

*maszyny synchroniczne, turbogeneratory,
modelowanie polowo-obwodowe, zwarcie,
współpraca z systemem, stany nieustalone*

Piotr KISIELEWSKI*, Ludwik ANTAL*

ZASTOSOWANIE MODELOWANIA POLOWO-OBWODOWEGO DO ANALIZY STANÓW NIEUSTALONYCH TURBOGENERATORA

W pracy przedstawiono sposób modelowania stanów nieustalonych pracy turbogeneratora w systemie elektroenergetycznym. Symulowano występowanie zakłóceń w postaci zwarć, a następnie zachowanie się układu po odłączeniu uszkodzonej części systemu. Po odłączeniu zakłócenia kontynuowano obliczenia aż do zaniknięcia stanu przejściowego w układzie. Przedstawiono przebiegi czasowe wybranych wielkości elektromechanicznych określających pracę turbogeneratora w stanach dynamicznych. Obliczenia symulacyjne wykonano za pomocą dwuwymiarowego, polowo-obwodowego modelu turbogeneratora, umożliwiającego wyznaczenie statycznych oraz dynamicznych charakterystyk maszyny.

1. WSTĘP

Głównym źródłem energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych są generatory synchroniczne przetwarzające energię mechaniczną dostarczoną do wału maszyny. Współczesne systemy elektroenergetyczne tworzą sieci połączonych ze sobą wielu elementów wytwarzających, transformujących oraz przesyłających energię elektryczną. Istotny wpływ na pracę systemów ma charakter pracy odbiorników. Zmienne w czasie zapotrzebowanie na energię elektryczną pociąga za sobą konieczność ciągłego dostosowywania się systemu do aktualnych warunków pracy. Ciągłym wahaniom obciążenia towarzyszą zmiany kątów mocy generatorów synchronicznych powodując powstawanie oscylacji [7].

Istotnym zagadnieniem w pracy systemów elektroenergetycznych jest badanie ich zachowania w stanach przejściowych, a w tym stabilności [1, 2, 6]. Problem ten jest rozważany na etapie projektowania turbozespołów, poprzez zaprojektowanie odp-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-372 Wrocław ul. Smoluchowskiego 19, piotr.kisielewski@pwr.wroc.pl, ludwik.antal@pwr.wroc.pl

wiedniej konstrukcji maszyny, dobór układów regulacji wzbudzenia i dopływu pary. Sprzężone poprzez sieć elektroenergetyczną oraz sygnały sterujące, układy wytwarzania energii elektrycznej tworzą skomplikowany, nieliniowy układ regulacji. Układy takie narażone są na zakłócenia i dlatego istnieje potrzeba dokładnego wyznaczania obszarów pracy stabilnej oraz prognozowania zachowań turbozespołów w stanach awaryjnych.

Stosowane obecnie metody analizy stanów nieustalonych turbogeneratorsa opierają się głównie na modelowaniu obwodowym maszyny, polegającym na opisie jej właściwości w układzie osi d i q [3, 5]. Metoda obwodowa jednak nie pozwala wiernie odwzorować maszyny w różnych jej stanach. Zazwyczaj pomija nieliniowość charakterystyki magnesowania, składową kolejności zerowej w prądach fazowych maszyny oraz prądy wirowe w uzwojeniach i obwodach tłumiących. Uzwojenia maszyny rozłożone na jej obwodzie zastępowane są uzwojeniami o parametrach skupionych. Klatkę tłumiącą oraz lite elementy wirnika zastępuje się dwoma obwodami zwartymi.

Stabilność statyczną i dynamiczną turbogeneratorów pracujących w systemie elektroenergetycznym bada się przy użyciu różnych analitycznych bądź wykreślnych metod obliczeniowych [4, 5]. Np. do badania stabilności statycznej stosuje się tradycyjnie metodę małych wychyleń, uważaną za metodę najdokładniejszą. Metoda ta, mimo przyjmowania szeregu założeń upraszczających, jak pominięcie obwodów tłumiących i nieliniowości obwodu magnetycznego, wymaga rozwiązania skomplikowanego układu równań. Dlatego w praktyce stosuje się jeszcze bardziej uproszczone metody jak np. związane z kryterium właściwej mocy synchronizującej. Stosowane metody, jak widać, pomijają szereg zjawisk zachodzących w maszynie elektrycznej w stanach przejściowych. Nie ma więc pewności, że uproszczenia te są dopuszczalne i nie prowadzą do błędnych wyników obliczeń. Pomijane zjawiska niewątpliwie mają wpływ na zachowanie się turbogeneratorsa w systemie energetycznym. Jednak nie sposób określić ilościowo skutków pominięcia nieliniowości charakterystyki magnesowania oraz prądów wirowych w uzwojeniach i elementach masywnych maszyny za pomocą obwodowego opisu pracy maszyny w stanach przejściowych. Konieczne w metodach obwodowych uproszczenia powodują, że stany te analizowane są niezbyt precyzyjnie. Turbogenerator zwykle jest modelowany z pominięciem elementów litych w maszynie. Można jednak oczekiwać, że wpływ litej beczki wirnika na parametry maszyny, w szczególności na początkowe wartości prądów oraz momentu w czasie zwarcia jest istotny. W modelach obwodowych maszynę synchroniczną zastępuje się prymitywnym schematem zastępczym, zawierającym skupione parametry. Dla uproszczenia obliczeń zakłada się stałość tych parametrów. W rzeczywistości parametry te są zmienne i zależne od aktualnego stanu elektromagnetycznego maszyny. Wyniki uzyskane metodami obwodowymi nie dają możliwości wglądu do konkretnych elementów konstrukcyjnych maszyny oraz nie pozwalają na przeprowadzenie oceny czasu trwania danego zakłócenia w odniesieniu do możliwych skutków cieplnych i dynamicznych w turbogeneratorze.

Ograniczeń metody obwodowej nie ma metoda polowo – obwodowa, stosowana obecnie w zaawansowanych, komercyjnych aplikacjach posługujących się metodą elementów skończonych (MES). W problemach rozwiązywanych tą metodą modelowany jest naturalny układ uzwojeń i obwodów tłumiących, bez transformacji układu do osi d i q . Uwzględniane są nieliniowe charakterystyki magnesowania oraz prądy wirowe indukowane w litych, przewodzących elementach konstrukcyjnych maszyny. W metodzie polowo-obwodowej modele łączące numeryczne obliczenia pola w domenie elementów skończonych z jednoczesnym rozwiązywaniem układu równań napięciowych i równania ruchu pozwalają na uwzględnienie w obliczeniach zarówno rzeczywistych właściwości materiałów konstrukcyjnych jak i parametrów obwodów zewnętrznych i regulacyjnych. Możliwe jest również obliczanie pól sprzężonych np. elektromagnetycznych i cieplnych. Stwarza to szansę na dokładniejszą analizę zjawisk fizycznych w najtrudniejszych dla maszyny stanach pracy. Modele polowo-obwodowe mają również duże znaczenie dla projektowania optymalnych konstrukcji maszyn. Parametryzacja modelu pozwala na analizę wpływu dowolnych czynników, nie wyłączając kształtów, na jej własności eksploatacyjne. Modelowanie polowo-obwodowe zostało dobrze zweryfikowane pomiarowo dla maszyn mniejszych mocy.

Nieustanny rozwój sprzętu i technik obliczeniowych sprawia, że modelowanie polowo-obwodowe, charakteryzujące się znacznym zapotrzebowaniem mocy obliczeniowej, może być wykorzystywane do symulacji coraz większych i coraz bardziej złożonych obiektów. W tej sytuacji, zalety metody polowo-obwodowej skłaniają do użycia jej w analizie pracy największych maszyn elektrycznych, do których należą turbogeneratory.

W literaturze można już znaleźć pozycje dotyczące badań polowo-obwodowych stanów przejściowych maszyn synchronicznych oraz wyznaczania ich parametrów. Ograniczone możliwości weryfikacji pomiarowej otrzymanych wyników dla maszyn dużych mocy sprawiają, że publikacje te zajmują się maszynami małej mocy. Maszyny takie to najczęściej czterobiegunowe silniki lub generatory synchroniczne o biegunach wydalnych i niewielkiej, nie przekraczającej 10 kW, mocy. Nie ma prac dotyczących analizy polowo-obwodowej stanów nieustalonych turbogeneratorów najwyższych mocy. Dla maszyn tej wielkości najczęściej wykonuje się trójwymiarowe obliczenia polowe (magnetostatyczne), których celem jest wyznaczenie indukcyjności rozproszenia w strefie czołowej turbogeneratorsa lub sił tam działających. Obliczone w ten sposób indukcyjności wykorzystywane są następnie w modelach obwodowych. Model obwodowy korzystający z parametrów wyznaczonych z numerycznych obliczeń magnetycznych (nazywany modelem obwodowo-polowym) jest elementem pośrednim między modelem polowo-obwodowym i klasycznym modelem obwodowym o stałych parametrach.

Zaproponowany w niniejszej pracy model polowo-obwodowy turbogeneratorsa dużej mocy został użyty do obliczeniowego badania zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w różnych nieustalonych stanach pracy turbogeneratorsa. Na podstawie

wyników tych obliczeń wyznaczono przebiegi czasowe podstawowych wielkości elektrycznych i mechanicznych. W rozpatrywanym w pracy modelu układy regulacyjne pominięto, a tam gdzie to było niezbędne, ich działanie uwzględniono przyjmując do obliczeń odpowiednie wartości prądu wzbudzenia lub momentu.

2. MODEL POLOWO-OBWODOWY

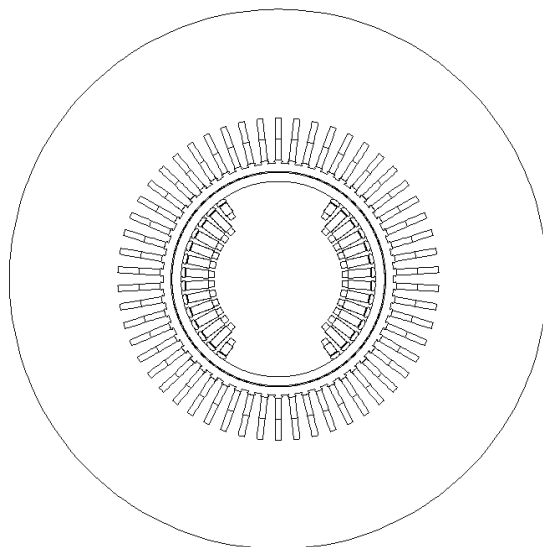
Do zamodelowania turbogeneratorsa wykorzystano pakiet „Flux” 9.2.2. Dane znamionowe maszyny zamieszczono w tabeli 1. Model symulacyjny maszyny składa się z dwóch części: polowej i obwodowej. W części polowej uwzględniającej rzeczywiste cechy fizyczne materiałów, rzeczywisty rozkład uzwojeń i obwodów tłumiących oraz ruch elementów w polu magnetycznym, rozwiązywane są równania pola elektromagnetycznego. W części obwodowej zawierającej elementy skupione odpowiadające uzwojeniom i obwodom obecnym w części polowej, których stan określają aktualne warunki elektromagnetyczne określone w części polowej, rozwiązywane są równania napięciowo-strumieniowe.

Tabela 1. Dane znamionowe turbogeneratorsa
Table 1. Rated parameters of the turbogenerators

Moc znamionowa	MVA	500
Napięcie stojana	kV	21
Prąd stojana	kA	13,7
Prąd wzbudzenia	kA	4,5
Prędkość znamionowa	obr/min	3000
Częstotliwość znamionowa	Hz	50
Moment znamionowy	MNm	1,3

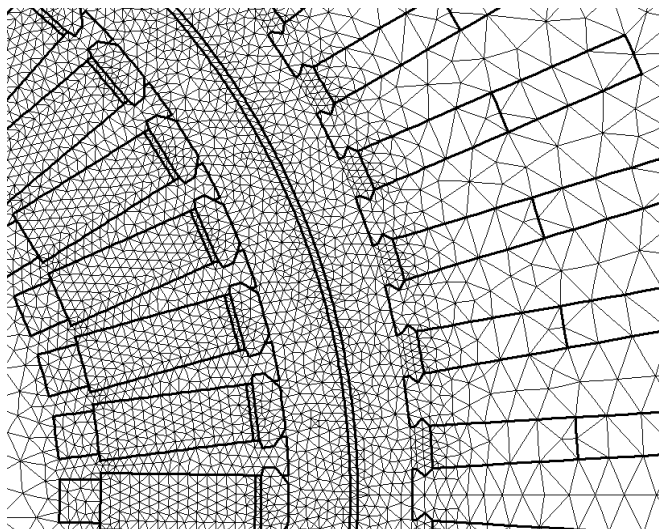
Część obwodowa zawiera również elementy obwodów zewnętrznych, źródła napięć bądź prądów i elementy uzwojeń maszyny z natury rzeczy pomijane w dwuwymiarowym modelu polowym (np. reaktancje i rezystancje połączeń czołowych). Parametry obwodowe w tym modelu nie są transformowane transpozycją Park’a. Modelowanie dotyczy więc obwodów i uzwojeń naturalnych. W litych elementach przewodzących uwzględniane jest zjawisko wypierania prądu.

Modelowany turbogenerators jest maszyną dwubiegunową. Stojan maszyny zawiera dwuwarstwowe uzwojenie, o dwóch gałęziach równoległych, umieszczone w 54 żłobkach. Na wirniku, oprócz uzwojenia wzbudzenia, znajduje się również klatka tłumiąca zbudowana z klinów żłobków uzwojenia wzbudzenia. Przekrój maszyny przedstawiono na rysunku 1.



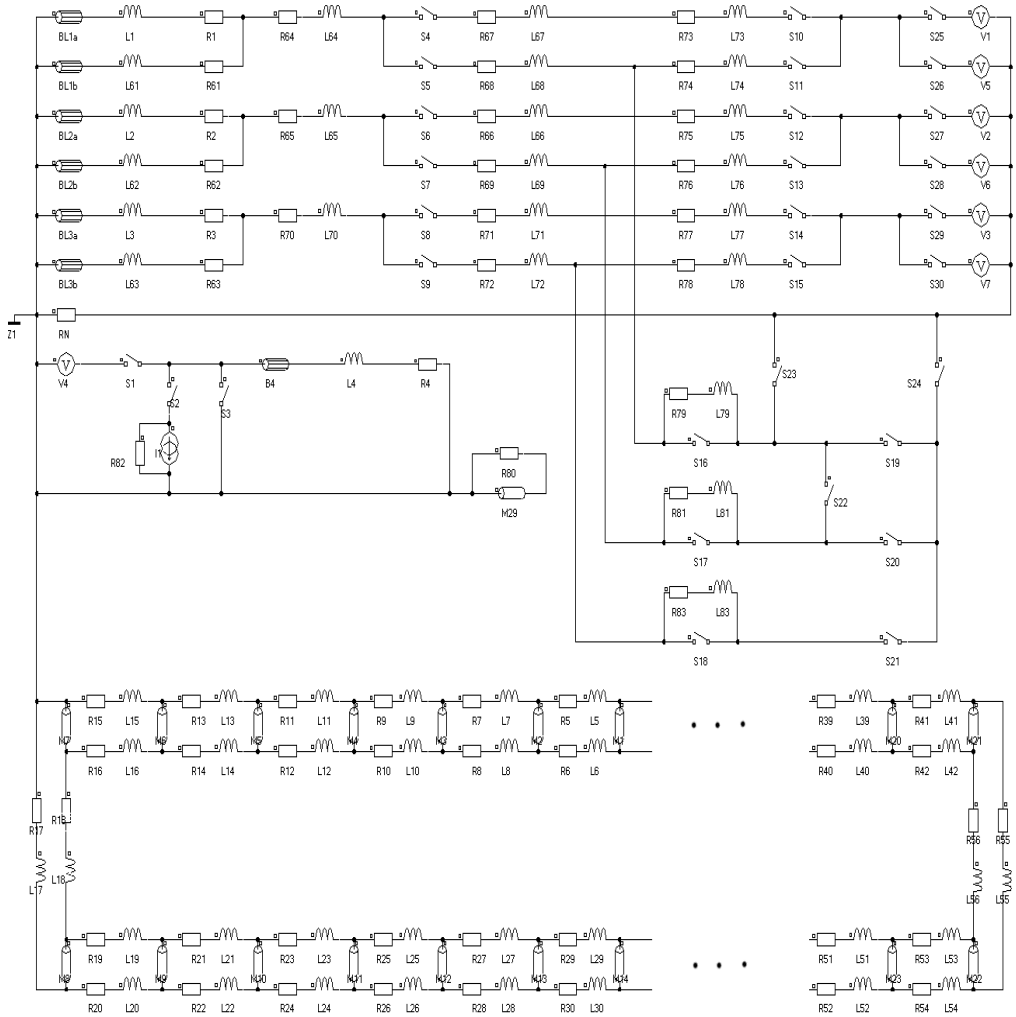
Rys. 1. Przekrój poprzeczny modelu turbogenerators
Fig. 1. Cross-section of the turbogenerator model

Obliczenia polowe wykonano metoda elementów skończonych. W modelu polowym siatka dyskretyzująca zbudowana z trójkątnych elementów drugiego rzędu składa się z 83 000 węzłów. Fragment siatki dyskretyzacyjnej przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Fragment siatki dyskretyzacyjnej
Fig. 2. Part of the discretization mesh

Model obwodowy przedstawiony na rysunku 3 odwzorowuje rzeczywisty schemat połączeń uzwojeń oraz obwodów tłumiących w maszynie. Poza elementami reprezentującymi uzwojenia (BL1–BL3), lite elementy przewodzące (M1–M28), źródła napięciowe (V1–V7) lub prądowe (I1) model obwodowy zawiera elementy reprezentujące połączenia czołowe uzwojenia stojana oraz wzbudzenia, w postaci rezystancji i indukcyjności (L1, R1–L63, R63). Analogicznie przedstawione są wycinki pierścienia zwierającego pręty klatki tłumiącej.

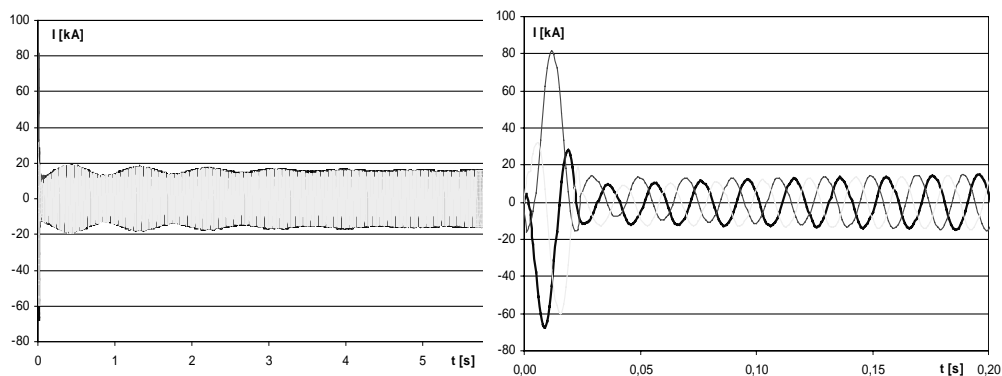


Rys. 3. Część obwodowa modelu maszyny
Fig. 3. Circuit part of the machine model

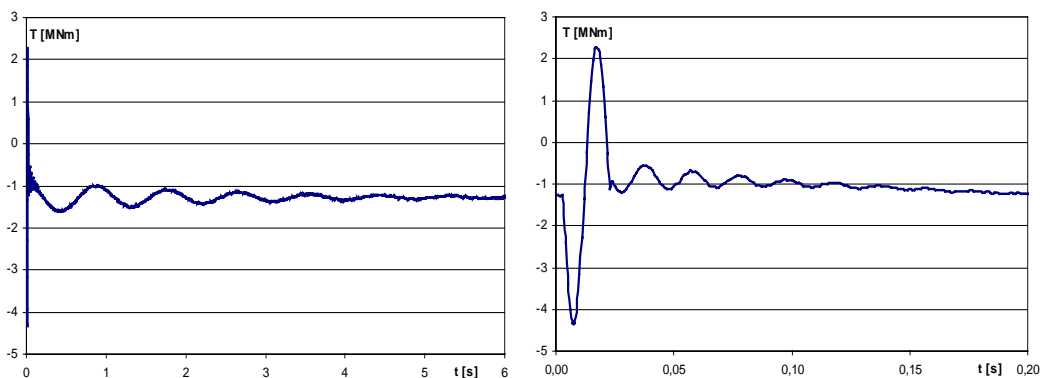
3. WYNIKI OBLICZEŃ

Podczas pracy znamionowej turbogenerators, pracującego poczatkowo w stanie ustalonym, zostało zasymulowane trójfazowe zwarcie symetryczne poprzez zwarcie jednego z torów linii przesyłowej. Po określonym czasie uszkodzony tor zostaje odłączony. W wyniku symulacji obliczone zostały przebiegi prądów w uzwojeniach twornika, prędkość oraz moment elektromagnetyczny na wale.

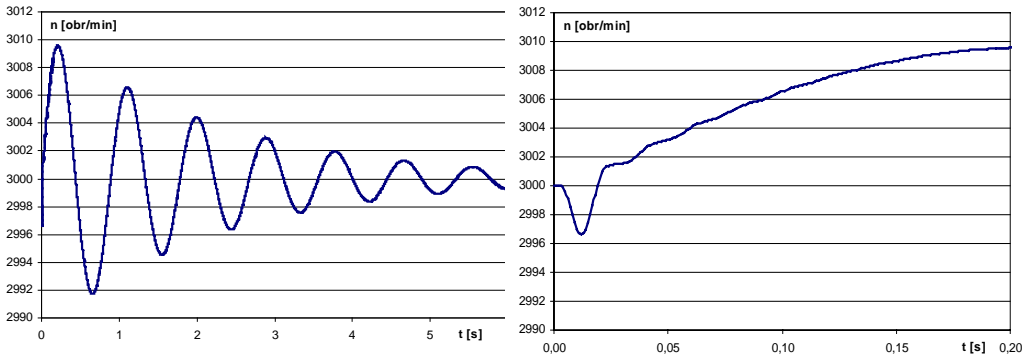
W obliczeniach uwzględniono rzeczywisty moment bezwładności turbozespołu. Uzyskane wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4–6.



Rys. 4. Prąd stojana dla zwarcia 3-fazowego
Fig. 4. Stator current for 3-phase short circuit



Rys. 5. Moment elektromagnetyczny dla zwarcia 3-fazowego
Fig. 5. Electromagnetic torque for 3-phase short circuit



Rys. 6. Prędkość obrotowa dla zwarcia 3-fazowego
Fig. 6. Rotating speed for 3-phase short circuit

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na możliwość zastosowania modelowania połowo-obwodowego maszyn największej mocy, jakimi są turbogeneratory, do analizy niestabilnych stanów pracy w systemie elektroenergetycznym.

Bardzo duża bezwładność układu turbogeneratora i turbiny parowej uniemożliwiają, pomimo dużych zmian momentu elektromagnetycznego, powstanie gwałtownych zmian prędkości, co sprzyja utrzymaniu maszyny w synchronizmie po odłączeniu zakłócenia. Zakłócenia takie powodują powstanie udarów prądów i momentu oraz kołysań maszyny w systemie elektroenergetycznym. Jeżeli pozostałe generatory w systemie poddane są kołysaniom, zwarcia na linii zasilającej badanego generatora mogą przyczynić się do utraty stabilności systemu.

Opracowany model turbogeneratora zweryfikowany obliczeniami parametrów i charakterystyk pozwala poprawnie odwzorować zjawiska zachodzące w maszynie w stanach ustalonych oraz przejściowych. Przy użyciu tego modelu można badać stabilność pracy maszyny synchronicznej przy dowolnych zakłóceniach.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2009 jako projekt badawczy Nr N511 021 32/4169.

LITERATURA

- [1] ANDERSON P., FOUAD A., *Power system control and stability*, IEEE Press, New York 2003
- [2] DEMENKO A., *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2004
- [3] GORDON R., AWAD S., AWAD M., *On equivalent circuit modeling for synchronous machines*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, No. 4, December 1999, Pages 982–988

- [4] *IEEE Guide for operation and maintenance of turbine generators*, IEEE Std 67-1990, New York 1990
- [5] *IEEE Guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses*, IEEE Std 1110-2002, New York 2003
- [6] MACHOWSKI J., BIALEK J., BUMBY J., *Power system dynamics and stability*, John Wiley & Sons, Chichester 1997
- [7] ROGERS G., *Power system oscillations*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts 2000

FIELD-CIRCUIT MODELLING APPLIED TO TRANSIENT STATES ANALYSIS OF TURBOGENERATOR

The paper presents procedure of transient states analysis in the 500 MVA turbogenerator work in power system using field-circuit modelling. There were placed the example transients of currents, electromagnetic torque and rotating speed. It is possible to observe magnetic shielding of dumping circuits on the basis of field distribution.