ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria: ENERGETYKA z. 126 Nr kol. 1281

Michał FERENC

ZESPOŁY PRĄDOTWÓRCZE DO AWARYJNEGO ZASILANIA ELEKTROWNI JĄDROWYCH – OBLICZANIE DOPUSZCZALNYCH OBCIĄŻEŃ

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny dynamiki silnika wysokoprężnego. Model jest używany do obliczania dopuszczalnych obciążeń zespołów prądotwórczych. Zespoły prądotwórcze o mocy 2,8 i 6,3 MW są stosowane jako rezerwowe źródła prądu w elektrowniach jądrowych.

GENERATING SETS FOR EMERGENCY POWER SUPPLY OF NUCLEAR POWER STATION – CALCULATION OF PERMISSIBLE LOADS

Summary. In paper a mathematical model of Diesel engine dynamics has been presented. This model can be used to compute the permissible loads of a generating units. The generating sets of 2.8 MW and 6.3 MW can be used as reserve energy supply source.

STROMVERSORGUNGSSATZE ZUR EINSPEISUNG DER KERNKRAFTWERKEBERECHNUNG ZULÄSSIGEN BELASTUNGEN

Zusammenfassung. Im Aufsatz wurde ein mathematischer Modell des dynamischen Eigenschaften eines Dieselmotors dargestellt. Dieser Modell kann zur Berechnung der Zulässigen Belastungen von Stromerzeugung eingesetz werden. Diese Energiespeisungssätze mit einer Leistung von 2.8 i 6.3 MW dürfen als eine Reserve Notstromanlagen in verschiedenen Kernkraftwerken angewendet werden.

1. WSTĘP

Zespoły prądotwórcze złożone z generatora elektrycznego i średnioobrotowego silnika wysokoprężnego są stosowane w elektrowniach jądrowych jako rezerwowe źródło zasilania układów chłodzenia i innych urządzeń w przypad-

ku odcięcia dopływu prądu z sieci elektroenergetycznej. Zespoły prądotwórcze do awaryjnego zasilania EJ były wytwarzane w Polsce. Generatory były produkowane przez DOLMEL we Wrocławiu, a silniki wysokoprężne przez ZUT ZGODA w Świętochłowicach.

Zespoły z silnikami typu 6ZL40/48 mają moc znamionową 2,8 MW, a z silnikami typu 12ZV40/48 6,3 MW. Silnik takiego zespołu musi spełniać specjalne wymagania. Musi charakteryzować się on zdolnością do przyjmowania dużych obciążeń w krótkim przedziale czasu. Tę cechę uzyskuje sił dzięki dobrej dynamice układu doładowania charakteryzującego się szybkim wzrostem ciśnienia doładowania przy zwiększeniu obciążenia.

Czas rozruchu aż do osiągnięcia znamionowej prędkości obrotowej nie może być dłuższy niż 10 sekund. Wymaga się (wg normy USA), aby w czasie wrzutu obciążenia spadek prędkości obrotowej nie przekroczył 5% wartości znamionowej, a czas regulacji 5 sekund. Ze względu na ograniczone możliwości obciążenia silnika bardzo ważną rzeczą jest dobranie odpowiedniego programu załączania obciążeń, tak aby maksymalnie skrócić czas i równocześnie nie doprowadzić do przeciążenia i zgaśnięcia silnika. W ramach współpracy z ZUT ZGODA opracowano kilka wersji matematycznego modelu dynamiki średnioobrotowego silnika wysokoprężnego oraz odpowiednie programy komputerowe. Modele matematyczne zostały opisane w publikacjach [1 – 5].

Każdy model matematyczny tak złożonego obiektu, jak silnik wysokoprężny musi zawierać pewne parametry wyznaczane w wyniku badań ruchowych silnika. Ostatnia wersja modelu, przedstawiona w pracy [2], charakteryzuje się tym, że ilość koniecznych danych pomiarowych ograniczono do niezbędnego minimum, i równocześnie uzyskano zadowalającą wiarygodność wyników obliczeń.

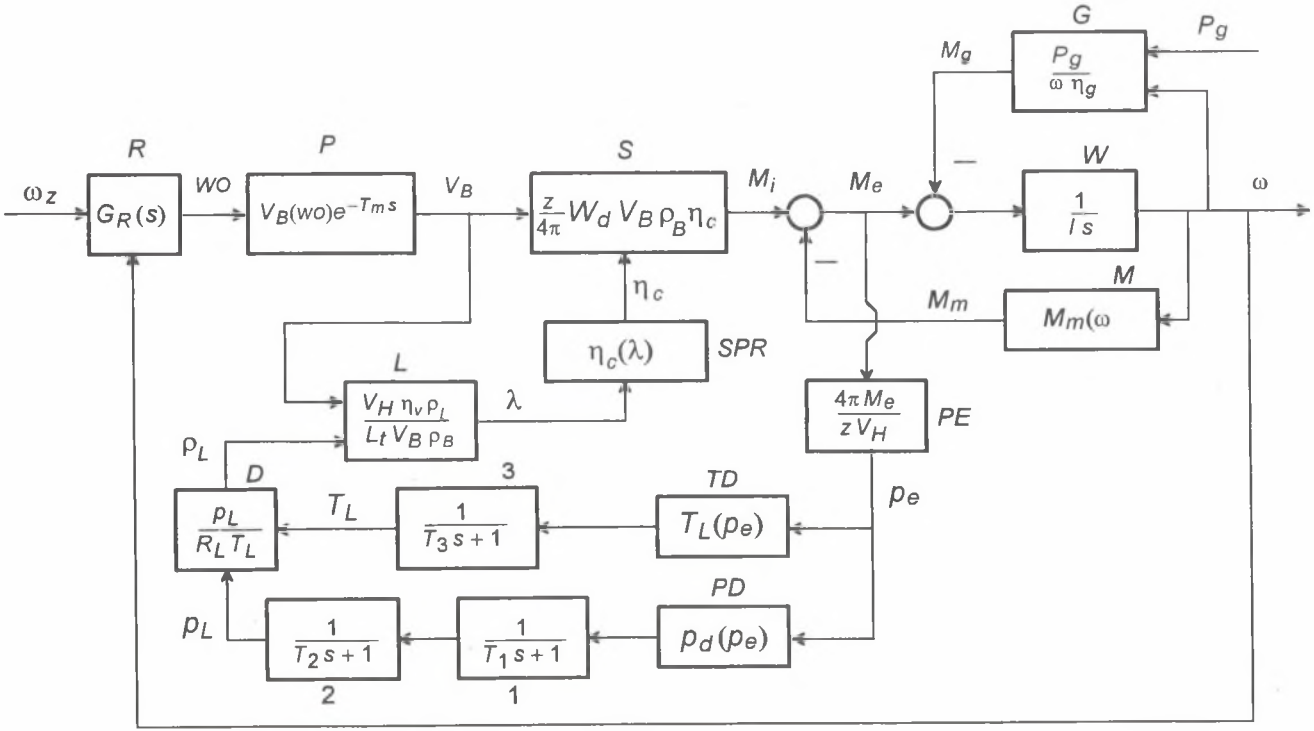
2. MODEL MATEMATYCZNY ZESPOŁU PRĄDOTWÓRCZEGO

Aktualnie używany program komputerowy SILNIK–G opisany w pracy [2] oparty jest na uproszczonym modelu dynamiki zespołu prądotwórczego opisanym w pracy [5].

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy zespołu prądotwórczego. Wewnątrz bloków wpisano funkcje realizowane przez te bloki.

Blok **R** reprezentuje dynamikę regulatora prędkości obrotowej. Stosowane są regulatory hydrauliczne firmy Woodward. Są to regulatory o algorytmie działania PI z siłownikiem hydraulicznym i odśrodkowym miernikiem prędkości obrotowej.

Blok **P** reprezentuje charakterystykę statyczną pompy wtryskowej oraz opóźnienie czasowe narastania momentu obrotowego silnika wynikające głównie z cykliczności zapłonów.



Rys. 1. Schemat blokowy zespołu prądotwórczego z silnikiem wysokoprężnym

Fig. 1. Block diagram of the generating sets with diesel engine

Blok **S** przedstawia zależność momentu obrotowego od doprowadzonej dawki paliwa i sprawności cieplnej silnika. Przyjęto, że sprawność cieplna silnika zależy tylko od nadmiaru powietrza do spalania.

Blok **W** przedstawia dynamikę wspólnego wału silnika i generatora.

Blok **M** przedstawia opory tarcia mechanicznego działające na wał silnika.

Blok **G** przedstawia zależność momentu oporu generatora od mocy czynnej generatora, prędkości obrotowej i współczynnika mocy cos φ (poprzez sprawność generatora).

W bloku **PE** oblicza się średnie ciśnienie użyteczne, które jest następnie wykorzystane w blokach TD i PD do obliczenia temperatury i ciśnienia doładowania z wzorów aproksymujących charakterystykę statyczną.

W stanie ustalonym temperatura i ciśnienia doładowania są funkcją obciążenia silnika, którego miarą jest średnie ciśnienie użyteczne. Dynamikę układu doładowania reprezentują bloki 1, 2, 3. Stałe czasowe muszą być wzięte z badań dynamicznych silnika. Te stałe czasowe zależą w pewnym stopniu od obciążenia silnika.

W bloku **D** obliczana jest gęstość powietrza na wlocie do cylindrów, a w bloku **L** nadmiar powietrza do spalania. W bloku **SPR** obliczana jest sprawność cieplna silnika jako funkcja nadmiaru powietrza do spalania.

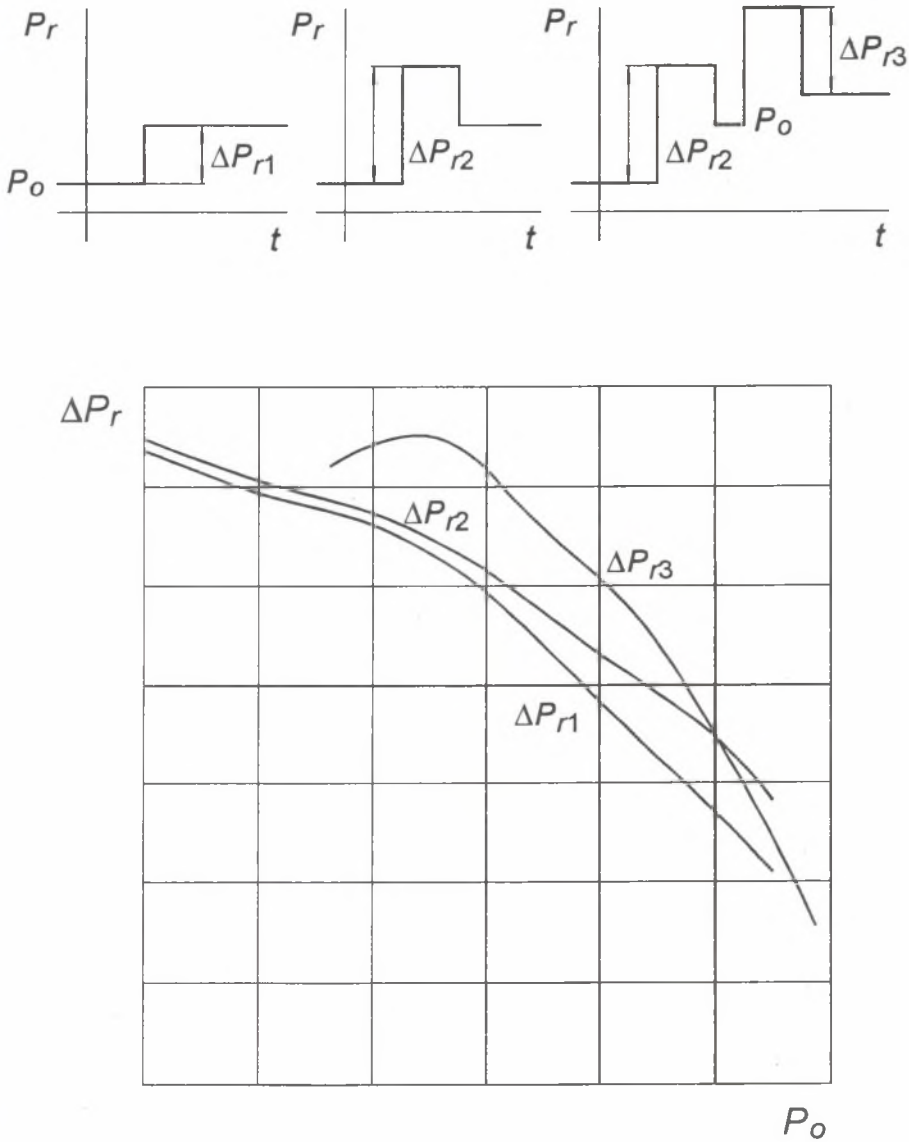
W zespołach prądotwórczych prędkość obrotowa jest stabilizowana przez regulator prędkości obrotowej. Zespoły do awaryjnego zasilania elektrowni jądrowych mają nastawiony statyzm równy zero, wobec tego w stanie ustalonym prędkość obrotowa jest dokładnie równa prędkości zadanej, a dynamiczne odchyłki prędkości obrotowej nie mogą przekroczyć 5% prędkości znamionowej. Z tego powodu wpływ prędkości obrotowej na charakterystykę pompy wtryskowej, sprawność cieplną silnika, ciśnienie i temperaturę doładowania można pominąć.

3. OBCIĄŻENIA GRANICZNE ZESPOŁU PRĄDOTWÓRCZEGO

Do sporządzenia programu obciążeń zespołu prądotwórczego niezbędna jest charakterystyka obciążeń granicznych zespołu prądotwórczego przedstawiona na rys. 2.

Charakterystyka obciążeń granicznych przedstawia zależność dopuszczalnych przyrostów mocy generatora od mocy ustalonej, jaką miał generator przed wzrostem obciążenia.

Charakterystyka obciążeń granicznych zależy od czasowego przebiegu wrzutu mocy. Najtrudniejsze warunki pracy silnika występującą przy skokowych zmianach obciążenia. Nieco łatwiejsze warunki powstają przy impulsowych wrzutach obciążenia powstających podczas rozruchu silników elektrycznych, bowiem po zakończeniu rozruchu pobór mocy obniża się w stosunku do



Rys. 2. Charakterystyki obciążeń granicznych zespołu prądotwórczego

Fig. 2. Limit load performance curves of a generating set

poboru mocy w czasie rozruchu, dlatego krzywe graniczne dla impulsowego wrzutu mocy leżą powyżej krzywej granicznej dla skokowego wrzutu mocy.

Dla małych obciążeń początkowych silnik dysponuje dużą rezerwą mocy, dlatego dopuszczalne wrzuty obciążenia są największe i są ograniczone brakiem powietrza do spalania, bowiem ciśnienie doładowania jest niskie.

W miarę wzrostu obciążenia początkowego dopuszczalne przyrosty mocy maleją.

Przy dużych mocach początkowych pojawia się ograniczenie mocy wynikające z mechanicznego ograniczenia ruchu listwy paliwowej sterującej wtryskiem paliwa. Maksymalne obciążenie silnika nie może przekroczyć 110% obciążenia znamionowego.

Włączenie następnego obciążenia może nastąpić tuż po zakończeniu rozruchu uprzednio włączonych silników elektrycznych w warunkach nieustalonego stanu w układzie doładowania silnika wysokoprężnego. Uzyskuje się wówczas większe przyrosty mocy zespołu prądotwórczego, bowiem wrzut obciążenia następuje przy korzystniejszych warunkach początkowych, a zwłaszcza przy wyższym ciśnieniu doładowania. Dla kolejno następujących po sobie wrzutów obciążenia krzywe obciążenia granicznego dla drugiego wrzutu obciążenia są o około 10% wyższe w porównaniu z wrzutem obciążenia w warunkach stanu ustalonego.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule matematyczny model dynamiki silnika charakteryzuje się znacznymi uproszczeniami w opisie układu doładowania w stosunku do modelu stosowanego uprzednio w ZUT ZGODA. Dzięki tym uproszczeniom uzyskano znaczne zmniejszenie ilości wymaganych danych doświadczalnych, przy czym dane te uzyskać można w stosunkowo prostych pomiarach. Dokładność modelu jest zadowalająca w przypadku pracy silnika ze stałą prędkością obrotową a więc w zastosowaniach dla zespołów prądotwórczych lub przy napędzie śruby nastawnej statku.

OZNACZENIA

$G_R(s)$ – transmitancja operatorowa regulatora prędkości obrotowej,
I – masowy moment bezwładności wału zespołu prądotwórczego,
L_t – teoretyczne zapotrzebowanie powietrza,
M_e – moment obrotowy silnika,
M_i – moment indykowany silnika,
M_m – moment strat mechanicznych silnika,
M_g – moment oporu genratora,
n – prędkość obrotowa silnika,

p_d – ciśnienie doładowania,
p_L – ciśnienie doładowania absolutne,
p_e – średnie ciśnienie użyteczne silnika,
P_g – moc elektryczna czynna generatora,
P_o – moc początkowa generatora,
ΔP_r – przyrost mocy generatora (moc rozruchowa),
R_L – stała gazowa powietrza,
s – operator Laplace'a,
t – czas,
T_L – temperatura doładowania,
T_1, T_2, T_3 – stałe czasowe w układzie doładowania,
T_m – opóźnienie czasowe (czas martwy silnika),
V_B – skokowa wydajność pompy wtryskowej,
W_d – wartość opałowa paliwa,
WO – wskaźnik obciążenia (położenie listwy paliwowej),
z – ilość cylindrów silnika,
λ – nadmiar powietrza do spalania,
η_c – sprawność cieplna silnika,
η_g – sprawność generatora,
η_v – sprawność napełnienia silnika,
$\omega = \frac{\pi}{30} n$ – prędkość kątowa wału silnika,
ω_z – zadana prędkość kątowa wału silnika,
ρ_B – gęstość paliwa,
ρ_L – gęstość powietrza.

LITERATURA

[1] Ferenc M.: Modelowanie numeryczne procesu regulacji okrętowego silnika wysokoprężnego z uwzględnieniem nieliniowości. Praca habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. nr 587, seria Energetyka z. 80, Gliwice 1978.

[2] Ferenc M., Stokłosa H., Cop J., Mędrych J.: Opracowanie modelu matematycznego dynamiki silników ZA40S i programu obliczeń na maszynę cyfrową. Opracowanie R–179/88 SIMPEX Katowice na zlecenie ZUT „ZGODA" Świętochłowice 1988.

[3] Ferenc M., Osuch W., Stokłosa H.: Obliczanie przebiegu procesu regulacji prędkości obrotowej średnioobrotowego silnika wysokoprężnego w napędach stacjonarnych. Referat na sympozjum MOTORCOMPUT 89. Warszawa 1989.

[4] Ferenc M., Wideł S., Wideł A., Sytniewski J.: Opracowanie programu układu mikroprocesorowego do sterowania obiektów energetycznych na

przykładzie średnioobrotowego silnika wysokoprężnego. Praca badawcza NB–400/RAu–2/RME–2/88 zad. 30.3. Gliwice 1989.
[5] Ferenc M., Osuch W., Stokłosa H.: Uproszczony model matematyczny dynamiki średnioobrotowego silnika wysokoprężnego. Silniki Spalinowe nr 4/1989.

Abstract

In the paper a mathematical model of Diesel engine dynamics has been presented. This model can be used to compute the permissible loads of a generating units. The generating sets of 2.8 MW and 6.3 MW can be used as reserve energy supply source. The presented model is simplified in description of loading system in regard to previously used models by ZUT ZGODA. Using this simplification model was obtained an enormous decreasing of the demanded experimental data. Accuracy of this model is a really good for the case of an engine operating with constant revolutions, e.g. for apply as screw boat driving engines.