

Badania nad zastosowaniem zjawiska lewitacji magnetycznej w transporcie*)

Wstęp

Poszukiwanie środków transportu bardziej ekonomicznych pod względem zużycia paliw od samolotów i szybszych od kolei szynowych skłoniło do podjęcia w wielu krajach badań nad zastosowaniem zjawiska lewitacji magnetycznej w transporcie naziemnym. Stosuje się dwa rodzaje unoszenia pojazdów korzystając z siły:

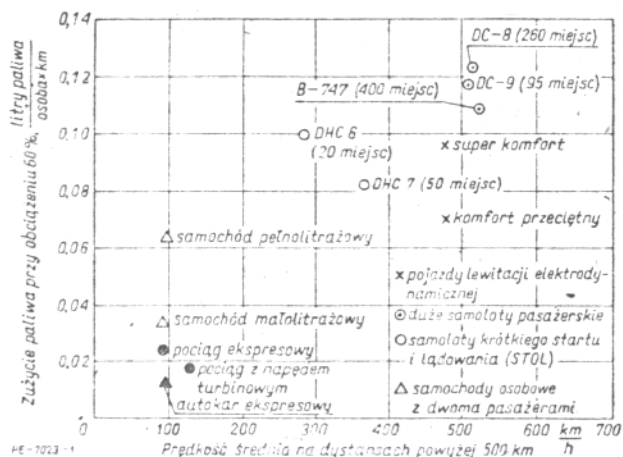
— odpychania magnesów trwałych (ewentualnie elektromagnesów) lub przyciągania elektromagnesów zasilanych prądem stałym o regulowanej automatycznie szczeliny powietrznej;

— odpychania, w wyniku oddziaływania prądów wirowych w elementach nieferromagnetycznych na pole magnetyczne elektromagnesów zasilanych prądem stałym lub zmiennym.

Sposób pierwszy jest stosowany przy prędkości do 100 km/h w systemach lewitacji elektromagnetycznej (LEM), drugi zaś — przy prędkości do 500 km/h w systemach lewitacji elektrodynamicznej (LED).

W systemach LED do wytwarzania silnych pól magnetycznych stosuje się bardzo często elektromagnesy nadprzewodzące, chociaż również istnieje możliwość uzyskania odpowiednich sił unoszenia pojazdów za pomocą elektromagnesów konwencjonalnych, tzn. o rdzeniach ferromagnetycznych. Do napędu pojazdów stosuje się albo silniki indukcyjne liniowe (SIL) lub silniki synchroniczne liniowe (SSL), albo też silniki odrzutowe.

Na rysunku 1 przedstawiono zużycie paliwa przez różne środki transportu na trasach powyżej 500 km



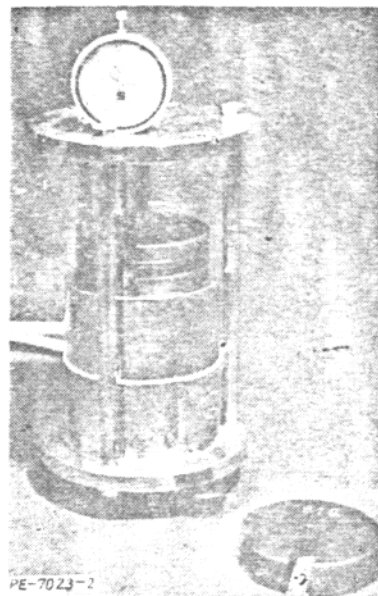
Rys. 1. Zużycie paliwa przez różne środki transportu na trasach powyżej 500 km (dla pojazdów lewitacji elektrodynamicznej założono, że energia elektryczna jest wytwarzana w elektrowniach ciepłych) [1]

[1]. Pojazdy LED osiągając zbliżone prędkości są bardziej ekonomiczne od samolotów i porównywalne pod względem zużycia energii z samochodami (przy prawie pięciokrotnie większej prędkości).

Lewitacja elektromagnetyczna

Siły odpychania elektromagnesów zasilanych prądem stałym

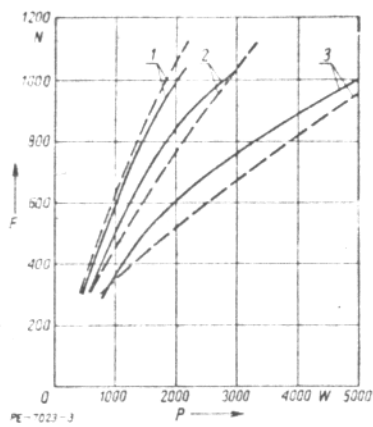
W Zakładzie Maszyn i Napędów Elektrycznych ATR w Bydgoszczy zaprojektowano i wykonano dwa modele elektromagnesów mających obwód magnetyczny o symetrii osiowej ze stali konstrukcyjnej St 3, z których mniejszy model (nr 1) przedstawiono na rys. 2 [2]. Modele elektromagnesów są wyposażone



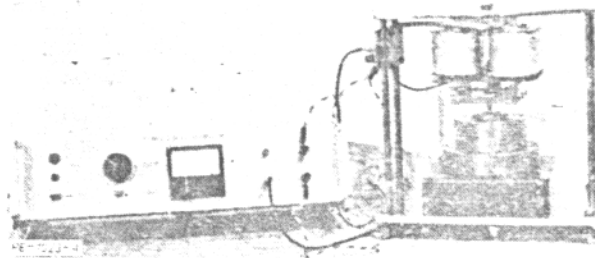
Rys. 2. Elektromagnes modelowy (model nr 1) o symetrii osiowej do badania sił odpychania

w przewodniczącym rdzeniu, zapewniając stabilizację w płaszczyźnie powierzchni aktywnych. Każdy model składa się z dwóch identycznych rdzeni, z których jeden jest ruchomy, a drugi nieruchomy, o identycznych uzwojeniach. Uzwojenia elektromagnesów połączone równolegle i zasilono prądem stałym w taki sposób, że strumienie magnetyczne są skierowane przeciwnie. Średnica zewnętrzna rdzenia elektromagnesu większego (model nr 2) wynosi 100 mm, elektromagnesu większego zaś (model nr 1) — 240 mm. Na rysunku 3 przedstawiono zależność siły odpychania F od mocy pobieranej przy stałej szczeliny powietrznej δ dla modelu nr 2. Przy zasilaniu napięciem odkształconym z przekształtnika tyrystorowego, tej samej siły odpychania odpowiada na ogół większy pobór mocy niż przy zasilaniu napięciem stałym nie zawierającym tętnień. Dla takich samych wymiarów gabarytowych

*) W Zakładzie Maszyn i Napędów Elektrycznych Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy od 1979 r. są prowadzone badania teoretyczne i eksperymentalne związane z korzystaniem ze zjawiska lewitacji magnetycznej w szybkim transporcie naziemnym. Badania teoretyczne od 1982 r. są prowadzone w ramach zadań Grupy Tematycznej nr 1 (Teoria Pola) podproblemu węzłowego 05.5A „Wybrane podstawowe badania w dziedzinie elektrotechniki”.



Rys. 3. Zależność siły odpychania F elektromagnesu od mocy pobieranej P (model nr 2): 1 — $\delta = 10$ mm; 2 — $\delta = 20$ mm; 3 — $\delta = 40$ mm — zasilanie napięciem praktycznie nie zawierającym tętnień; - - - zasilanie z prostownika jednofazowego półsterowanego w układzie mostkowym



Rys. 4. Model systemu LEM składający się z elektromagnesu, czujnika położenia zwory oraz układu regulacji automatycznej szczeliny powietrznej

rdzeni i parametrów uzwojeń siły odpychania elektromagnesów są dużo mniejsze od sił przyciągania. Sprawność energetyczna rośnie wraz ze wzrostem wymiarów gabarytowych.

Sprężenie przyciągania elektromagnesów prądu stałego o regulowanej automatycznie szczeliny powietrznej

Model systemu LEM, składający się z elektromagnesu o rdzeniu w kształcie litery U, czujnika położenia zwory oraz układu regulacji automatycznej szczeliny powietrznej przedstawiono na rys. 4 [3]. Przekrój rdzenia oraz zwory wykonanych ze stali konstrukcyjnej St4s jest równomierny, jednakowy i wynosi $0,015 \times 0,12$ m². 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 umieszczonych na każdej z kolumn rdzenia i połączonych równolegle. Wartość szczeliny powietrznej z , prędkość liniowa przemieszczania się unoszonej masy w kierunku pionowym oraz prąd uzwojenia elektromagnesu są wykorzystywane jako sygnały sprzężeń zwrotnych, do regulacji napięcia zasilającego (rys. 5). Regulacja napięcia zasilającego uzwojenie odbywa się w taki sposób, ażeby można było utrzymać stałą, o żądanej wartości, szczelinę powietrzną między rdzeniem a zworą elektromagnesu. Do celów badawczych — w przeciwieństwie do rozwiązań stosowanych w pojazdach modelowych LEM — nie stosujemy dodatkowej bezstykowej stabilizacji zwory [4]. Problem ten rozwiązano w prosty sposób przez wyposażenie zwory w prowadnicę teleskopową zapewniającą minimalny współczynnik tarcia statycznego. Badania odpowiedzi układu na wymuszenie jednostkowe wykonano przez skokowe zadawanie szczeliny

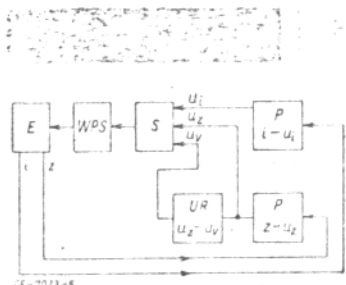
powietrznej od wartości początkowej 13 mm do punktu równowagi. Oscylogramy odpowiedzi skokowej pozwalają wyznaczyć podstawowe kryteria czasowe jakości regulacji, tzn. przeregulowanie oraz czas regulacji (ustalania) t_r (rys. 6).

Elektromagnesy zbliżone kształtem do rozpatrywanego elektromagnesu modelowego pełnią rolę kół w pojazdach LEM. Zworami dla układu takich elektromagnesów są lite prowadnice stalowe. Wskutek ruchu elektromagnesu, prądy wirowe w przewodnicy osłabiają pole magnetyczne w szczeliny powietrznej. Im większa jest prędkość, tym większa jest reakcja prądów wirowych rotacji na pole pierwotne. Oprócz siły przyciągania elektromagnesu, tzn. siły unoszącej pojazd, działają dwie siły elektrodynamiczne zależne od prędkości: siła hamująca oraz siła normalna skierowana przeciwnie do siły przyciągania. Metodą wyznaczenia tych sił oraz rozkładu pola elektromagnetycznego w systemie LEM zawiera m.in. praca [5].

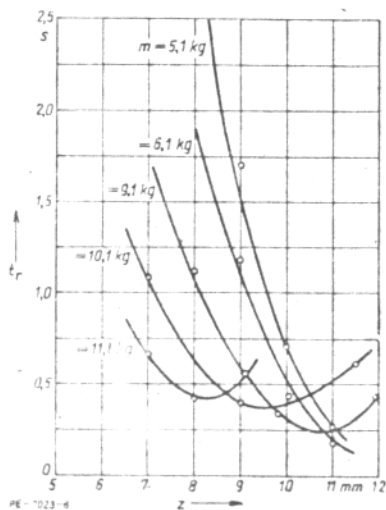
Lewitacja elektrodynamiczna

Tor aktywny o strumieniu magnetycznym poprzecznym

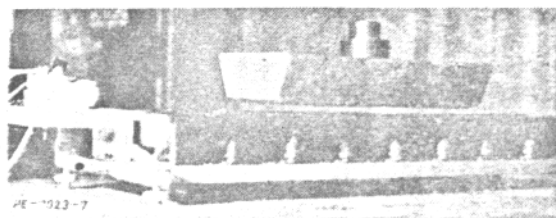
Najprostszy system LED składa się z toru aktywnego (części pierwotnej SIL) o biegunach jawnych i strumieniu magnetycznym poprzecznym oraz specjalnie ukształtowanej części wtórnej [6, 7]. Obwód magnetyczny części pierwotnej zawiera rdzenie pakietowane z blachy elektrotechnicznej w kształcie litery E, ułożone w dwóch rzędach. W każdym rzędzie powinno być mk rdzeni, przy czym m — liczba faz, $k = 1, 2, 3, \dots$. W wykonaniu modelowym pojedyncza cewka elektromagnesu zawiera 150 zwojów nawiniętych przewodem miedzianym o średnicy $\Phi 1,35$ mm. Szereg elektromagnesów może być rozpatrywany jako część pierwotna dwustronnego SIL, rozwiniętego względem osi równoległej do kierunku przemieszczania się fali wędrującej w ten sposób, że powierzchnie aktywne obu induktorów leżą w jednej



Rys. 5. Schemat funkcjonalny systemu LEM przedstawionego na rys. 4: E — elektromagnes; WPS — wzmacniacz prądu stałego; S — sumator; $P(i-u_1)$ — przetwornik prądu i na napięcie u_1 ; $P(z-u_2)$ — przetwornik odległości z na napięcie u_2 ; UR — układ różniczkujący



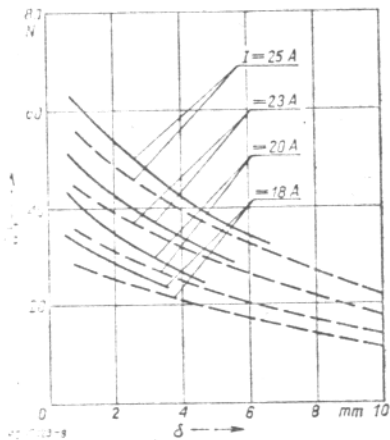
Rys. 6. Zależność czasu regulacji t_r od szczeliny powietrznej z przy stałej masie unoszonej m (pomiar)



Rys. 7. Unoszenie stabilne łodzi aluminiowej z dnem płaskim w polu elektromagnesów prądu przemiennego

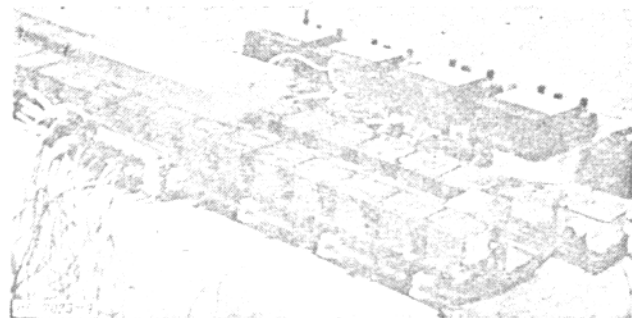
plaszczyźnie. Część wtórna jest wykonana z lekkiego stopu aluminiowego w kształcie łodzi (grubość dna 9,75 mm) i ma ściany boczne nachylone pod kątem 60° względem powierzchni aktywnej. Taki kształt części wtórnej zapewnia maksymalną siłę unoszenia i jej stabilizację boczną z uwagi na występowanie dwóch sił F_y działających na ściany boczne w przeciwnych kierunkach [6]. Przy zasilaniu elektromagnesów części pierwotnej z sieci jednofazowej część wtórna będzie unoszona nad częścią pierwotną, znajdując się w stanie równowagi trwałej względem pionu (osi z) oraz osi y , równoległej do płaszczyzn kształtek rdzeni. Równowagę trwałą względem wszystkich współrzędnych x, y, z można otrzymać zasilając elektromagnesy z sieci trójfazowej w taki sposób, aby zostały wytworzone dwa pola magnetyczne wędrujące w kierunkach przeciwnych na każdej półkole części pierwotnej. SIL wytwarzający zarówno siłę unoszenia F_z , siłę stabilizacji bocznej F_y , jak i siłę ciągu F_x otrzyma się wówczas, jeżeli fala wędrująca będzie miała taki sam kierunek ruchu wzdłuż całej części pierwotnej (kolejność połączeń cewek elektromagnesów $R, -S, T, -R, S, -T, \dots$). Kierunek przemieszczania się części wtórnej można zmieniać za pomocą dwóch przełączników zamocowanych na końcach obwodu magnetycznego części pierwotnej.

Pierwszym modelem (1979 r.) był SIL składający się z 2×9 elektromagnesów (rys. 7). Zależność siły unoszenia F_z od szczeliny powietrznej δ (wysokości unoszenia) przy $I = \text{const}$ przedstawiono na rys. 8.

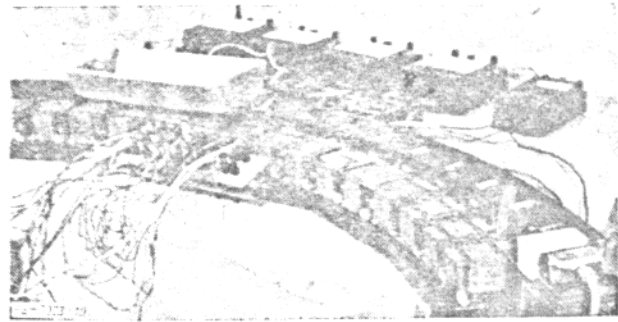


Rys. 8. Siła unoszenia F_z w zależności od wysokości unoszenia δ (szczeliny powietrznej) przy stałym prądzie $I = \text{const}$ dla modelu przedstawionego na rys. 7 zasilanego jednofazowo (50 Hz)
 ——— wyniki pomiarów; - - - - - wyniki obliczeń

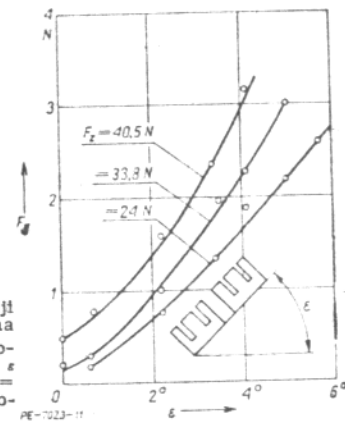
Metodę wyznaczenia sił unoszenia zawierają prace [6, 7]. Model przedstawiony na rys. 7 rozbudowano (1980 r.), wydłużając część pierwotną do 2×18 elektromagnesów (rys. 9). Skonstruowano również identyczną część pierwotną jak na rys. 9, lecz w kształcie wycinka łuku okręgu o promieniu 1,028 m (rys. 10). Do poprawnej pracy silnika wg rys. 10 konieczne jest nachylenie powierzchni aktywnej toru o pewien kąt ϵ



Rys. 9. SIL o strumieniu magnetycznym poprzecznym i części wtórnej unoszonej elektrodynamicznie wzdłuż toru prostoliniowego

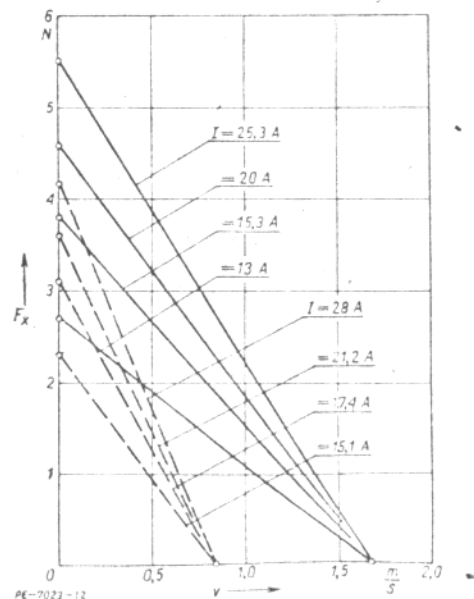


Rys. 10. SIL o strumieniu magnetycznym poprzecznym i części wtórnej unoszonej elektrodynamicznie wzdłuż toru łukowego



Rys. 11. Siła stabilizacji bocznej F_y działająca na część wtórna w zależności od kąta nachylenia ϵ toru łukowego przy $I = 24,7 \text{ A}$, $F_z = \text{const}$ (pomiarly)

względem poziomu w taki sposób, aby zewnętrzny rząd elektromagnesów znajdował się wyżej od rzędu wewnętrznego, tzn. położonego bliżej środka okręgu. Zależność sił stabilizacji bocznej F_y od kąta ϵ przy $I = \text{const}$ oraz $F_z = \text{const}$ przedstawiono na rys. 11. Przybliżone przebiegi charakterystyk mechanicznych $F_x(v)$ przy $I = \text{const}$ SIL o prostoliniowej oraz łukowej części pierwotnej przedstawiono na rys. 12 [8]. Krzywe te otrzymano z pomiarów dwóch punktów dla $v = 0$ oraz dla $F_x = 0$. Kolejnym następnym etapem prac jest budowa zamkniętego toru kołowego, zawierającego 2×72 elektromagnesy pogrupowane w sekcje składające się z 2×6 elektromagnesów



Rys. 12. Przybliżone przebiegi siły ciągu F_x w zależności od prędkości v przy $I = \text{const}$ dla SIL o strumieniu magnetycznym poprzecznym zasilanych z sieci 3-fazowej 50 Hz (pomiarly)
 ——— tor prostoliniowy; - - - - - tor łukowy



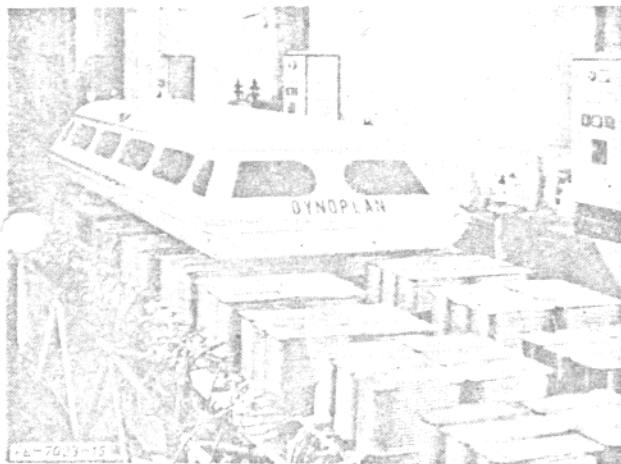
Rys. 13. Budowa zamkniętego toru kołowego o uzwojeniu podzielonym na kolejno przełączane sekcje



Rys. 16. „Taksówka elektrodynamiczna” o masie 320 kg przeznaczona dla dwóch pasażerów



Rys. 14. Budowa toru o długości 12 m składającego się z 54 zespołów elektromagnesów trójfazowych dla pojazdów modelowych „Dynoplan” oraz „taksówki elektrodynamicznej”



Rys. 15. Pojazd modelowy „Dynoplan” o masie 210 kg

(rys. 13) oraz identycznego toru prostego. Załączane będą automatycznie tylko te sekcje, ponad którymi w danej chwili znajduje się model pojazdu.

Tor aktywny o strumieniu magnetycznym podłużnym

Obecnie trwają prace konstrukcyjno-montażowe nad budową toru aktywnego składającego się z 2×27 zespołów elektromagnesów trójfazowych sześciobiegunowych dla pojazdów o masie rzędu kilkuset kilogramów (rys. 14). Moc czynna pobierana przez pojedynczy zespół elektromagnesów wynosi 4 kW, co daje pobór mocy czynnej przez cały tor $54 \times 4 \text{ kW} = 216 \text{ kW}$. Długość toru wynosi 12 m, podziałka biegunowa 0,1 m, prędkość synchroniczna harmonicznej

podstawowej fali wędrującej $v_s = 2fr = 2 \cdot 50 \cdot 0,1 = 10 \text{ m/s} \approx 36 \text{ km/h}$. Linie strumienia magnetycznego są równoległe do kierunku przemieszczania się pola magnetycznego. Na tak skonstruowanym torze będą unoszone i badane dwa modele pojazdów: „Dynoplan” o masie 210 kg (rys. 15) oraz „taksówka elektrodynamiczna” o masie 320 kg przeznaczona dla dwóch pasażerów (rys. 16). Zarówno jeden jak i drugi model pojazdów mają podwozie składające się z trzech połączonych ze sobą równoległe elementów w kształcie łodzi tworzących trimaran. Podwozie modelu „Dynoplan” jest wykonane ze stopu aluminiowego (wysokość unoszenia 30–40 mm), „taksówki elektrodynamicznej” zaś — z miedzi (wysokość unoszenia 50–60 mm). Elementy składowe zarówno toru, jak i modeli pojazdów zostały wykonane w Berlinie Zachodnim [9, 10].

Zakończenie

- Obecnie w warunkach krajowych występują poważne trudności ze skonstruowaniem systemu LED z elektromagnesami nadprzewodzącymi.
- Najbardziej ekonomiczny pod względem nakładów inwestycyjnych oraz zużycia energii elektrycznej jest system LEM, który przy prędkości do 100 km/h — jeśli chodzi o komunikację miejską i podmiejską — może być konkurencyjny z tramwajami oraz metrem.

LITERATURA

- [1] Atherton D. L., Belanger P. R., Eastham A. R., Eggleton P. L., Hayes W. F., Rudback N. E., Slemmon G. R.: High Speed Magnetically Levitated Transport Development in Canada. *Journal of Advanced Transport* Vol. 14: 1980 No 1 p. 73–105.
- [2] Gieras J.: Siły odpychania elektromagnesów zasilanych prądem stałym. VII Sympozjum „Zjawiska elektromagnetyczne w obwodach nieliniowych” PAN, PTEIS Politechnika Poznańska Poznań 1981 ss. 46–51.
- [3] 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 ss. 195–213.
- [4] Gieras J.: Perspektywy zastosowania zjawiska lewitacji magnetycznej w szybkim transporcie nazemnym. *Przegląd Elektrotechniczny* 1981 nr 1 ss. 3–9.
- [5] Gieras J.: Electrodynamic forces in electromagnetic levitation systems. *Acta Technica CSAV* 1982 No 5 p. 532–545.
- [6] Gieras J.: Linear Induction Motor With Transverse Flux and The Secondary Suspended Electrodynamically. *Elektrotechnický časopis*, 32: 1981 čis. 7 ss. 506–519.
- [7] Gieras J.: Electrodynamic Levitation Forces — Theory and Small — Scale Test Results. *Acta Technica CSAV* 1981 No 4 p. 389–414.
- [8] Gieras J.: Linear Induction Motors With Transverse Flux in Electrodynamic Levitation Systems. International Conference on Electrical Machines ICEM 82. Proceedings Part 3, Budapest 1982 p. 980–983.
- [9] Hochhäusler P.: A Catamaran as a Magnetically Levitated Vehicle. Conference on „Linear electric machines” London 1974 p. 216–222.
- [10] Hochhäusler P.: Die Fortentwicklung der magnetischen Schwebebahn auf elektrodynamischer Basis. *ETZ* Bd. 102: 1981 H. 7 S. 364–366.