

Andrzej BOBOŃ, Jerzy KUDŁA
Stefan PASZEK, Aleksander ŻYWIEC

BADANIA SYMULACYJNE STANÓW DYNAMICZNYCH ZESPOŁU PRĄDOTWÓRCZEGO
AWARYJNEGO ZASILANIA URZĄDZEŃ POTRZEB WŁASNYCH
W ELEKTROWNIACH ATOMOWYCH

Streszczenie: Przedstawiono uproszczony model matematyczny zespołu prądotwórczego "Silnik Diesla - generator synchroniczny", stosowanego jako rezerwowe źródło zasilania napędów potrzeb własnych w elektrowniach atomowych. Uwzględniono tyrystorowe źródło wzbudzenia i regulator napięcia generatora synchronicznego oraz regulator prędkości silnika Diesla. Opracowany na podstawie uproszczonego modelu zespołu algorytm i program obliczeń numerycznych umożliwił wyznaczenie podstawowych wielkości charakteryzujących nieustalony stan dynamiczny zespołu prądotwórczego i silników indukcyjnych stanowiących jego obciążenie (przetężenia prądowe, przeciążenia momentem, odchyłki napięć i częstotliwości, przebiegi regulacyjne napięcia generatora i prędkości obrotowej silnika Diesla). Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla zespołu prądotwórczego o mocy 2,8 MW podczas sekwencyjnego załączania silników indukcyjnych. Zbadano wpływ zastosowanych uproszczeń modelu na przebiegi nieustalone w układzie.

1. Wprowadzenie

Rezerwowymi źródłami energii elektrycznej w elektrowniach atomowych są zespoły prądotwórcze złożone z silnika spalinowego Diesla oraz generatora synchronicznego. Zespoły te są stosowane w elektrowniach atomowych do zasilania urządzeń potrzeb własnych reaktora jądrowego, w skład których wchodzi: napędy pomp wody schładzającej, napędy wentylatorów, urządzenia sygnalizacyjne i sterownicze.

Zespołom prądotwórczym stawia się wysokie wymagania techniczne zarówno pod względem jakości dostarczanej energii elektrycznej, przy czym przez jakość rozumie się tutaj dotrzymanie przez zespół zadanych wartości takich parametrów, jak napięcie, częstotliwość w ustalonych stanach pracy oraz dopuszczalne odchyłki napięcia, częstotliwości, również czasy regulacji napięcia i częstotliwości w stanach nieustalonych.

Z przedstawionych powodów wynika konieczność przeprowadzania badań symulacyjnych pracy tych układów już na etapie projektowania (doboru urządzeń potrzeb własnych, określenie harmonogramu załączeń elementów w stanach awaryjnych). Badania symulacyjne powinny umożliwić wyznaczenie:

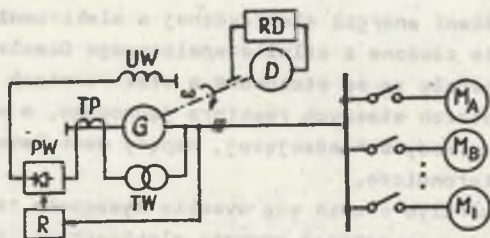
- przetężeń prądowych oraz przeciążeń momentem elementów wchodzących w skład układu (generator synchroniczny, silniki indukcyjne, silnik Diesla),
- odchyłek napięć i częstotliwości generatora synchronicznego,
- przebiegów regulacyjnych napięcia generatora oraz prędkości obrotowej silnika Diesla.

Do wyznaczenia wszystkich tych wielkości można stosować modele matematyczne maszyn elektrycznych odwzorowujące zarówno szybkozmienne procesy elektromagnetyczne, jak i wolnozmienne procesy mechaniczne [1]. Stosowanie takich modeli matematycznych maszyn do obliczeń cyklu załączenia trwającego kilkadziesiąt sekund i obejmującego włączenie kilku lub kilkunastu silników indukcyjnych dużej mocy związane jest z dużymi nakładami na obliczenia cyfrowe, co dla pracy projektanta jest niedopuszczalne. Stąd wynika konieczność opracowania modeli uproszczonych układu, które by w sposób wierny określały podstawowe parametry układu (odchyłki napięcia, częstotliwości, czasy regulacji).

W pracy przedstawiono model uproszczony zespołu prądotwórczego, przeprowadzono porównanie wyników badań symulacyjnych przy wykorzystaniu modeli dokładnych i uproszczonych oraz przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla zadanego cyklu załączenia.

2. Modele matematyczne elementów wchodzących w skład zespołu prądotwórczego

W skład zespołu prądotwórczego (rys. 1) wchodzi następujące elementy: silnik spalinowy Diesla wraz z regulatorem prędkości obrotowej, generator



Rys. 1. Schemat zespołu prądotwórczego obciążonego grupą silników indukcyjnych

G - generator synchroniczny, D - silnik Diesla, MA, MB, ..., MI - silniki indukcyjne, UW - uzwojenie wzbudzenia, TW - transformator wzbudzenia, TP - transformator prądowy, PW - prostownik wzbudzenia, R - regulator napięcia, RD - regulator prędkości silnika Diesla

Fig. 1. Block diagram of the generating set loaded with the group of induction motors

G - synchronous generator, D - Diesel engine, MA, MB, ..., MI - induction motors, UW - field winding, TW - field transformer, TP - current transformer, PW - field rectifier, R - voltage regulator RD - diesel speed governor

synchroniczny wraz z regulatorem napięcia i tyrystorowym źródłem wzbudzenia oraz silniki indukcyjne jako obciążenie.

2.1. Uproszczony model matematyczny generatora synchronicznego

Klasyczny model matematyczny generatora synchronicznego (model pełny) wyprowadza się w układzie współrzędnych Parka przy uwzględnieniu dwóch zastępczych obwodów tłumiących w osiach d , q wirnika [1]. Uproszczony model uzyskuje się przy pominięciu w równaniach napięciowych twornika, napięć transformacji ($\frac{d\Psi_d}{dt} \approx \frac{d\Psi_q}{dt} \approx 0$).

Przyjmując jako zmienne stanu strumienie skojarzone z obwodami wirnika, model matematyczny generatora synchronicznego ma postać [4]:

- równania obwodów twornika

$$U_d = E_d'' - \omega_G L_q'' I_q + I_d R, \quad (2.1)$$

$$U_q = E_q'' + \omega_G L_d'' I_d + I_q R, \quad (2.2)$$

- równania obwodów wirnika

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{T_{do}} \left\{ E_{q0} - E_q' + \omega_G (L_d - L_d') I_d - [E_q' - E_q'' + \omega_G (L_d' - L_d'') I_d] k_2 \right\}, \quad (2.3)$$

$$\frac{dE_d''}{dt} = \frac{1}{T_{do}} \left\{ [E_{q0} - E_q' + \omega_G (L_d - L_d') I_d] k_1 + [E_q' - E_q'' + \omega_G (L_d' - L_d'') I_d] k_3 \right\}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dE_d''}{dt} = - \frac{1}{T_{q0}} \left\{ E_d'' + \omega_G (L_q - L_q'') I_q \right\}, \quad (2.5)$$

- równanie ruchu mechanicznego

$$\frac{J}{p_b} \cdot \frac{d\omega_G}{dt} = M_{eG} + M_{mD}, \quad (2.6)$$

$$M_{eG} = \frac{p_b}{\omega_G} [E_q'' I_q + E_d'' I_d + \omega_G (L_d'' - L_q'') I_d I_q], \quad (2.7)$$

gdzie:

$$E_{q0} = \omega_G \frac{L_{ad}}{R_f} U_f; \quad k_1 = \frac{T_{do}''}{T_{do}} \cdot \frac{L_{ad} - L_d + L_d''}{L_{ad} - L_d + L_d''}$$

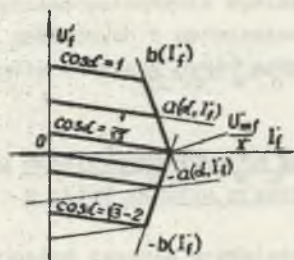
$$k_2 = \frac{L_d - L_d'}{L_{ad} - L_d + L_d'}; \quad k_3 = 1 - k_1 k_2.$$

Jako oznaczenia przyjęto:

- $U_d, U_q, I_d, I_q, E_d^*, E_q^*, E_f'$ - napięcia, prądy osiowe twornika, napięcia podprzejściowe i przejściowe w osiach d, q maszyny,
- U_f' - napięcie uzwojenia wzbudzenia sprowadzone na stronę twornika,
- M_{eG}, M_{mD} - moment elektromagnetyczny generatora, moment mechaniczny silnika Diesla,
- ω_G, P_b, J - elektryczna prędkość kątowa wirnika, liczba par biegunów generatora, moment bezwładności zespołu prądotwórczego,
- $L_d, L_d', L_d'', L_q, L_q', L_q'', L_{ad}, R, R_f', T_{do}', T_{do}'', T_{qo}'$ - parametry generatora.

2.2. Model matematyczny układu wzbudzenia i regulacji napięcia generatora synchronicznego

W skład układu wzbudzenia generatora wchodzi prostownik tyrystorowy wzbudzenia zasilany napięciem generatora w układzie szeregowej kompaundacji fazowej. Do analizy przyjęto uproszczony model prostownika tyrystorowego



Rys. 2. Uproszczone charakterystyki statyczne prostownika tyrystorowego

Fig. 2. Simplified static characteristics of the thyristor rectifier

wyrażający związki pomiędzy uśrednionymi za 1/6 okresu wartościami prądu i napięcia prostownika dla danego kąta wysterowania α .

Zakres zmienności napięcia wzbudzenia w zależności od prądu wzbudzenia i kąta wysterowania α określony jest przez rodzinę charakterystyk statycznych prostownika, których uproszczony przebieg przedstawiono na rys. 2.

Napięcie wzbudzenia (sprowadzone) wyznaczane jest z następujących zależności:

$$U_f^* = \min \left\{ a(\alpha, I_f^*); a(\alpha=0, I_f^*); b(I_f^*) \right\} \quad \text{dla } a(\alpha, I_f^*) \geq 0 \quad \left. \vphantom{U_f^*} \right\} \quad \text{dla } 0 \leq I_f^* < \frac{U_{mf}^*}{X'} \\ U_f^* = \max \left\{ a(\alpha, I_f^*); -a(\alpha=0, I_f^*); -b(I_f^*) \right\} \quad \text{dla } a(\alpha, I_f^*) < 0 \quad \left. \vphantom{U_f^*} \right\} \quad (2.8)$$

$$U_f^* = -R_d I_f^* \quad \text{dla } I_f^* < 0$$

$$U_f^* = 0 \quad \text{dla } I_f^* \geq \frac{U_{mf}^*}{X'}$$

gdzie:

$$a(\alpha, I_f^*) = \frac{3}{\pi} (\sqrt{3} U_{mf}^* \cos\alpha - X^* I_f^*),$$

$$b(I_f^*) = \frac{9}{\pi} (U_{mf}^* - X^* I_f^*).$$

Wartość maksymalna napięcia zasilania prostownika U_{mf}^* sprowadzona na stronę twornika wynosi:

$$U_{mf}^* = \xi_f \sqrt{\frac{2}{3} [(k_u U_d - k_i I_d)^2 + (k_u U_q + k_i I_d)^2]}, \quad (2.9)$$

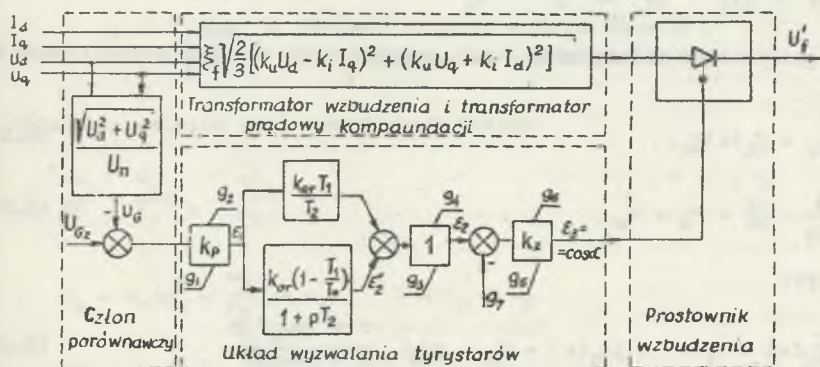
gdzie:

ξ_f - współczynnik sprowadzenia wielkości wirnika na stronę twornika,

X^*, R_D - reaktancja obwodu komutacji prostownika (sprowadzona) oraz zastępcza rezystancja tyrystora w stanie nieprzewodzenia,

k_u, k_i - parametry charakteryzujące transformator wzbudzenia i układ kompaundacji.

Układ regulacji napięcia oddziałujący na kąt wysterowania tyrystorów prostownika przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat prostownikowego układu wzbudzenia generatora z regulatorem napięcia

Fig. 3. Block diagram of the generator thyristor excitation system with voltage regulator

Równania opisujące pracę układu mają postać:

$$\frac{dE_2^*}{dt} = \frac{1}{T_2} \left[E_1 k_{ar} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) - E_2^* \right] \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_1 = k_p (U_{GZ} - U_G) \quad g_1 \leq \varepsilon_1 \leq g_2 \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 k_{ar} \frac{T_1}{T_2} + \varepsilon_2^* \quad g_2 \leq \varepsilon_2 \leq g_4 \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_3 = k_z (\varepsilon_2 - g_7) \quad g_5 \leq \varepsilon_3 \leq g_6 \quad (2.13)$$

gdzie:

U_G, U_{GZ} - napięcie generatora oraz napięcie zadane w jedn. wzgl.,

U_n - napięcie znamionowe generatora,

$k_{ar}, k_p, k_z, T_1, T_2$ - parametry regulatora napięcia,

g_1, \dots, g_6 - ograniczenia zmiennych $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$.

2.3. Uproszczony model matematyczny maszyny indukcyjnej

Przyjęto do rozważań uproszczony model matematyczny silnika indukcyjnego w układzie współrzędnych $(x, y, 0)$ wirującym z prędkością ω_G względem stojana. Uwzględniono jeden zastępczy obwód w wirniku i pominięto napięcia transformacji w stojanie i w wirniku ze względu na nierówności

$$\frac{d\Psi_1}{dt} \ll \omega_G \Psi_1, \quad \frac{d\Psi_2}{dt} \ll (\omega_G - \omega) \Psi_2.$$

Przy powyższych założeniach model matematyczny silnika indukcyjnego ma postać:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1(s) \underline{I}_1, \quad (2.14)$$

$$\frac{J}{p_b} \cdot \frac{ds}{dt} = M_e + M_m, \quad (2.15)$$

przy czym:

$$\underline{Z}_1(s) = R_1(s) + jX_1(s) = R_1 + j\omega_G L_1 \frac{1 + js\omega_G T_2 \sigma}{1 + js\omega_G T_2} \quad (2.16)$$

$$M_e = p_b L_1 (1 - \sigma) I_1^2 \frac{1}{s\omega_G T_2 + s\omega_G T_2} \quad (2.17)$$

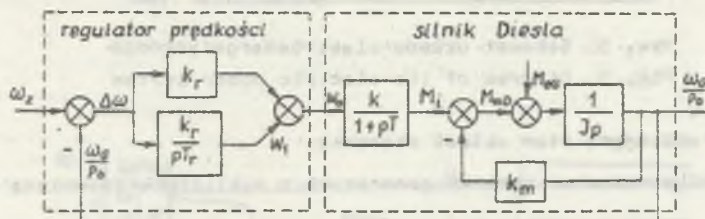
$$s = \frac{\omega_G - \omega}{\omega_G}, \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_1^2}{L_1 L_2}.$$

gdzie:

- $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ - kompleksory (wielkości uogólnione) napięcia i prądu stojana,
- R_1, R_2, L_1, L_2 - rezystancje i indukcyjności całkowite obwodów stojana (1) i wirnika (2),
- L_μ - indukcyjność magnesowania,
- M_e, M_m - moment elektromagnetyczny i mechaniczny silnika,
- ω, p_b, J - prędkość kątowa wirnika, liczba par biegunów, moment bezwładności.

2.4. Model matematyczny silnika Diesla z regulatorem prędkości

Model matematyczny silnika Diesla wynika ze schematu blokowego przedstawionego na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy silnika Diesla

Fig. 4. Block diagram of the Diesel engine

Równania silnika mają następującą postać:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{k_r}{T_r} \left(\omega_z - \frac{\omega_G}{P_b} \right)$$

$$\omega_o = k_r \left(\omega_z - \frac{\omega_G}{P_b} \right) + \omega_1, \quad 0 \leq \omega_o \leq \omega_D$$

$$\frac{dM_1}{dt} = \frac{1}{T} (k\omega_o - M_1)$$

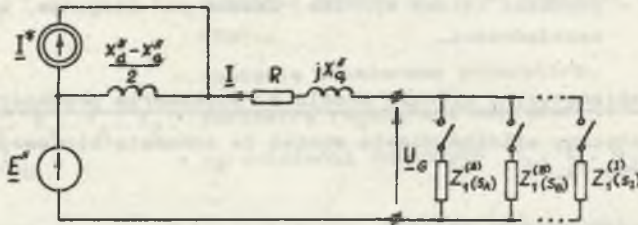
$$M_{mD} = M_1 - k_m \frac{\omega_G}{P_b}, \quad M_{mD} \leq M_D$$

gdzie:

- k, k_r, k_m, T_r, T - parametry silnika Diesla z regulatorem prędkości,
- ω_z - zadana prędkość kątowa mechaniczna,
- M_D - maksymalna wartość momentu silnika Diesla.

3. Model matematyczny układu elektroenergetycznego podczas sekwencyjnego załączania obciążenia

Przy przyjętych założeniach upraszczających przedstawionych w rozdziale 2 sekwencyjne załączanie obciążenia (w postaci silników indukcyjnych) zostało sprowadzone do załączania na zaciski generatora impedancji zależnych od poślizgu (rys. 5).



Rys. 5. Schemat układu elektroenergetycznego
Fig. 5. Diagram of the electric power system

Równania opisujące stan układu stanowią:

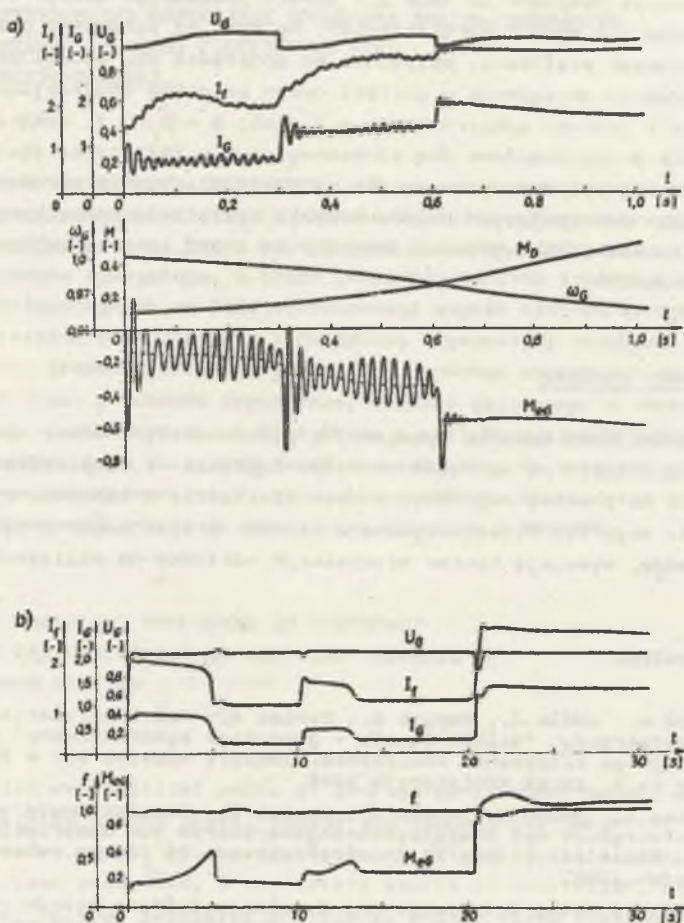
- równania algebraiczne twornika generatora z cyklicznie zmienianą impedancją,
- równania różniczkowe obwodów wirnika generatora,
- równania algebraiczno-różniczkowe regulatora napięcia generatora,
- równania algebraiczno-różniczkowe silnika Diesla wraz z regulatorem prędkości obrotowej,
- równanie różniczkowe ruchu opisujące ruch maszyn indukcyjnych cyklicznie włączanych do układu.

Rozwiązania równań dokonano za pomocą maszyny cyfrowej. Przy całkowaniu równań różniczkowych korzystano ze zmodyfikowanej metody Eulera II rzędu.

4. Wyniki badań symulacyjnych stanów dynamicznych zespołu prądowórczego

Na podstawie przedstawionych modeli matematycznych układu opracowano algorytm i program obliczeń na maszynie cyfrową. Przeprowadzono obliczenia dla generatora synchronicznego o danych:

$$S_n = 3,5 \text{ MVA}, U_n = 6 \text{ kV}, I_n = 321 \text{ A}, \cos \varphi_n = 0,81, I_{fn} = 250 \text{ A}, \\ n_n = 600 \frac{\text{obr.}}{\text{min.}}$$



Rys. 6. Przebiegi czasowe amplitudy napięcia U_G , prądu twornika I_G , prądu wzbudzenia I_f , momentu elektromagnetycznego generatora M_{eG} , momentu Diesla M_D , prędkości ω_G zespołu, częstotliwości napięcia f podczas sekwencyjnego załączania obciążenia

a) porównanie wyników obliczeń dla modeli dokładnych (—) i uproszczonych (- - - - -), b) wyniki obliczeń dla modeli uproszczonych i dla realnych czasów trwania cyklu załączania obciążenia

Fig. 6. Transients of voltage amplitude U_G , armature current I_G , field current I_f , generator electromagnetic moment M_{eG} , diesel moment M_D , rotational speed ω_G , voltage frequency f during sequential switching of load

a) comparison of computation results for accurate models (—) and simplified models (- - - - -), b) computation results for simplified models and true durations of the load switching cycle

Obliczenia wykonano zarówno dla modeli dokładnych maszyn elektrycznych, jak również dla modeli uproszczonych. Na rys. 6a porównano przebiegi czasowe wybranych wielkości, obliczone na podstawie obu modeli przy cyklicznym załączaniu obciążenia w postaci dwóch silników indukcyjnych o mocach po 400 kW i jednego odbiornika RL o danych: $S = 2 \text{ MV A}$, $\cos\varphi = 0,4$. Obliczenia przeprowadzono dla skróconego cyklu załączania obciążenia.

Na rys. 6b przedstawiono wyniki obliczeń dla modeli uproszczonych i dla realnie występujących czasów trwania cyklu załączania obciążenia w postaci silników indukcyjnych o mocy 630 kW i 250 kW oraz odbiornika RL o mocy 2 MVA.

5. Uwagi końcowe

Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły znikomą rolę zastosowanych uproszczeń na wartości odchyłek napięcia i częstotliwości w układzie oraz na procesy regulacyjne tych wielkości. W konsekwencji uproszczone modele mogą być wykorzystywane w biurach projektowych przy projektowaniu układów, wymagając bowiem niewielkich nakładów na obliczenia cyfrowe.

LITERATURA

- [1] Boboń A., Kudła J., Paszek S., Żywiec A.: Model matematyczny zespołu prądowłórczego "Silnik Diesla - generator synchroniczny" podczas sekwencyjnego załączania obciążenia. Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, Matematyka z. 9, seria Konferencja 1985.
- [2] Żywiec A., Boboń A., Kudła J., Paszek S.: Simulationsberechnung der Regelvorgänge von Dieselsynchronengeneratoren zur Reservespeisung von Eigenbedarfsantrieben in Atomkraftwerken. 31 Intern. wiss. Koll. TH Ilmenau 1986.
- [3] Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Symulacja cyfrowa stanów nieustalonych w zespole prądowłórczym awaryjnego zasilania w elektrowniach jądrowych. Sympozjum "Symulacja procesów dynamicznych" SPD-3, Zakopane 1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Stein

wpłynęło do Redakcji 15 czerwca 1987 r.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА
АВАРИЙНОГО ПИТАНИЯ ПРИВОДОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД
В АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Резюме

Представлена приближенная математическая модель дизель-генератора, который является резервным источником питания приводов собственных нужд в атомных электростанциях. Учтен тиристорный источник возбуждения и регулятор напряжения генератора, а также регулятор частоты вращения дизель-генератора. Разработанные на базе приближенной модели системы алгоритм и программа численных расчетов дает возможность определения основных параметров переходного режима дизель-генератора и асинхронных двигателей являющихся его нагрузкой (токи и моменты перегрузки, падение напряжения и частоты, регулировочные кривые напряжения генератора и частоты вращения дизла). Представлены результаты численных расчетов генераторного агрегата мощностью 2,8 МВ во время последовательного включения нагрузки. Исследовано влияние применяемых упрощений модели на переходные процессы в системе.

MODELLING OF TRANSIENT PROCESSES IN EMERGENCY
POWER SUPPLY GENERATING SET OF AUXILIARY DEVICES
IN ATOMIC POWER STATION

Summary

A simplified mathematical model of the emergency power supply generating set consisted of the Diesel engine and synchronous generator and used as a reserve supply source of auxiliary drives in the atomic power stations has been presented. A thyristory source of excitation, synchronous generator voltage regulator and Diesel engine speed governor have been included in the set.

The algorithm and numerical calculations program worked out on the basis of the set simplified model enables to determine basic quantities characterizing dynamic transient of the generating set and induction motors as its load (overcurrents, torque overloads, voltage and frequency deviations, time functions of the generator voltage and Diesel engine speed).

The results of numerical calculations for the 2,8 MW generating set (obtained) during sequential switching on the induction motors have been presented.

An influence of the assumed model simplifications on the transients in the system has been examined.