

Zdzisław KONOPKA

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki  
Politechnika Śląska

## PRZYKŁADY BADAŃ WYBRANYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH POJAZDÓW TRAKCYJNYCH Z ZASTOSOWANIEM MODELOWANIA NA MC

**Streszczenie:** W oparciu o związki analityczne przedstawione w pracy [1] wyznaczono charakterystyki statyczne i dynamiczne silnika trakcyjnego dla obydwu stref regulacji prędkości oraz układu automatycznej regulacji prędkości silnika w obszarze osłabionego wzbudzenia.

### 1. WSTĘP

Symulacja cyfrowa umożliwia badanie układu elektrodynamicznego poprzez sformułowanie programu, którego poszczególne fragmenty opisują zjawiska występujące w tym układzie. Program taki jest modelem cyfrowym układu elektrodynamicznego i może być zapisany w języku algorytmicznym (np. ALGOL, FORTRAN) lub symbolicznym. W tym drugim przypadku program zapisywany jest za pomocą umownych znaków, określających standardowe funkcje programowe, które z kolei są elementarnymi podprogramami opisującymi właściwości poszczególnych elementów układu elektrodynamicznego. Programów używanych do zapisu symulacji w postaci symbolicznej, zwanych symulatorami, jest w skali światowej kilkadziesiąt. Właściwości wybranych symulatorów dostępnych w kraju scharakteryzowano w pracy [3]. Badania symulacyjne rozpatrywanych układów zostaną przeprowadzone przy zastosowaniu symulatora oznaczonego symbolem X3AB.

Procedura tworzenia modeli cyfrowych analizowanych układów jest w tym przypadku następująca:

- należy opisać układ metodą blokowo zorientowaną (np.: jak w p. 2 i 3) pracy [1]);
- na bazie schematu strukturalnego (blokowego) należy sporządzić .tzw. schemat maszynowy modelu cyfrowego, w którym poszczególne operacje matematyczne wyrażone są za pomocą symboliki odpowiadającej danemu symulatorowi;

- należy napisać program obliczeń na bazie schematu maszynowego, czyli inaczej należy sporządzić model cyfrowy badanego układu.

Przedstawienie matematycznej postaci analizowanego układu w formie schematu blokowego a następnie maszynowego zastępuje złożoną niekiedy jego strukturę szeregiem prostych operacji matematycznych odpowiednio ze sobą powiązanych, które realizowane są przez standardowe operacje maszynowe, czyli tzw. funkcje programowe (odpowiednik bloków operacyjnych maszyny analogowej). Te funkcje programowe zapisane według określonej procedury tworzą program symulacyjny (odpowiednik tablicy łączeniowej maszyny analogowej). Zasadniczą zaletą takiej symulacji jest zachowanie struktury modelowanego układu fizycznego i łatwość ingerencji w tę strukturę. Wykaz standardowych funkcji programowych symulatora X3AB oraz metodykę zapisu programu symulacyjnego można znaleźć w publikacji [4]. Prezentowane w niniejszym artykule badania symulacyjne dotyczą (jako przykładowe) dwóch wybranych układów, których opis matematyczny i schematy strukturalne były sporządzone w pracy [1].

## 2. BADANIA SYMULACYJNE SILNIKA TRAKCYJNEGO Z REGULACJĄ PRĘDKOŚCI W II STREFIE POPRZEC ZMIANĘ LICZBY ZWOJÓW UWZWOJENIA WZBUDZENIA

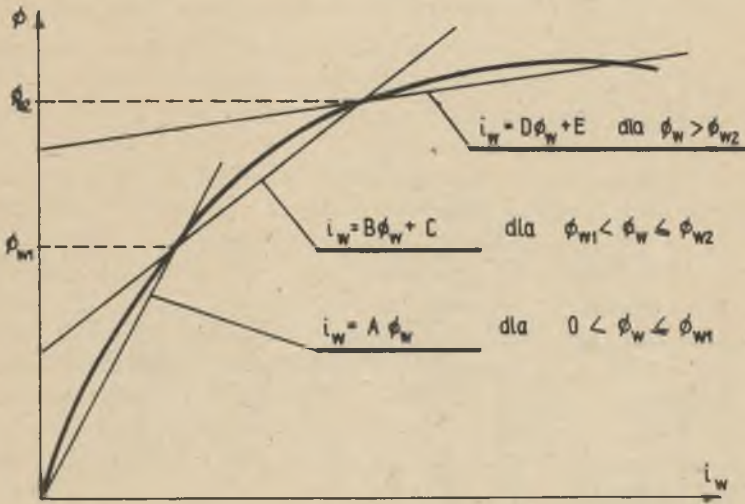
Do badań symulacyjnych wykorzystujemy model matematyczny opracowany w pracy [1] (p. 2.1). Zgodnie z przedstawioną procedurą, na podstawie schematu strukturalnego ([1] rys. 2), sporządzamy schemat maszynowy modelu cyfrowego silnika (rys. 1), przyjmując dla przeprowadzanych badań liniową zależność momentu obciążenia  $M_{O1}$  od prędkości oraz zlinearyzowaną trójdzinkowo charakterystykę magnesowania silnika zgodnie z rys. 2.

Badania modelowe, wykonane dla silnika typu LSa-430T o mocy godzinowej  $P_h = 170$  kW, w które wyposażone są lokomotywy SMA2, umożliwiają wyznaczenie jego charakterystyk statycznych i dynamicznych. Dla przykładu przeprowadzimy następujące obliczenia:

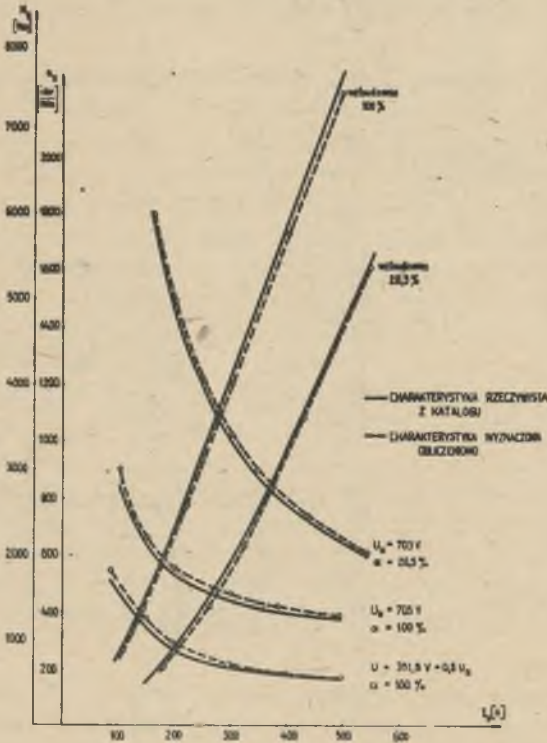
- 1) charakterystyki  $n_g = f(i_g)$  dla napięcia zasilania  $U_H$  i  $0,5 U_H$ , przy stopniu wzbudzenia  $\alpha = 1$ , oraz dla napięcia  $U_H$  przy stopniu wzbudzenia  $\alpha = 0,285$  (rys. 2),
- 2) charakterystyki  $M = f(i_g)$  przy  $\alpha = 1$  i  $\alpha = 0,285$  (rys. 3),
- 3) charakterystyki  $i_g = f(t)$ ;  $n_g = f(t)$ , oraz  $n_g = f(i_g)$  przy skokowej zmianie napięcia od wartości  $0,5 U_H$  do  $U_H$  (rys. 4 i 6),
- 4) charakterystyk  $i_g = f(t)$ ;  $n_g = f(t)$ , przy napięciu  $U_H$  i skokowej zmianie liczby zwojów tak, że stopień wzbudzenia zmieni się od 1 do 0,285 (rys. 5 i 6).

Zmianę napięcia zasilania silnika uzyskuje się przez zastąpienie stałej  $C1$  (napięcie zasilania  $U_g$ ) na rys. 1 komparatorem umożliwiającym zmianę jej wartości w wymaganym zakresie i w żądanym czasie. Podobnie

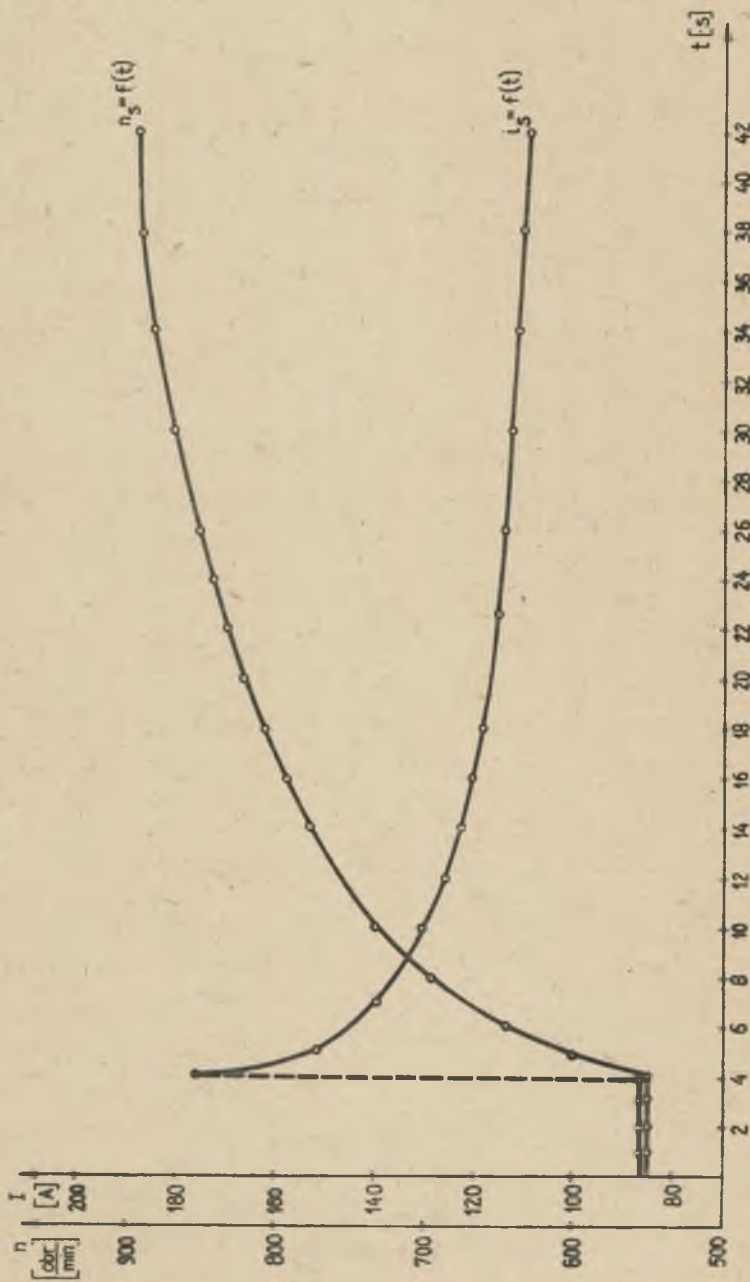




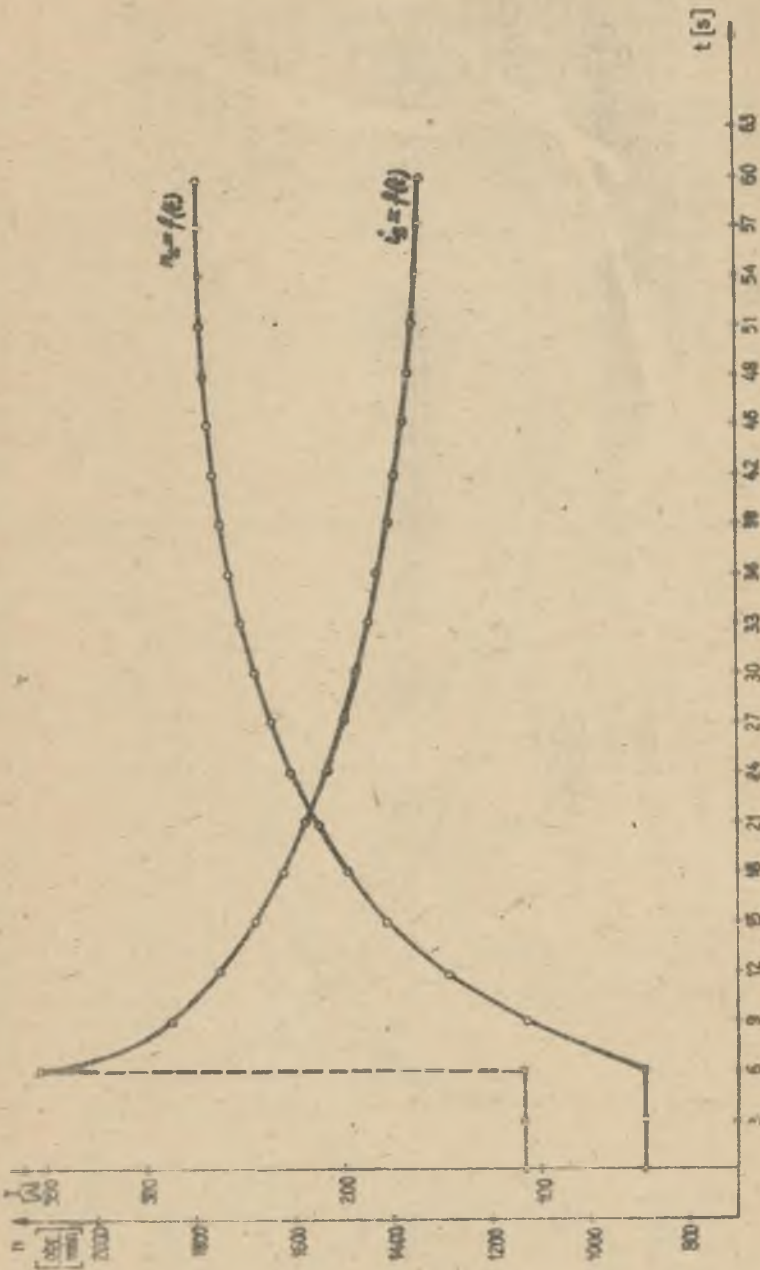
Rys. 2. Linearyzacja trójodcinkowa charakterystyki magnesowania silnika



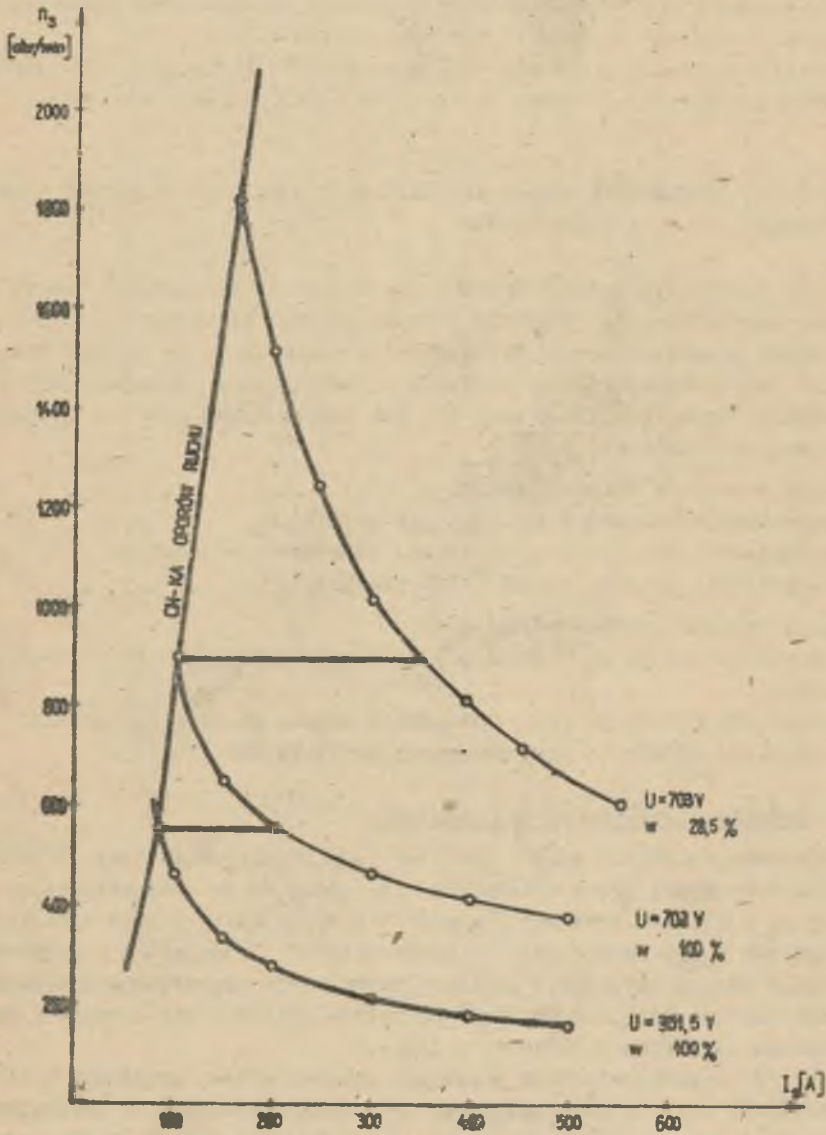
Rys. 3. Przebiegi charakterystyk  $n_B = f(I_B)$  oraz  $M = f(I_B)$  silnika



Rys. 4. Przebiegi czasowe prędkości i prądu silnika przy skokowej zmianie napięcia zasilania



Rys. 5. Przebiegi czasowe prędkości i prądu silnika przy skokowej zmianie liczby zwojów uzwojenia wzbudze-  
nia

Rys. 6. Wyznaczone obliczeniowo przebiegi charakterystyk  $n_s = f(I_s)$

zmianę liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia uzyskuje się przez zastąpienie stałej C2 i C3 odpowiednimi komparatorami. Pierwszy z nich dokonuje zmiany wartości rezystancji silników  $R_g$ , wywołanej zmianą liczby zwojów, natomiast drugi zmienia liczbę zwojów uzwojenia wzbudzenia. Komparator włączony w miejsce stałej C17 umożliwia zmianę wartości momentu obciążenia niezależnego od prędkości obrotowej silnika. Zastosowanie i wykorzystanie tych komparatorów jest zdeterminowane aktualnie prowadzonymi badaniami symulacyjnymi i dlatego nie zaznaczono ich na rys. 1.

Jak wynika z rys. 3, zbieżność charakterystyk wyznaczonych obliczeniowo z charakterystykami podanymi przez producenta jest zadowalająca.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU AUTOMATYCZNEJ REGULACJI PRĘDKOŚCI JAZDY POJAZDÓW TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ

Badania symulacyjne przeprowadzimy dla układu spełniającego funkcje regulacyjne opisane w pracy [1], dla którego schemat strukturalny modelu matematycznego przedstawia rys. 7. Badania te ograniczymy do drugiej strefy regulacji prędkości. Obiektem regulacji w analizowanym układzie jest silnik szeregowy typu PZSb 32b o mocy 1,1 kW. Zakres badań modelu cyfrowego układu jest następujący:

#### 1. Badanie struktury układu regulacji:

- a) sprawdzenie działania ograniczenia prądowego,
- b) sprawdzenie działania ograniczenia od stopnia wzbudzenia,
- c) sprawdzenie procesu stabilizacji prędkości.

#### 2. Badanie dynamiki układu regulacji:

- a) odpowiedź układu na skokową i płynną zmianę wymuszenia prędkościowego,
- b) odpowiedź układu na skokową i płynną zmianę momentu obciążenia,
- c) odpowiedź układu na skokową zmianę napięcia zasilania.

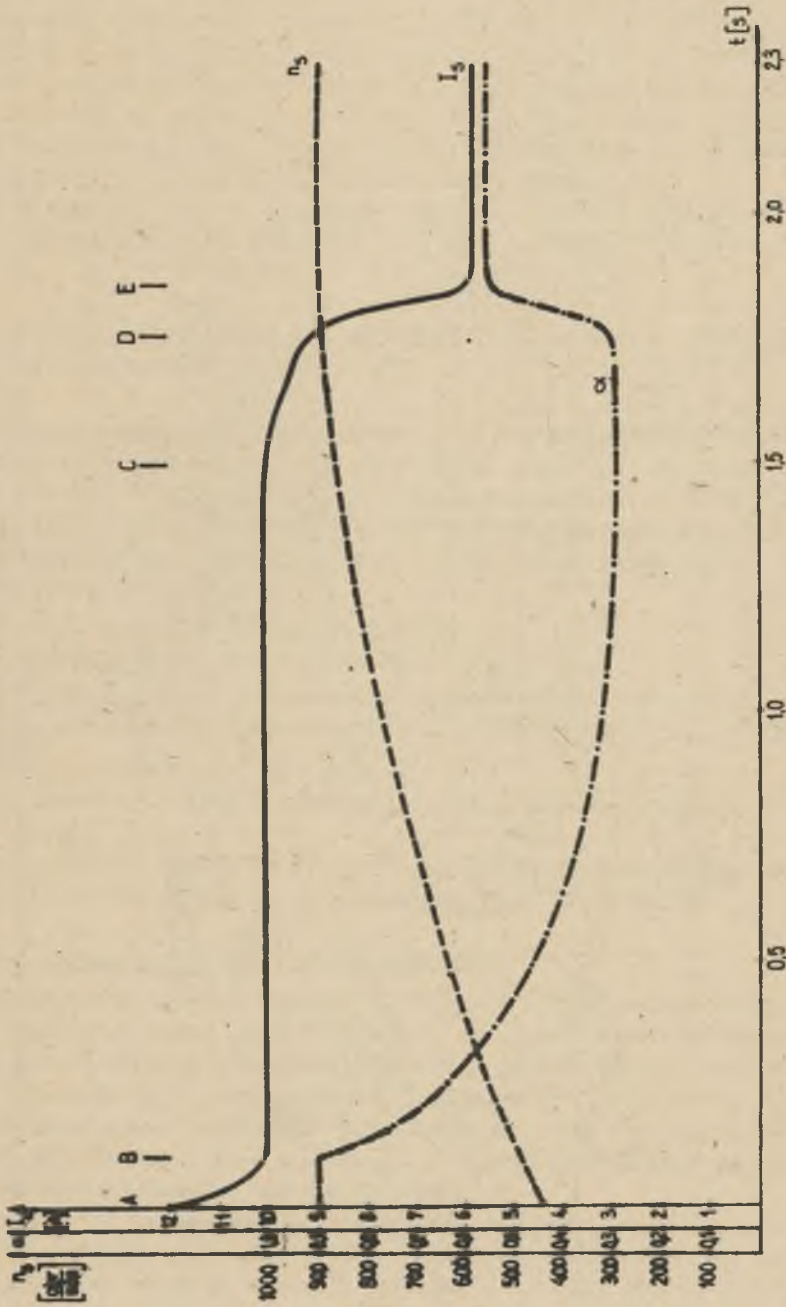
#### 3.1. Badanie struktury układu regulacji

Wprowadzamy do modelu sygnał odpowiadający prędkości zadanej, dobierając początkowy punkt pracy układu tak, aby leżał on na charakterystyce naturalnej  $n_g = f(I_g)$  w przedziale prądów większych aniżeli prąd ograniczenia progowego  $I_{smx}$ . Pomimo pełnego wysterowania regulatora prędkości ( $\Delta n$  - duże) ujemne sprzężenie prądowe uniemożliwia zapoczątkowanie procesu osłabiania wzbudzenia i punkt pracy układu przesuwa się zgodnie z charakterystyką naturalną silnika  $n_g = f(I_g)$ .

Na rys. 8, przedstawiającym przebiegi czasowe prądu, prędkości i stopnia wzbudzenia silnika dla omawianego przypadku, odpowiada to przedziałowi czasowemu zawartemu pomiędzy punktami A i B. Gdy prąd osiągnie nastawioną wartość  $I_{smx}$ , następuje proces osłabiania wzbudzenia, który odbywa







Rys. 8. Przebiegi czasowe prądu, prędkości i stopnia wzbudzenia silnika, wyznaczone w ramach badań struktury układu regulacji

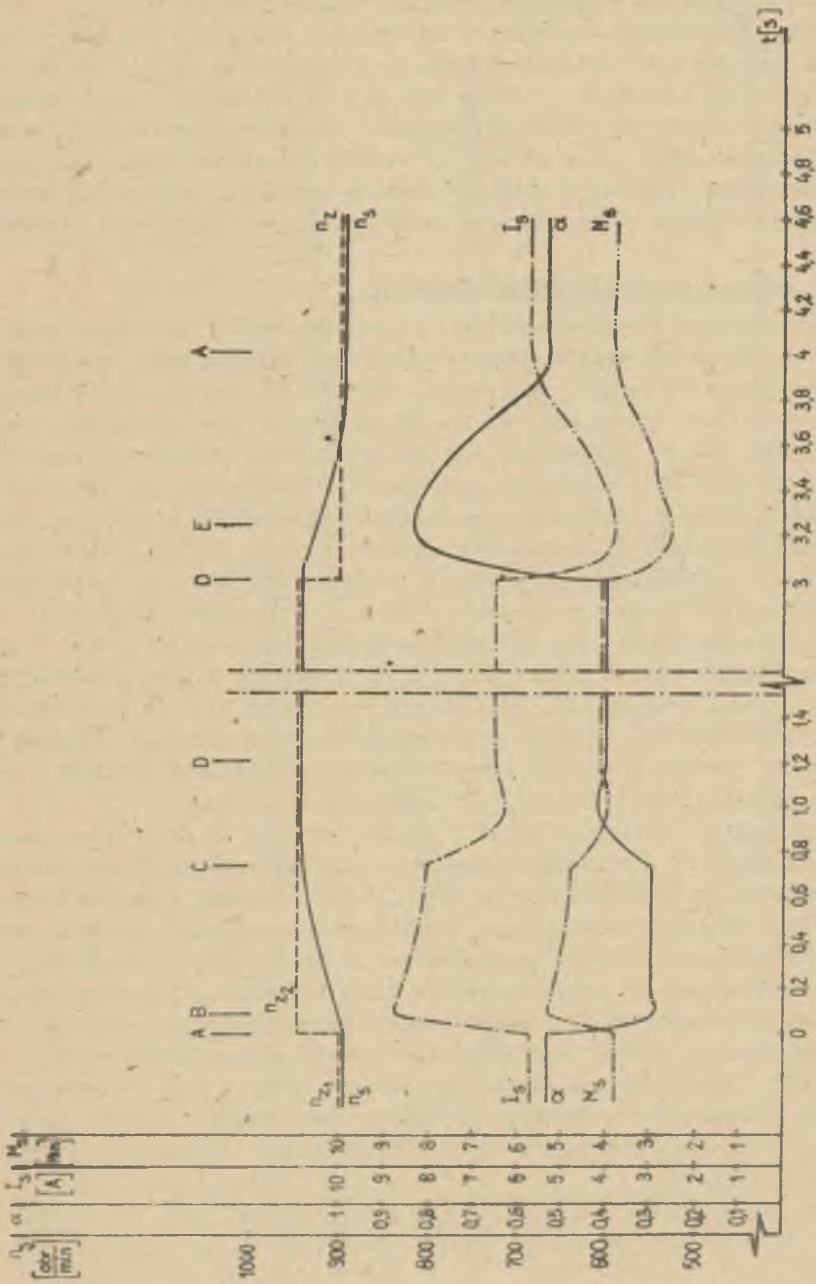
się przy stałej wartości prądu silnika  $I_{\text{BMX}}$  i który zostaje zakończony wówczas, gdy stopień wzbudzenia osiągnie wartość minimalną  $\alpha_{\text{min}}$  (przedział czasowy pomiędzy punktami BC na rys. 8). Następnie prędkość silnika zmienia się zgodnie z charakterystyką  $n_s = f(I_s)$  przy  $\alpha_{\text{min}}$ , co odpowiada przedziałowi czasowemu C - D na rys. 8 i po zbliżeniu się do wartości zadanej rozpoczyna się proces stabilizacji prędkości (przedział czasowy D-E). Ustalony punkt pracy układu E będzie odpowiadał aktualnemu momentowi obciążenia silnika, a ustalona różnica pomiędzy prędkością zadaną i rzeczywistą silnika będzie uchybem statycznym układu regulacji prędkości.

### 3.2. Badanie dynamiki układu regulacji

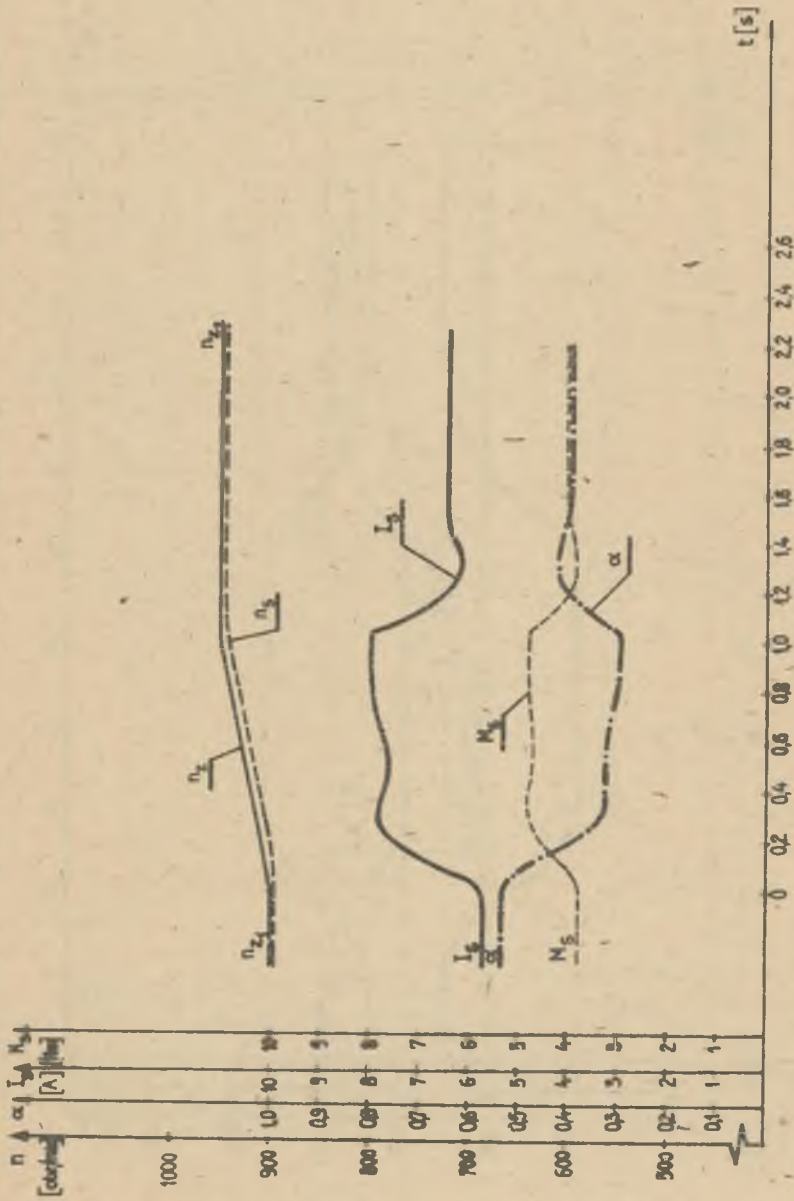
W analizowanym układzie regulacji sygnał prędkości obrotowej jest wymuszeniem, natomiast zmiana momentu obciążenia silnika oraz napięcie zasilania traktowane są jako zakłócenia. Przeanalizujemy odpowiedź badanego układu na skokową zmianę wymuszenia. Przebiegi czasowe prędkości, prądu, momentu oraz stopnia wzbudzenia silnika przedstawia rys. 9. Po ustaleniu się punktu pracy przy prędkości  $n_{z1}$  (punkty A na rys. 9) wprowadzono nową, większą wartość prędkości  $n_{z2}$ . Różnica prędkości  $\Delta n = n_{z2} - n_{z1}$  zwiększy sygnał wyjściowy  $S_{\Delta n}$  regulatora prędkości (rys. 7), co z kolei spowoduje wzrost współczynnika wypełnienia impulsatora  $\beta$  i w konsekwencji zmniejszanie się stopnia wzbudzenia silnika do wartości minimalnej  $\alpha_{\text{min}}$  (odcinek czasowy AB na rys. 9). Następnie prędkość silnika rośnie zgodnie z charakterystyką  $n = f(I)$  przy  $\alpha_{\text{min}}$ , zbliżając się do prędkości zadanej  $n_{z2}$  (odc. czasowy BC), przy której rozpoczyna się proces stabilizacji (odc. czasowy CD) i ustala się nowy punkt pracy układu. Rysunek 9 przedstawia również przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości układu przy skokowym obniżeniu wartości prędkości zadanej.

Jeśli pomiędzy nastawnik jazdy i węzeł sumacyjny na wejściu regulatora prędkości (rys. 7) wprowadzimy element inercyjny, wówczas zmianę wymuszenia układu można traktować - przy dużej stałej czasowej elementu inercyjnego - jako liniową funkcję czasu. Przebiegi czasowe analizowanych wielkości dla takiego przypadku przedstawione są na rys. 10. Zważywszy, że kształt krzywej zmiany prądu w stanach pracy nieustalonej determinuje wartość siły przyczepności [5], można poszukiwać optymalnego przebiegu prądu poprzez zmianę stałej czasowej zastosowanego członu inercyjnego.

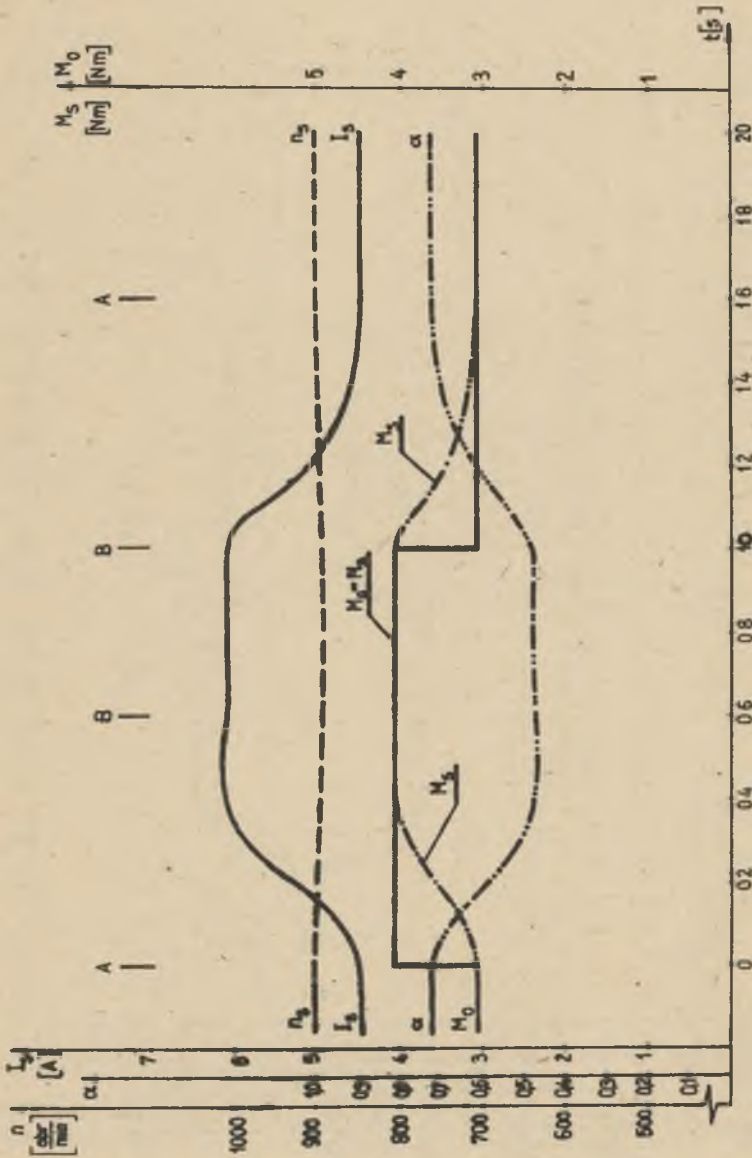
Odpowiedź układu na zakłócenia spowodowane skokową zmianą momentu obciążenia w obszarze stabilizacji prędkości oraz skokową zmianą napięcia zasilania w trakcie rozruchu w strefie osłabionego wzbudzenia przedstawiają rys. 11 i 12.



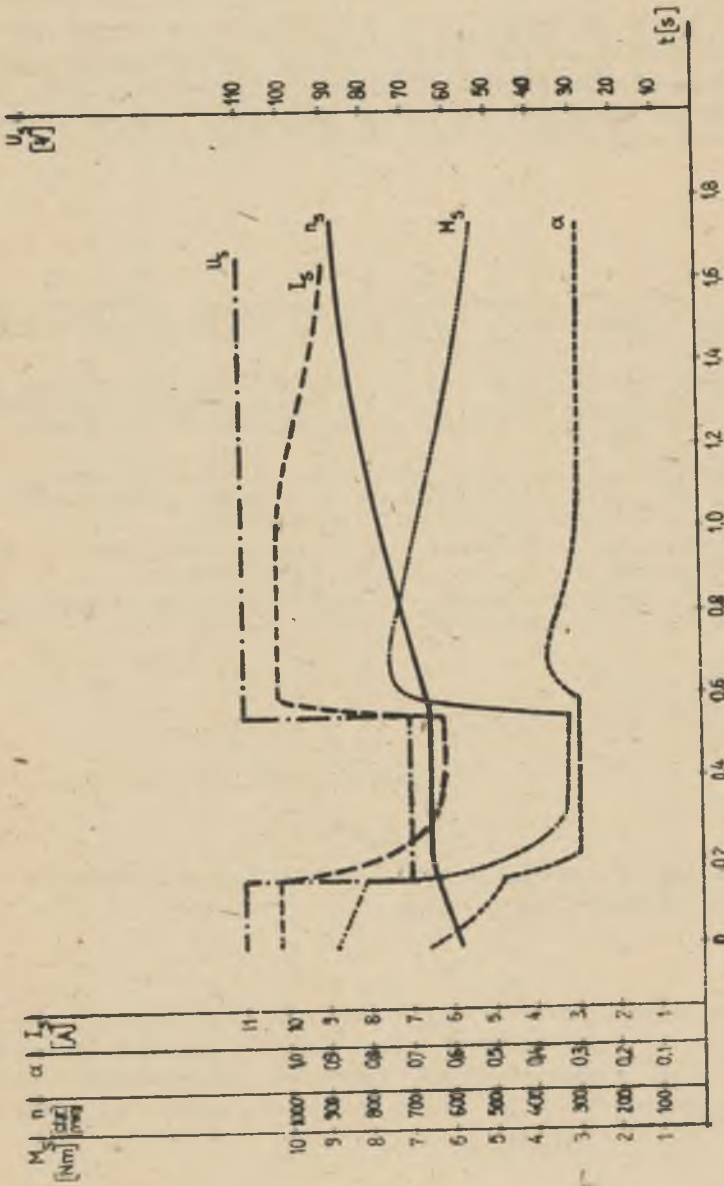
Rys. 9. Odpowiedź układu regulacji prędkości silnika, na skokową zmianę prędkości zadanej



Rys. 10. Odpowiedź układu regulacji prędkości silnika na liniową zmienię prędkości zadanej



Rys. 11. Odpowiedź układu regulacji prędkości silnika na zakłócenia spowodowane skokową zmianą momentu obciążenia silnika w obszarze stabilizacji prędkości



Kys. 12. Odpowiedź układu regulacji prędkości silnika na zakłócenia spowodowane zmianą napięcia zasilania, w trakcie rozruchu, w strefie osłabionego wzbudzenia

#### 4. ZAKOŃCZENIE

Prezentowane w artykule przebiegi mają charakter przykładowy. Rodzaj i zakres badań zależą bowiem od celu, któremu mają służyć, od konieczności wyeksponowania tych przebiegów, które umożliwią ocenę badanego układu i wyciągnięcie wniosków szczegółowych. Autor nie komentuje zatem otrzymanych wyników, gdyż celem artykułu (łącznie z artykułem [1]) jest zaprezentowanie metody analizy, a nie analiza konkretnego układu elektrodynamicznego.

#### LITERATURA

- [1] KONOPKA Z.: Uwagi o strukturze i metodzie analizy wybranych układów napędowych pojazdów trakcji elektrycznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka z 78, 1982.
- [2] KONOPKA Z.: Regulacja prędkości pojazdów trakcji elektrycznej i spalino-elektrycznej poprzez impulsową zmianę stopnia wzbudzenia silników szeregowych prądu stałego. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1978.
- [3] KRÓLIKOWSKI M.: Badania symulacyjne pracy silnika szeregowego prądu stałego w wybranych układach napędowych pojazdów trakcyjnych. Praca magisterska. Politechnika Śląska, Gliwice 1979.
- [4] Oprogramowanie maszyn cyfrowych OBRA 1300. Program symulacji cyfrowej maszyny analogowej. Publ. nr 4304101, ELWRO 1972.
- [5] ISAJEW I.P.: Wlivanije reżimow raboty elektriczeskogo podwiżnogo so-stawa na koeficient scieplenia. Elektrichestwo nr 7, 1963.

Wpłynęło do redakcji 8.VI.1981 r.

Recenzent: doc. dr inż. Zbigniew Fidrych

#### ПРИМЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫБРАННЫХ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ ПОВЕЗДОВ ЭЛЕКТРОТЯГИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### Резюме

Опираясь на единых аналитических решениях, которые представлены в работе [1], построены диаграммы семейства статических и динамических характеристик тягового двигателя в двух диапазонах регулировки его вращения, а также характеристики автоматической регулировки скорости вращения двигателя в зоне ослабленного поля возбуждения.



EXAMPLES OF TESTING OF THE POWER TRANSMISSION SYSTEMS  
IN TRACTION - VEHICLES BY COMPUTERS

S u m m a r y

Being upon analytical relations presented in paper [1]. Static and dynamic characteristics of the traction engine for two ranges of speed control as well as those of the automatic speed control system of the traction engine in the weakened induction range have been indicated.