

Roman Krok*, Paweł Pistelok**

***Politechnika Śląska, Gliwice**

****BOBRME Komel, Katowice**

OPTIMALIZACJA KONSTRUKCJI UZWOJEŃ STOJANÓW TURBOGENERATORÓW CHŁODZONYCH BEZPOŚREDNIO WODĄ

OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION OF TURBOGENERATORS STATORS WINDINGS WITH DIRECT WATER COOLING

Abstract: In the paper, three most often applied structural solutions of winding with direct water cooling are presented. The optimization procedure of these structural solutions is discussed. The objective functions which can be used in the procedure of optimization of these structural solutions are described. The drawings of three structural solutions and average rises of temperatures in the elementary wires of winding conductors for optimized structural solutions are presented. The results of optimization calculations which effected with optimal constructions of three water cooled winding types are listed in table 1. For the water-cooled winding construction type 1, the area of acceptable solutions with technical constrains taken into account is presented on a 3D graph. The attempt was taken to show the need for the use of optimization procedures in designing of direct water cooled windings.

1. Wstęp

W procesie projektowania dużych maszyn elektrycznych konieczne jest stosowanie symulacji komputerowych w celu poprawy własności i jakości oferowanego wyrobu oraz obniżenia kosztów produkcji. Uzwojenia chłodzone bezpośrednio wodą są najczęściej stosowane w dużych turbogeneratorach [5, 6, 7, 8], produkowanych zwykle w krótkich seriach, często przy uwzględnieniu specyficznych wymagań konkretnego klienta. Błędy przy projektowaniu tego typu maszyn powodują duże straty ekonomiczne producenta, nie wspominając już o utracie klientów oraz pozycji na rynku. Przy produkcji seryjnej maszyn elektrycznych małych i średnich mocy dokonuje się nieustannego ich doskonalenia na podstawie nabywanych doświadczeń. Przed opracowaniem nowej serii bardzo często wykonywane są badania na prototypach. Przy projektowaniu maszyn o dużych mocach znamionowych często jedynym, stosunkowo mało kosztownym, sposobem sprawdzenia poprawności opracowanych rozwiązań jest przeprowadzenie symulacji komputerowych. W fazie wykonywania projektów wykorzystywane są programy komputerowe: do optymalizacji konstrukcji, obliczeń elektromagnetycznych, cieplnych oraz mechanicznych. W przypadku dużych maszyn elektrycznych zwykle nie ma możliwości budowy prototypów i wykonywania przy ich pomocy badań sprawdzających z powodu bardzo wysokich kosztów.

2. Przedmiot optymalizacji

W pracy rozpatrywano trzy typy konstrukcji prętów uzwojeń stojanów turbogeneratorów chłodzonych bezpośrednio wodą - rys. 1, 4, 6. Dla każdego z nich opracowano model matematyczny, a następnie algorytm obliczeń i program komputerowy do optymalizacji konstrukcji.

3. Założenia optymalizacyjne

W artykule rozpatrzono przypadek projektowania nowego uzwojenia stojana przy modernizacji turbogeneratorsa. Zakres wykonywanych prac zazwyczaj nie obejmuje wymiany rdzenia. Wielkością zadaną przy projektowaniu prętów uzwojenia są zatem wymiary żłobka stojana, co przy określonej grubości izolacji (wynikającej głównie z napięcia znamionowego stojana) oznacza zadaną szerokość elementarnych przewodów drążonych i pełnych. Przy poszukiwaniu rozwiązania optymalnego zmiennymi decyzyjnymi są: liczba przewodów drążonych w przekroju poprzecznym pręta, liczba przewodów pełnych przypadających na jeden przewód drążony, stosunek wysokości przewodu pełnego do wysokości przewodu drążonego oraz grubość ścianki przewodu drążonego. Zbiór wartości wymienionych zmiennych decyzyjnych w sposób jednoznaczny określa konstrukcje rozpatrywanych typów prętów uzwojenia stojana. W przypadku chłodzenia bezpośredniego wodnego, zazwyczaj każdy zewzów uzwojenia stojana jest chłodzony

niezależnie, a w konsekwencji znajduje się w identycznych warunkach cieplnych. Tak więc model cieplny wystarczy sporządzić dla jednego zezwoju uzwojenia. Opracowując modele w postaci sieci cieplnych przyjęto następujące uproszczenia [1, 5]:

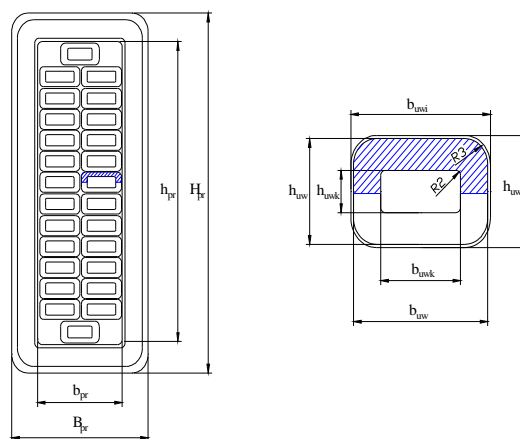
- ciepło właściwe medium chłodzącego i współczynniki oddawania ciepła na skutek konwekcji oraz przewodności cieplne właściwe materiałów konstrukcyjnych nie zależą od temperatury,
- pominięto strumień ciepła przepływający pomiędzy prętami uzwojenia a rdzeniem stojana (jako mało znaczący w porównaniu do strumienia ciepła odprowadzanego z przewodów drążonych do przepływającej w nich strugi wody).

Dla każdego rozpatrywanego rozwiązania konstrukcyjnego pręta uzwojenia stojana została opracowana sieć cieplna [5], którą następnie wykorzystano w obliczeniach optymalizacyjnych [1]. Obliczenia te wykonano dla znamionowego stanu pracy przykładowego turbogeneratora o mocy 200 MW, przy znamionowym prądzie stojana $I_n=8620$ A. Całkowity wydatek wody chłodzącej uzwojenie stojana wynosi $30 \text{ m}^3/\text{h}$, a temperatura wody na wypływie z chłodnicy wynosi 40°C . W procedurach optymalizacyjnych wykorzystano metodę gradientów sprzężonych. Programy komputerowe sporządzono w środowisku Mathcad.

4. Uzwojenie stojana z prętów typu 1

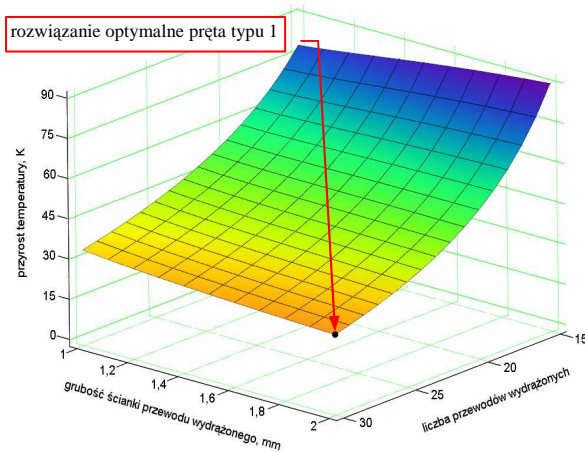
Wykorzystując utworzoną sieć cieplną dla uzwojenia stojana turbogeneratora o mocy 200 MW wykonanego z prętów typu 1 (rys. 1) została opracowana procedura optymalizacji. Zadanie poszukiwania rozwiązania optymalnego sprowadza się do minimalizacji jednej z następujących wielkości:

- 1) maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana,
- 2) przyrostu temperatury wody na spływie z prętów,
- 3) całkowitych straty mocy w uzwojeniu stojana,
- 4) średniej gęstości prądu stojana,
- 5) prędkości wody w elementarnych przewodach drążonych,
- 6) całkowitej masy miedzi uzwojenia stojana.

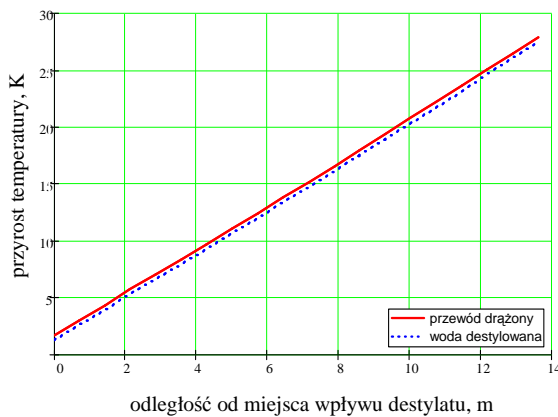


Rys. 1. Przekrój poprzeczny pręta uzwojenia stojana (z lewej) oraz wymiary elementarnego przewodu drążonego (z prawej) – rozwiązanie konstrukcyjne 1

Funkcje celu dla optymalizowanego rozwiązania konstrukcyjnego pręta mają dwie zmienne decyzyjne: N_d – liczba elementarnych przewodów drążonych, g_s – grubość ścianki elementarnego przewodu drążonego. Procedury optymalizacyjne wyszukują wartości zmiennych decyzyjnych dla których wybrana funkcja celu osiąga minimum, przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń technicznych – np. minimalna grubość ścianki przewodu drążonego umożliwiająca gięcie prętów i wykonanie przepleceń. Ponieważ funkcje celu stosowane przy optymalizacji prętów uzwojenia stojana typu 1 mają dwie zmienne decyzyjne, a zatem istnieje możliwość ich przedstawienia na wykresach 3D - rys.2. W procedurach optymalizacyjnych określono granice obszaru rozwiązań dopuszczalnych. Wynikają one ze stosowanych technologii wykonywania uzwojeń oraz innych czynników - np. ograniczenie maksymalnej prędkości przepływu wody w kanale chłodzącym spowodowane zjawiskiem erozji. Program optymalizacyjny został tak skonstruowany, że projektant ma możliwość zmiany ograniczeń obszaru rozwiązań dopuszczalnych wynikających ze stosowanych w konkretnej firmie technologii produkcji uzwojeń stojana. Rozkład temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze wody chłodzącej w zezwoju uzwojenia stojana wykonanego ze zoptymalizowanych prętów typu 1 przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Rozwiązanie optymalne pręta typu 1 uzwojenia stojana przy minimalizacji maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana



Rys. 3. Rozkład przyrostu temperatury wzdłuż długości zezwoju uzwojenia stojana wykonanego ze zoptymalizowanych prętów typu 1

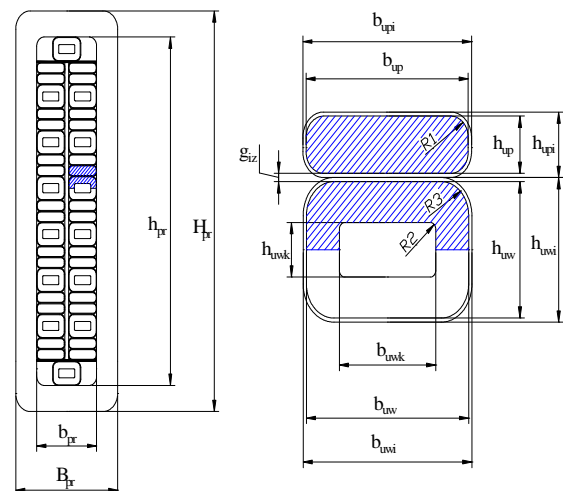
Funkcja celu (rys. 2) jest funkcją gładką. Z przeprowadzonych obliczeń dla różnych typów turbogeneratorów wynika, że rozwiązania optymalne znajdują się zazwyczaj na granicy obszaru rozwiązań dopuszczalnych. Zastosowana technologia wykonania uzwojeń, determinująca granice rozwiązań dopuszczalnych, ma więc bezpośredni wpływ na wartość uzyskanego minimum funkcji celu – np. w rozpatrywanym przypadku minimum maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana.

5. Uzwojenie stojana z prętów typu 2

Konstrukcja prętów typu 2 charakteryzuje się tym, że pomiędzy elementarnymi przewodami drażnionymi znajdują się dwa elementarne przewody pełne - rys. 4. Dla tego rozwiązania

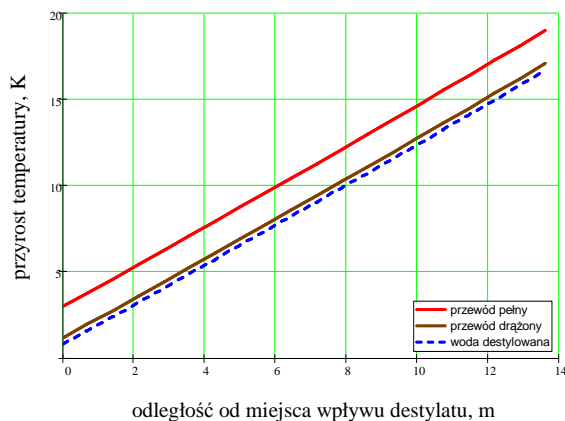
bardzo często stosowanym kryterium optymalizacji jest minimalizacja maksymalnego przyrostu temperatury przewodów pełnych (występującego na wypływie wody), który jest jednocześnie maksymalnym przyrostem temperatury uzwojenia stojana. Funkcja celu ma w tym przypadku trzy zmienne decyzyjne, którymi są: N_d – liczba elementarnych przewodów drażnionych, g_s – grubość ścianki elementarnego przewodu drażnionego, r – stosunek wysokości elementarnego przewodu drażnionego (h_{uw}) do wysokości elementarnego przewodu pełnego (h_{up}).

W podobny sposób jak dla prętów typu 1 zostały określone granice obszaru rozwiązań dopuszczalnych, zapewniające możliwość technicznej realizacji zaprojektowanego uzwojenia stojana. W procesie optymalizacji prętów typu 2 występują już trzy zmienne decyzyjne, a zatem nie ma możliwości przedstawienia funkcji celu w postaci wykresu wykonanego w kartezjańskim trójwymiarowym układzie współrzędnych (tak jak zostało to uczynione dla prętów typu 1).



Rys. 4. Przekrój poprzeczny pręta uzwojenia stojana (z lewej) oraz wymiary elementarnego przewodu pełnego i drażnionego (z prawej) – rozwiązanie konstrukcyjne 2

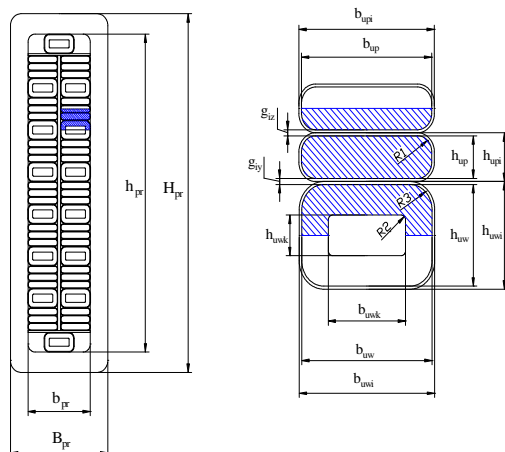
Obliczenia optymalizacyjne dla pręta typu 2 wykonano przy pomocy opracowanego programu. Kryterium optymalizacji była minimalizacja maksymalnego przyrostu temperatury uzwojenia stojana. Rozkład temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze wody chłodzącej w zezwoju uzwojenia stojana wykonanego ze zoptymalizowanych prętów typu 2 przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Rozkład przyrostu temperatury wzdłuż długości zezwoju uzwojenia stojana wykonanego ze zoptymalizowanych prętów typu 2

6. Uzwojenie stojana z prętów typu 3

W prętach typu 3 pomiędzy elementarnymi przewodami drażonymi znajdują się trzy elementarne przewody pełne - rys. 6.

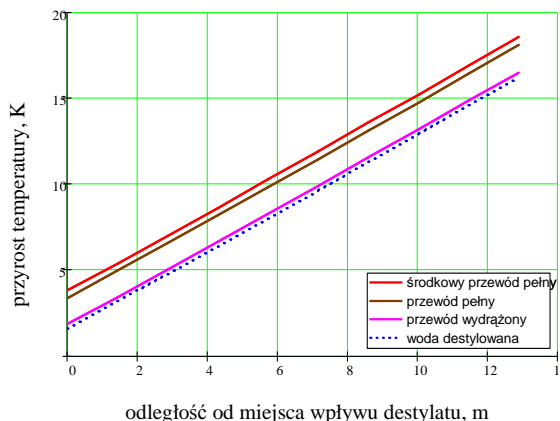


Rys. 6. Przekrój poprzeczny pręta uzwojenia stojana (z lewej) oraz wymiary elementarnego przewodu pełnego i drażonego (z prawej) – rozwiązanie konstrukcyjne 3

Dla tego rozwiązania bardzo często stosowanym kryterium optymalizacji jest minimalizacja maksymalnego przyrostu temperatury środkowych przewodów pełnych (występującego na wypływie wody), który jest jednocześnie maksymalnym przyrostem temperatury uzwojenia stojana. Funkcja celu ma trzy zmienne decyzyjne, podobnie jak w przypadku optymalizacji prętów typu 2.

Wykorzystując sporządzony program wykonano obliczenia optymalizacyjne dla pręta typu 3. Kryterium optymalizacji była minimalizacja maksymalnego przyrostu tempe-

ratury uzwojenia stojana. Rozkład temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze wody chłodzącej w zezwoju uzwojenia stojana wykonanego ze zoptymalizowanych prętów typu 3 przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Rozkład przyrostu temperatury wzdłuż długości zezwoju uzwojenia stojana wykonanego ze zoptymalizowanych prętów typu 3

7. Porównanie uzwojeń stojana wykonanych z prętów typu 1, 2 i 3

W tabeli 1 zestawiono parametry trzech uzwojeń stojana wykonanych odpowiednio ze zoptymalizowanych prętów typu 1, 2 i 3, przystosowanych do zabudowania w rdzeniu stojana turbogeneratora o mocy 200 MW. Wielkościami zadanymi przy ich projektowaniu były wymiary oraz liczba żłobków rdzenia stojana. Zestawione wyniki obliczeń odnoszą się do zoptymalizowanych rozwiązań konstrukcyjnych prętów, zapewniających minimalny przyrost temperatury uzwojenia stojana.

Występujące w tabeli 1 wymiary charakterystyczne przewodów elementarnych dla poszczególnych typów prętów podano na rys. 1, 4 i 6. Pozostałe wielkości oznaczają odpowiednio: $\Delta\vartheta_{p2}$ – maksymalny przyrost temperatury środkowego przewodu pełnego (dotyczy pręta typu 3), $\Delta\vartheta_{p1}$ – maksymalny przyrost temperatury przewodu pełnego (dotyczy pręta typu 2), $\Delta\vartheta_d$ – maksymalny przyrost temperatury przewodu drażonego, $\Delta\vartheta_w$ – przyrost temperatury wody na wypływie z prętów, ΔP_s – całkowite straty mocy w uzwojeniu stojana, j_s – średnia gęstość prądu stojana, k_F – współczynnik Fielda, m_s – całkowita masa miedzi uzwojenia stojana, V – prędkość przepływu wody w przewodach drażonych.

Tab. 1. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych uzwojenia stojana turbogeneratorsa o mocy 200 MW dla trzech rozwiązań konstrukcyjnych prętów

Wielkość		Pręt 1	Pręt 2	Pręt 3
N_d	-	30	18	18
r	-	-	1,99	3,0
g_s	mm	2,0	1,5	1,5
h_{upi}	mm	-	2,2	1,4
h_{uwi}	mm	5,3	4,4	4,3
h_{uwk}	mm	1,0	1,1	1,1
b_{uwk}	mm	4,2	5,2	5,2
b_{uwi}	mm	8,5		
$\Delta\vartheta_{p2}$	K	-	-	18,9
$\Delta\vartheta_{p1}$	K	-	19,1	18,4
$\Delta\vartheta_d$	K	28,3	17,2	16,7
$\Delta\vartheta_w$	K	27,9	16,9	16,4
ΔP_s	kW	957	581	563
j_s	A/mm ²	4,06	4,24	4,38
k_F	-	2,9	1,71	1,61
m_s	kg	8181	7840	7582
V	m/s	1,17	1,39	1,24

W uzwojeniu stojana wykonanym z prętów typu 1 występuje największy przyrost temperatury. Przewody tego uzwojenia są co prawda najlepiej chłodzone (w każdym przewodzie elementarnym przepływa woda), jednak na skutek dużej ich wysokości występują w nich największe straty mocy spowodowane wypieraniem prądu.

W uzwojeniach stojana zbudowanych z prętów typu 2 i 3 występują bardzo zbliżone przyrosty temperatury oraz straty mocy. Minimalnie lepsze pod względem tych parametrów jest uzwojenie wykonane z prętów typu 3.

8. Podsumowanie

Opracowane programy komputerowe są wykorzystywane przy projektowaniu nowych uzwojeń stojanów dla potrzeb modernizacji związanych z poprawą niezawodności pracy głównych węzłów konstrukcyjnych oraz zwiększeniem mocy znamionowych turbogeneratorów - niejednokrotnie nawet o kilka-

naście procent. Zaprojektowane uzwojenia stojana zostały wdrożone do produkcji. Przeprowadzone pomiary potwierdziły uzyskanie założonych w projektach wzrostów mocy generatorów w wyniku wykonanych modernizacji.

Literatura

- [1] Pistelok P.: *Opracowanie programów komputerowych do optymalizacji konstrukcji uzwojeń stojanów turbogeneratorów chłodzonych wodą*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 2008.
- [2] Ostwald M.: *Podstawy optymalizacji konstrukcji*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- [3] Stadnicki J.: *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*. WNT, Warszawa 2006.
- [4] Majid K. I.: *Optymalne projektowanie konstrukcji*. PWN, Warszawa 1981.
- [5] Krok R.: *Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach prądu przemiennego*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [6] Krok R., Sieradzki S., Adamek J.: *Cieplne badania symulacyjne stosowane przy opracowywaniu projektów modernizacji generatorów synchronicznych*. Zeszyty Problemowe Maszyny elektryczne, nr 74/2006, Katowice 2006.
- [7] Gurazdowski D., Zawilak J.: *Wpływ przepłotu na straty dodatkowe od prądów wirowych w przecie stojana turbogeneratorsa*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 77/2007, Katowice 2007.
- [8] Gurazdowski D., Zawilak J.: *Rozkład temperatury w przecie uzwojenia stojana turbogeneratorsa*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 75/2006, Katowice 2006.

Autorzy

dr inż. Roman Krok
Politechnika Śląska, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, tel. (032) 237-29-29, e-mail: Roman.Krok@polsl.pl

mgr inż. Paweł Pistelok
Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”, 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188, e-mail: p.pistelok@komel.katowice.pl

Recenzent

Prof. dr hab.inż. Ludwik Antal