

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Zdzisław KONOPKA: Uwagi o strukturze i metodzie analizy wybranych układów napędowych pojazdów trakcji elektrycznej	5
2. Zdzisław KONOPKA: Przykłady badań wybranych układów napędowych pojazdów trakcyjnych z zastosowaniem modelowania na MC	19
3. Eugeniusz KAŁUŻA: Analiza celowości wprowadzenia do eksploatacji lokomotyw sieciowo-spalinowych	37
4. Andrzej BUJAKOWSKI, Wiesław JAGŁA: Mikroprocesorowy system sterowania lokomotywy manewrowej	43
5. Wiesław JAGŁA, Andrzej BUJAKOWSKI: Koncepcja układu sterowania cyfrowego lokomotyw spalinowo-elektrycznych	55
6. Piotr GAWOR: Wpływ rezystancji złącza podłużnego szyn trakcji elektrycznej na powstawanie prądów błądzących	65
7. Roman KONIECZNY: Kryteria oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną	77
8. Szymon CIURA: Model matematyczny do analizy zagrożenia pożarowego kabli pracujących w tunelach kablowych	87
9. Franciszek BUCHTA: O efektywności sygnalizatorów zwarc w sieciach kablowych średnich napięć	99

Zdzisław KONOPKA
Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

UWAGI O STRUKTURZE I METODZIE ANALIZY WYBRANYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH POJAZDÓW TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ

Streszczenie: W artykule przedstawiono modele matematyczne wybranych układów napędowych lokomotyw elektrycznych, umożliwiające wyznaczenie charakterystyk statycznych i dynamicznych tych układów, z wykorzystaniem maszyny analogowej bądź cyfrowej.

1. WSTĘP

Pojazdy trakcyjne napędzane są z reguły silnikami szeregowymi prądu stałego, które będąc elementami nieliniowymi są znacznie trudniejsze w analizie, aniżeli silniki ze wzbudzeniem niezależnym. W najprostszym układzie napędowym lokomotywy elektrycznej, jakim jest układ z rozrządem klasycznym, i ponadto w specyficznym stanie dynamicznym, jakim jest rozruch, przebiegi czasowe prądu i prędkości można wyznaczyć metodą analityczno-graficzną [10]. W pojazdach trakcyjnych o złożonych układach napędowych, jak np.: w lokomotywach spalinowych z przekładnią elektryczną lub pojazdach wyposażonych w układy automatycznej regulacji prędkości, przeprowadzenie analizy dynamicznej, umożliwiającej ocenę tych układów, jest żmudne i pracochłonne, ponieważ w ich strukturze znajduje się szereg elementów nieliniowych. Opis matematyczny poszczególnych elementów całego układu za pomocą równań różniczkowych liniowych jest związany z założeniem liniowości układu w otoczeniu określonego punktu równowagi układu (w stanie ustalonym). Zbudowany w ten sposób model matematyczny umożliwia analizę stabilności układu [8, 11], ocenę własności regulacyjnych układu w oparciu o sformułowane wcześniej kryterium oceny [5] bądź też syntezę optymalnych układów regulacji [7]. Odzworowanie matematyczne złożonych układów napędowych pojazdów trakcyjnych za pomocą nieliniowych równań różniczkowych i rozwiązywanie ich z wykorzystaniem analogowej lub cyfrowej techniki obliczeniowej umożliwia wyznaczenie charakterystyk statycznych, quasi-statycznych (np. zmianę prądu silnika w funkcji czasu, w stanie mechaniczne ustalonym, przy zasilaniu impulsowym), bądź dynamicznych tych ukła-

dów w całym obszarze ich dopuszczalnych zmienności [1, 9, 12]. Szereg zalet modelowania cyfrowego, a w szczególności symbolicznego, łączącego zalety analogowej i cyfrowej techniki obliczeniowej, skłania do takiej konstrukcji modeli matematycznych rozpatrywanych układów napędowych pojazdów trakcyjnych, która umożliwi bezpośredni zapis programu obliczeń dla MC, za pomocą wybranego przez programującego języka symbolicznego. Taką metodę analizy przedstawiono w niniejszym artykule.

2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO LOKOMOTYWY LUB JEDNOSTKI ELEKTRYCZNEJ

Układ napędowy lokomotywy lub jednostki elektrycznej jest odpowiednią, uzależnioną od typu pojazdu, konfiguracją połączeń silników trakcyjnych. Zatem wszelkie związki analityczne będą rozpatrywane w odniesieniu do jednego silnika. Model matematyczny silnika szeregowego prądu stałego, zapisany w postaci nieliniowych równań różniczkowych, jest w literaturze znany [1, 12], jednak dotyczy on analizy pracy silnika w pierwszej strefie regulacji prędkości. W niniejszej pracy przedstawiono model matematyczny silnika trakcyjnego, umożliwiający analizę jego pracy w obydwu strefach regulacji prędkości. Założono przy tym, że regulacja prędkości silnika w pierwszej strefie odbywa się poprzez płynną, ciągłą bądź impulsową zmianę napięcia zasilającego, natomiast w drugiej strefie poprzez zmianę stopnia wzbudzenia silnika jednym z trzech sposobów:

- 1) przez zmianę liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia,
- 2) przez zbocznikowanie uzwojenia wzbudzenia bocznikiem czynno-indukcyjnym,
- 3) przez zbocznikowanie uzwojenia wzbudzenia impulsatorem tyrystorowym.

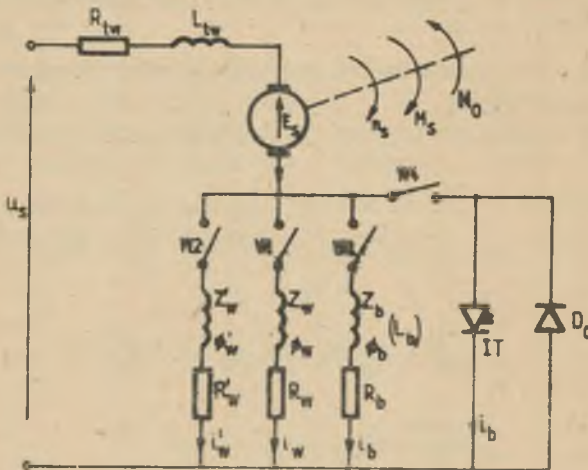
Schemat zastępczy silnika, w którym uwzględniono powyższe możliwości zmiany stopnia wzbudzenia silnika, przedstawia rys. 1.

Przy założeniu, że:

- indukcyjność twornika w funkcji prądu silnika jest stała,
- silnik jest skompensowany, a więc pomija się reakcję twornika,
- wpływ strumienia rozproszenia oraz prądów wirowych na strumień wzbudzenia jest pomijalny,

sformułowano równania opisujące stan pracy silnika.

Postać tych równań uwzględnia wymienione trzy sposoby zmiany stopnia wzbudzenia silnika trakcyjnego.



Rys. 1. Schemat zastępczy silnika trakcyjnego

2.1. Silnik trakcyjny z regulacją prędkości w II strefie poprzez zmianę liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia

Zmianę liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia, realizowaną w układach rzeczywistych, np. przez zwarcie części zwojów, przedstawiono schematycznie na rys. 1.

Przy włączonym wyłączniku W1 (pozostałe wyłączone) silnik pracuje z pełnym wzbudzeniem, natomiast przy włączonym wyłączniku W2 - z osłabionym wzbudzeniem.

Zakładając pełne wzbudzenie silnika oraz stosując oznaczenie występujących wielkości zgodnie z rys. 1, równania opisujące pracę silnika będą miały postać następującą:

$$U_s = C_E \Phi_w n_s + R_{tw} i_s + L_{tw} \frac{di_s}{dt} + R_w i_w + Z_w \frac{d\Phi_w}{dt} \quad (1)$$

$$M_s = C_M \Phi_w i_s \quad (2)$$

$$M_s = M_0 - M_0 - \frac{\pi}{30} J \frac{dn_s}{dt} \quad (3)$$

$$M_0 = M_{01} + M_{02} \quad (4)$$

$$M_{01} = r(n_s) \quad (5)$$

$$i_w = f(\Phi_w) \quad (6)$$

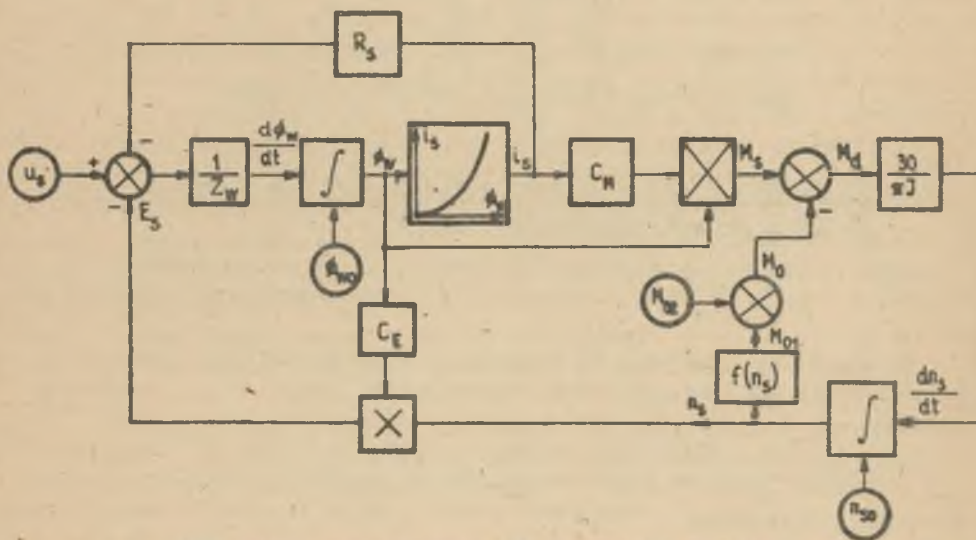
W układzie równań (1) moment obciążenia M_0 przedstawiono jako sumę dwóch momentów składowych:

M_{O1} - moment obciążenia zależny od prędkości (pozorowane opory ruchu zależne od prędkości),

M_{O2} - moment obciążenia niezależny od prędkości (pozorowane opory ruchu zależne od profilu pionowego i poziomego (trasy)).

Pomijając w równaniu (1) indukcyjność twornika L_{tw} oraz uwzględniając, że $i_s = i_w$, $R_{tw} + R_w = R_s$, otrzymany po przekształceniu następującą jego postać:

$$\frac{d\phi_w}{dt} = \frac{1}{Z_w} (U_s - C_E \phi_w n_s - R_s i_s) \quad (7)$$



Rys. 2. Schemat strukturalny modelu matematycznego silnika trakcyjnego

Równaniami (2) i (7) odpowiada schemat strukturalny (rys. 2), przedstawiający szereg prostych operacji, takich jak: całkowanie, dodawanie, mnożenie, dzielenie itp., które w zależności od zastosowanej techniki rozwiązywania mogą być zastąpione standardowymi blokami operacyjnymi - w przypadku modelowania analogowego, bądź też standardowymi funkcjami programowymi - w przypadku modelowania cyfrowego.

Regulację prędkości w przedstawionym modelu silnika trakcyjnego uzyskuje się przez płynną bądź skokową zmianę napięcia U_s w przypadku I strefy regulacji, oraz przez skokową zmianę liczby zwojów (od Z_w do Z'_w) i rezystancji silnika (od $R_s = R_{tw} + R_w$ do $R'_s = R'_{tw} + R'_w$) w przypadku drugiej strefy regulacji prędkości.

2.2. Silnik trakcyjny z regulacją prędkości w II strefie przez zbudowanie uzwojenia wzbudzenia silnika bocznikiem czynno-indukcyjnym

Ten sposób regulacji prędkości odpowiada układowi przedstawionemu na rys. 1, przy włączonych wyłącznikach W1 i W3 oraz wyłączonych W2 i W4. Przy uproszczeniach analogicznych jak dla p. 2.1 równania opisujące pracę silnika są następujące:

$$\frac{d\Phi_w}{dt} = \frac{1}{Z_w} (U_B - C_E \Phi_w n_B - R_{tw} i_s - R_w i_w) \quad (8)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_b} (Z_w \frac{d\Phi_w}{dt} + R_w i_w - R_b i_b) \quad (9)$$

$$M_d = M_B - M_0 = \frac{\pi}{30} J \frac{dn_B}{dt} \quad (10)$$

$$M_B = C_M \Phi_w i_s \quad (11)$$

$$M_0 = M_{01} + M_{02}; \quad M_{01} = f(n_B) \quad (12)$$

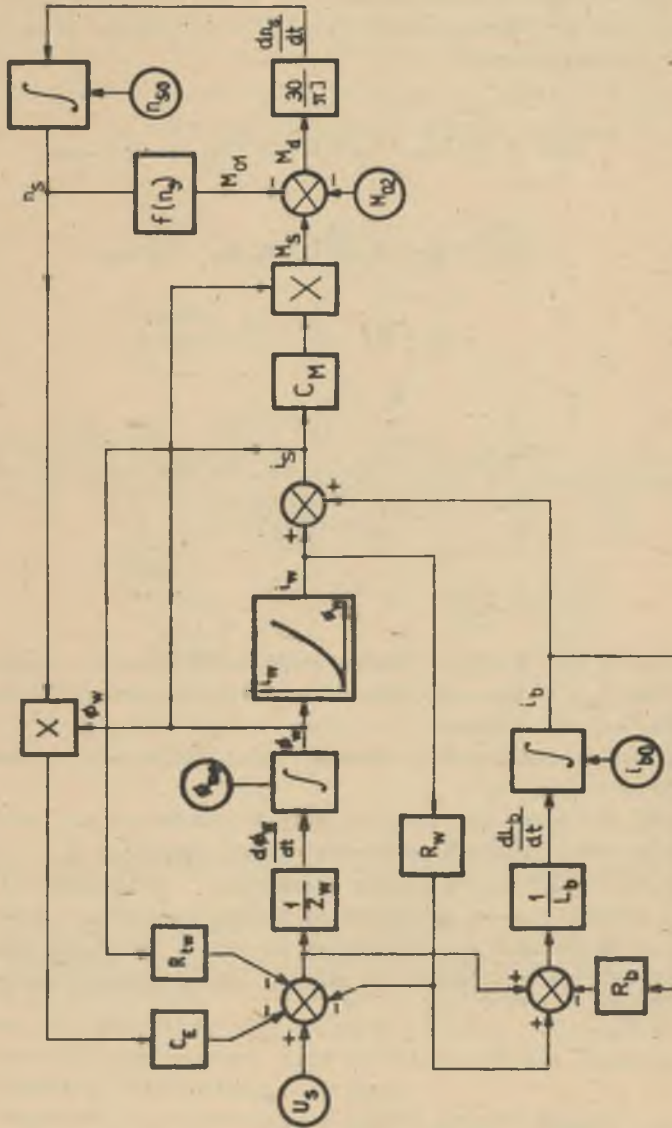
$$i_w = f(\Phi_w) \quad (13)$$

$$i_s = i_w + i_b \quad (14)$$

W zależności (9) przyjęto niezmiennosc indukcyjności bocznika L_b w funkcji prądu i_b , co ma praktyczne uzasadnienie, ponieważ boczniki te pracują w stanie nienasyconym.

Schemat strukturalny modelu matematycznego opisanego równaniami (8) ÷ (14) przedstawia rys. 3.

Regulację prędkości obrotowej silnika w przedstawionym modelu silnika uzyskuje się przez płynną bądź skokową zmianę napięcia U_B - w przypadku I strefy, oraz przez skokową zmianę rezystancji bocznikującej uzwojenie wzbudzenia silnika R_b - w przypadku II strefy regulacji. Posługując się schematem strukturalnym przedstawionym na rys. 3 sporządza się model analogowy bądź cyfrowy analizowanego układu, umożliwiającą wyznaczenie żądanych przebiegów.



Rys. 3. Schemat strukturalny modelu matematycznego silnika trakcyjnego, uwzględniający regulację prędkości silnika w II strefie przez zbudowanie wzmożenia bocznikiem czynno-indukcyjnym

2.3. Silnik trakcyjny z płynną regulacją prędkości w II strefie przez z bocznikowanie uzwojenia wzbudzenia impulsatorem tyrystorowym

Schemat układu umożliwiającego regulację prędkości poprzez płynną zmianę stopnia wzbudzenia silnika przedstawia rys. 1 (przy włączonych wyłącznikach W1 i W4 oraz wyłączonych W2 i W3). W celu ułatwienia analizy wprowadzono dodatkowe uproszczenia, a mianowicie:

- 1) Zmianę stanu układu, spowodowaną zmianą wymuszenia lub zakłóceń, rozpatruje się dla wartości średnich prądu silnika i prądu wzbudzenia, z pominięciem pulsacji spowodowanych impulsowaniem w obwodzie wzbudzenia.
- 2) Impulsator tyrystorowy, bocznikujący uzwojenie wzbudzenia, jest reprezentowany przez zastępczą rezystancję nieliniową \bar{R}_b . Jej wartość jest funkcją współczynnika wypełnienia impulsatora β , natomiast nie zależy od prądu obciążenia. Wiąże się to z założeniem, że stopień wzbudzenia $\alpha = \frac{i_w}{i_b}$ nie zależy od prądu obciążenia. Wartość $R_b = f(\beta)$ oblicza się z zależności:

$$R_b = R_w \frac{\alpha(\beta)}{1 - \alpha(\beta)} \quad (15)$$

dla wyznaczonego przebiegu funkcji $\alpha = f(\beta)$.

- 3) Indukcyjność twornika jest stała, niezależna od prądu i_b

Przy tych uproszczeniach model matematyczny silnika reprezentują następujące równania:

$$U_s = C_E \Phi_w n_s + R_{tw} i_s + L_{tw} \frac{di_s}{dt} + \bar{R}_b i_b \quad (16)$$

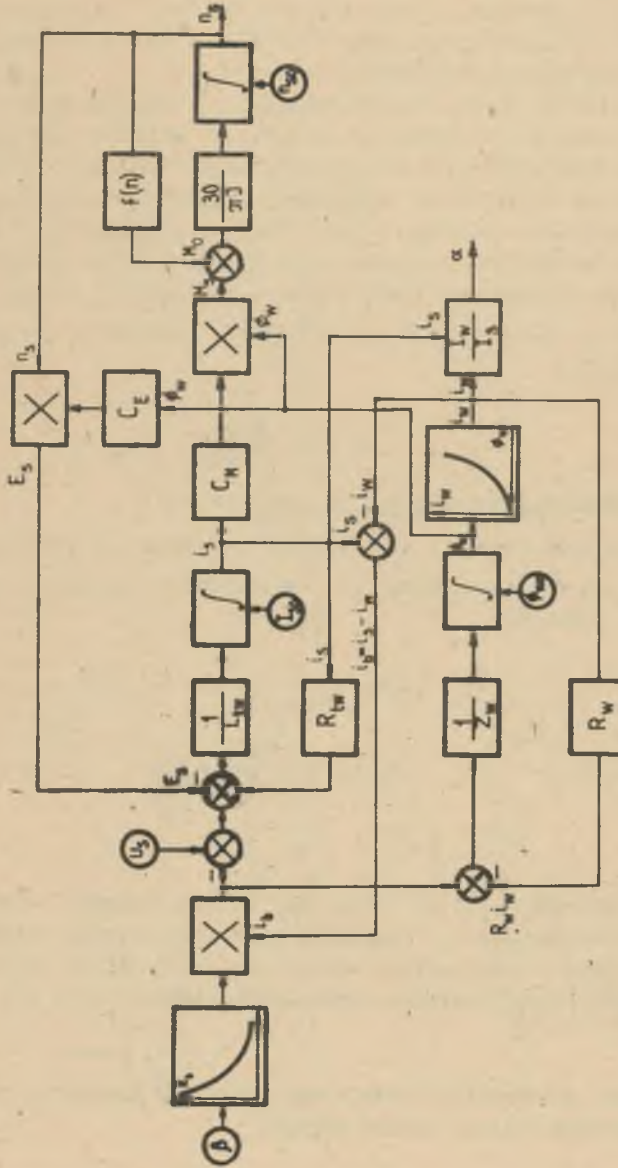
$$R_w i_w + Z_w \frac{d\Phi_w}{dt} = \bar{R}_b i_b \quad (17)$$

$$\bar{R}_b = f(\beta) \quad (18)$$

oraz równania (10), (11), (12), (13) i (14). Schemat strukturalny modelu przedstawiono na rys. 4. Regulację prędkości silnika uzyskuje się w omawianym modelu poprzez płynną zmianę napięcia - dla I strefy oraz przez płynną zmianę współczynnika wypełnienia impulsatora - dla II strefy.

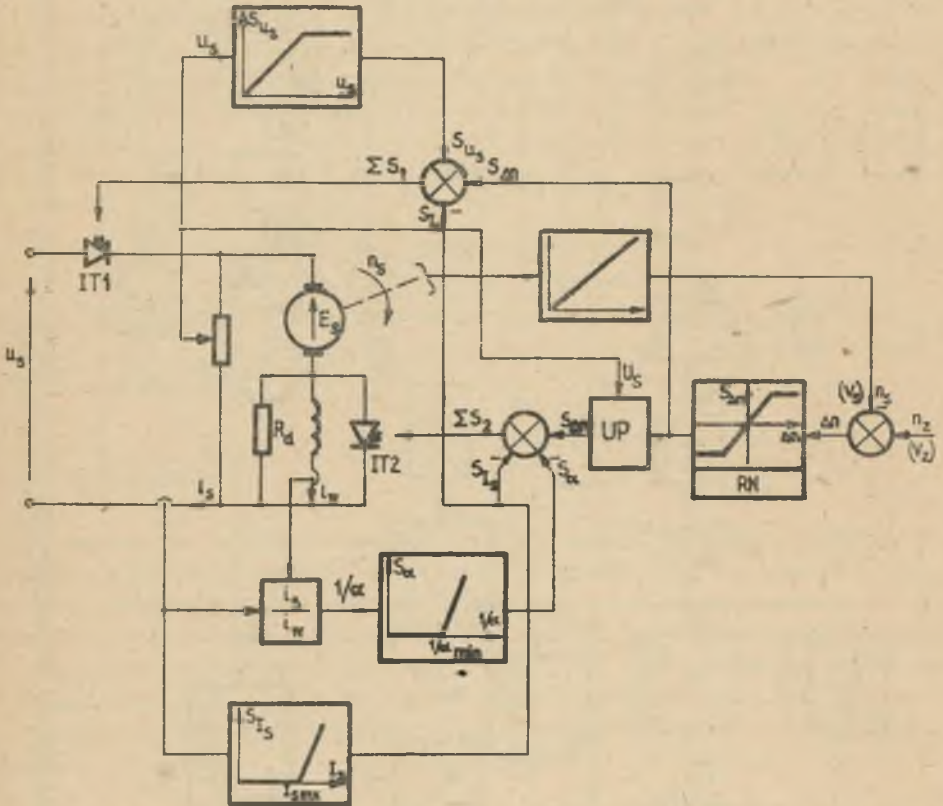
3. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU AUTOMATYCZNEJ REGULACJI PRĘDKOŚCI JAZDY POJAZDÓW TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ

Każdy układ regulacji automatycznej składa się z obiektu regulacji oraz z odpowiedniej konfiguracji członów regulacji o znanych charakterystykach statycznych i dynamicznych - w przypadku analizy bądź poszukiwa-



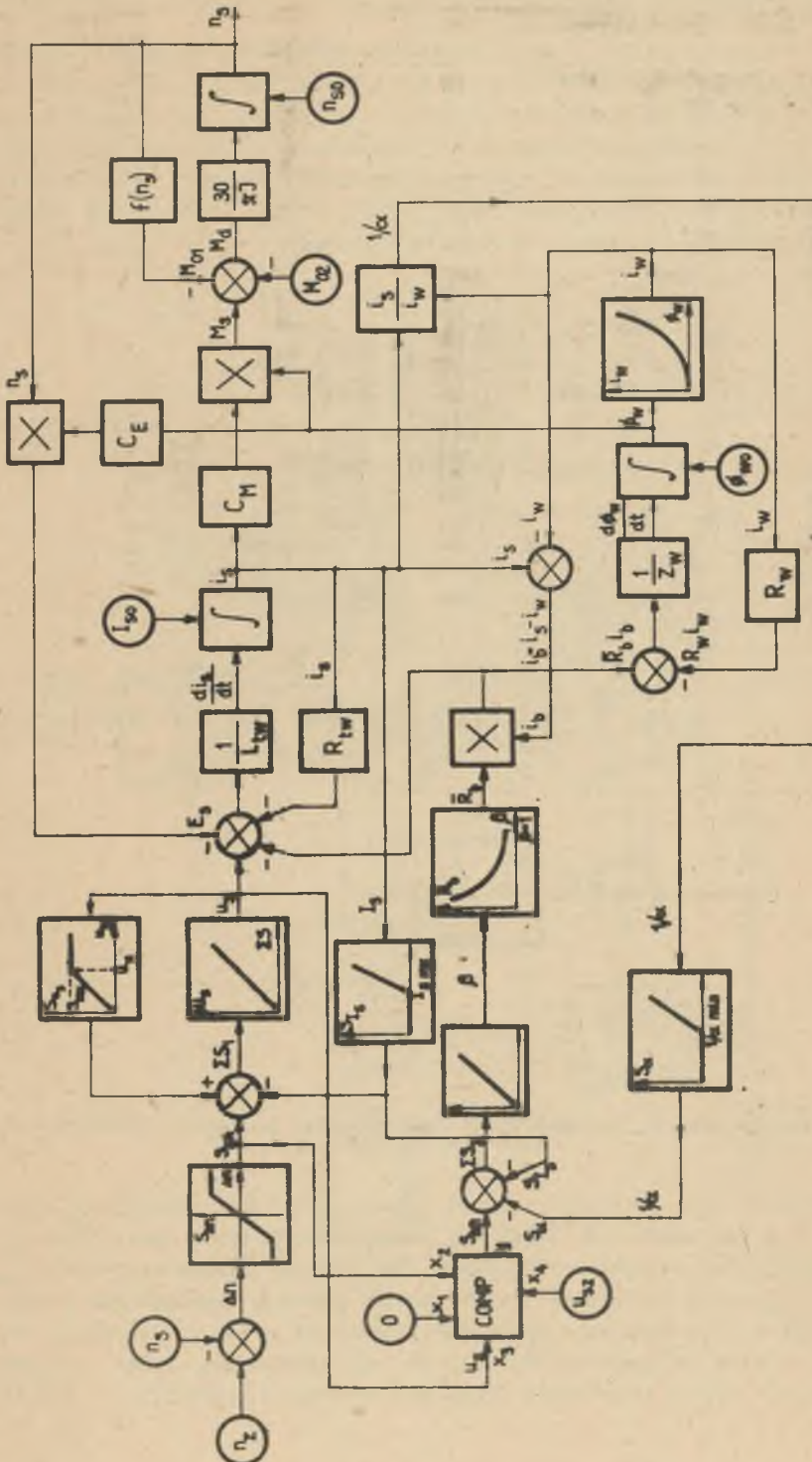
Rys. 4. Schemat strukturalny modelu matematycznego silnika trakcyjnego, uwzględniający regulację prędkości silnika w II strefie przez zbcznikowanie uzwojenia wzbudzenia impulsatorem tyrystorowym

nych - w przypadku syntezy. Model matematyczny układu regulacji będzie więc złożony z modelu obiektu (np. wg p. 2) oraz modelu członów regulacji i będzie konfiguracją bloków operacyjnych w przypadku modelowania analogowego bądź standardowych funkcji programowych - w przypadku symbolicznego modelowania cyfrowego. Na rys. 5 przedstawiono schemat przykładowego rozwiązania układu automatycznej dwustrefowej regulacji prędkości lokomotywy w odniesieniu do jednego silnika trakcyjnego.



Rys. 5. Schemat układu automatycznej dwustrefowej regulacji prędkości silnika trakcyjnego

Działanie układu jest następujące: różnica pomiędzy prędkością zadaną v_z (lub v_z w odniesieniu do prędkości jazdy lokomotywy) i rzeczywistą silnika v ysterowuje regulator prędkości RN, którego sygnał wyjściowy $S_{\Delta n}$, łącznie z sygnałem sprzężenia prądowego S_{IS} , steruje impulsatorem w obwodzie twornika IT₁. Regulacja prędkości odbywa się zatem w I strefie. Gdy napięcie silnika osiągnie wartość zadaną, np. znamionową, układ progowy UP przekazuje sygnał regulatora prędkości do toru regulacji w drugiej



Rys. 6. Schemat strukturalny modelu matematycznego układu automatycznej dwustronnej regulacji prędkości silnika trakcyjnego

strefie. W torze tym sygnał sterujący jest sumą trzech sygnałów: dodatniego od różnicy prędkości, ujemnego od prądu silnika i ujemnego od stopnia wzbudzenia. Przedstawiony układ zapewnia rozruch i regulację prędkości przy stałej zadanej wartości prądu rozruchowego. Nie uwzględniono sygnału z układu przeciwpoślizgowego i układu formowania prądu rozruchowego, zapewniającego wykorzystanie maksymalnej siły pociągowej, np. wg pracy [3]. Schemat strukturalny modelu matematycznego opisanego układu, przedstawiony w wersji umożliwiającej bezpośrednie sporządzenie modelu analogowego lub cyfrowego, pokazano na rys. 6. Model ten umożliwi analizę pracy układu bądź syntezę polegającą na doborze optymalnych nastaw regulatora i członów formujących w obwodach sprzężeń zwrotnych. W prezentowanym schemacie strukturalnym układ progowy UP (rys. 5) przedstawiono za pomocą komparatora COMP, którego działanie jest następujące:

$$y = \begin{cases} x_1 & \text{jeżeli } x_3 < x_4 \\ x_2 & \text{jeżeli } x_3 \geq x_4 \end{cases}$$

Zatem, dopóki napięcie silnika jest mniejsze od wartości zadanej $U_s < U_{sz}$, dopóty sygnał $S_{\Delta n}$ ma wartość 0; gdy $U_s \geq U_{sz}$, na wyjściu komparatora pojawi się sygnał $S_{\Delta n}$.

4. ZAKOŃCZENIE

Przedstawione modele matematyczne analizowanych układów umożliwiają proste w realizacji badania własności tych układów z zastosowaniem elektronicznej techniki obliczeniowej. W ten sposób odwzorowany może być układ napędowy dowolnego pojazdu trakcji elektrycznej, wyposażony w silniki szeregowo prądu stałego. Wyprowadzone modele matematyczne, w części dotyczącej silnika szeregowego, bazują na podobnych uproszczeniach co modele klasyczne [13]. Są zatem inną formą odwzorowania, nie idealną, lecz bliższą rzeczywistości z uwagi na uwzględnienie występujących nieliniowości.

LITERATURA

- [1] DUDEK W., MACHOWSKI A., MACHOWSKI J., STANKIEWICZ A.: Technika analogowa w zastosowaniu do obliczeń trakcyjnych i parametrów silników przy zasilaniu impulsowym. Teoretyczne Zagadnienia Trakcji Elektrycznej. Trakcja Elektryczna w Górnictwie. PWN, Warszawa 1972.
- [2] FIEKOSTOW W.P.: Idealizowanie i sieciowy przewidywalny modelowanie automatycznie regulowanego taboru kolejowego przy użyciu modelu. Prace Instytutu Transportu. Moskwa "Transport" 1970. Wypusk 327.

- [3] FIEOKISTOW W.P.: Ułączenie tągowych svojstw elektropodwiżnogo sostawa pri pławnom awtomatичесkom puskie. Elektrichestwo 1970, nr 10.
- [4] FIEOKISTOW W.P., SZAFKIN I.N.: Awtomatичесkoje regulirovanije skorosti elektropodwiżnogo sostawa. Żeleznodorożnyj transport nr 3, 1968.
- [5] GABRYŚ W.: Uwagi o strukturze i własnościach regulacyjnych układów przekładni elektrycznych dla lokomotyw spalinowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" z. 27, Gliwice 1970.
- [6] ISAJEW I.P.: Wlijanie reżimow raboty elektrieskogo podwiżnogo sostawa na koeficient sčepłenija. Elektrichestwo nr 7, 1963.
- [7] KALUŻA E.: Analiza i synteza układów regulacji mocy lokomotyw spalinowo-elektrycznych metodami przestrzeni stanów. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka z. 38, Gliwice 1973.
- [8] KONOPKA Z.: Analiza dynamiczna nieliniowego układu regulacji mocy przekładni elektrycznej typu prąd przemienny - prąd stały. Praca magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 1970.
- [9] KONOPKA Z.: Regulacja prędkości pojazdów trakcji elektrycznej i spalinowo-elektrycznej poprzez impulsową zmianę stopnia wzbudzenia silników szeregowych prądu stałego. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1978.
- [10] KUCZEWSKI Z.: Napęd elektryczny. WNT, Warszawa 1971, ss. 286 i 428.
- [11] MALISZEWSKI J.: Regulacja i stabilizacja prędkości obrotowej szeregowych trakcyjnych silników prądu stałego. Teoretyczne Zagadnienia Trakcji Elektrycznej. Trakcja Miejska i Kolejowa. PWN, Warszawa 1975.
- [12] RYCZKO Z.: Modelowanie silnika szeregowego prądu stałego na maszynie analogowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" z. 38, Gliwice 1973.
- [13] WAJS K.: Model dynamiczny maszyny prądu stałego. Zarys dziejów. Przegląd elektrotechniczny 1979, nr 10.

Wpłynęło do redakcji 8.VI.1981 r.

Recensent: doc. dr inż. Zbigniew Fidrych

**ЗАМЕЧАНИЯ О СТРУКТУРЕ И МЕТОДЕ АНАЛИЗА ВЫБРАННЫХ СИСТЕМ
ПРИВОДА ПОЕЗДОВ ЭЛЕКТРОТЯГИ**

Резюме

В статье представлены математические модели выбранных систем электропривода электрических локомотив, делающие возможным построение диаграмм семейства статических и динамических характеристик этих систем с помощью аналоговой или цифровой вычислительных машин.

CONSIDERATIONS ABOUT STRUCTURE AND METHOD OF ANALYSIS OF THE SELECTED
POWER TRANSMISSION SYSTEMS IN TRACTION-VEHICLES

S u m m a r y

In the paper mathematical archetypes of the selected power transmission systems of electric locomotives have been presented. From these mathematical archetypes it is possible to calculate the statical and dynamical characteristics of the systems by using an analog or digital computer.

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].

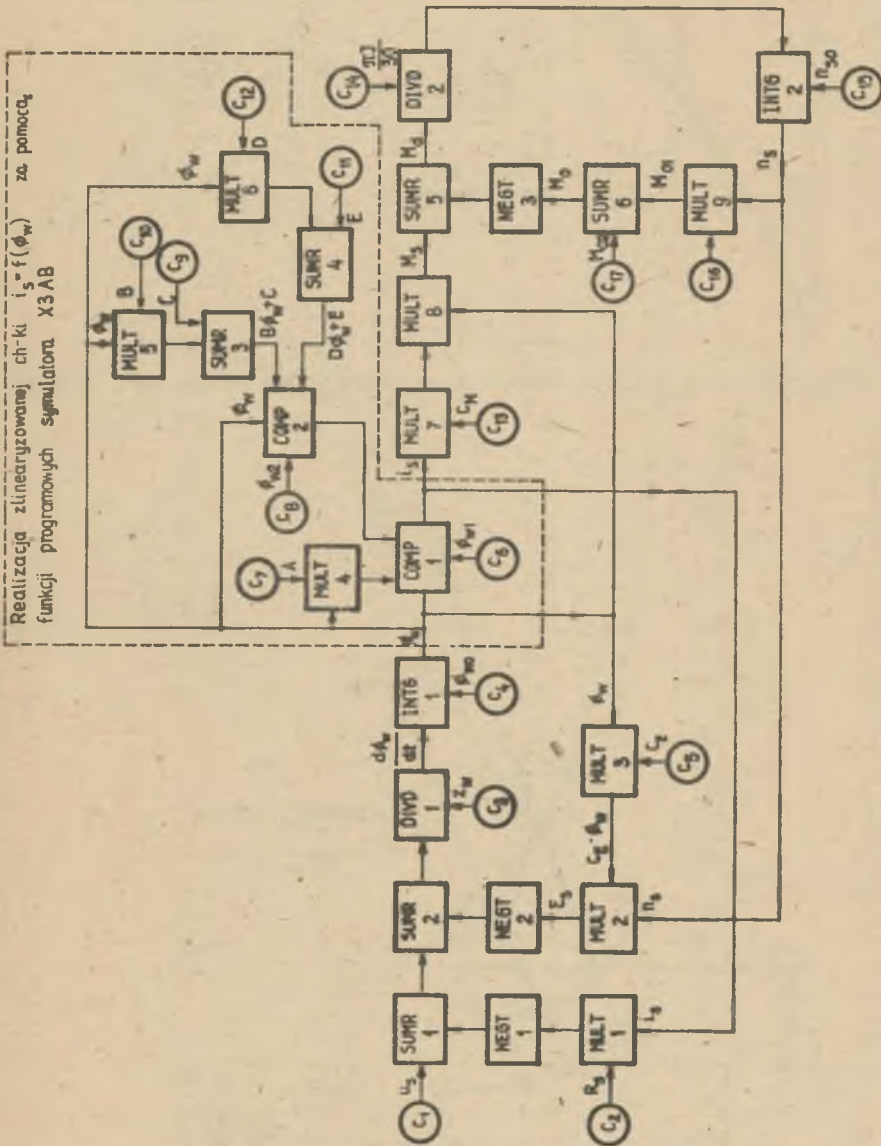
2. BADANIA SYMULACYJNE SILNIKA TRAKCYJNEGO Z REGULACJĄ PRĘDKOŚCI W II STREFIE POPRZEC ZMIANĘ LICZBY ZWOJÓW UWZWOJENIA WZBUDZENIA

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.

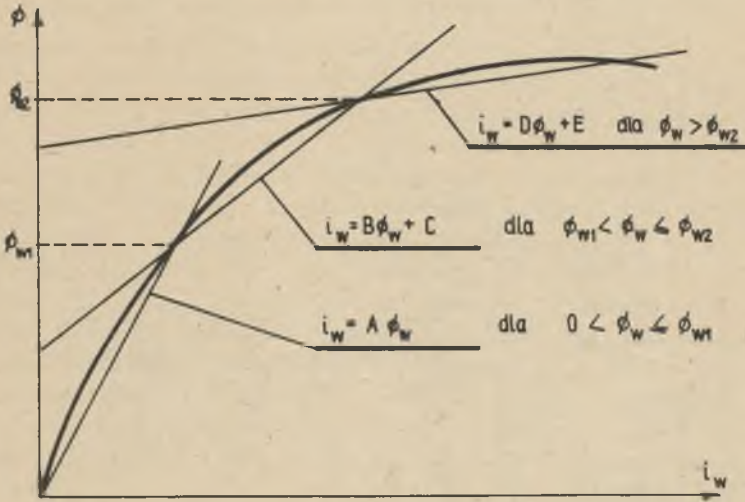
Badania modelowe, wykonane dla silnika typu LSa-430T o mocy godzinowej $P_h = 170$ kW, w które wyposażone są lokomotywy SMA2, umożliwiają wyznaczenie jego charakterystyk statycznych i dynamicznych. Dla przykładu przeprowadzimy następujące obliczenia:

- 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).

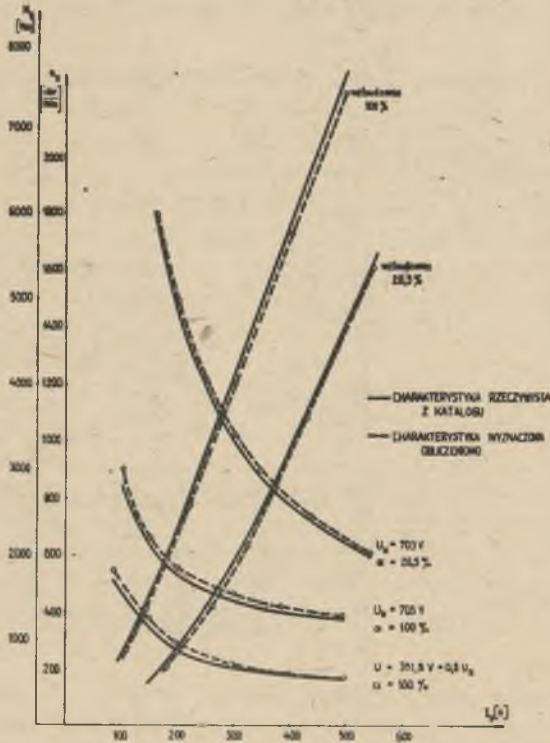
Zmianę napięcia zasilania silnika uzyskuje się przez zastąpienie stałej $C1$ (napięcie zasilania U_g) na rys. 1 komparatorem umożliwiającym zmianę jej wartości w wymaganym zakresie i w żądanym czasie. Podobnie



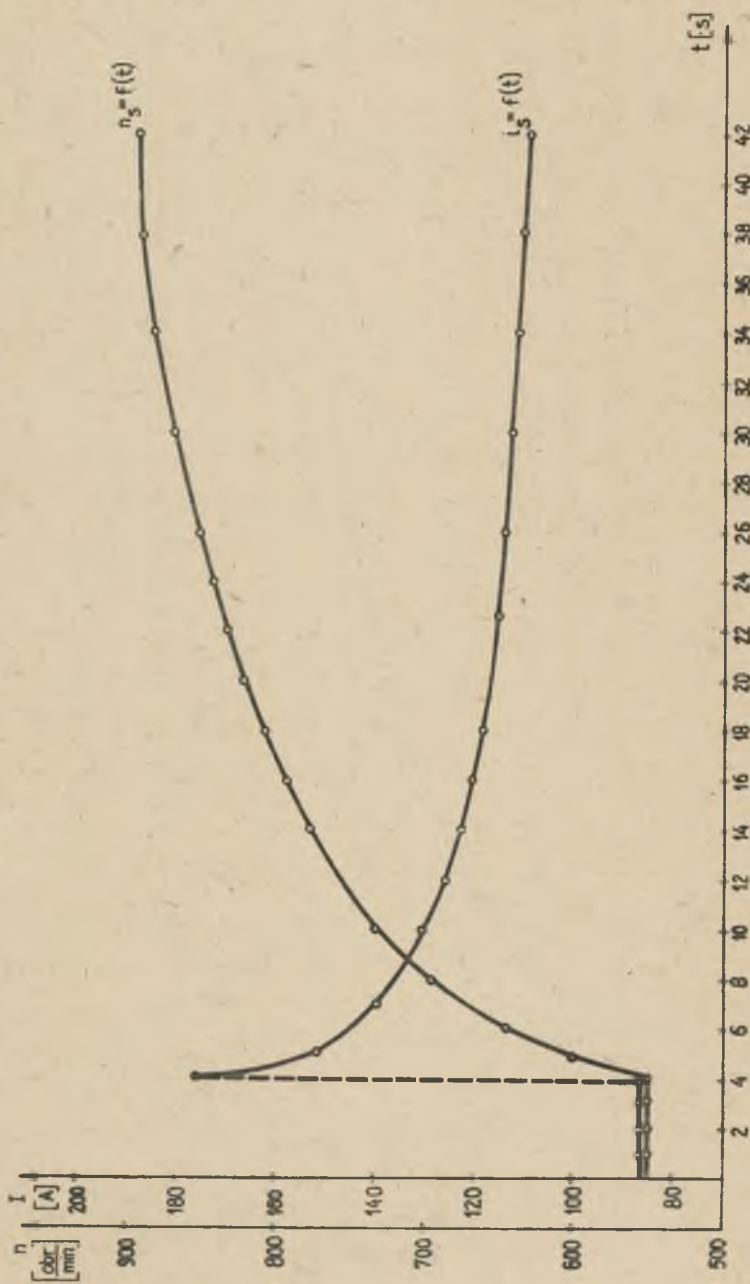
Rys. 1. Schemat maszynowy modelu cyfrowego silnika trakcyjnego z regulacją prędkości w II strefie po-
 przez zmianę liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia



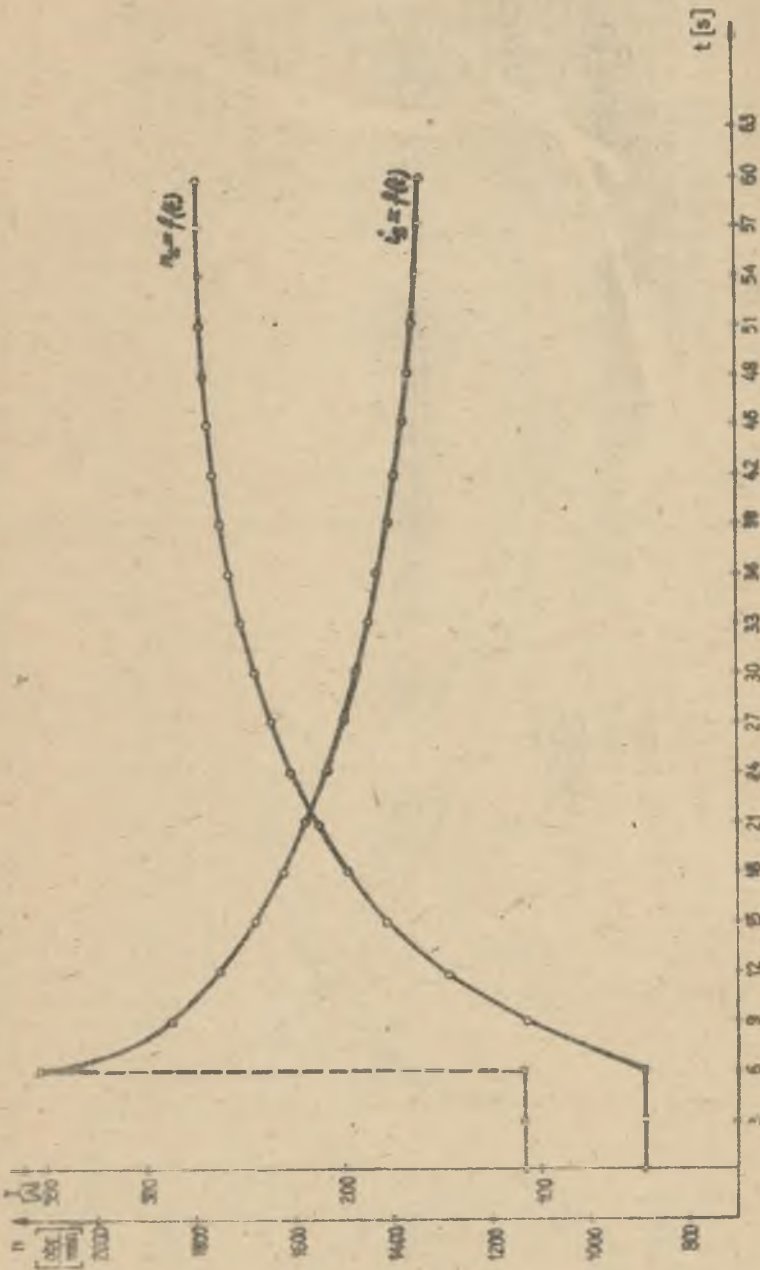
Rys. 2. Linearyzacja trójodcinkowa charakterystyki magnesowania silnika



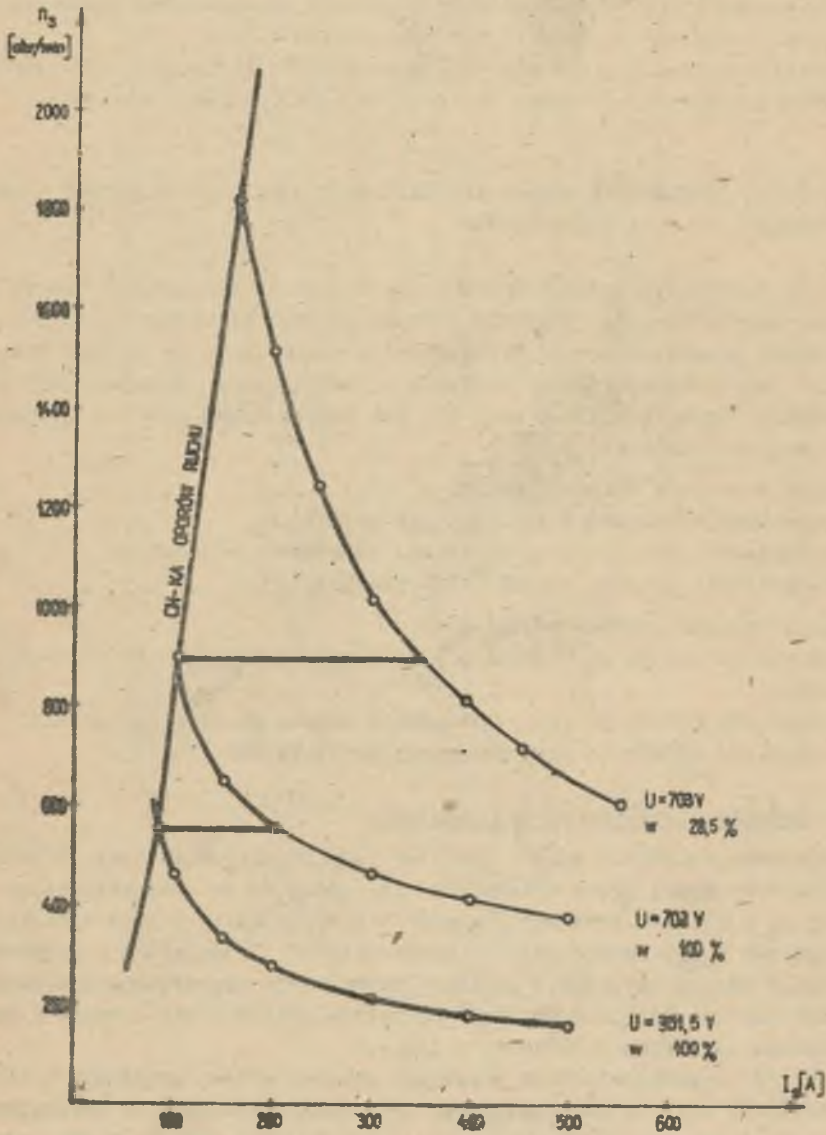
Rys. 3. Przebiegi charakterystyk $n_s = f(i_w)$ oraz $M = f(i_w)$ silnika



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

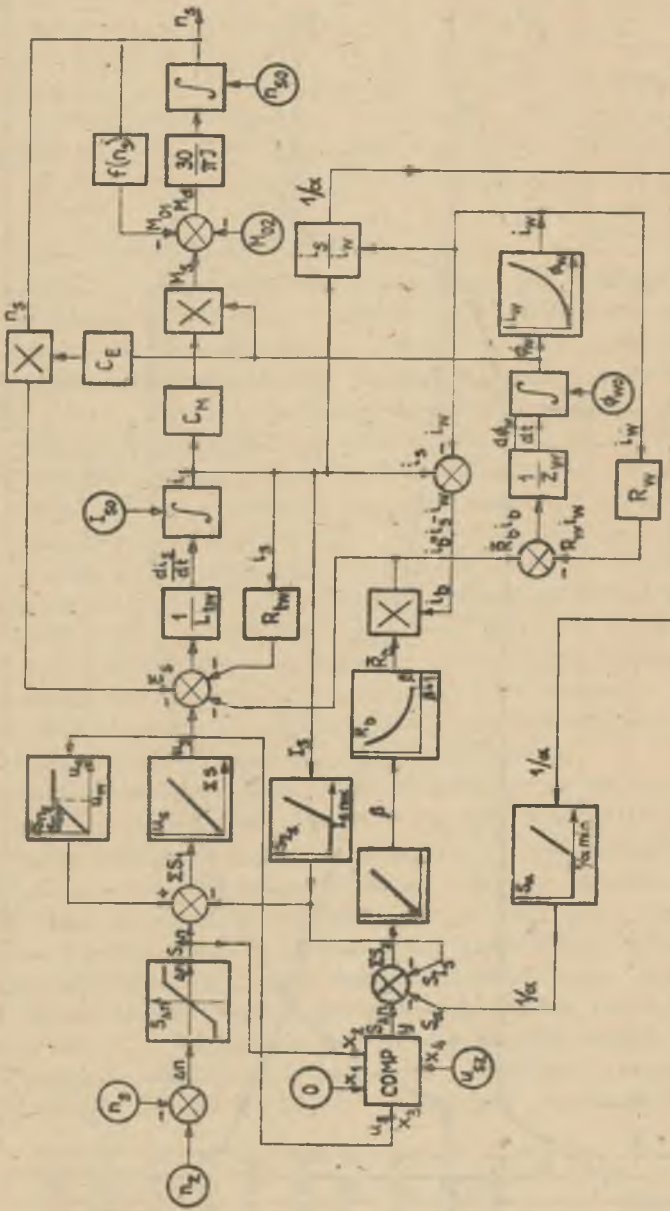
Badania symulacyjne przeprowadzimy dla układu spełniającego funkcje regulacyjne opisane w pracy [1], dla którego schemat strukturalny modelu matematycznego przedstawia rys. 7. Badania te ograniczymy do drugiej strefy regulacji prędkości. Obiektem regulacji w analizowanym układzie jest silnik szeregowy 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.

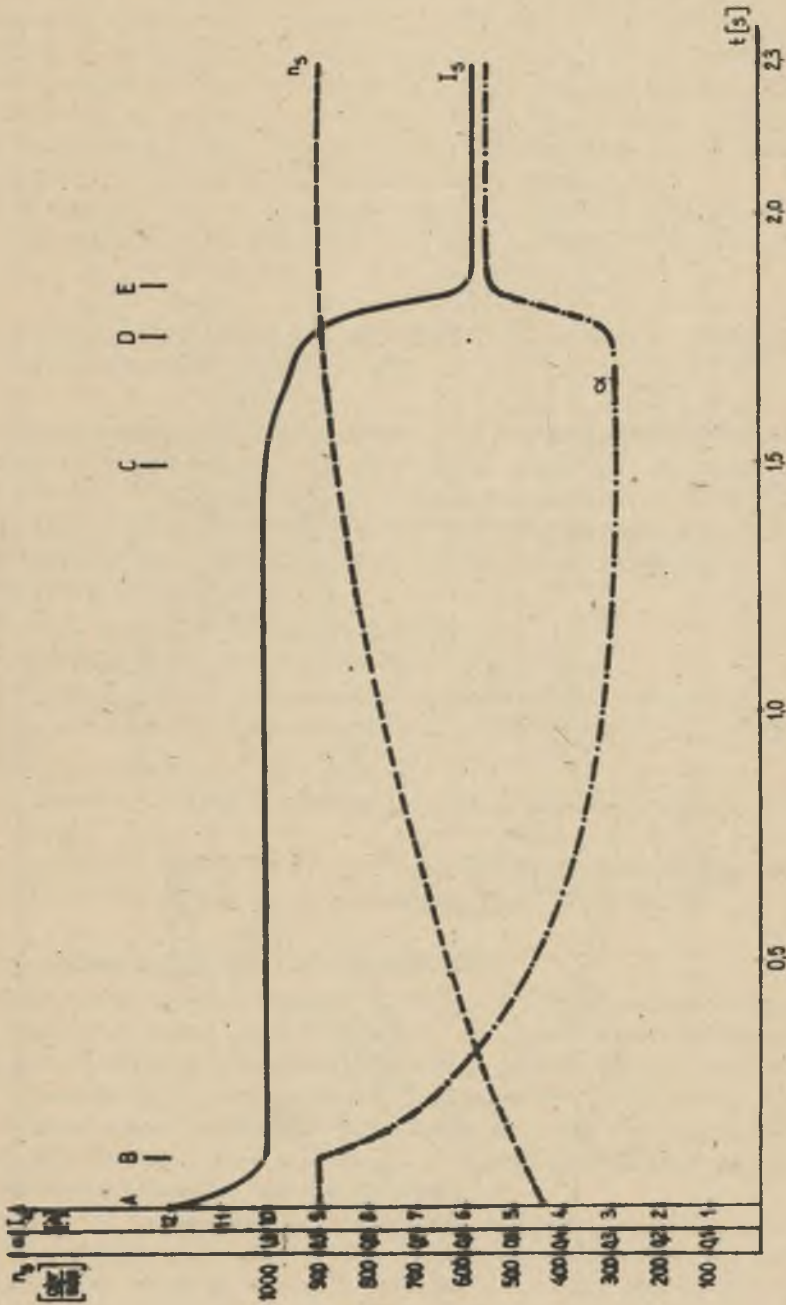
3.1. Badanie struktury układu regulacji

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 (Δn - 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. 7. Schemat strukturalny modelu matematycznego układu automatycznej regulacji prędkości jazdy pojazdów trakcyjnej elektrycznej



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

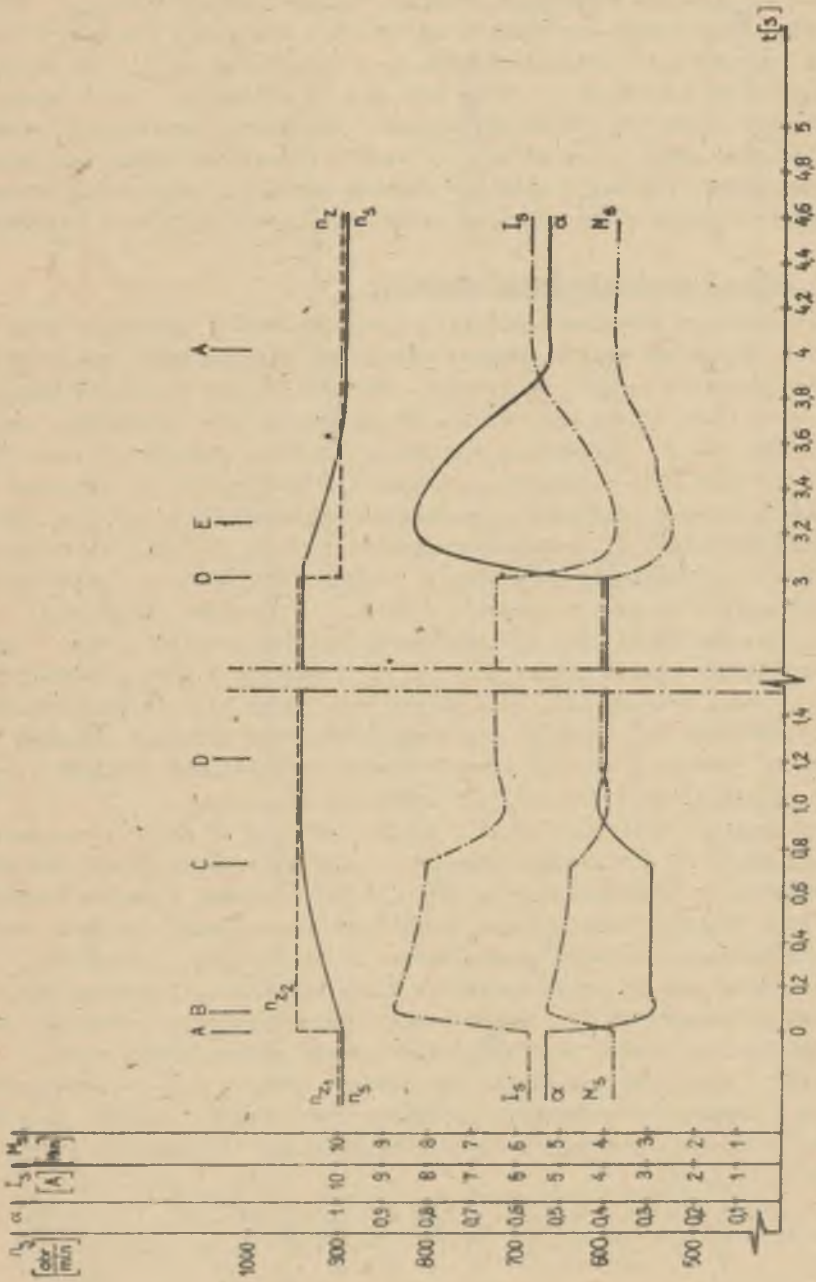
się przy stałej wartości prądu silnika I_{Bmx} i który zostaje zakończony wówczas, gdy stopień wzbudzenia osiągnie wartość minimalną α_{min} (przedział czasowy pomiędzy punktami BC na rys. 8). Następnie prędkość silnika zmienia się zgodnie z charakterystyką $n_s = f(I_s)$ przy α_{min} , co odpowiada 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

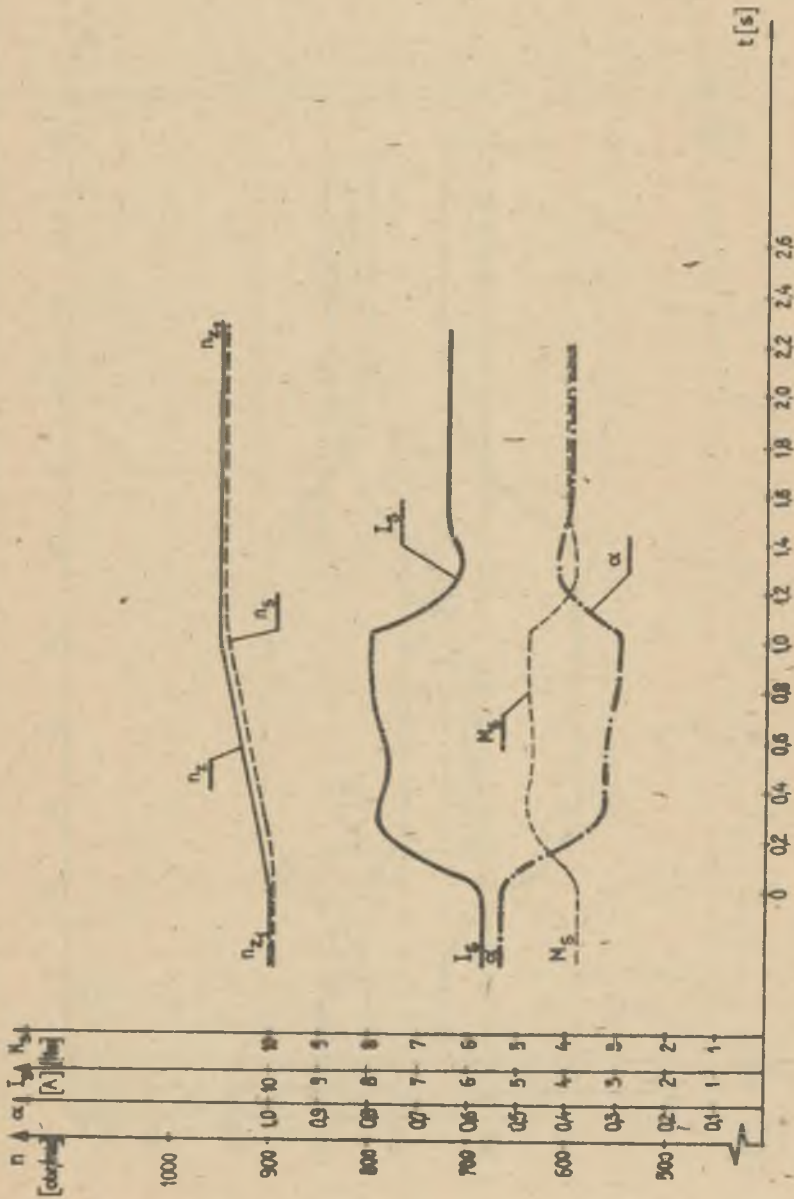
W analizowanym układzie regulacji sygnał prędkości obrotowej jest wymuszeniem, natomiast zmiana momentu obciążenia silnika oraz napięcie zasilania traktowane są jako zakłócenia. Przeanalizujemy odpowiedź badanego układu na skokową zmianę wymuszenia. Przebiegi czasowe prędkości, prądu, momentu oraz stopnia 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 β i w konsekwencji zmniejszanie się stopnia wzbudzenia silnika do wartości minimalnej α_{min} (odcinek czasowy AB na rys. 9). Następnie prędkość silnika rośnie zgodnie z charakterystyką $n = f(I)$ przy α_{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.

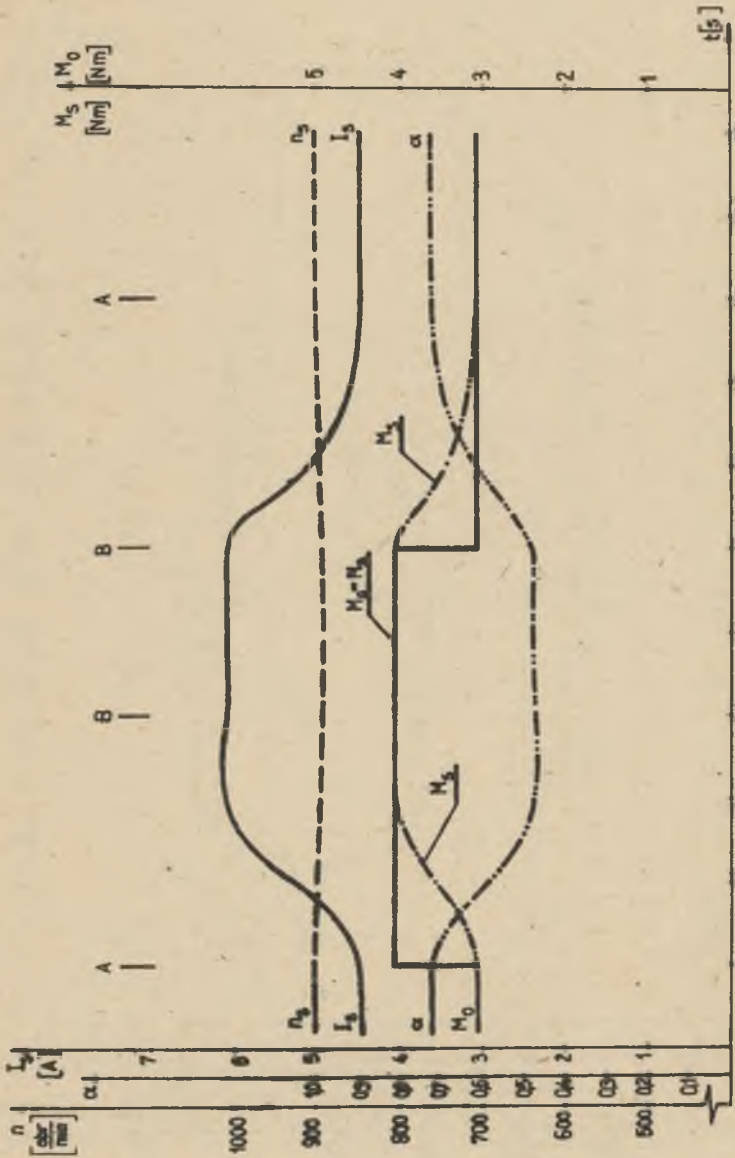
Odpowiedź układu na zakłócenia spowodowane skokową zmianą momentu obciążenia w obszarze stabilizacji prędkości oraz skokową zmianą napięcia zasilania w trakcie rozruchu w strefie osłabionego wzbudzenia przedstawiają rys. 11 i 12.



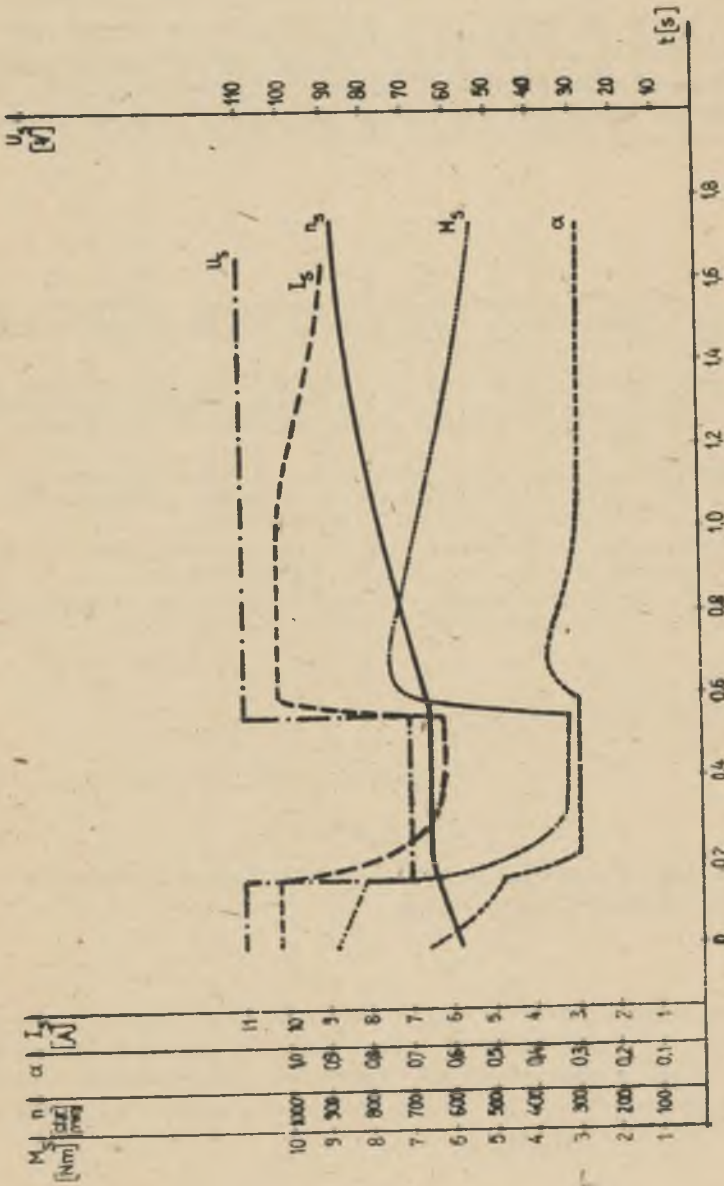
Rys. 9. Odpowiedź układu regulacji prędkości silnika, na skokową zmianę prędkości zadanej



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 spalinowo-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 režimow 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.

Eugeniusz KAUZA

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

ANALIZA CELOWOŚCI WPROWADZENIA DO EKSPLOATACJI LOKOMOTYW SIECIOWO-SPALINOWYCH

Streszczenie: W artykule uzasadnia się celowość stosowania pojazdów trakcyjnych sieciowo-spalinowych do pracy manewrowej i liniowej w rejonach kolejowych o sieci częściowo zelektryfikowanej.

1. WSTĘP

W wyniku malejącego od 1975 r. tempa elektryfikacji PKP oraz niewłaściwej polityki zakupów taboru trakcyjnego, preferującej lokomotywy spalinowe wobec niedostatku lokomotyw elektrycznych, znaczna część pracy przewozowej na PKP realizowana jest za pomocą trakcji spalinowej. Pomimo że lokomotywy spalinowe reprezentują dziś najdroższy system transportu kolejowego, na liniach wcześniej zelektryfikowanych kursują one często. Rosnące koszty eksploatacji trakcji spalinowej wynikają w pierwszej kolejności z szybko rosnących cen paliw płynnych. Najprostszą i najbardziej efektywną metodą ograniczenia zużycia paliw płynnych przez lokomotywy spalinowe jest maksymalne zastępowanie ich lokomotywami elektrycznymi, lecz wiąże się to z koniecznością intensyfikacji tempa elektryfikacji PKP. Wobec małej realności osiągnięcia w bliższej perspektywie pożądanego, a jednocześnie optymalnego stanu elektryfikacji PKP (30-40%), należy rozważyć, w jaki sposób i jakim systemem trakcyjnym należy zastąpić trakcję spalinową, aby czekające gospodarke narodową wielomiliardowe straty wynikające z dieselizacji PKP ograniczyć do minimum.

2. CELOWOŚĆ I MOŻLIWOŚĆ WPROWADZENIA DO EKSPLOATACJI LINIOWYCH LOKOMOTYW SIECIOWO-SPALINOWYCH

Analizując służbowe rozkłady jazdy pociągów towarowych oraz schematy sieci kolejowej można zauważyć, że wiele tras pociągów towarowych prowadzonych przez kokomotywy spalinowe na terenie Śląskiej DOKP przebiega po torach częściowo lub całkowicie zelektryfikowanych. Prowadzenie pociągów przez lokomotywy spalinowe po torach całkowicie zelektryfikowanych, co zostało potwierdzone przez autora w ramach badań prowadzonych w latach 1980/81 na terenie DOKP, wynika z niedoboru lokomotyw elektrycznych przy jednoczesnym nadmiarze lokomotyw spalinowych, a także z powodu małej intensywności eksploatacji posiadanych lokomotyw elektrycznych. Powyższy stan rzeczy powinien stymulować wszczęcie produkcji i wprowadzenie do eksploatacji lokomotyw sieciowo-spalinowych lub podjęcie przebudowy części posiadanych liniowych lokomotyw spalinowych na lokomotywy sieciowo-spalinowe.

W ramach prac prowadzonych w naszym Instytucie nad kosztami eksploatacyjnymi lokomotyw spalinowych i sieciowo-spalinowych wyznaczono próg opłacalności stosowania lokomotyw sieciowo-spalinowych na trasach częściowo zelektryfikowanych. W powyższych obliczeniach przyjęto następujące ceny pojazdów trakcyjnych, paliw i energii:

- lokomotywa spalinowa ST 44 - 14,7 mln zł,
- lokomotywa sieciowo-spalinowa - 18,8 mln zł,
- olej napędowy - 12 zł/kg,
- olej maszynowy - 95 zł/kg,
- energia elektryczna - 0,65 zł/kWh.

Koszty amortyzacji k_a i utrzymania pojazdów trakcyjnych k_t ustalono na poziomie:

$k_a = 15,03$ zł/tys brtkm; $k_t = 11,03$ zł/tys brtkm dla lokomotywy spalinowej

$k_a = 19,16$ zł/tys brtkm, $k_t = 11,14$ zł/tys brtkm dla lokomotywy sieciowo-spalinowej

Koszty te wyznaczono dla przeciętnych przebiegów dobowych lokomotyw wynoszących na terenie Śl. DOKP ok. 200 km i dla przeciętnych mas pociągów towarowych 1400 t brutto.

Otrzymane wyniki obliczeń wskazują jednoznacznie, że opłaca się zastąpić lokomotywy spalinowe lokomotywami sieciowo-spalinowymi na trasach zelektryfikowanych już w ok. 15%. Większość pociągów towarowych kursujących w obrębie Śl. DOKP prowadzonych jest po torach zelektryfikowanych w znacznie wyższym stopniu, niż to wynika z wyznaczonego progu opłacalności.

Na podstawie analizy pracy lokomotyw spalinowych serii ST 44 z Lokomotywni Katowice wynika, że zastąpienie jednej lokomotywy ST 44 lokomotywą sieciowo-spalinową pozwoliłoby ograniczyć zużycie oleju napędowego przeciętnie o ok. 17 ton w ciągu miesiąca. W związku z tym, że na terenie

Śl. DOKP występuje nadmiar liniowych lokomotyw spalinowych (ST 44), a co najmniej kilkadziesiąt tych lokomotyw częściowo uszkodzonych i nie naprawionych z powodu braku części zamiennych zalega na bocznych torach lokomotywowni, najtańszym sposobem otrzymania lokomotywy sieciowo-spalinowej będzie podjęcie przebudowy lokomotywy ST 44 i doczepienie do niej tendra mieszczącego przetwornicę zasilającą silniki trakcyjne lokomotywy ST 44 energią elektryczną pobieraną z sieci trakcyjnej w czasie jazdy na odcinku zelektryfikowanym. Szczegóły takiego rozwiązania przedstawione zostały w prowadzonych przez Autora pracach dyplomowych studentów specjalności Trakcja elektryczna na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. W rozwiązaniu tym lokomotywa sieciowo-spalinowa przy obciążeniu mocą znamionową silnika spalinowego osiąga na obwodzie kół napędnych moc 1090 kW. Natomiast przy zasilaniu z sieci trakcyjnej ze względu na ograniczoną moc przetwornicy, zapewniającą między innymi izolację galwaniczną pomiędzy obwodem silników trakcyjnych a siecią trakcyjną 3 kV, moc na obwodzie kół napędnych lokomotywy wynosi 760 kW przy pracy ciągłej i 1020 kW przy dopuszczalnym przeciążeniu. Prawdokowe rozwiązanie lokomotywy sieciowo-spalinowej, przeznaczonej do pracy na liniach w wysokim stopniu zelektryfikowanych, powinno umożliwić jej rozwijanie wyższej mocy przy zasilaniu z sieci trakcyjnej, a odpowiednio niższej na odcinkach bez sieci trakcyjnej. Prawdokowość takiego rozwiązania wynika z następujących przesłanek:

- a) stanu torów na liniach niezelektryfikowanych w obrębie Śl. DOKP jest zdecydowanie gorszy od torów na liniach zelektryfikowanych. Występują tu znaczne ograniczenia dopuszczalnych prędkości jazdy, dlatego też moce rozwijane przez pojazdy trakcyjne na odcinkach niezelektryfikowanych są stosunkowo małe,
- b) decydujący wpływ na różnicę cen pomiędzy lokomotywą elektryczną sieciową a lokomotywą sieciowo-spalinową ma cena agregatu prądowórczego (diesel-prądnic), która rośnie wraz z mocą agregatu.

Wobec powyższego celowe i jednocześnie możliwe do przyjęcia jest rozwiązanie, w którym moc agregatu prądowórczego jest znacznie niższa od mocy znamionowej silników trakcyjnych lokomotywy sieciowo-spalinowej.

Liniowa lokomotywa sieciowo-spalinowa powinna być wyposażona w:

- silniki trakcyjne o napięciu znamionowym 3000/2V, umożliwiające zasilanie ich bezpośrednio z sieci trakcyjnej o napięciu 3 kV w czasie jazdy na odcinku zelektryfikowanym,
- niezbędną aparaturę trakcyjną, urządzenia i napędy pomocnicze stosowane na lokomotywach elektrycznych serii EU07 lub ET22,
- agregat prądowórczy stosowany np. w lokomotywach spalinowych SM31 o mocy 1200 kW, zainstalowany na oddzielnym tendrze, zapewniający zasilanie silników trakcyjnych i odbiorów pomocniczych całej lokomotywy w czasie jazdy poza siecią trakcyjną.

3. CELOWOŚĆ I MOŻLIWOŚĆ WPROWADZENIA DO EKSPLOATACJI MANEWRÓWYCH LOKOMOTYW SIECIOWO-SPALINOWYCH

Lokomotywy manewrowe sieciowo-spalinowe powinny znaleźć zastosowanie w pierwszej kolejności wszędzie tam, gdzie w rejonie pracy danej lokomotywy przeważająca część torów została już zelektryfikowana. Warunek ten spełniają lokomotywy obsługujące pociągi sieciowe oraz lokomotywy prowadzące manewry na zelektryfikowanych stacjach osobowych. Lokomotywy prowadzące pociągi sieciowe od stałego miejsca postoju do rejonu pracy poruszają się po torach zelektryfikowanych z siecią trakcyjną normalnie zasilaną. Jedynie odcinek trasy w pobliżu rejonu pracy oraz sam rejon pracy ma sieć trakcyjną odłączoną od zasilania. Powrót pociągu sieciowego na miejsce stałego postoju odbywa się zwykle już pod siecią trakcyjną zasilaną z podstacji trakcyjnej. Lokomotywy prowadzące manewry na zelektryfikowanych stacjach osobowych dołączając wagony pocztowe lub odwożąc składy wagonów pasażerskich z rejonu peronów do wagonowni poruszają się także w większości wypadków po torach zelektryfikowanych. Jedynie krótkie odcinki tras tych lokomotyw już na terenie wagonowni przebiegają po torach niezelektryfikowanych.

Kolejnym rejonem pracy, gdzie powinny znaleźć zastosowanie lokomotywy sieciowo-spalinowe, są górki rozrządowe tych stacji rozrządowych, które posiadają część torów zelektryfikowanych. Rozszerzenie zakresu elektryfikacji stacji rozrządowych o grupy torów przejazdowych (wyciągowych), odjazdowych i tranzystowych pozwoliłoby wprowadzić w miejsce obecnie eksploatowanych lokomotyw spalinowych serii SM42 i SM31 lokomotywy sieciowo-spalinowe. Powyższa wymiana taboru w odniesieniu do jednej lokomotywy i jednego miesiąca pozwoliłaby ograniczyć zużycie oleju napędowego o 5-10 ton.

Niezbędne warunki dla zastosowania lokomotyw sieciowo-spalinowych spełnia już obecnie na terenie stacji rozrządowej Tarnowskie Góry grupy C torów wjazdowych z północy. Z pomiarów wykonywanych na lokomotywie serii SM31, pracującej w tym rejonie, wynika że najwyższa moc rozwijana przez silnik spalinowy lokomotywy nie przekraczała 232 kW przy prowadzeniu składu wagonów o masie 1920 t i prędkości napychania na górkę rozrządową wynoszącą ok. 3 km/h. Zakładając, że szybkość napychania na górkę rozrządową może zostać podniesiona do ok. 6 km/h po wyposażeniu torów w niezbędne hamulce torowe, wymagana moc lokomotywy wzrosłaby do ok. 500 kW. Powyższą mocą powinna dysponować lokomotywa w czasie pracy pod siecią trakcyjną, a więc w czasie napychania składów na górkę. Natomiast pracując na torach kierunkowych niezelektryfikowanych, np. przy dopychaniu wagonów, silniki trakcyjne lokomotywy muszą być zasilane ze spalinowo-elektrycznego agregatu prądotwórczego, zainstalowanego na lokomotywie o maksymalnej mocy oddawanej przez prądnicę ok. 220 kW.

Manewrowa lokomotywa sieciowo-spalinowa, przeznaczona do pracy na torach stacji rozrządowych, powinna być wyposażona w:

- silniki trakcyjne (6 sztuk) o napięciu znamionowym 3000/2 V, i mocy po (140-160 kW) umożliwiające zasilanie ich z sieci trakcyjnej poprzez rezystory lub impulsator tyrystorowy zapewniający możliwość realizacji układu stabilizacji prędkości jazdy niezbędny przy napychaniu składu wagonów na górkę rozrządową,
- agregat prądowórczy stosowany na lokomotywach spalinowych serii SM30 o mocy 350 kW.

4. UWAGI KOŃCOWE

W obecnej sytuacji gospodarczej kraju każda możliwość ograniczenia zużycia paliw płynnych i olejów silnikowych powinna zostać wykorzystana. Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za szybkim wprowadzeniem lokomotyw sieciowo-spalinowych poza możliwością ograniczenia zużycia paliw płynnych jest zapewnienie wyższego komfortu pracy maszynistom tych lokomotyw, związanego z okresową eliminacją drgań i hałasu, których źródłem jest pracujący silnik wysokoprężny. Wykorzystując w maksymalnym stopniu produkowane podzespoły i aparaturę taboru trakcyjnego, montaż lokomotyw sieciowo-spalinowych mógłby zostać w krótkim czasie podjęty w dowolnej fabryce taboru trakcyjnego lub w zakładach naprawczych taboru.

LITERATURA

- [1] KAŁUŻA E.: Analiza możliwości i celowości stosowania hybrydowych źródeł zasilania silników trakcyjnych w lokomotywach przemysłowych i manewrowych. Materiały konferencyjne nt. Nowoczesne elektryczne układy napędowe - Ośrodek Postępu Technicznego w Katowicach - 1976.
- [2] MÜLLER J.: Motorové lokomotivy pro hutní průmysl. Strojirenstvi nr 11, listopad 1979 Nr 12.
- [3] KAHLER P.: Elektrische Rangierlokomotiven. Schienenfahrzeuge, 1977 Nr 12.
- [4] Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beim Einsatz von Lokomotiven im Werkbanverkehr. Siemens. Sonderdruck aus "Technische Rundschau Nr 1 i 3 z 1969.

Wpłynęło do redakcji 17.IV.1981 r.

Recenzent: doc. dr inż. Władysław Dziuba

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-КОНТАКТНЫХ ЛОКОМОТИВОВ**Р е з ю м е**

В статье доказывается целесообразность использования дизель-контактных локомотивов для маневровой и линейной работы в железнодорожных районах с частично электрифицированной сетью.

ANALYSIS OF ENGINE AND NETWORKS LOCOMOTIVES UTILIZATION**S u m m a r y**

Purposefulness of engine and network locomotives utilization in partly electrified railway networks has been proved in the paper.

Andrzej BUJAKOWSKI

Instytut Systemów Sterowania - Katowice

Wiesław JAGŁA

Instytut Podstawowych Problemów Elektrotechniki
i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej

MIKROPROCESOROWY SYSTEM STEROWANIA LOKOMOTYWY MANEWROWEJ

Streszczenie: W artykule omówiono mikroprocesorowy system sterowania lokomotywy manewrowej, realizujący na lokomotywie polecenia przekazywane zdalnie drogą radiową. Przedstawiono założenia i koncepcję systemu oraz opisano sposób jego realizacji. Zamieszczono również algorytm sterowania realizowany przez oprogramowanie mikrokomputera.

1. WPROWADZENIE

Lokomotywę manewrową można uważać za jeden z istotnych obiektów stacji rozrządowej, który może podlegać sterowaniu. Interesuje nas tu głównie praca lokomotywy w rejonie górki rozrządowej w trakcie procesu rozrządzania. Proces rozrządzania - przy założeniu optymalnej organizacji obiegu dokumentów na stacji, a co za tym idzie eliminacji postójów wynikających z oczekiwania na przygotowanie dokumentów odprawianego składu - decyduje o przepustowości stacji rozrządowej. Wydajność procesu rozrządzania może być podnoszona między innymi przez modernizację hamulców torowych górki rozrządowych (sterowanie w funkcji aktualnej prędkości staczającego się wagonu) oraz przez precyzyjne sterowanie prędkością napychania rozrządzanego składu.

Zmienna prędkość napychania składu, zależna od długości i masy kolejnych odpręgów, może być realizowana jedynie na drodze zdalnego sterowania lokomotywy manewrowej przez nadrzędny system komputerowy optymalizujący pracę górki rozrządowej. Przedmiotem niniejszego artykułu jest cyfrowy system sterowania lokomotywą manewrową (system SSL), który umożliwia realizację tak pomyślanego zdalnego sterowania. Omawiany układ sterowania został zrealizowany w wersji modelowej w laboratorium Zespołu Trakcji

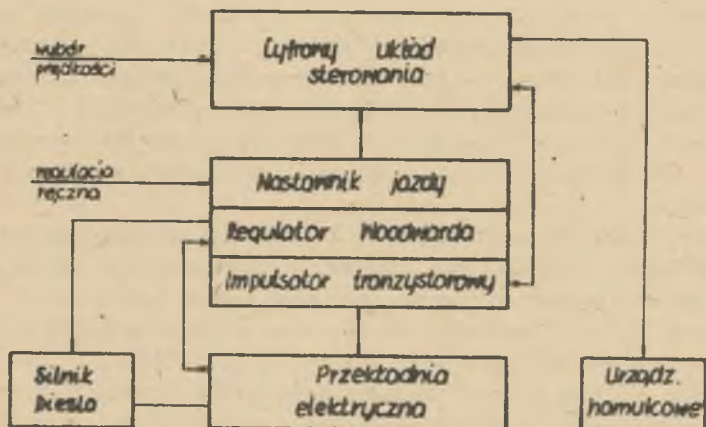
Elektrycznej Instytutu Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej.

Założono możliwość zdalnego przekazywania informacji do 4 lokomotyw manewrowych pracujących jednocześnie w rejonie stacji przy wykorzystaniu jednego kanału łączności radiowej.

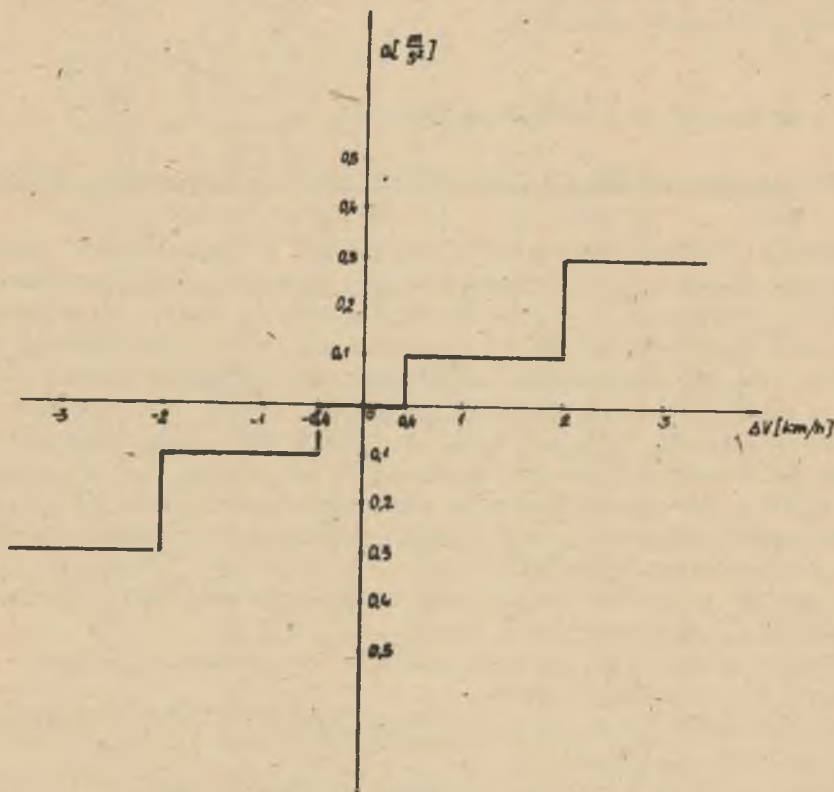
Założono stabilizację prędkości jazdy z dokładnością 0,1 m/s (0,4 km/godz) dla zadanych prędkości jazdy do 10 km/h oraz z dokładnością 0,3 m/s w zakresie prędkości 10-20 km/h. Maksymalną szybkość jazdy lokomotywy przy sterowaniu zdalnym ograniczono do 20 km/h oraz założono następujące stopniowanie prędkości zadanej: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20 km/h.

2. KONCEPCJA UKŁADU STEROWANIA LOKOMOTYWĄ MANEWROWĄ

Zadania i założenia cyfrowego układu sterowania dla lokomotywy manewrowej typu SM 31 są podobne jak dla układu lokomotywy linowej typu SU 46 [1]. Założono realizację układu sterowania w oparciu o mikrokomputer. W celu realizacji założonej dokładności stabilizacji prędkości jazdy wprowadzono dodatkowo impulsowy regulator wzbudzenia. Sposób włączenia cyfrowego układu sterowania do urządzeń lokomotywy SM 31 przedstawiono na rys. 2.1. Zakłada się, że układ sterowania będzie współpracował z regulatorem Woodwarda i z istniejącymi urządzeniami hamulcowymi. Układ sterowania oddziałując na regulator Woodwarda, regulator impulsowy wzbudzenia i urządzenia hamulcowe powinien zapewnić stabilizację żądanej wartości prędkości jazdy.



Rys. 2.1



Rys. 2.2

Struktura i działanie układu sterowania dla lokomotywy manewrowej SM31 jest podobna do układu sterowania lokomotywy SU46 [1], z pewnymi wyjątkami, mianowicie dla lokomotywy SM31 przyjęto inną strefę nieczułości układu (rys. 2.2) oraz inne zakresy minimalnych i maksymalnych wartości przyśpieszeń.

Drugą wprowadzoną innowacją jest sposób i pomiar prędkości opierający się na pomiarze odcinka czasu pomiędzy dwoma kolejnymi impulsami z impulsatora. Pomiar prędkości jest niezależny dla wszystkich osi lokomotywy. Dla powyższego sposobu pomiaru prędkości przyjęto po jednym czujniku impulsowym na każdą oś.

Opisany cykl pomiarowy T układu sterowania cyfrowego lokomotywy SU46, dla lokomotywy SM31 jest wewnętrznym cyklem obsługi poszczególnych bloków funkcjonalnych przez mikrokomputer zgodnie z algorytmem sterowania. W celu realizacji założonej dokładności stabilizacji prędkości jazdy wprowa-

dzono dodatkowy impulsowy regulator wzbudzenia wzbudnicy. Działanie układu stabilizacji prędkości zawierającego regulatora Woodwarta i regulatora wzbudzenia opisano w pracy [1].

3. SYSTEM STEROWANIA LOKOMOTYWA, MANEŹROJĄ SSL

3.1. Rola systemu SSL w komputerowym kierowaniu pracą stacji rozrządowej

System SSL stanowi jeden z wielu podsystemów komputerowego systemu kierowania stacją i może być wykorzystywany do automatyzacji procesów rozrządzenia i formowania pociągów. Szczególną wagę ma proces rozrządzenia, który w dużym stopniu decyduje o przepustowości stacji rozrządowej. System SSL jest tak projektowany, by mógł być wykorzystywany zarówno w całkowicie zautomatyzowanym procesie rozrządzenia, jak i autonomicznie. W pierwszym przypadku, dane wyjściowe dla systemu SSL będą generowane i przekazywane on-line z nadrzędnego komputera sterującego całym procesem rozrządzenia, natomiast w przypadku pracy autonomicznej rolę członu zadającego prędkość napechania składu będzie sprawował doświadczony operator z pulpitu sterowania zdalnego.

Ze względu na zakładaną współpracę z nadrzędnym systemem komputerowym przyjęto następujące założenia:

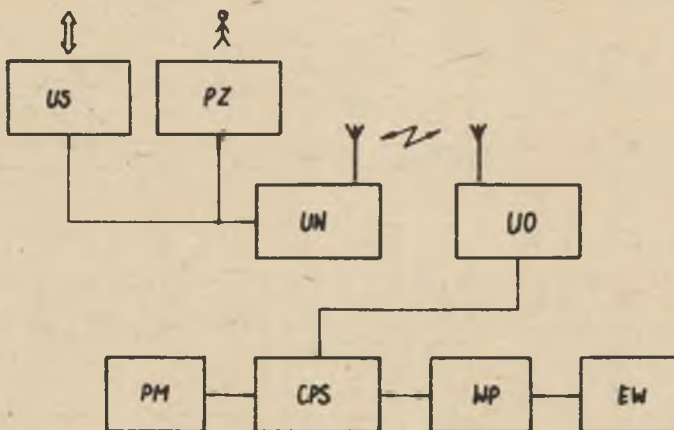
- struktura systemu musi zapewnić możliwość programowego zapisywania i odczytywania istotnych rejestrów,
- dane wejściowe i wyjściowe do/z systemu powinny posiadać organizację bajtową (słowo 8 bitowe),
- sposób sprzężenia z systemem nadrzędnym (interface) powinien być dokładnie sprecyzowany, a w miarę możliwości zgodny z jakimś powszechnie stosowanym standardem,
- konstrukcja systemu powinna być modułowa, by umożliwiała zmiany funkcjonalne lub technologiczne poszczególnych modułów bez ingerencji w pozostałe moduły systemu.

3.2. Struktura systemu SSL

Podział SSL na bloki funkcjonalne

W ramach systemu SSL można wyróżnić następujące bloki funkcjonalne (rys. 3.1):

- a - układ sprzężenia US, służący do wprowadzenia i wyprowadzenia informacji do/z systemu SSL z/do systemu nadrzędnego w standardowy sposób,
- b - pulpit zdalnego sterowania PZ,
- c - radiowe urządzenie nadawczo-odbiorcze UN,
- d - radiowe urządzenie odbiorczo-nadawcze UO,
- e - cyfrowy podsystem sterowania lokomotywy CPS,



Rys. 3.1

- f - pulpit maszynisty PM,
 a - warstwa układów pośredniczących i izolujących WP,
 b - elementy wykonawcze EW.

Bloki d, e, f, g, h zabudowane są na lokomotywie manewrowej.

3.3. Struktura systemu CPS

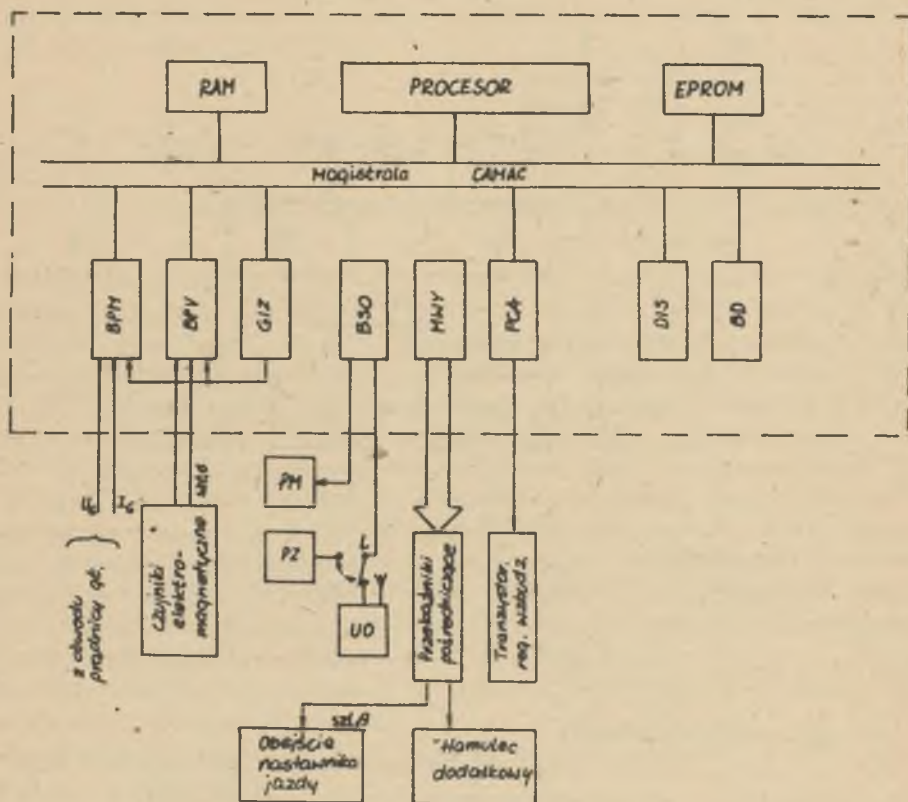
Cyfrowy system sterowania CPS, znajdujący się na lokomotywie, stanowi jądro systemu SSL, w którym dokonuje się lokalne przetwarzanie danych wejściowych, realizacja algorytmów sterowania, autotestowanie systemu oraz reagowania informacji przekazywanych zwrótnie z lokomotywy do systemu nadrzędnego.

Ze względu na znaczną złożoność funkcji i możliwość ich przyszłego modyfikowania przyjęto koncepcję realizacji CPS w oparciu o mikrokomputer (na bazie mikroprocesora Intel 8080) i standardy mechaniczno-elektryczne systemu CAMEC.

Przyjęta struktura systemu CPS została przedstawiona na rys. 3.2. Mikrokomputer stanowi autonomiczny sterownik kasety, dzięki czemu w sposób programowy może sterować wykonywaniem operacji przez poszczególne moduły oraz odczytywać z bloków potrzebne aktualnie dane, by na ich podstawie w przetworzeniu zainicjować kolejne operacje w modułach funkcjonalnych.

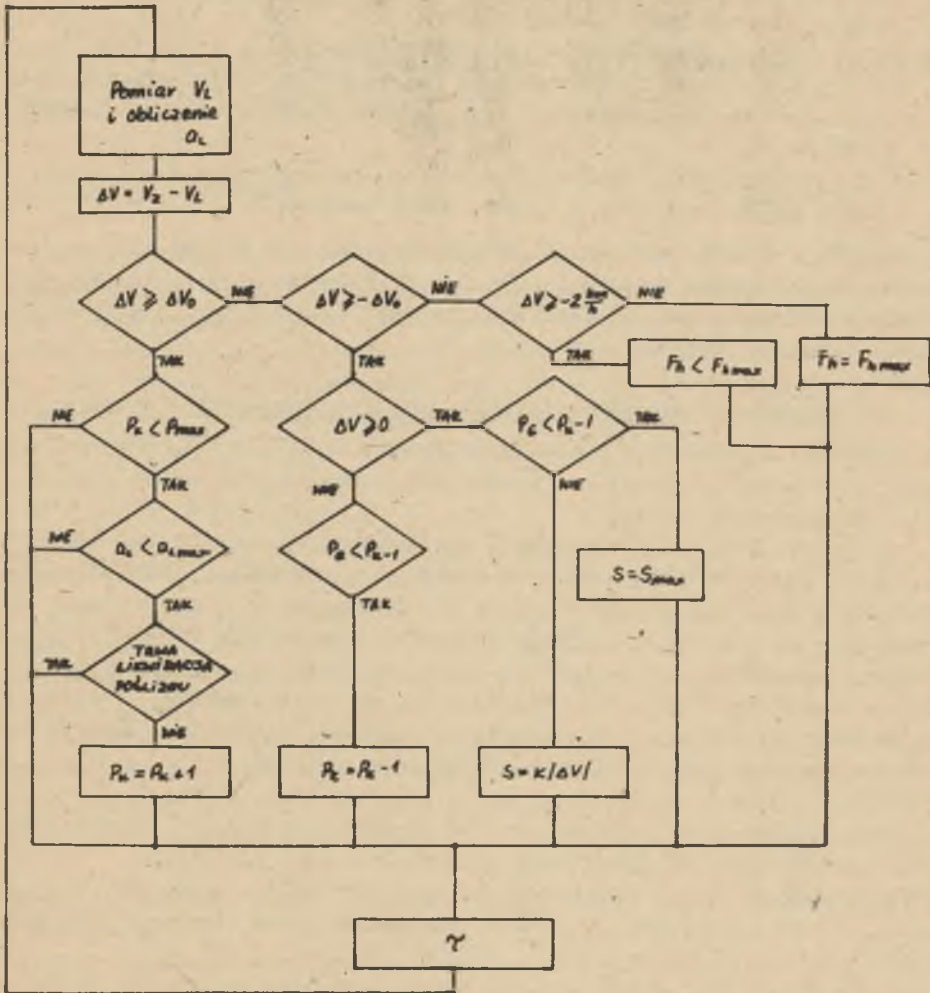
W systemie zastosowano następujące moduły:

- 1) - mikrokomputer (opracowany przez autorów w standardzie CAMEC zgodnie z normą EUR 6500),
- 2) - pamięć stała EPROM - dla programu sterującego i stałych parametrów,
- 3) - pamięć o dostępie swobodnym RAM - jako bufor liczebnic.



Rys. 3.2

- 4) - blok pomiaru mocy generatora BPM - generuje na wyjściu wartość aktualnej mocy generatora w postaci cyfrowej w kodzie dwójkowym. Wynik pomiaru jest zapamiętywany w rejestrze po to, by było możliwe odczytywanie wartości mocy w dowolnej fazie następnego cyklu pomiarowego. Sygnały wejściowe oddzielone są galwanicznie od CPS,
- 5) - generator impulsów zegarowych GIZ - standardowy blok typu 730A produkcji ZAE "POLON";
- 6) - blok pomiaru prędkości BPV - umożliwia niezależny pomiar prędkości wszystkich osi lokomotywy, zapewnia izolację galwaniczną CPS od zewnętrznych czujników prędkości;
- 7) - moduł wyjść cyfrowych MWY - ma za zadanie wyprowadzanie z podsystemu CPS sygnałów typu "załącz - wyłącz" sterujących stycznikami bocznikującymi nastawnik jazdy lub oddziaływującymi na układ hamulcowy; Wyjście bloku izolowane są galwanicznie od CPS,



- V_L - prędkość lokomotywy
- a_L - przyspieszenie lokomotywy
- s - sygnał sterujący
- P_k - moc odpowiadająca k-tej pozycji nastawnika jazdy
- P_G - aktualna moc prądniczy głównej
- τ - opóźnienie

Rys. 3.3

- 8) - przetwornik cyfrowo-analogowy PCA - przetwarza sygnał cyfrowy na analogowy dla sterowania impulsatorami tranzystorowymi. Blok PCA posiada izolację galwaniczną części cyfrowej od analogowej. Napięcie przebicia izolacji wynosi 500 V;
- 9) - blok sprzęgający z urządzeniem odbiorczo-nadawczym i pulpitem maszynisty BSO - służy do przyłączenia urządzenia łączności radiowej znajdującego się na lokomotywie oraz pulpitu maszynisty do magistrali CAMAC;
- 10) - blok diagnostyczny BD, zadaniem którego jest wykrywanie i sygnalizacja nieprawidłowości w trakcie pracy urządzenia.

Wszystkie sygnały wychodzące lub przychodzące z/do kasety CPS są izolowane galwanicznie. Wymaganie to wynika z konieczności zabezpieczenia układów elektronicznych od zakłóceń i przepięć pochodzących z silnoprądowych obwodów lokomotywy.

3.4. Algorytm działania cyfrowego podsystemu sterowania lokomotywą

Algorytm działania CPS przedstawia schemat na rys. 3.3. Algorytm ten jest realizowany cyklicznie ze stałym taktom regulacji T_R przez mikroprocesorowy sterownik kasety.

Każdy takt sterowania rozpoczyna się pomiarem prędkości lokomotywy V_L (odczyt z rejestru bloku BPV) oraz obliczeniem aktualnego przyspieszenia lokomotywy a_L . Jednocześnie dokonuje się programowa kontrola poślizgu kół pędnych. W celu kontroli poślizgu wszystkie osie napędne lokomotywy (dwie w przypadku układu modelowego) wyposażone być muszą w czujniki prędkości. Kontrola poślizgu polega na odczytywaniu i wyliczaniu różnicy prędkości wszystkich osi lokomotywy w stosunku do prędkości minimalnej. Wartość tej różnicy wskazuje zarówno na fakt wystąpienia poślizgu, jak i na jego wielkość.

Następnie sterownik pobiera wartość prędkości zadanej V_Z (odczyt rejestru z bloku BSO) i oblicza różnicę prędkości $\Delta V = V_Z - V_L$. W zależności od znaku błędu prędkości oraz od stosunku błędu ΔV do wielkości strefy nieczułości ΔV_0 akcja podejmowana przez sterownik jest różna.

Jeżeli $V_Z > V_L + \Delta V_0$ i jednocześnie aktualny stopień mocy oraz aktualne przyspieszenie nie osiągnęły wartości granicznych, to stopień mocy zwiększany jest o jeden.

Gdy $V_L < V_Z < V_L + \Delta V_0$, to w zależności od stosunku aktualnej mocy generatora P_G do mocy odpowiadającej najbliższemu niższemu stopniowi mocy P_{K-1} sygnał sterujący impulsowy regulator wzbudzenia (tj. liczba przesyłana do bloku FCA) przybiera wartość maksymalną lub proporcjonalną do błędu.

W przypadku gdy prędkość aktualna jest większa, od wartości zadanej V_Z , wtedy w zależności od wielkości błędu ΔV możliwe są cztery warianty:

- a) hamowanie pełne,
- b) hamowanie niepełne,
- c) obniżenie stopnia mocy o jeden,
- d) brak reakcji.

Po każdym przejściu algorytmu program sterujący zawiesza się na czas wynikający z taktu regulacji.

4. BADANIA MODELOWE

Przedstawioną koncepcję sterowania lokomotywy manewrowej zrealizowano laboratoryjnie w zespole Trakcji Elektrycznej Instytutu Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki. Jako obiekt regulacji wykorzystano kopalnianą lokomotywę dołową, jeżdżącą po trzydziestometrowym odcinku toru. Silnik Diesla symulowany był przez silnik prądu stałego z ujemnym prędkościowym sprzężeniem zwrotnym.

Dla realizacji modelu opracowano i zrealizowano w całości:

- cyfrowy podsystem sterowania CPS,
- impulsator tranzystorowy,
- przekaźnikowo-stycznikowy układ obejścia nastawnika jazdy,
- pulpity zdalnego sterowania i układy transmisji radiowej.

W trakcie prób ruchowych cyfrowy podsystem sterowania zmontowany był razem z impulsatorem tranzystorowym, układem przekaźnikowo-stycznikowym i usytuowany był w bezpośrednim sąsiedztwie układu elektromaszynowego zasilającego lokomotywę ruchowymi, podwieszonymi kablami.

W czasie badań modelowych stwierdzono stosunkowo wysoką odporność układu sterowania na zakłócenia elektromagnetyczne. We wstępnym okresie badań odnotowano zwrotny wpływ zakłóceń generowanych przez przełączane styczniki na stan rejestru wyjść cyfrowych. Efekt ten wyeliminowano dwoma sposobami:

- przez odpowiedni dobór pojemności blokujących, układy wzmacniaczy wyjściowych,
- przez programowe sprawdzanie stanu rejestru wyjściowego i ewentualną ponowną próbę zapisu po każdej operacji powodującej przełączenie styczników.

Zbudowany model układu sterowania będzie służył jako stanowisko laboratoryjno-badawcze. Przeprowadzono próby ruchowe sprawdzające przyjętą koncepcję załączonego algorytmu sterowania. Z uzyskanych wyników pomiarowych wynika, że zrealizowany układ pozwala osiągnąć założoną dokładność stabilizacji prędkości jazdy przy przyjętej dokładności pomiaru prędkości lokomotywy równej 0,1 km/h.

Badania dynamiki układu zamierza się przeprowadzić po wydłużeniu odcinka torów z 30 do 80 m.

5. WNIOSKI

Zastosowanie zdalnie sterowanej lokomotywy manewrowej do napychania składów wagonów na górkę rozrządową pozwoli na skrócenie czasu rozrządzenia. Przy zdalnym sterowaniu lokomotywy istnieje możliwość podporządkowania jej nadrzędnemu systemowi komputerowemu optymalizującemu pracę stacji rozrządowej. Wynikiem prac prowadzonych w Zespole Trakcji Instytutu Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki nad modelami zdalnego systemu sterowania jest model układu przeznaczony do instalowania we wszystkich typach lokomotyw manewrowych.

LITERATURA

- [1] JAGŁA W., BUJAKOWSKI A.: koncepcja układu sterowania cyfrowego lokomotyw spalinowo-elektrycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka nr 78, 1982.
- [2] KONOPKA Z.: Przykłady badań wybranych układów napędowych pojazdów trakcyjnych z zastosowaniem modelowania na mc. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka nr 78, 1982.
- [3] MÜLLER H.J., ZIMMER R.: Die autonome Fahr und Bremssteuerung des Triebfahrzeuges 42 C der DD Banart AGG. Elektrische Bahnen 1972 nr 7, s. 8.
- [4] ENSLOW PH.: Systemy cyfrowe wieloprocesorowe. WNT, Warszawa 1978.
- [5] LEONADES ED.C.: Control and Dynamic System. Vol. 10. New York, Academic Press 1973.
- [6] BAUMANN W.: Standard - Interfaces der elektronischen Messtechnik. Berlin VEB Verlag Technik 1974.

Wpłynęło do redakcji 29.V.1981 r.

Recenzent: doc. dr inż. Ryszard Matusiak

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНЕВРОВЫМ ЛОКОМОТИВОМ

Р е з ю м е

В статье обсуждена микропроцессорная система управления маневровым локомотивом, реализующая на локомотиве передачу расположения путем радиотелеуправления. Представлены задачи и концепция системы, а также описан способ ее осуществления. Представлен тоже алгоритм, реализуемый средствами программирования миникомпьютера.

MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM OF THE SWITCHING LOCOMOTIVE

S u m m a r y

The paper deals with microprocessor control system of the switching locomotive which performs commands sent by radio from the remote control desk.

Assumptions, idea and the way of system realization were given. The paper contains also control algorithm performed in software.

Wiesław JARZA

Instytut Podstawowych Problemów Elektrotechniki
i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej

Andrzej BUJAKOWSKI

Instytut Systemów Sterowania - Katowice

KONCEPCJA UKŁADU STEROWANIA CYFROWEGO LOKOMOTYW SPALINOWO-ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie: w artykule przedstawiono koncepcję układu sterowania cyfrowego spalinowo-elektrycznej lokomotywy liniowej. Opisano zagadnienia rozruchu, stabilizacji prędkości jazdy w różnych warunkach trakcyjnych oraz hamowania. Prezentowane koncepcje są rezultatem prac prowadzonych w Instytucie Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki Politechniki Śląskiej, związanych ze sterowaniem lokomotyw typu SU46.

1. WSTĘP

Obecnie obserwuje się szybko postępujący proces automatyzacji trakcji elektrycznej i spalinowo-elektrycznej, zmierzający do modernizacji zarówno obwodów głównych, jak i układów sterowania. Modernizacja ta przebiega przede wszystkim w kierunku elektronizacji obwodów sterowania, a w szczególności: regulatorów wzbudzenia, regulatorów napięcia i regulatorów prędkości jazdy. Opanowanie technologii wytwarzania elementów scalonych, zwłaszcza cyfrowych, a w szczególności mikroprocesorów stworzyło możliwość bardziej kompleksowego podejścia do zagadnień związanych ze sterowaniem pracą lokomotyw. Specyfika układów mikroprocesorowych polega na tym, że algorytm pracy urządzenia sterującego, wprowadzany do pamięci systemu, może być w zależności od wymagań modyfikowany bez potrzeby przekonstruowywania jego części elektronicznej. W układach takich możliwa jest realizacja bardzo złożonych (w porównaniu z konwencjonalnymi elektronicznymi układami sterowania) algorytmów sterowania, o ile tylko wymagany czas wykonywania algorytmu nie jest zbyt krótki.

2. ZAŁOŻENIA FUNKCJONALNE

Zadaniem cyfrowego układu sterowania jest zapewnienie rozruchu lokomotywy (przy nieprzekroczeniu granicznej wartości przyspieszenia), stabilizacji prędkości jazdy w różnych warunkach trakcyjnych oraz hamowania przy zachowaniu granicznej wartości opóźnienia.

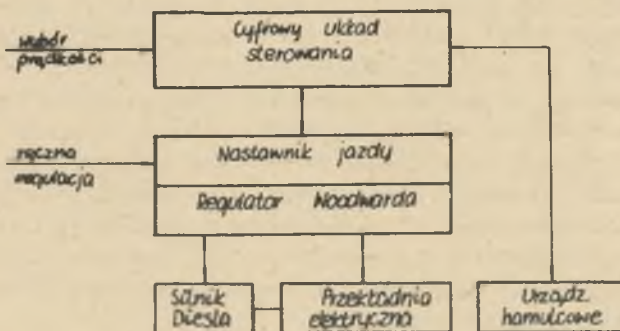
Założono, że układ sterowania cyfrowego będzie współpracował z zainstalowanym na lokomotywie regulatorem Woodwarda i z istniejącymi urządzeniami hamulcowymi.

W układzie tradycyjnym (tylko z regulatorem Woodwarda) maszynista dokonuje za pomocą nastawnika jazdy wyboru stopnia mocy, na którym będzie pracował silnik Diesla wraz z przekładnią elektryczną. Czynności te, absorbujące jego uwagę, nie pozwalają na skupienie się wyłącznie na obserwacji trasy ruchu pociągu i podejmowaniu decyzji co do wartości prędkości jazdy na trasie. Ręczna regulacja stopnia mocy przez maszynistę powoduje często przeregulowania, które podnoszą zużycie paliwa przez silnik spalinowy.

W proponowanym cyfrowym układzie sterowania czynności te przejmuje mikrokomputerowy system sterowania, a rola maszynisty sprowadza się do wyboru prędkości jazdy i obserwacji poprawności działania układu. W przypadku awarii układu cyfrowego maszynista może kontynuować jazdę w sposób tradycyjny.

3. STRUKTURA I DZIAŁANIE UKŁADU STEROWANIA DLA LOKOMOTYWY SU46

Sposób włączenia cyfrowego układu sterowania do urządzeń lokomotywy SU45 obrazuje rys. 1.



Rys. 1

Pulpit maszynisty zawiera stacyjkę i podświetlane przyciski funkcyjne i cyfrowe. Wybór wielkości żądanej prędkości następuje przez wciśnięcie odpowiednich przycisków. Przyjmuje się zadawanie prędkości jazdy co 5 km/godz., czyli że prędkości jazdy będą się układały w szeregu: 0; 5; 10; 15; 20, ... 120 km/godz. W praktyce takie kwantowanie prędkości jazdy jest zupełnie wystarczające. Danymi wejściowymi są informacje uzyskane z pulpitu maszynisty oraz sygnały pochodzące z czujników impulsowych, wykorzystywane do pomiaru aktualnej wartości prędkości jazdy i przyspieszenia. Jako czujniki przetwarzające prędkość obrotową zestawu kołowego lokomotywy na sygnały elektryczne proponuje się zastosować czujniki magnetoelektryczne przymocowane do obudowy przekładni zębatej i sprzęgnięte magnetycznie z kołem zębatym osadzonym na wale silnika trakcyjnego. Obwód magnetyczny zamyka się przez rdzeń magnesu czujnika, szczelinę powietrzną, koło zębate przekładni. W wyniku wirowania koła zębatego ulega zmianie wielkość szczeliny, a stąd wartość strumienia głównego na skutek zmian reluktancji. Powoduje to indukowanie się w cewce czujnika SEM o częstotliwości proporcjonalnej do liczby obrotów zestawu kołowego.

Zastosowanie w układzie dwóch czujników mocowanych nad tym samym kołem zębatym, lecz przesuniętych względem siebie o 1/2 długości podziałki zębowej, zwiększa dwukrotnie rozdzielczość urządzenia.

Pomiaru wartości prędkości dokonuje się, zliczając impulsy ze stałym taktom układu T1. W ten sposób ilość impulsów zliczona w okresie T1 reprezentuje wartość (ściślej jest to średnia za okres) aktualnej prędkości.

Przyspieszenie mierzone jest metodą różnicową przez odejmowanie wartości prędkości zmierzonej w dwóch kolejnych taktach. Proponowany schemat funkcjonalny cyfrowego układu sterowania przedstawiono na rys. 2, a przyjęte strefy regulacyjne układu na rys. 3.

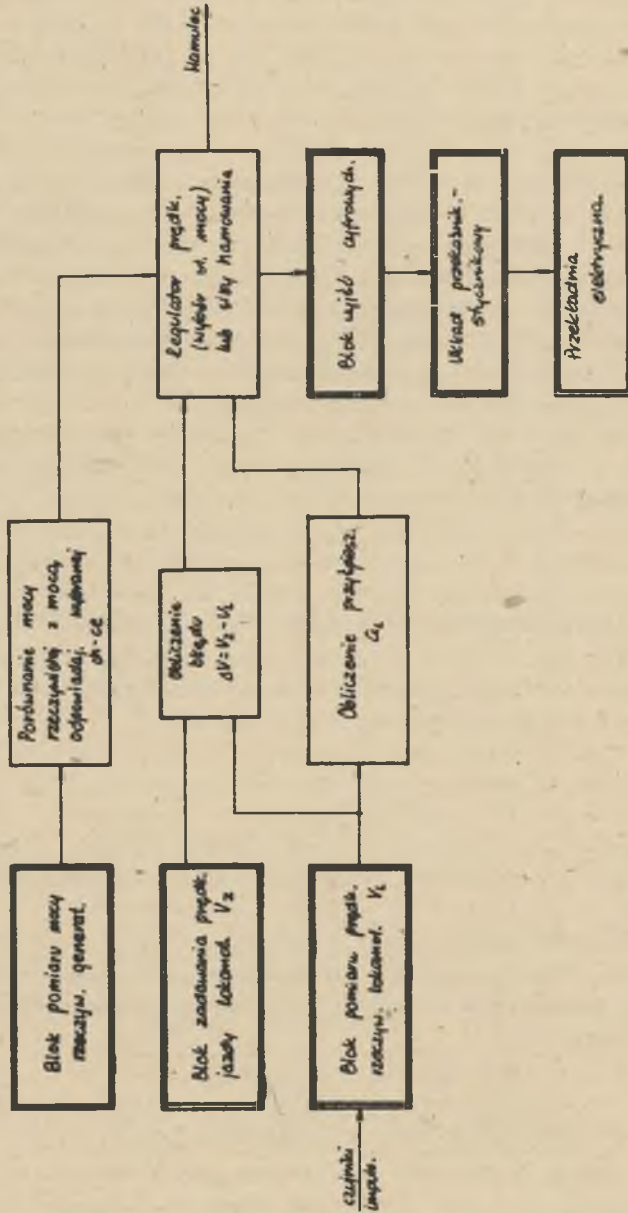
Układ wyboru stopnia mocy oddziałuje na regulator Woodwarda i urządzenia hamulcowe w ten sposób, aby zapewnić stabilizację żądanej wartości prędkości. Jak widać z rys. 3, nie jest to sterowanie proporcjonalne, lecz odcinkowe, ze strefą nieczułości. Wąska strefa nieczułości układu ± 1 km/godz. pozwala uzyskać mały uchyb regulacji bez zbyt częstych prze-regulowań.

Podczas pracy układu wewnątrz założonej strefy nieczułości układ utrzymuje ostatnio wybraną wartość stopnia mocy przekładni elektrycznej, co oznacza w praktyce możliwość jazdy lokomotywy z prędkością mieszczącą się w przedziale:

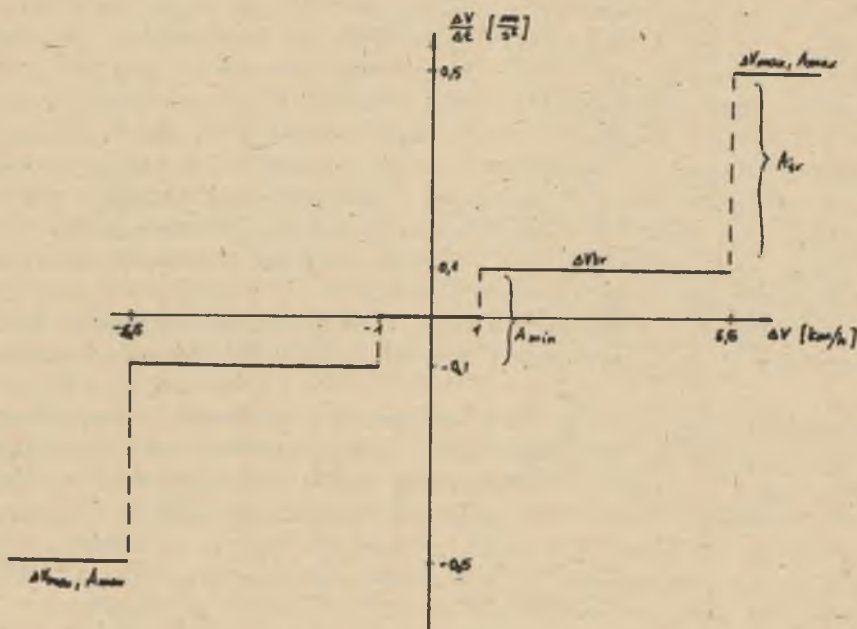
$$VZ - 1 \leq V < VZ + 1 \text{ km/godz.}$$

gdzie VZ oznacza zadaną wartość prędkości.

W tym przedziale wartość rozwijanych przyspieszeń jest bardzo niska i wynika głównie ze zmiany aktualnych oporów trakcyjnych. W trakcie rozruchu lokomotywy od prędkości zerowej do wartości żądanej przez maszynistę proces regulacji przebiega następująco: wobec dużej początkowej różnicy



Rys. 2



Rys. 3

prędkości dopuszczalne jest rozwijanie przyspieszeń nie większych niż $0,5 \text{ m/s}^2$, ponieważ układ realizuje funkcję odciążenia podług przyspieszenia. W praktyce rozwijanie tak dużych przyspieszeń możliwe jest w zasadzie przy jeździe lokomotywy nieobciążonej.

Ograniczenie wartości przyspieszeń do odpowiednich wartości granicznych następuje poprzez obniżenie stopnia mocy, gdy aktualna wartość przyspieszenia w danym takcie pomiarowym przekracza wartość dopuszczalną w określonym przedziale odchyłek prędkości. W okresie przyspieszania następuje podwyższenie stopnia mocy w kolejnych taktach podstawowych co T_1 . Gdy wartość rzeczywista prędkości będzie różnić się od prędkości $VZ-1 \text{ km/godz}$ mniej niż $0,5 \text{ km/godz}$., następuje dalsze ograniczenie przyspieszenia do wartości nie większej niż $0,1 \text{ m/s}^2$. W rezultacie wejście do strefy nieczułości układu regulacji odbywać się będzie zawsze z przyspieszeniem nie przekraczającym A_{\min} .

Z chwilą gdy w opisanym tutaj procesie rozruchu lokomotywy prędkość V stanie się równa $VZ-1 \text{ km/godz}$., następuje utrzymanie ostatnio wybranego stopnia mocy. Prędkość lokomotywy będzie dalej wzrastać zgodnie z przyspieszeniem początkowym, z jakim została osiągnięta prędkość $VZ-1 \text{ km/godz}$. (przyspieszenie "wejścia" w strefę nieczułości układu). Jeżeli opory jaz-

dy nie zrównoważą siły pociągowej lokomotywy, to po pewnym czasie prędkość przekroczy wartość $VZ + 1$ km/godz, co będzie sygnałem do obniżenia stopnia mocy. Winno to spowodować obniżenie się prędkości jazdy i w następnym takcie wewnętrznym układ może znaleźć się już wewnątrz strefy nieczułości. W procesie stabilizacji prędkości jazdy wokół strefy nieczułości (tj. w przedziale $|\Delta V| = 1,5$ km/godz) takt pomiaru prędkości i przyśpieszenia zostaje wydłużony 5÷10 razy. Podczas dalszych kolejnych taktów (teraz co 5÷10 T1) następuje pomiar przyśpieszenia i prędkości. Wydłużenie taktu pomiarowego w sąsiedztwie strefy nieczułości wynika z dążenia do eliminacji zbyt częstych przełączeń stopni mocy przy jeździe z prędkością praktycznie ustaloną. Stopień mocy zostaje zmniejszony o jeden, gdy prędkość V_{II} jest większa od $VZ + 1$ km/godz oraz gdy zmierzona wartość przyśpieszenia jest ciągle jeszcze dodatnia. Podczas obniżenia się prędkości poniżej $VZ - 1$ km/godz występuje proces analogiczny, z tym że następuje w tym przypadku podwyższanie stopnia mocy.

Wychylenie rączki hamulca przez maszynistę z położenia spoczynkowego (w celu przyhamowania lub zahamowania pociągu) powoduje szybkie obniżenie stopnia mocy z 10-krotnie przyśpieszonym cyklem, tj. co $\frac{1}{10}$ T1, następnie kolejne obniżenie stopnia mocy przez układ sterujący, aż do osiągnięcia poziomu biegu jałowego. Zwolnienie urządzeń hamulcowych i powrót rączki do położenia spoczynkowego powoduje ponowne rozpoczęcie procesu stabilizacji prędkości jazdy na zadanym poziomie. Proces obniżania prędkości może odbywać się również dzięki wybieraniu nowych prędkości zedanych, niższych od uprzednio nastawionych.

Przy nastawie mniejszej prędkości jazdy, różniącej się o więcej niż 5 km/godz od prędkości poprzedniej, następuje szybkie obniżenie stopnia mocy do poziomu jałowego silnika Diesla, a następnie jazda wybiegiem aż do osiągnięcia równej granicy nowej strefy nieczułości $VZ + 1$ km/godz. Dalej zaczyna się ponownie opisany uprzednio proces stabilizacji prędkości lokomotywy. Podczas wybrania nowej wartości prędkości niższej tylko o 5 km/godz nie następuje jazda wybiegiem, lecz kolejne obniżenie stopnia mocy (poza strefę $VZ \pm 1,5$ km/godz z taktom T1) aż do momentu wejścia w nową strefę stabilizacji, po czym nowa wartość prędkości VZ będzie w opisany sposób utrzymywana. Rozwiązanie takie pozwala na uniknięcie niepotrzebnego w tym przypadku zejścia z prędkością obrotową silnika Diesla do poziomu biegu jałowego. Jeżeli wskutek jazdy na dużym spadku mimo ograniczenia mocy przekładni do poziomu biegu jałowego prędkość jazdy pociągu w dalszym ciągu wzrasta, następuje włączenie hamulca lokomotywy, gdy $V > VZ + 2$ km/godz. Odblokowanie tego hamulca ma miejsce wtedy, gdy prędkość spadnie poniżej wartości $VZ + 2$ km/godz. Przewiduje się dodatkowo włączenie hamowania swaryjnego w przypadku, gdy prędkość wzrośnie ponad $VZ + 10$ km/godz.

4. ROZWIĄZANIE PULPITU MASZYNISTY

Zakłada się, że wszystkie przyciski na pulpicie będą zwrotnie podświetlane w celu sygnalizacji przyjęcia polecenia przez układ cyfrowy oraz dla określenia aktualnego stanu układu. Przyciski numeryczne proponuje się podzielić na trzy grupy: do zadawania setek, dziesiątek i jednostek prędkości wyrażonej w km/godz. Wszystkie przyciski będą stabilne i wzajemnie zależne w ramach grupy.

Oprócz przycisków numerycznych przewiduje się dwa przyciski funkcyjne niestabilne: AKCEPT - służący do wprowadzania do układu uprzednio wybranej prędkości zadanej, START - używany do ustawiania układu w stan początkowy przed rozpoczęciem pracy. Podświetlanie przycisków numerycznych ma na celu sygnalizację wartości prędkości zadanej, uprzednio wprowadzonej do układu. Przewiduje się, że przyciski będą podświetlane światłem ciągłym po osiągnięciu prędkości zadanej, a światłem pulsującym w okresie przyspieszenia lub hamowania. Przycisk START podświetlany jest światłem pulsującym dla zasygnalizowania braku możliwości osiągnięcia zadanej prędkości w danych warunkach trakcyjnych. Przycisk AKCEPT podświetlany jest jedynie w chwili przyciśnięcia dla kontroli poprawności działania układu.

5. POWIĄZANIE UKŁADU STEROWANIA CYFROWEGO LOKOMOTYWY Z UKŁADEM HAMULCOWYM

Układ cyfrowy będzie mógł sterować procesem hamowania pociągu w sposób ograniczony, a mianowicie:

- będzie uruchamiał i luzował hamulec dodatkowy (niesamoczynny), oddziałujący jedynie na koła lokomotywy celem przyhamowania pociągu,
- będzie uruchamiał hamulec zespolony (samoczynny) celem zatrzymania awaryjnego pociągu (hamowanie awaryjne).

Natomiast maszynista będzie mógł posługiwać się hamulcem zespolonym sterując ręcznie w celu przyhamowania i luzowania pociągu oraz w przypadku konieczności zatrzymania pociągu na stacji, przed semaforem lub w dowolnym miejscu na szlaku.

W związku z powyższym proponuje się wyposażać lokomotywę w układ elektropneumatyczny bocznikujący zawór dodatkowy maszynisty (Oerlikon FD 1), a cewki zaworów elektropneumatycznych tego układu sterować sygnałami prądowymi z układu cyfrowego poprzez wzmacniacze i przekaźniki pomocnicze prądu stałego.

Powyższe rozwiązanie umożliwi uruchomienie i luzowanie hamulca dodatkowego przez układ cyfrowy.

6. PODSUMOWANIE

Niewątpliwe zalety cyfrowych systemów sterowania, jak np. modularność konstrukcji i elastyczność funkcjonalna są powodem coraz powszechniejszego ich stosowania w nowoczesnych lokomotywach. Za granicą znane są już rozwiązania sterowania cyfrowego lokomotyw elektrycznych, a w szczególności jednostek szybkiej kolei miejskiej. Rozwój krajowej produkcji szerokiej gamy scalonych układów cyfrowych oraz opanowanie podstawowych technologii produkcji urządzeń cyfrowych umożliwia obecnie budowanie w kraju cyfrowych układów sterowania lokomotyw. Biorąc jednocześnie pod uwagę stały wzrost cen paliw wydaje się celowe prowadzenie prac nad układami sterowania lokomotyw spalinyowych. Cyfrowy układ sterowania daje między innymi możliwość optymalizacji pracy silnika Diesla ze względu na zużycie paliwa.

LITERATURA

- [1] DUDAK W.: Teoretyczne zagadnienia trakcji elektrycznej. Skrypt AGH, Kraków 1974.
- [2] CZERNIŁO S.: Tabor trakcji elektrycznej. WKiŁ, Warszawa 1974.
- [3] DULŚ J.: Zasilnie sterowana lokomotywa elektryczna dla baz przeładunkowych węgla i rudy. Problemy projektowe Hutnictwa i Przemysłu Maszynowego nr 3 (265) ss. 54-62 Gliwice - marzec 1977.
- [4] Intel 8080 Microcomputers System Manual. January 1975. Second Print (80-394 A).
- [5] COBURN A.: Wstęp do systemów operacyjnych. P.A.N., Warszawa 1976.

Przyjęta do redakcji 29.V.1981 r.

Recenzent: doc.dr hab.inż. Przemysław Pazdro

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЛИНЕЙНЫМИ ЛОКОМОТИВАМИ

Резюме

В статье представлена концепция системы цифрового управления дизель-электрическим линейным локомотивом. Описаны вопросы пуска, стабилизации скорости хода в разных тяговых условиях, а также торможения.

Представленные концепции - результат работ проводимых Институтом основных проблем электротехники и энергоэлектроники Силезского политехнического института, связанных с управлением локомотивами типа SU-46.

AN IDEA OF A DIGITAL CONTROL SYSTEM OF THE DIESEL-ELECTRIC LOCOMOTIVES

S u m m a r y

The paper presents an idea of a digital control system of the diesel-electric locomotive.

Starting, velocity stabilisation and braking in different traction conditions are discussed. The ideas presented in the paper are the result of research carried out in the Silesian Polytechnic, concerning the SU46 locomotive type control.

Piotr GAWOR

Instytut Elektryfikacji
i Automatykacji Górnictwa
Politechniki Śląskiej

WPLYW REZYSTANCJI ZIĄCZA PODEŹNEGO SZYN TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ NA POWSTAWANIE PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH

Streszczenie: Przeprowadzono analizę teoretyczną rozkładu potencjałów szyn oraz rozptyłu prądu w szynach trakcji elektrycznej przewodowej w przypadku, gdy brakuje łącznika podłużnego w obydwu tokach toru. Dokonano analizy wpływu rezystancji pojedynczego złącza podłużnego szyn na powstawanie prądów błędzących.

1. WSTĘP

Jednym z czynników, które w sposób istotny wpływają na powstawanie prądów błędzących jest stan sieci powrotnej trakcji elektrycznej przewodowej. Stan ten ilościowo opisuje się wprowadzając pojęcie jednostkowej rezystancji podłużnej szyn r_g , wyrażanej w Ω/km oraz jednostkowej rezystancji przejścia z szyn do ziemi r_n , wyrażanej w Ω/km . Dla potrzeb analizy teoretycznej zjawiska upływu prądu z szyn zakłada się, że obydwie te rezystancje rozłożone są równomiernie na całej długości toru.

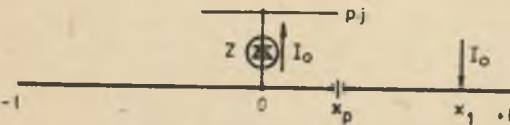
W praktyce często zdarza się, że w czasie eksploatacji linii trakcji elektrycznej dochodzi do uszkodzenia pojedynczych łączników podłużnych. W następstwie tego dojść może albo do powstania przerwy elektrycznej w szynach, albo do punktowego wzrostu rezystancji podłużnej szyn.

W dalszej części niniejszego artykułu przeprowadzono analizę wpływu obecności przerwy w szynach oraz wpływu wartości rezystancji złącza podłużnego na rozkład potencjałów i prądów w szynach.

Analiza dotyczy przypadku prowadzącego do największych prądów błędzących, tzn. przypadku jednostronnego zasilania linii trakcyjnej i pojedynczego, skupionego obciążenia.

2. ROZKŁAD POTENCJAŁÓW I PRĄDU W SZYNACH Z POJEDYNCZĄ PRZERWĄ ELEKTRYCZNĄ

Przedmiotem rozważań niech będzie odcinek linii jednotorowej o długości $2l$, zasilany jednostronnie ze stacji usytuowanej w punkcie O (rys. 1),



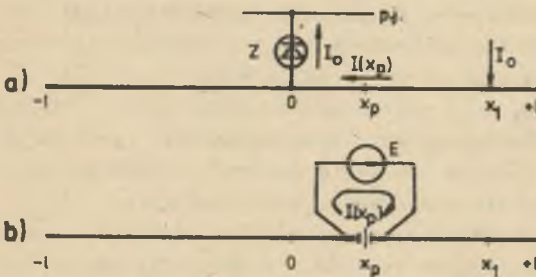
Rys. 1. Rysunek poglądowy odcinka linii trakcji elektrycznej zasilanego jednostronnie w punkcie O , obciążonego w punkcie x_1 prądem I_0 i posiadającego przerwę w szynach w punkcie x_p
 Z - stacja zasilająca, p.j. - przewód jezdny

obciążony prądem I_0 , przyłożonym w dowolnym punkcie x_1 w postaci pojedynczego obciążenia skupionego. Szyny odcinka niech charakteryzują się równomiernie rozłożonymi rezystancjami: podłużną r_B i przejścią r_P .

Założmy, że w dowolnym punkcie x_p rozpatrywanej linii wystąpi przerwa (np. brak łącznika podłużnego w obydwu tokach). Prąd w szynach w punkcie x_p będzie wówczas równy zero.

Rozkład potencjałów i rozptył prądu w szynach dla tej sytuacji znaleźć można na drodze superpozycji dwóch przypadków:

a) szyny nie posiadające przerwy, zasilane w punkcie O i obciążone prądem I_0 w punkcie x_1 (rys. 2a); prąd w punkcie x_p szyn oznaczymy symbolem $I(x_p)$,



Rys. 2. Przypadki składowe pomocne do analizy pracy linii z przerwą w szynach

a) szyny bez przerwy, obciążone w punkcie x_1 i zasilane w punkcie O ,
 b) szyny nieobciążone, z zastępczą SEM-ną włączoną w punkcie x_p

b) szyny posiadające przerwę w punkcie x_p , do której przyłączona jest siła elektromotoryczna E o takiej wartości, że wywołany przez nią prąd w punkcie x_p szyn będzie równy $I(x_p)$ i przeciwnie skierowany niż w przypadku a), (rys.2b). Dla przypadku a) wartość potencjału szyn względem ziemi $V(x)$ oraz prądu w szynach $I(x)$ w dowolnym punkcie x określić można z wyrażenia [3]:

- dla odcinka $-1 \leq x \leq 0$

$$V(x) = \frac{I_0 r}{\text{sh}2\alpha l} \text{ch}\alpha(1+x) [\text{ch}\alpha(1-x_1) - \text{ch}\alpha l] \quad (1a)$$

$$I(x) = \frac{I_0}{\text{sh}2\alpha l} \text{sh}\alpha(1+x) [\text{ch}\alpha l - \text{ch}\alpha(1-x_1)] \quad (1b)$$

- dla odcinka $0 \leq x \leq x_1$

$$V(x) = \frac{I_0 r}{\text{sh}2\alpha l} [\text{ch}\alpha(1-x_1) \text{ch}\alpha(1+x) - \text{ch}\alpha l \text{ch}\alpha(1-x)] \quad (2a)$$

$$I(x) = \frac{-I_0}{\text{sh}2\alpha l} [\text{sh}\alpha(1+x) \text{ch}\alpha(1-x_1) + \text{sh}\alpha(1-x) \text{ch}\alpha l] \quad (2b)$$

- dla odcinka $x_1 \leq x \leq 1$

$$V(x) = \frac{I_0 r}{\text{sh}2\alpha l} \text{ch}\alpha(1-x) [\text{ch}\alpha(1+x_1) - \text{ch}\alpha l] \quad (3a)$$

$$I(x) = \frac{I_0}{\text{sh}2\alpha l} \text{sh}\alpha(1-x) [\text{ch}\alpha(1+x_1) - \text{ch}\alpha l], \quad (3b)$$

w których

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_g}{r_p}}, \quad \text{km}^{-1} - \text{współczynnik ugiętu},$$

$$r = \sqrt{r_g r_p}, \quad \Omega - \text{rezystancja charakterystyczna szyn},$$

a pozostałe oznaczenia wynikają z rys. 1 i rys. 2.

W przypadku włączenia do przerwanych szyn siły elektromotorycznej rozkład potencjałów i prądu w szynach opisany jest wzorami [3]:

- dla odcinka $-1 \leq x < x_p$

$$V(x) = \frac{-E}{\text{sh}2\alpha l} \text{sh}\alpha(1-x_p) \cdot \text{ch}\alpha(1+x) \quad (4a)$$

$$I(x) = \frac{E}{r \text{sh}2\alpha l} \text{sh}\alpha(1-x_p) \cdot \text{sh}\alpha(1+x) \quad (4b)$$

- dla odcinka $x_p < x \leq 1$

$$V(x) = \frac{E}{\text{sh}2\alpha l} \text{sh}\alpha(1+x_p) \cdot \text{ch}\alpha(1-x) \quad (5a)$$

$$I(x) = \frac{E}{r \text{sh}2\alpha l} \text{sh}\alpha(1+x_p) \cdot \text{sh}\alpha(1-x). \quad (5b)$$

Wartość siły elektromotorycznej, jaką trzeba włączyć do przerwy w szynach obliczyć można z warunku równości wartości bezwzględnych prądów $I(x_p)$ w punkcie x_p szyn w obydwu przypadkach. Należy w tym celu przyrównać wyrażenia (4b) lub (5b) z jednym z wyrażeń (1b), (2b), (3b), w zależności od położenia punktu x_p .

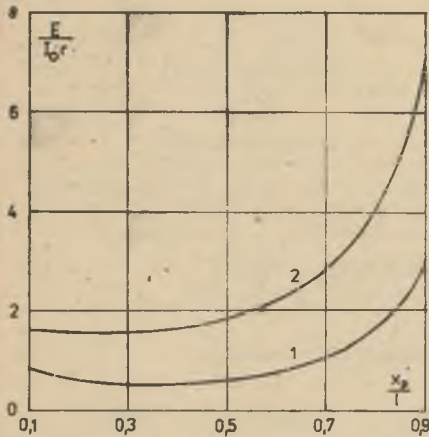
Przykładowo, dla sytuacji przedstawionej na rys. 1., tzn. dla

$$x_1 > x_p > 0,$$

należy przyrównać wyrażenia (4b) i (2b), podstawiając $x = x_p$. Szukana wartość E będzie wówczas równa:

$$E = I_0 r \frac{\operatorname{ch} \alpha(1-x_1)}{\operatorname{sh} \alpha(1-x_p)} + \frac{\operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha(1+x_p)} \quad (6)$$

Z wyrażenia (6) wynika, że dla określonych parametrów sieci szynowej αl linii obciążonej prądem I_0 wartość E zależy od miejsca położenia obciążenia x_1 oraz od miejsca, w którym brakuje łącznika podłużnego x_p . Przyjmując przypadek najniekorzystniejszego obciążenia, tzn. przyłożonego w punkcie $x_1 = 1$, wyznaczono zależność $E = f(x_p)$, którą przedstawiono na rys. 3. Dla wykreślenia zależności



Rys. 3. Zależność zastępczej siły elektromotorycznej, jaką należy włączyć do przerwy w punkcie x_p , aby zrównoważyć prąd pochodzący od obciążenia I_0

- 1 - dla $\alpha = 0,316 \text{ km}^{-1}$
2 - dla $\alpha = 0,141 \text{ km}^{-1}$

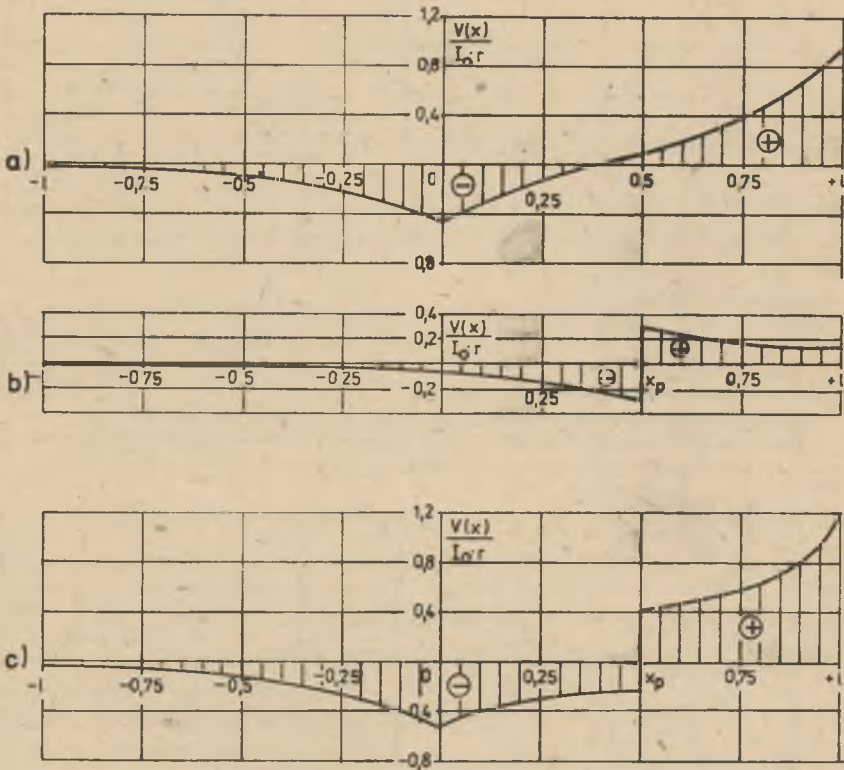
przyjęto następujące parametry linii:

$$l = 10 \text{ km}; \quad \alpha = 0,316 \text{ km}^{-1} \quad (r_s = 0,02 \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \quad r_p = 0,2 \Omega \text{ km})$$

$$\text{oraz } \alpha = 0,141 \text{ km}^{-1} \quad (r_s = 0,02 \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \quad r_p = 1 \Omega \cdot \text{km}).$$

Znając wartość siły elektromotorycznej niezbędnej do zrównoważenia prądu $I(x_p)$ w szynach, wywołanego obciążeniem I_0 , można wyznaczyć wypadkowy rozkład potencjałów oraz prądu w szynach posiadających przerwę w punkcie x_p . Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe (dla $x_p = 0,5$ i $x_1 = 1$) wykresy poszczególnych wielkości dla obydwu przypadków składowych oraz wykresy wypadkowego rozkładu potencjałów i prądu w szynach (rys. 4c i rys. 5c).

Na podstawie rozkładu potencjałów i prądu w szynach można scharakteryzować efekt powstawania prądów błądzących. Ogólny kierunek wektora natężenia przekładowego pola elektrycznego w ziemi określony jest rozkładem

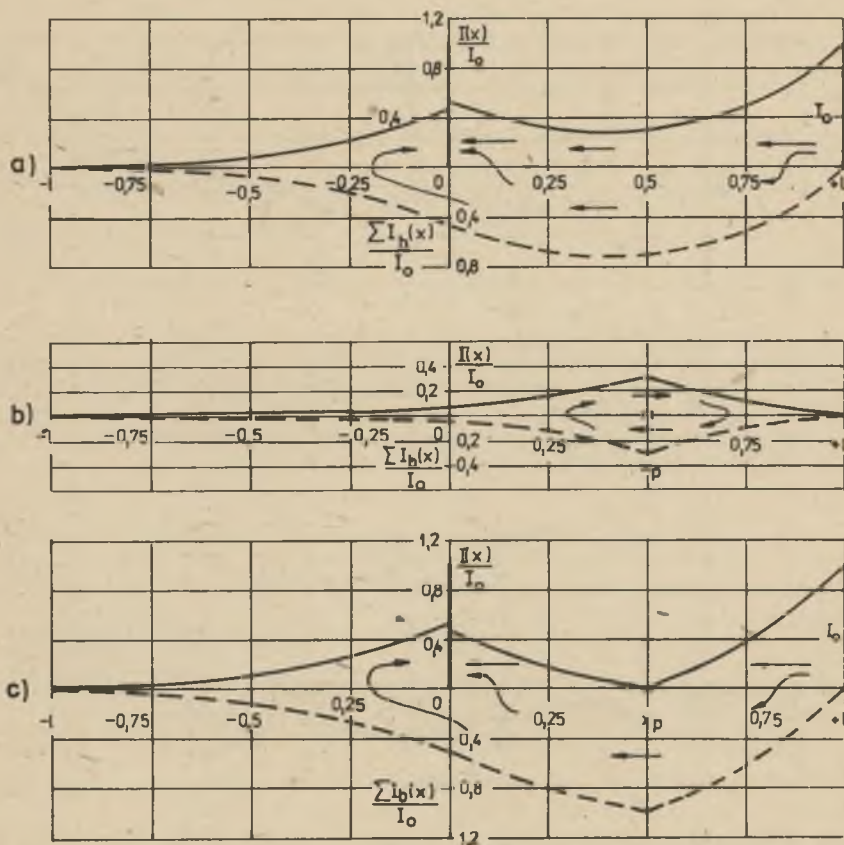


Rys. 4. Rozkłady potencjałów szyn z przerwą w punkcie x_p dla linii zasilanej jednostronnie w punkcie 0 i obciążonej pojedynczym obciążeniem skupionym w punkcie 1;

a), b) - przypadki składowe, c) - wypadkowy rozkład potencjałów

strefy anodowej i katodowej szyn. Wartość prądu wpływającego z szyn i rozprzyskującego się w ziemi w postaci prądów błądzących nie jest jednakowa wzdłuż odcinka linii. Rozkład sumarycznych prądów błądzących przedstawiono na rys. 5 linią przerywaną. Sumaryczne prądy błądzące w danym punkcie $\sum I_b(x)$ należy rozumieć jako sumę prądów w ziemi, przepływających przez płaszczyznę poprowadzoną prostopadle w tym punkcie do osi torów. Dla odcinka pomiędzy punktem przyłożenia obciążenia i stacją zasilającą wartość sumarycznych prądów błądzących wynika z zależności:

$$\sum I_b(x) = I_0 - I(x) \quad (7)$$



Rys. 5. Rozpływ prądu w szynach $I(x)$ oraz wartości sumarycznych prądów błędnych $\Sigma I_b(x)$ wywołanych pracą linii zasilanej jednostronnie i obciążonej pojedynczym obciążeniem skupionym w punkcie 1, posiadającej przerwę w punkcie x_p ;

a), b) - przypadki składowe, c) wypadkowy rozpływ prądu

Największą wartość przyjmują prądy błędne w punkcie rozgraniczającym strefę anodową od strefy katodowej (w którym potencjał szyn jest równy zero). Istnienie przerwy w szynach sprawia, że największą wartość prądów błędnych jest równa prądowi obciążenia linii I_0 .

Prądy w nieobciążonych odcinkach szyn (dla sytuacji podanej na rys. 1) będą to odcinki określone nierównościami $x < 0$ oraz $x < x_1$ są w całości prądami błędными. Prąd $I(x_1+)$ w całości wypływa z szyn do ziemi, natomiast na prąd $I(0-)$, wpływający do stacji zasilającej, składają się prądy, które wpłynęły z ziemi do szyn w strefie katodowej. Wartości tych prądów okreś-

liczyć można z równań (1b), (3b), (4b), (5b) lub, znając wartość potencjałów szyn w punktach (0-) i (x_1+) , z wyrażenia:

$$I(0-) = \frac{V(0-)}{r \operatorname{cth} \alpha l} \quad (8)$$

$$I(x_1+) = \frac{V(x_1+)}{r \operatorname{cth} \alpha (l-x_1)} \quad (9)$$

Przedstawiona metoda analizy rozkładu potencjałów i prądu w szynach zastosowana może być dla dowolnego innego usytuowania punktu przyłożenia obciążenia x_1 oraz przerwy w szynach x_n . W przypadku większej liczby obciążeń skupionych analizę należy powtórzyć dla każdego obciążenia z osobna, a wyniki zsumować.

3. WPŁYW REZYSTANCJI ZŁĄCZA PODŁUŻNEGO NA ROZKŁAD POTENCJAŁÓW I PRĄDU W SZYNACH

Przyodek wystąpienia przerwy elektrycznej (o rezystancji nieskończenie dużej) w szynach jest przypadkiem skrajnym. Jest on istotny z punktu widzenia teoretycznego, jednakże w praktyce zdarza się rzadko. Znacznie częściej mamy do czynienia z uszkodzeniem lub pogorszeniem się stanu złącza podłużnego szyny, w wyniku którego pojawia się w danym punkcie rezystancja R . Stan taki przedstawiony jest na rys. 6.

Wpływ rezystancji pojedynczego złącza R (w każdym toku) na rozkład potencjałów i rozkład prądów w szynach i w ziemi przedyskutować można na przykładzie rys. 4 i rys. 5. Rysunki 4a i 5a potraktować można jako jeden przypadek graniczny, tzn. taki, w którym rezystancja złącza równa jest zero. Z kolei rysunki 4c i 5c dotyczą, jak już wspomniano, drugiego przypadku granicznego, w którym rezystancja złącza jest nieskończenie duża. Dla pośrednich wartości rezystancji złącza wykresy rozkładu potencjałów i prądu w szynach będą zatem miały przebieg pośredni pomiędzy przedstawionymi na rys. 4a i 4c oraz rys. 5a i 5c.

Wraz ze zmianą rezystancji R zmieniać się będzie wartość prądu płynącego przez uszkodzone złącze i odpowiednio - wartość prądów błądzących płynących w ziemi w punkcie x_R .

Wartość prądu płynącego przez rezystancję R obliczyć można stosując twierdzenie Thevenina:

$$I_R = \frac{U}{R + x_1 + x_2} \quad (10)$$

gdzie:

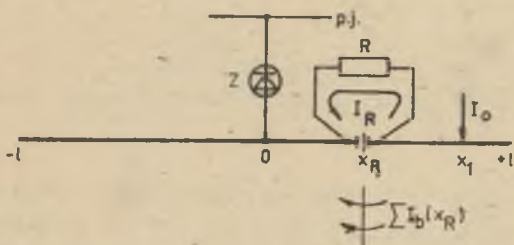
U - napięcie pomiędzy końcami łączonych szyn przed włączeniem rezystancji R ,

R_1, R_2 - rezystancje zastępcze odcinków torów odpowiednio po lewej i prawej stronie punktu x_R .

Wartość napięcia U odpowiada napięciu na przerwie w szynach i równa jest zastępczej sile elektromotorycznej E , którą oblicza się wg zasad przedstawionych w rozdziale 2. Rezystancje zastępcze szyn zgodnie z teorią linii o parametrach rozłożonych wynoszą:

$$R_1 = r \operatorname{cth}\alpha(1+x_R) \quad (11a)$$

$$R_2 = r \operatorname{cth}\alpha(1-x_R) \quad (11b)$$



Rys. 6. Rysunek poglądowy linii z pojedynczym złączem podłużnym o rezystancji R

Przykładowo, dla przypadku przedstawionego na rys. 6, gdy $0 < x_R < x_1$, napięcie U obliczyć można ze wzoru (6) i wówczas prąd płynący w uszkodzonym złączu o rezystancji R określony jest wyrażeniem:

$$I_R = I_0 r \frac{\frac{\operatorname{ch}\alpha(1-x_1)}{\operatorname{sh}\alpha(1-x_R)} + \frac{\operatorname{ch}\alpha 1}{\operatorname{sh}\alpha(1+x_R)}}{R + r [\operatorname{cth}\alpha(1+x_R) + \operatorname{cth}\alpha(1-x_R)]} \quad (12)$$

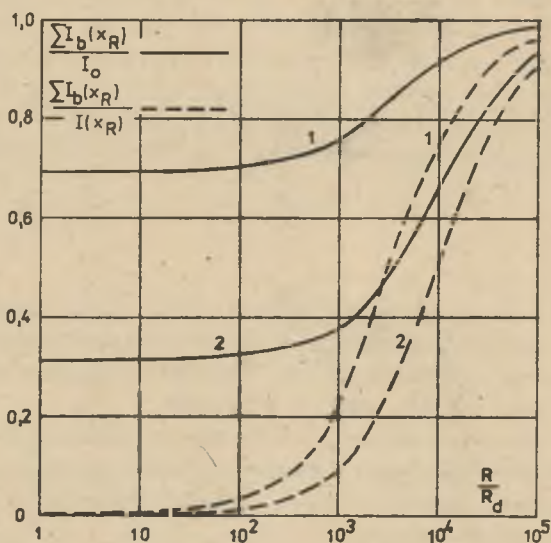
Dla zilustrowania zależności (12) przyjęto sytuację przedstawioną na rys. 4 i rys. 5 ($x_1 = 1$; $x_R = 0,51$) i obliczono, zgodnie z wyrażeniem (7), sumaryczną wartość prądów błądzących w punkcie x_R :

$$\sum I_b(x_R) = I_0 - I_R \quad (13)$$

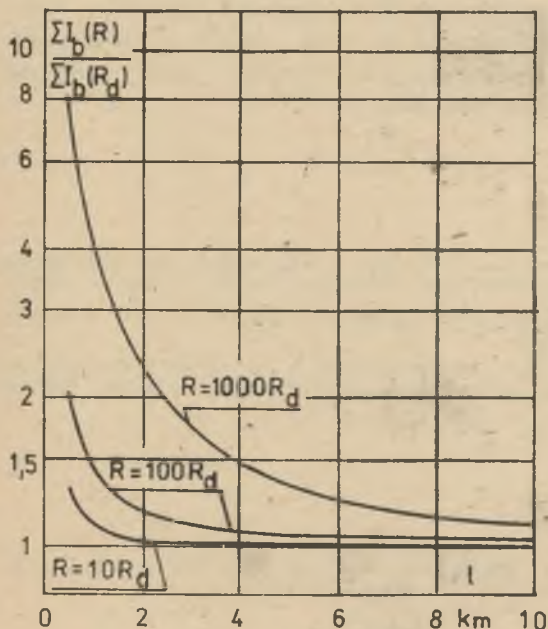
Zależność (13) przedstawiono wykreślnie na rys. 7.

Rezystancja uszkodzonego złącza podana została w jednostkach względnych, przy czym jako rezystancję odniesienia przyjęto wartość dopuszczalnej rezystancji złącza podłużnego R_d , równą rezystancji dwóch metrów szyn [2].

Dodatkowo, linią przerywaną wykreślono zależność sumarycznych prądów błądzących, odniesioną do wartości prądu, jaki płynąłby w szynach w punkcie x_R , gdyby one posiadały złącze podłużne wykonane zgodnie z wymaganiami normy [2], tzn. dla $R = R_d$.



Rys. 7. Zależność sumarycznej wartości prądów błędzących w punkcie x_R od rezystancji pojedynczego złącza podłużnego; 1 - dla $\alpha = 0,316 \text{ km}^{-1}$, 2 - dla $\alpha = 0,141 \text{ km}^{-1}$



Rys. 8. Zależność wzrostu sumarycznej wartości prądów błędzących w następstwie zwiększonej rezystancji pojedynczego złącza podłużnego od długości linii

Wpływ zwiększonej rezystancji pojedynczego złącza podłużnego (występującej jednocześnie w obydwu tokach toru) na wzrost prądów błądzących jest różny w liniach trakcyjnych o różnej długości. Zobrazowano to na rys. 8, odnosząc sumaryczną wartość prądów błądzących w punkcie o współrzędnej x_R (rys. 6) przy złączu o rezystancji $R = \sum I_b(R)$ do tejże wartości $-\sum I_b(R_d)$ w linii o prawidłowo wykonanych złączach, tzn. przy $R = R_d$.

4. WNIOSKI

1. Zastępcza siła elektromotoryczna E , jaką należy uwzględnić przy analizie rozkładu potencjałów i rozplywu prądu w szynach posiadających przerwę, zależna jest od parametrów torów, rodzaju obciążenia i wartości prądu oraz od miejsca wystąpienia przerwy w szynach.

2. Obecność przerwy w szynach, zwłaszcza na odcinku pomiędzy stacją zasilającą a punktem przyłożenia obciążenia, powoduje zmianę rozkładu potencjałów szyn; zmianie ulegają zarówno wartości potencjałów, jak i granice stref anodowej i katodowej szyn.

3. Wartość prądów błądzących zależy od rezystancji pojedynczego złącza podłużnego szyn. W praktyce jednak odczuwalnego wzrostu prądów błądzących należy się spodziewać dopiero przy ok. 100-krotnym wzroście rezystancji pojedynczego złącza podłużnego w stosunku do rezystancji złącza wykonane prawidłowo.

4. Wpływ zwiększonej rezystancji pojedynczego złącza podłużnego (w każdym toku) na wzrost prądów błądzących jest istotniejszy w liniach krótkich. Przy długości linii $l < 1$ km spodziewać się można kilkakrotnego wzrostu prądów błądzących; w liniach o długości $l > 10$ km prądy błądzące wzrosnąć mogą o kilka do kilkunastu procent.

LITERATURA

- [1] GAWOR P.: Badania źródeł prądów błądzących i ich wpływ na zagrożenia w kopalniach ROW. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1976.
- [2] PN-66/E-05024 Ochrona podziemnych urządzeń metalowych przed korozją powodowaną prądami błądzącymi.
- [3] STRIŻEWSKI I.W.: Teoria i rachunek drenażowej i katodowej zaszczycy magistralnych trzuboprowadów od korozji błądzącymi tokami. Moskwa 1963.

Wpłynęło do redakcji 29.V.1981 r.

Recenzent: doc. dr inż. Władysław Dziuba

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО РЕЛЬСОВОГО СТЫКА ЭЛЕКТРОТЯГИ
НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ БЛУДАЮЩИХ ТОКОВ

Р е з ю м е

Проведен теоретический анализ распределения потенциалов рельсов, а также токораспределения в рельсах электропроводной тяги в случае, когда отсутствует продольный стык в двух токах пути. Проведен теоретический анализ влияния сопротивления отдельного продольного стыка рельсов на возникновение блуждающих токов.

THE INFLUENCE OF RAIL BOND RESISTANCE OF ELECTRIC TRACTION
ON STRAY CURRENTS FORMATION

S u m m a r y

There has been carried out a theoretical analysis of rail potential distribution and current propagation in rails of electric traction in case when there is no rail bond in both rails. Also the influence of a single rail bond resistance on the formation of stray currents, has been analysed.

Roman KONIECZNY

Instytut Transportu Kolejowego
Politechniki Śląskiej

KRYTERIA OCENY JAKOŚCI WSPÓŁPRACY ODBIERAKA PRĄDU Z SIECIĄ TRAKCYJNĄ

Streszczenie: W artykule zestawiono stosowane kryteria oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną. Przeprowadzono analizę zaprezentowanych kryteriów oraz zaproponowano nowe zbiorcze kryterium oceny jakości współpracy tych układów.

Jednym z ważniejszych zagadnień technicznych w trakcji elektrycznej jest zapewnienie wysokiej jakości odbioru prądu przez pojazd trakcyjny. Jakość odbioru prądu uzależniona jest od jakości współpracy dynamicznej odbieraka prądu z siecią trakcyjną, tj. od warunków pracy zestyku ślizgowego, jaki tworzą wkładki ślizgacze odbieraka prądu z drutem jezdny sieci trakcyjnej. Warunki pracy zestyku odbierak - sieć uzależnione są od wartości odbieranego prądu, prędkości jazdy oraz szeregu innych czynników.

Ocena jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną może być przeprowadzona przy użyciu kilku metod badawczych, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- empiryczną (bazującą na pomiarach poligonowych),
- teoretyczną (bazującą na obliczeniach).

Empiryczne metody oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną bazują głównie na wynikach uzyskanych przy użyciu wagonu pomiarowego na liniach rzeczywistych, względnie na odcinkach doświadczalnych. Badane są między innymi następujące wielkości:

- czas przerw w styku pomiędzy wkładkami ślizgacza a drutem jezdny,
- przemieszczenie pionowe punktu styku ślizgacza z drutem jezdny,
- przemieszczenie pionowe ram odbieraka,
- siła stykowa między ślizgaczem a drutem jezdny.

Wielkości powyższe mogą być również wyznaczone drogą obliczeń teoretycznych, np. na modelach matematycznych, odwzorowujących sieć trakcyjną

i odbierak prądu jako układy drgające, opisane układem równań różniczkowych zwyczajnych.

Zarówno w metodach teoretycznych, jak i empirycznych stosowane są następujące kryteria oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną:

1. Wskaźnik ekonomiczny

Wskaźnikiem optymalnej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną może być minimum kosztów związanych ze współpracą obu układów. Koszty te mogą być wyrażone następującym wzorem [4]:

$$E^* = K_e(K_B + K_O) + (E_B + E_O), \quad (1)$$

gdzie:

- E^* - całkowite koszty poniesione na sieć trakcyjną i odbieraki prądu [jednostka pieniężna/rok];
- K_B, K_O - nakłady inwestycyjne na sieć trakcyjną i odbieraki prądu [jednostka pieniężna];
- K_e - współczynnik efektywności nakładów inwestycyjnych [1/rok];
- E_B, E_O - roczne wydatki eksploatacyjne na sieć trakcyjną i odbieraki prądu (wliczając odpisy amortyzacyjne) [jednostka pieniężna/rok].

Na E_B i E_O składają się między innymi koszty związane z wymianą zużytych materiałów stykowych. Zużycie materiałów stykowych przy przejściu odbieraka prądu odcinka 1 przęsła zawieszenia może być wyrażone wzorem [2]:

$$Z_m = \frac{L}{C} \sum j_i C_i, \quad (2)$$

gdzie:

- Z_m - sumaryczne zużycie materiałów stykowych [kg],
- j_i - poziom zużycia materiału [kg/m],
- C_i - liczba przypadków o zużyciu j_i ,
- C - całkowita liczba analizowanych przypadków,
- L - długość przęsła zawieszenia [m].

Innym wskaźnikiem ekonomicznym może być zużycie drutu jezdnego na odcinku 1 km, po przejściu 10 000 odbieraków prądu.

2. Współczynnik zmienności siły stykowej

Według pracy [4] współczynnik ten określony jest następującymi wzorami:

$$n_1 = \frac{F_{kmax}}{F_{st}} - 1 \quad \text{oraz} \quad n_2 = \frac{F_{kmin}}{F_{st}} - 1, \quad (3)$$

gdzie:

F_{kmax} i F_{kmin} - wartości ekstremalne siły stykowej w rozpatrywanym
przędzie zawieszenia,

F_{st} - siła statyczna odbieraka prądu.

Jakość współpracy odbieraka z siecią ocenia się jako zadowalającą, jeżeli $|n_1| \wedge |n_2| \leq 0,3 + 0,5$. Dla wyższych prędkości jazdy zalecane jest przyjmowanie mniejszych wartości n_1 i n_2 .

Według pracy [2] współczynnik zmienności siły stykowej może być określony wzorami:

$$n' = \frac{F_{kmax} - (F_{st} + F_a)}{F_{st} + F_a} \quad \text{oraz} \quad n'' = \frac{(F_{st} + F_a) - F_{kmin}}{F_{st} + F_a} \quad (4)$$

gdzie F_a - składowa siła aerodynamiczna nacisku odbieraka na sieć.

Jakość współpracy odbieraka z siecią ocenia się jako zadowalającą, gdy $|n'| \wedge |n''| \leq 0,5$.

Według pracy [3] współczynnik zmienności siły stykowej może być określony wzorem:

$$k_n = \frac{\sum F_{kmax_i}}{\sum F_{kmin_i}} \quad (5)$$

Indeksem i oznaczone są ekstrema tego samego typu w rozpatrywanym przędzie zawieszenia (lub na odcinku kilku przędzi).

Jakość współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest tym lepsza, im bardziej zbliżona jest do 1 wartość współczynnika k_n .

3. Składowa zmienna siły stykowej

Według pracy [4] składowa ta opisana jest wzorami:

$$Q_1 = F_{kmax} - F_{st} \quad \text{oraz} \quad Q_2 = F_{kmin} - F_{st} \quad (6)$$

Współpracę odbieraka z siecią można uznać jako zadowalającą, gdy:

$$|Q_1| \wedge |Q_2| \leq (0,3 + 0,5) F_{st}$$

Według pracy [2] składowa zmienna siły stykowej opisana jest następującymi wzorami:

$$Q'_1 = F_{kmax} - (F_{st} + F_a) \quad \text{oraz} \quad Q'_2 = (F_{st} + F_a) - F_{kmin} \quad (7)$$

Współpracę odbieraka z siecią można uznać jako zadowalającą, gdy:

$$|Q_1'| \wedge |Q_2'| \leq 0,3 (P_{st} + P_a)$$

4. Odchylenie średniokwadratowe siły stykowej

Odchylenie średniokwadratowe siły stykowej można obliczyć według wzoru [4]:

$$\epsilon_{sr}(P_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^C (P_{ki} - \sum_{i=1}^C P_{ki} \frac{C_i}{C})^2 \frac{C_i}{C}} \quad (8)$$

gdzie:

P_{ki} - wartość średnia siły stykowej w przedziale i ,

C_i - liczba przypadków o wartości P_{ki} ,

C - całkowita liczba analizowanych przypadków.

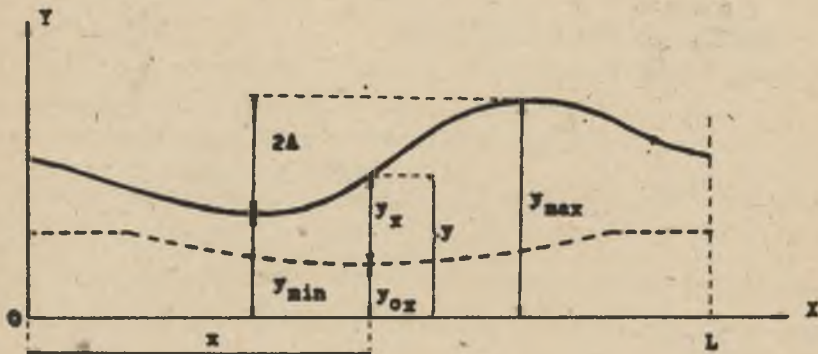
Jakość współpracy odbieraka z siecią jest tym lepsza, im mniejsze jest ϵ_{sr} .

5. Zakres pionowych przemieszczeń punktu styku

Zakres ten (tzw. podwójna amplituda) określony jest wyrażeniem [2,4]:

$$2A = y_{max} - y_{min} \quad (9)$$

gdzie y_{max} i y_{min} - wartości ekstremalne pionowego przemieszczenia punktu styku odbieraka prądu z siecią trakcyjną w rozpatrywanym prześle zawieszenia (rys. 1).



Rys. 1. Ilustracja graficzna kryteriów p.p. 5 i 6

Jakość współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest tym lepsza, im mniejszy jest zakres pionowych przemieszczeń punktu styku.

6. Uniesienie drutu jezdnego w wybranym punkcie

Uniesienie to można określić w oparciu o znajomość trajektorii punktu styku odbieraka prądu z siecią trakcyjną [4]:

$$y_x = y - y_{ox} \quad (10)$$

gdzie:

y - rzędna punktu styku w odległości x od konstrukcji wsporczej,
 y_{ox} - rzędna wybranego punktu w warunkach statycznych (rys. 1).

7. Współczynnik utraty styku

Współczynnik ten określony jest wzorem [2, 4]:

$$k_{od} = \frac{\sum t_{od}}{t} 100\% \quad (11)$$

gdzie:

$\sum t_{od}$ - suma czasów utraty styku ślizgacza odbieraka z drutem jezdnym na rozpatrywanym odcinku,
 t - czas przejścia odbieraka przez rozpatrywany odcinek.

Współpracę odbieraka prądu z siecią trakcyjną można uznać jako zadowalającą, jeżeli $k_{od} \leq 1,5\%$.

8. Kryterium SNCF [6]

Kryterium to stosowane jest na kolejach francuskich do oceny konstrukcji sieci trakcyjnej dla dużych prędkości jazdy. Podstawą kryterium są 4 współczynniki: uniesienia drutu jezdnego, zakresu pionowych przemieszczeń punktu styku, czasu trwania przerw stykowych oraz zmienności siły stykowej. Współczynnik wynikowy obliczany jest jako średnia arytmetyczna wymienionych współczynników.

9. Funkcja przenoszenia [5]

Kryterium to stosowane jest na kolejach brytyjskich do oceny konstrukcji odbieraków prądu dla dużych prędkości jazdy. Funkcja przenoszenia została zdefiniowana jako stosunek siły bezwładności odbieraka prądu do rzędnej ruchu pionowego jego górnego węzła. Im stosunek ten jest mniejszy, tym lepsza jest konstrukcja odbieraka.

Innym kryterium stosowanym na kolejach brytyjskich - podobnym do przedstawionego powyżej - jest impedancja mechaniczna [1], zdefiniowana jako stosunek sinusoidalnie zmiennej siły wymuszającej drgania układu mechanicznego do amplitudy tych drgań.

Dokonując analizy przedstawionych kryteriów oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną można zauważyć stosunkowo dużą ich różnorodność. Kryteria powyższe bazują na kilku wielkościach, z których najczęściej powtarzającą się jest siła stykowa.

Zasadniczą niedogodnością kryteriów opartych na wskaźnikach ekonomicznych jest ocena a posteriori jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną na podstawie zużycia materiałów stykowych (bez podania przyczyn tego zużycia) oraz poniesionych wydatków eksploatacyjnych. Kryterium oceny jakości, oparte na współczynniku utraty styku, jest szczególnie predystynowane dla badań eksperymentalnych, przeprowadzanych w warunkach liniowych. Przerwy styku określane są zwykle poprzez pomiar napięcia na odbieraku w warunkach bezprądowych.

Bazą wyjściową kryteriów z p.p. 2-7 jest trajektoria punktu styku odbieraka prądu z siecią trakcyjną oraz przebieg siły stykowej. Jedną kryteriów opartych na współczynnikach zmienności oraz składowej zmiennej siły stykowej, a także wysokości uniesienia drutu jezdnego w wybranym punkcie jest nieuwzględnienie ekstremów lokalnych, przez co dwa różne przebiegi mogą mieć ten sam współczynnik jakości. Mankamentu tego nie posiadają kryteria: k_n oraz $\xi_{sr}^*(F_k)$. Kryterium odchylenia średniokwadratowego siły stykowej w postaci (8) jest jednak niewygodne w stosowaniu, dlatego można go przedstawić w innej wersji:

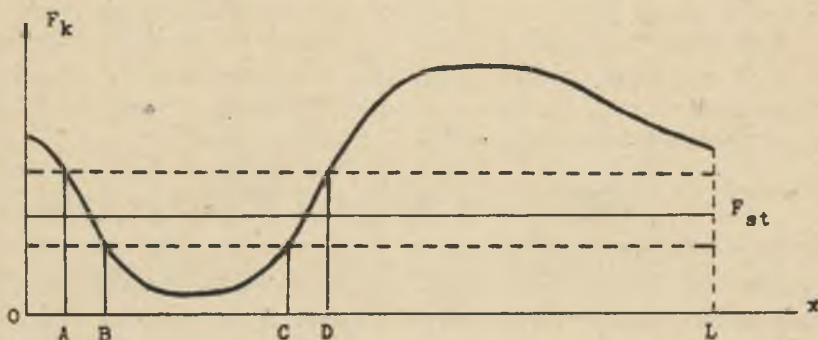
$$\xi_{sr}^*(F_k) = \sqrt{\frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} (F_k - F_{st})^2 dx}, \quad (12)$$

gdzie L_m oznacza długość rozpatrywanego odcinka sieci trakcyjnej.

Jakość współpracy odbieraka z siecią będzie tym lepsza, im bardziej zbliżona będzie do zera wartość współczynnika ξ_{sr}^* .

Według pracy [4], przy projektowaniu sieci trakcyjnych i odbieraków prądu zalecane jest posługiwanie się następującymi kryteriami oceny jakości: zakresu pionowego przemieszczenia punktu styku, poziomu uniesienia drutu jezdnego w wybranym punkcie oraz składową zmienną siły stykowej. Przeznaczeniem kryterium z p. 6 jest sprawdzenie, czy nie wystąpi niedopuszczalne uniesienie drutu jezdnego w wybranym punkcie, np. w pobliżu konstrukcji podporowej. Sytuacja taka w warunkach rzeczywistych doprowadzić może do uszkodzenia sieci trakcyjnej, a także odbieraka prądu.

Przeznaczeniem kryterium z p. 3 jest sprawdzenie, czy nie wystąpi przekroczenie dopuszczalnej wartości siły stykowej. Ponieważ brak w tej mierze oddzielnych norm, na kolejach radzieckich zalecane jest przyjmowanie do obliczeń orientacyjnego zakresu zmienności siły stykowej [4]: 40-200 N dla odbieraków "lekkich" z wkładkami węglowymi oraz 60-300 N dla odbieraków "ciężkich". Oczywiście, im bardziej wartość siły stykowej przewyższa wartość siły statycznej odbieraka, tym większe jest zużycie materiałów



Rys. 2. Przykładowy przebieg ilustrujący potrzebę stabilizacji siły stykowej

stykowych. Zagadnienie to zilustrowano na rys. 2, na którym linią przerywaną zaznaczono granice optymalnego zakresu zmienności siły stykowej, wynoszące 0,7 oraz 1,4 $\cdot F_{st}$. Jak widać na przykładowym przebiegu, długość odcinka, na którym siła stykowa przyjmuje wartości należące do tego zakresu, wynosi tylko ok. 12% długości przęsła zawieszenia (odcinki AB + CD). Wartość siły stykowej na odcinku BC jest niekorzystna ze względu na zwiększone prawdopodobieństwo utraty styku, natomiast na odcinkach pozostałych - ze względu na zwiększone zużycie materiałów stykowych. Celowe jest zatem w takim przypadku dążenie do stabilizacji siły stykowej na poziomie zbliżonym do F_{st} na całej długości przęsła.

Dokonując podsumowania powyższych rozważań można stwierdzić, że przedstawione kryteria oceny jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną - mimo stosunkowo dużej ich różnorodności - posiadają wspólną przeszyzną odniesienia, jaką są informacje zawarte w przebiegach: trajektorii punktu styku (y) oraz siły stykowej (F_k). Dwa najbardziej reprezentatywne kryteria: zmienności siły stykowej (n_1 i n_2) oraz zakresu pionowych przesłeszczeń punktu styku (2A) można połączyć w jedno zbiorcze kryterium w następujący sposób:

$$J^j = \sum_{i=1}^C \left| \frac{F_{kmax_i}}{F_{st}} - 1 \right| + \sum_{i=1}^C \left| \frac{F_{kmin_i}}{F_{st}} - 1 \right| + \frac{100}{L} \left(\sum_{i=1}^C |Y_{max_i}| + \sum_{i=1}^C |Y_{min_i}| \right) \quad (13)$$

gdzie:

J^j - współczynnik jakości współpracy odbieraka z siecią,

C - liczba ekstremów w rozpatrywanym przęsle zawieszenia.

Zaproponowane powyżej wyrażenie (13) ujmuje dwie najważniejsze wielkości (y oraz F_k), charakteryzujące współpracę odbieraka prądu z siecią trakcyjną, umożliwiając tym samym dokładną ocenę jakości odbioru prądu przez pojazd trakcyjny. Kryterium J' uwzględnia ewentualne ekstrema lokalne w przebiegach trajektorii punktu styku oraz siły stykowej.

W przypadku nieuwzględnienia ekstremów lokalnych, kryterium (13) można przedstawić w wersji uroszczonej:

$$J = \left| \frac{F_{kmax}}{F_{st}} - 1 \right| + \left| \frac{F_{kmin}}{F_{st}} - 1 \right| + \frac{100}{L} (|Y_{max}| + |Y_{min}|) \quad (14)$$

W przypadku gdy przedmiotem analizy są wyniki z kilku pręseł, należy dokonać uśrednienia wartości poszczególnych składników wyrażeń (13) i (14).

Kryteria J i J' nie są wersjami zamkniętymi i mogą być rozbudowane o dodatkowe składniki, jak np. poziom uniesienia drutu jezdnego w pobliżu konstrukcji wsporczej, odchylenie średniokwadratowe siły stykowej lub czas przerw stykowych.

Określenie największej dopuszczalnej wartości współczynnika jakości współpracy odbieraka z siecią jest łatwiejsze w przypadku kryterium J niż J' . Przyjmując optymalny zakres zmienności siły stykowej wg rys. 2 oraz zakładając, że przemieszczenie pionowe punktu styku zawarte będzie w granicach $\pm 5 \cdot 10^{-4} L$, można napisać:

$$\left. \begin{array}{l} 0,7 F_{st} \leq F_k \leq 1,4 F_{st} \\ - 0,0005 L \leq y \leq 0,0005 L \end{array} \right\} \rightarrow J_{opt} \leq 0,8 \quad (15)$$

Warunek (15) stanowi jednak bardzo wysokie wymaganie jakości i J jest trudny do spełnienia w ramach klasycznych rozwiązań konstrukcyjnych sieci trakcyjnych i odbieraków prądu. Wobec powyższego jakość współpracy odbieraka z siecią można uznać jako zadowalającą, jeżeli F_k oraz y zawarte będą w następujących granicach:

$$\left. \begin{array}{l} 0,7 F_{st} \leq F_k \leq 2,0 F_{st} \\ - 0,0005 L \leq y \leq 0,0015 L \end{array} \right\} \rightarrow J \leq 1,5 \quad (16)$$

Warunek (16) określono przy założeniu, że mniej niekorzystny dla współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest dodatkowy wzrost wartości maksymalnej siły stykowej z poziomu $1,4 F_{st}$ do $2,0 F_{st}$, niż zmniejszenie wartości minimalnej poniżej $0,7 F_{st}$.

Przyjmując, zarówno w obliczeniach teoretycznych, jak i w pomiarach poligonowych $J_{\text{dop}} = 1,5$, można określić V_{dop} - największą dopuszczalną prędkość jazdy, przy której współpraca rozpatrywanego układu odbierak - sieć jest jeszcze zadowalająca.

LITERATURA

- [1] BEADLE A.R., BETTS A.I., SMITH W.R.: Pantograph development for high speeds - Railway Engineer Journal 1975/11.
- [2] BELJAEV I.A., MICHEJEW W.P., SZIJAN W.A.: Tokosjem i tokopriemniki elektropodwiżnogo sostava. Wyd. "Transport", Moskwa 1976.
- [3] FIDRYCH Z.: Issledowanije wlijanja paramietrow kontaktnoj podwieski na kaczestwo tokosjema pri wysokich skorostjach dwiżenja, Praca doktorska. MIIT, Moskwa 1971.
- [4] FRAJFELD A.W.: Projektowanje kontaktnoj sieti. Wyd. "Transport", Moskwa 1978.
- [5] GRAZIANO M.C.: Pantographs for high-speed running - Railway Davision Journal 1971/ss. 374-406.
- [6] ROMAN Z.: Kryteria oceny konstrukcji sieci trakcyjnej do dużych prędkości jazdy stosowane na kolejach SNCF. Przegląd Kolejowy Elektrotechniczny, 1975/12.

Wpłynęło do redakcji 29.V.1981 r.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Przemysław Pazdro

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЕМНИКА
С КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКОЙ

Р е з ю м е

В статье составлены применяемые критерии оценки качества взаимодействия токоприемника с контактной подвеской. Проанализированы представленные критерии, а также предложен новый совместный критерий оценки качества взаимодействия этих систем.

CRITERIA OF QUALITY ESTIMATION OF CURRENT COLLECTOR
WITH THE OVERHEAD CONTACT SYSTEM COLLABORATION

S u m m a r y

In this article the applied criteria of estimation of quality dynamic collaboration with current collector with the overhead contact system has been compared. The analysis of presented criteria has been accomplished and the new collective criteria of estimation of collaboration quality of this system has been suggested.

Szymon CIURA

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

MODEL MATEMATYCZNY DO ANALIZY ZAGROŻENIA POŻAROWEGO KABLI PRACUJĄCYCH W TUNELACH KABLOWYCH

Streszczenie: W artykule zaproponowano model matematyczny do analizy zagrożenia pożarowego kabli elektroenergetycznych, pracujących w tunelach kablowych. Wykonano przykładowe obliczenia tego zagrożenia i przedstawiono możliwości praktycznego wykorzystania zaproponowanego modelu.

1. WPROWADZENIE

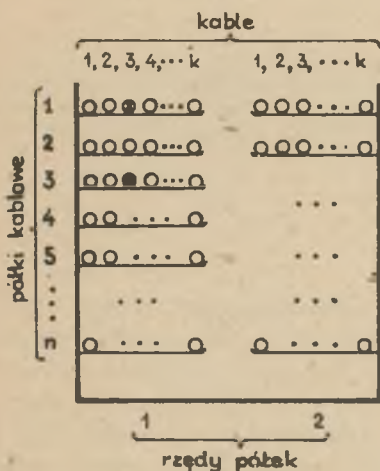
Przy ocenie ciągłości zasilania obiektów przemysłowych dużego znaczenia nabiera zagadnienie zagrożenia pożarowego kabli. Powszechne wprowadzenie do eksploatacji kabli i przewodów w izolacji i powłokach z polichlorku winylu i polietylenu spowodowało bowiem wzrost tego zagrożenia, zwłaszcza dla kabli układanych w zamkniętych tunelach kablowych [1, 3, 4]. Wymienione tworzywa zawierają związki węgla i wodoru, co powoduje wzrost ich palności, zależnie od wprowadzonych do ich struktury związków innych pierwiastków.

Wskutek niewyłączenia prądu zwarciovego lub znacznego przeciążenia kabla prądem roboczym temperatura kabla i jego otoczenia podnosi się. W warunkach działania podwyższonej temperatury następuje termiczny rozkład tworzywa, z którego zbudowana jest powłoka i izolacja kabla. W wyniku tego rozkładu następuje wydzielanie się chloru i wodoru. Szybki wzrost temperatury zamkniętej przestrzeni tunelu lub kanału kablowego powoduje, że rozkład termiczny ulega przyspieszeniu, rozkładowi ulegają również tworzywa kabli sąsiednich. Wydzielane są duże ilości wodoru, gaszące własności chloru są już niewystarczające i kable zaczynają się palić. Zamknięta przestrzeń tunelu lub kanału sprzyja szybkiemu nagraniu otoczenia do temperatury fazy płomieniowej, pożar obejmuje swym zasięgiem nowe, sąsiednie kable, spalające się tym szybciej, im bardziej zanieczyszczona jest ich powierzchnia [1, 3, 4]. Zagrożenie pożarowe kabli pracujących w

zamkniętych przestrzeniach zależy więc ściśle między innymi od sposobu ułożenia tych kabli, odległości pomiędzy nimi, liczby kabli i rodzaju ich warstwy zewnętrznej [14]. Poniżej przedstawiono próbę analitycznego określenia zagrożenia pożarowego kabli, którego źródłem są pożary pozostałych kabli, pracujących we wspólnym tunelu kablowym.

2. TEORETYCZNE PODSTAWY ANALIZY

Założmy, że w tunelu kablowym po obu jego stronach (w dwu rzędach) rozmieszczonych jest n półek kablowych, a na każdej z nich ułożonych jest k kabli wysokiego napięcia (rys. 1). Przyjmijmy, że u_2 uszkodzeń lub przeciążeń każdego z tych kabli prowadzi do jego zapalenia się. Po zapaleniu się jednego z kabli (na rys.



Rys. 1. Sposób rozmieszczenia kabli w tunelu kablowym:

- - kabel stanowiący źródło pożaru,
- ⊙ - kabel o analizowanym zagrożeniu pożarowym

jeśli na poszczególnych półkach kablowych umieszczone są azbestowe podkładki, na których układane są kable. W przypadku braku tych podkładek mogłoby bowiem dojść do wcześniejszego zapalenia się kabli z sąsiednich półek kablowych, niż sąsiednich kabli z tej samej półki, na której został zainicjowany pożar. W takim przypadku analiza stałaby się bardzo trudna i praktycznie niewykonalna, ale można by z całą pewnością stwierdzić, że zagrożenie pożarowe kabli wzrosłoby wielokrotnie.

1 - kable zaczerpionego), wskutek oddziaływania cieplnego lub bezpośrednio płomieniem, zapalają się od niego najbliższe kable, ułożone po obu jego stronach (na rys. 1 - kable 2 i 4). Od kabli tych zapalają się kolejne kable sąsiednie (1 i 5), aż pożar obejmie swym zasięgiem wszystkie kable na określonej półce kablowej. Z półki tej pożar podobnie przenosi się na półki sąsiednie - wg rys. 1 na półki 2 i 4, a następnie - na półki 1 i 5, na półkę 6 itd., aż zapalą się wszystkie kable, rozmieszczone na n półkach kablowych. Stąd pożar może rozprzestrzenić się na kable z sąsiedniego rzędu półek (wg rys. 1 - na kable z rzędu 2).

Powyższy mechanizm rozprzestrzeniania się pożarów można przyjąć,

Liczbę B_p pożarów dowolnego z kabli, powstałych wskutek zapalenia się w omówiony wyżej sposób pozostałych kabli z rozpatrywanego tunelu kablowego, można wyznaczyć z ogólnego wzoru

$$B_p = d \cdot u_z (b_k + u_p \cdot b_p + u_p' \cdot u_r' \cdot b_r) \left[\frac{1}{\text{rok}} \right], \quad (1)$$

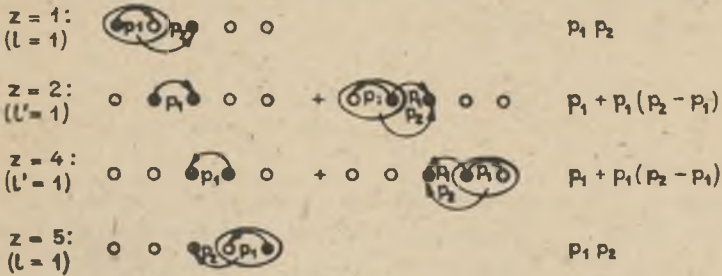
w którym¹⁾:

- d - intensywność uszkodzeń i przeciążeń, mogących stanowić przyczynę pożarów kabli, pracujących w tunelach kablowych, w linię · rok;
- u_z - udział uszkodzeń i przeciążeń kabli, powodujących ich zapalenie się;
- b_k - liczba pożarów kabla o analizowanym zagrożeniu pożarowym, powstałych wskutek oddziaływania pozostałych $k-1$ kabli, gdy każdy z nich był jeden raz źródłem pożaru;
- b_p - liczba pożarów kabla o analizowanym zagrożeniu pożarowym, powstałych wskutek oddziaływania palących się kabli na pozostałych $n-1$ półkach kablowych, pod warunkiem, że wszystkie kable na każdej z tych półek zapaliły się jeden raz;
- u_p - częstość występowania pożarów wszystkich k kabli, ułożonych na jednej z $n-1$ półek kablowych (wg rys. 1 - półki $2+n$), pod warunkiem, że każdy z tych kabli był jeden raz źródłem pożaru;
- u_p' - częstość występowania pożarów wszystkich k kabli, ułożonych na jednej z n półek kablowych w sąsiednim rzędzie półek (na rys. 1 - w rzędzie 2), pod warunkiem, że każdy z tych kabli był jeden raz źródłem pożaru;
- b_r - liczba pożarów kabla o analizowanym zagrożeniu pożarowym, powstałych wskutek zapalenia się jeden raz wszystkich $n \cdot k$ kabli z sąsiedniego rzędu półek kablowych (wg rys. 1 - kable z rzędu 2);
- u_r' - częstość występowania pożarów wszystkich $n \cdot k$ kabli sąsiedniego rzędu półek (oznaczenie j.w.) w przypadku, gdy k kabli na każdej z n tych półek zapaliło się jeden raz.

Liczbę b_k pożarów wyznacza się, rozpatrując wszystkie możliwe oddziaływania pomiędzy palącymi się kablami na określonej półce kablowej, zgodnie z przyjętym mechanizmem rozprzestrzeniania się pożaru. Wartość ta zależy od miejsca ułożenia kabla na półce (kable zewnętrzne lub leżące pomiędzy innymi kablami) oraz od liczby k kabli, umieszczonych na tej półce. Oznaczmy zatem przez $p_1, p_2, p_3, \dots, p_w$ prawdopodobieństwo zapalenia się sąsiedniego kabla od palących się odpowiednio 1, 2, 3, ... w kabli na określonej półce kablowej. Oznaczmy również przez $z=1, 2, \dots, m, \dots, k$ kolejne kab-

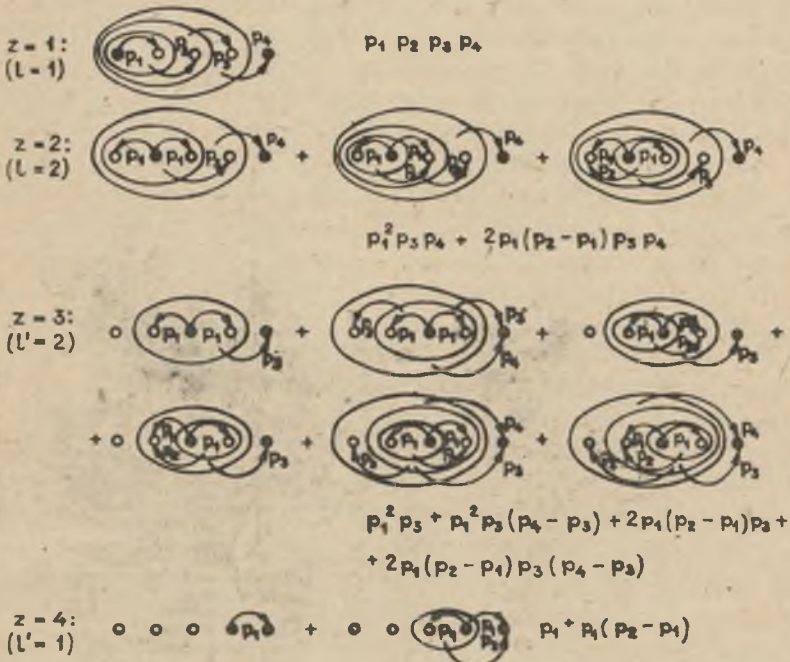
¹⁾ Dla lepszego zrozumienia definicji poszczególnych wielkości ze wzoru (1) poniżej przytacza się je w oparciu o rys. 1 (dla kabla oznaczonego krzyżykiem).

$k = 5, m = 3:$



$$b_k(3,5) = 4 p_1 p_2 + 2 P_1 - 2 P_1^2$$

$k = 5, m = 5:$



$$b_k(5,5) = b_k(1,5) = 5 p_1 p_2 p_3 p_4 + 2 P_1 P_2 P_3 + P_1 P_2 + P_1 + P_1^2 P_3^2 + - 2 P_1^2 P_3 P_4 - P_1^2 P_3 - P_1^2 - 2 P_1 P_2 P_3^2$$

Rys. 2. Sposób określenia liczby b_k pożarów dla $m=3$ i $m=5$ przy $k=5$ kabli. Na rysunku oznaczono: ●, ⊙ - jak na rys. 1, $\curvearrowright p_i$ - kierunek przenoszenia się pożaru z prawdopodobieństwem p_w , ○ - kolejne etapy rozwijania się pożaru

le, ułożone na tej samej półce i przeanalizujemy, jak na rys. 2, wszystkie możliwości zapalenia się m -tego kabla od pozostałych $k-1$ kabli, będących kolejno źródłem pożaru. Na podstawie tej analizy wynika ogólny wzór do wyznaczania liczby pożarów b_k m -tego kabla:

$$b_k(m, k) = \sum_z \left[2^{l-1} \left\{ 1 - \sum_{i=2}^{l \geq 2} \left[\frac{p_a}{p_{a+1}} \cdot \prod_{j=1}^{l \geq 2} \left(1 - \frac{p_b}{2p_{b+1}} \right) \right] \right\} \left(\prod_{w=1}^{m-1} p_w \right) + \right. \\ \left. + 2^{l'-1} (1 - p_c + p_{c+1}) \left\{ 1 - \sum_{i=2}^{l' \geq 2} \left[\frac{p_a}{p_{a+1}} \cdot \prod_{j=1}^{l' \geq 2} \left(1 - \frac{p_b}{2p_{b+1}} \right) \right] \right\} \left(\prod_{w=1}^c p_w \right) \right], \quad (2)$$

$$l = z \wedge z < \frac{m}{2} \quad \text{oraz} \quad l = k-z+1 \wedge z > \frac{k+m}{2},$$

$$l' = m-z \wedge \frac{m}{2} < z \leq m-1 \quad \text{oraz} \quad l' = z-m \wedge \frac{k+m}{2} > z > m,$$

$$a = 2i-3,$$

$$b = 2j-1,$$

$$c = 2l'-1,$$

$$\frac{p_b}{p_{b+1}} = 1 \wedge b > 1 \quad \text{oraz} \quad \frac{p_b}{p_{b+1}} = 1 \wedge b > l'.$$

Wartość prawdopodobieństwa p_w zależy między innymi od tzw. obciążenia ogniowego trasy i rośnie wraz ze wzrostem liczby kabli, objętych pożarem [14]. Jeśli przyjąć zaproponowany w pracy [5] wykładniczy model "siły" pożaru, wartość tę można określić jako

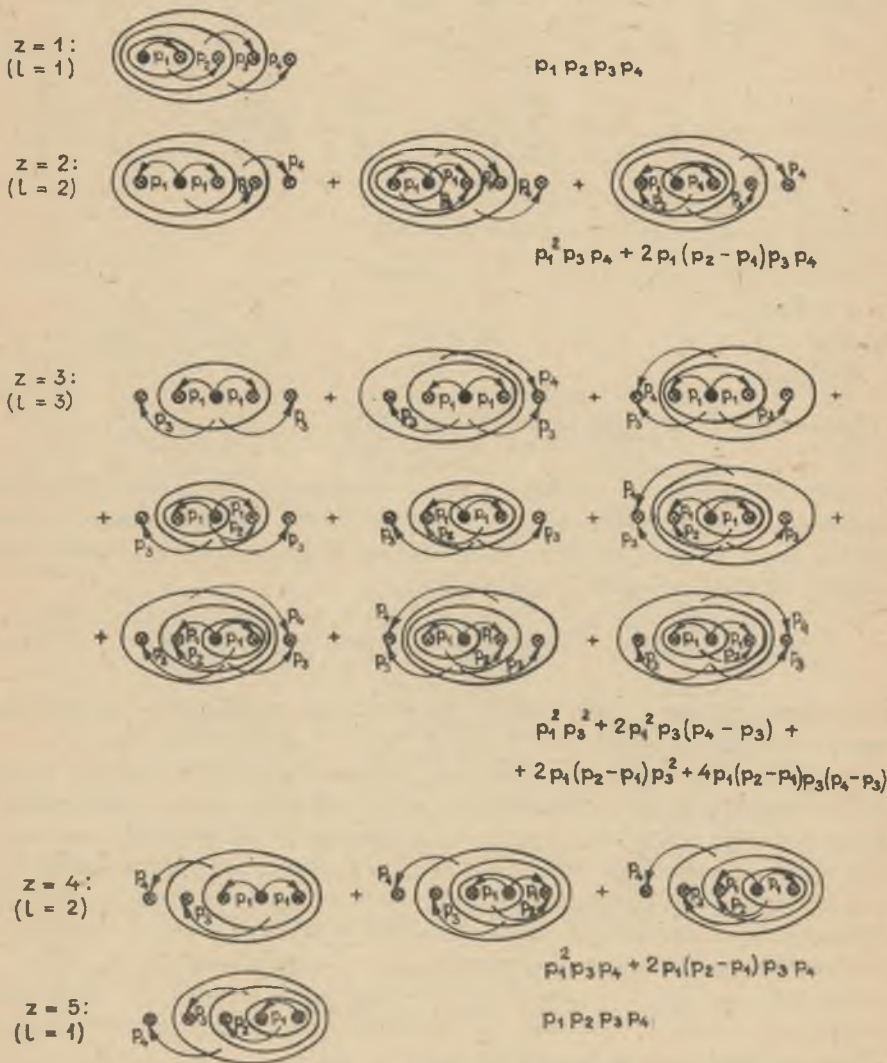
$$p_w = \exp(w \cdot \lambda_w) - 1, \quad (3)$$

przy czym wartość p_w jest ograniczona od góry, zatem jeśli $\exp(w \cdot \lambda_w) > 2$, należy przyjmować $p_w = 1$.

We wzorze (3) λ_w jest parametrem o charakterze intensywności inicjacji pożaru, zależnym między innymi od rodzaju kabli i ich podatności na zapalenie się, a dla kolejnych etapów rozprzestrzeniania się pożarów - odpowiednio od wzajemnej odległości kabli na półce, odległości pomiędzy poszczególnymi półkami kablowymi, odległości pomiędzy rzędami półek oraz zastosowanej w każdym przypadku izolacji przeciwogniowej.

Częstość warunkowa u_1 i u'_1 występowania pożarów wszystkich kabli na półce kablowej zależy tylko od liczby tych kabli i można ją określić podobnie jak liczbę b_k pożarów, co zobrazowano na rys. 3. Dla k kabli na półce otrzymuje się zatem ogólny wzór:

$k = 5$:



$$u_p(5) = 10 P_1 P_2 P_3 P_4 + P_1^2 P_3^2 - 4 P_1^2 P_3 P_4 - 2 P_1 P_2 P_3^2$$

Rys. 3. Sposób określenia częstości u_p powstawania pożaru $k=5$ kabli. Przyjęto oznaczenia jak na rys. 2

$$u_j(k) = \left(\prod_{w=1}^{k-1} p_w \right) \sum_{z=1}^k \left[2^{z-1} \left\{ 1 - \sum_{i=2}^{z-1} \left[\frac{2^a}{2^{a+1}} \cdot \prod_{j=1}^{z-1} \left(1 - \frac{2^b}{2^{b+1}} \right) \right] \right\} \right], \quad (4)$$

$$l = z \wedge z \leq \frac{k}{2} \quad \text{oraz} \quad l = k - z + 1 \wedge z > \frac{k}{2},$$

$$a = 2i - 3$$

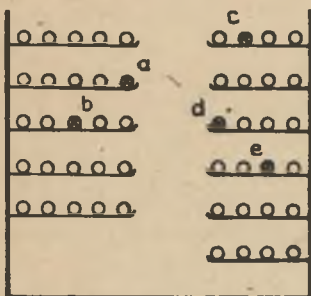
$$b = 2j - 1,$$

$$\frac{2^b}{2^{b+1}} = 1 \wedge b > 1.$$

Podobnie też można wyznaczyć częstość występowania pożarów u'_r kabli na wszystkich póżkach kablowych, zastępując we wzorze (4) liczbę k kabli liczbą n póżek kablowych. Prawdopodobieństwa p_w związane zatem będą wtedy z $k, 2k, 3k, \dots, wk$, palącymi się kablami (w oznacza tutaj liczbę póżek objętych pożarem). Na podstawie wzoru (2) można zaś, przy powyższym założeniu, wyznaczyć liczbę pożarów $b_j(m, n)$ wszystkich kabli, umieszczonych na m -tej póżce kablowej ($z=1, 2, \dots, m, \dots, n$ określa teraz numer póżki). Wzór (2) umożliwia również określenie liczby pożarów $b_r(m, r)$, a wtedy z określa numer rzędu r póżek kablowych. Zwykle w tunelu kablowym znajdują się $r=2$ rzędy póżek kablowych, jednak często liczba tych póżek nie jest jednakowa dla obu rzędów, podobnie też różna jest liczba kabli na poszczególnych póżkach. W takim przypadku dokładne wyznaczenie liczby pożarów b_j oraz częstości u'_r możliwe byłoby w sposób przedstawiony na rys. 2 i rys. 3, przy czym poszczególne wartości prawdopodobieństwa p_w wynikałyby tu z rzeczywistej liczby palących się kabli. Jeśli zaś wartości prawdopodobieństwa p_w określić na podstawie przeciętnej liczby k kabli na póżkach, wartości b_j i u'_r można wyznaczyć z niewielkim, kilkuprocentowym błędem, korzystając bezpośrednio ze wzorów (2) i (4). Przy niejednakowej liczbie kabli na poszczególnych póżkach kablowych częstości u_j i u'_r należałoby wyznaczyć na podstawie wzoru (4) w oparciu o rzeczywiste liczby k kabli na tych póżkach, a do wzoru (1) wstawić średnie ważone wartości tych częstości.

3. PRZYKŁAD OBLICZENIA ZAGROŻENIA POŻAROWEGO KABLI

Założmy, że w tunelu kablowym znajdują się 2 rzędy póżek kablowych, na których kable rozmieszczone tak jak na rys. 4.



Rys. 4. Rozmieszczenie kabli w rozpatrywanym tunelu kablowym

Założmy również, że:

- $\lambda_w = 0,173$ dla kabli ułożonych na wspólnej półce kablowej ($p_w = 1$ dla $w \geq 4$ kabli)¹⁾;
- $\lambda'_w = 0,058$ dla kabli z sąsiednich półek kablowych ($p'_w = 1$ dla $w \geq 12$ kabli);
- $\lambda''_w = 0,028$ dla kabli z sąsiedniego rzędu półek kablowych ($p''_w = 1$ dla $w \geq 25$ kabli);
- analizę zagrożenia pożarowego przeprowadzimy dla kabli a + e z rys. 4.

Dla kabla a otrzymuje się zatem:

$$b_k(1,5) = b_k(5,5) = 5p_1p_2p_3p_4 + 2p_1p_2p_3 + p_1p_2 + p_1 + p_1^2p_3^2 - 2p_1^2p_3p_4 + - p_1^2p_3 - p_1^2 - 2p_1p_2p_3^2 = 0,48,$$

$$u_p(5) = 10p_1p_2p_3p_4 + p_1^2p_3^2 - 4p_1^2p_3p_4 - 2p_1p_2p_3^2 = 0,38,$$

$$u'_p(4) = 6p_1p_2p_3 - 2p_1^2p_3 = 0,27,$$

$$b_p(2,5) = 3p_1^2p_2^2p_3^2 + p_1^2p_2^2 + 2p_1 - (p_1^2)^2p_3 - (p_1^2)^2 = 1,49,$$

$$u''_p(6) = 14p_1^2p_2^2p_3^2p_4^2p_5^2 + 2(p_1^2)^2(p_3^2)^2p_5^2 - 6(p_1^2)^2p_3^2p_4^2p_5^2 - 4p_1^2p_2^2(p_3^2)^2p_5^2 = 1,26,$$

$$b_r(1,2) = p_1^2 = 0,96.$$

Względny wzrost zagrożenia pożarowego ΔB_p tego kabla (w porównaniu z przypadkiem braku oddziaływania innych kabli) równy jest zatem

$$\Delta B_p = 0,48 + 0,38 \cdot 1,49 + 0,27 \cdot 1,26 \cdot 0,96 = 1,37.$$

Dla kabla b otrzymuje się natomiast:

$$b_k(3,5) = 4p_1p_2 + 2p_1 - 2p_1^2 = 0,62,$$

$$u_p(5) = 0,38,$$

¹⁾Wartość λ_w wynika ze wzoru (3), gdy $p_w = 1$ i $w = 4$. Przyjęta wartość w oznacza najmniejszą liczbę kabli, palących się już z taką "siłą", że zapali się od nich każdy następny kabel, ułożony na tej samej półce kablowej. Podobnie wyznaczono wartości λ'_w i λ''_w .

$$u'_p(4) = 0,27,$$

$$b'_o(3,5) = 4p'_1p'_2 + 2p'_1 - 2(p'_1)^2 = 1,49,$$

$$u'_r(6) = 1,26,$$

$$b'_r(1,2) = 0,96,$$

$$\Delta B_p = 0,62 + 0,38 \cdot 1,49 + 0,27 \cdot 1,26 \cdot 0,96 = 1,51.$$

Analogiczne obliczenia dla kabla c dają rezultat:

$$b'_k(2,4) = b'_k(3,4) = 2p_1p_2 + 2p_1 - p_1^2 = 0,50,$$

$$u'_p(4) = 0,27,$$

$$u'_o(5) = 0,38,$$

$$\begin{aligned} b'_p(1,6) &= 7p'_1p'_2p'_3p'_4p'_5 + 2p'_1p'_2p'_3p'_4 + 2p'_1p'_2p'_3 + p'_1p'_2 + p'_1 + \\ &- 3(p'_1)^2p'_3p'_4p'_5 - 2p'_1p'_2(p'_3)^2p'_5 - (p'_1)^2p'_3p'_4 + \\ &- 2p'_1p'_2(p'_3)^2 - (p'_1)^2p'_3 - (p'_1)^2 + (p'_1)^2(p'_3)^2p'_5 + \\ &+ (p'_1)^2(p'_3)^2 = 1,21, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u'_r(5) &= 10p'_1p'_2p'_3p'_4 + (p'_1)^2(p'_3)^2 - 4(p'_1)^2p'_3p'_4 - 2p'_1p'_2(p'_3)^2 = \\ &= 1,76, \end{aligned}$$

$$b'_r(2,2) = p_1^2 = 1,00,$$

$$\Delta B_o = 0,50 + 0,27 \cdot 1,21 + 0,38 \cdot 1,76 \cdot 1,00 = 1,50.$$

Podobnie dla kabla d otrzymuje się

$$\Delta B_p = 0,37 + 0,27 \cdot 1,23 + 0,38 \cdot 1,76 \cdot 1,00 = 1,37,$$

a dla kabla e

$$\Delta B_p = 0,50 + 0,27 \cdot 1,23 + 0,38 \cdot 1,76 \cdot 1,00 = 1,50.$$

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone obliczenia zagrożenia pożarowego kabli pracujących w tunelu kablowym wykazują, że zagrożenie to, przy dokonanych założeniach, jest ok. 2,5-krotnie większe niż w przypadku braku oddziaływań pomiędzy kablami. Zagrożenie pożarowe rośnie wraz ze wzrostem liczby kabli, ułożonych na wspólnej półce kablowej oraz ze wzrostem liczby półek rozmieszczonych we wspólnym rzędzie, przy czym większy wpływ na wzrost zagrożenia ma położenie kabla na określonej półce (numer kabla), niż położenie tej półki w rzędzie półek. Wnioski te, przy innych założeniach co do wartości pa-

parametrów λ_w , λ'_w i λ''_w (a stąd - prawdopodobieństwa p_w , p'_w i p''_w), mogą być jednak inne.

Zaproponowany model matematyczny do analizy zagrożenia pożarowego kabli elektroenergetycznych może być użyteczny praktycznie na etapie projektowania tuneli kablowych i rozmieszczania w nich tych kabli, a zwłaszcza kabli zasilających ważne odbiory. W tym celu niezbędne są jednak odpowiednie badania laboratoryjne celem statycznego oszacowania wartości prawdopodobieństwa p_w , p'_w i p''_w dla różnych typów kabli, różnych odległości pomiędzy rzędami półek, półkami oraz kablami na tych półkach, oraz zastosowanych środków ochronnych.

Innym zagadnieniem jest zagrożenie pożarowe kabli wskutek wystąpienia przyczyn zewnętrznych (np. zapalenie się nagromadzonych palnych zanieczyszczeń i śmieci [4], przedostanie się do tunelu kablowego otwartego ognia itp.), mogących spowodować jednoczesne zapalenie się wielu, a nawet wszystkich kabli w tunelu kablowym. Tak powstające pożary mogą mieć miejsce wielokrotnie częściej niż pożary rozprzestrzeniające się wg przyjętego mechanizmu. Opracowany model matematyczny nie ujmuje takich przypadków, aczkolwiek zdarzają się one w przemysłowych sieciach rozdzielczych o dużej liczbie kabli w tunelach.

LITERATURA

- [1] FELCZYŃSKI W.: Wybór rodzaju tras kablowych z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego i walorów techniczno-ekonomicznych. Energetyka nr 9, 1976.
- [2] FELCZYŃSKI W.: Podstawowa ochrona przeciwpożarowa tras kablowych. Energetyka nr 11, 1976.
- [3] KAZUBSKI M.: Zagrożenie pożarowe wynikające ze stosowania izolacji i powłok z polichlorku winylu. Informator projektanta nr 3, 1975, Elektroprojekt, Warszawa.
- [4] MURASZKO O.: Pożary kabli i przewodów w izolacji z plastyfikowanego polichlorku winylu. Informator projektanta nr 3, 1975, Elektroprojekt, Warszawa.
- [5] Praca zbiorowa (niepublikowana): Zagadnienie wyboru optymalnych warunków pracy układów elektroenergetycznych Huty Katowice w stanach normalnych i awaryjnych. IEISU Gliwice, 1978, 1979.

Wpłynęło do redakcji 16.IV.1981 r.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ КАБЕЛЕЙ,
РАБОТАЮЩИХ В КАБЕЛЬНЫХ ТУНЕЛЯХ

Р е з ю м е

В статье предложена математическая модель для анализа пожарной опасности электроэнергетических кабелей, работающих в кабельных туннелях. Выполнены примерные расчеты этой опасности и представлены возможности практического использования предложенной модели.

A MATHEMATICAL MODEL FOR ANALYSING FIRE HAZARDS
OF CABLES LAID IN A CABLE CHANNEL

S u m m a r y

The paper suggests a mathematical model for analysing fire hazard of electrical cables operating in cable channels. An exemplary calculation of such a hazard was made. The practical possibilities of utilizing the suggested model were presented.

Franciszek BUCHTA

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

O EFEKTYWNOŚCI SYGNALIZATORÓW ZWARĆ W SIECIACH KABLOWYCH ŚREDNICH NAPIĘĆ

Streszczenie: Przedstawiono propozycję metody badania efektywności sygnalizatorów zwarć w krajowych sieciach kablowych średnich napięć. W metodzie uwzględniono losowość procesu odnowy powaryjnej oraz narastanie obciążeń stacji śn/nn. Przeprowadzono analizę dla przypadku lokalnej sygnalizacji zwarć. Podano ogólne wnioski.

1. WSTĘP

Celowość stosowania sygnalizatorów zwarć w krajowych sieciach kablowych średnich napięć wynika z potrzeby obniżenia niedostarczonej odbiorcom energii elektrycznej. Zagadnienie ważne jest zarówno w odniesieniu do układów istniejących, jak i projektowanych. W tym ostatnim przypadku zastosowanie sygnalizatorów może mieć wpływ na ustalenie optymalnej liczby stacji śn/nn zasilanych z półpętli (obecnie barierą ograniczającą wzrost liczby stacji śn/nn w półpętli jest obniżenie ciągłości zasilania odbiorców, wynikające głównie z trudności lokalizacji uszkodzeń [2]).

Propozycję rozwiązania konstrukcyjnego sygnalizatora zwarć dla sieci kablowych średnich napięć przedstawiono w pracy [1]. Wstępny kosztorys sygnalizatorów wskazuje, że koszt jest zbyt duży, aby można ekonomicznie efektywność ich stosowania przyjąć za oczywistą. Konieczne zatem staje się opracowanie praktycznej metody badania efektywności stosowania sygnalizatorów zwarć, która powinna określić graniczny koszt przy określonej trwałości sygnalizatora oraz sposób rozmieszczenia w sieci.

2. METODA BADAŃ

Niedostarczona energia ΔA , wynikająca z uszkodzeń w sieciach kablowych śn, zależy od wielu zmiennych. Na podstawie wstępnego rozeznania zmienne

te podzielono, dla danego sposobu prowadzenia lokalizacji, na dwie grupy. Do pierwszej grupy zaliczono zmienne sterujące procesu lokalizacji. Są to:

- n - liczba stacji śn/nn w pólpetli,
- l - średnia w pólpetli długość linii śn między stacjami, km,
- λ - średnioroczna intensywność uszkodzeń linii $\frac{1}{100 \text{ km, rok}}$.

Wśród powyższych zmiennych nie ma mocy stacji śn/nn z uwagi na to, że jej wpływ na niedostarczoną energię jest łatwy do określenia w inny sposób, natomiast uwzględnienie mocy znacznie skomplikowałoby obliczenia.

Do drugiej grupy zaliczono zmienne zakłócające proces lokalizacji uszkodzeń. Są to zmienne [8]:

- v_p - przeciętna prędkość przejazdu brygady pogotowia energetycznego w ruchu miejskim, $\frac{\text{km}}{\text{h}}$,
- t_{λ} - czas trwania łączenia próbnego, min. W jego skład wchodzi: czas potrzebny na wyjście z samochodu, wejście do stacji, stwierdzenie braku napięcia, dwie rozmowy z dyspozytorem, nawiązanie łączności przez dyspozytora z obsługą GPZ, otwarcie i zamknięcie łącznika, załączenie linii wyłącznikiem, wyjście ze stacji, wejście do samochodu,
- t_o - czas otwierania (zamykania) łącznika w stanie beznapięciowym, min. Czas ten jest krótszy od czasu t_{λ} o czas nawiązania połączenia radiowego z dyspozytorem i czas otwarcia łącznika,
- t'_{λ}, t'_o - podobnie jak t_{λ} i t_o , jeśli brygada znajduje się już wewnątrz stacji, min,
- t_s - czas sprawdzenia stanu sygnalizatora, min.

W zależności od przyjętego sposobu prowadzenia lokalizacji, oprócz wymienionych zmiennych zakłócających mogą istnieć jeszcze inne.

W analizie efektywności interesująca jest różnica niedostarczonej energii w procesie lokalizacji w sieci bez sygnalizatorów i z sygnalizatorami. Prowadzenie badań statystycznych w sieci rzeczywistej jest z wielu powodów niemożliwe, jednak różnicę tę można wyznaczyć na drodze badań modelowych, korzystając z symulacji procesu odnowy powaryjnej w układzie dyspozytor - przyroda (zasada takiej symulacji omówiona jest w pracach [7, 8]). Zastosowanie symulacji możliwe jest dzięki uwzględnieniu w ocenach ΔA istniejących zakłóceń.

Wybór punktów, w których przeprowadza się symulację procesu odnowy powaryjnej, tzn. wybór kombinacji określonych poziomów zmiennych sterujących należy do teorii statystycznego planowania doświadczeń [3, 5]. Stosowanie metod tej teorii wpływa na znaczne obniżenie liczby koniecznych do wykonania symulacji.

Korzystając z powyższych metod oraz stosując analizę regresji, można wartość oczekiwaną różnicy, przypadającą na jedno uszkodzenie, przedstawić ogólnie w postaci wielomianu

$$\Delta A' = P(\beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 l + \beta_3 \lambda + \beta_{11} n^2 + \beta_{22} l^2 + \beta_{33} \lambda^2 + \beta_{12} nl + \beta_{13} n\lambda + \beta_{23} l\lambda + \beta_{123} nl\lambda + \dots) \text{ [kW}\cdot\text{h]} \quad (1)$$

gdzie:

P - przeciętna w ciągu roku moc wyłączona na skutek powstania uszkodzenia dla jednej stacji śn/nn, stała w pólpetli, kW,

β - współczynnik regresji.

Określenie stopnia wielomianu (1) oraz istotnych współczynników regresji należy do analizy wariancji [3, 5].

Roczny zysk w zł, wynikający ze stosowania sygnalizatorów, można wyznaczyć jako

$$K_{\Delta A'} = \Delta A' k_{\Delta A}, \text{ [zł]} \quad (2)$$

gdzie $k_{\Delta A}$ - jednostkowy koszt niedostarczonej energii, $\frac{\text{zł}}{\text{kW}\cdot\text{h}}$.

Uwzględniając narastanie obciążeń stacji koszt ten w roku t można obliczyć następująco

$$K_{\Delta A'}(t) = (1+q)^t \Delta A' k_{\Delta A}, \text{ [zł]} \quad (3)$$

gdzie q - przyrost roczny zużycia powierzchniowego energii.

Podstawą do ilościowej oceny zysku (3) jest suma zdyskontowanych na rok zerowy zysków rocznych

$$\sum_{t=0}^T K_{\Delta A'}(t) d^{-t} = K^d, \quad (4)$$

gdzie:

T - trwałość sygnalizatorów, lata,

$d=(1+p)$ - stopa dyskonta (p jest stopą rozszerzeniową, obecnie przyjmuje się dla całej gospodarki $p=0,08$).

Kryterium ekonomicznej efektywności stosowania sygnalizatorów jest następujące:

$$K_S^d(n) < K_{\min}^d(n) \Rightarrow \text{zastosowanie sygnalizatorów we wszystkich } n \text{ stacjach jest ekonomicznie uzasadnione,} \quad (5)$$

$$K_S^d(n) > K_{\max}^d(n) \Rightarrow \text{zastosowanie sygnalizatorów we wszystkich } n \text{ stacjach jest ekonomicznie nieuzasadnione,}$$

gdzie:

$K_B^d(n)$ - koszt inwestycyjny powiększony o zdyskontowany na rok zerowy koszt eksploatacyjny sygnalizatorów zastosowanych we wszystkich n stacjach, zł,

$$K_{\min}^d(n) = k^d(P_0, n, l_{\min}, \lambda_{\min}),$$

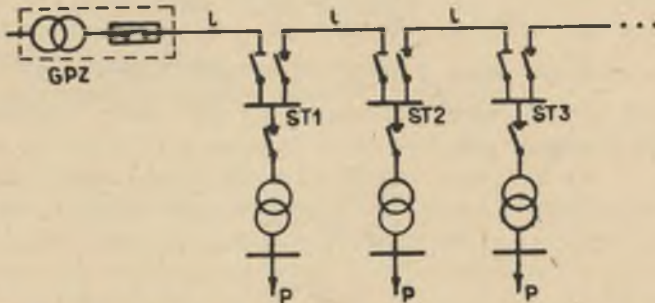
$K_{\max}^d(n) = K^d(P_0, n, l_{\max}, \lambda_{\max})$ - minimalny oraz maksymalny zysk zdyskontowany na rok zerowy.

Jeśli $K_{\min}^d(n) \leq K_B^d(n) \leq K_{\max}^d(n)$ należy wtedy obliczyć zysk zdyskontowany (4) dla konkretnej sieci, w której planuje się zastosowanie sygnalizatorów.

3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METODY

Z a ł o ż e n i a

a. Symulacja procesu lokalizacji uszkodzeń wykonywana jest w sieci przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Schemat analizowanej półpętli kablowej śn

- b. Lokalizacja uszkodzeń prowadzona jest wg optymalnej strategii ze względu na niedostarczoną energię (równoważna jej jest strategia maksymalnej informacji [9]).
- c. Lokalizacja uszkodzeń bez użycia sygnalizatorów prowadzona jest metodą łączy próbnych, bez ograniczenia liczby tych łączy.
- d. Sygnalizacja przepływu prądu zwarcioowego dokonywana jest lokalnie (sygnał nie jest przesyłany do RDR). Zakłada się, że sygnał jest wyprowadzony na sewnątrz stacji śn/nn.
- e. Sygnalizatory reagują na wszystkie rodzaje zwarć.

- f. Brygada objazdowa dokonująca łączeń w GPZ dostępna jest bez opóźnień.
- g. Poziomy, dolny i górny, zmiennych sterujących procesu lokalizacji podano w tabl. 1. W tabelicy podano także przedziały dla zmiennych zakłócających.

Tablica 1

Przedziały zmienności poszczególnych zmiennych

Zmienna	n	l	λ	v_p	t_z	t_o	t'_z	t'_o	t_s
	-	km	$\frac{100 \text{ km, rok}}{h}$	$\frac{\text{km}}{h}$	min	min	min	min	min
Poziom dolny	4	0,3	20	10	4	2	2,5	0,3	0,2
Poziom górny	10	0,5	30	20	6	3	3,5	0,7	0,8

- h. Prawdopodobieństwa warunkowe wystąpienia uszkodzenia linii kablowej w poszczególnych porach doby lub roku przedstawiono w tabelicy 2 [6].

Tablica 2

Prawdopodobieństwa warunkowe wystąpienia uszkodzenia linii kablowej w poszczególnych porach

a) doby

b) roku

Godzina	Prawdopodobieństwo
0 - 5	0,1
6 - 7	0,2
8 - 14	0,4
15 - 21	0,2
22 - 23	0,1

Miesiąc	Prawdopodobieństwo
I - II	0,25
III - VI	0,39
VII - XII	0,36

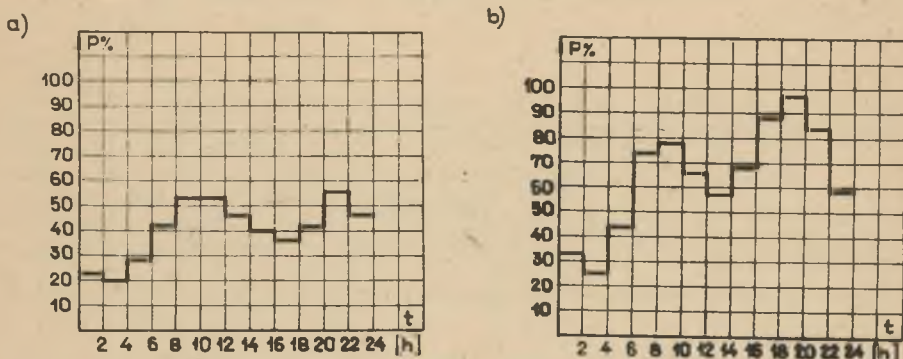
- i. Obciążenie stacji śn/nn w lecie i zimie przedstawiono na rys. 2.

Wykresy wykonano w oparciu o pracę [4]. Zakładano stałość wykresów w każdym roku.

- j. Obciążenie stacji śn/nn w jesieni oraz na wiosnę przyjęto jako średnie z obciążenia w lecie i zimie.

k. Przyrost roczny zużycia powierzchniowego energii $q = 8\%$.

l. Jednostkowy koszt niedostarczonej energii $k_{\Delta A} = 25 \frac{\text{zł}}{\text{kW}\cdot\text{h}}$.



Rys. 2. Typowe wykresy obciążenia odbiorców miejskich a) w lecie; b) w zimie

($P\%$ = 100% odpowiada obciążeniu szczytowemu stacji śn/nn)

W y n i k i

Wykonanie wstępnej analizy dało podstawę do tego, aby sądzić, że niedostarczona energia $\Delta A'$ zależy nie tylko wprost od zmiennych n , l , λ , ale również od ich drugich potęg (wielomian (1) stopnia drugiego). Wykonano zatem kompozycyjne planowanie ortogonalne drugiego rzędu [3, 5]. Planowanie to dla zmiennych standaryzowanych (przyjmujących na granicznych swych poziomach wartości +1 i -1) przedstawiono w tabelicy 3.

Tabela 3

Kompozycyjne planowanie ortogonalne drugiego rzędu

x_0	n_s	l_s	λ_s	$n_s^2 -$ -0,72	$l_s^2 -$ -0,72	$\lambda_s^2 -$ -0,72	$n_s l_s$	$n_s \lambda_s$	$l_s \lambda_s$	$\overline{\Delta A'}$ [kW·h]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
+1	+1	+1	+1	0,28	0,28	0,28	+1	+1	+1	3,10 P
+1	+1	+1	-1	0,28	0,28	0,28	+1	-1	-1	2,07 P
+1	+1	-1	+1	0,28	0,28	0,28	-1	+1	-1	1,86 P
+1	+1	-1	-1	0,28	0,28	0,28	-1	-1	+1	1,24 P
+1	-1	+1	+1	0,28	0,28	0,28	-1	-1	+1	0,25 P
+1	-1	+1	-1	0,28	0,28	0,28	-1	+1	-1	0,16 P
+1	-1	-1	+1	0,28	0,28	0,28	+1	-1	-1	0,15 P
+1	-1	-1	-1	0,28	0,28	0,28	+1	+1	+1	0,10 P
+1	-1,215	0	0	+0,72	-0,72	-0,72	0	0	0	0,07 P
+1	+1,215	0	0	+0,72	-0,72	-0,72	0	0	0	2,78 P
+1	0	-1,215	0	-0,72	+0,72	-0,72	0	0	0	0,57 P
+1	0	+1,215	0	-0,72	+0,72	-0,72	0	0	0	1,07 P

cd. tablicy 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
+1	0	0	-1,215	-0,72	-0,72	+0,72	0	0	0	0,62 P
+1	0	0	+1,215	-0,72	-0,72	+0,72	0	0	0	1,02 P
+1	0	0	0	-0,72	-0,72	-0,72	0	0	0	0,82 P

¹⁾ Jeśli P w kW

n_B, l_B, λ_B - zmienne standaryzowane [3,5],

x_0 - zmienna fikcyjna przyjmująca stałe +1 [3,5],

$\frac{x_0}{\Delta A'}$ - wartość średnią z dwóch symulacji.

Dla zrealizowania tego planowania potrzebne są wartości $\overline{\Delta A'}$. Wartości te wyznaczono korzystając z symulacji procesu odnowy poswaryjnej, przy czym dla każdej kombinacji zmiennych (wiersze w tabl. 3) wykonano dwie symulacje, z których wyznaczono wartość średnią $\overline{\Delta A'}$.

Stosując metody z teorii regresji wyznaczono w oparciu o dane zestawione w tabl. 3 następujący wielomian

$$\Delta A' = P(2,888 - 0,879n - 3,000l - 4,667\lambda + 0,041n^2 + 0,800nl + 1,267n\lambda), \text{ [kWh]} \quad (6)$$

W wielomianie tym wszystkie współczynniki regresji są istotne na poziomie $\alpha = 0,05$, a współczynnik korelacji wielowymiarowej [3] $R = 0,99$ jest istotny na poziomie $\alpha = 0,01$.

Poszczególne współczynniki regresji posiadają następujące odchylenia standardowe:

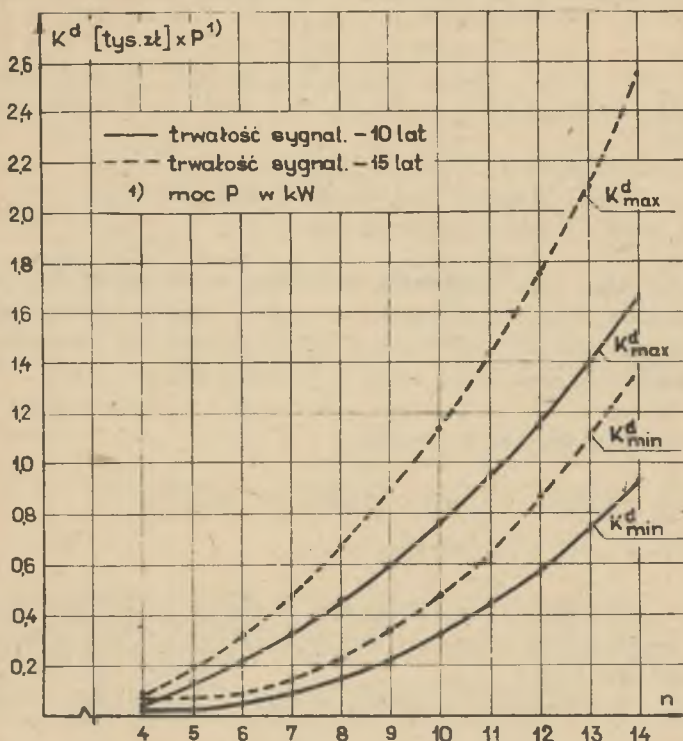
$$\begin{aligned} \sigma\{\beta_0\} &= 0,117, & \sigma\{\beta_{1i}\} &= 0,075 \\ \sigma\{\beta_{1j}\} &= 0,047, & \sigma\{\beta_{1j}\} &= 0,054. \end{aligned}$$

Moc P dla przyjętych założeń h), i), j) wyznaczono jako

$$P = 0,562 P_{Bz} \text{ [kW]}, \quad (7)$$

gdzie P_{Bz} - średnia ze szczytowych mocy stacji w półpętli, kW.

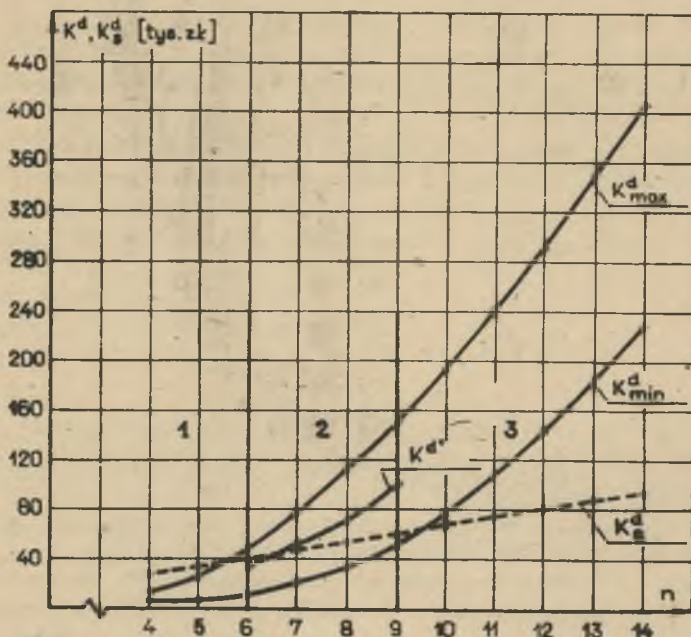
Zysk K_{min}^d oraz K_{max}^d dla poszczególnych liczb stacji przedstawiono w postaci wykresów na rys. 3. Wykresy te wykonano dla dwóch trwałości sygnalizatorów - 10 i 15 lat. Dla poszczególnych trwałości sygnalizatorów obszar znajdujący się pod krzywą K_{min}^d (rys. 3) charakteryzuje, zgodnie z kryterium (5), ekonomicznie uzasadnioną opłacalność stosowania sygnalizatorów, natomiast obszar znajdujący się nad krzywą K_{max}^d charakteryzuje ekonomiczną nieopłacalność stosowania sygnalizatorów.



Rys. 3. Zysk K^d_{min} oraz K^d_{max} , wynikający ze stosowania sygnalizatorów w zależności od liczby stacji \acute{s} n/ n

Przykładową analizę szczegółową przeprowadzono dla mocy $P_{sz} = 300$ kW, nakładu inwestycyjnego na sygnalizatory $5000 \frac{zł}{1 \text{ stacja}}$ oraz trwałości $T = 15$ lat. Roczne koszty eksploatacyjne oszacowano w oparciu o pracę [4] jako 4% od nakładu inwestycyjnego. Wyniki tej analizy przedstawiono w postaci wykresów na rys. 4.

Na rysunku tym zaznaczono trzy obszary. W obszarze 1, tzn. dla 4 i 5 stacji w pólpetli, sygnalizatory nie przynoszą ekonomicznych korzyści, w obszarze 3, tzn. dla $n \geq 10$ stosowanie sygnalizatorów jest korzystne, przy czym korzyść ta jest tym większa, im więcej jest stacji w pólpetli. W obszarze 2, tzn. dla liczby stacji 6+9, konieczne jest obliczenie zysku K^d dla rzeczywistych długości l oraz intensywności uszkodzeń λ . Jeśli, przykładowo, założyc przeciętne $l=0,4$ km oraz $\lambda = 25 \frac{1}{100 \text{ km rok}}$, to otrzyma się w tym obszarze krzywą oznaczoną jako K^d' . Zatem sygnalizatory będą przynosić ekonomiczne korzyści, począwszy od 7 stacji w pólpetli.



Rys. 4. Zyski K^d oraz koszt K_s^d sygnalizatorów w zależności od liczby stacji $6n/nn$

4. UWAGI KOŃCOWE, WNIOSKI

Przyjęcie założenia a), b) oraz f) powoduje, że wykonana analiza odnosi się do przypadku uszkodzeń pojedynczych lub wielokrotnych wtedy, kiedy dysponuje się odpowiednią liczbą brygad pogotowia energetycznego. W przypadku, kiedy liczba uszkodzeń jest większa od liczby brygad, dyspozytor powinien kierować się optymalną strategią ze względu na czas lokalizacji uszkodzeń. Strategia ta, minimalizująca czas lokalizacji jednego uszkodzenia, w efekcie zapewnia w całej sieci minimum niedostarczonej odbiorcom energii elektrycznej. Przyjęcie założenia b) powoduje, że przeciętny roczny zysk czasu, wynikający ze stosowania sygnalizatorów w półpełni, nie przekracza kilku minut.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można sformułować następujące ogólne wnioski:

1. Zastosowanie sygnalizatorów lokalnych wobec dużego ich kosztu (wg [1] ok. 5000 $\frac{zł}{stacja}$) musi poprzedzać analiza ekonomiczna efektywności ich stosowania.

2. W sieciach, dla których ciągłość zasilania odbiorców jest szczególnie mała (w sieciach o dużej liczbie stacji, długości i intensywności uszkodzeń linii), zastosowanie sygnalizatorów znacznie obniża wartość niedostarczonej odbiorcom energii elektrycznej.
3. Przeprowadzona przykładowa analiza szczegółowa wskazuje na przydatność zaproponowanej metody badania efektywności sygnalizatorów do zastosowań praktycznych.
4. Konieczne jest prowadzenie dalszych badań, uwzględniających inne kryteria prowadzenia lokalizacji uszkodzeń oraz inne możliwości stosowania sygnalizatorów (np. sygnalizatory tylko w niektórych stacjach, sygnalizacja centralna itp.). Celowe byłoby poszerzenie tych badań na sieci terenowe śn.

LITERATURA

- [1] HORAK J. i inni: Opis urządzenia do sygnalizacji lokalnej toru przepływu prądów zwarcia w sieciach kablowych (sygnalizacja lampką na zewnątrz stacji śn/nn). Politechnika Częstochowska (praca nie publikowana), Częstochowa 1978.
- [2] HORAK J.: Możliwość i efekty skracania czasu ogólnej lokalizacji uszkodzeń w sieciach kablowych. Energetyka nr 10, 1979.
- [3] MAŃCZAK K.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1976.
- [4] MEJRO CZ.: Podstawy gospodarki energetycznej. WNT, Warszawa 1974.
- [5] NALIMOW W.W., CZERNOWA N.A.: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych. WNT, Warszawa 1967.
- [6] POPCZYK J.: O strumieniu uszkodzeń w rozdzielczych sieciach kablowych średniego napięcia. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, Elektryka z. 37, 1972.
- [7] POPCZYK J.: Proces odnowy peawaryjnej w napowietrznych sieciach rozdzielczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 66, 1979.
- [8] POPCZYK J. i inni: Optymalne warunki prowadzenia ruchu w miejskiej sieci rozdzielczej. IESU Politechniki Śląskiej (praca nie publikowana), Gliwice 1980.
- [9] PRUSS W.L., NICZYPOROWICZ Ł.B.: Ispolzowanije ECWM dla formirowanija optimalnogo uprawlenija processom awarijnoj diagnostiki w raspriedielitelnyh elektrosietiach 6-10 kV. IWUZ Energetika nr 5, 1971.

Wpłynęło do redakcji 5.III.1981 r.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski

О ЭФФЕКТИВНОСТИ СИГНАЛИЗАТОРОВ КОРОТКИХ ЗАМКНИИ
В КАБЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 20 КВ

Р е з ю м е

В статье предложен метод исследования эффективности сигнализаторов коротких замыканий в отечественных кабельных сетях 20 кв. В методе учтены случайность процесса послеаварийного восстановления и нарастание нагрузок подстанций 20/0,4 кв. Проведен анализ для местной сигнализации коротких замыканий. Представлены общие выводы.

ON EFFECTIVENESS OF THE SHORT CIRCUIT SIGNALS
IN MEDIUM VOLTAGE CABLE NETWORKS

S u m m a r y

The paper offers a method of effectiveness investigation of the short circuit signals in Polish medium voltage cable networks. In the method randomness of post failure renewal procedure and load incrising in medium (low voltage stations) were taken into consideration. A case of local signaling of short circuit was analysed. The general conclusions were presented.