

*turbogenerator, parametry elektromagnetyczne,
metoda elementów skończonych*

Adam GOZDOWIAK*, Piotr KISIELEWSKI*

WYZNACZANIE I WERYFIKACJA PARAMETRÓW TURBOGENERATORA Z SYMULACJI POŁOWEJ I POŁOWO-OBWODOWEJ

Artykuł przedstawia wyniki obliczeń podstawowych elektromagnetycznych parametrów turbogeneratorsa przy wykorzystaniu metody elementów skończonych. Wyniki otrzymano przy wykorzystaniu dwuwymiarowego modelu turbogeneratorsa. Otrzymane wartości zostały porównane z parametrami rzeczywistymi badanej maszyny podanymi przez producenta dla stanu nienasyconego.

1. WSTĘP

Istotnym zagadnieniem w trakcie projektowania turbogeneratorsów jest dokładne poznanie elektromagnetycznych parametrów, które spełnią wymagania stawiane przez system elektroenergetyczny [3]. Najważniejsze wymagania stawiane przed generatorami synchronicznymi dotyczą współczynnika zwarcia oraz podprzejsciowej reaktancji podłużnej (X_d''). Minimalna wartość współczynnika zwarcia podawana w normie [3] powinna być nie mniejsza niż 0,35, natomiast rekomendowana wartość, która spełni większość wymagań międzynarodowych systemów elektroenergetycznych to 0,5 [9]. Minimalna wartość podprzejsciowej reaktancji poprzecznej w stanie nasyconym nie może być mniejsza niż 10% znamionowej impedancji turbogeneratorsa [3].

W czasie projektowania turbogeneratorsów duży nacisk jest kładziony na osiągnięcie jak największej sprawności przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów materiałowych oraz gabarytów maszyny. Przy tak restrykcyjnych założeniach bardzo trudno jest spełnić wymagania stawiane przez SEE. Osiągnięcie wysokiego współczynnika zwarcia wymusza zwiększenie przepływu uzwojeniu wzbudzenia, by móc wyprodukować tą samą moc, jak przy mniej rygorystycznych wymogach. Zwiększenie liczby zwojów w uzwo-

* Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: piotr.kisielewski@pwr.edu.pl

jeniu wirnika powoduje wzrost strumienia magnetycznego, a jednocześnie zwiększenie gabarytów i kosztu maszyny. Zastosowanie numerycznych obliczeń przy braku odpowiednich analitycznych, zweryfikowanych wzorów projektowych jest uzasadnione i pozwala na weryfikację założeń projektowych przy niestandardowych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Przeprowadzone badania pokazują, że takie symulacje są dokładniejsze od obliczeń analitycznych [2]. Obecnie modelowanie polowo-obwodowe uchodzi za jedno z najdokładniejszych metod obliczeniowych maszyn elektrycznych, ponieważ jest w stanie uwzględnić elektromagnetyczne zjawiska występujące w maszynie elektrycznej, nieliniowość charakterystyk magnesowania rdzeni, ruch wirnika oraz indukowanie prądów wirowych w przewodzących częściach wirnika.

Podstawowe parametry turbogeneratora są wyznaczane w czasie prób ruchowych przy wykorzystaniu charakterystyki biegu jałowego oraz udarowego zwarcia trójfazowego, a następnie są przyrównywane z założeniami projektowymi. Jednakże takie testy wymagają drogiego wyposażenia oraz ich przeprowadzenie jest ograniczane właściwościami materiałowymi (wytrzymałość elektryczna izolacji uzwojeń twornika w czasie biegu jałowego, ograniczenia cieplne w czasie zwarcia udarowego). Dlatego szukane jest rozwiązanie, w jaki sposób zastąpić testy ruchowe, w sytuacjach w których nie jest to konieczne.

Analizowaną maszyną był turbogenerator 2-biegunowy, posiadający 54 żłobki stojana i uzwojenie połączone w dwie gałęzie równoległe. Model badanej maszyny został szczegółowo opisany w pracy [6].

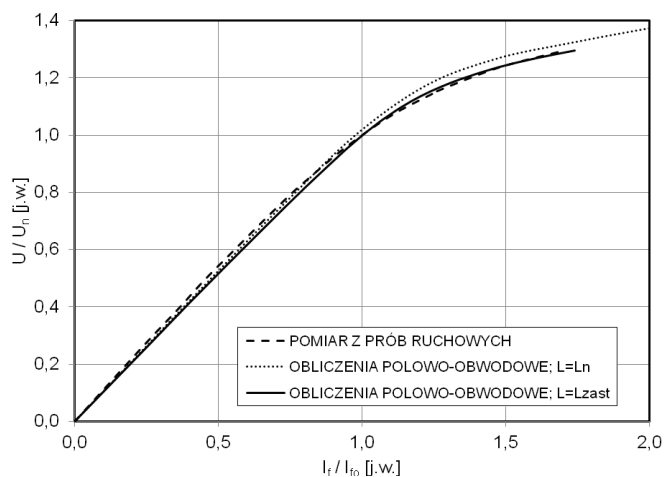
2. PARAMETRY WYZNACZONE Z SYMULACJI POŁOWO-OBWODOWEJ

W celu obliczenia współczynnika zwarcia oraz synchronicznej reaktancji podłużnej posłużono się dwiema charakterystykami: biegu jałowego oraz udarowego zwarcia symetrycznego, które zostały wyznaczone na podstawie przebiegów czasowych prądów i napięć wyznaczonych metodą polowo-obwodową.

2.1. CHARAKTERYSTYKA BIEGU JAŁOWEGO

Pierwsze obliczenia charakterystyki biegu jałowego znacząco odbiegały od charakterystyki podawanej przez producenta w przypadku dużych nasyceń obwodu magnetycznego. Przyczyną tego był brak uwzględnienia w obliczeniach szerokości kanałów wentylacyjnych w rdzeniu stojana, które stanowią ok. 13% całkowitej długości czynnej turbogeneratora. Autorzy w [1] proponują zastosowanie zastępczej użytecznej długości czynnej maszyny. Posługując się zweryfikowanymi wzorami z pracy [1], została obliczona zastępcza długość maszyny, która jest mniejsza o ok. 1,4% od wartości rzeczywistej.

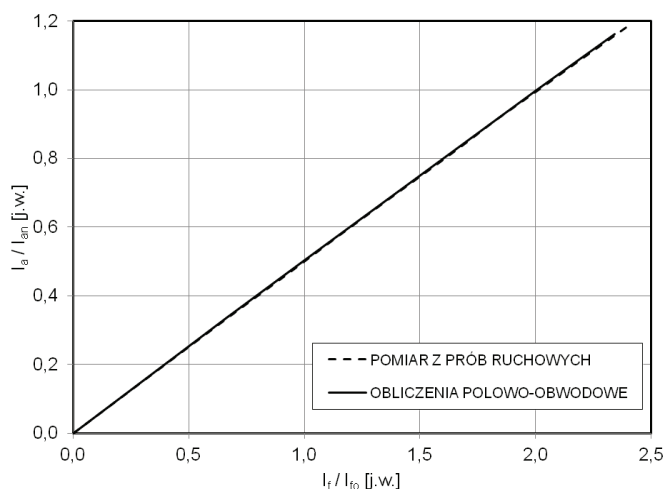
Na rysunku 1 przedstawiono charakterystykę biegu jałowego podawaną przez producenta oraz charakterystyki otrzymane z symulacji przy uwzględnieniu zastępczej długości maszyny L_{zast} oraz długości znamionowej L_n .



Rys. 1. Charakterystyka biegu jałowego

2.2. CHARAKTERYSTYKA ZWARCIA

Charakterystykę zwarcia wyznaczono poprzez zwarcie zacisków uzwojenia twornika i zasilenie napięciem stałym uzwojenia wirnika. Wykonanie tych symulacji nie



Rys. 2. Charakterystyka zwarcia

wymaga zastosowania zastępczej długości maszyny, ponieważ w stanie zwarcia obwód magnetyczny jest nienasycony. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 2. Zbieżność charakterystyki podanej przez producenta z wyznaczoną z symulacji zależy od przyjętej do obliczeń indukcyjności czoł stojana.

W tabeli 1 przyrównano wielkości fizyczne otrzymane z symulacji połowo-obwodowej z pomiarami.

Tabela 1. Porównanie (w jednostkach względnych) wielkości fizycznych i parametrów turbogenerатора otrzymanych z symulacji połowo-obwodowej z pomiarami

Parametr	Wartość zmierzona	Wartość wyliczona z symulacji połowo-obwodowej	Błąd [%]
I_{fon}	1,000	0,997	0,27
$I_{f\delta}$	0,947	0,959	1,25
I_{fzn}	2,000	1,999	0,03
Kz	0,500	0,499	0,20
$X_{d(nienasycona)}$	2,112	2,085	1,28

3. PARAMETRY WYZNACZONE Z ROZKŁADU PÓŁ MAGNETOSTATYCZNYCH

Na podstawie rozkładu potencjału magnetycznego istnieje możliwość wyznaczenia strumienia magnetycznego sprzężonego z uzwojeniem twornika i wzbudzenia. W celu wyznaczenia synchronicznej reaktancji podłużnej, prądy płynące w obwodach tłumiących oraz w uzwojeniu wirnika powinny wynosić zero. W taki sposób strumień w osi q wynosi zero. Dodatkowo uzwojenie wzbudzenia musi zostać ustawione w osi d , czyli zostać zrównane do jednej fazy np. A, w taki sposób, aby kąt między osią d , a fazą A wynosił zero. W obliczeniach magnetostatycznych przyjęto, że prądy fazowe stojana są opisane zależnością (1).

$$i_B = i_C = -\frac{i_A}{2}. \quad (1)$$

Wychodząc ze wzoru (2) na wektor prądu stojana, którego wartość rzeczywista określa prąd w osi d , a wartość urojona prąd w osi q , można określić prąd płynący w osi d (3) oraz strumień w osi d (4) [2, 5].

$$i_s = \frac{2}{3}(i_A + ai_B + a^2i_C), \quad (2)$$

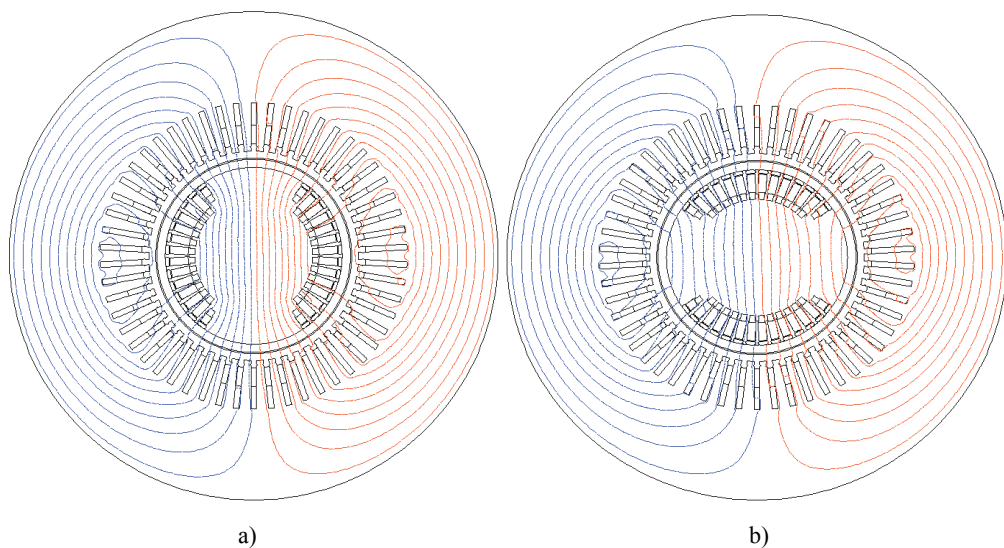
$$I_d = \operatorname{Re} \sqrt{\frac{2}{3}}(i_A + ai_B + a^2i_C), \quad (3)$$

$$\psi_d = \operatorname{Re} \sqrt{\frac{2}{3}}(\psi_A + a\psi_B + a^2\psi_C). \quad (4)$$

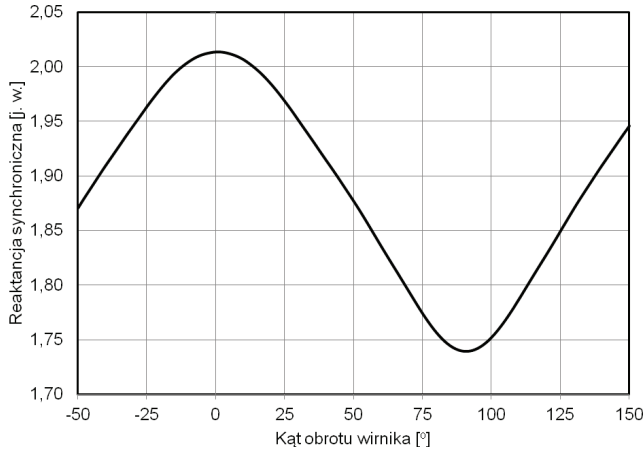
Indukcyjność synchroniczną w osi podłużnej można wyznaczyć z zależności (5), która jest powiększona o indukcyjność czół stojana L_{cs} , nie uwzględnianą w dwuwymiarowym modelu połowym. Analogicznie wyznacza się indukcyjność w osi poprzecznej.

$$L_d = \frac{\psi_d}{I_d} + L_{cs} \Rightarrow X_d = \omega L_d. \quad (5)$$

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład linii pola magnetycznego w osi d i q dla znamionowego prądu w stanie pracy synchronicznej, natomiast na rysunku 4 wartości reaktancji synchronicznej w stanie nasyconym dla różnego położenia wirnika.

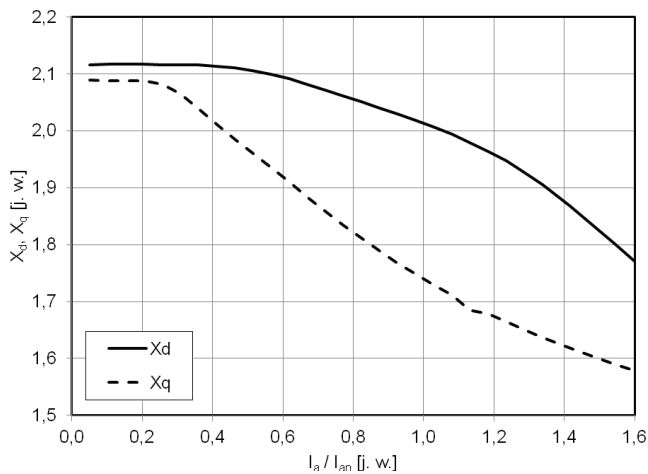


Rys. 3. Rozkład linii pola magnetycznego a) w osi podłużnej, b) w osi poprzecznej turbogenerators

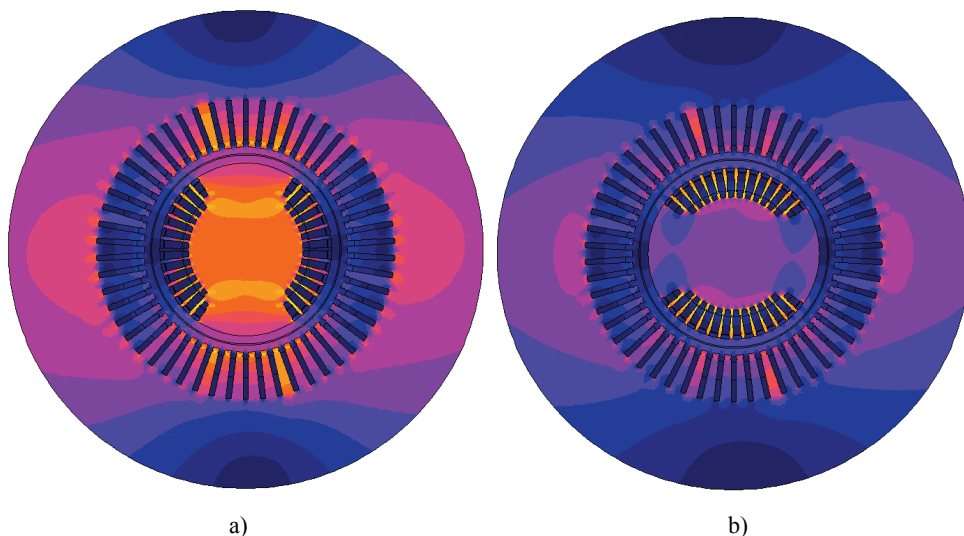


Rys. 4. Zależność reaktancji synchronicznej turbogeneratorsa od kąta położenia wirnika w stanie nasyconym (0° – oś d , 90° – oś q)

Zależność reaktancji synchronicznej podłużnej i poprzecznej od wartości prądu płynącego w uzwojeniu stojana przedstawiono na rysunku 5. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem prądu stojana X_q szybciej maleje niż X_d . Wynika to z faktu, że w osi q strumień zamyka się przez wąskie zęby wirnika, co prowadzi do nadmiernego nasycenia się miejsc między żłobkami wirnika, a w konsekwencji czego rośnie reluktancja na drodze strumienia. To zjawisko zostało zilustrowane na rysunku 6.



Rys. 5. Zależność reaktancji synchronicznej podłużnej i poprzecznej od wartości prądu fazowego



Rys. 6. Rozkład pola magnetycznego dla a) osi podłużnej,
b) osi poprzecznej turbogenerators dla znamionowego prądu stojana

4. PARAMETRY WYZNACZONE Z ROZKŁADU PÓL SINUSOIDALNIE ZMIENNYCH

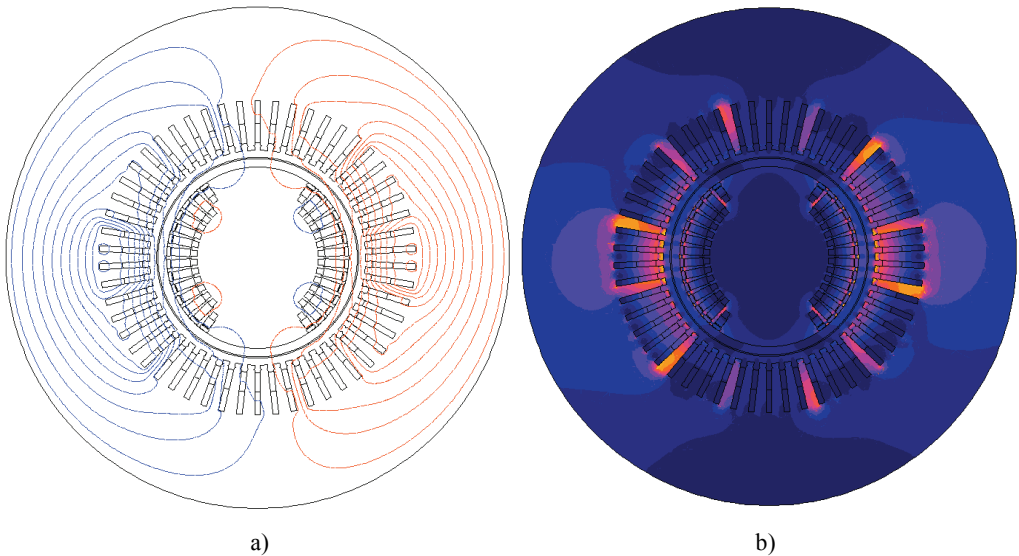
4.1. REAKTANCJA PRZEJŚCIOWA

Stan przejściowy to stan nieustalony w czasie zwarcia zacisków twornika, w którym strumień magnetyczny zamyka się głównie przez uzwojenia wytwarzające strumień (strumień rozproszenia). W tym stanie nie ma efektu tłumienia pochodzącego od prądów wirowych płynących w klinach wirnika i litej stali wirnika. Prąd płynący w zwartym uzwojeniu wirnika nie pozwala strumieniowi powstałemu na skutek przepływu prądu w uzwojeniach stojana, zamknąć się przez wirnik.

W symulacji przyjęto częstotliwość znamionową 50 Hz. Uzwojenie wzbudzenia zostało zwarte. Prądy stojana zostały zdefiniowane dla $t = 0$, jako wartości szczytowe wraz z przesunięciem fazowym φ zgodnym z rozmieszczeniem faz stojana zgodnie z (6).

$$i_B = i_C = -\frac{i_A}{2} = -\frac{I_{\max}}{2}. \quad (6)$$

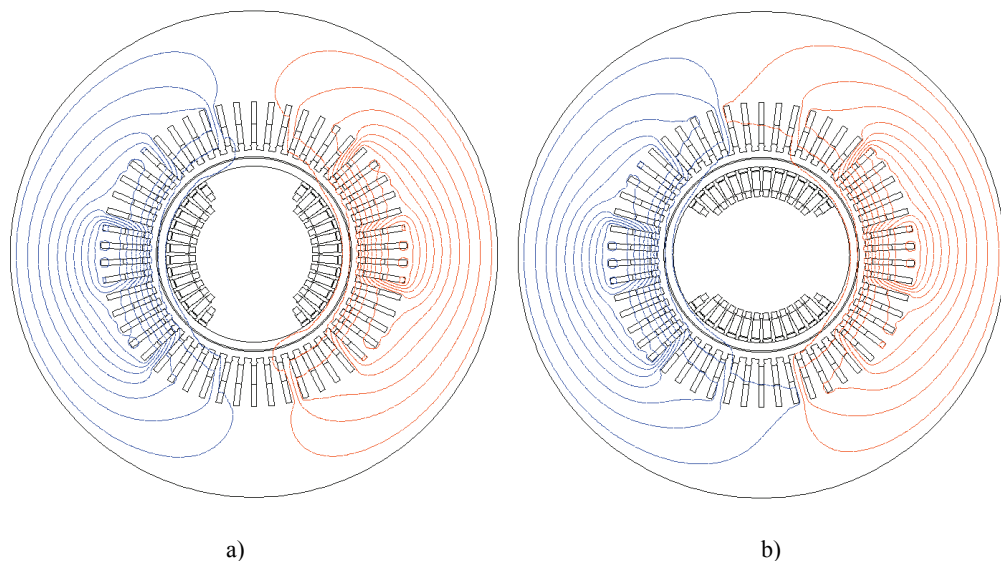
Reaktancja przejściowa podłużna została obliczona w analogiczny sposób jak X_d . Pominięto obliczenie X'_q , ponieważ ułożenie uzwojenia wzbudzenia w osi poprzecznej nie wpływa na warunki pracy turbogeneratorsa w stanie przejściowym – nie ma efektu wypierania strumienia stojana. Efekt wypierania strumienia stojana w osi podłużnej przez prąd płynący w uzwojeniu w osi d wirnika został przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Rozkład linii pola magnetycznego a) oraz rozkład pola magnetycznego b) w osi podłużnej w stanie przejściowym

4.2. REAKTANCJA PODPRZEJŚCIOWA

Stan podprzejściowy występuje w pierwszej chwili wystąpienia zwarcia trójfazowego. W tym stanie prądy wirowe płynące w przewodzących częściach wirnika oraz prąd płynący w uzwojeniu wirnika nie pozwala przeniknąć strumieniowi stojana przez wirnik, działa tak zwany efekt wypierania strumienia. Cały strumień zamyka się przez szczelinę powietrzną, dlatego też reaktancja podprzejściowa jest zdecydowanie mniejsza od reaktancji synchronicznej oraz niewiele mniejsza od reaktancji przejściowej, w której strumień stojana wnika do wirnika, lecz nie przenika przez uzwojenie wzbudzenia. Przykładowy efekt wypychania strumienia stojana został pokazany na rysunku 8.



Rys. 8. Rozkład linii pola magnetycznego a) w osi podłużnej, b) w osi poprzecznej turbogeneratorsa w stanie podprzejsiowym

Reaktancję podprzejsiową obliczono przy zasilaniu uzwojenia prądem sinusoidalnie zmiennym o częstotliwości większej od częstotliwości znamionowej. Przyjmuje się, że powinna ona być większa od $\frac{1}{T_d''}$ [1]. W obliczeniach wykorzystano częstotliwość 300 Hz. W celu obliczenia X_d'' oraz X_q'' prądy zostały tak samo zdefiniowane jak w przypadku obliczeń reaktancji przejsiowej.

5. STAŁE CZASOWE

Stała czasowa uzwojenia wzbudzenia T_{do}' jest wyrażona za pomocą zależności (7) i została wyznaczona z rozkładu pól magnetostatycznych. Symulację przeprowadzono przy znamionowym prądzie wzbudzenia oraz przy otwartym uzwojeniu twornika.

$$T_{do}' = \frac{L_f}{R_f}. \quad (7)$$

Indukcyjność uzwojenia wzbudzenia to stosunek strumienia wzbudzenia do prądu wzbudzenia. Dodatkowo ta indukcyjność jest powiększona o indukcyjność połączeń czołowych L_{cf} uzwojenia wzbudzenia.

$$L_f = \frac{\psi_f}{i_f} + L_{cf} \quad (8)$$

Znając wartość T'_{do} oraz reaktancji synchronicznej podłużnej X_d i reaktancji przejściowej podłużnej X'_d , stałą czasową przejściową można wyznaczyć z uproszczonej zależności (9).

$$T'_d \approx T'_{do} \frac{X'_d}{X_d} \quad (9)$$

Stała czasowa przejściowa w osi podłużnej jest wyrażona w sposób uproszczony za pomocą równania (10).

$$T''_d \approx T''_{do} \frac{X''_d}{X'_d}. \quad (10)$$

Stałą czasową tłumienia T''_{do} wyliczono z mocy czynnej i biernej w przewodzących częściach wirnika przy rozkładzie pól sinusoidalnie zmiennych. Obliczenia wykonano dla częstotliwości 3 Hz. Taka częstotliwość została wykorzystana w celu wyeliminowania efektu naskórkowości w litej stali wirnika oraz w klinach wirnika. Metoda ta została wykorzystana wielu pracach, między innymi w [1, 2].

$$T''_{do} \approx \frac{Q}{P\omega} \quad (11)$$

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono obliczenia połowo-obwodowe oraz połowe turbogenerato-
ra, które mogą posłużyć do projektowania i optymalizacji nowo powstających, nie-
standardowych konstrukcji. Dodatkowo można ich użyć do zweryfikowania obliczeń
analitycznych w fazie projektowania. Różnice między wyznaczonymi, a zmierzonymi
parametrami zestawiono w tabeli 2. Największe różnice odnotowano dla stanu przej-
ściowego. Przyczyną tej rozbieżności może być brak uwzględniania w obliczeniach
indukcyjności połączeń czołowych uzwojenia wirnika.

Połączenie obliczeń numerycznych wraz z obliczeniami analitycznymi, takimi jak
zastępcza długość rdzenia oraz indukcyjność czoł stojana pozwala w dokładny sposób

odzwierciedlić zjawiska zachodzące w turbogeneratorach i wyznaczyć ich podstawowe parametry elektromagnetyczne.

Wyznaczanie reakcji synchronicznej, podprześciowej i przejściowej metodą połową znacznie skraca długość symulacji w stosunku do wyznaczenia tych parametrów metodą połowo-obwodową przy wykorzystaniu udarowego zwarcia trójfazowego [7].

Tabela 2. Porównanie parametrów turbogenerators otrzymanych z symulacji połowej z parametrami badanej maszyny

Parametr	Jednostka	Wartość zmierzona	Wartość wyliczona z symulacji połowej	Błąd [%]
$X_{d(\text{nienasycona})}$	[j. w.]	2,112	2,116	0,19
$X_{d(\text{nasycona})}$	[j. w.]	2,000	2,020	1,00
X'_d	[j. w.]	0,345	0,320	7,25
X''_d	[j. w.]	0,275	0,276	0,36
T'_{do}	[j. w.]	8,1	8,067	0,41
T'_d	[s]	1,250	1,2903	3,22
T''_{do}	[s]	–	0,0522	–
T'_d	[s]	0,041	0,0408	0,49
$X_{q(\text{nienasycona})}$	[j. w.]	–	2,090	–
$X_{q(\text{nasycona})}$	[j. w.]	–	1,740	–
X''_q	[j. w.]	0,383	0,380	0,78

LITERATURA

- [1] BAN D., ŽARKO D., MALJKOVIĆ Z., *The application of finite element method for more accurate calculation and analysis of turbogenerator parameters*, Electric Power Components and Systems, Vol. 26, Iss. 10, 1998, 1081–1093.
- [2] BERHAUSEN S., BOBOŃ A., *Polowa metoda wyznaczania parametrów i charakterystyk maszyny synchronicznej*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 91, 2011, 43–49.
- [3] IEC 60034-3, *Specific requirements for synchronous generators driven by steam turbines or combustion gas turbines*.
- [4] IEC 60034-4, *Methods for determining synchronous machine quantities from tests*.
- [5] LATEK W., *Turbogeneratory*, WNT, Warszawa 1973, 153–180.
- [6] KISIELEWSKI P., ANTAL L., *Model połowo-obwodowy turbogenerators*, Prace Nauk. IMNiPE PWr, Nr 59, SiM, Nr 26, Wrocław 2006, 53–60.
- [7] KISIELWSKI P., ANTAL L., *Wyznaczanie parametrów turbogenerators z symulacji połowo-obwodowej*, XLII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Kraków 2006.
- [8] KISIELWSKI P., ANTAL L., *Zjawiska zachodzące w turbogenerators przy udarowym zwarcii symetrycznym*, Prace Nauk. IMNiPE PWr, Nr 59, SiM, Nr 26, Wrocław 2006.

- [9] THORNTON-JONES R., GODLIGHTLY I., GUTTERIDGE N., HUIZER C., NAVRATIL D., *Review of generator and excitation system specification and test requirements to satisfy multiple international grid code standards*, Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE.
- [10] TUROWSKI J., *Obliczenia elektromagnetyczne maszyn i urządzeń elektrycznych*, WNT, Warszawa 1982, 143–165.

IDENTIFICATION AND VERIFICATION OF THE TURBOGENERATOR PARAMETERS
DETERMINED FROM THE FIELD AND FIELD-CIRCUIT SIMULATION

Presented article shows the computation results of turbogenerator electromagnetic parameters by using finite element method. Two-dimensional field model of the turbogenerator was used during the simulations. Obtained results were compared with the parameters coming from the real machine for unsaturated state.