

Michał FERENC
Politechnika Śląska, Gliwice

OBLICZANIE OBCIĄŻEŃ GRANICZNYCH ZESPOŁU PRĄDOWÓRCZEGO DO AWARYJNEGO ZASILANIA ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono wymagania stawiane spalinowym zespołom prądowórczym do awaryjnego zasilania elektrowni jądrowych, podano model matematyczny średnioobrotowego silnika wysokoprężnego, podano typowe wyniki obliczeń charakterystyki obciążeń granicznych zespołu prądowórczego oraz przebieg odchyłki częstotliwości po włączeniu pewnego obciążenia sekwencyjnego.

CALCULATIONS OF LIMITS LOADS OF GENERATING SET FOR EMERGENCY SUPPLY OF AN ATOMIC POWER STATION

Summary. The article shows the requirements which a combustion generating set for an emergency supply of an atomic power station is to fulfil, describes the mathematical model for calculations of engine speed course of a loaded engine and dives typical results of limit loads characteristics and the course of frequency derivations on attaching same required loading.

OZNACZENIA

- a_λ [-] - współczynnik we wzorze aproksymacyjnym do obliczania sprawności cieplnej silnika
- f [okr/s] - częstotliwość prądu wytwarzanego przez generator
- I [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$] - masowy moment bezwładności wału silnika i generatora
- i_c [-] - liczba cylindrów silnika
- L_t [kg pow / g pal] - teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania
- M_e [Nm] - moment obrotowy silnika
- M_i [Nm] - moment indykowany (wewnętrzny) silnika

M_m [Nm]	-	moment strat mechanicznych silnika
M_G [Nm]	-	moment na wale generatora
n [obr/min]	-	prędkość obrotowa silnika
p_{ot} [Pa]	-	ciśnienie otoczenia
p_c [Pa]	-	średnie ciśnienie użyteczne silnika
p_d^* [Pa]	-	ciśnienie doładowania wynikające z charakterystyki statycznej (ciśnienie manometryczne)
p_d [Pa]	-	ciśnienie doładowania silnika (manometryczne)
p_{dl} [Pa]	-	ciśnienie doładowania pośrednie wynikające z przyjętej metody aproksymacji charakterystyki dynamicznej układu doładowania silnika (ciśnienie manometryczne)
p_L [Pa]	-	ciśnienie doładowania silnika absolutne
P_G [W]	-	moc elektryczna czynna generatora
P [MW]	-	moc elektryczna początkowa (ustalona) generatora
P_r [MW]	-	moc rozruchowa (w czasie rozruchu silnika elektrycznego)
P_u [MW]	-	moc ustalona (generatora po rozruchu silnika elektrycznego)
R_L [J/kg K]	-	stała gazowa powietrza
t [s]	-	czas
T_L [K]	-	temperatura doładowania (bezwzględna)
T_L^* [K]	-	temperatura doładowania wynikająca z charakterystyki statycznej układu doładowania (bezwzględna)
T_1, T_2, T_3 [s]	-	stałe czasowe w układzie doładowania wyznaczone doświadczalnie
T_m [s]	-	opóźnienie czasowe wynikające z cykliczności zapłonów
V_B^* [m ³ /skok]	-	skokowa wydajność pompy wtryskowej wynikająca z charakterystyki statycznej
V_B [m ³ /skok]	-	skokowa wydajność pompy wtryskowej
V_H [m ³]	-	skokowa pojemność cylindra
w_d [kJ/kg]	-	wartość opałowa paliwa
WO [działki]	-	wskaźnik obciążenia (położenie listwy paliwowej)
λ [-]	-	współczynnik nadmiaru powietrza do spalania
η_c [-]	-	sprawność cieplna silnika

η_{cM} [-]	-	maksymalna sprawność cieplna silnika
η_G [-]	-	sprawność generatora
η_v [-]	-	sprawność napełnienia silnika
ω [rad/s]	-	prędkość kątowna wału silnika
ρ_B [kg/m ³]	-	gęstość paliwa
ρ_L [kg/m ³]	-	gęstość powietrza

1. WYMAGANIA STAWIANE ZESPOŁOM PRĄDOTWÓRCZYM DO AWARYJNEGO ZASILANIA ELEKTROWNI JĄDROWYCH

Zespoły prądotwórcze służące do awaryjnego zasilania elektrowni jądrowej powinny spełniać następujące wymagania:

- elektrownia jądrowa powinna mieć 3 zespoły prądotwórcze w każdej chwili gotowe do rozruchu,
- obciążenie przyjmuje tylko jeden zespół prądotwórczy ten który pierwszy osiągnął parametry znamionowe,
- po upływie 10 sekund od chwili awarii częstotliwość (prędkość obrotowa) i napięcie elektryczne powinny osiągnąć wartości znamionowe,
- statyczny błąd regulacji (statyzm regulacji) prędkości obrotowej ma być równy 0 %,
- po włączeniu obciążenia maksymalna odchyłka częstotliwości nie może przekroczyć 5 % wartości znamionowej (równej 50 Hz),
- czas stabilizacji częstotliwości - liczony od chwili włączenia obciążenia do osiągnięcia względnej odchyłki częstotliwości $\pm 1\%$ w odniesieniu do częstotliwości znamionowej - nie może przekroczyć 5 s,
- dla *pierwszego* włączenia obciążenia może być dopuszczony większy spadek częstotliwości (6 % do 10 %), wydłużony czas stabilizacji (7 s) oraz większy spadek napięcia elektrycznego (do 20 %).

2. MODEL MATEMATYCZNY DYNAMIKI SILNIKA WYSOKOPRĘŻNEGO

Matematyczny model dynamiki silnika jest przedstawiony w postaci schematu blokowego na rys.1. Dynamikę silnika opisują cztery różniczkowe równania stanu wraz z uzupeł-

niającymi je funkcjami wynikającymi z termodynamiki i charakterystyk statycznych silnika otrzymanych z pomiarów.

Równanie ruchu wału silnika i generatora

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{I} (M_e - M_G) \quad (1)$$

Równania dynamiki układu doładowania:

$$\frac{dp_{d1}}{dt} = \frac{1}{T_1} (p_d^* - p_{d1}) \quad (2)$$

$$\frac{dp_d}{dt} = \frac{1}{T_2} (p_{d1} - p_d) \quad (3)$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{T_3} (T_L^* - T_L) \quad (4)$$

Moment indykowany silnika jest obliczany ze wzoru (5).

$$M_i = \frac{i_c}{4\pi} W_d V_B \rho_B \eta_c \quad (5)$$

Skokowa wydajność pompy wtryskowej zależy od położenia listwy sterującej i jest przedstawiona w postaci charakterystyki (rys. 2). Charakterystykę sprawności cieplnej otrzymaną z pomiarów przedstawia (rys. 3). Opóźnienie czasowe T_m wynikające z cykliczności pracy silnika czterosuwowego jest określone nierównościami:

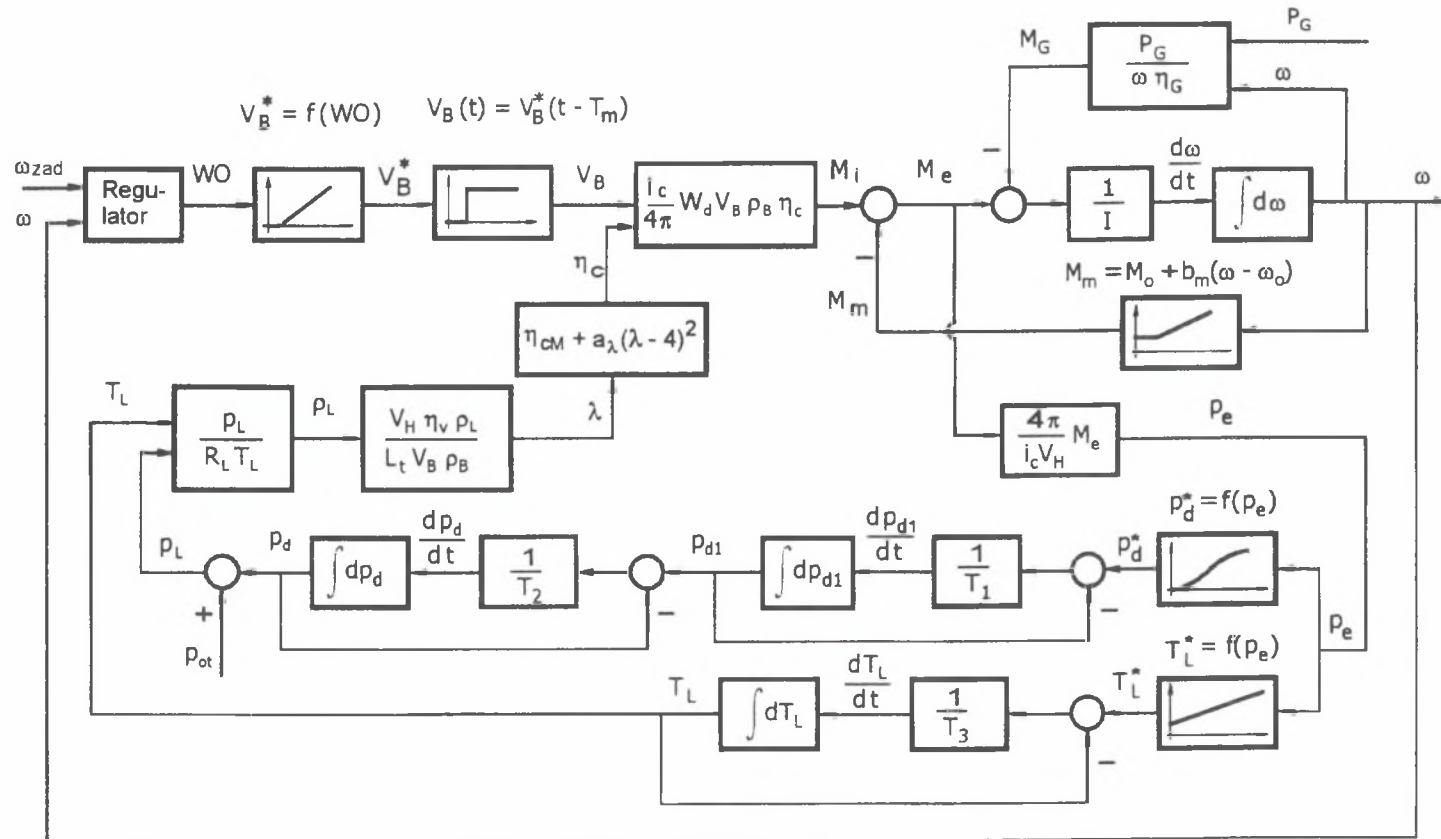
$$\frac{15}{n} < T_m < \frac{15}{n} + \frac{120}{n i_c} \quad (6)$$

Nadmiar powietrza do spalania i sprawność cieplna silnika są obliczane ze wzorów:

$$\eta_c = \eta_{cM} + a\lambda(\lambda - 4)^2 \quad (7)$$

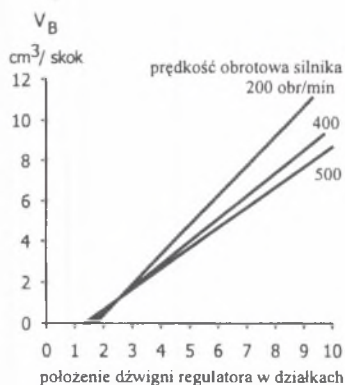
$$\lambda = \frac{V_H \eta_v \rho_L}{L_t V_B \rho_B} \quad (8)$$

$$\rho_L = \frac{p_d + p_{ot}}{R_L T_L} \quad (9)$$

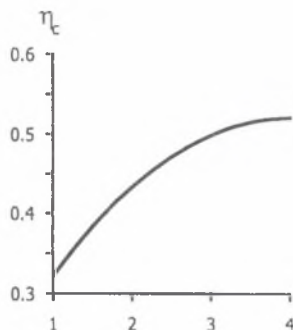


Rys. 1. Schemat blokowy pokazujący model matematyczny średnioobrotowego silnika wysokoprężnego.

Fig. 1. Blok diagram showing the mathematical model of a medium speed Diesel engine.

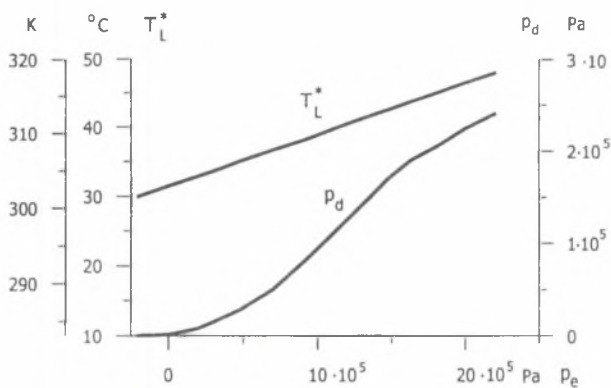


Rys. 2. Charakterystyka pompy wtryskowej
Fig. 2. Fuel pump characteristics



Rys. 3. Sprawność cieplna silnika
Fig. 3. Thermal efficiency of engine

Charakterystyki statyczne układu doładowania (ciśnienie i temperatura doładowania) są funkcjami średniego ciśnienia użytecznego (rys. 4). Funkcje te są przedstawione w postaci tabeli wczytywanej przez program, a wartości funkcji w punktach pośrednich są obliczane przez komputer metodą interpolacji.



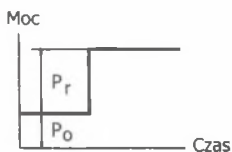
Rys. 4. Charakterystyki ciśnienia i temperatury doładowania
Fig. 4. Pressure and temperature charging characteristics

3. CHARAKTERYSTYKA OBCIĄŻEŃ GRANICZNYCH

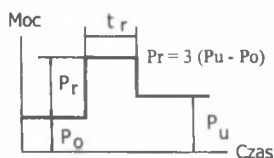
W celu sprawdzenia zdolności zespołu prądowórczego do przyjmowania zmiennych obciążeń wykonuje się obliczenia obciążeń granicznych dla różnych wartości obciążenia początkowego. Obciążenie graniczne jest to maksymalny przyrost mocy elektrycznej o typ-

wym przebiegu czasowym, dla którego są spełnione wymagania dotyczące odchyłki częstotliwości i czasu regulacji.

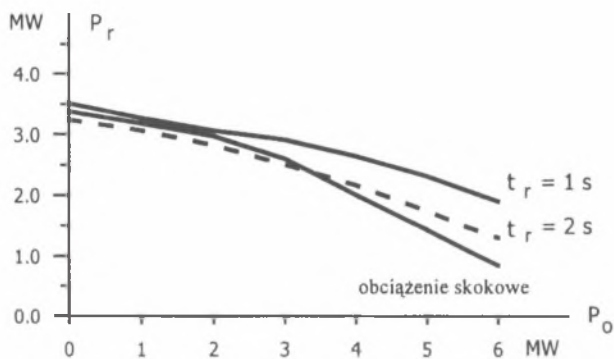
Charakterystyka obciążeń granicznych zespołu prądowórczego (rys. 5) przedstawia maksymalny (dopuszczalny) przyrost mocy jako funkcję mocy początkowej.



Rys. 5a. Skokowa zmiana obciążenia



Rys. 5b. Impulsowa zmiana obciążenia



Rys.5. Charakterystyka obciążeń granicznych
Fig. 5. Limit load characteristic

Załączenie silnika elektrycznego zasilanego przez zespół prądowórczy daje impulsowy przebieg mocy (rys. 5b). Wysokość, czas trwania impulsu i współczynnik mocy $\cos(\varphi)$ zależą od charakterystyki rozruchowej załączanego silnika. Czas trwania impulsów prostokątnych jest równy około 2 do 5 sekund. Największy spadek prędkości obrotowej uzyskuje się między 2 i 3 sekundą od chwili włączenia obciążenia.

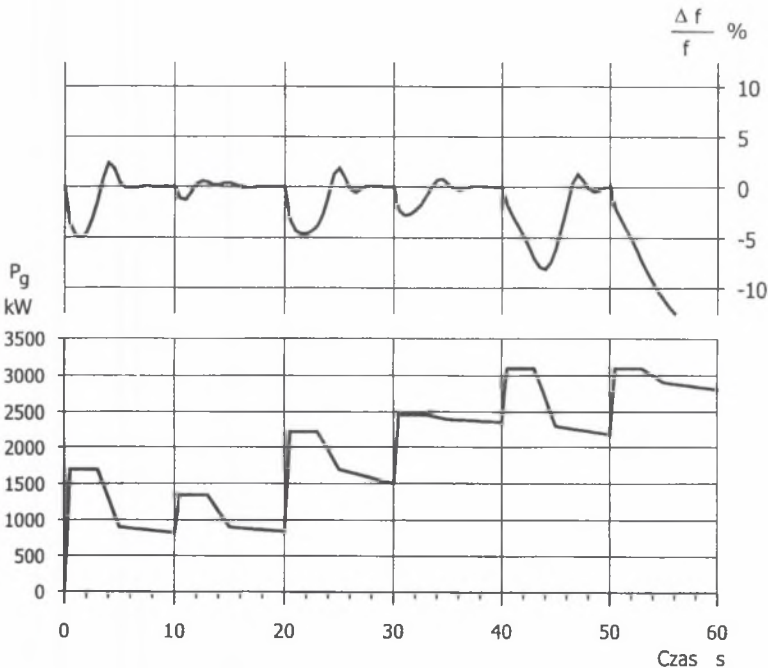
Załączenie odbiorników o stałym poborze mocy (oświetlenie, grzejniki elektryczne) daje skokowy przebieg zmiany mocy (rys. 5a). Skokowa zmiana obciążenia jest dla zespołu prądowórczego mniej korzystna w porównaniu z krótkotrwałymi obciążeniami impulsowymi.

4. OBLICZENIA DLA ZADANEGO OBCIĄŻENIA SEKWENCYJNEGO

Program obciążeń, czyli kolejność załączania silników elektrycznych napędzających pompy chłodzenia reaktora i innych napędów powinna być tak dobrana, aby zapewnić możliwości przyjęcia tego obciążenia przez zespół prądotwórczy przy zapewnieniu bezpieczeństwa reaktora. Do ułożenia programu obciążeń korzysta się z charakterystyki obciążeń granicznych zespołu prądotwórczego.

Przykład obciążenia sekwencyjnego oraz obliczony przebieg prędkości obrotowej (częstotliwości prądu generatora) przedstawia rys.6. Obciążenie 3,1 MW włączone w chwili $t = 40$ s spowodowało przekroczenie poniżej -5% dopuszczalnego spadku prędkości obrotowej, a po powtórnym włączeniu obciążenia 3,1 MW w chwili $t = 50$ s silnik wysokoprężny zaczął gasnąć.

Z załączonych obliczeń wynika, że należy zmienić program załączania odbiorników mocy lub zastosować silnik napędowy o większej mocy.



Rys. 6. Odchyłka częstotliwości po włączeniu obciążenia sekwencyjnego
Fig. 6. Frequency derivation on attaching sequential loading

5. ANALIZA DOKŁADNOŚCI MODELU

W modelu dynamiki silnika występuje wiele parametrów wyznaczanych doświadczalnie. Wartości tych parametrów są obarczone błędami pomiarowymi. W celu zbadania wpływu błędów parametrów modelu na wyniki obliczeń obciążeń granicznych wykonano badania wrażliwości modelu na zmianę jego parametrów [2].

Badania wrażliwości wykonano w ten sposób, że w modelu zmieniano wartość tylko jednego parametru i obliczano obciążenie graniczne silnika.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że na dokładność obliczenia obciążenia granicznego największy wpływ mają sprawność cieplna i ciśnienie doładowania. Błąd sprawności cieplnej silnika równy 5% powoduje niepewność obliczenia obciążenia granicznego równy średnio 10%. Błąd początkowej wartości ciśnienia doładowania ma duży wpływ na obliczone obciążenie graniczne przy zerowej mocy początkowej, bo wówczas występuje niedobór powietrza do spalania, natomiast przy dużych obciążeniach początkowych wpływ ten jest mały. Zmiana stałej czasowej układu doładowania o 30% powoduje zmianę obliczonego obciążenia granicznego o 5%.

6. WNIOSKI

Przedstawiony model matematyczny dynamiki średnioobrotowego silnika wysokoprężnego jest bardzo prosty, bo zawiera elementarne równania bilansu energii i strumienia powietrza doładowującego oraz doświadczalne charakterystyki statyczne: charakterystykę sprawności cieplnej silnika, charakterystykę sprawności generatora elektrycznego, charakterystyki ciśnienia i temperatury doładowania, charakterystykę pompy wtryskowej. Dzięki wprowadzeniu doświadczalnych charakterystyk ciśnienia i temperatury doładowania oraz wprowadzeniu dwóch stałych czasowych opisujących dynamikę układu doładowania udało się zrezygnować ze skomplikowanej i mało dokładnej procedury liczenia dynamiki układu doładowania opartej na bilansie mocy turbiny spalinowej i mocy sprężarki powietrza. Dokładność obliczeń dynamicznych jest tego samego rzędu co dokładność danych pomiarowych wprowadzonych do modelu. Przedstawiony model matematyczny i program komputerowy umożliwiają wykonanie obliczeń przebiegu prędkości obrotowej i częstotliwości prądu w zespołach prądotwórczych.

czych napędzanych średnioobrotowymi silnikami wysokoprężnymi dla dowolnego programu załączania odbiorników mocy.

LITERATURA

1. Ferenc M., Osuch W., Stokłosa H., *Uproszczony model matematyczny dynamiki średnioobrotowego silnika wysokoprężnego*, Silniki Spalinowe Nr 4/1989.
2. Ferenc M., Czechowicz Z., *Model matematyczny dynamiki średnioobrotowego silnika wysokoprężnego. Badanie wrażliwości na zmianę parametrów*, Praca BK, Bielsko-Biała 1995,

Recenzent: Dr hab. inż. Wojciech Siłka
Profesor Politechniki Opolskiej

Abstract

The article presents a mathematical model of dynamics Diesel engine. The model is used for calculation of safe loads diesel-electric generating sets. Diesel-electric generating sets of power 2.8 and 6.3 MW are used for safety of nuclear power plants.