w funkcji obciążenia generatora.

### **1. WSTĘP**

Obecnie na światowym i krajowym rynku maszyn elektrycznych coraz większym zainteresowaniem cieszą się maszyny z magnesami trwałymi. W dziedzinie samochodów elektrycznych najczęściej stosowane są tego typu silniki sterowane sinusoidalnie, gdyż znajdują się w grupie maszyn o najwyższej sprawności przetwarzania energii. Bardzo podobny trend dotyczy generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi gdzie do tej pory znalazły szerokie zastosowanie w produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii. Największym obszarem zastosowań prądnic wzbudzanych magnesami trwałymi, jest zastosowanie ich w elektrowniach wiatrowych i wodnych. Prądnice te posiadają prostą budowę i charakteryzują się najwyższą sprawnością. Proces ciągłego udoskonalania tego typu maszyn powoduje, iż koniecznym jest opracowanie konstrukcji prądnic przeznaczonych do pracy w agregatach spalinowo-elektrycznych zasilanych olejem napędowym, biogazem czy metanem, np. pozyskiwanym na wysypiskach śmieci. Opracowaną konstrukcję prądnic przeznaczoną do pracy w agregacie prądowórczym będzie można wykorzystać w agregatach pracują-

---

\* BOBRME KOMEL, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, info@komel.katowice.pl

cych w pojazdach hybrydowych, a także do zastosowań stacjonarnych. Natomiast same generatory, oprócz w/w zastosowań będą znakomitym rozwiązaniem do pozyskiwania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii takich jak elektrownie wodne czy wiatrowe. W Branżowym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Maszyn Elektrycznych KOMEL obecnie jest realizowany projekt rozwojowy pt.: „Nowa generacja wysokosprawnych agregatów spalinowo-elektrycznych”. Projekt zakłada opracowanie konstrukcji prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi przeznaczonych do pracy w agregacie prądowórczym. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń trzech konstrukcji prądnic z magnesami trwałymi.

## 2. KONCEPCJA AGREGATU PRĄDOWÓRCZEGO

Nowa seria agregatów spalinowo-elektrycznych jest przeznaczona do pojazdów hybrydowych budowanych wg następującej koncepcji. Pojazd jest napędzany silnikiem elektrycznym zasilanym z agregatu spalinowo-elektrycznego pracującego buforowo z zasobnikiem energii elektrycznej (praca szeregową). W polskich miastach jest eksploatowanych dziesiątki tysięcy autobusów. Wymiana w tych autobusach silnika spalinowego na silnik elektryczny o mniejszej mocy (ok. 50%) oraz zainstalowanie w nich agregatu spalinowo-elektrycznego o mocy ok. 50% mocy silnika spalinowego wraz z zasobnikiem energii elektrycznej pozwoli uzyskać:

- identycznie jak obecne parametry autobusu,
- obniżenie zużycia oleju napędowego o ok. 30% ,
- odzyskiwać energię hamowania,
- znaczne obniżenie emisji spalin w szczególności przy ruszaniu autobusu,
- minimalne zużycie klocków hamulcowych i ich rozpraszanie na jezdni,
- ekonomiczną pracę agregatu spalinowo-elektrycznego

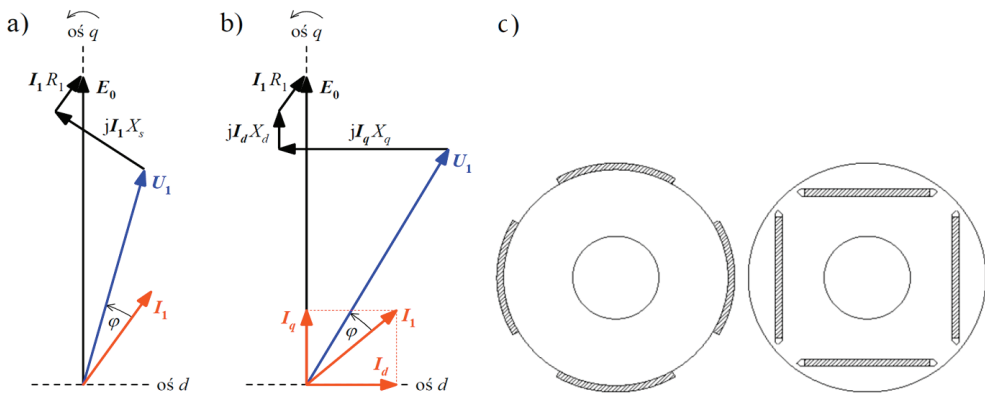
Modernizacja napędów mogłaby być przeprowadzona w czasie ich okresowych remontów. Takie podejście uzasadnia potrzebę opracowania nowych wysokosprawnych agregatów spalinowo-elektrycznych z prądnicami wzbudzanymi magnesami trwałymi. Agregat będzie składać się z katalogowego silnika spalinowego (benzynowego, wysokopięrznego lub gazowego) i prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi. Opracowana konstrukcja agregatu prądowórczego z powodzeniem może być wykorzystana do innego typu aplikacji jak np. przenośny agregat do ładowania baterii samochodów osobowych – tzw. „range extender”. Można go również wykorzystać do ładowania (w terenie) baterii paralotni elektrycznych, oraz wszelkiego typu pojazdów elektrycznych jak rowery, quady, ATV itp. W ramach trwającego projektu wykonano szereg obliczeń polowo-obwodowych obwodów elektromagnetycznych prądnic z uwzględnieniem odpowiedniego reżimu pracy. Z analizy wyników obliczeń oraz z szeregu propozycji wybrano 3 konstrukcje, które zostały zaprojektowane i zaprezentowane w niniejszym artykule.

### 3. MODEL MATEMATYCZNY

Jednym z podstawowych założeń nowej konstrukcji generatorów jest sztywność napięcia wyjściowego. Znamionową zmienność napięcia obliczono ze wzoru (1).

$$\delta U_{\%} = \frac{U_0 - U_N}{U_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:  $U_0$  – napięcie międzyfazowe biegu jałowego w stanie nagrzanym maszyny,  $U_N$  – napięcie międzyfazowe przy znamionowym obciążeniu generatora w stanie nagrzanym. Istotnym parametrem wpływającym na zmienność napięcia generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi jest różnica w reaktancjach osi podłużnej  $d$  oraz osi poprzecznej  $q$  wirnika. Dla maszyn, w których reaktancje  $X_d$  oraz  $X_q$  są równe, zmienność napięcia przekracza 25% (dla znamionowego punktu pracy) [1–4]. Do tej grupy zalicza się generatory z magnesami montowanymi na powierzchni wirnika (*Surface Permanent Magnet – SPM*). Fakt ten powoduje, iż konstrukcja ta nie spełnia założonych wymagań stawianym nowym prądnicom. W celu uzyskania odpowiedniej sztywności charakterystyki napięcia wyjściowego zastosowano prądnicę z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika (*Interior Permanent Magnet – IPM*).



Rys. 1. Wykresy wektorowe napięć generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi montowanymi a) na powierzchni i b) wewnątrz wirnika oraz c) przykładowe rozwiązania konstrukcyjne wirników generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi

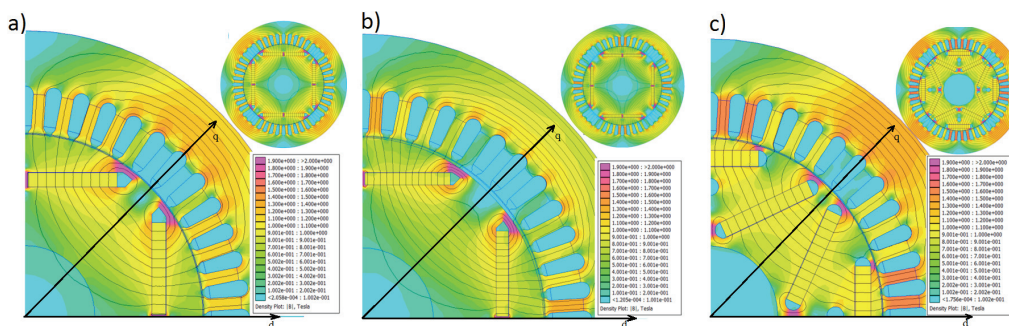
Fig. 1. Voltage vector diagrams of synchronous generators with permanent magnets mounted a) on the surface and b) inside the rotor, c) examples of design solutions rotor synchronous generators with permanent magnets

Na rysunku 1c pokazano dwa przykładowe warianty wykonania wirnika (IPM oraz SPM) generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. Zgodnie z oczekiwaniami zmienność napięcia  $\delta U_{\%}$  dla maszyny, w której reaktancje w osiach podłużnych i po-

przeczynnych są różne ( $X_d < X_q$ ), jest znacznie mniejsza w odniesieniu do maszyn, dla których zachodzi relacja  $X_d \approx X_q$ . Relacje pomiędzy spadkami napięć w modelu obliczeniowym generatorów synchronicznych wzbudzanych magnesami (IPM oraz SPM) trwałymi zaprezentowano na rysunku 1a i b za pomocą wykresów wektorowych. Do przeprowadzenia obliczeń polowo-obwodowych modeli prądnic (schemat zastępczy, obliczanie charakterystyk zewnętrznych) wykorzystano algorytm obliczeniowy generatorów synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi zaprezentowany w publikacji [1].

#### 4. MODELE OBLICZENIOWE GENERATORÓW

Zaprojektowany obwód elektromagnetyczny modelu I (rys. 2a) charakteryzował się zadowalającą wartością zmienności napięcia wyjściowego na poziomie 7% (rys. 3b), lecz w widmie rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie amplituda trzeciej harmonicznej jest największa w odniesieniu do pozostałych rozpatrywanych modeli (rys. 3a).

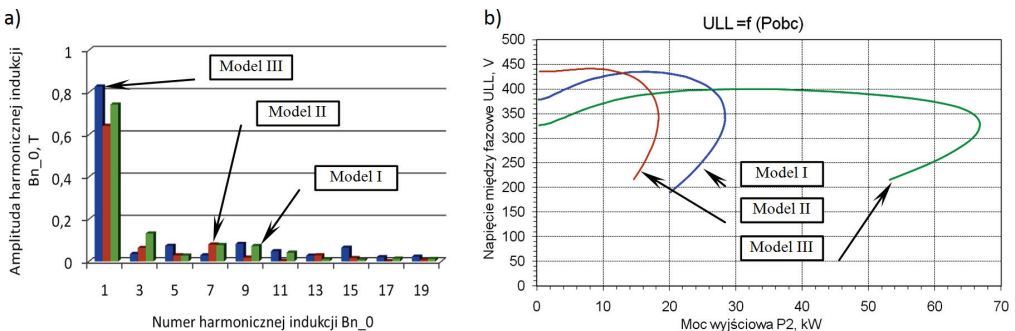


Rys. 2. Obwody elektromagnetyczne generatorów IPM, a) równomierna szczelina – model I, b) nierównomierna szczelina – model II, c) równomierna szczelina – model III

Fig. 2. IPM electromagnetic generator circuit, a) uniform airgap – model I, b) uneven airgap – model II, c) uniform airgap – model III

W celu minimalizacji zawartości wyższych harmonicznych w przestrzennym rozkładzie indukcji magnetycznej w szczelinie, a co za tym idzie, kształtu napięcia indukowanego na zaciskach prądnicy, opracowano konstrukcję obwodu elektromagnetycznego z nierównomierną szczeliną powietrzną. Nierównomierność szczeliny powietrznej polegała na dwukrotnym zwiększeniu jej grubości w osi „q” w odniesieniu do jej grubości w osi „d” wirnika (rys. 2). W modelach obliczeniowych I i II parametry nawojowe stojana zostały odpowiednio dobrane tak aby uzyskać znamionowe napięcie międzyfazowe 400 V, natomiast objętość magnesów w wirniku pozostała taka sama. W modelu II zastosowano nierównomierną szczelinę powietrzną w celu

minimalizacji amplitud wyższych harmonicznych. Z otrzymanych wyników obliczeń (rys. 3a) wynika iż zastosowanie nierównomiernej szczeliny powietrznej w modelu II spowodowało zmniejszenie amplitudy pierwszej harmonicznej rozkładu indukcji w szczeliny powietrznej (rys. 3a) w odniesieniu do pozostałych modeli. Na podstawie otrzymanych, drogą obliczeń połowo-obwodowych, charakterystyk zewnętrznych (rys. 3b) rozpatrywanych konstrukcji (model I i II) obwodów elektromagnetycznych, nie uzyskano zakładanej mocy wyjściowej 30 kVA. W konstrukcji modelu III zwiększono objętość magnesów w wirniku, co poprawiło sztywność charakterystyki napięcia wyjściowego generatora i zwiększyło obliczeniową moc maksymalną maszyny do ok. 65 kVA. Znaczny zapas mocy generatora (model III, rys. 4b) wynika z ewentualnej konieczności przebadania agregatu przy większej mocy niż znamionowa. Na rysunku nr 2c zaprezentowano konstrukcję modelu III. Odpowiednio ułożone magnesy (koncentracja strumienia magnetycznego) stanowią wystarczające wzbudzenie generatora, które powoduje, iż ze wzniosu mechanicznego 180 mm uzyskano zakładane 30 kVA mocy (dla przykładu silnik asynchroniczny o identycznych gabarytach osiąga moc znamionową 22 kW).



Rys. 3. Wyniki obliczeń dla trzech modeli prądnic a) widmo harmonicznych obwodowego rozkładu indukcji, b) charakterystyki zewnętrzne

Fig. 3. Results of calculation for three computational models, a) harmonic spectrum distribution of magnetic induction in the airgap, b) characteristic output voltage vs. power load

W wyniku porównania widm harmonicznych tych trzech konstrukcji (rys. 3a) można stwierdzić iż, model II posiada najmniejszą amplitudę pierwszej harmonicznej w odniesieniu do pozostałych modeli. Najwyższą amplitudę pierwszej harmonicznej posiada konstrukcja modelu III. Z przeprowadzonych symulacji obciążenia generatora na odbiornik  $R$  ( $\cos\varphi = 1$ ) wynika, iż największą wartość zmienności napięcia odnotowano dla modelu I i II. W rozpatrywanym modelu III wartość zmienności napięcia wyniosła  $\Delta U_{III} = -21\%$ . Dla pozostałych modeli wartość ta wyniosła  $\Delta U_I = 7,4\%$  oraz  $\Delta U_{II} = 8,0\%$ . Należy zauważyć, iż dla konstrukcji III wartość zmienności napięcia jest ujemna, co potwierdza fakt różnicy reaktancji w osiach  $d$  i  $q$  maszyny. Podczas obciąż-

zania generatora charakterystyka napięcia „podnosi się”, co jest wynikiem samoczynnego dowzbudzenia maszyny synchronicznej.

## 5. PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy było zaprezentowanie modelowych prądnic z magnesami trwałymi przeznaczonych do pracy w agregacie prądotwórczym. Z trzech przedstawionych modeli jedynie konstrukcja III spełniła zakładane parametry do przewidzianego reżimu pracy. W porównaniu do pozostałych prezentowanych wariantów, dla modelu III odnotowano największą amplitudę pierwszej harmonicznej (rys. 3a), oraz największą sztywność charakterystyki napięcia wyjściowego (małą wartość zmienności napięcia). Jak widać na rysunku 3b, z obwodu elektromagnetycznego III osiągnięto najwyższą moc – 30 kVA w porównaniu z pozostałymi rozpatrywanymi modelami. W wyniku przeprowadzonych obliczeń, najlepszą konstrukcją pod względem parametrów okazał się obwód elektromagnetyczny oparty na modelu III, gdzie magnesy zostały umieszczone wewnątrz wirnika i ułożone w kształcie litery „V” z trzecim dodatkowym magnesem w każdym biegunie maszyny.

*Projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Innowacyjna Gospodarka 2007–2013.*

## LITERATURA

- [1] BERNATT J., *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, Wydawnictwo BOBRME KOMEL, Katowice 2010.
- [2] GAWRON S., *Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi o malej zmienności napięcia wyjściowego*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, nr 84/2009.
- [3] GLINKA T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [4] ROSSA R., KRÓL E., *Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, nr 80/2008.

## PERMANENT MAGNET GENERATOR ASSIGNED TO WORK IN POWER UNIT

In the article, the conception of standby diesel unit with permanent magnet generator was presented. Design issues and possibilities of power unit were discussed. The way which the power unit works in buffer system in the bus was described. Three computational models of permanent magnet synchronous generator were shown. The cross section with graphically presentation of magnetic induction in particular parts of electromagnetic circuits was shown. The work is designed three electromagnetic circuits of permanent magnet generators where the characteristics output voltage versus power load were expressed.