

Jacek GIERAS, Waldemar BEDNARZ,  
Wojciech PIWIARSKI  
Akademia Techniczno-Rolnicza  
w Bydgoszczy

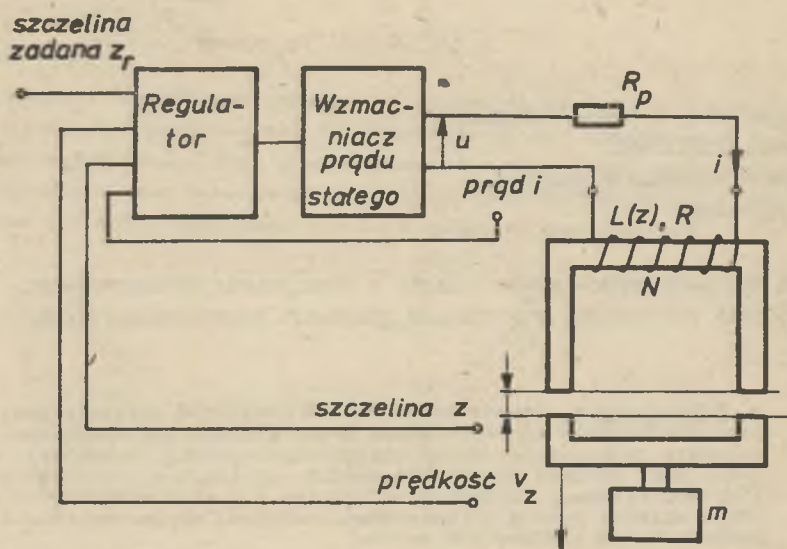
#### PRACA ELEKTROMAGNESÓW PRĄDU STAŁEGO O REGULOWANEJ AUTOMATYCZNIE SZCZELINIE POWIETRZNEJ W SYSTEMACH LEWITACJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

**Streszczenie.** Przedstawiono układ regulacji automatycznej szczeliny powietrznej elektromagnesu prądu stałego przeznaczonego do unoszenia pojazdów lewitacji elektromagnetycznej. Dokonano analizy pracy oraz zbadano stabilność układu regulacji automatycznej szczeliny powietrznej. Poddano ocenie wpływ sił elektrodynamicznych na pracę układu. Teorię zilustrowano badaniami eksperymentalnymi na zaprojektowanym i wykonanym modelu.

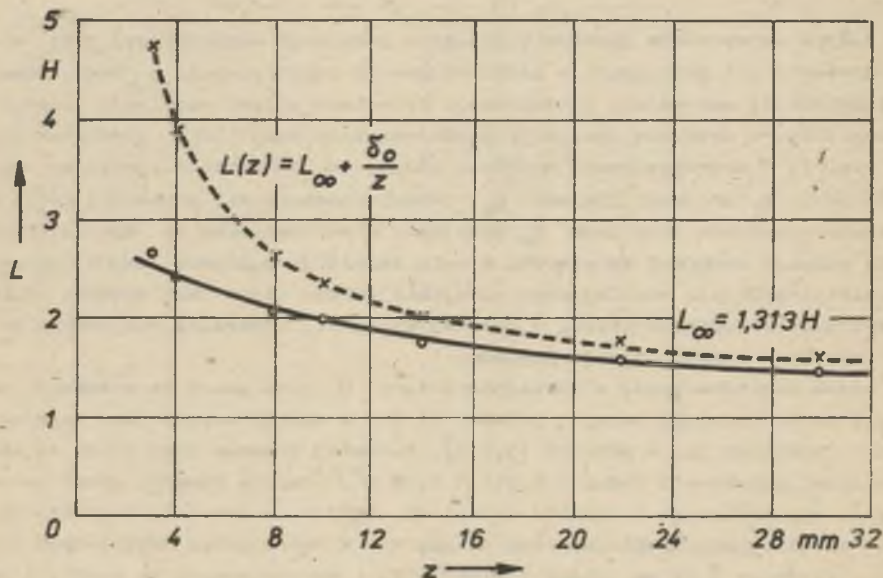
#### 1. OPIS MODELU SYSTEMU LEWITACJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

Jednym ze sposobów unoszenia pojazdów lewitacji magnetycznej jest wykorzystanie sił przyciągania elektromagnesów prądu stałego o regulowanej automatycznie szczeliny powietrznej. Strukturę układu regulacji automatycznej (URA) w systemie lewitacji elektromagnetycznej (LEM) przedstawiono na rys. 1. W zaproponowanym systemie modelowym LEM wartość szczeliny powietrznej  $z$ , prędkość liniowa  $v_z$  przemieszczenia się unoszonej masy w kierunku pionowym oraz prąd  $i_w$  uzwojenia elektromagnesu są wykorzystane jako sygnały sprzężeń zwrotnych, w celu regulacji napięcia zasilającego. Regulacja napięcia zasilającego uzwojenie odbywa się w taki sposób, żeby można było utrzymywać stałą, o żądanej wartości, szczelinę powietrzną między rdzeniem a zwrą elektromagnesu.

Rdzeń elektromagnesu w kształcie litery U oraz zwora są wykonane ze stali konstrukcyjnej zwykłej jakości St 4s, o charakterystykach magnesowania podanych np. w pracach [3,4,5]. Przekrój rdzenia oraz zwory są równomierne, jednakowe i wynoszą  $0,015 \times 0,12 \text{ m}^2$ . Średnia długość drogi strumienia magnetycznego w rdzeniu wynosi ok. 0,27 m, w zworze natomiast - ok. 0,14 m. Uzwojenie elektromagnesu składa się z dwóch cewek nawiniętych drutem o średnicy  $\emptyset,69 \text{ mm}$  (klasa izolacji F) i umieszczonych na każdej z kolumn rdzenia. W celu umożliwienia pracy elektromagnesu przy niskim napięciu zasilania ze wzmacniacza tranzystorowego prądu stałego, cewki połączone równolegle. Rezystancja uzwojenia elektromagnesu w temp.  $20^\circ\text{C}$  wynosi  $R = 22,76 \Omega$  (dwie cewki połączone równolegle). Zależność indukcyjności  $L(z)$



Rys. 1. Układ regulacji automatycznej szczeliny powietrznej elektromagnesu z zaznaczonymi torami sprzężeń zwrotnych



Rys. 2. Zależność indukcyjności  $L$  uzwojenia elektromagnesu modelowego od szczeliny powietrznej  $z$   
 linia ciągła - pomiary, linia przerywana - aproksymacja za pomocą wzoru (1)

dwoch cewek połączonych równolegle od szczeliny powietrznej  $z$  przedstawiono na rys. 2. Przebieg  $L(z)$  uzyskany z pomiarów można wyrazić analitycznie za pomocą równania [12]:

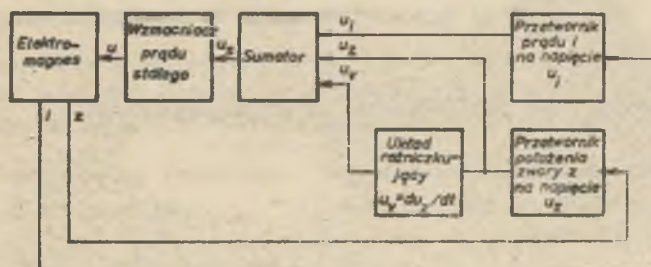
$$L(z) = L_{\infty} + L_0 \frac{\delta_0}{z}, \quad (1)$$

gdzie:

- $L_{\infty}$  - indukcyjność uzwojenia elektromagnesu przy nieskończonym wielkiej szczelinie powietrznej,
- $z$  - szczelina powietrzna,
- $\delta_0$  - szczelina powietrzna znamionowa (punkt pracy),
- $L_{\infty} + L_0$  - indukcyjność dla szczeliny powietrznej  $\delta_0$ .

W omawianym przypadku  $L_{\infty} = 1,313$  H,  $L_0(\delta_0 = 8$  mm) = 1,295 H.

Do celów badawczych - w przeciwieństwie do rozwiązań stosowanych w pojazdach modelowych LEM, np. [1,9,10] - nie stosowano dodatkowej bezstykowej stabilizacji bocznej zwory. Problem ten rozwiązano w prosty sposób przez wyposażenie zwory w prowadnicę teleskopową zapewniającą minimalny współczynnik tarcia statycznego. Przekładka tefalolitowa o grubości 3 mm na powierzchni aktywnej rdzenia służy do eliminacji zjawiska "klejenia się" zwory pod wpływem magnetyzmu szczątkowego. Masa zwory wynosi 2,105 kg, obciążników dodatkowych odpowiednio: 1; 2x2; 5 kg, co umożliwia zmianę masy podwieszanej w zakresie od 2,105 do 12,105 kg, co 1 kg.

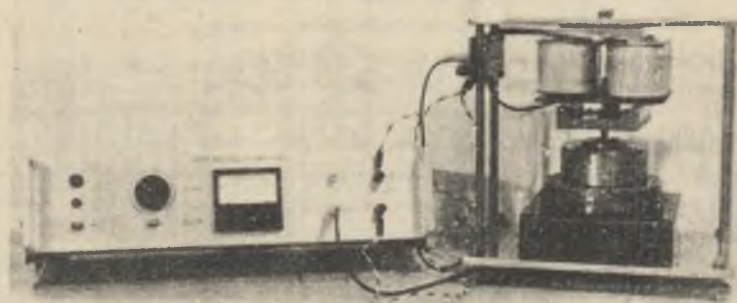


Rys. 3. Schemat funkcjonalny układu regulacji automatycznej szczeliny powietrznej elektromagnesu

Schemat funkcjonalny URA szczeliny powietrznej elektromagnesu prądu stałego jest przedstawiony na rys. 3. Do zasilania uzwojenia elektromagnesu zastosowano wzmacniacz impulsowy prądu stałego o regulowanym współczynniku wypełnienia impulsów. Okres powtarzania impulsów jest o wiele większy od stałej czasowej elektromagnetycznej obiektu regulacji. Pomiar szczeliny powietrznej zrealizowano w sposób stykowy, przy użyciu liniowego potencjometru suwakowego o rezystancji 10 k $\Omega$ . Autorzy pracują nad konstrukcją odpowiednich osujników bezstykowych położenia zwory. Pomiaru prędkości  $v_z$  ruchu zwory dokonuje się przez różniczkowanie sygnału wyjściowego z prze-

twornika połączenia zwory, pomiaru prądu natomiast - poprzez pomiar spadku napięcia na oporniku  $R_p$  włączonym szeregowo z uzwojeniem elektromagnesu (rys. 1). W sumatorze odbywa się sumowanie wszystkich trzech sygnałów sprzężeń zwrotnych i dalsza obróbka sygnału napięciowego doprowadzonego do wejścia wzmacniacza prądu stałego.

Zaprojektowany i wykonany przez autorów model systemu LEM zawierający elektromagnes wraz z URA szczeliny powietrznej jest przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Model systemu lewitacji elektromagnetycznej

## 2. ANALIZA PRACY SYSTEMU LEWITACJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

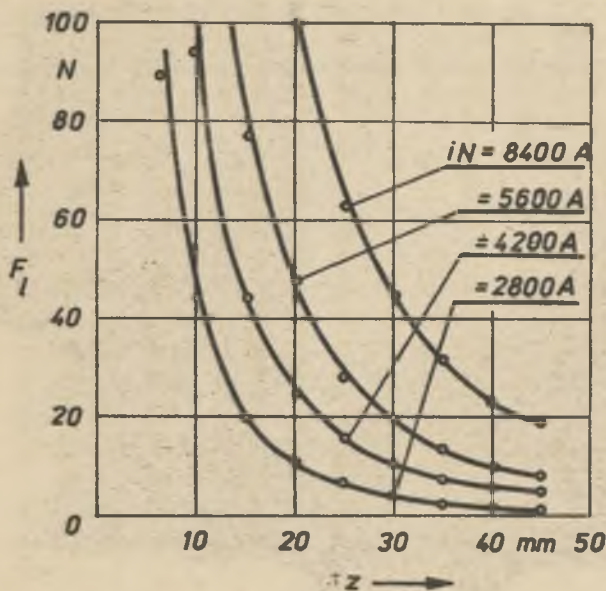
Siła przyciągania elektromagnesu w zależności od szczeliny powietrznej wyraża się wzorem:

$$F_1 = \frac{\mu_0 L b_p (iN)^2}{4 \left( \frac{1}{\mu_r} + \pi \right)} \approx \frac{\mu_0 L b_p (iN)^2}{4 \pi^2}, \quad [N] \quad (2)$$

w którym:

- $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni,
- $\mu_r$  - względna przenikalność magnetyczna rdzenia,
- $L$  - długość rdzenia elektromagnesu,
- $iN$  - przepływ elektromagnesu,
- $l_{Fe}$  - średnia długość drogi strumienia magnetycznego w rdzeniu oraz eworze,
- $b_p$  - szerokość bieguna elektromagnesu.

W omawianym przypadku  $L = 0,12$  m;  $l_{P_0} = 0,41$  m;  $b_p = 0,015$  m. Zależność siły przyciągania  $F_1$  od szczeliny powietrznej  $z$  przy zasilaniu prądem niezmennym w osie oraz przy stałym przepływie  $iN = \text{const}$  przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność siły przyciągania  $F_1$  elektromagnesu modelowego od szczeliny powietrznej przy stałym przepływie  $iN = \text{const}$ .  
linia ciągła - obliczenia wg wzoru uproszczonego (2), wyniki pomiarów zaznaczono kółkami

Elektromagnes wraz z URA (rys. 3), przy niewielkich odchyleniach zwory od punktu pracy  $\delta_0$  można opisać układem równań elektromechanicznych liniowych [12]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz'}{dt_0} &= 2H v_z' \\ \frac{dv_z'}{dt_0} &= 2(\ddot{y}' - 1') \\ \frac{di'}{dt_0} &= \frac{1}{n} (2H v_z' - 1' + u') \end{aligned} \right\} , \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha'$ ,  $\nu'_z$ ,  $i'$ ,  $u'$  - odchylenia względne szczeliny powietrznej, prędkości ruchu zwroty, prądu w uzwojeniu oraz napięcia zasilającego od punktu pracy;

$H$ ,  $a$  - stałe,

$$t_0 = \frac{t}{T_0} = t \frac{R}{L_0}.$$

Wymienione wielkości można wyznaczyć na podstawie następujących zależności [12]:

$$H = 0,5 g \frac{T_0^2}{d_0^2}, \quad (4)$$

$$a = \frac{L_m}{L_0} + 1, \quad (5)$$

$$T_0 = \frac{L_0}{R}, \quad (6)$$

$$\nu'_z = \nu_{z0} = \frac{\nu_z}{\nu_{z0}} = \frac{\nu_z}{g T_0}, \quad (7)$$

$$i' = i_0 - 1, \quad (8)$$

$$\alpha' = \alpha_0 - 1, \quad (9)$$

$$u' = u_0 - 1, \quad (10)$$

$$i_0 = \frac{1}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2mgd_0}{L_0}}} \quad (11)$$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{d_0}, \quad (12)$$

$$u_0 = \frac{u}{U_0} = \frac{u}{R I_0}, \quad (13)$$

przy czym:

$m$  - unoszona masa,

$g$  - przyspieszenie ziemskie,

$R$  - rezystancja uzwojenia,

$u$  - napięcie zasilające.

URA charakteryzują trzy zmienne stanu: przemieszczenie zwory  $z$ , prędkość ruchu zwory  $\nu_z$  oraz prąd  $i$ . Rozważając wszystkie zmienne stanu jako sygnały sprzężeń zwrotnych, należy regulować napięcie  $u$  w taki sposób, ażeby było spełnione następujące równanie [12]:

$$u = K(z - z_r) + K_v \nu_z + K_i \left( \frac{I_0 z_r}{d_0} - i \right) + U_0 \frac{z_r}{d_0}, \quad (14)$$

gdzie:

$K, K_v, K_i$  - współczynniki sprzężeń zwrotnych dla odległości, prędkości oraz prądu,

$z_r$  - szczelina powietrzna odpowiadająca punktowi równowagi.

Jeżeli regulacja napięcia zasilającego odbywa się zgodnie z równaniem (14), wtedy w stanie ustalonym  $z = z_r = d_0$ ,  $v_z = 0$ ,  $i = I_0$  oraz  $u = U_0$ . Stosując wielkości względne (7), (11), (12), (13), równanie (14) przyjmuje postać:

$$u_0 = K_0(z_0 - z_{r0}) + K_{v0}v_{z0} + K_{i0}(z_{r0} - i_0) + z_{r0}, \quad (15)$$

gdzie:

$$K_0 = \frac{K d_0}{U_0}, \quad K_{v0} = \frac{K_v v_{z0}}{U_0}, \quad K_{i0} = \frac{K_i I_0}{U_0}, \quad z_{r0} = \frac{z_r}{d_0}. \quad (16)$$

Linearyzując równanie (15) w sąsiedztwie punktu równowagi odpowiadającemu  $z_{r0} = 1$ , otrzymuje się:

$$u' = K_0 z' + K_{v0} v_z' - K_{i0} i' + (-K_0 + K_{i0} + 1) z_r', \quad (17)$$

gdzie:

$$z_r' = z_{r0} = 1. \quad (18)$$

Stosując przekształcenia Laplace'a do układu równań (3) oraz równania (17), otrzymuje się:

$$\begin{aligned} s Z(s) &= 2 H V(s) \\ s V(s) &= 2 [Z(s) - I(s)] \\ s I(s) &= \frac{1}{s} [2 H V(s) - I(s) + U(s)] \end{aligned} \quad (19)$$

$$U(s) = K_0 Z(s) + K_{v0} V(s) - K_{i0} I(s) + (-K_0 + K_{i0} + 1) Z_r(s)$$

gdzie:  $Z(s), V(s), I(s)$  oraz  $Z_r(s)$  są transformacjami Laplace'a wielkości  $z', v_z', i', u'$  oraz  $z_r'$ .

Na podstawie powyższego układu równań (19) można zbudować schemat blokowy URA szczeliny powietrznej elektromagnesu - rys. 6, o transmitancji operatorowej:

$$\frac{Z(s)}{Z_r(s)} = \frac{4 H (K_0 - K_{i0} - 1)}{M(s)} \quad (20)$$

gdzie:

$$M(s) = as^3 + (1 + K_{i0})s^2 + (4 H - 4 H_a + 2 K_{v0})s + 4 H(K_0 - K_{i0} - 1) \quad (21)$$

Badanie stabilności układu liniowego sprowadza się do badania położenia pierwiastków równania charakterystycznego  $M(s) = 0$  na płaszczyźnie zmiennej zespolonej  $s$ .

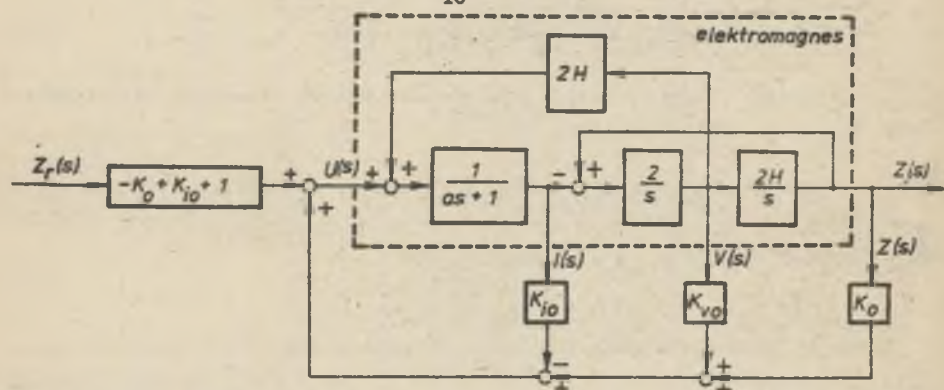
Inne schematy blokowe systemów LEM zawierają np. prace [1,2,6,8,9,10].

Obszar stabilności URA, przedstawiono na rys. 3 oraz na rys. 6, można wyznaczyć na podstawie kryterium Hurwitza, z którego wynika, że:

$$-1 < K_{i0} < K_0 - 1$$

$$K_{v0} > 2H(a-1) \quad (22)$$

$$K_{v0} > 2H\left(\frac{aK_0}{K_{i0}+1} - 1\right).$$



Rys. 6. Schemat blokowy układu regulacji automatycznej szczeliny powietrznej elektromagnesu

Nieograniczony obszar stabilności (22) na płaszczyźnie  $K_{i0}, K_{v0}$  umożliwia przyjęcie dowolnych wartości współczynników sprzężeń zwrotnych z tego obszaru. Równanie charakterystyczne jest równaniem trzeciego stopnia i ma jeden pierwiastek rzeczywisty oraz dwa pierwiastki zespolone sprzężone w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej  $s$ . Postać równania (21) umożliwia takie przyjęcie pierwiastków, aby otrzymać najbardziej odpowiednie wartości wszystkich trzech współczynników sprzężeń zwrotnych. Zakłada się dla URA oscylacyjność równą  $\sqrt{3}$ , co jest równoważne wymaganiu, aby pierwiastki zespolone równania charakterystycznego tego układu leżały w części lewej półpłaszczyzny zmiennej zespolonej  $s$  ograniczonej z prawej strony dwiema półprostymi nachylonymi względem osi rzeczywistej pod kątem  $60^\circ$ . Przyjmując ponadto stopień stabilności URA wynoszący  $0,5\omega_D$ , gdzie  $\omega_D$  - pulsacja drgań własnych nie tłumionych, pierwiastki zespolone sprzężone, będą równe  $s_{1,2} = -0,5\omega_D(1 \pm j\sqrt{3})$ . Trzeci pierwiastek można przyjąć  $s_3 = -\omega_D$ . Takie umiejscowienie pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej  $s$  - aczkolwiek nie zawsze konieczne - jest typowe dla konwen-



cyjonalnych serwomechanizmów i nie prowadzi do zbyt dużych wartości współczynników sprzężeń zwrotnych. Równanie (21) po wprowadzeniu przyjętych pierwiastków ma postać

$$H(s) = a(s + \omega_n)(s^2 + \omega_n s + \omega_n^2). \quad (23)$$

Porównując stronami równania (20) i (23) otrzymuje się:

$$\left. \begin{aligned} K_o &= a \omega_n \left( \frac{\omega_n^2}{4H} + 2 \right) \\ K_{vo} &= a \omega_n^2 + 2H(a - 1) \\ K_{io} &= 2a\omega_n - 1 \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Wartość  $\omega_n$  może być określona za pomocą różnych kryteriów. Na przykład jeżeli ciałem unoszonym jest pędzący pojazd LEM, wartość  $\omega_n$  powinna być tak dobrana, aby zapewnić pasażerom maksymalny komfort jazdy. Współczynniki sprzężeń zwrotnych można wyznaczyć dla określonej jednej wartości  $\omega_n$ .

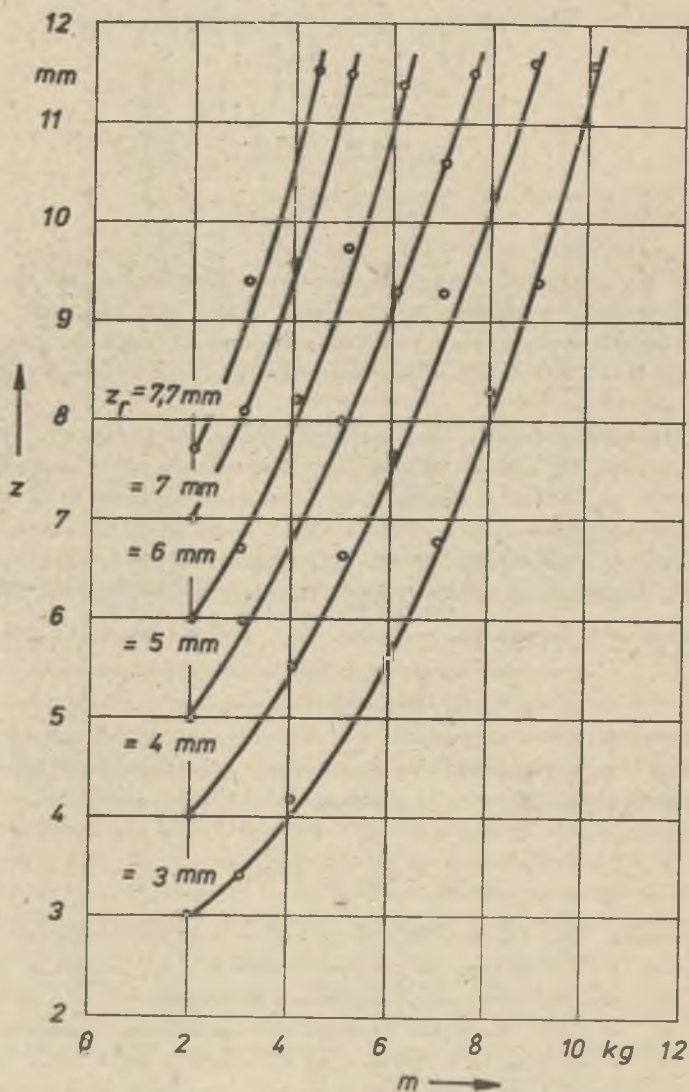
Czas odpowiedzi układu można zmniejszyć przez wzrost  $\omega_n$ . Nie można jednak zwiększać  $\omega_n$  nieograniczenie, gdyż wzrost  $\omega_n$  wywołuje wzrost współczynnika wzmożenia wzmacniacza i czasami prowadzi do nasycenia wzmacniacza. Nasycenie wzmacniacza może z kolei spowodować niestabilność URA. Niech szczelina powietrzna zmienia się sinusoidalnie w czasie o niewielką wartość. Aby moduł transmitancji widmowej  $\left| \frac{U(j\omega)}{Z_r(j\omega)} \right|$  nie był zbyt duży w porównaniu z jednością, pulsacja  $\omega_n$  powinna spełniać nierówność:

$$\omega_n < \omega_{n1} = \sqrt[3]{\frac{4H}{a}}. \quad (25)$$

Podobnie, aby nie dopuścić do zbyt dużego wzrostu  $\left| \frac{I(j\omega)}{Z_r(j\omega)} \right|$  w porównaniu z jednością, pulsacja  $\omega_n$  powinna spełniać warunek

$$\omega_n < \omega_{n2} = 2\sqrt{H}. \quad (26)$$

W rozważanym URA dla  $m = 12,105$  kg,  $\delta_o = 0,008$  m, położenia początkowego swozy z (0) = 0,013 m, na podstawie wzorów (24) uzyskano następujące wartości względne współczynników sprzężeń zwrotnych:  $K_o = 7,270$ ;  $K_{vo} = 8,739$ ;  $K_{io} = 5,271$ . Wartości bezwzględne natomiast - zgodnie z zależnościami (16) - wynoszą:  $K = 25598$  V/m;  $K_v = 450,8$  Va/m;  $K_i = 122,6$  V/λ. Wyznaczone wartości współczynników sprzężeń zwrotnych były niezbędne do prawidłowego zaprojektowania URA.



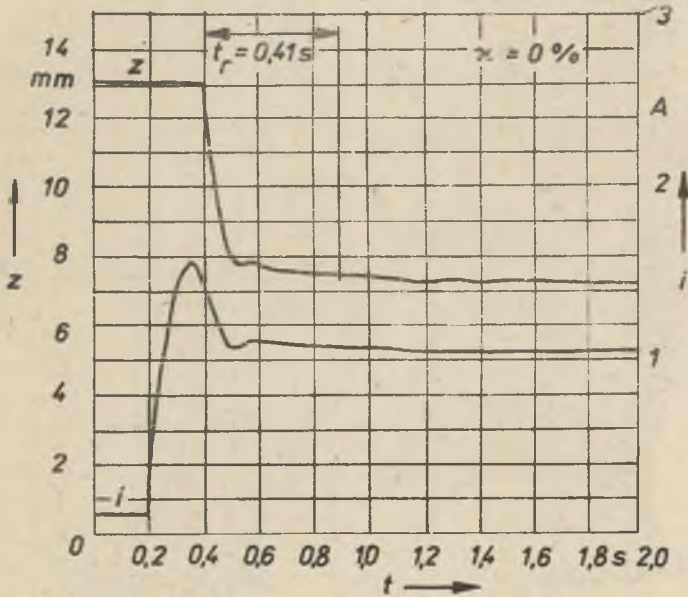
Rys. 7. Zależność szczeliny powietrznej  $z$  od masy unoszonej  $m$  przy stałej szczelinie zadanej  $z_r = \text{const}$  (odpowiadającej punktowi równowagi) - wyniki pomiarów

## 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Charakterystyki elektromechaniczne  $z(m)$  przy stałej szczelinie zadanej  $z_r$  modelu systemu LEM przedstawiono na rys. 7. Jako wartość szczeliny zadanej  $z_r$  przyjmuje się szczelinę przy masie unoszonej  $m = 2,105 \text{ kg}$  dla określonej nastawy potencjometru zadającego tę wartość. Sztywność charakterystyk  $z(m)$  przy  $z_r = \text{const}$  zawiera się w przedziale

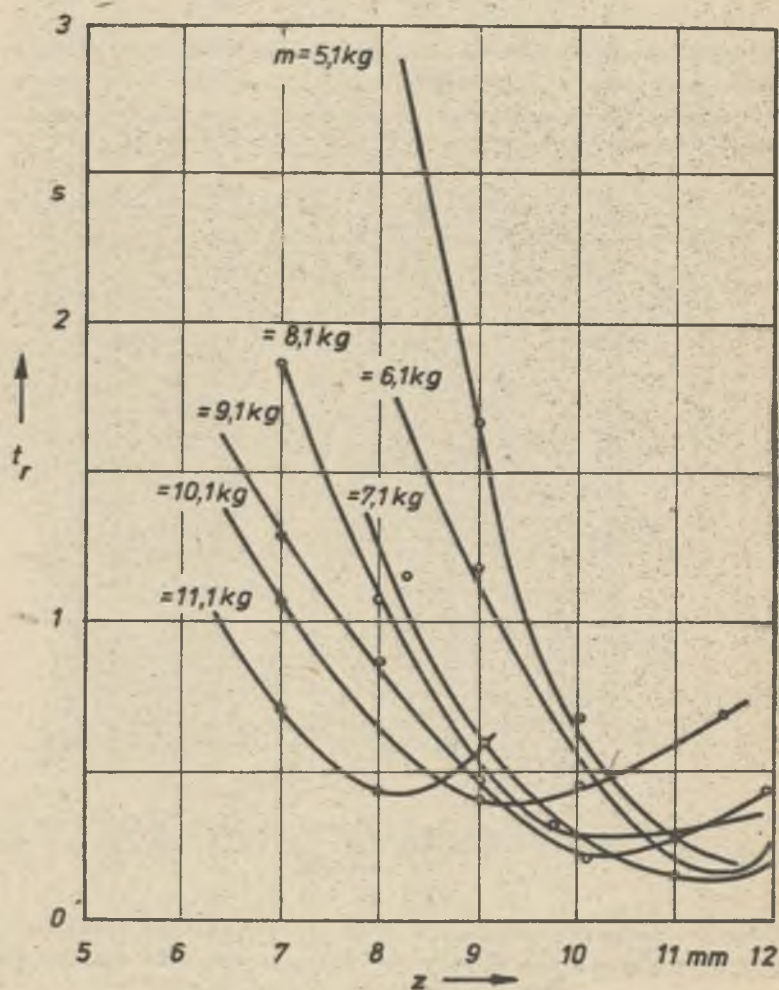
$$0,6 \cdot 10^{-3} \leq \frac{m}{k_g} \leq 1,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{kg}},$$

przy czym sztywność maksymalna odpowiada małym szczelinom zadany i maleje wraz ze wzrostem  $z_r$ . Na podstawie charakterystyk  $z(m)$  przy  $z_r = \text{const}$  można wykreślić charakterystyki regulacyjne  $z(z_r)$  dla  $m = \text{const}$ .



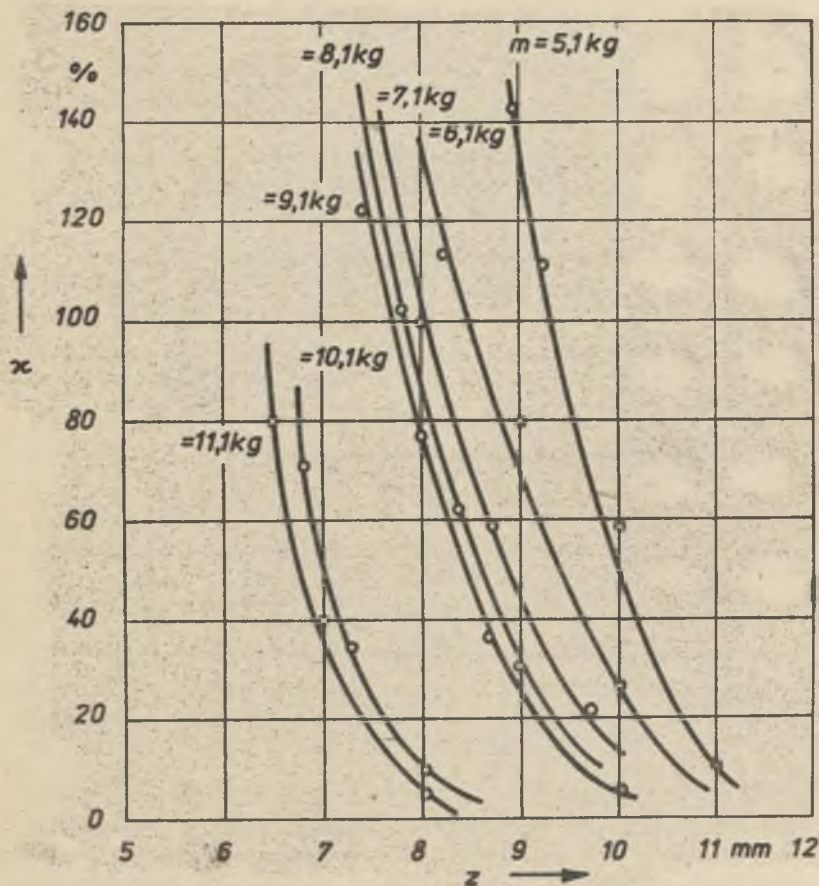
Rys. 8. Przebiegi czasowe położenia zwory  $z(t)$  oraz prądu w uzwojeniu  $i(t)$  wywołane zmianą skokową wymuszenia dla  $m = 8,1 \text{ kg}$  oraz  $z_r = 8 \text{ mm}$  - wyniki pomiarów

Badania odpowiedzi układu na wymuszenie jednostkowe dokonano przez skokowe zadawanie szczeliny od wartości początkowej  $z(0) = 0,013 \text{ m}$  do punktu równowagi  $z_r$ . Jeden z oseylogramów przedstawiający przebieg czasowy położenia zwory  $z(t)$  oraz prądu w uzwojeniu  $i(t)$  wywołany zmianą skokową wymuszenia dla  $m = 8,1 \text{ kg}$  oraz  $z_r = 0,008 \text{ m}$  zamieszczono na rys. 8. Przebieg czasowy prądu otrzymuje się poprzez rejestrację spadku napięcia na



Rys. 9. Zależność czasu regulacji  $t_r$  układu od szczeliny powietrznej  $z$  przy stałej masie unoszonej  $m = const$  - wyniki pomiarów

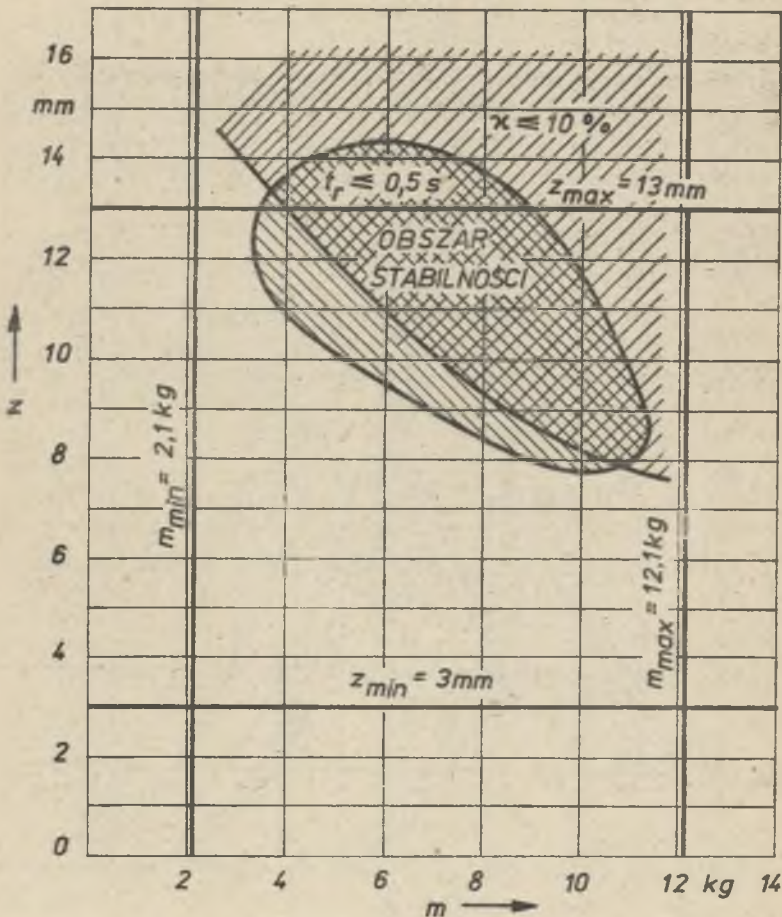
rezystorze szeregowym  $R_p$  (rys. 1), przebieg czasowy położenia zwory natomiast poprzez rejestrację napięcia  $u_z$  przetwornika odległości (rys. 3). Oscylogramy odpowiedzi skokowej pozwalają wyznaczyć podstawowe kryteria czasowe jakości regulacji, tzn. czas regulacji (ustalania)  $t_r$  oraz przeregulowanie  $\% [11]$ . Na podstawie oscylogramów uzyskanych przy szczelinach  $z = 3 \div 12$  mm oraz masie unoszonej  $m = 2,105 \div 12,105$  kg wykreślono zależności  $t_r(z)$  przy  $m = \text{const}$  - rys. 9 oraz  $\% (z)$  dla  $m = \text{const}$  - rys. 10. Znajomość przebiegów tych charakterystyk pozwala określić obszar pracy stabilnej - rys. 11, przy następujących przyjętych ograniczeniach:  $t_r \leq 0,5$  s,  $\% \leq 10\%$ . Ponadto obszar pracy stabilnej układu jest ograniczony parametrami konstrukcyjnymi elektromagnesu modelowego, tj. masą  $2,105 \leq m \leq 12,105$  kg oraz szczeliną  $3 \leq z \leq 13$  mm.



Rys. 10. Zależność przeregulowania  $\%$  od szczeliny powietrznej  $z$  przy stałej masie unoszonej  $m = \text{const}$  - wyniki pomiarów

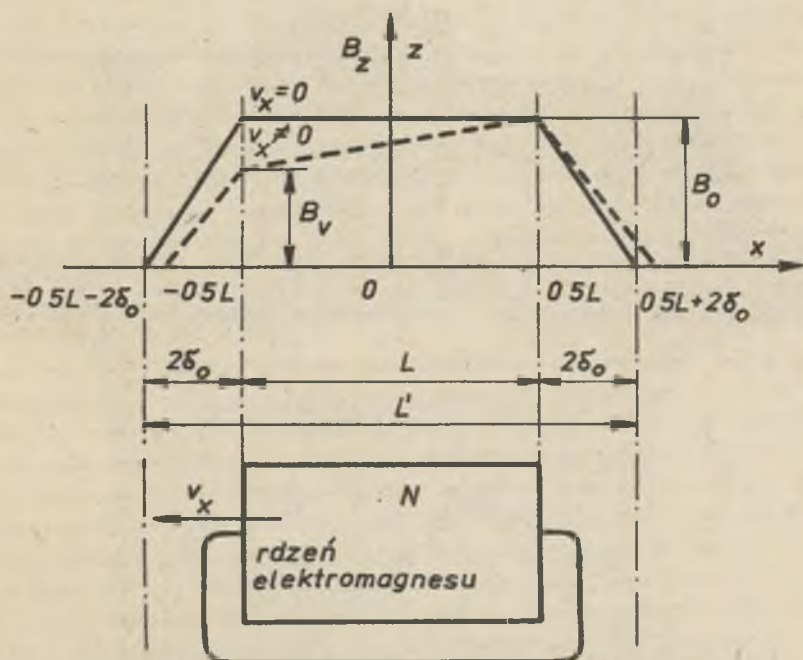
## 4. SILY ELEKTRODYNAMICZNE W SYSTEMACH LEWITACJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

Rolę kół w pojazdach LEM pełnią elektromagnesy zbliżone kształtem do rozpatrywanego elektromagnesu modelowego. URA szczeliny powietrznej jest również podobny do układu rozważanego w poprzednich rozdziałach. Zworami dla układu elektromagnesów są lite przewodnice stalowe. Na skutek ruchu elektromagnesu z prędkością liniową  $v_x$ , prądy wirowe w przewodnicy osłabiają pole magnetyczne w szczeliny powietrznej, wzbudzone przez elektro-



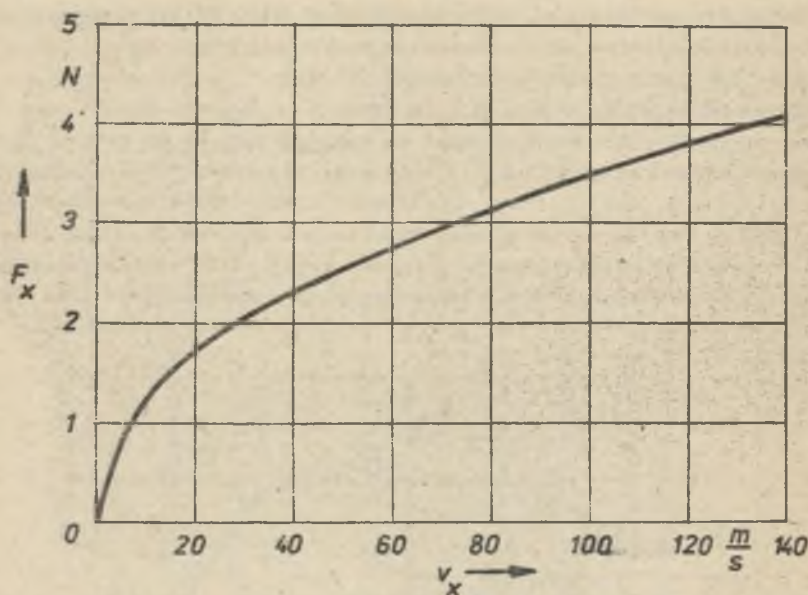
Rys. 11. Obszar pracy stabilnej (podwójnie zakreskowany) układu dla czasu regulacji  $t_r \leq 0,5$  s oraz przeregulowania  $\kappa \leq 10\%$

magnes - rys. 12. Czyż wyższa prędkość  $v_x$ , tym większa jest reakcja pola prądów wirowych rotacji na pole pierwotne. Oprócz siły przyciągania  $F_1$  określonej wzorem (2), tzn. siły unoszącej pojazd, działają dwie siły elektrodynamiczne zależne od prędkości  $v_x$ : siła hamująca  $F_x(v_x)$  oraz siła normalna  $F_z(v_x)$ , przeciwnie skierowana do siły  $F_1$ . Zależności na siły elektrodynamiczne  $F_x$  oraz  $F_z$  uzyskane na podstawie teorii pola elektromagnetycznego (trójwymiarowego) są wyprowadzone np. w pracy [7]. Na rys. 13 przedstawiono zależność  $F_x(v_x)$ , na rys. 14 natomiast zależność  $F_z(v_x)$  oraz  $F_1(v_x) = F_1 - F_z(v_x)$  dla rozważanego elektromagnesu modelowego przy  $iN = 5600$  A;  $z = 10$  mm oraz harmonicznych podstawowych rozkładu przestrzennego pola wzdłuż współrzędnych  $\underline{x}$  oraz  $\underline{y}$  [7]. Siły elektrodynamiczne  $F_x$  oraz  $F_z$  od wyższych harmonicznych rozkładu przestrzennego pola są pomi-

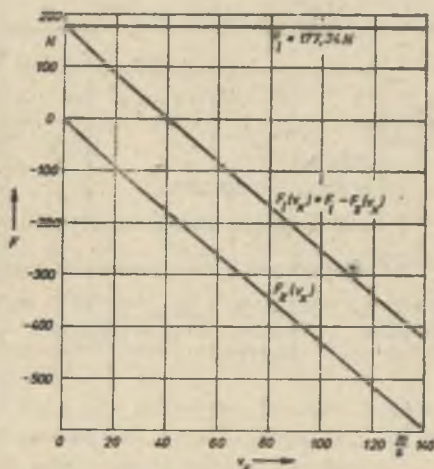


Rys. 12. Rozkład składowej normalnej  $B_z$  indukcji magnetycznej w szczelnie powietrznej (między rdzeniem elektromagnesu a prowadnicą stalową) wzdłuż współrzędnej  $x$  (w kierunku przemieszczania się elektromagnesu)

alnie małe. Jak wynika z rys. 13 oraz rys. 14, siły elektrodynamiczne spełniają nierówność  $|F_z(v_x)| \gg |F_x(v_x)|$  oraz istnieje - bez dodatkowych środków zapobiegawczych - niebezpieczeństwo odpadnięcia pojazdu od toru pewnej, uwarunkowanej konstrukcją elektromagnesu, prędkości krytycznej. Aby siła hamująca  $F_x(v_x)$  była mała w porównaniu z siłą  $F_1$  określoną wzo-



Rys. 13. Zależność siły elektrodynamicznej hamującej  $F_x$  od prędkości  $v_x$  elektromagnesu modelowego - obliczenia na podstawie pracy [7] dla  $g = 10$  mm,  $i_N = 5600$  A oraz harmonicznych podstawowych rozkładu pola magnetycznego.



Rys. 14. Siła przyciągania  $F_1$  oraz siły elektrodynamiczne normalne  $F_2$  i  $F_1(v_x)$  elektromagnesu modelowego - obliczenia wg wzoru (1) oraz pracy [7] dla  $g = 10$  mm,  $i_N = 5600$  A oraz harmonicznych podstawowych rozkładu pola elektromagnetycznego



rem (2), należy konstruować elektromagnesy o dużej długości rdzenia  $L$ , ażeby siła normalna  $F_z(v_x)$  była natomiast mała w porównaniu z siłą  $F_1$ , stał zastosowana na przewodnicę powinna charakteryzować się niską konduktywnością (lub wykonanie powierzchni aktywnej przewodnicy z blach elektrotechnicznych).

## 5. WNIOSKI

Zaprojektowany i wykonany system modelowy LEM miał na celu praktyczne wykazanie możliwości bezstykowego unoszenia ciał ferromagnetycznych za pomocą elektromagnesów. Charakterystyki elektromechaniczne - rys. 7 posiadają dobrą sztywność, obszar pracy stabilnej (rys. 11) jest dostatecznie rozległy. Do współpracy z elektromagnesem zastosowano wzmacniacz impulsowy, którego zaletą jest prosta budowa i szeroki zakres regulacji napięcia wyjściowego, wadą zaś - mała moc wyjściowa. Unoszenie ciał ferromagnetycznych o masie rzędu setek lub tysięcy kilogramów jest możliwe za pomocą znacznie większych (przede wszystkim dłuższych) elektromagnesów niż elektromagnes modelowy, współpracujących z impulsowymi sterownikami tyrystorowymi prądu stałego o regulowanym współczynniku wypełnienia i dużej częstotliwości powtarzania impulsów [9, 12]. Prawidłowe zaprojektowanie URA szczeliny powietrznej elektromagnesu zależy od właściwego doboru pulsacji  $\omega_n$  oraz na tej podstawie - prawidłowego wyznaczenia współczynników sprzężeń zwrotnych  $K_0, K_{v0}, K_{i0}$ .

Podczas ruchu elektromagnesu wzdłuż przewodnicy stalowej, będącej jednocześnie zworą, powstają siły elektrodynamiczne: hamująca  $F_x$  oraz normalna  $F_z$  osłabiająca siłę przyciągania  $F_1$ , jak również ma miejsce osłabianie pola magnetycznego w szczelinie powietrznej przez prądy wirowe rotacji wzniesione w przewodnicy. Zarówno osłabianie pola jak i siły  $F_1$  może być przyczyną niestabilności układu. Aby ograniczyć negatywne skutki tych zjawisk, należy wprowadzić dodatkowe dodatnie sprzężenie zwrotne reagujące na prędkość  $v_x$  poruszania się elektromagnesu (pojazdu LEM). W odniesieniu do zastosowania w transporcie, wydaje się, że system LEM jest odpowiedni dla małych prędkości  $v_x$ , tzn. poniżej  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  (transport miejski), system lewitacji elektrodynamicznej (LED) natomiast - dla dużych prędkości, tzn. do  $500 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Przemawia za tym zarówno wzrost siły  $F_z(v_x)$  wraz z prędkością  $v_x$  jak i mała szczelina powietrzna (rzędu kilku do kilkadziesiąt milimetrów) w systemie LEM. Z ekonomicznego punktu widzenia, system LEM zawierający elektromagnesy konwencjonalne i układy elektroniczne, jest tańszy niż system LED zawierający elektromagnesy nadprzewodzące wraz z niezbędnymi urządzeniami kriogenicznymi.

## LITERATURA

- [1] Albrecht C., Bohn G.: Neue spurgeführte Transportmittel ( Teil I), Physikalische Blätter, vol. 32, 1976, Nr 7, ss. 309-326.
- [2] Appun P.: Ein elektromagnetisches Trag- und Führungssystem für Schienengebundene Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge, Elektrische Bahnen, vol. 46, 1975, Nr 4, ss. 86-93.
- [3] Cicho J., Dąbrowski M.: Badania własności magnetycznych stali konstrukcyjnych, Archiwum Elektrotechniki, t. 24, 1975, z.2, ss.329-343.
- [4] Dąbrowski M., Gieras J.: Maszyny indukcyjne o wirniku masywnym, PWN, Warszawa-Poznań 1977.
- [5] Gieras J.: Analytical method of calculating the electromagnetic field and power losses in ferromagnetic halfspace taking into account saturation and hysteresis. Proceedings IEE, vol. 124, 1977, Nr 11 ss. 1098-1104.
- [6] Gieras J.: Perspektywy zastosowania zjawiska lewitacji magnetycznej w szybkim transporcie naziemnym. Przegląd Elektrotechniczny, 1981, Nr 1, ss. 3-9.
- [7] Gieras J.: Electrodynamic forces in electromagnetic levitation systems, Acta Technica CSAV (w druku).
- [8] Jayavant B.V., Sinha P.K., Aylwin D.G.: Feedback control systems for d.c. electromagnets in passenger-carrying vehicles, Int. J. Control, vol. 24, 1976, Nr 5, ss. 627-639.
- [9] Jayavant B.V., Sinha, P.K., Wheeler A.R., Whorlow R.J.: Development of 1-ton magnetically suspended vehicle using controlled d.c. electromagnets, Proceedings IEE, vol. 123, 1976, Nr 9, ss. 941-948.
- [10] Jayavant B.V., Sinha P.K.: Passenger carrying vehicles and bearings using controlled d.c. electromagnets for suspension, Proceedings of the 6th Int. Conference on Magnet Technology MT-6, Bratislava, 1977, ss. 172-176.
- [11] Kozorek T.: Teoria sterowania (tom 1), PWN, Warszawa 1977.
- [12] Matsumura F., Yamada S.: A Method to Control the Suspension System Utilizing Magnetic Attractive Force, Electrical Engineering in Japan, vol. 94, 1974, Nr 6, ss. 50-57.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

Wpłynęło do redakcji 5.IV.1982 r.

РАБОТА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА С АВТОМАТИЧЕСКИ РЕГУЛИРОВАННЫМ ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ

## Резюме

В работе представлена схема автоматического регулирования воздушного зазора электромагнита постоянного тока предназначенного для подвески электромагнитной левитации. Приведен анализ работы и исследована устойчивость системы автоматического регулирования воздушного зазора. Проведена оценка влияния электродинамических сил на работу системы. Теоретические рассуждения

проиллюстрированы экспериментальными исследованиями на спроектированной и изготовленной модели.

#### OPERATION OF D.C. ELECTROMAGNETS WITH CONTROLLED AIR GAP IN ELECTROMAGNETIC LEVITATION SYSTEMS

##### S u m m a r y

The control system of the air gap of a d.c. electromagnet for electromagnetic levitation vehicles is given. The operation of the control system is analysed and its stability is investigated. The influence of electrodynamic forces on the operation of the system is discussed. To verify the theory, the model of electromagnetic levitation system was constructed and some experiments were carried out.