ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1977

Seria: ENERGETYKA z. 63 Nr kol. 534

Michał FERENC

NIELINIOWY MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA WYSOKOPRĘŻNEGO JAKO OBIEKTU REGULACJI OBROTÓW

Streszczenie. W artykule podano równania różniczkowe stanu opisujące dynamikę silnika wysokoprężnego z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk statycznych.

1. Wstęp

W poprzednich latach większą uwagę zwracano na opracowanie matematycznych metod analizy procesów przejściowych dla układów liniowych.

Przemysłowe obiekty regulacji w zakresie dużych zmian obciążeń są przeważnie obiektami nieliniowymi.

Znane powszechnie metody obliczeń i analizy dynamiki tych układów opierają się na linearyzacji przeprowadzonej przy założeniu małych zmian parametrów dynamicznych. Otrzymany w ten sposób liniowy układ równań różniczkowych o stałych współczynnikach daje jedynie jakościowy obraz zachodzących procesów. Obecnie wraz ze zwiększeniem wymagań odnośnie jakości procesu regulacji coraz większą uwagę zwraca się na opracowanie nieliniowych modeli matematycznych odzwierciedlających własności dynamiczne obiektów w szerokim zakresie zmian obciążeń. W artykule podane równania różniczkowe wyrażające dynamiczne własności okrętowego silnika wysokoprężnego doładowywanego turbosprężarką. W oparciu o badania doświadczalne znaleziono proste wzory na obliczanie mocy turbiny zasilanej impulsyjnie, przepływu powietrza przez silnik oraz moc wewnętrzną silnika. Uzyskany w ten sposób model matematyczny odzwierciedlający dynamiczne własności silnika służy do badań procesu regulacji oraz zachowania się układu napędowego podczas manewrowania statkiem.

Ponieważ zasadnicze równania różniczkowe są nieliniowe, więc ich rozwiązanie jest możliwe przy zastosowaniu techniki cyfrowej. Do obliczeń przybliżonych można dokonać linearyzacji równań przy założeniu małych odchyleń od stanu ustalonego i zlinearyzowane równania zamodelować na maszynie analogowej.

2. Podstawowe równania dynamiki czterosuwowego silnika wysokoprężnego doładowanego turbosprężarką

Podstawowe równania opisujące dynamiczne własności silnika wysokoprężnego wynikają z równań bilansu strumieni masy i energii czynnika roboczego oraz równań ruchu układu korbowego.

Drobiazgowe uwzględnienie wszystkich procesów termodynamicznych zachodzących w silniku prowadzi do bardzo złożonych równań zawierających wiele współczynników nie dających się dokładnie wyznaczyć. W pracach odnoszących się do opisu silnika jako obiektu regulacji obrotów przyjmowane są różne uproszczenia. Niektóre z nich przyjęto również w artykule. Opierając się na pracach Krutowa [4], Jegorowa [5], Ruderta [1] oraz na podstawie własnych badań przyjęto podane niżej równania wyrażające dynamiczne własności silnika wysokoprężnego.

Strumień powietrza przepływającego przez silnik $\dot{m}_{Lv}$ - oblicza się ze wzoru:

$$\dot{m}_{Lv} = \frac{1}{2} Z V_H \varrho_L \eta_v \frac{\omega}{2\pi} \tag{1}$$

gdzie:

Z - liczba cylindrów,

V_H - objętość skokowa cylindra,

ϱ_L - gęstość powietrza doładowującego,

η_v - sprawność napełnienia,

ω - prędkość kątowa wału silnika.

Gęstość powietrza ϱ_L zależy od temperatury bezwzględnej powietrza T_L i ciśnienia bezwzględnego p_L

$$\varrho_L = \frac{p_L}{R_L T_L} \tag{2}$$

gdzie:

R_L - jest stałą gazową powietrza.

Strumień powietrza przepłukującego $\dot{m}_{Ls}$ często jest obliczany jako funkcja różnicy średniego ciśnienia powietrza przed silnikiem i średniego ciśnienia spalin za silnikiem. Rudert [1] stosuje wzór:

$$\dot{m}_{Ls} = \dot{m}_{Lso} \frac{p_L}{p_{Lo}} \sqrt{\frac{T_{Lo}}{T_L}} \sqrt{\frac{1 - \frac{p_G}{p_L}}{1 - \frac{p_{Go}}{p_{Lo}}}} \tag{3}$$

gdzie:

p_G - ciśnienie spalin za silnikiem,

indeks o - oznacza wartości odniesionie do stanu ustalonego.

Wzór (3) może dawać poprawne wyniki dla silników o stałym ciśnieniu spalin przed turbosprężarką.

W przypadku agregatów z impulsyjnym zasilaniem turbiny średnie ciśnienie spalin przed turbiną może być wyższe od ciśnienia spalin za zaworami w okresie przepłukania i wzór (3) daje błędne wyniki.

Na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzonych dla silników serii ZL i ZV produkowanych przez ZUT "ZGODA" w Świętochłowicach stwierdzono, że całkowity strumień powietrza $\dot{m}_L$ w stanie ustalonym jest proporcjonalny do strumienia powietrza $\dot{m}_{Lv}$ wyrażonego wzorem (1)

$$\dot{m}_L = 1{,}4\ \dot{m}_{Lv} \tag{4}$$

Moc wewnętrzną N_i silnika liczono ze wzoru

$$N_i = W_d\ \dot{m}_B\ \eta_c \tag{5}$$

gdzie:

W_d - wartość opałowa paliwa,

$\dot{m}_B$ - strumień paliwa,

η_c - sprawność cieplna silnika.

Sprawność cieplna silnika η_c jest funkcją nadmiaru powietrza do spalania λ oraz prędkości obrotowej silnika ω. Nadmiar powietrza λ do spalania związany jest ze strumieniem $\dot{m}_B$ spalanego paliwa zależnością:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{Lv}}{L_t\ \dot{m}_B} \tag{6}$$

Równanie ruchu wału silnika wynikające z warunku równowagi momentów sił ma postać:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_i - M_m - M_e \tag{7}$$

gdzie:

I - masowy moment bezwładności wirujących mas,

M_e - moment sił oporu (napęd śrubowy),

M_m - moment oporów tarcia,

M_i - moment wewnętrzny.

Moment wewnętrzny M_i wynika z mocy wewnętrznej silnika

$$M_i = \frac{N_i}{\omega} \tag{8}$$

W zakresie obciążeń od 25% do 100% przyjmowano, że moment tarcia M_m jest proporcjonalny do obrotów silnika

$$\frac{M_m}{M_{mo}} = \frac{\omega}{\omega_o} \tag{9}$$

Moment sił oporu (obciążenia) zależy przede wszystkim od charakterystyki odbioru mocy.

Dla śruby okrętowej napędzającej statek na uwięzi przyjmuje się:

$$\frac{M_e}{M_{eo}} = \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2 \tag{10}$$

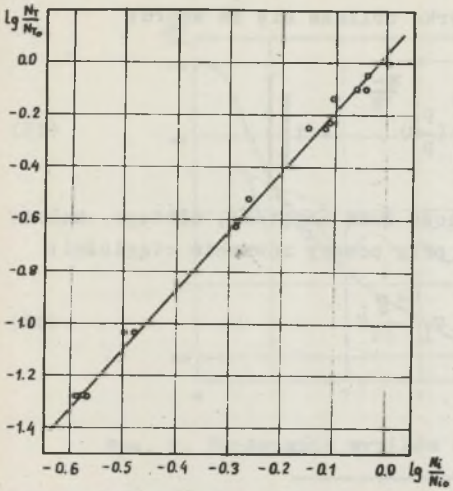
Moc turbiny gazowej napędzanej spalinami wylotowymi z silnika jest przede wszystkim funkcją parametrów termodynamicznych spalin (temperatury, ciśnienia, energii kinetycznej).

Powszechnie stosowane w teorii turbin wzory na obliczenie mocy i sprawności turbin gazowych mogą być przydatne jedynie do obliczania mocy turbin zasilanych spalinami o stałym ciśnieniu. W przypadku turbin zasilanych impulsyjnie wprowadza się współczynniki korekcyjne uwzględniające pulsacje spalin. Ścisłe obliczenia termodynamiczne rozwijanej mocy i przepływu spalin są bardzo złożone, wymagają znajomości pełnych charakterystyk turbiny oraz przebiegu pulsacji ciśnienia, prędkości i temperatur spalin.

Na podstawie badań statycznych przeprowadzonych przez ZUT "ZGODA" w Świętochłowicach dla silników serii ZL i ZV stwierdzono, że moc trubiny jest funkcją mocy wewnętrznej silnika (rys. 1).

Z wykresu przedstawionego na rys. 1 otrzymano zależność

$$\frac{N_T}{N_{To}} = a_N\left(\frac{N_i}{N_{io}}\right)^{b_N} \tag{11}$$



Rys. 1. Zależność mocy turbiny od mocy wewnętrznej silnika

gdzie:

$a_N = 1,1 \quad b_N = 2,27$ dla silnika 6ZL.

Równanie ruchu wału turbosprężarki wynikające z równowagi momentów sił ma postać:

$$I_T \frac{d\omega_T}{dt} = M_T - M_K \tag{12}$$

gdzie:

I_T - masowy moment bezwładności wału turbosprężarki,

ω_T - prędkość kątowa turbosprężarki,

M_T - moment napędowy turbiny,

M_K - moment oporu sprężarki (kompresora).

Moment napędowy turbiny wynika z mocy turbiny

$$M_T = \frac{N_T}{\omega_T} \tag{13}$$

Moment oporu sprężarki określony jest wzorem:

$$M_K = \frac{N_K}{\omega_T} = \dot{m}_K \frac{R_L\, T}{\omega_T\, \eta_{aK}} \frac{\varkappa}{\varkappa - 1} \left[\left(\frac{p_L}{p}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} - 1 \right] \tag{14}$$

gdzie:

$\dot{m}_K$ - wydajność sprężarki,

T - temperatura bezwzględna powietrza na ssaniu sprężarki,

p - ciśnienie bezwzględne powietrza na ssaniu sprężarki,

$\varkappa$ - wykładnik adiabaty dla powietrza,

η_{aK} - sprawność adiabatyczna sprężarki,

N_K - moc sprężarki.

Sprawność adiabatyczną sprężarki η_{aK} oraz wydajność sprężarki $\dot{m}_K$ odczytuje się z charakterystyki sprężarki jako funkcję obrotów i sprężu.

Temperaturę T_K powietrza za sprężarką oblicza się ze wzoru:

$$T_K = T\left\{1 + \frac{1}{\eta_{aK}}\left[\left(\frac{p_L}{p}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} - 1\right]\right\} \tag{15}$$

Kolektor wlotowy silnika ma zwykle dość dużą objętość, dlatego należy uwzględnić proces akumulacji powietrza przy pomocy równania ciągłości:

$$\dot{m}_K - \dot{m}_L = V_L \frac{d\varrho_L}{dt} \tag{16}$$

gdzie:

V_L - objętość kolektora wlotowego.

Temperaturę powietrza za chłodnicą powietrza można opisać z dużym przybliżeniem uproszczonym równaniem bilansu cieplnego

$$\frac{d}{dt}(V_L \varrho_L c_L T_L^*) = \dot{m}_K c_L(T_K-273) - \dot{m}_L c_L(T_L-273) - F_{ch} k_{ch} \Delta T_{ch} \tag{17}$$

gdzie:

c_L - ciepło właściwe powietrza,

F_{ch} - powierzchnia wymiany ciepła w chłodnicy,

k_{ch} - współczynnik przenikania ciepła,

ΔT_{ch} - średnia różnica temperatur w chłodnicy,

$T_L^* = T_L - 273$.

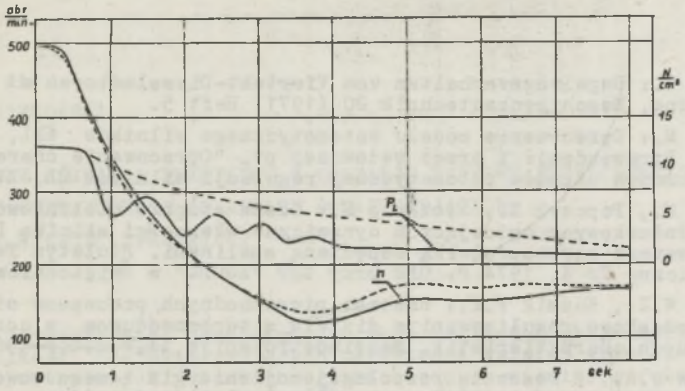
Wydajność pompy paliwowej określa równanie wynikające z charakterystyki doświadczalnej

$$\dot{m}_B = \frac{1}{4\pi} Z \omega V_B \tag{18}$$

gdzie:

V_B - skokowa wydajność pompy paliwowej, dana w postaci charakterystyki.

Równania różniczkowe ruchu silnika rozwiązano na maszynie cyfrowej. Na rys. 2 podano jeden z uzyskanych przebiegów dynamicznych w silniku 6ZL przy obciążeniu hamulcem realizującym charakterystykę śrubową (obciążenie liczone według wzoru (10)). Linią ciągłą przedstawiono wyniki pomiaru



Rys. 2. Porównanie wyników obliczeń z pomiarami. Silnik 6ZL

——————— wyniki pomiaru

— — — — — — wyniki obliczeń

uzyskane na stacji prób, a linią kreskowaną wyniki obliczeń. Równanie ruchu silnika rozwiązywane przy założeniu, że ruch listwy paliwowej jest taki sam, jaki uzyskano z pomiarów (obliczenia silnika w układzie otwartym z odłączonym regulatorem). Uzyskano dość dobrą zgodność przebiegu prędkości obrotowej silnika i nieco gorszą dla ciśnienia doładowania.

3. Wnioski

Równania modelu matematycznego służą do obliczenia przebiegów dynamicznych w silniku przy różnych wymuszeniach.

W ramach wykonywania prac badawczych związanych z oceną jakości procesu regulacji przeprowadzono linearyzację równań i do ich rozwiązania zastosowano technikę analogową. Na maszynie analogowej badano przebiegi regulacji obrotów silnika 6ZL przy wymuszeniach zmianą zadanych obrotów oraz momentu obciążenia. Znacznie szersze możliwości daje technika cyfrowa. Równania różniczkowe mogą być wykorzystane do obliczenia charakterystyk częstotliwościowych bądź obliczenia przebiegów czasowych przy dowolnych wymuszeniach z uwzględnieniem nieliniowości równań.

Istotną zaletą przedstawionego modelu matematycznego silnika wysokoprężnego jest możliwość obliczenia prawie wszystkich współczynników liczbowych na podstawie prostych pomiarów statycznych.

LITERATURA

[1] Rudert S.: Regulungsverhalten von Viertakt-Dieselmotoren mit Abgasturboaufladung, Maschinenbautechnik 20 (1971) Heft 5.

[2] Ferenc M.: Opracowanie modelu matematycznego silników 6ZL, 8ZL, 16ZV-40/48. Sprawozdanie z pracy badawczej pt. "Opracowanie charakterystyk dynamicznych układów automatycznej regulacji silników ZL, ZV-40/48".

[3] Ferenc M., Popczyk Z., Stokłosa M.: Ocena stopnia nieliniowości równań różniczkowych opisujących dynamiczne własności silnika Diesla doładowywanego turbosprężarką napędzaną spalinami. Biuletyn Techniczno-Ekonomiczny Nr 4, 1974 r. OBR przy ZUT "ZGODA" w Świętochłowicach.

[4] Krutow W.I., Kuźmik P.K.: Rasczet pierechodnych processow sistiemy awtomaticzeskogo regulirowanija diziela s turbonadduwom s uczetom nieliniejnych charaktieristik. Maszinostrojenije (I.W.U.Z.) 1969, nr 10.

[5] Jegorow J.A.: K rasczetu raspołagajemoj eniergii i massowowo raschoda wypusknych gazow dwigatiela s impulsnoj sistiemoj nadduwa, Maszinostrojenije (I.W.U.Z.) 1970, nr 2.

НЕЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЯ
КАК ОБЬЕКТА РЕГУЛЯЦИИ ОБОРОТОВ

Р е з ю м е

В статье представлено основные дифференциальные уравнения стану динамики Дизеля с учётом нелинейных статических характеристик.

A NONLINEAR MATHEMATICAL DIESEL ENGINE MODEL AS AN OBJECT OF CONTROL SPEED ROTATION

S u m m a r y

The article presents differential equations of state space for Diesel engine taking into consideration nonlinear statics charakteristics.