

**Dariusz Gurazdowski, Jan Zawilak**  
**Politechnika Wroclawska, Wroclaw**

## **WPLYW PRZEPLOTU NA STRATY DODATKOWE OD PRĄDÓW WIROWYCH W PRĘCIE STOJANA TURBOGENERATORA**

### **THE INFLUENCE OF ROEBEL STRANDS TRANSPOSITION ON EDDY CURRENT LOSSES OF THE TURBOGENERATOR STATOR WINDING BAR**

**Abstract:** The paper presents the theoretical description of the eddy current losses of the stator-winding bar for the turbogenerator slot part as well as the calculation results of these losses for bars with the specific strands Roebel transposition. The application computational model takes into consideration magnetic coupling within as well as slot part (ferromagnetic environment) and overhangs part (non-magnetic environment). The calculation results are presented for three following transposition types: 0+360+0, 0+540+0, 90+360+90. It was showed the split of bars for strands columns and calculation method of additional losses in any strand in any column. The complete calculation makes it possible to perform by software "Bar". The computations were made for selected type of turbogenerator with indirectly cooled system and power 450 MVA. The top and bottom bar of stator winding consists of 136 strands that are arranged in 2 columns.

#### **1. Wstęp**

Uzwojenia maszyn dużych mocy wykonuje się w postaci wiązki odizolowanych, równoległych przewodów elementarnych połączonych skuwkami w strefie połączeń czołowych. Dzięki takiemu podziałowi zmniejsza się straty energii wywoływane prądami wirowymi występującymi w obrębie pojedynczego pręta. Jeśli przewody elementarne znajdują się w różnych warunkach magnetycznych to powstają prądy cyrkulacyjne o torach zamykających się przez sąsiednie, połączone na końcach, przewody elementarne.

Celem niniejszej pracy jest określenie strat dodatkowych od prądów wirowych w strefie żłobkowej uzwojenia stojana turbogeneratora dla zadanego przeplotu Roebela [1,2,3,4]:

- przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0+360+0,
- przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0+540+0,
- przeplot w strefie żłobkowej i czołowej typu 90+360+90.

#### **2. Metoda Obliczeń**

##### **2.1 Schemat zastępczy**

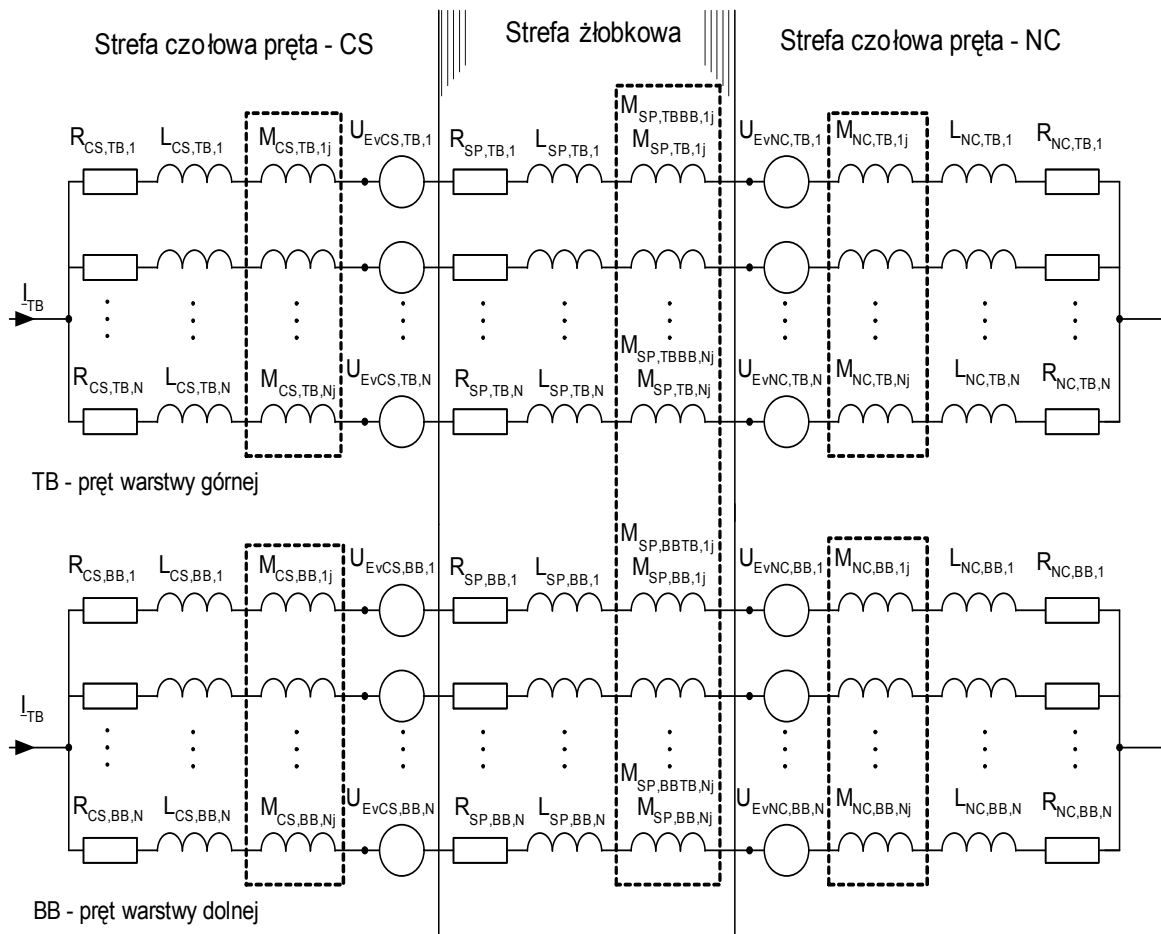
Obliczenia strat dodatkowych w pręcie warstwy górnej i dolnej wykonano za pomocą programu komputerowego „Bar”<sup>1)</sup>.

W tym celu zbudowano model matematyczny określający sprzężenia magnetyczne przewodów elementarnych w strefie żłobkowej (środowisku ferromagnetycznym) i w strefie czołowej (środowisku niemagnetycznym). Wykorzystano do tego „metodę przewodów elementarnych”, która traktuje pręt w żłobku jak sieć elektryczną o „n” gałęziach równoległych powiązanych wzajemnie sprzężeniami magnetycznymi [5,8]. Liczba gałęzi równoległych odpowiada liczbie przewodów elementarnych pręta.

Schemat zastępczy modelu matematycznego opisującego sprzężenia magnetyczne przewodów elementarnych pręta warstwy dolnej i górnej uzwojenia stojana oraz oddziaływanie strefy czołowej turbogeneratora przedstawiono na rysunku 1. W schemacie tym przyjęto następujące oznaczenia:

- TB – pręt warstwy górnej uzwojenia,
- BB – pręt warstwy dolnej uzwojenia,
- CS – strefa czołowa uzwojenia po stronie nie-napędowej maszyny (connection side),
- NC – strefa czołowa uzwojenia po stronie napędowej maszyny (nonconnection side),
- SP – strefa żłobkowa maszyny (slot part),
- Ev – napięcie dodatkowe strefy czołowej (external voltage).

1) - Program „Bar” opracowano w ramach prac nad rozprawą doktorską jednego ze współautorów.



Rys. 1. Schemat zastępczy pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana turbogeneratora

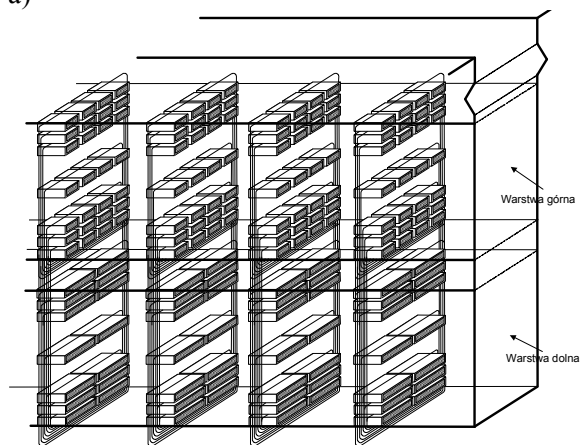
Na podstawie schematu zastępczego określono równania napięciowe i prądowe, pozwalające wyznaczyć prądy w każdym przewodzie elementarnym pręta uzwojenia stojana turbogeneratora [3].

## 2.2 Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia

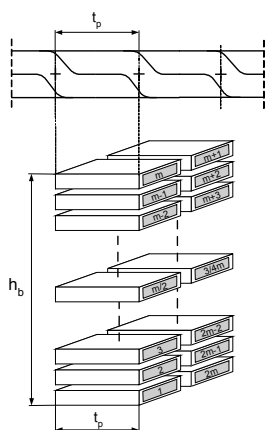
Do wyznaczenia poszczególnych strat w przecię z przeplotem przewodów elementarnych podzielono go wzdłuż długości strefy żłobkowej na „słupki przewodów elementarnych” (rys. 2). Długość każdego słupka odpowiada podziałce transpozycji pręta. Na podstawie rozplywu prądów w przewodach elementarnych obliczono straty na długości każdego słupka, uzyskując rozkład strat wzdłuż wysokości pręta.

Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta można wyznaczyć za pomocą współczynnika wzrostu rezystancji zwanego współczynnikiem Fielda  $k_r$ , [6,7,9,10].

a)



b)



Rys. 2. Pręt uzwojenia stojana turbogeneratora: a) podział na słupki przewodów elementarnych, b) podział na przewody elementarne ( $t_p$  – podziałka transpozycji,  $h_b$  – wysokość pręta,  $m$  – liczba przewodów w kolumnie)

Strumień rozproszenia skierowany prostopadle do boku pręta wywołuje przepływ prądów wirowych zamykających się w strefie żłobkowej uzwojenia. Współczynnik Fielda  $p$ -tej warstwy przewodów elementarnych, uwzględniający zwiększenie strat wskutek wypierania prądu w przewodach, dla prądu przemiennego wynosi [6,7,10]:

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + p(p-1)\psi(\xi) \quad (1)$$

gdzie:

$\xi$  – zredukowana wysokość pręta

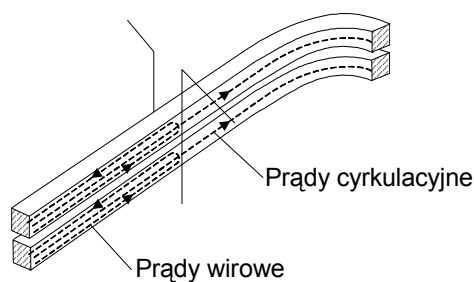
$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\operatorname{sh}(2\xi) + \sin(2\xi)}{\operatorname{ch}(2\xi) - \cos(2\xi)} \quad (2)$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{\operatorname{sh}(\xi) - \sin(\xi)}{\operatorname{ch}(\xi) + \cos(\xi)} \quad (3)$$

Dla  $m$  warstw przewodów elementarnych na wysokości żłobka wartość średnia współczynnika Fielda wynosi [6,7,10]:

$$k_r = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi) \quad (4)$$

Ponieważ przewody elementarne w uzwojeniu stojana są połączone równolegle, więc oprócz prądów wirowych mogą się pojawić także prądy cyrkulacyjne (rys. 3). Prądy te zamykają się przez sąsiednie przewody elementarne, płynąc zarówno w części żłobkowej, jak i czołowej maszyny. Wyrażenie (4) określające współczynnik wzrostu rezystancji nie uwzględnia przepływu prądów cyrkulacyjnych wywołanych strumieniem rozproszenia żłobkowego i czołowego.



Rys. 3. Prądy wirowe i cyrkulacyjne w przecie uzwojenia stojana

Dlatego, jeżeli w poszczególnych warstwach żłobka przepływają prądy o różnej wartości i różnym przesunięciu fazowym, to współczynnik wzrostu rezystancji (4)  $p$ -tej warstwy przewodów elementarnych wyniesie według Emdego [10]:

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + \frac{I_u^2 + I_p I_u \cos \gamma}{I_p^2} \psi(\xi) \quad (5)$$

gdzie:

$I_p$  – sumaryczny przepływ rozpatrywanej  $p$ -tej warstwy przewodów,

$I_u$  – sumaryczny przepływ pod tą warstwą do dna żłobka,

$\gamma$  – kąt przesunięcia fazowego między  $I_p$  i  $I_u$

Po przekształceniu, wyrażenie (5) ma postać [9]:

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + \frac{I_{wR}^2 + I_{wI}^2 - I_{wR} I_{pR} - I_{wI} I_{pI}}{I_p I_p^*} \psi(\xi) \quad (6)$$

gdzie:

$$I_{pR} = \operatorname{Re}\{I_p\}; \quad I_{pI} = \operatorname{Im}\{I_p\}$$

$I_{wR}$  – sumaryczny przepływ od dna żłobka do rozpatrywanej  $p$ -tej warstwy.

$$I_w = \sum_{i=1}^p I_i; \quad I_{wR} = \operatorname{Re}\{I_w\}; \quad I_{wI} = \operatorname{Im}\{I_w\}$$

Wyznaczając współczynnik wzrostu rezystancji (6) dla poszczególnych warstw pręta, można obliczyć straty od prądów wirowych w  $i$ -tym przewodzie elementarnym  $k$ -tego słupka:

$$P_{ec(i,k)} = P_{bcc(i,k)}(k_{r(i,k)} - 1) \quad (7)$$

gdzie:

$k_{r(i,k)}$  – współczynnik wzrostu rezystancji w  $i$ -tym przewodzie elementarnym  $k$ -tego słupka.

$P_{bcc(i,k)}$  – straty podstawowe oraz straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych w  $i$ -tym przewodzie elementarnym  $k$ -tego słupka,

Straty dodatkowe ( $P_{ec}$ ) od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prosto-

padłym do boku pręta w strefie żłobkowej uzwojenia są sumą strat dodatkowych poszczególnych przewodów elementarnych ( $P_{ec(i,k)}$ ):

$$P_{ec} = \sum_{k=1}^w \left( \sum_{i=1}^n P_{ec(i,k)} \right) \quad (8)$$

### 3. Wyniki obliczeń dla różnych typów przepływu przewodów elementarnych

Straty w pręcie obliczono osobno dla każdego przewodu elementarnego w słupku. Suma tych strat stanowi całkowite straty dodatkowe od prądów wirowych w strefie żłobkowej pręta.

Pręt górny i dolny podzielono na 136 słupków. Obliczenia wykonano w programie Bar dla turbogeneratorsa o pośrednim systemie chłodzenia, obciążonego mocą 450 MVA.

W uzwojeniu stojana zastosowano trzy różne przepływy Roebela: 0+360+0, 0+540+0, 90+360+90.

Straty w prętach obu warstw obliczono dla wybranego żłobka numer 3 (pręty należą do tej samej fazy) i 8 (pręty w żłobku należą do różnych faz). W obliczeniach założono, że temperatura pręta górnego i dolnego wynosi 95 °C i jest stała na całej długości strefy żłobkowej uzwojenia stojana.

W tabeli 1 przedstawiono współczynniki strat dodatkowych  $k_r$  od prądów wirowych w prętach warstwy dolnej i górnej. Dla wszystkich badanych typów przepływu wartość tego współczynnika jest znacznie mniejsza w pręcie dolnym niż w górnym. Zjawisko to występuje dla obydwu obliczanych żłobków (3 i 8).

W warstwie górnej wydzielane są większe straty niż w warstwie dolnej. Współczynnik strat ( $k_r$ ) osiąga najniższą wartość dla przepływu 0+360+0. W pręcie dolnym wynosi 1,127 dla żłobka 3 i 8, a w górnym 1,828 dla żłobka 3 i 1,645 dla żłobka 8. Największą wartość  $k_r$  uzyskano dla przepływu 90+360+90.

Tabela 1.

Współczynnik strat od prądów wirowych

Przeplot	$k_r$			
	żłobek 3		żłobek 8	
	BB	TB	BB	TB
0+360+0	1,127	1,828	1,127	1,645
0+540+0	1,138	1,947	1,137	1,753
90+360+90	1,158	2,072	1,158	1,842

BB – pręt warstwy dolnej (bottom bar)

TB – pręt warstwy górnej (top bar)

Mimo, iż dla przepływu 0+360+0 wyznaczono najniższy współczynnik  $k_r$ , wartość strat dodatkowych  $P_{ec}$  jest największa. Dla pręta dolnego wynosi 0,301 kW w żłobku 3 i 0,306 kW w żłobku 8, a dla pręta górnego 2,264 kW w żłobku 3 i 1,820 kW w żłobku 8. Przeplot 0+360+0 posiada najmniejsze w stosunku do pozostałych badanych przepływu właściwości kompensacji prądów cyrkulacyjnych. Stąd, rozkład gęstości prądu jest bardzo nierównomierny wzdłuż wysokości pręta, powodując większe dla tego przepływu straty od prądów wirowych. Najbardziej korzystny rozkład gęstości uzyskuje się dla przepływu 90+360+90. Wartość strat od prądów wirowych ( $P_{ec}$ ) dla tego przepływu jest najmniejsza.  $P_{ec}$  dla pręta dolnego wynosi 0,276 kW w żłobku 3 i 0,306 kW w żłobku 8, a dla pręta górnego 2,264 kW w żłobku 3 i 1,820 kW w żłobku 8.

Wartość strat od prądów wirowych w pręcie górnym jest kilka razy większa niż w pręcie dolnym. W żłobku 3 straty  $P_{ec}$  są większe o około 7 razy. Natomiast w żłobku 8 około 6 razy dla przepływu 0+360+0 i 5,5 razy dla przepływu 0+540+0 i 90+360+90.

Zajwisko to wynika z nierównomiernych warunków magnetycznych w jakich znajdują się przewody elementarne pręta warstwy górnej i dolnej.

Tabela 2.

Straty od prądów wirowych

Przeplot	$P_{ec}$ [kW]			
	żłobek 3		żłobek 8	
	BB	TB	BB	TB
0+360+0	0,306	2,264	0,301	1,820
0+540+0	0,294	2,072	0,295	1,618
90+360+90	0,276	1,987	0,275	1,564

BB – pręt warstwy dolnej (bottom bar)

TB – pręt warstwy górnej (top bar)

Straty od prądów wirowych w pręcie warstwy górnej mają duży wpływ na temperaturę w uzwojeniu stojana w strefie żłobkowej maszyny. Stanowią one od 35% do 43% strat całkowitych  $P_t$  w tej strefie. W tabeli 3 przedstawiono straty całkowite w pręcie w obszarze strefy żłobkowej.

Dla przepływu 0+360+0 straty dodatkowe  $P_{ec}$  w pręcie warstwy górnej stanowią 40% strat całkowitych  $P_t$  dla żłobka 3 i 35% dla żłobka 8. Natomiast dla przepływu 0+540+0 wynoszą 43%

dla żłobka 3 i 37% dla żłobka 8. Przy przeplocie 90+360+90 jest to 45% dla żłobka 3 i 39% dla żłobka 8.

Tabela 3.

Całkowite straty w pręcie w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana

Przeplot	$P_t$ [kW]			
	żłobek 3		żłobek 8	
	BB	TB	BB	TB
0+360+0	2,761	5,593	2,701	5,233
0+540+0	2,470	4,854	2,493	4,360
90+360+90	2,062	4,434	2,062	4,015

BB – pręt warstwy dolnej (bottom bar)

TB – pręt warstwy górnej (top bar)

Straty od prądów wirowych  $P_{ec}$  w pręcie warstwy dolnej strefy żłobkowej są niewielkie i stanowią od 11% do 15% strat całkowitych  $P_t$  w tej strefie. Mają one niewielki wpływ na rozkład temperatur w uzwojeniu i są mało znaczące przy doborze odpowiedniego przepłotu przewodów elementarnych.

#### 4. Wnioski

Na podstawie wykonanych obliczeń można wskazać typ przepłotu przewodów elementarnych, w którym występują najmniejsze straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta. Najmniejszą wartość strat uzyskano dla przepłotu 90+360+90 (tabela 2).

Zmiana przepłotu Roebela powoduje zarówno zmianę strat dodatkowych od prądów wirowych jak i cyrkulacyjnych (różne położenie przewodów elementarnych na wysokości pręta).

Przedstawione wyniki dla trzech typów przepłotu wskazują, że straty w pręcie warstwy górnej mają największy procentowy udział w stratach całkowitych danego pręta w obszarze strefy żłobkowej. Natomiast straty dodatkowe pręta dolnego są niewielkie w stosunku do strat całkowitych w tej warstwie.

W praktyce największy wpływ na rozkład temperatur w uzwojeniu stojana turbogenerators mają straty pręta górnego. Dąży się do minimalizacji tych strat poprzez odpowiedni dobór przepłotu przewodów elementarnych. Przedstawiona w pracy metoda umożliwia ich obliczenie w prętach uzwojenia stojana turbogenerators dla różnych typów przepłotu Roebela.

#### 5. Literatura

- [1]. Dąbrowski M., *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa, 1994.
- [2]. Gurazdowski D., Zawilak J., *Wpływ przepłotu przewodów elementarnych na strumień skojarzony z prętem turbogenerators*. W: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWr. 2003, 89–100, (Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 54).
- [3]. Gurazdowski D., Zawilak J., *Wpływ przepłotu przewodów elementarnych na rozkład gęstości prądu w pręcie turbogenerators*. W: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWr. 2005, 222–234, (Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 58).
- [4]. Haldeman J., *Untersuchung verschiedener Verdrillungsarten in Statorwicklungen großer Synchronmaschinen, deren Wirkung auf Strom- und Temperaturverteilung und Zusatzverluste in verschiedenen Betriebszuständen*. Zürich, 1997.
- [5]. Iseli M. A., *Zusatzverluste in Statorwicklungen grosser Synchronmaschinen unter Berücksichtigung der Verdrillung und der Stirnraumfelder*. Zürich, 1991.
- [6]. Latek W., *Turbogenerators*. WNT, Warszawa, 1973.
- [7]. Schuisky W., *Berechnung elektrischer Maschinen*, Wien, Springer-Verlag, 1960.
- [8]. Śliwiński T., Głowacki A., *Parametry rozruchowe silników indukcyjnych*. PWN, Warszawa, 1982.
- [9]. Traxler-Samek G., *Zusatzverluste im Stirnraum von Hydrogenerators mit Roebelstabwicklung*. Technischen Universität Wien, Mai, 2003.
- [10]. Turowski J., *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*. WNT, Warszawa, 1982.

#### Autorzy

Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław

e-mail: [dariusz.gurazdowski@pwr.wroc.pl](mailto:dariusz.gurazdowski@pwr.wroc.pl)  
[jan.zawilak@pwr.wroc.pl](mailto:jan.zawilak@pwr.wroc.pl)