

Seria: TRANSPORT z.1

Nr kol. 756

Zbigniew GINAŁSKI

Dział Sieci i Zasilania

Katowice

## ELEKTRODYNAMICZNE ODDZIAŁYWANIE PANTOGRAFU I PRZEWODU JEZDNEGO SIECI TRAKCYJNEJ

Streszczenie. Artykuł omawia wpływ siły elektrodynamicznej na współpracę między pantografem a przewodem jezdnym. Oprócz teoretycznego opisu zjawiska, przedstawiono tu także wyniki badań praktycznych.

Autor proponuje wprowadzenie poprawek do dotychczas używanych wzorów.

Planowany na najbliższe lata wzrost szybkości i ciężaru pociągów trakcji elektrycznej spowoduje wzrost mocy elektrycznej pobieranej z sieci trakcyjnej.

Przy niezmiennym napięciu zasilania 3000V prądu stałego wzrost mocy zostanie pokryty poprzez wzrost prądu pobieranego przez tabor. Stawia to szczególnie wysokie wymagania techniczne dla konstrukcji pantografu i sieci trakcyjnej.

W chwili obecnej prowadzone są u nas i za granicą poważne prace nad przystosowaniem pantografu do większych prądów i prędkości [3, 4, 5], jednak nigdzie nie uwzględnia się faktu istnienia sił elektrodynamicznych.

Pomimo pomijania tych sił w pracach konstrukcyjnych, warto sobie zdawać sprawę z ich istnienia i możliwości oddziaływania na warunki pracy.

Prądy rozruchu, których wartości dla nowoczesnego taboru sięgają coraz wyżej, wywołują w przewodach i pantografie powstawanie sił elektrodynamicznych oraz wydzielenie pewnych ilości ciepła. Siły elektrodynamiczne nie są na razie znaczne, ale ponieważ należą one od kwadratu prądu, pomijanie ich dla nowych warunków ruchu oraz dla zwarć, przy jednoczesnym uwzględnieniu innych sił równorzędnych, a nawet mniejszych, obarczałoby rozważania dotyczące współpracy dość znacznym błędem. Tym bardziej konieczne jest uwzględnienie ich działania przy przepływie prądów zwarciowych.

## 1. Krótki opis zjawiska [1]

W dowolnym, odosobnionym obwodzie elektrycznym obserwuje się podczas przepływu prądu działania elektrodynamiczne, dążące niejako do powiększenia powierzchni, której krzywą brzegową jest jest rozpatrywany obwód.

Działanie elektrodynamiczne obserwuje się również między obwodem elektrycznym. Występowanie sił elektrodynamicznych jest związane ze zmianami energii pola magnetycznego przy zmianie kształtu poszczególnych obwodów, czy też wzajemnego ich ułożenia. Działania elektrodynamiczne w obwodach elektrycznych nie występują w postaci sił skupionych, lecz są rozłożone w sposób ciągły, na całej długości obwodu elektrycznego.

Zamiast siłami elektrodynamicznymi, logiczniej jest operować jednostkowym obciążeniem elektrodynamicznym przewodu, przez które rozumimy granicę stosunku siły wypadkowej  $\Delta F$ , działającej na element przewodu o długości  $\Delta l$ , do tejże długości:

$$P = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta l}$$

Pod wpływem obciążeń elektrodynamicznych obwód elektryczny może ulegać odkształceniu i doznawać naprężeń. Gdy właściwości obwodu elektrycznego pozwalają na traktowanie go, przynajmniej w przybliżeniu, jako ciała sztywnego, możemy siły działające na elementarne cząstki obwodu zastąpić jedną wypadkową siłą i ewentualnie jedną parą sił.

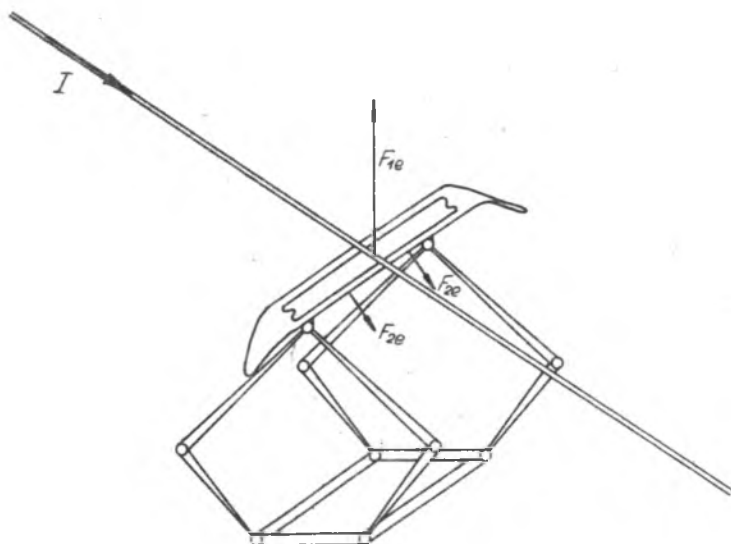
W zwykłych warunkach ruchu siły elektrodynamiczne nie odgrywają poważniejszej roli ze względu na stosunkowo niewielkie wartości natężenia prądu. Natomiast w warunkach rozruchu lub zwarcia, gdy natężeniem prądu osiągają wartości kilkakrotnie większe, siły elektrodynamiczne, wzrastają przeważnie z kwadratem natężenia prądu, wywierają znaczny wpływ na współpracę między pantografem a przewodem jezdny.

## 2. Siły elektrodynamicznego oddziaływania w układzie przewód jezdny - pantograf

Pomijając znaną powszechnie siłę elektrodynamicznego oddziaływania między przewodami sieci trakcyjnej przewodzącymi prąd, można w układzie przewód - pantograf wyodrębnić następujące siły pochodzenia elektrodynamicznego (rys.1) :

- a/ siła elektrodynamicznego oddziaływania między prądem płynącym w przewodzie jezdny a blachą stalową ślizgacza pantografu -  $F_{1e}$ ,
- b/ siła elektrodynamicznego oddziaływania między prądem płynącym w przewodzie jezdny w miedzianych nakładkach pantografu  $F_{2e}$ ,

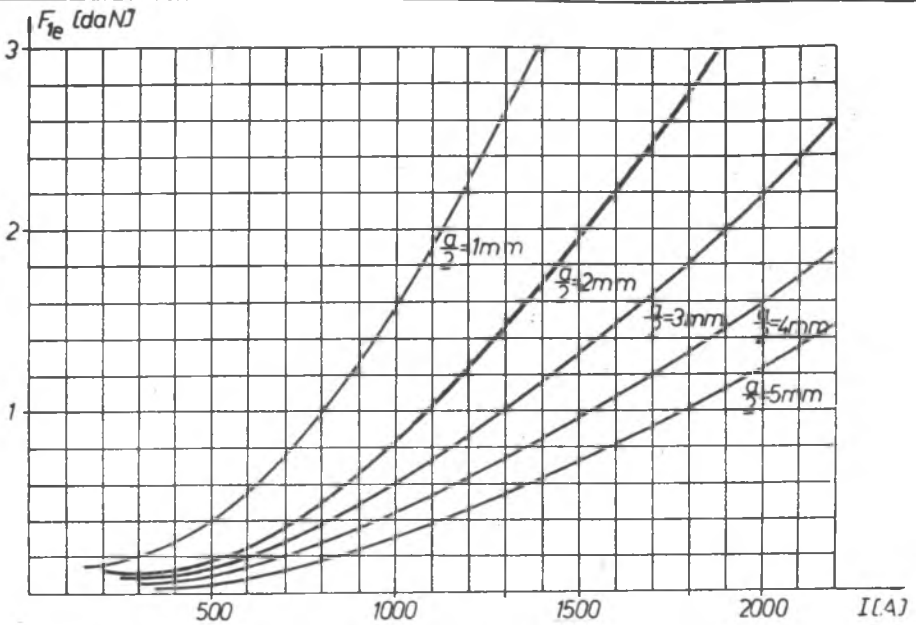
- c/ siła elektrodynamicznego oddziaływania między prądem płynącym w przewodzie jezdnym i w ramionach ruchomych pantografu -  $F_{3e}$ ,
- d/ siły elektrodynamiczne występujące na wszystkich elementach pantografu na których następuje geometryczna zmiana kierunku prądu -  $F_{4e}$ .



Rys. 1. Siły elektrodynamiczne działające w układzie przewód-pantograf.

- $F_{1e}$  - siła elektrodynamicznego oddziaływania między prądem w przewodzie jezdnym, a stalową blachą ślizgacza,  
 $F_{2e}$  - siła elektrodynamicznego oddziaływania między prądem w przewodzie i w miedzianych nakładkach pantografu.

Największą z wymienionych sił jest siła -  $F_{1e}$  elektrodynamicznego oddziaływania między prądem płynącym w przewodzie jezdnym a stalową blachą ślizgacza pantografu. Może ona osiągnąć w szczególnie niesprzyjających warunkach (duże zużycie płytek pantografu, duży prąd w sieci trakcyjnej) wielkości kilkunastu daN /rys. 2, tablica 1). Natomiast siły  $F_{2e}$ ,  $F_{3e}$ ,  $F_{4e}$  są dla tych samych warunków kilkadziesiąt razy mniejsze.



Rys.2. Teoretyczne wartości siły  $F_{1e}$  w zależności od prądu  $I$  i grubości nakładu  $\frac{a}{2}$

Tablica 1

Wartość siły  $F_{1e}$  w zależności od grubości nakładek miedzianych pantografu i prądu w przewodzie jezdycznym.

Prąd $I$ / A /	Siła $F_{1e}$ / daN / przy grubości nakładek w mm				
	$\frac{a}{2} = 1$	$\frac{a}{2} = 2$	$\frac{a}{2} = 3$	$\frac{a}{2} = 4$	$\frac{a}{2} = 5$
200	0,063	0,031	0,021	0,013	0,013
400	0,251	0,125	0,083	0,062	0,050
600	0,565	0,282	0,188	0,141	0,113
800	1,002	0,501	0,340	0,250	0,204
1000	1,570	0,785	0,522	0,397	0,314
1200	2,260	1,130	0,751	0,565	0,452
1400	3,080	1,540	1,026	0,770	0,616
1600	4,020	2,010	1,340	1,050	0,805
1800	5,090	2,545	1,650	1,272	1,020
2000	6,280	3,140	2,090	1,670	1,258
2500	9,800	4,900	3,260	2,450	1,960
3000	14,110	7,055	4,703	3,527	2,830

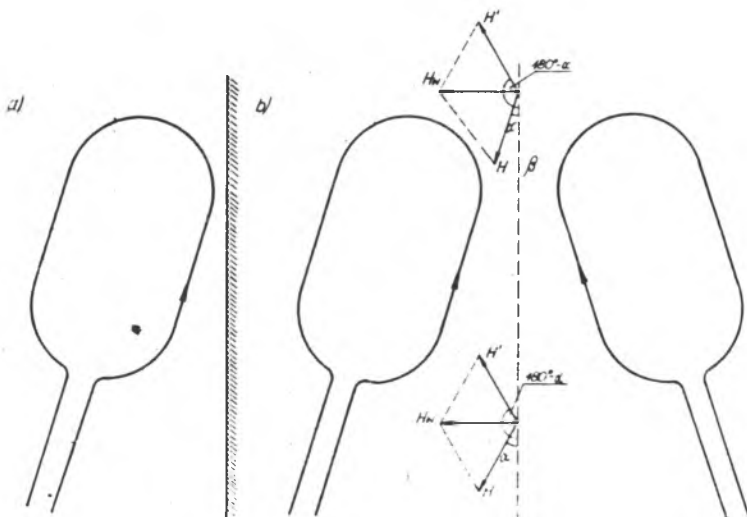
3. Siła elektrodynamicznego oddziaływania między stalową blachą ślizgacza pantografu a prądem płynącym w przewodzie jezdnym  
 $F_{le}$

Wielkość tej siły można wyznaczyć za pomocą następującego rozumowania.

Rozpatrzmy dowolny obwód elektryczny o dowolnym kształcie i obok niego ścianę stalową. Usuniemy ścianę stalową i umieścimy po drugiej stronie jej płaszczyzny granicznej  $\beta$  symetrycznie drugi taki sam obwód elektryczny stanowiący zwierciadlane odbicie pierwszego obwodu względem płaszczyzny granicznej. Jeżeli w dowolnym punkcie tej płaszczyzny natężenie pola magnetycznego wywołane przez obwód 1 wynosi  $H$ , to natężenie pola wywołane przez obwód 1' wynosi  $H'$ , a jego moduł jest równy modułowi  $H$ .

Wektor  $H$  tworzy z płaszczyzną graniczną  $\beta$  kąt  $\alpha$ , a wektor  $H'$  kąt  $(180 - \alpha)$ . Wypadkowa natężenia pola  $H$  jest w każdym punkcie płaszczyzny prostopadła do płaszczyzny która jest płaszczyzną ekwipotencjalną - rys.3.

Wstawiając z powrotem ścianę stalową w miejsce obwodu 1 stwierdzamy, że w przypadku, gdy nie następuje silne nasycenie magnetyczne w żelazie, obraz pola magnetycznego między obwodem a płaszczyzną  $\beta$  nie ulega zmianie, ponieważ potencjał magnetyczny ściany ferromagnetycznej ma w przybliżeniu stałą wartość.



Rys.3. Wpływ ściany z materiału ferromagnetycznego na obwód elektryczny.

Stąd wniosek, że można oddziaływanie ścian stalowych na obwody elektryczne zastąpić oddziaływaniem takich samych obwodów elektrycznych, stanowiących swierciadlane odbicie względem płaszczyzny granicznej. Działające siły starają się zbliżyć obwód elektryczny do ściany stalowej. Zjawisko takie ma miejsce przy pantografie, detykającym przewodu jezdnego.

Płytki miedziane, zamocowane na ślizgaczu wykonanym z blachy stalowej, uniemożliwiają bezpośredni kontakt przewodu jezdnego z blachą, w związku z czym następuje oddziaływanie między przewodem a pantografem, powoduje przyciąganie ich do siebie. Siła przyciągania zależy od wielkości prądu płynącego w przewodzie jezdnym oraz od odległości przewód - blacha, która jest określona przez grubość płytki miedzianej.

Charakterystyczne dla tej siły jest to, że nie zależy ona od wielkości prądu odprowadzonego przez pantograf, a jedynie od wielkości prądu w przewodzie jezdnym.

Z pewnym przybliżeniem wielkość tej siły można obliczyć ze wzoru:

$$F_{le} = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \frac{1}{a} \eta \quad [1]$$

gdzie:  $F_{le}$  - siła elektrodynamicznego oddziaływania (N),

$a$  - podwójna grubość płytki pantografu (m),

$l$  - szerokość pantografu (m),

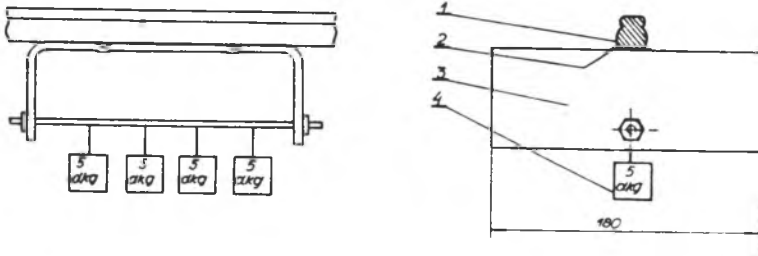
$y = l$  - szerokość pantografu

$$\eta - \text{współczynnik } \eta = 1 - \frac{a}{y} - \sqrt{1 + \left(\frac{a}{y}\right)^2}$$

$\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

Dla stosowanego na PKP pantografu typu AKP 1 i AKP-4B wymiar  $l$  - szerokość pantografu - wynosi około 154 mm, natomiast grubość miedzianych płytek pantografu zależy od stopnia ich zużycia i dla nowych płytek wynosi  $\frac{a}{2} = 5$  mm. Przepisy techniczno-ruchowe określają maksymalne zużycie płytek do grubości  $\frac{a}{2} = 2,5$  mm; w praktyce spotkać można płytki zużyte w swej środkowej części do grubości nawet 1,5 mm. Daje to w wyniku dość duże siły przyciągające pantograf do przewodu jezdnego. Wpływ siły  $F_{le}$  na współpracę pantograf - przewód jezdny jest dwójaki. Korzystny gdyż ustawia powierzchnię ślizgacza równolegle do przewodu jezdnego, przez co ścieranie płytek miedzianych jest równomierne na całej szerokości pantografu, a ponadto istnienie siły  $F_{le}$  powoduje zmniejszenie liczby i czasu trwania przerw styku przewód - jezdny - pantograf. Niekorzystny - zwiększa mechaniczne zużycie przewodu jezdnego i materiału stykowego pantografu skutkiem zwiększonej siły tarcia. Na podstawie

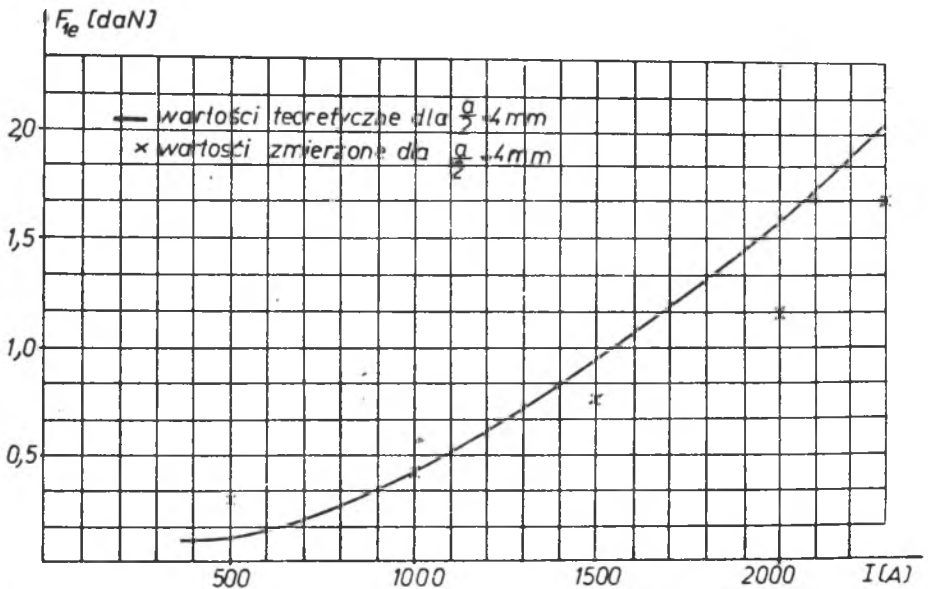
wzoru [1.] dokonano obliczeń wartości siły  $F_{le}$  dla różnych wartości prądu i różnych grubości nakładek miedzianych. Wyniki przedstawiono na wykresie 2 i w tabelicy 1.



Rys.4. Układ do pomiaru siły  $F_{le}$ .

- 1 - przewód jezdy podłączony do źródła prądu 15V, 2000A,
- 2 - podkładka Cu o grubości 0,5 mm,
- 3 - wycinek pantografu,
- 4 - ciężarki.

Praktyczne pomiary przeprowadzane dla wycinka pantografu o wymiarach jak na rys.4 potwierdziły fakt istnienia siły  $F_{le}$  (rys. 5) oraz zasygnalizowały pewien wpływ magnetyzmu szczątkowego na wartość tej siły.



Rys.5. Wartości siły elektrodynamicznego oddziaływania między stalową blachą ślizgacza pantografu a prądem płynącym w przewodzie.

Zaniżone wartości siły  $F_{2e}$  wynikły tu prawdopodobnie na skutek użycia małego wycinka pantografu oraz nasycenia magnetycznego żelaza pantografu.

#### 4. Siła elektrodynamicznego oddziaływania między prądem płynącym w przewodzie jezdnym i miedzianych nakładkach pantografu $F_{2e}$

Zakładając jednostronne zasilanie sieci trakcyjnej, można wyznaczyć siłę  $F_{2e}$  z następującego rozumowania:

Wytnijmy na pantografie w odległości  $x$  od osi przewodu pasek o długości  $dx$ . Indukcja magnetyczna w tym miejscu wynosi:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i_1}{4\pi x} \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + x^2}}$$

stąd siła działająca na elementy  $dx$ :

$$dF = \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot l \cdot dx}{4\pi x \cdot \sqrt{l^2 + x^2}}$$

Całkowita siła działająca na jedną część pantografu:

$$F_{2e} = \int_{S_1}^L \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2}{4\pi x} \cdot \frac{l dx}{\sqrt{l^2 + x^2}}$$

Jeżeli przewód znajduje się na środku pantografu, wtedy siły działające z obu stron pantografu są sobie równe i działają na pantograf zgodnie z kierunkiem prądu.

Siła wypadkowa:

$$F_{2e} = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2}{4\pi} \cdot \eta \quad [2]$$

gdzie:

- $i_1$  - prąd płynący w przewodzie jezdym (A),
- $i_2$  - prąd płynący w jednej połowie pantografu (A),
- $l$  - długość przewodu jezdnego,
- $S_1$  - średnia geometryczna odległość własny przewodu jezdnego,
- $2_0$  - szerokość pantografu.

$$\eta = \ln \frac{c \left( 1 + \sqrt{l^2 + S_1^2} \right)}{S_1 \left( 1 + \sqrt{l^2 + c^2} \right)}$$



Wyliszone ze wzoru /2/ wartości siły  $E_{2e}$  nie przekraczają wielkości 0,1 daN, w związku z czym mogą być pominięte w rozważaniach dotyczących współpracy pantograf - przewód jezdny.

Podobnie niskie wartości mają siły  $F_{3e}$  i  $F_{4e}$ .

Siłę  $F_{4e}$  można wyznaczyć z podobnego rozumowania jak i siły  $F_{2e}$ , natomiast siłę  $F_{3e}$  wylicza się ze wzoru:

$$F_{3e} = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_2}{4\pi} \cdot \eta \quad [3]$$

gdzie:  $\eta = \arcsin h \frac{l_1}{a} \quad \arcsin h \frac{l_1}{\sqrt{a^2 + x^2}}$

$a$  - odległość przewód jezdny - ramię pantografu,

$l_1$  - długość ramienia pantografu,

$I_1, I_2$  - prądy płynące w przewodzie i ramieniu pantografu.

Ponieważ siły  $F_{2e}, F_{3e}, F_{4e}$  nie osiągają zbytu dużych wartości, największe znaczenie dla współpracy przewód - pantograf ma siła elektrodynamicznego oddziaływania między prądem płynącym w przewodzie jezdny a stalową blachą pantografu -  $F_{1e}$  i ją należy uwzględnić w rozważaniach dotyczących współpracy.

Siłę tę można zmniejszyć przez:

- zmniejszenie zużycia nakładek mieszanych pantografu poprzez stosowanie specjalnego smaru oraz ściśle przestrzeganie norm zużycia nakładek,
- zmniejszenie ciężaru blachy stalowej w ślizgacza pantografu ewentualnie jej wymianę na inny materiał.

Niezwykle pozytywną cechą tej siły jest ustawienie powierzchni ślizgacza równoległe do przewodu jezdny.

Siłę elektrodynamicznego oddziaływania  $F_{1e}$  należałoby uwzględnić we wszystkich równaniach opisujących proces dynamicznej współpracy z siecią trakcyjną.

Uwzględniając kierunek działania tej siły /zawsze do przewodu/ w równaniach powinna ona mieć znak przeciwny niż siła nacisku statycznego. np. po wprowadzeniu jej do równania J.Kumesawy równanie będzie miało postać:

$$(m_s(x) + M) \cdot v^2 \frac{d^2y}{dx^2} + \eta \cdot v \frac{dy}{dx} + k(x) \cdot y =$$

$$F_{st} = \frac{\mu h}{4\pi} \cdot i^2 \frac{1}{a} \cdot \eta \quad [4]$$

gdzie:  $k(x) = \frac{1}{e(x)}$

$$M_g(x) = \bar{m} \left( 1 - \xi_m \cdot \cos \frac{2\pi}{l} x \right)$$

$\xi_m$  - stopień nierównomierności masy

$\bar{m}$  - średnia wartość zastępczej sieci trakcyjnej,

$M$  - masa zastępcza odbieraka prądu,

$m_g$  - masa zastępcza sieci trakcyjnej,

$V$  - prędkość przemieszczenia się wymuszającej siły,

$y$  - rzędna trajektorii odbieraka prądu w czasie,

$F_{st}$  - nacisk statyczny odbieraka prądu przy jego podnoszeniu i opuszczaniu.

#### L I T E R A T U R A

- [1] Kurdziel R.: Działanie cieplne i dynamiczne prądów zwarciovych. PWT Warszawa 1957.
- [2] Skoniecki J., Kowalczyk E., Domański : Elektryczne zespoły trakcyjne. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1967.
- [3] Cianciara K.: Współpraca pantografów z siecią trakcyjną przy podwyższonych prędkościach jazdy. Przegląd Elektrotechniczny 10/72.
- [4] Banek A. i inni : Badania i wytyczne dla konstrukcji i modernizacji sieci dla dużej prędkości jazdy. Wydawnictwa COB i RTK, Warszawa 1972.
- [5] Figurzyński Z.: Sieć trakcyjna na liniach z dużymi prędkościami. Przegląd Elektrotechniczny 9/70 i 10/1970.
- [6] Grajner J.: Zagadnienia mechaniczne współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną. Transport Kolejowy - I Sympozjum Katowice-Jaszowiec 1977 - Referaty.
- [7] Fidrych Z., R. Konieczny : Modelowanie dynamiki współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną przy użyciu maszyn matematycznych. Transport Kolejowy - I Sympozjum Katowice-Jaszowiec 1977 - Referaty.

Recenzent:

Doc. dr hab. inż. Przemysław Pazdro

#### ELEKTRODYNAMIC INFLUENCE OF THE PANTOGRAPH AND TROLLEY WIRE OF THE OVERHEAD CONTACT SYSTEM

##### Summary

The paper discusses the influence of elektrodynamic force the cooperation between the pantograph and trolley wire. Besides the teoretical description of this phenomenon there are also results of practical experiment included.

The anther proposes so introduce some corections in the formules presently employed.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ПАНТОГРАФА  
И КОНТАКТНОГО ПРОВОДА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Резюме

Предмет говорит о влиянии электродинамической силы на сотрудничество между пантографом и контактными проводом. Вместе с теоретическим описанием явления представляет тоже результаты пробирных исследований.

Автор предлагает введение исправлений в настоящее время использованных примерах.