

**Adam Gozdowiak, Piotr Kisielewski**  
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

## SKŁADOWA PRZECIWIWA PRĄDU STOJANA TURBOGENERATORA

### NEGATIVE SEQUENCE OF THE TURBOGENERATOR STATOR CURRENT

**Streszczenie:** Prezentowany artykuł zawiera wyniki symulacyjne wyznaczonych reaktancji oraz rezystancji składowej przeciwnej turbogeneratora. Wyniki uzyskano przy wykorzystaniu modelu połowo-obwodowego turbogeneratora. Zbadano wpływ zarówno litej stali wirnika, jak i niemagnetycznych klinów na wartości prądów indukowanych w przewodzących częściach wirnika. Wyznaczono wpływ elementów konstrukcyjnych na straty powstające na skutek pojawienia się składowej przeciwnej prądu stojana.

**Abstract:** Presented article contains the simulation results of the turbogenerator negative sequence reactance and resistance. The results were obtained by using field-circuit model of the turbogenerator. The influences of solid steel rotor and nonmagnetic wedges in rotor slots on values of the eddy current were investigated. Additionally, the influence of two mentioned construction elements on the losses in the rotor due to negative sequence stator current was analyzed.

**Słowa kluczowe:** *składowa przeciwna, turbogenerator, metoda elementów skończonych*  
**Keywords:** *negative sequence, turbogenerator, finite element method*

#### 1. Wstęp

Obecnie turbogeneratory 2-biegunowe są projektowane na moce rzędu 1500 MVA. Podczas zakłócenia, w generatorach tych powstają znaczne straty w przewodzących częściach wirnika. Nawet przy poprawnie zaprojektowanym systemie chłodzenia, temperatura wirnika może być ograniczeniem dla maksymalnego obciążenia turbogeneratora. Wewnętrzne zjawiska w turbogeneratorze oraz wytrzymałość termiczna zastosowanych materiałów wpływają w znacznym stopniu na gabaryty maszyny.

Powierzchnia wirnika jest krytycznym miejscem, w którym występują dodatkowe straty na skutek pojawienia się składowej przeciwnej prądu stojana indukującej prądy o częstotliwości 100 Hz w klinach oraz litej stali wirnika.

Nasilenie skutków pojawienia się składowej przeciwnej zależy od rodzaju konstrukcji turbogeneratora. Duży przyrost temperatury w litej stali wirnika powoduje zmiany wymiarów w wyniku rozszerzalności cieplnej wprowadzając dodatkowe naprężenia mechaniczne.

Żłobki wirnika w turbogeneratorach 2-biegunowych są bardziej podatne na uelastycznienia w osi poprzecznej, niż w osi podłużnej. Istnieje zatem potrzeba zredukowania sztywności dużego zęba w celu uniknięcia nadmiernie wysokich drgań wywołanych różną sztywnością wirnika w obu osiach. Jedną z metod ograniczenia

tych drgań jest wycięcie wąskiej szczeliny poprzecznej w dużym zębie w jednakowych odstępach wzdłuż długości wirnika. Niestety takie rozwiązanie przyczynia się do znacznej gęstości prądu indukowanego w litej stali wirnika w przestrzeni między końcem cięcia, a pierwszym żłobkiem wirnika [1, 2]. Gęstość prądu indukowanego w dużym zębie może zostać zredukowana poprzez zastosowanie wysoko wytrzymałych, wysoko konduktywnych klinów niemagnetycznych w dużym zębie wirnika. Kliny w dużym zębie wraz z klinami przytrzymującymi żłobki wirnika tworzą klatkę, która ekranuje żelazo wirnika przed wnikaniem do niego strumienia powstałego na skutek pojawienia się składowej przeciwnej prądu stojana. Dodatkowo poprawnie zaprojektowana i wykonana klatka tłumiąca zabezpiecza przed przegrzaniem zarówno kołpaka, jak i połączeń czołowych uzwojenia wirnika. Brak klatki skutkuje brakiem ekranowania wirnika, a tym samym prądy indukowane zamykają się przez stal wirnika oraz kołpak, przyczyniając się do nadmiernego wzrostu temperatury oraz skrócenia żywotności elementów konstrukcyjnych wirnika. Odpowiedni dobór klatki tłumiącej w czasie projektowania turbogeneratora stanowi kompromis pomiędzy uzyskaniem odpowiedniej elastyczności beczki wirnika, przy jednocze-

snym wykorzystaniu możliwie najwięcej materiału magnetycznego (litej stali) w celu uniknięcia zwiększenia prądu wzbudzenia magnesującego rdzeń.

W artykule wyznaczono symulacyjnie reaktancję  $X_2$  oraz rezystancję  $R_2$  składowej przeciwnej badanego turbogeneratora. Otrzymane wyniki przyrównano do pomiarów. Następnie symulacyjnie wyznaczono wpływ litej stali wirnika oraz niemagnetycznych klinów na wartość strat w wirniku spowodowanych powstaniem składowej przeciwnej prądu stojana.

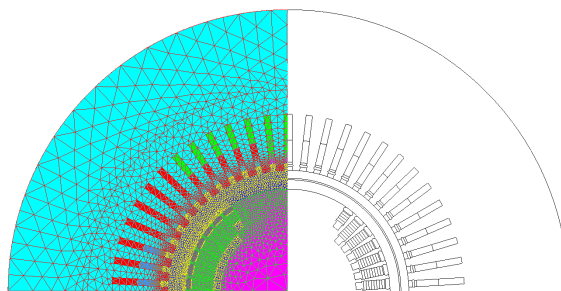
## 2. Model turbogeneratora

Badaną maszyną był turbogenerator 2-biegowy, posiadający 54 żłobki na stojanie i uzwojenie połączone w dwie gałęzie równoległe. Podstawowe parametry zostały zamieszczone w tabeli 1.

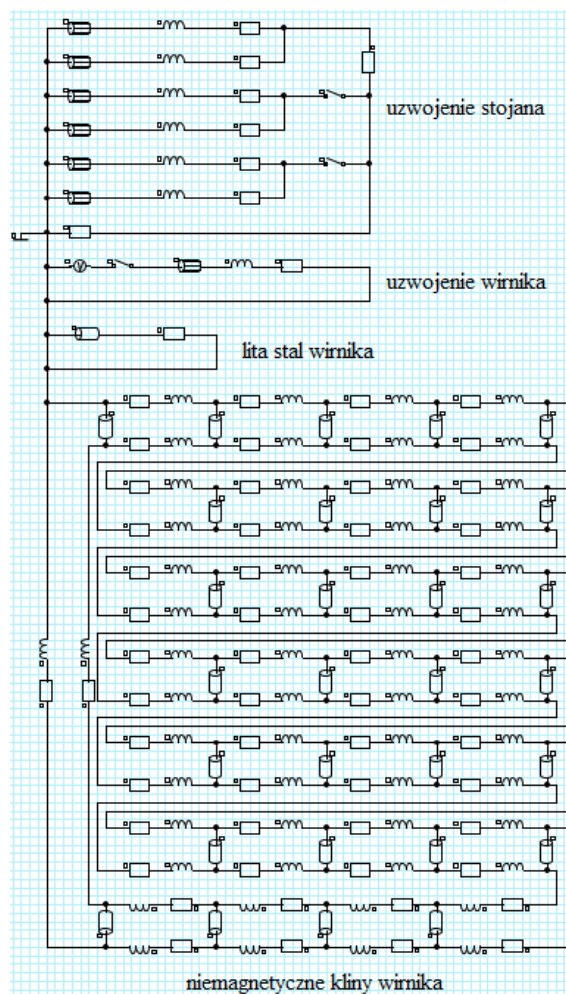
Tab. 1. Dane znamionowe badanego turbogeneratora

Symbol	Wartość	Jednostka
$S_N$	500	MVA
$U_{SN}$	21	kV
$I_{SN}$	13,75	kA
$\cos\varphi_N$	0,80	-
$I_{FN}$	4,50	kA
$n_N$	3000	obr/min
$M_N$	1,273	MNm

Dwuwymiarowy model symulacyjny składa się z dwóch części, połowej oraz obwodowej. W części połowej uwzględniono rzeczywisty rozkład uzwojeń rozłożonych w żłobkach stojana i wirnika oraz obwody tłumiące w postaci niemagnetycznych klinów wirnika wykonanych z miedzi. Oprócz uwzględnienia nieliniowości charakterystyk magnesowania rdzeni stojana i wirnika, uwzględniono również zjawisko wypierania prądu w klinach wirnika oraz prądy wirowe indukowane w litej stali wirnika. Pominięto natomiast zjawisko wypierania prądu w uzwojeniach stojana i wirnika oraz prądy wirowe w pakiecie blach stojana. Model połowy pokazuje rysunek 1. Model połowy w czasie obliczeń był sprzęgnięty z modelem obwodowym zawierającym elementy skupione, reprezentujące uzwojenia i obwody znajdujące się w części połowej oraz rezystancje i indukcyjności połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika oraz klinów wirnika.



Rys. 1. Połowa modelu połowego turbogeneratora



Rys. 2. Model obwodowy turbogeneratora

## 3. Wyniki obliczeń

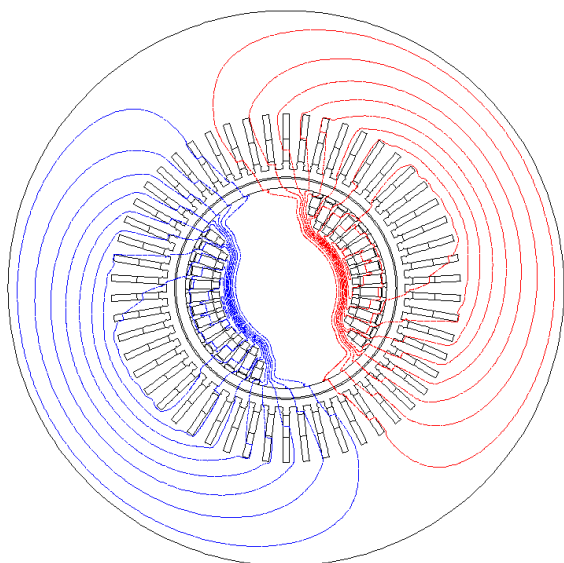
Na podstawie zweryfikowanego pomiarowo modelu turbogeneratora zostały obliczone reaktancje i rezystancje składowej przeciwnej. Dodatkowo zostały przedstawione linie stałego potencjału magnetycznego oraz rozkład gęstości prądów w przewodzących częściach wirnika. Obliczenia zostały wykonane w programie FLUX, przy wykorzystaniu modułu transient. Wszystkie symulacje zostały wykonane w tych samych warunkach, tj. przy stałej wartości prą-

du wzbudzenia oraz przy stałej prędkości obrotowej.

### 3.1. Weryfikacja modelu turbogenerators przy zastosowaniu rzeczywistej klatki tłumiącej

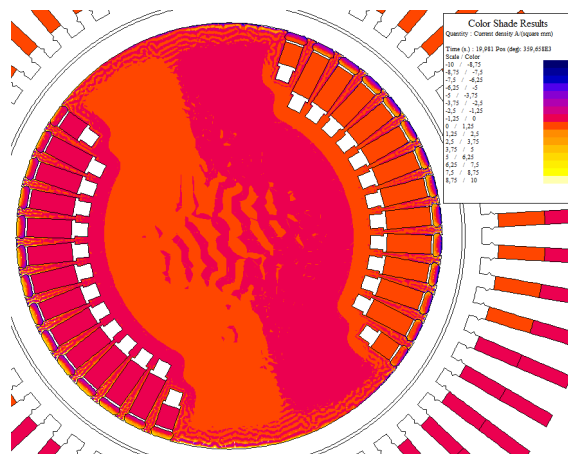
W badanym turbogeneratorze klatkę tłumiącą wirnika stanowiły kliny niemagnetyczne przytrzymujące uzwojenie wirnika w żłobku oraz lita stal. Według normy [3] oraz wytycznych przedstawionych w literaturze [4], pomiar reaktancji składowej przeciwnej jest wykonywany podczas próby zwarcia dwufazowego uzwojenia stojana, przy jednoczesnym zasilaniu uzwojenia wirnika prądem o takiej wartości, która podczas biegu jałowego powoduje wyindukowanie napięcia nie przekraczającego  $0,2U_N$ . Przykładowy przebieg zachowania się turbogenerators przyłączonego do SEE w czasie zwarcia dwufazowego został zaprezentowany w [5].

Na rysunku 3 przedstawiono linie potencjału magnetycznego podczas zwarcia dwufazowego. Największa gęstość indukowanych prądów w wirniku jest w klinach oraz na powierzchni wirnika w dużym zębie, co ilustruje rysunek 4.



Rys. 3. Linie stałego potencjału magnetycznego podczas zwarcia dwufazowego w badanym turbogeneratorze

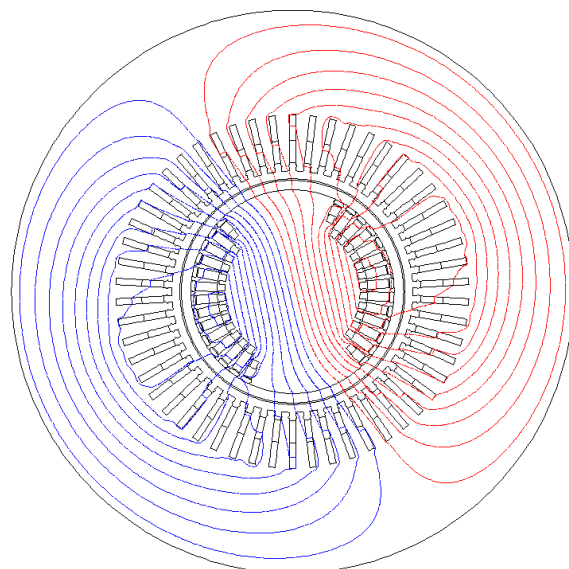
Wyznaczona reaktancja składowej przeciwnej różniła się od pomiarów o 7,8%, natomiast rezystancja składowej przeciwnej o 6,9%.



Rys. 4. Rozkład gęstości prądów wirnika podczas zwarcia dwufazowego w badanym turbogeneratorze

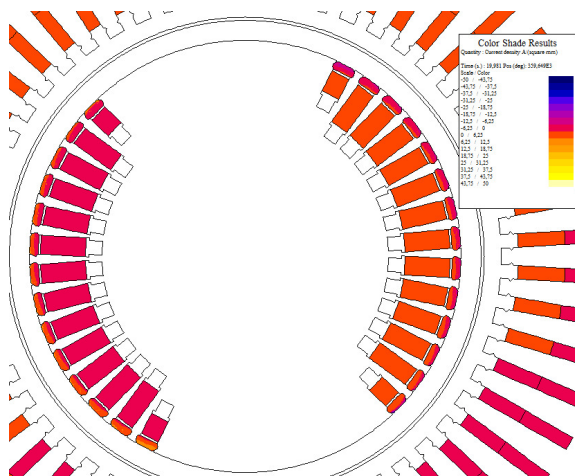
### 3.2. Wpływ niemagnetycznych klinów na straty w wirniku

Analizie poddano wirnik, w którym wyeliminowano możliwość indukowania się prądów w litej stali. W ten sposób zbadano wpływ klinów wirnika na straty powstające podczas stanów nieustalonych wywołujących powstanie składowej przeciwnej prądu stojana. Na rysunku 5 przedstawiono linie potencjału magnetycznego przy eliminacji prądów indukowanych w stali wirnika.



Rys. 5. Linie stałego potencjału magnetycznego podczas zwarcia dwufazowego bez udziału stali wirnika

Rysunek 6 ilustruje rozkład gęstości indukowanych prądów w niemagnetycznych klinach wirnika. Prąd indukowany w klinach jest o 275% większy niż w przypadku uwzględnienia możliwości indukowania prądów w stali wirnika.



Rys. 6. Rozkład gęstości prądów wirnika podczas zwarcia dwufazowego bez udziału stali wirnika

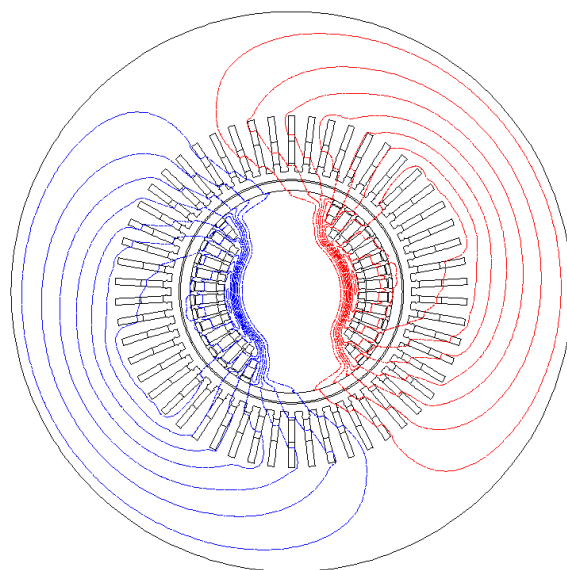
Wyznaczona  $X_2$  jest większa o 66%, natomiast  $R_2$  o 283% od wartości wyznaczonych dla zastosowanej konstrukcji badanego turbogeneratora.

### 3.3. Wpływ litej stali wirnika na straty w wirniku

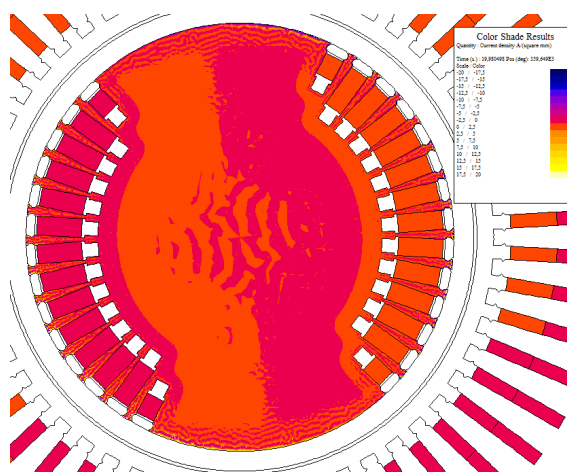
Analizie poddano przypadek, w którym wyeliminowano możliwość indukowania się prądów w niemagnetycznych klinach wirnika, w celu zaobserwowania wpływu samej litej stali wirnika na straty od prądów indukowanych na skutek pojawienia się składowej przeciwnej prądu stojana.

Na rysunku 7 przedstawiono linie potencjału magnetycznego przy eliminacji prądów indukowanych w niemagnetycznych klinach wirnika. Natomiast rysunek 8 ilustruje rozkład gęstości indukowanych prądów w litej stali wirnika.

Wyznaczona  $X_2$  jest większa o 0,95%, natomiast  $R_2$  o 5,1% od wartości wyznaczonych dla zastosowanej konstrukcji badanego turbogeneratora.



Rys. 7. Linie stałego potencjału magnetycznego podczas zwarcia dwufazowego bez udziału niemagnetycznych klinów wirnika



Rys. 8. Rozkład gęstości prądów wirnika podczas zwarcia dwufazowego bez udziału niemagnetycznych klinów wirnika

## 4. Wnioski

Niedokładność wyznaczonej wartości reaktancji oraz rezystancji składowej przeciwnej badanego turbogeneratora w próbie zwarcia dwufazowego może wynikać z niedokładności odzwierciedlenia rezystancji oraz indukcyjności elementów zawierających kliny wirnika oraz rezystywności litej beczki wirnika. W tabeli 2 zamieszczono wyznaczone wartości  $X_2$  oraz  $R_2$  dla przeprowadzonych symulacji zaprezentowanych w podrozdziałach 3.1 - 3.3.

Tab. 2. Wyznaczone wartości reaktancji i rezystancji składowej przeciwnej

	$X_2$ [j. w.]	$R_2$ [j.w.]
Pomiar	0,30	0,04
Obliczenia symulacyjne przy rzeczywistej klatce	0,27	0,03
Obliczenia symulacyjne przy pominięciu indukcji prądów w litej stali wirnika	0,46	0,14
Obliczenia symulacyjne przy pominięciu indukcji prądów w niemagnetycznych klinach	0,28	0,04

Zaprezentowane wyniki pokazują istotny wpływ litej stali wirnika na ograniczenia strat w wirniku w stanach nieustalonych wywołujących powstanie składowej przeciwnej prądu stojana.

## 5. Literatura

- [1]. Jianyang D., Xubiao L., Feng L., Shiyou Y., Guangzheng N.: *Negative Sequence Eddy Current Field Analysis of a 1055 MVA Turbogenerator by using 3D finite element methods*, IEEE, Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005,
- [2]. Riley C. P.: *Negative sequence losses in turbine generator rotors*, Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference,
- [3]. IEC60034-4 Part 4: *Methods for determining synchronous machine quantities from tests*,
- [4]. Latek W.: *Maszyny elektryczne w przemyśle*, WNT, Warszawa 1979,
- [5]. Kisielewski P., Antal L.: *Praca turbogeneratorsa podczas zwarcia dwufazowego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 02b, 2013,
- [6]. Jack A. G., Stoll R. L.: *Negative-sequence currents and losses in the solid rotor of a turbogenerator*, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, 1980,
- [7]. Neidhoefer G. J., Bose B. N.: *Negative-sequence losses in solid rotors of turbo-generators and equivalent wave resistance*, Power Apparatus and Systems, 1975.

## Autorzy

mgr inż. Adam Gozdowiak  
 dr inż. Piotr Kisielewski  
 Politechnika Wrocławska  
 Katedra Maszyn, Napędów  
 i Pomiarów Elektrycznych  
 ul. Smoluchowskiego 19; 50-372 Wrocław  
 adam.gozdowiak@pwr.edu.pl  
 piotr.kisielewski@pwr.edu.pl