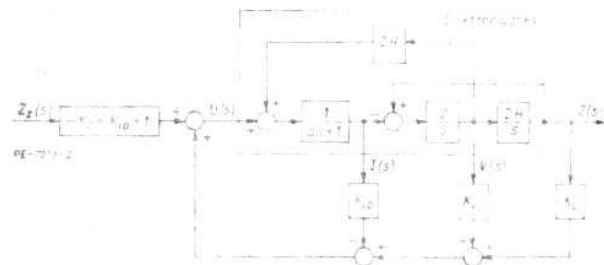


Na podstawie układu równań (1) można zbudować schemat blokowy URA (rys. 2), zgodnie z którym równanie regulatora ma postać

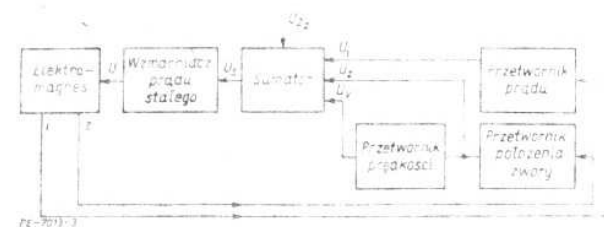
$$(2) \quad u = K \cdot z + K_1 v_2 - K_1 + z_2 (K_1 - K + 1)$$



Rys. 2. Schemat blokowy URA

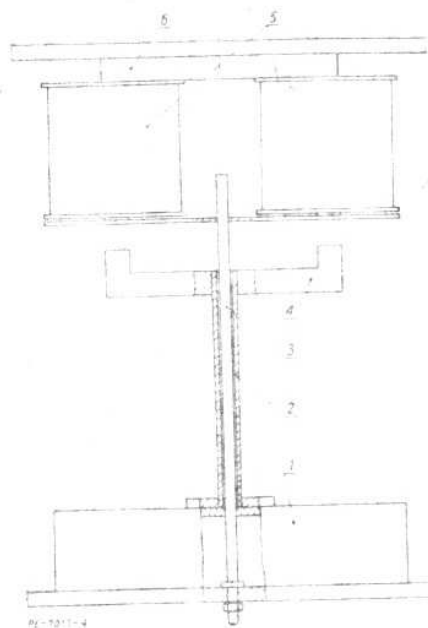
Równanie regulatora (2) stanowi podstawę do zaprojektowania URA przedstawionego na rys. 3.

W rozwiązaniu modelowym rdzeń elektromagnetyczny prądu stałego wykonany jest w kształcie litery U ze stali konstrukcyjnej zwykłej jakości. Przekrój rdzenia elektromagnesu oraz zwory jest równomierny i wynosi $0,015 \times 0,12$ m. 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 połączonych szeregowo.



Rys. 3. Schemat funkcjonalny URA

Do celów badawczych zastosowano dodatkowe masy odpowiednio: 1, 2, 2,5 kg, co umożliwia przy masie zwory 2,105 kg zmianę masy unoszonej od 2,105 do 12,105 kg co 1 kg. W modelu nie zastosowano bocznej stabilizacji zwory, lecz wyposażono ją w prowadnicę teleskopową, która spełnia tę rolę (rys. 4). Prze-



Rys. 4. Konstrukcja prowadnicy zwory elektromagnetycznej

twornikiem położenia zwory w modelu systemu LEM jest liniowy potencjometr suwakowy. W rozwiązaniach stosowanych w pojazdach unoszonych elektromagnetycznie należy zastąpić stykowy przetwornik położenia zwory przetwornikiem bezstykowym oraz zastosować boczna stabilizację ruchu zwory [1, 2, 3].

Opis układu regulacji automatycznej

Wzmacniacz prądu stałego

Elektromagnes prądu stałego jest zasilany ze wzmacniacza impulsowego prądu stałego o regulowanym współczynniku wypełnienia impulsów. Częstotliwość powtarzania impulsów wynosi 500 Hz, a stała czasowa uzwojenia elektromagnesu zasilanego ze wzmacniacza wynosi ok. 0,1 s, co pozwala rozpatrywać napięcie wzmacniacza jako napięcie stałe o regulowanej amplitudzie. Schemat ideowy wzmacniacza przedstawiono na rys. 5. Wzmacniacz operacyjny US 1 pracuje jako integrator i całkuje napięcie — 5 V, przy czym stała całkowania wynosi

$$(3) \quad T_c = U \frac{1}{R_1 C_1}$$

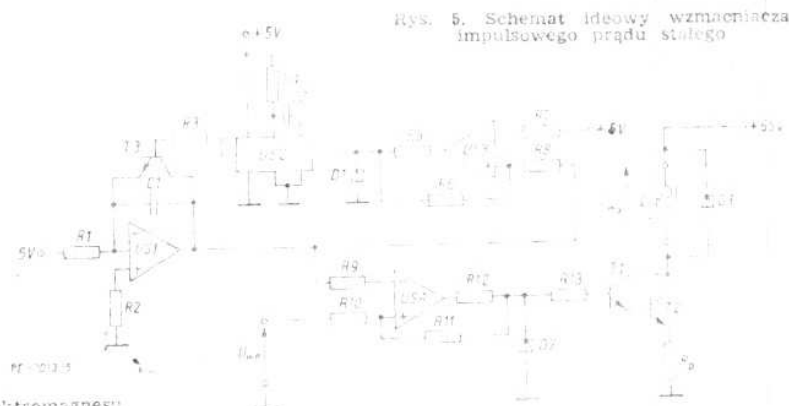
Napięcie to jest porównywane za pomocą wzmacniacza operacyjnego US 3 pracującego jako komparator, z napięciem +5 V. W chwili osiągnięcia z integratora wartości +5 V, napięcie wyjściowe zmienia wartość z 0 V na 5,1 V, powodując generowanie przez przerzutnik monostabilny US 2 impulsu o czasie trwania

$$(4) \quad T_1 = 0,69 R_4 C_2$$

Impuls ten powoduje wprowadzenie tranzystora T3 w stan przewodzenia i w konsekwencji rozładowanie kondensatora C1. Po zakończeniu impulsu cykli pracy powtarza się. Na wyjściu integratora otrzymuje się więc przebieg piłokształtny o amplitudzie 5 V i częstotliwości $f_1 = 1/R_1 C_1$. Przebieg piłokształtny porównywany jest za pomocą komparatora US 4 z napięciem wejściowym wzmacniacza. Na wyjściu komparatora US 4 otrzymuje się ciąg impulsów prostokątnych o częstotliwości 500 Hz i współczynniku wypełnienia zależnym od napięcia sterującego U_{we} . Impulsy z komparatora sterują tranzystory T1, T2 włączone szeregowo z uzwojeniem elektromagnesu, pracujące w układzie Darlingtona. Dioda D3 zabezpiecza tranzystory T1, T2 przed przepięciami w chwili wyłączenia prądu oraz zapewnia jego ciągłość w uzwojeniu elektromagnesu. Charakterystykę statyczną wzmacniacza zastosowanego w modelu układu LEM można opisać równaniem

$$(5) \quad U_{wy} = (10,2 U_{we} + 4) V$$

Współczynnik wzmocnienia wzmacniacza można kształtować przez zmianę napięcia zasilania elektromagnesu U_2 ograniczoną od góry wartością maksymalną napięcia U_c tranzystorów T1, T2, lub przez



Rys. 5. Schemat ideowy wzmacniacza impulsowego prądu stałego

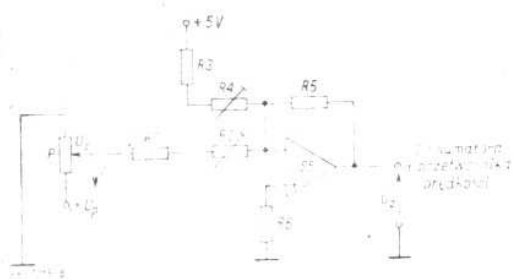
zmianę napięcia wejściowego U_{we} , zmieniając amplitudę napięcia piłokształtnego w przedziale $0 \div 15$ V dla zastosowanych w układzie wzmacniaczy operacyjnych $\mu A 741$.

Przetwornik położenia zwory

Pomiar szczeliny powietrznej w rozwiązaniu modelowym dokonywany jest za pomocą potencjometru liniowego suwakowego o rezystancji 10 k Ω . Suwak potencjometru sprzężony mechanicznie ze zworą elektromagnesu odwzorowuje jej położenie i wraz ze wzmacniaczem stanowi przetwornik położenia zwory. Charakterystyka statyczna przetwornika położenia w wykonaniu modelowym (rys. 6) opisana jest równaniem

$$(6) \quad U_z = -500z$$

Charakterystykę tę można kształtować dowolnie zarówno przez zmianę rezystancji R_1, R_2, R_5 , jak i przez zmianę napięcia zasilania potencjometru U_p .



Rys. 6. Schemat ideowy przetwornika położenia zwory

Przetwornik prędkości

Pomiaru prędkości przemieszczania się zwory dokonuje się przez różniczkowanie napięcia przetwornika położenia w układzie pokazanym na rys. 7. Sygnał U_z różniczkowany jest za pomocą wzmacniacza operacyjnego US 6. Kondensator C2 oraz rezystor R1 służą do zmniejszenia wzmocnienia układu w zakresie dużych częstotliwości, co powoduje zmniejszenie szumów oraz zwiększenie stabilności pracy wzmacniacza różniczkującego. Wzmacniacz operacyjny US 7 służy do odwracania fazy napięcia, a wzmocnienie jego wynosi 1 . Transmitancja przetwornika prędkości w rozwiązaniu modelowym wynosi

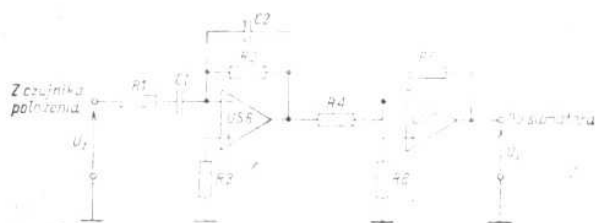
$$(7) \quad \frac{U_v(s)}{U_z(s)} = \frac{R_2 C_1 s}{(R_1 C_1 s + 1)(R_2 C_2 s + 1)} \approx R_2 C_1 s = 0,033 s$$

Sygnał napięciowy jest zatem proporcjonalny do prędkości

$$(8) \quad U_v = 0,033 \frac{dU_z}{dt}$$

Uwzględniając równanie przetwornika położenia otrzymuje się ostatecznie równanie przetwornika prędkości

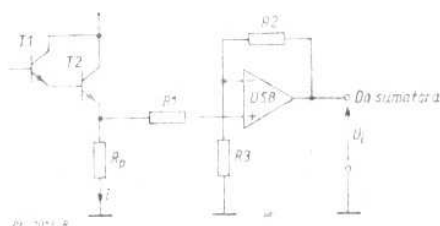
$$(9) \quad U_v = -16,5 \frac{dz}{dt} = -16,5 v$$



Rys. 7. Schemat ideowy przetwornika prędkości

Przetwornik prądu

Wielkość proporcjonalną do prądu otrzymuje się przez pomiar napięcia na rezystorze R_D włączonym szeregowo z uzwojeniem elektromagnesu. Schemat przetwornika przedstawiony jest na rys. 8. Napięcie



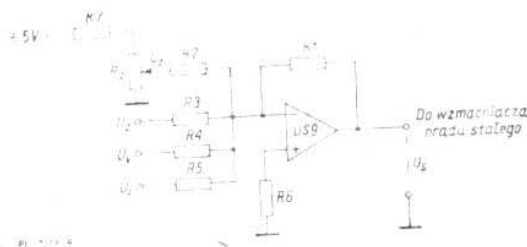
Rys. 8. Schemat ideowy przetwornika prądu na napięcie

na rezystorze R_D wzmacniane jest w układzie wzmacniacza US 8 i podawane na sumator. Elementy wzmacniacza są tak dobrane, żeby uzyskać równanie przetwarzania o postaci

$$(10) \quad U_j = 3 i$$

Sumator

Sygnały napięciowe U_z, U_v, U_i podawane są na sumator, którego schemat przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Schemat ideowy sumatora

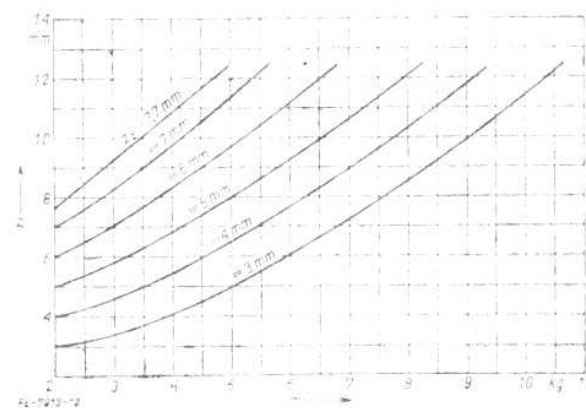
Funkcja zadawania wartości szczeliny powietrznej realizowana jest w układzie za pomocą rezystorów R_2, R_7 oraz potencjometru R_2 . Równanie sumatora ma więc następującą postać

$$(11) \quad U_s = -\frac{R_1}{R_3} U_z - \frac{R_1}{R_4} U_v - \frac{R_1}{R_5} U_i - \frac{R_1}{R_2} U_z$$

Napięcie wyjściowe sumatora steruje wzmacniacz impulsowy prądu stałego.

Wyniki badań modelu LEM

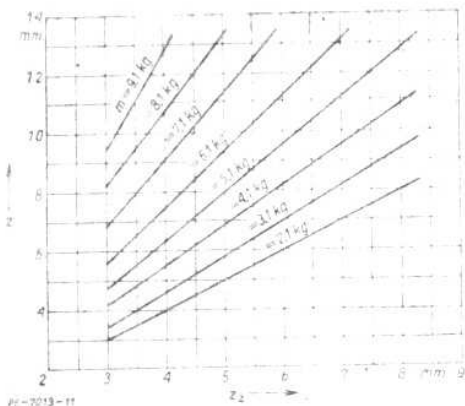
Model układu LEM przeznaczony do badań eksperymentalnych został wykonany w Akademii Techniczno-Rolniczej [4]. Na podstawie badań w stanach statycznych wykreślono charakterystyki mechaniczne $z = f(m)$ przedstawione na rys. 10 oraz charakte-



Rys. 10. Zależność szczeliny z od masy m przy stałej szczelinie zadanej z_2

Wnioski

Zaprojektowany i wykonany układ modelowy URA miał na celu potwierdzenie słuszności rozważań teoretycznych dotyczących możliwości technicznych wykorzystania zjawiska lewitacji elektromagnetycznej. Wyniki badań systemu LEM zachęcają do prowadzenia dalszych badań nad próbami wykorzystania zjawiska lewitacji do unoszenia pojazdów w transporcie naziemnym. Charakterystyki elektromechaniczne (rys. 10) wykazują dobrą sztywność; obszar pracy stabilnej (rys. 13) jest dostatecznie rozległy. Zastosowanie

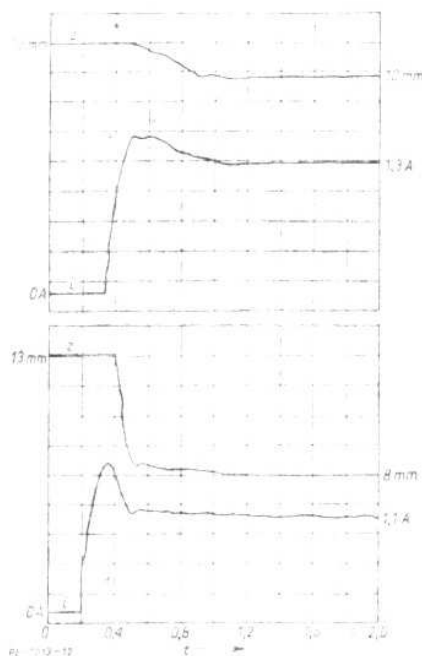


Rys. 11. Zależność szczeliny z od szczeliny zadanej z_2 przy stałej masie m

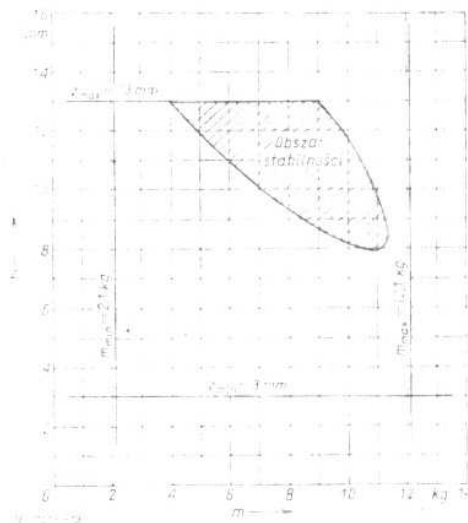
regulacyjne $z = f(z_2)$ — na rys. 11. Jako wartość szczeliny zadanej z_2 przyjmuje się szczelinę przy masie $m = 2,105$ kg przy określonej nastawie potencjometru zadającego tę wartość. Sztywność charakterystyk mechanicznych $z = f(m)$ przy $z_2 = \text{const}$ zawiera się w przedziale $0,6 \cdot 10^{-3} \leq \frac{dz}{dm} \leq 1,6 \cdot 10^{-3}$ m/kg

przy czym sztywność maksymalna odpowiada małym szczelinom zadany i maleje ze wzrostem z_2 .

Badania w stanach dynamicznych dotyczą odpowiedzi układu na wymuszenie skokowe przez zadawanie szczeliny od wartości początkowej $z(0) = 0,013$ m do położenia równowagi z . Oscylogramy przedstawiające przebieg czasowy położenia zwory $z(t)$ oraz prądu uzwojenia elektromagnesu $i(t)$ wywołany zmianą skokową wymuszenia dla $m = 9,1$ kg oraz $m = 8,1$ kg i szczeliny $z = 7$ mm przedstawiono na rys. 12. Oscylogramy odpowiedzi skokowych przy różnych masach i różnych szczelinach zadanych z_2 umożliwiają wyznaczenie podstawowych kryteriów jakości regulacji, tzn. czasu regulacji t_r oraz przeregulowania κ . Parametry powyższe wyznaczone przy szczelinie $z = 3 \div 12$ mm oraz masie $m = 2,105 \div 12,105$ kg pozwoliły określić obszar pracy stabilnej (rys. 13) dla określonych ograniczeń: $t_r \leq 0,5$ s oraz $\kappa \leq 10\%$ ograniczony dodatkowo parametrami konstrukcyjnymi modelu elektromagnesu, tj. masą 2,105 — 12,105 kg i szczeliną 3 — 13 mm.



Rys. 12. Odpowiedź skokowa URA dla masy $m = 8,1$ kg oraz $z = 10$ mm i $z = 8$ mm



Rys. 13. Obszar pracy stabilnej URA dla przeregulowania $\kappa \leq 10\%$ oraz czasu regulacji $t_r \leq 0,5$ s

wanie w rozwiązaniu modelowym wzmacniacza impulsowego prądu stałego znacznie uprościło jego budowę, lecz moc wyjściowa, jaką można uzyskać, jest mała (rzędu kilkuset watów). Unoszenie ciał ferromagnetycznych o masie rzędu setek lub tysięcy kilogramów jest możliwe przy użyciu znacznie większych elektromagnesów niż elektromagnes modelowy, współpracujących z impulsowymi sterownikami tyrystorowymi prądu stałego o regulowanym współczynniku wypełnienia [2, 3, 5]. Proces projektowania URA w przypadku dużych mas unoszonych pozostaje niezmieniony, a zmianie ulega tylko moc elementu sterującego elektromagnes.

LITERATURA

- [1] Gieras J.: Perspektywy zastosowania zjawiska lewitacji magnetycznej w szybkim transporcie naziemnym. *Przeгляд Elektrotechniczny* 1981 nr 1 s. 3-9.
- [2] Matsumura F., Yamada S.: A Method to Control the Suspension System Utilizing Magnetic Attractive Force. *Electrical Engineering in Japan* Vol. 94:1974 No 6, p. 50-57.
- [3] Jayawant 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 No. 9 p. 941-948.
- [4] Gieras J., Bednarz W., Piniarski W.: Praca elektromagnesów prądu stałego o regulowanej automatycznie szczelinie powietrznej w systemach lewitacji elektromagnetycznej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”* 1982 nr 82 s. 195-213.
- [5] Wołoski R.: Wybrane układy i urządzenia półprzewodnikowe. Warszawa 1978 WNT.