

Wiesław GRZESIKIEWICZ
Henryk RZEPIEJEWSKI

MODELOWANIE REGULATORA KOLEJOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO ZS

Streszczenie. Modelujemy regulator silnika spalinowego ZS stosowanego do napędu lokomotyw. Regulator służy do utrzymania nastawianej prędkości kątowej i mocy silnika. W celu identyfikacji oraz weryfikacji modelu regulatora opracowano matematyczny model stanowiska badawczego, służącego do diagnostyki regulatora. Prezentujemy matematyczny opis przetwarzania sygnałów przez zespoły stanowiska i regulator. Jako kryterium weryfikacyjne modelu przyjęto miarę zgodności sygnałów pomiarowych i symulacyjnych. Przedstawiamy porównanie wybranych wyników pomiarów i symulacji komputerowej.

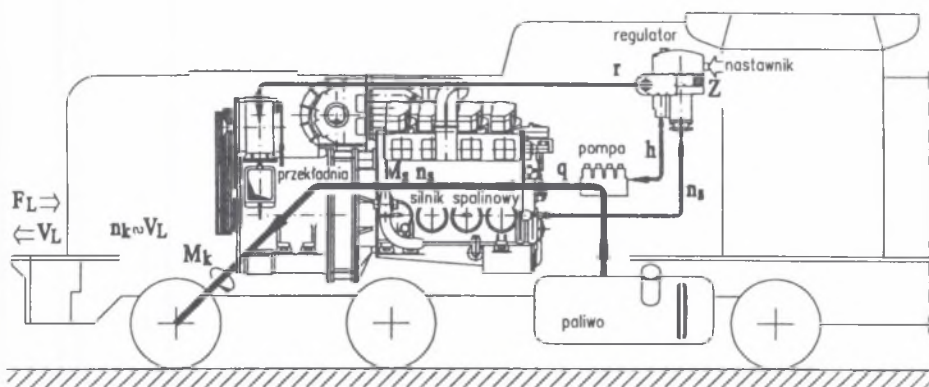
MODELING OF A CONTROL SYSTEM FOR THE DIESEL ENGINE

Summary. We model a control system of the diesel - electric power drive of a locomotive. The control system in question serves to keep preset power and angular velocity of the engine shaft. To identify and verify the model of the control system a mathematical model of the test rig used for diagnosis of the control system has been worked out. As the criterion for the model verification the measure of conformity of measured and simulated signal has been assumed. In the paper we present the mathematical description of the flow of signals through the rig with special attention paid to the control system. We also present the comparison of some measured results and obtained by simulation.

1. WPROWADZENIE

Rozpatrujemy regulator silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym, napędzającego lokomotywę z przekładnią elektryczną [4]. Rozważany regulator spełnia dwa zadania: utrzymuje nastawioną prędkość kątową oraz moc (moment) silnika poprzez zmianę dawki paliwa i przełożenia przekładni elektrycznej [1], [3]. Na schemacie z rysunku 1 na tle układu napędowego lokomotywy zaznaczono tor przeniesienia energii ze zbiornika paliwa do kół lokomotywy oraz tory przesyłania sygnałów do i z rozpatrywanego regulatora. Wprowadzone sym-

bole oznaczają: q - wydatek paliwa, M_s , - moment silnika spalinowego, n_s - obroty silnika spalinowego, M_k , - moment napędzający koło, n_k - obroty koła, F_L , - siła oporów ruchu, V_L - prędkość lokomotywy, Z - sygnał nastawiający, h - sygnał sterujący pompą wtryskową, r - sygnał sterujący przekładnią.



Rys. 1. Schemat przepływu energii i transmisji sygnałów sterujących
Fig. 1. A schematic diagram of energy and control signals flow

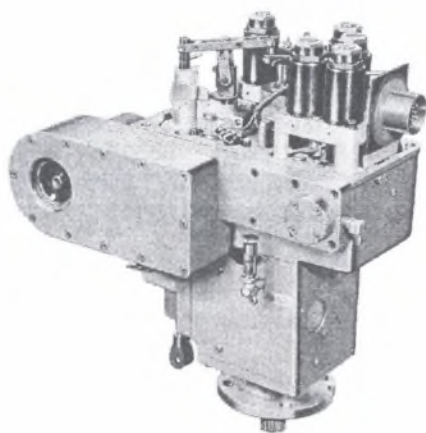
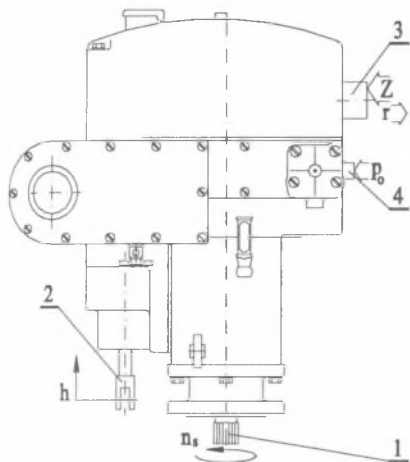
W artykule jest prezentowany proponowany matematyczny model regulatora oraz zasady identyfikacji jego parametrów. Podstawą do opracowania matematycznego modelu regulatora były rezultaty analizy konstrukcji oraz wyniki badań regulatora. Eksperymentalne badania przeprowadzono na stanowisku diagnostycznym, które będzie przedstawione w dalszej części artykułu. W celu identyfikacji oraz weryfikacji modelu regulatora opracowano matematyczny model stanowiska diagnostycznego. Jako kryterium weryfikacyjne przyjęto miarę zgodności sygnałów pomiarowych z analogicznymi wynikami symulacji komputerowej.

2. REGULATOR I STANOWISKO BADAWCZE

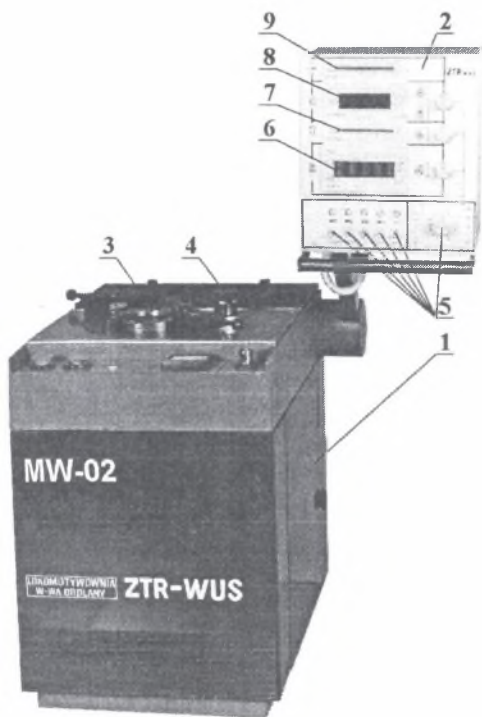
W lokomotywach spalinowych z przekładnią elektryczną, eksploatowanych przez PKP. najpowszechniej jest stosowany regulator typu PG firmy Woodward Governor Company.

W artykule rozważamy regulator stosowany w krajowych lokomotywach manewrowych serii SM42. Na na rysunku 2 wskazano te elementy regulatora, przez które jest on powiązany z silnikiem spalinowym i prądnicą agregatu prądowłórczego. Wałek napędowy regulatora (1) jest napędzany przez wał korbowy silnika spalinowego za pośrednictwem przekładni zębatej. Ruch tłoczyśka (2) jest przenoszony na listwy pomp wtryskowych, sterujące dawką paliwa. Przez złącze elektryczne (3) jest przesyłany sygnał Z , za pomocą którego maszynista steruje pracą silnika spalinowego. Ponadto przez to złącze przepływa sygnał do obwodu regulacji wzbudzenia prądnic.

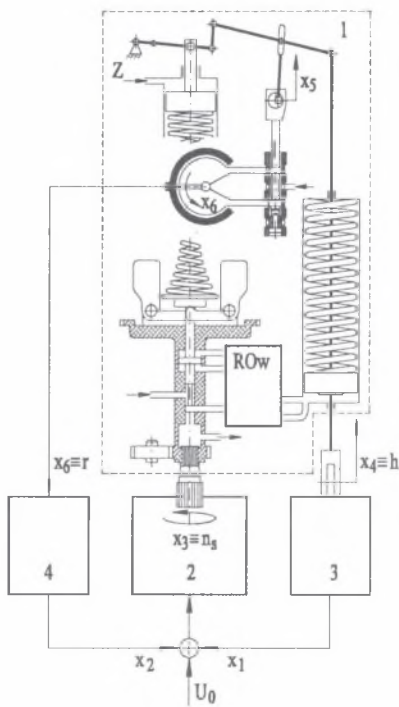
Badania regulatora przeprowadzono na stanowisku diagnostycznym, którego widok pokazano na rysunku 3, a schemat strukturalny wraz z regulatorem na rysunku 4.



Rys. 2. Widok zewnętrzny regulatora
Fig. 2. An outside view of the controller



Rys.3. Widok zewnętrzny stanowiska diagnostycznego MW02
Fig.3. An outside view of MW02 diagnostic stand



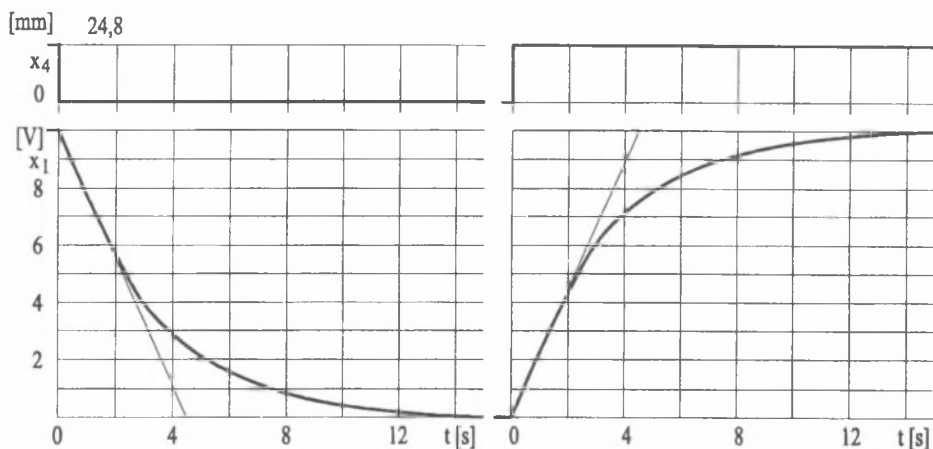
Rys.4. Struktura stanowiska badawczego
Fig.4. The layout of the test stand

Regulator jest napędzany elektrycznym silnikiem tarczowym poprzez przekładnię pasową. Silnik elektryczny jest zasilany z przekształtnika tyrystorowego, sterowanego regulatorami prędkości i prądu.

Prędkość obrotowa układu napędowego jest liniową funkcją wartości napięcia sterującego. Podukłady (3) i (4) przetwarzają i standaryzują sygnały wyjściowe regulatora, a ich sygnały wyjściowe x_1 i x_2 po zsumowaniu sterują pracą podukładu napędowego (2). Operator stanowiska diagnostycznego może symulować zmianę obciążenia układu napędowego przez zmianę wartości sygnału U_0 [5].

3. MATEMATYCZNY MODEL STANOWISKA Z REGULATOREM

W pierwszym etapie matematycznego modelowania ustalono i zweryfikowano modele trzech podukładów zaznaczonych na rysunku 4 odnośnikami (2, 3, 4). Podstawę do wyboru matematycznych modeli tych podukładów stanowiły wyniki rejestracji ich charakterystyk czasowych, uzyskane przy skokowej zmianie sygnałów sterujących. Przykładowe zapisy napięcia x_1 , uzyskane w rezultacie skokowej zmiany wartości sygnału h , pokazano na rysunku 5. Zapis wykonano przy przemieszczaniu tłoczyska nastawiającego dawkę paliwa w krańcowe położenia STOP i MAX.



Rys.5. Zmiany napięcia na wyjściu podukładu (3) wywołane skokowymi zmianami położenia tłoczyska siłownika nastawiającego dawkę paliwa

Fig.5. The change in output voltage of the sub-system (3) of Fig. 4. caused by a step change of the position rod of the actuator setting the fuel dose

Zarejestrowane przebiegi wskazują, że rozpatrywane podukłady mogą być potraktowane jako elementy inercyjne pierwszego rzędu.

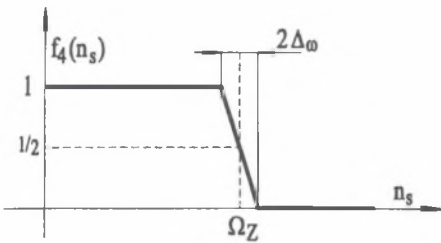
W zaproponowanym modelu przyjęto, że przetwarzanie sygnałów w każdym rozważanym podukładzie można opisać za pomocą równania różniczkowego pierwszego rzędu, tzn.:

$$T\dot{x} + x = \alpha y, \tag{1}$$

gdzie: y - sygnał wchodzący; x - sygnał wychodzący, α i T - parametry charakteryzujące statyczne i dynamiczne właściwości podukładu. Wartości tych parametrów były ustalone na podstawie rezultatów badań eksperymentalnych.

Matematyczny model regulatora przyjęto w postaci równań opisujących przetwarzanie sygnału obrotów (n_s) na sygnał sterujący pompą wtryskowa (h), oraz na sygnał sterujący przekładnią lokomotywy (r). Opis ten sformułowano według zasad zamieszczonych w pracy [2] na podstawie konstrukcji regulatora:

$$\begin{cases} T_4 \dot{h} + h = f_4(n_s); \\ \dot{x}_5 = f_5(\dot{h}, h, r); \\ \dot{r} = f_6(x_5, r), \end{cases} \tag{2}$$



Rys.6. Funkcja f_4
Fig.6. The function f_4

gdzie: x_5 jest dodatkową zmienną opisującą przemieszczenie suwaka rozdzielacza pokazanego na rysunku 4. Parametrami tego modelu jest stała T_4 oraz wielkości charakteryzujące postacie funkcji f_4 , f_5 , f_6 . Dla funkcji f_4 zaproponowano postać, którą ilustruje wykres pokazany na rysunku 6, gdzie zaznaczono jej parametry: Δ_0 - stała, określająca nachylenie charakterystyki regulatorowej silnika; Ω_Z - nastawiana prędkość kątowna silnika.

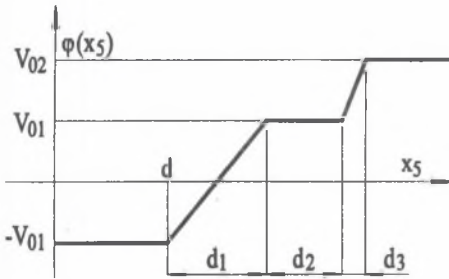
Postać funkcji f_5 opisuje następujący wzór:

$$f_5(x_5, \dot{h}, h) := \begin{cases} -\frac{x_5}{T_5} & , \text{gd}y \begin{cases} x_5 > \delta \\ x_5 = \delta; \Delta V \leq 0; \end{cases} \\ \dot{h} & , \text{gd}y \begin{cases} x_5 = \delta; \Delta V > 0; \end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

jeśli $\Delta V := \dot{h} + \frac{x_5}{T_5}$; $\delta := h - d$. Parametrami funkcji f_5 jest stała T_5 oraz zmienna d , której wartość zależy od nastawionego sygnałem Z stopnia (rys.4).

Funkcję f_6 przyjęto w postaci:

$$f_6(x_5, r) := \begin{cases} 0 & , \text{gdy} \begin{cases} r = 0; \varphi(x_5) \leq 0; \\ r = 1; \varphi(x_5) \geq 0; \end{cases} \\ \varphi(x_5) & , \text{gdy} \begin{cases} 0 < r < 1; \\ r = 0; \varphi(x_5) > 0; \\ r = 1; \varphi(x_5) < 0; \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$



Rys.7. Funkcja φ
Fig.7. The function φ

przy czym funkcję φ określa wykres z rysunku 7. Parametry funkcji φ , zaznaczone na wykresie, zostały ustalone na podstawie dokumentacji technicznej regulatora.

Przedstawiony opis stanowiska badawczego z regulatorem był podstawą do opracowania matematycznego modelu.

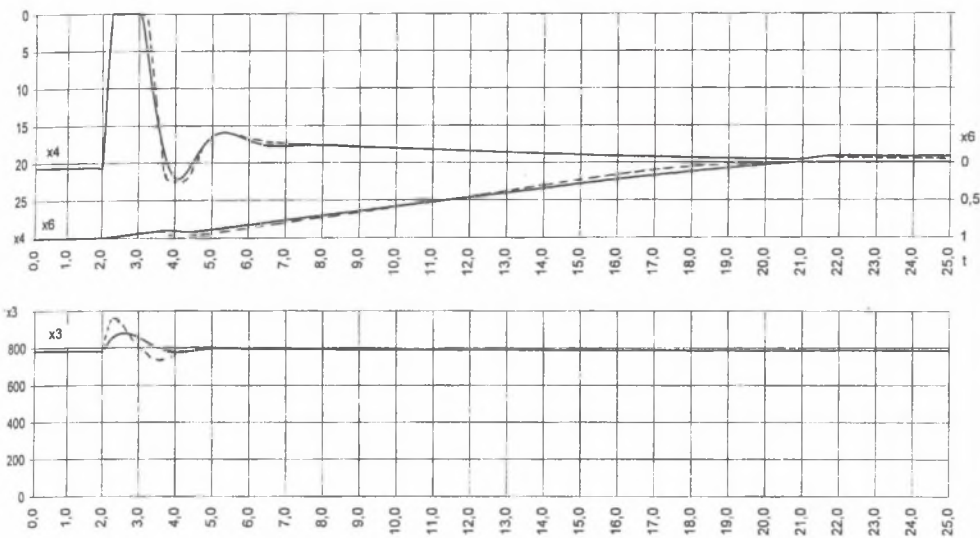
Do opisu niestabilnych procesów, powstających podczas badań regulatora na stanowisku, wybrano zestaw sześciu współrzędnych $x := [x_1, \dots, x_6]T$, które reprezentują omówione sygnały. Matematyczny opis tych współrzędnych przedstawiamy w formie układu równań różniczkowych:

$$\dot{x} = F(t; x), \quad (5)$$

gdzie funkcja $F : R^7 \rightarrow R^6$ ma postać, która wynika z opisanych wcześniej podukładów stanowiska, to znaczy:

$$\begin{cases} F_1(x_1, x_4) := (-x_1 + \alpha_1 x_4) / T_1; \\ F_2(x_2, x_6) := (-x_2 + \alpha_2 x_6) / T_2; \\ F_3(t, x_1, x_2, x_3) := (-x_3 + \alpha_2(x_1 + \beta x_2 + U_0(t))) / T_3; \\ F_4(x_3, x_4) := (-x_4 + f_4(x_3)) / T_4; \\ F_5(t, x_4, x_5) := f_5(x_5, F_4(x_3, x_4), x_4); \\ F_6(x_5, x_6) := f_6(x_5, x_6); \end{cases} \quad (6)$$

gdzie oprócz omówionych wcześniej oznaczeń wprowadzono stałą β oraz wartość sygnału opisującego obciążenie U_0 .



Rys.8. Wyniki pomiarów (.....) i symulacji (—)
 Fig.8. Results from measurements (.....) and simulation (—)

Przytoczony matematyczny opis stanowiska wykorzystano jako podstawę do opracowania komputerowego modelu, za pomocą którego symulowano pomiary wykonane na stanowisku badawczym. Zasadniczym celem tych symulacyjnych badań było ustalenie wartości parametrów modelu regulatora.

Uzyskane rezultaty ilustruje rysunek 8, na którym zamieszczono przykładowe wykresy sygnałów: x_3 - obroty silnika elektrycznego napędzającego regulator na stanowisku [obr/min], x_4 - wysunięcie listwy pompy wtryskowej [mm], x_6 - sygnał ustalający wartość rezystancji w obwodzie wzbudzenia prądnicy. Prezentowane wyniki wyznaczono doświadczalnie i symulacyjnie w trakcie skokowej zmiany wartości napięcia sygnału opisującego obciążenie U_{10} (rys. 4).

4. ZAKOŃCZENIE

Przytoczony matematyczny opis przetwarzania sygnałów w stanowisku diagnostycznym wykorzystano do opracowania modelu komputerowego, za pomocą którego symulowano pomiary na stanowisku. Celem tych symulacyjnych badań było wyznaczenie parametrów modelu regulatora. Uzyskany w ten sposób model regulatora będzie zastosowany w opracowaniu modelu układu napędowego lokomotywy spalinowej z przekładnią elektryczną. Ten kompleksowy model elektromechanicznego układu napędowego będzie wykorzystany do symulacyjnych badań wpływu sterowania na dynamikę i energetyczną efektywność przenoszenia napędu do silnika do kół. Badania symulacyjne wykonane zostaną dla wybranych serii loko-

motyw spalinowych i będą ukierunkowane na ocenę celowości modernizacji sterowania ich układami napędowymi przez wprowadzenie nowoczesnych elektronicznych regulatorów agregatów prądowców i specjalizowanych systemów mikroprocesorowych.

LITERATURA

1. Górniak J., Bogdański A.: Sterowanie silników wysokoprężnych i sprzężarek gazowych. WNT, Warszawa 1972.
2. Grzesikiewicz W.: Dynamika układów mechanicznych z więzami. WPW, Warszawa 1990.
3. Rzepiejewski H., Sikorski J.: Układy regulacji agregatów prądowców przekładni elektrycznych lokomotyw spalinowych. Technika Transportu Szynowego, 1/94, 2/94, 3/94.
4. Regulatory typu PGV dla lokomotyw. Instrukcja eksploatacji i obsługi. Biuletyn 36609P. Woodward Governor Company, 1976.
5. Stanowisko diagnostyczne MW-03. Opis techniczny. Lokomotywnia Warszawa Odolany, Zespół Technologiczno-Rozwojowy 1989.

Recenzent: Dr hab.inż. Janusz Dyduch
Prof. Politechniki Radomskiej

Abstract

We consider a control system of the diesel engine of diesel - electric locomotive [4]. The system in question serves two purposes: it keeps the pre-set angular velocity of the engine shaft and torque by changing the fuel delivery and the ratio of the electric transmission, see [1] and [3]. In the schematic diagram in Fig. 1 a flow of energy from the fuel tank to the wheels is marked. The symbols mean: q - the fuel delivery, M_s - the engine torque, n_s - velocity of the shaft, M_k - driving moment on the wheel, n_k - angular velocity of the wheel, Z pre-setting signal, h - control signal for the injection pump, r - control signal for the electric transmission.

In the paper a mathematical model of the proposed control system is presented and principles of identification of its parameters are described. The pre-requisites for building the model were the analysis of the design and results of investigation of the system on a diagnostic test rig.

To identify the parameters of the system a mathematical model of the test rig was worked-out. as the criterion for the model verification a measure of conformity of measured and numerically simulated signals has been used.