

## Perspektywy zastosowania zjawiska lewitacji magnetycznej w szybkim transporcie naziemnym

### Wstęp

W naukach przyrodniczych i technicznych występuje zjawisko fizyczne lewitacji, polegające na unoszeniu i zawieszaniu w powietrzu ciał materialnych wbrew prawu powszechnego ciężenia<sup>1)</sup>. Na przykład wg Boerdijka [1], ciało podlega zjawisku lewitacji, jeżeli znajduje się w stanie równowagi trwałej lub obojętnej, przy czym nie istnieje jakikolwiek wizualny styk materialny między ciałem a jego otoczeniem. Lewitację stabilną ciał przewodzących nieferromagnetycznych można uzyskać w polu elektromagnetycznym, lewitację ciał ferromagnetycznych — w polu magnetycznym, stosując układy sprzężenia zwrotnego. W technice tylko te sposoby umożliwiają zawieszenie dużej masy przy umiarkowanym poborze energii [2]. Pomysł zastosowania cewek zasilanych prądem przemiennym do lewitacji i napędu pojazdów zainicjował prawdopodobnie francuski wynalazca Bachalet w 1914 r. [3], przewidując pojazdy przyszłości na poduszce magnetycznej, pędzące z prędkością rzędu setek kilometrów na godzinę. Przy prędkości powyżej 250 km/h, ze względu na zjawisko adhezji, silniki wirujące nie nadają się do napędu, koła jezdne zatem należy zastąpić „poduszką magnetyczną”, stosując jednocześnie silniki o ruchu postępowym, np. silniki elektryczne liniowe lub silniki odrzutowe.

Badania o znaczeniu praktycznym w dziedzinie napędów z silnikami liniowymi doczekały się realizacji po drugiej wojnie światowej, pod koniec lat czterdziestych. Pionierem w tej dziedzinie jest prof. E. R. Laithwaite, który przede wszystkim w latach 1957—1966 opublikował wiele prac zawierających interesujące pomysły zastosowań silników liniowych, np. [4, 5, 6]. Prowadzone w wielu krajach badania potwierdziły ok. 1965 r. przekonanie, że silnik liniowy jest najodpowiedniejszym elementem napędowym w szybkim transporcie naziemnym.

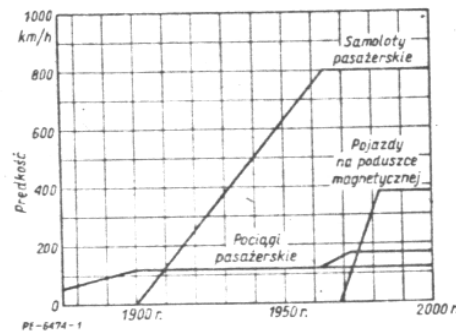
Sugestia Powella i Danby'ego w 1966 r. [7] o możliwości wykorzystania elektromagnesów nadprzewodzących do zawieszenia pojazdu poruszającego się z dużą prędkością doprowadziła do realizacji programu szeroko zakrojonych badań w kilku wysoko uprzemysłowionych krajach, tzn. RFN, Stanach Zjednoczonych, Kanadzie, Japonii oraz Wielkiej Brytanii.

### Zalety systemu lewitacji magnetycznej w transporcie

Współczesny transport wewnętrzny w krajach wysoko uprzemysłowionych z trudem spełnia stawiane zadania przewozu rosnącej z każdym rokiem masy towarowej oraz liczby osób. Dotychczasowe konwencjonalne środki transportu są albo zbyt wolne, albo — w związku z zarysowującymi się trudnościami paliwowo-energetycznymi — nieekonomiczne, tzn. transport kolejowy, samochodowy oraz żegluga śródlądowa są zbyt wolne, transport lotniczy zaś — zbyt energochłonny i drogi. Gdyby udało się skonstruować

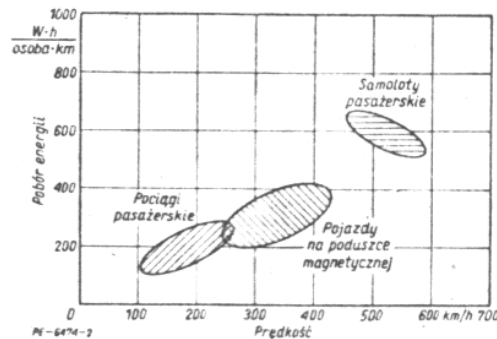
<sup>1)</sup> Pojęcie lewitacji zostało wprowadzone także przez okultyzm, tj. naukę o istnieniu nadprzyrodzonych sił tajemnych, z którymi obcować mogą tylko ludzie „wtajemniczeni”, a także ogół praktyk magicznych związanych z tą nauką. Pojęcie to występuje również w parapsychologii (tj. w dziedzinie dotyczącej zjawisk metapsychologicznych), w której lewitację traktuje się jako formę telekinety i psychokinety.

środki transportu tańsze od samolotów i szybsze od pociągów, byłyby one rozwiązaniem optymalnym, koniecznym do wdrożenia. Badania wykazały, że tym optymalnym środkiem transportu są szybkie pojazdy naziemne poruszające się na poduszce magnetycznej. Na rysunku 1 przedstawiono wykresy przeciętnych prędkości pociągów, samolotów oraz pojazdów na poduszce magnetycznej w kolejnych latach dwudziestego wieku, na rysunku 2 natomiast — pobór energii przez te pojazdy w zależności od rozwijanej prędkości.



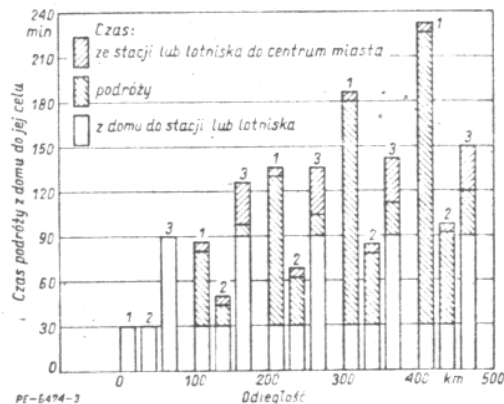
Rys. 1. Przeciętne prędkości podróżowania w kolejnych latach XX w.

Wdrożenie nowego systemu transportu wymaga olbrzymich nakładów inwestycyjnych. Dlatego też należy wykazać, że system taki spełnia wymagania wszystkich stron zainteresowanych jego budową, a więc użytkowników (przedsiębiorstw i pasażerów korzystających z usług), eksploatatorów (inwestorów, właścicieli, obsługi) oraz nie zakłóca środowiska naturalnego. Użytkownik wymaga przede wszystkim krótkiego czasu przewozu — a więc dużej prędkości, wysokiego stopnia bezpieczeństwa, niezawodności i wygody, zalet użytkowych w stosunku do innych środ-



Rys. 2. Pobór energii przez pasażerskie środki transportu w zależności od prędkości

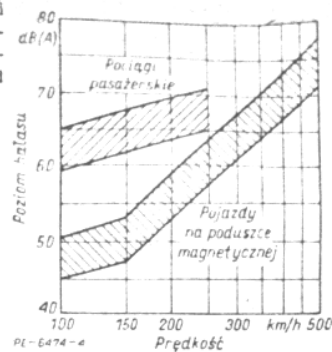
ków transportu oraz umiarkowanej opłaty za przewóz. Czasy podróży kolejami szynowymi, samolotami pasażerskimi oraz pojazdami na poduszce magnetycznej na trasach o długości do 400 km przedstawia histogram na rys. 3. Eksploatator z kolei ma na uwadze rentowność, wysoki stopień przepustowości, uniwersalność i adaptabilność, umiarkowany pobór energii oraz niski nakład środków niezbędnych do utrzymania w ruchu. W celu ochrony środowiska naturalnego należy zapewnić uniknięcie zanieczyszczeń i nadmiernych hałasów, minimalne zajęcie powierzchni terenu przez zainstalowane urządzenia, zachowanie pierwotnego krajobrazu i infrastruktury, niewywoływanie zakłóceń ekologicznych, umiarkowany pobór energii.



Rys. 3. Czasy podróży z miejsca pobytu do jej celu przy wykorzystaniu różnych środków transportu  
1 — pociągami; 2 — pojazdami na poduszce magnetycznej; 3 — samolotami pasażerskimi

Studia i badania na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych w wysoko rozwiniętych krajach zachodnich wykazały, że transport naziemny wykorzystujący zjawisko lewitacji magnetycznej jest inwestycją opłacalną. Program wstępnych badań naukowych obejmował badanie części składowych systemu (sił lewitacji, silników liniowych, torów, prowadnic, zabezpieczeń), pojazdów modelowych na torach eksperymentalnych, układów sterowania systemem. Wyniki badań były tak zachęcające, że natychmiast przystąpiono do realizacji zadań rozwojowych nowego systemu transportu. Przewiduje się, że przy prędkości ok. 400 km/h systemy lewitacji magnetycznej znajdą zastosowanie w transporcie międzynarodowym (średnia odległość między stacjami 150—200 km), przy prędkości ok. 300 km/h, zaś na trasach krótkich 50—100 km. Wagony pasażerskie będą mogły pomieścić 200—600 osób, wagony towarowe będą miały ładowność 600—1000 t. Tory powinny być zamocowane na specjalnych dźwigarach podpierających. Sterowanie ruchem oraz pracą pojazdów musi być maksymalnie zautomatyzowane. Z tego też względu, jak również z uwagi na obejmowanie toru przez pojazd, jazda będzie bardzo bezpieczna. Wyposażenie kabin pasażerskich będzie odpowiadać komfortowi w nowoczesnych wagonach kolejowych. Pojazdy na poduszce magnetycznej nie wydzielają dymu ani spalin. Nie są również głośniejsze od kolei szynowej (rys. 4). Z uwagi na bezstykowy system zawieszenia nie występuje żadne mechaniczne zużycie torów i podwozia. Przez to koszty utrzymania w ruchu tych elementów są niższe w stosunku do kolei konwencjonalnych. Mimo większych prędkości, zużycie energii nie jest większe niż w samochodach osobowych, tzn. ok. 1,5-krotnie większe niż w kolejach szynowych (rys. 2). Według danych w 1974 r. koszty budowy 1 km linii dwutorowej dla pojazdów Magneplane (St. Zjednoczone) szacuje się w zakresie od 370 000 do 1 238 000 dolarów [8].

Rys. 4. Poziomy głośności kolei szynowych oraz pojazdów na poduszce magnetycznej w zależności od prędkości

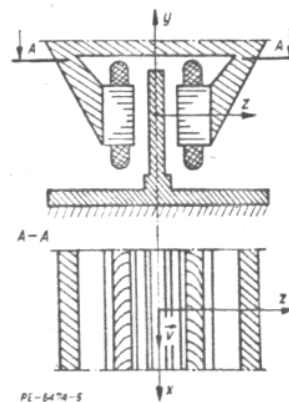


### Napęd pojazdów poruszających się na poduszce magnetycznej

Do napędu pojazdów wykorzystujących zjawisko lewitacji magnetycznej stosuje się przeważnie silniki indukcyjne liniowe dwustronne o krótkiej części pierwotnej oraz silniki synchroniczne liniowe jednostronne o długiej części pierwotnej. Silniki indukcyjne jednostronne są rzadziej stosowane.

### Silniki indukcyjne liniowe

Krótką część pierwotną silnika indukcyjnego liniowego, mającą z reguły uzwojenie trójfazowe, jest zamocowana do podwozia pojazdu, długa część wtórna jest usytuowana pionowo w osi symetrii toru (rys. 5).



Rys. 5. Silnik indukcyjny liniowy dwustronny do napędu pojazdów na poduszce magnetycznej

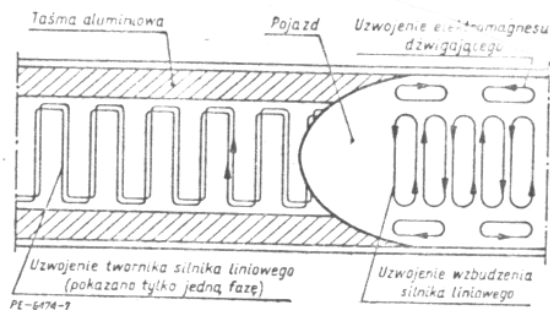
Część wtórna może być zarówno płytą aluminiową, jak i stalową, pokrytą po obydwu stronach warstwą aluminium lub miedzi. Poślizg części ruchomej względem harmonicznej podstawowej fali wędrującej wynosi ok. 10% lub nieco więcej i decyduje zasadniczo o sprawności napędu liniowego, gdyż  $P_{mech} = (1-s)(P_1 - \Delta P_1) \approx (1-s)P_1$ , przy czym:  $P_{mech}$  — moc mechaniczna,  $P_1$  — moc pobierana z sieci,  $\Delta P_1$  — straty mocy w części pierwotnej.

Wymagane jest zasilanie ze źródła o regulowanej i stabilizowanej częstotliwości, dla zapewnienia łagodnego przyspieszenia przy starcie i stałej prędkości na trasie oraz ograniczenia strat energii podczas ruchu. Ponadto optymalna częstotliwość zasilania jest większa od częstotliwości technicznych 50 Hz oraz 60 Hz. Przy zasilaniu np. napięciem o częstotliwości 60 Hz i prędkości synchronicznej 60÷120 m/s długość fali harmonicznej podstawowej pola magnetycznego wędrującego wynosi 1÷2 m [3]. Biorąc pod uwagę wymiary napędu liniowego oraz jego moc, konwencjonalne silniki liniowe o strumieniu podłużnym (linie pola magnetycznego w jarzmie części pierwotnej) rów-

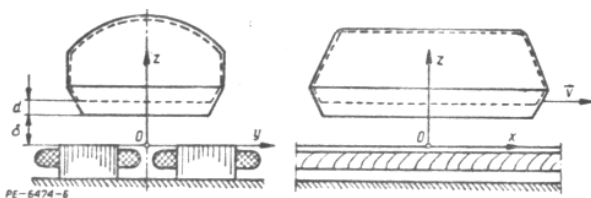
nolegle do kierunku ruchu) miałyby bardzo dużą masę, dużą reakcję rozproszenia oraz małą sprawność. Silniki liniowe o strumieniu poprzecznym (linie pola magnetycznego w jarzmie części pierwotnej prostopadle do kierunku ruchu) przy tej samej długości fali pola wędrującego odznaczają się lepszymi parametrami użytkowymi.

Jedną z podstawowych trudności technicznych jest zachowanie jak najmniejszej szczeliny powietrznej między rdzeniem części pierwotnej a częścią wtórną. Następnym problemem jest siła normalna, która w przypadku nieferromagnetycznej części wtórnej odpycha ją od części pierwotnej. Przy małych prędkościach siła normalna jest mniejsza od siły ciągu, ale przy prędkościach powyżej 50 m/s może być dużo od niej większa. Zastosowanie stalowej części wtórnej pokrytej warstwą miedzi lub aluminium zmniejsza normalną siłę odpychającą wskutek pojawienia się siły naciągu magnetycznego. Z drugiej strony, siłę odpychającą można wykorzystać do unoszenia pojazdu, budując silnik liniowy jednostronny o długiej części pierwotnej i o specjalnie ukształtowanej krótkiej części wtórnej z aluminium lub miedzi (rys. 6) [9, 10, 11, 12]. Pojazd jak gdyby „plynie po rzece

powietrznej, która w pojazdach wykorzystujących zjawisko lewitacji wynosi 10÷25 cm (w pojazdach o unoszeniu elektrodynamicznym). Problem synchronizacji nie istnieje, jeżeli silnik jest zasilany ze źródła o częstotliwości regulowanej. Uzwojenie trójfazowe części pierwotnej (długiej) jest wykonane z izolowanych przewodów aluminiowych odpowiednio ukształtowanych, ułożonych i zamocowanych wzdłuż toru, między prowadnicami (rys. 7). Rdzeń ferro-



Rys. 7. Pojazd z silnikiem synchronicznym liniowym jednostronnym na torze aktywnym



Rys. 6. Silnik indukcyjny liniowy do jednoczesnego napędu oraz unoszenia elektrodynamicznego pojazdu na poduszce magnetycznej [9, 10, 11, 12]

magnetycznej” wytworzonej przez dwa rzędy silników liniowych pełniących funkcję układów zawieszania, napędu oraz stabilizacji bocznej.

Dla poślizgu ok. 10% częstotliwość prądów wirowych w części wtórnej jest mała (5÷8 Hz przy częstotliwości zasilania 50÷60 Hz) i zjawisko naskórkowości w tych warunkach, praktycznie biorąc, nie wpływa na parametry i pracę silnika liniowego. Wpływ tego zjawiska może być natomiast zauważalny przy rozruchu i hamowaniu.

Stała czasowa dyfuzji pola elektromagnetycznego [13]

$$(1) \quad T_d = \frac{\mu_0 \mu_r \gamma d^2}{\pi^2}$$

dla aluminiowej części wtórnej o grubości 10 mm wynosi ok. 0,0004 s. Tak więc strumień magnetyczny od strony nabiegającej części pierwotnej nie wnika od razu do części wtórnej. Rozkład siły ciągu wzdłuż powierzchni aktywnych (w kierunku ruchu pola) silnika jest zatem nierównomierny. Siła ciągu od strony nabiegającej ma wartość równą zero, na końcu rdzenia części pierwotnej zaś — przyjmuje wartość maksymalną. Dlatego też, ażeby ograniczyć wpływ podłużnych efektów końcowych, należy stosować długie silniki wielobiegunowe.

Mały współczynnik mocy silników indukcyjnych liniowych wymaga stosowania kompensacji mocy biernej.

### Silniki synchroniczne liniowe

Silniki synchroniczne w porównaniu z silnikami indukcyjnymi o tej samej mocy znamionowej są mniejsze, bardziej sprawne oraz co najważniejsze — mogą pracować przy znacznie większej szczelinie

magnetyczny nie jest potrzebny, ponieważ uzwojenie nadprzewodzące części wtórnej usytuowanej w „podwoziu” pojazdu wytwarza silne pole magnetyczne o indukcji 1÷5 T [14]. Aktywna długa część pierwotna z kabli aluminiowych, z uwagi na mniejsze zużycie aluminium, jest tańsza od długiej części wtórnej silnika indukcyjnego, tzn. z płyt aluminiowych [3]. Silniki synchroniczne o małych mocach i małych szczelinach powietrznych mogą być wyposażone w rdzeń ferromagnetyczny, który służy jednocześnie do zawieszania pojazdu. Poprzez regulację prądu i częstotliwości w uzwojeniach części pierwotnej można zmieniać w szerokim zakresie stosunek siły ciągu do siły normalnej, który powinien być inny przy prędkości ustalonej niż w stanach pozastatycznych [16].

Długość optymalna harmonicznej podstawowej fali części pierwotnej jest nieco większa od  $2\pi\delta$ , przy czym  $\delta$  — wysokość cewek wzbudzących (zasilanych prądem stałym) względem cewek części pierwotnej, co narzuca częstotliwość zasilania w zakresie od 20 do 100 Hz [3].

### Unoszenie pojazdów

W szybkim transporcie naziemnym stosuje się dwa rodzaje unoszenia pojazdów wykorzystujące siły:

— przyciągania elektromagnesów zasilanych prądem stałym, działające na elementy ferromagnetyczne;

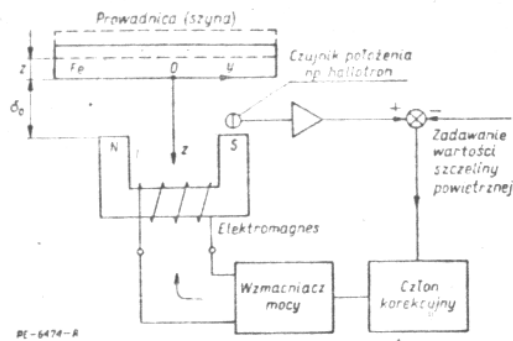
— odpychania, w wyniku oddziaływania prądów wirowych w elementach nieferromagnetycznych na pole magnetyczne elektromagnesów zasilanych prądem stałym lub zmiennym.

Sposób pierwszy ma miejsce w systemach lewitacji elektromagnetycznej, drugi zaś — w systemach lewitacji elektrodynamicznej (systemach repulsyjnych).

### Lewitacja elektromagnetyczna

W podwoziu pojazdów umieszcza się elektromagnesy w kształcie litery U zwrócone biegunami ku górze, dla których zworami są prowadnice stalowe. Na rysunku 8 przedstawiono taki elektromagnes wraz z układem sterowania, pracujący przy stałej szczelinie powietrznej  $\delta_0 + z$ , przy czym  $\delta_0$  jest szczeliną minimalną, narzuconą przez warunki techniczne funkcjonowania systemu.

Czujnik hallotronowy położenia elektromagnesu umieszczony na powierzchni bieguna (w szczelinie



Rys. 8. Elektromagnes ze szczeliną powietrzną pracujący w układzie zamkniętym regulacji automatycznej

powietrznej) ma za zadanie reagować na zmiany szczeliny powietrznej i poprzez odpowiednie układy elektroniczne — sterować prądem cewki elektromagnesu. Jeżeli szczelina powietrzna maleje — prąd w uzwojeniu elektromagnesu powinien również maleć, jeżeli szczelina rośnie — prąd elektromagnesu powinien rosnąć. Wymagany jest więc układ zamknięty regulacji automatycznej prądu, mający za zadanie utrzymywanie stałej, narzuconej zewnętrznie szczeliny powietrznej  $\delta_0 + z$ . Układ ten powinien zawierać, oprócz przetwornika położenia, wzmacniacz mocy sterujący uzwojenie elektromagnesu oraz człon korekcyjny (kompensacyjny), który jest niezbędny do uzyskania żądanej dokładności regulacji, dostatecznego zapasu stabilności i szybkości działania.

Siła przyciągająca elektromagnes do prowadnicy jest wyrażona zależnością [15]

$$(2) \quad F_z = \frac{\mu_0 S_\delta (iN)^2}{4 \left( \frac{l_{Fe}}{2 \mu_r \frac{S_{Fe}}{S_\delta}} + \delta_0 + z \right)^2}$$

w której:  $\mu_0$  — przenikalność magnetyczna próżni;  $S_\delta$  — pole powierzchni szczeliny powietrznej pod biegunami N-S;  $S_{Fe}$  — przekrój rdzenia elektromagnesu (przyjęto przekrój prowadnicy stalowej, będącej zworą, równy przekrojowi rdzenia elektromagnesu);  $l_{Fe}$  — długość średnia drogi strumienia magnetycznego w rdzeniu;  $N$  — liczba zwojów cewki elektromagnesu;  $\mu_r$  — przenikalność magnetyczna względna rdzenia elektromagnesu zależna od natężenia pola magnetycznego, a więc prądu  $i$  przepływającego przez cewkę.

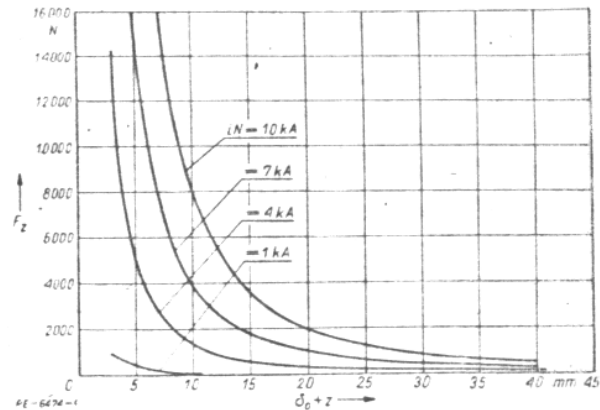
W systemach zawieszania pojazdów  $\delta_0 + z$  jest rzędu kilku do kilkudziesięciu milimetrów. Zakładając wymiary rdzenia elektromagnesu jak w pracy [17], tzn.  $l_{Fe} \approx 0,4$  m,  $\delta_0 + z = 0,01$  m,  $S_{Fe}/S_\delta = 1$  oraz  $\mu_r = 100$ , otrzymuje się  $l_{Fe}/[2 \mu_r (S_{Fe}/S_\delta)] = 0,4/2 \cdot 100 \cdot 1 = 0,002$  m, a zatem w szybkim transporcie naziemnym można przyjąć  $l_{Fe}/[2 \mu_r (S_{Fe}/S_\delta)] \ll \delta_0 + z$ . Otrzymuje się wtedy przy  $\delta_0 + z \neq 0$  prosty wzór na siłę zawieszania pojazdu

$$(3) \quad F_z \approx \frac{\mu_0 S_\delta (iN)^2}{4 (\delta_0 + z)^2}$$

Przy zasilaniu elektromagnesu prądem stałym  $I$ , nie zawierającym tętnień, we wzorze (3)  $i = I$ , przy zasilaniu prądem sinusoidalnie zmiennym  $i = \sqrt{2} I_{Sk} \sin(\omega t + \varphi_1)$ , przy zasilaniu zaś prądem odkształconym z przekształtnika półprzewodnikowego

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_{mk}).$$

Zależność siły  $F_z$  od szczeliny powietrznej elektromagnesu zasilanego prądem stałym przy  $iN = \text{const}$  dla  $S_\delta = 0,025$  m<sup>2</sup> przedstawiają wykresy podane na rys. 9.



Rys. 9. Zależność siły  $F_z$  przyciągania elektromagnesu od szczeliny powietrznej  $\delta_0 + z$  przy stałym przepływie  $iN = \text{const}$  oraz  $S_\delta = 0,025$  m<sup>2</sup>

Układ zawieszania za pomocą elektromagnesu sterowanego prądem stałym jest nieliniowym regulatorem położenia, ale przy małych zmianach wartości szczeliny powietrznej oraz prądu cewki — rys. 9, można siłę  $F_z$  zapisać jako funkcję liniową szczeliny powietrznej oraz prądu, tzn.

$$(4) \quad F_z = -k_1 z + k_2 i = -m \frac{d^2 z}{dt^2}$$

przy czym:  $k_1, k_2$  — stałe;  $m$  — masa zawieszona elektromagnetycznie. Przy warunkach początkowych zerowych  $z(0) = 0, \dot{z}(0) = 0$ , równanie (4) można ująć w postaci operatorowej

$$ms^2 Z(s) = k_1 s Z(s) - k_2 I(s)$$

Wyrażając transmitancję wzmacniacza na rys. 8 jako

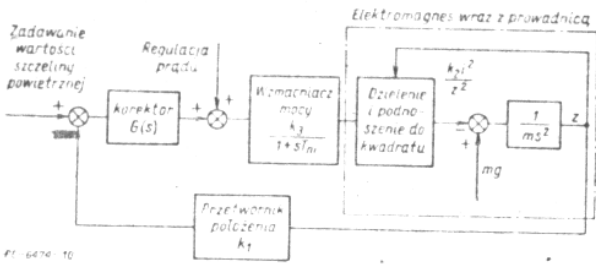
$$(5) \quad \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{k_3}{1 + sT_m}$$

w której:  $U(s)$  — napięcie sterujące w postaci operatorowej;  $T_m$  — stała czasowa wzmacniacza;  $k_3$  — stała, otrzymuje się wyrażenie na transmitancję układu

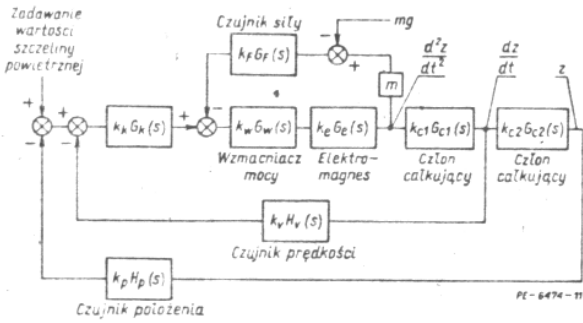
$$(6) \quad \frac{Z(s)}{U(s)} = \frac{-k_2 k_3}{m(1 + sT_m)(s^2 - k_1/m)}$$

Położenie biegunów w równaniu (6) wskazuje, że układ będzie niestabilny nawet przy dowolnym wzroście  $k_2 k_3$  czy też wzmocnieniu przetwornika położenia. W celu uzyskania odpowiedniego zapasu stabilności układu, a jednocześnie dokładności i szybkości działania, należy zastosować człon korekcyjny (kompensacyjny) pomiędzy przetwornikiem położenia a wzmacniaczem mocy.

Schemat blokowy systemu zawieszania elektromagnetycznego z kompensacją kaskadową przedstawiono na rys. 10 [17]. Taki układ zapewnia jednak położenie stabilne pojedynczego elektromagnesu nieruchomego. W pojeździe poruszającym się po podłożu magnetycznej muszą być zainstalowane co najmniej cztery elektromagnesy i dla zapewnienia stabilności układu należy zastosować jeszcze dwie



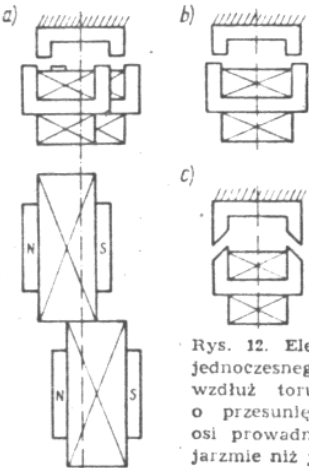
Rys. 10. Schemat blokowy systemu zawieszenia elektromagnetycznego przy prędkości  $v = 0$  [17]



Rys. 11. Schemat blokowy systemu zawieszenia elektromagnetycznego pojazdów

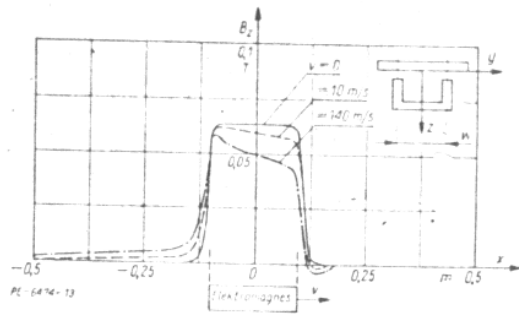
wewnętrzne pętle sprzężenia zwrotnego zawierające czujnik siły oraz czujnik prędkości (rys. 11).

Prowadzenie pojazdu wzdłuż toru, tzn. jego stabilizację boczną można uzyskać albo nadając odpowiedni kształt i zamocowanie elektromagnesom dźwigającym (rys. 12) [17, 18, 19], albo też stosując dodatkowe elektromagnesy stabilizujące [20, 21].



Rys. 12. Elektromagnesy dźwigające do jednoczesnego prowadzenia pojazdu wzdłuż toru (stabilizacji bocznej): a) o przesuniętej osi symetrii względem osi przewodnicy [18, 20]; b) o dłuższym jarzmie niż jarzmo przewodnicy; c) o biegunach ukośnych [17]

Prądy wirowe rotacji indukowane w przewodnicach przy dużych prędkościach powodują osłabienie indukcji magnetycznej pod częścią nabiegającą elektromagnesu (rys. 13) oraz są przyczyną powstawania m.in. dużych sił hamujących [18, 22].

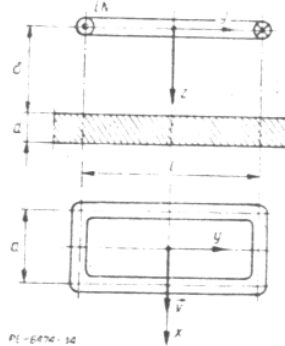


Rys. 13. Wpływ prądów wirowych indukowanych w przewodnicy na rozkład składowej normalnej  $B_z$  indukcji magnetycznej pod biegunem elektromagnesu przy różnych prędkościach  $v$  elektromagnesu względem przewodnicy dla  $\delta_0 + z = 14$  mm;  $y = 0,5$  m

### Lewitacja elektrodynamiczna

W podwoziu pojazdu znajdują się elektromagnesy nadprzewodzące zwrócone powierzchniami aktywnymi biegunów w kierunku toru wykonanego z płyt aluminiowych. Jeżeli elektromagnes jest zasilany prądem stałym, co ma miejsce w większości konstrukcji, w torze aluminiowym są wzniecane prądy wirowe rotacji, jeżeli elektromagnes jest zasilany prądem przemiennym, w torze powstają zarówno prądy wirowe rotacji jak i transformacji. Ponieważ zjawisko lewitacji elektrodynamicznej występuje począwszy od minimalnej prędkości granicznej ok. 70 km/h (20 m/s), pojazdy są wyposażone w koła ogumione, wysuwane tylko podczas „startu” i „ładowania”.

Siły działające na cewkę prostokątną o wymiarach  $l, a$ , zawierającą  $N$  zwojów z prądem  $i$ , poruszającą się z prędkością liniową  $v$  w odległości  $\delta$  od płaskiej nieferromagnetycznej płyty przewodzącej o grubości  $d$  i konduktywności  $\gamma$  (rys. 14), najprościej jest obliczyć



Rys. 14. Cewka o wymiarach  $l, a$  przemieszczająca się z prędkością  $v$  równoległe do powierzchni płyty nieferromagnetycznej o grubości  $d$

na podstawie zależności podanej przez Hannakama [23], zmodyfikowanej następnie w pracy [24], tzn. siła unoszenia elektrodynamicznego

(7)

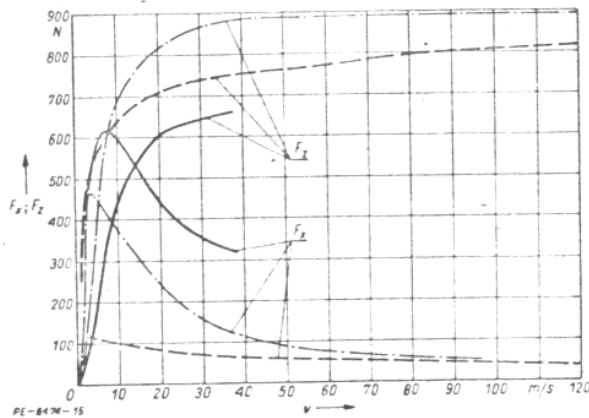
$$F_z = \frac{\mu_0 (Ni)^2}{\pi \delta} \left\{ \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \delta^2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2} - 2\delta + \right. \\ \left. - \left[ \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2} \right] \frac{\delta^2}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2} + \right. \\ \left. - \left[ \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2} - \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \delta^2} \right] \frac{\delta^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \delta^2} \right\} \times$$

$$\times \frac{1}{1+k^2}$$

Siła hamująca

$$(8) \quad F_x = kF_z$$

przy czym:  $k = 2/\mu_0 v \gamma d$ , jeżeli  $d < \Delta$  oraz  $k = 2/\mu_0 v \gamma \Delta$  jeżeli  $d > \Delta$ , przy czym  $\Delta = \sqrt{2/(\omega \mu \gamma)}$  — równoważna głębokość wnikania pola elektromagnetycznego do przewodzącej płyty nieferromagnetycznej;  $\omega = 2\pi f$ . W pracy [25] postuluje się żeby zamiast współczynnika  $1/(1+k^2)$  we wzorze (7) przyjąć współczynnik  $\exp\{-\xi/[1+2(\delta/l)^{3/2}]\}$ , przy czym  $\xi = [4\pi/(\mu_0 v \gamma \delta)]^{1/2}$ . Zarówno wzór (7) jak i wzór podany w pracy [25] dają zbyt duże wartości sił unoszenia w porównaniu



Rys. 15. Siły  $F_z$  unoszenia elektrodynamicznego oraz siły hamujące  $F_x$  działające na cewkę zasilaną prądem stałym o przepływie  $iN = 50\,400$  A, długości  $a = 0,4$  m, poruszającą się na wysokości  $\delta = 0,22$  m z prędkością  $v$  nad płytą aluminiową o konduktywności  $\gamma = 30 \cdot 10^6$  S/m, szerokości  $0,8$  m i grubości  $d = 1$  cm

Linia ciągła wg pomiarów [27]; linia punktowa — obliczona na podstawie wzorów (7), (8) [24]; linia przerywana — obliczona wg wzorów podanych w pracy [25]

z eksperymentem (rys. 15). Lepszą zgodność obliczeń sił  $F_z$  z pomiarami otrzymuje się na podstawie zależności podanych w pracach [26, 27]. W szczególności na uwagę zasługują zależności na siły uzyskane na podstawie dynamicznej teorii obwodowej [27].

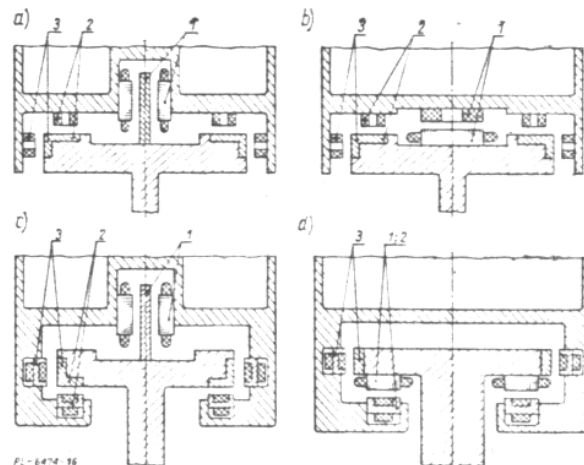
W przypadku małych szczelin powietrznych (ok. 1 cm) można zastosować elektromagnes z rdzeniem ferromagnetycznym zamiast elektromagnesów nadprzewodzących i siłę unoszenia  $F_z$  obliczać wg metody polowej podanej np. w pracy autora [11].

#### Kombinacje systemów zawieszenia i napędu pojazdów

Na rysunku 16 przedstawiono różne sposoby zawieszenia i napędu pojazdów szybkiego transportu naziemnego. Pojazdy te są wyposażone w trzy podstawowe układy elektromagnetyczne: zawieszenia, napędu, stabilizacji bocznej (przewodzenia wzdłuż toru). Pojazd EET-01 budowany w latach 1972—77 w Erlangen (RFN) [28] jest przykładem połączenia zawieszenia elektrodynamicznego z napędem za pomocą silnika liniowego indukcyjnego i krótkiej części pierwotnej (rys. 16a). Pojazd o masie 17 t, długości 12 m był lewitowany na kołowym torze eksperymentalnym o średnicy 280 m i pochyleniu  $45^\circ$  przy szczelinie powietrznej 10 cm, osiągając prędkość do 150 km/h. W wyniku badań stwierdzono m.in., że drgania pojazdu unoszonego elektrodynamicznie można łatwo wytłumić za pomocą elektromagnesów dodatkowych

o odpowiednio regulowanych prądach. Po roku 1977 przystąpiono w Erlangen do badań nad napędem pojazdów unoszonych elektrodynamicznie za pomocą silników liniowych synchronicznych o długiej części pierwotnej usytuowanej w torze, zasilanej sekcjami przez stacje przemienników, oraz nadprzewodzących uzwojeń wzbudzenia usytuowanych w pojeździe EET 02 o masie 14 t (rys. 16b). Eksperymentalny tor kołowy został przebudowany na tor aktywny wyposażony w uzwojenie trójfazowe; zezwoje toru (podziałka biegunowa 1,4 m) w postaci kabli aluminiowych są wbetonowane w dno toru. Podobnie (rys. 16b) są skonstruowane pojazdy „Canadian Maglev System” [27] oraz „Magneplane System” [8] (St. Zjednoczone). Nadając odpowiedni kształt toru, można wyeliminować elektromagnesy prowadzące (3 — rys. 16b) [3, 8]. Silnik synchroniczny jednostronny w stosunku do silnika indukcyjnego dwustronnego gwarantuje większą pewność pracy (większa szczelina powietrzna) oraz możliwość łagodnego „startu” i „ładowania”. Połączenie zawieszenia elektromagnetycznego z napędem silnikiem liniowym o krótkiej części pierwotnej (rys. 16c) stosowano w pojazdach „Transrapid” (RFN). Pojazd „Transrapid 02” zbudowany w 1971 r. o masie 11,3 t, długości 11,7 m, na torze o długości 930 m rozwijał prędkość do 164 km/h. Pojazd „Transrapid 04” zbudowany w 1974 r. o masie 20 t i długości 15 m, szerokości 3,4 m, wysokości 2,8 m na 2,4-kilometrowym torze osiągał prędkość od 170 do 204,3 km/h [3, 18]. Elektromagnesy dźwigające oraz elektromagnesy prowadzące są często zastępowane elektromagnesami spełniającymi obydwie funkcje, zamocowanymi jak na rys. 12.

Na Międzynarodowej Wystawie Transportu (IVA) w Hamburgu w 1979 r. eksponowano pojazd „Transrapid 05” o konstrukcji jak na rys. 16d. Silnik liniowy synchroniczny wytwarzał zarówno siłę ciągu jak i siłę dźwigającą pojazd o masie 36 t i długości 26 m. Elektromagnesy w pojeździe zasilane były z akumulatorów. Z uwagi na niewielką długość toru — ok. 900 m, pojazd mógł rozwinąć prędkość załadowie 75—90 km/h. Po raz pierwszy w Europie pojazd ten zademonstrował olbrzymiej liczbie zwiedzających zalety nowego systemu transportu naziemnego.



Rys. 16. Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne pojazdów poruszających się na poduszce magnetycznej: a) zawieszenie i prowadzenie elektrodynamiczne — napęd za pomocą silnika indukcyjnego liniowego dwustronnego o krótkiej części pierwotnej; b) zawieszenie i prowadzenie elektrodynamiczne — napęd za pomocą silnika synchronicznego liniowego jednostronnego o długiej części pierwotnej; c) zawieszenie i prowadzenie elektromagnetyczne — napęd za pomocą silnika indukcyjnego liniowego dwustronnego o krótkiej części pierwotnej; d) zawieszenie elektromagnetyczne i napęd za pomocą silnika synchronicznego liniowego jednostronnego o długiej części pierwotnej — prowadzenie elektromagnetyczne

1 — układ napędowy; 2 — układ zawieszenia; 3 — układ prowadzenia

Dotychczas badane były pojazdy modelowe o małych wymiarach (z wyjątkiem prezentowanych na Wystawie IVA) poruszające się po torach krótkich, o długości najwyżej 2,4 km. Dzięki tym eksperymentom można już w chwili obecnej przystąpić do budowy systemu transportu naziemnego spełniającego przeznaczoną funkcję i pokładane nadzieje oraz umożliwiającego jednocześnie dalsze badania, np. przy dużych prędkościach (400—500 km/h), nad trwałością, nad optymalizacją. Taki system jest budowany w północnej części RFN, w okolicach rzeki Ems [28]. Tor liczy 31 km długości, trzy zwrotnice oraz jest zaprojektowany na prędkość pojazdów 300—400 km/h. Obok toru powstaje centrum badawcze, centrum sterowania, kontroli i sygnalizacji ostrzegawczej oraz hala obsługi. Elementem napędowym pojazdów jest silnik liniowy synchroniczny o długiej części pierwotnej usytuowanej w torze, którego okład prądu wynosi 7,5 kA/m. Pojazd składa się z dwóch jednostek o masie 68 t każda, mających ładowność po 96 pasażerów. Długość jednostki wynosi 52 m, szerokość 3,6 m, wysokość 2,8 m. Układ nadprzewodzących uzwojeń wzbudzenia silników synchronicznych umieszczonych w pojeździe składa się z 6 sekcji, tzn. po trzy sekcje na jednostkę, przy czym każda sekcja zawiera sześć prostokątnych uzwojeń biegunów. Każdy biegun daje przepływ 1,15 MA przy prądzie 1000 A (straty cieplne tylko 25 W). Szczelina powietrzna między częścią pierwotną a częścią wtórną wynosi 0,30 m. Zawieszenie pojazdu w systemie lewitacji elektromagnetycznej odbywa się za pomocą elektromagnesów konwencjonalnych o rdzeniach ferromagnetycznych. Pierwsze eksperymenty przewiduje się w 1982 r.

#### Wnioski

System lewitacji magnetycznej, być może, już ok. 2000 r. rozwiąże radykalnie trudne obecnie do rozwiązania problemy transportu. Do napędu pojazdów na poduszce magnetycznej najbardziej odpowiednio są bezrdzeniowe silniki liniowe synchroniczne z nadprzewodzącymi uzwojeniami wzbudzenia. Zawieszenie elektromagnetyczne pojazdów w stosunku do zawieszenia elektrodynamicznego wydaje się być tańsze i mniej energochłonne. Niezależnie od tych zalet systemu lewitacji elektromagnetycznej, pojazdy modelowe unoszone za pomocą sił elektrodynamicznych są projektowane i budowane w Kanadzie, Japonii oraz w St. Zjednoczonych [3, 8, 27]. Republika Federalna Niemiec — kraj najbardziej zaawansowany w konstrukcji i badaniach pojazdów poruszających się na poduszce magnetycznej preferuje lewitację elektromagnetyczną. Zarówno napęd jak i zawieszenie elektrodynamiczne zapewnia koncepcja zastosowania w pojazdach bębnowych (zamiast kół jezdnych) z elektromagnesami nadprzewodzącymi na obwodzie, wirujących nad torem z płyt aluminiowych (paddlewheel propulsion system) [29].

#### LITERATURA

- [1] Boerdijk A. H.: Technical aspects of levitation. *Philips Research Reports* Vol. 11: 1956 No 1 pp. 45—56.
- [2] Laithwaite E. R.: Electromagnetic levitation. *Proc. IEE* Vol. 112: 1965 No 12 pp. 2361—2375.
- [3] Thornton R. D.: Magnetic levitation and propulsion. 1975. *IEEE Trans.* Vol. MAG-11: 1975 No 4 pp. 981—995.
- [4] Laithwaite E. R.: Linear induction motors. *Proc. IEE* Vol. 104 part A: 1957 No 18 pp. 461—470.
- [5] Laithwaite E. R., Barwell F. T.: Linear induction motor for high-speed railways. *Electronics and Power* 1964 No 10 pp. 100—103.
- [6] Laithwaite E. R.: Propulsion without wheels. *Eng. Univ. Press*. London 1966.
- [7] Powell J. R., Danby G. R.: High speed transport by magnetically suspended trains. *ASME Winter Annual Meeting* New York paper 66 — WA/RR-5 1966.
- [8] Thornton H. D., Iwasa Y., Kolm H. H.: The magneplane system. *Proc. of the 5th Internat. Cryogenic Engineering Conference*. Kyoto 1974 IPC Science and Technology Press 1974 pp. 42—45.
- [9] Hochhäusler P.: Neue Erkenntnisse für den Betrieb der magnetischen Schwebebahn. *ETZ-B* Bd 25: 1973 H. 3 S. 45—47.
- [10] Hochhäusler P.: A catamaran as a magnetically levitated vehicle. *Proc. of the Conference on Linear Electric Machines*. London 1974 pp. 216—222.
- [11] Gieras J.: Elementy teorii elektromechanicznych przetworników indukcyjnych w ujęciu polowym. *Zeszyty Nauk. Akademii Techniczno-Roln. w Bydgoszczy, Elektrotechnika* 1979 nr 2 (rozprawa habilitacyjna).
- [12] Gieras J.: Unoszenie ciał przewodzących nieferromagnetycznych w polu elektromagnetycznym. *Mat. Międzynar. Konferencji Nauk. nt. Maszyny Elektr. Specjalne*, Oddz. Bydg. SEP, Bydgoszcz 1979 (załącznik).
- [13] Turowski J.: Obliczanie elektrycznych parametrów liniowych i nieliniowych maszyn elektrycznych do celów analizy i modelowania. *Instytut Układów Elektromaszynowych Polit. Wrocław, PRE* nr 37 Wrocław 1979.
- [14] Skalski C. A.: The Air-Core Linear Synchronous Motor — An Assessment of Current Development. *MITRE Technical Report MTR-7028 Rev. I* Mc Lean Virginia 22101 1975.
- [15] Wyszko J. D., Iwanow W. I.: Magnitnyje opory w awtomatike. Moskwa 1978 Energiya.
- [16] Atherton D. L. i in.: The Canadian high speed magnetically levitated vehicle system. *Canadian Electrical Engineering Journal*. Vol. 3: 1978 No 2 pp. 3—26.
- [17] Jayawant B. V., Sinha P. K., Wheeler A. R., Whorlow R. J., Willsher J.: Development of 1-ton magnetically suspended vehicle using controlled d.c. electromagnets. *Proc. IEE* Vol. 123: 1976 No 9 pp. 941—948.
- [18] Albrecht C., Bohn G.: Neue spurgeführte Transportmittel (Teil I). *Physikalische Blätter* Bd. 32: 1976 H. 7 S. 309—326.
- [19] Brzezina W., Langerholec J.: Calculation of Pole Dimension Corrections for the Treatment of Stray Flux in Electromagnetic Suspension Magnets. *ETZ-A* Bd 95: 1974 S. 524—525.
- [20] Borcherts R. H.: An Investigation of Two HSGT Magnetic Suspension System (Attraction). *IEEE Trans.* Vol. MAG-12: 1976 No 4 pp. 359—372.
- [21] Appun P.: Ein elektromagnetische Trag- und Führungssystem für schienengebundene Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge. *Elektrische Bahnen* Bd 46: 1975 H. 4 S. 86—93.
- [22] Langerholec J.: Numerical computation of eddy-current effects in ferromagnetic maglev suspension. *Journal of Applied Physics*. Vol. 46: 1975 No 12 pp. 5255—5258.
- [23] Hannakam L.: Wirbelströme in Dunnen Leitenden Platten Infolge Bewegter Stromdurchflossener Leiter. *ETZ-A* Bd. 86: 1965 S. 427—431.
- [24] Guderjahn G. A., Wipf S. L., Fink H. J., Boom R. W., MacKenzie K. E., Williams D., Downey T.: Magnetic Suspension and Guidance for High Speed Rockets by Superconducting Magnets. *Journal of Applied Physics* Vol. 40: 1969 No 5 pp. 2133—2140.
- [25] Coffey T., Chilton F., Barbee T. W.: Suspension and Guidance of Vehicles by Superconducting Magnets *Journal of Applied Physics* Vol. 40: 1969 No 5 p. 2161.
- [26] Borcherts R. H., Davis L. C.: Force on a Coil Moving over a Conducting Surface Including Edge and Channel Effects. *Journal of Applied Physics*. Vol. 43: 1972 No 5 pp. 2418—2427.
- [27] Atherton D. L., Eastham A. R., Ooi B. T., Jain O. P.: Forces and Moments for Electrodynamical Levitation System — Large-Scale Test Results and Theory. *IEEE Trans.* Vol. MAG-14: 1978 No 2 pp. 59—68.
- [28] Bogner G.: Applied Superconductivity Activities at Siemens. *IEEE Trans.* Vol. MAG-15: 1979 No 1 pp. 824—827.
- [29] Borcherts R. H.: Repulsion magnetic suspension research — US progress to date. *Cryogenics* July 1975 pp. 385—393.