

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron
BOBRME Komel, Katowice

NOWE ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE DWUBIEGUNOWEJ PRĄDNICY SYNCHRONICZNEJ Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

NEW CONSTRUCTION OF 2-POLE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR

Abstract: This paper presents the construction of a permanent magnets synchronous generator. The computational methodology and the main results of electromagnetic calculations of the synchronous generator with permanent magnets are presented. On the basis of the executed calculations, a physical model of the generator was made, which the preliminary laboratory tests were carried out. The comparison of the preliminary laboratory tests and the results of performed calculations are also included in the paper. The main advantage of the presented model of the permanent magnets synchronous generator is low output voltage variability.

1. Wstęp

Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi w porównaniu z innymi maszynami elektrycznymi charakteryzują się [1]:

- najwyższą sprawnością,
- największą gęstością mocy w jednostce objętości.

Opracowanie i wdrażanie maszyn z magnesami trwałymi stało się możliwe dopiero od kilku ostatnich lat, gdy cena magnesów trwałych NdFeB na rynkach światowych stała się względnie niska. Maszyny tego typu jako silniki napędowe są m.in. stosowane w pojazdach szynowych oraz pojazdach drogowych o napędzie wyłącznie elektrycznym [2] lub o napędzie hybrydowym.

Innym zastosowaniem maszyn z magnesami trwałymi (prądnice synchroniczne) są elektrownie wiatrowe [3], [4] oraz elektrownie wodne. W tych urządzeniach, w celu maksymalnego wykorzystania energii odnawialnej, liczy się przede wszystkim sprawność przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną.

Liczba zastosowań maszyn z magnesami trwałymi jest bardzo szeroka.

Od kilku lat produkowane w BOBRME KOMEL prądnice z magnesami trwałymi charakteryzują się stosunkowo dużą zmiennością napięcia (sięgającą 20÷30%), która jest zdefiniowana jako:

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

gdzie:

U_N – napięcie znamionowe,

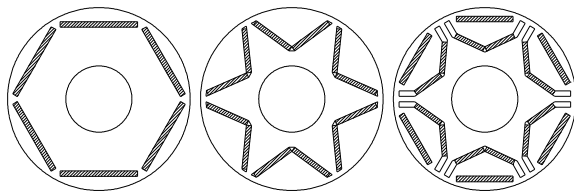
$U_{b,j}$ – napięcie biegu jałowego.

Ta cecha powoduje, że nie jest możliwe bezpośrednio zainstalowanie prądnic, np. w agregatach prądotwórczych czy w hydroelektrowniach.

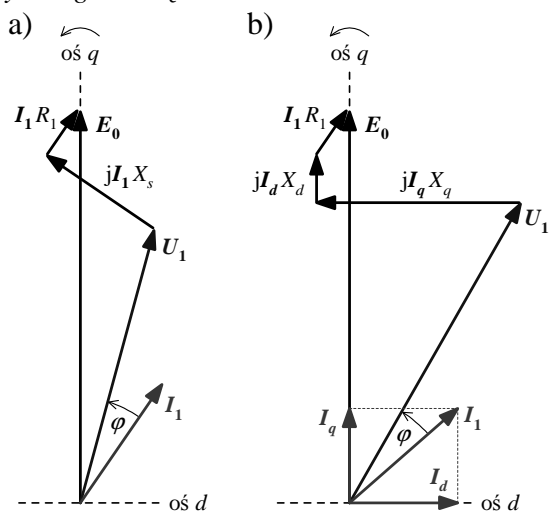
Wysoka zmienność napięcia $\delta U_{\%}$ prądnic seryjnie produkowanych w KOMEL związana jest bezpośrednio z konstrukcją wirników prądnic. Są to maszyny z magnesami trwałymi umieszczonymi na powierzchni wirnika, dla których reaktancje synchroniczne w osiach podłużnej d i poprzecznej q wirnika są jednakowe: $X_d = X_q = X_s$. W takim przypadku zmienność napięcia jest wysoka. Natomiast dla maszyn w których reaktancja w osi podłużnej X_d jest mniejsza od reaktancji w osi poprzecznej X_q ($X_d < X_q$), zmienność napięcia $\delta U_{\%}$ jest mniejsza [5]. Przykłady rozwiązań tego typu maszyn przedstawiono na rys. 1.

Autorzy pracy w poprzedniej publikacji [6] zbadali wpływ konstrukcji wirnika na zmienności napięcia dla maszyny o liczbie biegunów $2p=8$. Zgodnie z oczekiwaniami zmienność napięcia $\delta U_{\%}$ dla maszyny w której reaktancje w osiach podłużnych i poprzecznych są różne ($X_d < X_q$) jest znacznie mniejsza w porównaniu z maszynami z magnesami trwałymi dla których $X_d \approx X_q$.

Na rysunku 1 przedstawione są rozwiązania wirników, które zapewniają zmienność napięcia prądnicy mniejszą od 8% - rys. 2.



Rys. 1. Przykładowe przekroje poprzeczne wirników maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi wg rozwiązania BOBRME Komel



Rys. 2. Wykresy wektorowe napięć prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi mocowanymi a) na powierzchni wirnika i b) wewnątrz wirnika [5]

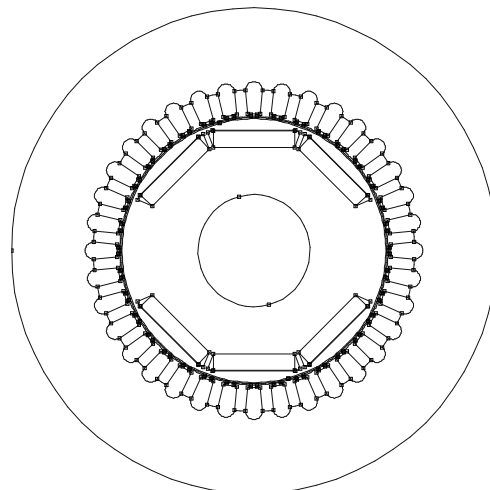
Ten artykuł poświęcony jest prądnicie dwubiegunowej. Rozwiązanie konstrukcyjne wirnika, celem uzyskania $X_d < X_q$ jest bardziej złożone.

2. Budowa i obliczenia elektromagnetyczne prądnicy 2-biegunowej

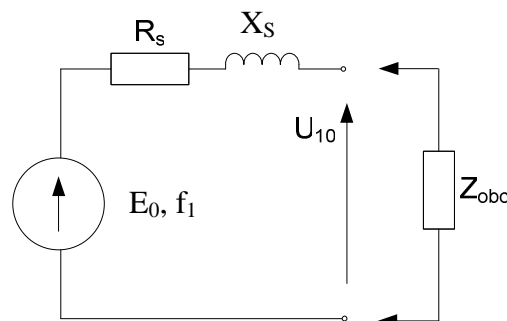
Model fizyczny prądnicy oparto na elementach silnika elektrycznego ogólnego zastosowania typu Sg132M-2. Na rysunku 3 pokazano jedno z rozwiązań obwodu magnetycznego, przy którym uzyskuje się $X_d < X_q$.

Parametry schematu zastępczego maszyny (rys. 4) obliczono metodą obwodową wykorzystując zależności analityczne [8], [9] oraz dane konstrukcyjne maszyny.

Metodą połową MES 2D [7] obliczono napięcie rotacji E_1 oraz reaktancje podłużną i poprzeczną (X_d i X_q) maszyny.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny obwodu magnetycznego modelowej prądnicy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika



Rys. 4. Schemat zastępczy prądnicy z magnesami trwałymi

Opis schematu zastępczego:

E_0 – siła elektromotoryczna rotacji pochodząca od magnesów trwałych,

f_1 – częstotliwość generowanego napięcia,

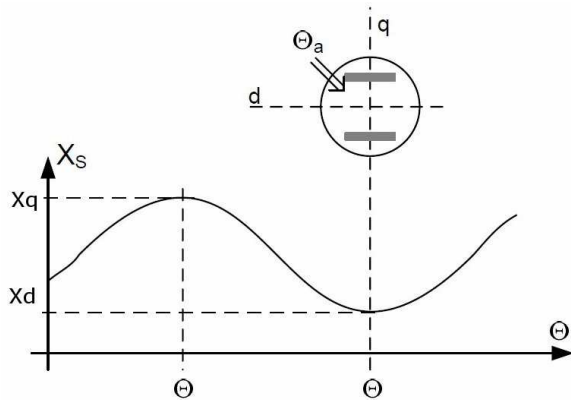
R_s – rezystancja fazowa uzwojeń stojana (twornika),

X_s – reaktancja synchroniczna uzwojenia stojana,

U_{10} – napięcie biegu jałowego prądnicy,

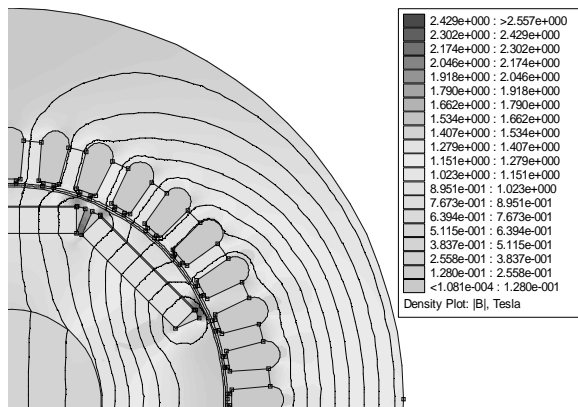
Z_{obc} – impedancja obciążenia prądnicy.

Reaktancja synchroniczna X_s jest funkcją kąta położenia wektora siły magnetomotorycznej twornika Θ_a względem osi magnetycznej wirnika i zmienia się w zależności od wartości X_d do X_q – rysunek 5.

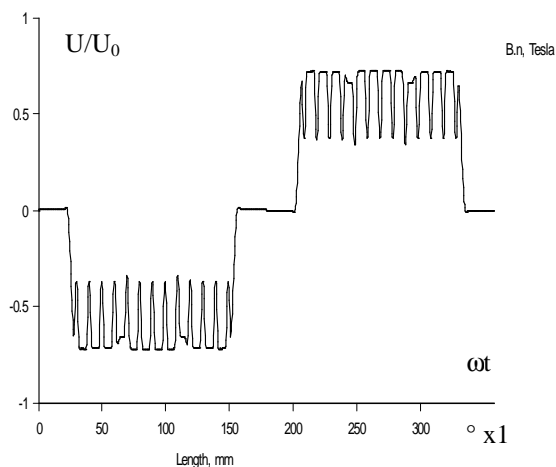


Rys. 5. Reaktancja synchroniczna X_s w funkcji siły magnetomotorycznej

Na rysunku 5 przedstawiono wycinek przekroju poprzecznego prądnicy pokazujący rozkład pola magnetycznego oraz stan nasycenia magnetycznego poszczególnych elementów prądnicy przy biegu jałowym.



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej prądnicy z magnesami trwałymi



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej obliczony metodą polową ($B_0 = 0.75 \text{ T}$)

Na podstawie rozkładu indukcji (rys. 7) oraz 1-szej harmonicznej tego rozkładu, z zależności

(2), obliczono wartość 1-szej harmonicznej napięcia rotacji przy biegu jałowym prądnicy.

$$E_{1\text{RMS}} = \sqrt{2} \cdot B_{mp1} \cdot l_{PM} \cdot \omega_{el} \cdot \frac{D - \delta}{1000 \cdot 2} \cdot N_s \cdot q \cdot \frac{k_{ul}}{a_g} \cdot k_s \quad (2)$$

gdzie:

- B_{mp1} – 1-sza harmoniczna indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej,
- l_{PM} – długość magnesów trwałych,
- D – średnica zewnętrzna stojana,
- δ – grubość szczeliny powietrznej,
- N_s – liczba szeregowych przewodów w żłobku,
- q – liczba żłobków na biegun i fazę,
- k_{ul} – współczynnik uzwojenia,
- a_g – liczba gałęzi równoległych,
- k_s – współczynnik skosu.

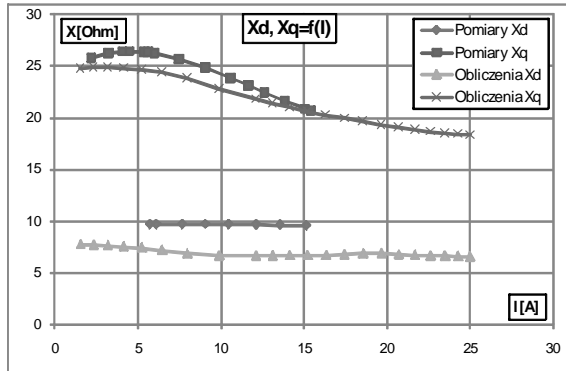
Wartość skuteczna napięcia biegu jałowego przy częstotliwości 50 Hz wyniosła 385 V.

Uwzględniając parametry schematu zastępczego oraz napięcie biegu jałowego wykreślono szereg charakterystyk, które umieszczono w zestawieniu z wynikami pomiarów w tabeli 1 i na rysunkach 8-14.

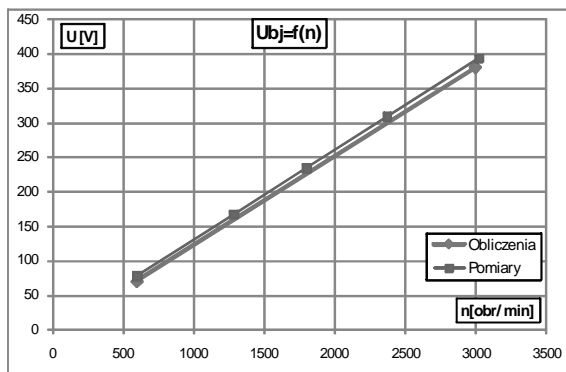
4. Wyniki badań laboratoryjnych

Tabela 1. Dane znamionowe prądnicy

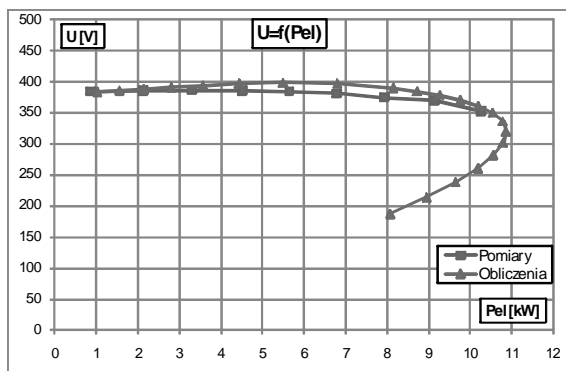
Parametr	Jednost.	Obliczenia	Pomiary
1	2	3	4
$P_{\text{elekt.}}$	W	9000	8996
$P_{\text{mech.}}$	W	9469	9697
U	V	381.5	370
I	A	13.6	11.7
$\cos\phi$	-	1	0.978
η	%	95.1	92.8
f	Hz	50	50
U_{bj}	V	385	391
R_f	Ω	0.485	0.505
$X_r + X_d$	Ω	6.7	9.6
$X_r + X_q$	Ω	21.2	21.6
$\text{THD}_{U\%}$	%		4.8
$\Delta U_{\%}$	%	0.4	5.3



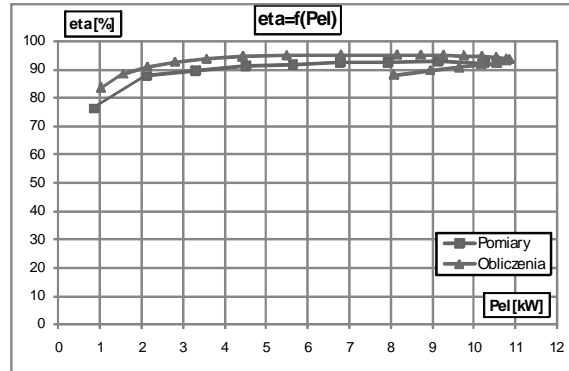
Rys. 8. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów laboratoryjnych reaktancji podłużnej i porzecznej maszyny



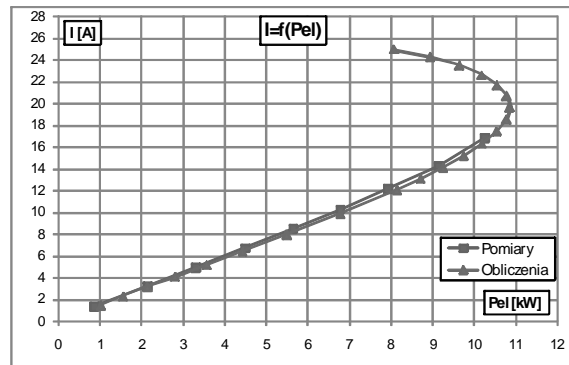
Rys. 9. Porównanie obliczeń i pomiarów napięcia biegu jałowego prądnicy



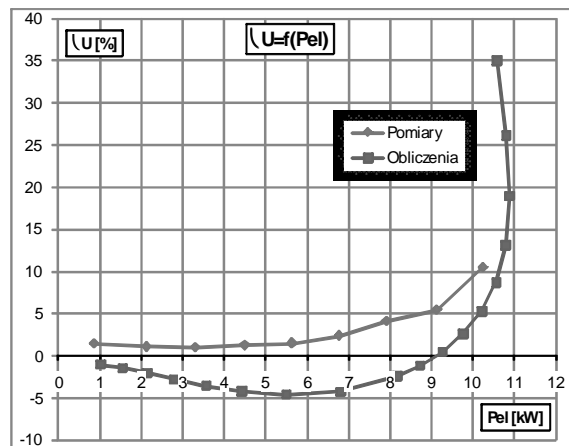
Rys. 10. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów laboratoryjnych charakterystyki obciążenia maszyny dla $\cos\varphi=1$



Rys. 11. Zestawienie charakterystyk sprawności prądnicy dla $\cos\varphi=1$

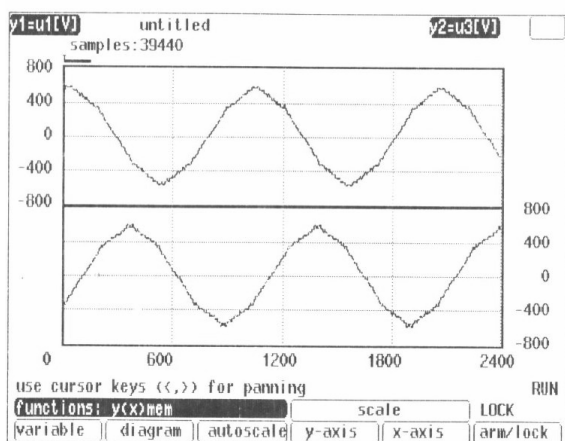


Rys. 12. Zestawienie obliczeń i pomiarów laboratoryjnych prądu obciążenia w funkcji mocy wyjściowej prądnicy dla $\cos\varphi=1$



Rys. 13. Zestawienie obliczeń i pomiarów laboratoryjnych zmienności napięcia wyjściowego prądnicy dla obciążenia czynnego ($\cos\varphi=1$)

Na rysunku 14 przedstawiono oscylogramy napięć z pomiarów laboratoryjnych.



Rys. 14. Kształt indukowanego napięcia w prądniczy z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Omawiana prądnicza z magnesami trwałymi została zaznamionowana na moc 9 kW. Z obliczeń wynikało, że przy tak zaprojektowanym obwodzie elektromagnetycznym zmienność napięcia przy 9 kW będzie oscylowała przy wartości 0%. Natomiast wyniki badań laboratoryjnych wykazały (rysunek 13), że zmienność napięcia w tym punkcie pracy niewiele przekracza 5%, co potwierdza przyjęte założenia zmienności napięcia do 8%.

Głównym powodem rozbieżności obliczeń zmienności napięcia w stosunku do wyników pomiarów, są parametry schematu zastępczego, a dokładniej wartości reaktancji w osi podłużnej i poprzecznej (X_d , X_q). W zestawieniu obliczeń i pomiarów (rysunek 8) wartości te różniły się, co miało bezpośredni wpływ na obliczenie niższej niż jest w rzeczywistości wartości zmienności napięcia.

Analizując dalsze wyniki pomiarów i obliczeń zauważamy dużą ich zgodność. Szczegóły tych zestawień przedstawiają charakterystyki zamieszczone na rysunkach od 8 do 12. Nieznaczne rozbieżności pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych a obliczeniami wynikają przede wszystkim z:

1. rozbieżności parametrów magnesów, które w rzeczywistości mogą być inne niż założono w projekcie; wpływa to np. na napięcie biegu jałowego,
2. temperatury pracy, która mocno wpływa na charakterystykę magnesów, co w konsekwencji przekłada się na charakterystyki zewnętrzne prądniczy,
3. charakterystyki magnesowania blachy,

4. tolerancji wykonania modelu fizycznego, które sumują się w szczelinie powietrznej i powodują jej nierównomierność.

Osiągnięcie niskiej zmienności napięcia wyjściowego prądniczy w zależności od prądu obciążenia na poziomie do 5% (założenia do 8%) jest kolejnym dobrym krokiem w celu kształtowania charakterystyk zewnętrznych prądnic z magnesami trwałymi.

Pomimo powyższych zalet konstrukcja prądniczy dwubiegunowej z magnesami trwałymi, jak wykazały pomiary laboratoryjne, charakteryzuje się dużą zawartością harmonicznym w napięciu indukowanym na biegu jałowym. Dla napięcia fazowego zawartość THD osiąga wartość ok. 7%, natomiast dla napięcia międzyprzewodowego wartość ta zbliżona jest do 5%. Dla ograniczenia zawartości harmonicznym w napięciu indukowanym można odpowiednio zaprojektować uzwojenie stojana, np. uzwojenie skrócone lub skorygować kształt wirnika prądniczy.

Patrząc jednak przez pryzmat przepisów [10], [11] obowiązujących w Polsce zawartość THD sięgająca nawet 7% jest wartością dopuszczalną.

Literatura

- [1]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 2002 r.
- [2]. J. Bernatt, S. Gawron, E. Król: *Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi*. Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2008.
- [3]. Glinka T.: *Autonomiczne elektrownie wiatrowe*. Materiały konferencyjne II Ogólnopolskiej Konferencji ETW 2004, Wyd. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2004.
- [4]. J. Bernatt, S. Gawron, E. Król: *Małe przydomowe elektrownie wiatrowe – doświadczenia z budowy i eksploatacji*, Czysta Energia 01/2005.
- [5]. Rossa R., Król E.: *Modern electric machines with permanent magnet*. Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2008, ss. 12-17.
- [6]. S. Gawron: *Prądnicze synchroniczne z magnesami trwałymi o niskiej zmienności napięcia wyjściowego*, XLV International Symposium on Electrical Machines - Krańcizyn 2009, Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych, Nr 84/2009, str. 137-141.
- [7]. Thelin P., Soulard J., Nee H.P., Sadarangani C.: *Comparison between Different Ways to Calculate the Induced No-Load Voltage of PM Synchronous Motors using Finite Element Methods*, PEDS'01, Bali, Indonesia, Oct. 2001.

- [8]. Jeziński E. : *Maszyny synchroniczne*, Warszawa, PWT 1951.
- [9]. Głowacki A.: *Obliczenia elektromagnetyczne silników indukcyjnych trójfazowych*. WNT, Warszawa 1993.
- [10]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji § 34.3 (Dz. U. 2 poz. 5 i 6).
- [11]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego § 38.3 (Dz. U. 93 poz. 623).

Praca naukowa finansowana jest ze środków na naukę na lata 2010-2012 jako projekt badawczy.

The research results published in this paper have been obtained under the financial support in 2010- 2012 as a scientific grant from Polish government.

Autorzy

Dr inż. Jakub Bernatt
e-mail: jakub.bernatt@komel.katowice.pl
Mgr inż. Stanisław Gawron
e-mail: s.gawron@komel.katowice.pl
BOBRME Komel,
Al. Roździeńskiego 188,
40-203 Katowice
tel. (032) 258-20-41

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk