

Piotr GAWOR

Instytut Elektryfikacji
i Automatykacji Górnictwa
Politechniki Śląskiej

WPLYW REZYSTANCJI ZIĄCZA PODEŹNEGO SZYN TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ NA POWSTAWANIE PRĄDÓW BŁĄDZĄCYCH

Streszczenie: Przeprowadzono analizę teoretyczną rozkładu potencjałów szyn oraz rozptyłu prądu w szynach trakcji elektrycznej przewodowej w przypadku, gdy brakuje łącznika podłużnego w obydwu tokach toru. Dokonano analizy wpływu rezystancji pojedynczego złącza podłużnego szyn na powstawanie prądów błędzących.

1. WSTĘP

Jednym z czynników, które w sposób istotny wpływają na powstawanie prądów błędzących jest stan sieci powrotnej trakcji elektrycznej przewodowej. Stan ten ilościowo opisuje się wprowadzając pojęcie jednostkowej rezystancji podłużnej szyn r_g , wyrażanej w Ω/km oraz jednostkowej rezystancji przejścia z szyn do ziemi r_n , wyrażanej w $\Omega.\text{km}$. Dla potrzeb analizy teoretycznej zjawiska upływu prądu z szyn zakłada się, że obydwie te rezystancje rozłożone są równomiernie na całej długości toru.

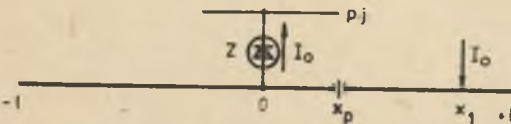
W praktyce często zdarza się, że w czasie eksploatacji linii trakcji elektrycznej dochodzi do uszkodzenia pojedynczych łączników podłużnych. W następstwie tego dojść może albo do powstania przerwy elektrycznej w szynach, albo do punktowego wzrostu rezystancji podłużnej szyn.

W dalszej części niniejszego artykułu przeprowadzono analizę wpływu obecności przerwy w szynach oraz wpływu wartości rezystancji złącza podłużnego na rozkład potencjałów i prądów w szynach.

Analiza dotyczy przypadku prowadzącego do największych prądów błędzących, tzn. przypadku jednostronnego zasilania linii trakcyjnej i pojedynczego, skupionego obciążenia.

2. ROZKŁAD POTENCJAŁÓW I PRĄDU W SZYNACH Z POJEDYNCZĄ PRZERWĄ ELEKTRYCZNĄ

Przedmiotem rozważań niech będzie odcinek linii jednotorowej o długości $2l$, zasilany jednostronnie ze stacji usytuowanej w punkcie O (rys. 1),



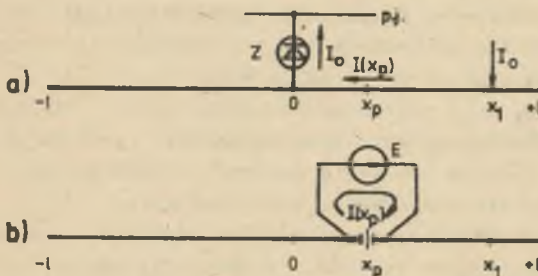
Rys. 1. Rysunek poglądowy odcinka linii trakcji elektrycznej zasilanego jednostronnie w punkcie O , obciążonego w punkcie x_1 prądem I_0 i posiadającego przerwę w szynach w punkcie x_p
 Z - stacja zasilająca, p.j. - przewód jezdny

obciążony prądem I_0 , przyłożonym w dowolnym punkcie x_1 w postaci pojedynczego obciążenia skupionego. Szyny odcinka niech charakteryzują się równomiernie rozłożonymi rezystancjami: podłużną r_B i przejścia r_p .

Założmy, że w dowolnym punkcie x_p rozpatrywanej linii wystąpi przerwa (np. brak łącznika podłużnego w obydwu tokach). Prąd w szynach w punkcie x_p będzie wówczas równy zero.

Rozkład potencjałów i rozptył prądu w szynach dla tej sytuacji znaleźć można na drodze superpozycji dwóch przypadków:

a) szyny nie posiadające przerwy, zasilane w punkcie O i obciążone prądem I_0 w punkcie x_1 (rys. 2a); prąd w punkcie x_p szyn oznaczymy symbolem $I(x_p)$,



Rys. 2. Przypadki składowe pomocne do analizy pracy linii z przerwą w szynach

a) szyny bez przerwy, obciążone w punkcie x_1 i zasilane w punkcie O ,
 b) szyny nieobciążone, z zastępczą SEM-ną włączoną w punkcie x_p

b) szyny posiadające przerwę w punkcie x_p , do której przyłączona jest siła elektromotoryczna E o takiej wartości, że wywołany przez nią prąd w punkcie x_p szyn będzie równy $I(x_p)$ i przeciwnie skierowany niż w przypadku a), (rys.2b). Dla przypadku a) wartość potencjału szyn względem ziemi $V(x)$ oraz prądu w szynach $I(x)$ w dowolnym punkcie x określić można z wyrażenia [3]:

- dla odcinka $-1 \leq x \leq 0$

$$V(x) = \frac{I_0 r}{\operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{ch} \alpha(1+x) [\operatorname{ch} \alpha(1-x_1) - \operatorname{ch} \alpha l] \quad (1a)$$

$$I(x) = \frac{I_0}{\operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{sh} \alpha(1+x) [\operatorname{ch} \alpha l - \operatorname{ch} \alpha(1-x_1)] \quad (1b)$$

- dla odcinka $0 \leq x \leq x_1$

$$V(x) = \frac{I_0 r}{\operatorname{sh} 2\alpha l} [\operatorname{ch} \alpha(1-x_1) \operatorname{ch} \alpha(1+x) - \operatorname{ch} \alpha l \operatorname{ch} \alpha(1-x)] \quad (2a)$$

$$I(x) = \frac{-I_0}{\operatorname{sh} 2\alpha l} [\operatorname{sh} \alpha(1+x) \operatorname{ch} \alpha(1-x_1) + \operatorname{sh} \alpha(1-x) \operatorname{ch} \alpha l] \quad (2b)$$

- dla odcinka $x_1 \leq x \leq 1$

$$V(x) = \frac{I_0 r}{\operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{ch} \alpha(1-x) [\operatorname{ch} \alpha(1+x_1) - \operatorname{ch} \alpha l] \quad (3a)$$

$$I(x) = \frac{I_0}{\operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{sh} \alpha(1-x) [\operatorname{ch} \alpha(1+x_1) - \operatorname{ch} \alpha l], \quad (3b)$$

w których

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_g}{r_p}}, \quad \text{km}^{-1} - \text{współczynnik ugiętu,}$$

$$r = \sqrt{r_g r_p}, \quad \Omega - \text{rezystancja charakterystyczna szyn,}$$

a pozostałe oznaczenia wynikają z rys. 1 i rys. 2.

W przypadku włączenia do przerwanych szyn siły elektromotorycznej rozkład potencjałów i prądu w szynach opisany jest wzorami [3]:

- dla odcinka $-1 \leq x < x_p$

$$V(x) = \frac{-E}{\operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{sh} \alpha(1-x_p) \cdot \operatorname{ch} \alpha(1+x) \quad (4a)$$

$$I(x) = \frac{E}{r \operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{sh} \alpha(1-x_p) \cdot \operatorname{sh} \alpha(1+x) \quad (4b)$$

- dla odcinka $x_p < x \leq 1$

$$V(x) = \frac{E}{\operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{sh} \alpha(1+x_p) \cdot \operatorname{ch} \alpha(1-x) \quad (5a)$$

$$I(x) = \frac{E}{r \operatorname{sh} 2\alpha l} \operatorname{sh} \alpha(1+x_p) \cdot \operatorname{sh} \alpha(1-x). \quad (5b)$$

Wartość siły elektromotorycznej, jaką trzeba włączyć do przerwy w szynach obliczyć można z warunku równości wartości bezwzględnych prądów $I(x_p)$ w punkcie x_p szyn w obydwu przypadkach. Należy w tym celu przyrównać wyrażenia (4b) lub (5b) z jednym z wyrażeń (1b), (2b), (3b), w zależności od położenia punktu x_p .

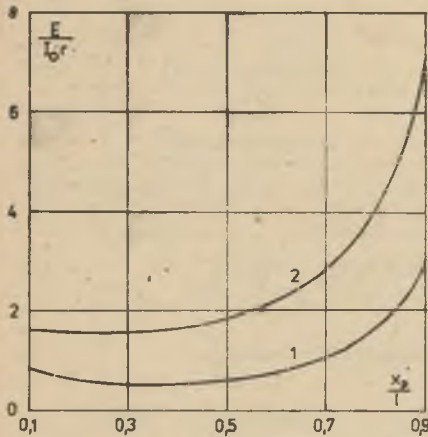
Przykładowo, dla sytuacji przedstawionej na rys. 1., tzn. dla

$$x_1 > x_p > 0,$$

należy przyrównać wyrażenia (4b) i (2b), podstawiając $x = x_p$. Szukana wartość E będzie wówczas równa:

$$E = I_0 r \frac{\operatorname{ch} \alpha(1-x_1)}{\operatorname{sh} \alpha(1-x_p)} + \frac{\operatorname{ch} \alpha l}{\operatorname{sh} \alpha(1+x_p)} \quad (6)$$

Z wyrażenia (6) wynika, że dla określonych parametrów sieci szynowej αl linii obciążonej prądem I_0 wartość E zależy od miejsca położenia obciążenia x_1 oraz od miejsca, w którym brakuje łącznika podłużnego x_p . Przyjmując przypadek najniekorzystniejszego obciążenia, tzn. przyłożonego w punkcie $x_1 = 1$, wyznaczono zależność $E = f(x_p)$, którą przedstawiono na rys. 3. Dla wykreślenia zależności



Rys. 3. Zależność zastępczej siły elektromotorycznej, jaką należy włączyć do przerwy w punkcie x_p , aby zrównoważyć prąd pochodzący od obciążenia I_0

- 1 - dla $\alpha = 0,316 \text{ km}^{-1}$
2 - dla $\alpha = 0,141 \text{ km}^{-1}$

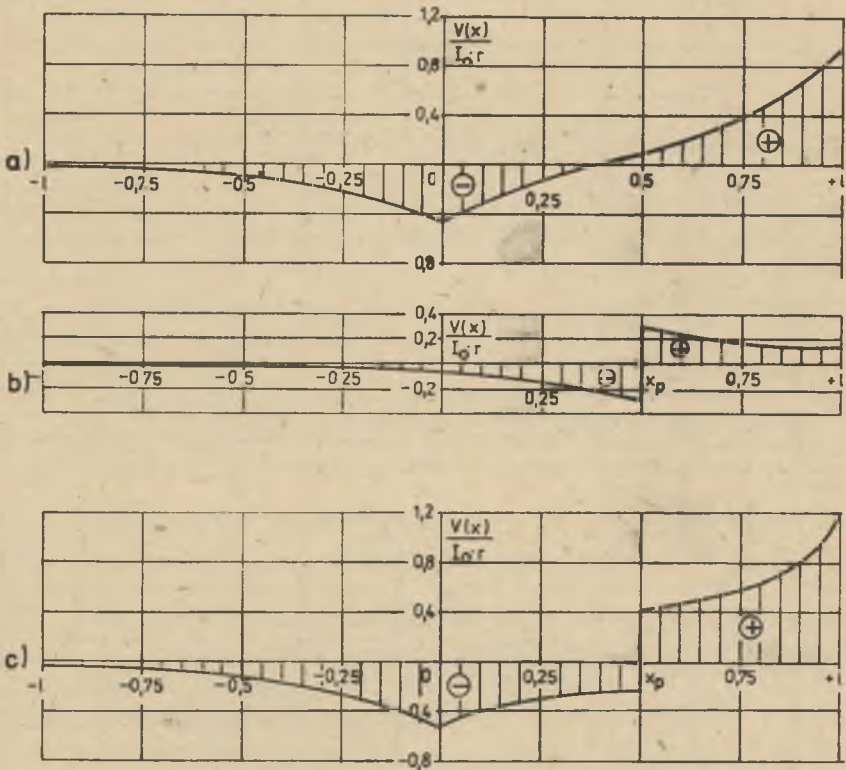
przyjęto następujące parametry linii:

$$l = 10 \text{ km}; \alpha = 0,316 \text{ km}^{-1} \quad (r_s = 0,02 \Omega \cdot \text{km}^{-1}; r_p = 0,2 \Omega \text{ km})$$

$$\text{oraz } \alpha = 0,141 \text{ km}^{-1} \quad (r_s = 0,02 \Omega \cdot \text{km}^{-1}; r_p = 1 \Omega \cdot \text{km}).$$

Znając wartość siły elektromotorycznej niezbędnej do zrównoważenia prądu $I(x_p)$ w szynach, wywołanego obciążeniem I_0 , można wyznaczyć wypadkowy rozkład potencjałów oraz prądu w szynach posiadających przerwę w punkcie x_p . Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe (dla $x_p = 0,5$ i $x_1 = 1$) wykresy poszczególnych wielkości dla obydwu przypadków składowych oraz wykresy wypadkowego rozkładu potencjałów i prądu w szynach (rys. 4c i rys. 5c).

Na podstawie rozkładu potencjałów i prądu w szynach można scharakteryzować efekt powstawania prądów błądzących. Ogólny kierunek wektora natężenia przeżyłowego pola elektrycznego w ziemi określony jest rozkładem

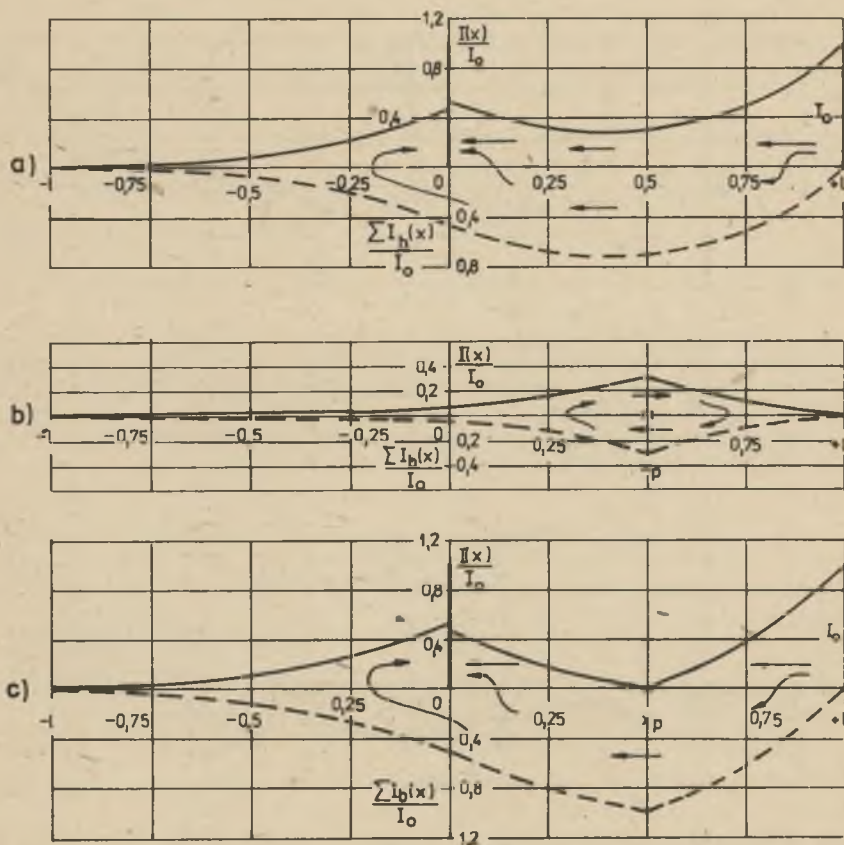


Rys. 4. Rozkłady potencjałów szyn z przerwą w punkcie x_p dla linii zasilanej jednostronnie w punkcie 0 i obciążonej pojedynczym obciążeniem skupionym w punkcie 1;

a), b) - przypadki składowe, c) - wypadkowy rozkład potencjałów

strefy anodowej i katodowej szyn. Wartość prądu wypływającego z szyn i rozprzyskującego się w ziemi w postaci prądów błądzących nie jest jednakowa wzdłuż odcinka linii. Rozkład sumarycznych prądów błądzących przedstawiono na rys. 5 linią przerywaną. Sumaryczne prądy błądzące w danym punkcie $\sum I_b(x)$ należy rozumieć jako sumę prądów w ziemi, przepływających przez płaszczyznę poprowadzoną prostopadłe w tym punkcie do osi torów. Dla odcinka pomiędzy punktem przyłożenia obciążenia i stacją zasilającą wartość sumarycznych prądów błądzących wynika z zależności:

$$\sum I_b(x) = I_0 - I(x) \quad (7)$$



Rys. 5. Rozpływ prądu w szynach $I(x)$ oraz wartości sumarycznych prądów błędnych $\Sigma I_b(x)$ wywołanych pracą linii zasilanej jednostronnie i obciążonej pojedynczym obciążeniem skupionym w punkcie 1, posiadającej przerwę w punkcie x_p ;

a), b) - przypadki składowe, c) wypadkowy rozpływ prądu

Największą wartość przyjmują prądy błędne w punkcie rozgraniczającym strefę anodową od strefy katodowej (w którym potencjał szyn jest równy zero). Istnienie przerwy w szynach sprawia, że największą wartość prądów błędnych jest równa prądowi obciążenia linii I_0 .

Prądy w nieobciążonych odcinkach szyn (dla sytuacji podanej na rys. 1) będą to odcinki określone nierównościami $x < 0$ oraz $x > x_1$ są w całości prądami błędными. Prąd $I(x_1+)$ w całości wypływa z szyn do ziemi, natomiast na prąd $I(0-)$, wpływający do stacji zasilającej, składają się prądy, które wpłynęły z ziemi do szyn w strefie katodowej. Wartości tych prądów okreś-

liczyć można z równań (1b), (3b), (4b), (5b) lub, znając wartość potencjałów szyn w punktach (0-) i (x_1+) , z wyrażenia:

$$I(0-) = \frac{V(0-)}{r \operatorname{cthg}l} \quad (8)$$

$$I(x_1+) = \frac{V(x_1+)}{r \operatorname{cthg}(l-x_1)} \quad (9)$$

Przedstawiona metoda analizy rozkładu potencjałów i prądu w szynach zastosowana może być dla dowolnego innego usytuowania punktu przyłożenia obciążenia x_1 oraz przerwy w szynach x_n . W przypadku większej liczby obciążeń skupionych analizę należy powtórzyć dla każdego obciążenia z osobna, a wyniki zsumować.

3. WPŁYW REZYSTANCJI ZŁĄCZA PODŁUŻNEGO NA ROZKŁAD POTENCJAŁÓW I PRĄDU W SZYNACH

Przyodek wystąpienia przerwy elektrycznej (o rezystancji nieskończenie dużej) w szynach jest przypadkiem skrajnym. Jest on istotny z punktu widzenia teoretycznego, jednakże w praktyce zdarza się rzadko. Znacznie częściej mamy do czynienia z uszkodzeniem lub pogorszeniem się stanu złącza podłużnego szyny, w wyniku którego pojawia się w danym punkcie rezystancja R . Stan taki przedstawiony jest na rys. 6.

Wpływ rezystancji pojedynczego złącza R (w każdym toku) na rozkład potencjałów i rozkład prądów w szynach i w ziemi przedyskutować można na przykładzie rys. 4 i rys. 5. Rysunki 4a i 5a potraktować można jako jeden przypadek graniczny, tzn. taki, w którym rezystancja złącza równa jest zero. Z kolei rysunki 4c i 5c dotyczą, jak już wspomniano, drugiego przypadku granicznego, w którym rezystancja złącza jest nieskończenie duża. Dla pośrednich wartości rezystancji złącza wykresy rozkładu potencjałów i prądu w szynach będą zatem miały przebieg pośredni pomiędzy przedstawionymi na rys. 4a i 4c oraz rys. 5a i 5c.

Wraz ze zmianą rezystancji R zmieniać się będzie wartość prądu płynącego przez uszkodzone złącze i odpowiednio - wartość prądów błądzących płynących w ziemi w punkcie x_R .

Wartość prądu płynącego przez rezystancję R obliczyć można stosując twierdzenie Thevenina:

$$I_R = \frac{U}{R + x_1 + x_2} \quad (10)$$

gdzie:

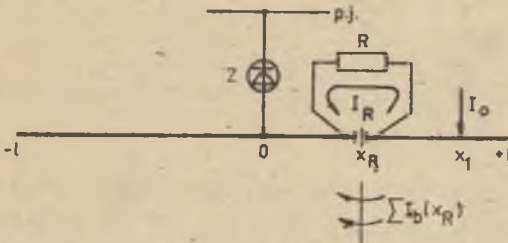
U - napięcie pomiędzy końcami łączonych szyn przed włączeniem rezystancji R ,

R_1, R_2 - rezystancje zastępcze odcinków torów odpowiednio po lewej i prawej stronie punktu x_R .

Wartość napięcia U odpowiada napięciu na przerwie w szynach i równa jest zastępczej sile elektromotorycznej E , którą oblicza się wg zasad przedstawionych w rozdziale 2. Rezystancje zastępcze szyn zgodnie z teorią linii o parametrach rozłożonych wynoszą:

$$R_1 = r \operatorname{cth}\alpha(1+x_R) \quad (11a)$$

$$R_2 = r \operatorname{cth}\alpha(1-x_R) \quad (11b)$$



Rys. 6. Rysunek poglądowy linii z pojedynczym złączem podłużnym o rezystancji R

Przykładowo, dla przypadku przedstawionego na rys. 6, gdy $0 < x_R < x_1$, napięcie U obliczyć można ze wzoru (6) i wówczas prąd płynący w uszkodzonym złączu o rezystancji R określony jest wyrażeniem:

$$I_R = I_0 r \frac{\frac{\operatorname{ch}\alpha(1-x_1)}{\operatorname{sh}\alpha(1-x_R)} + \frac{\operatorname{ch}\alpha 1}{\operatorname{sh}\alpha(1+x_R)}}{R + r [\operatorname{cth}\alpha(1+x_R) + \operatorname{cth}\alpha(1-x_R)]} \quad (12)$$

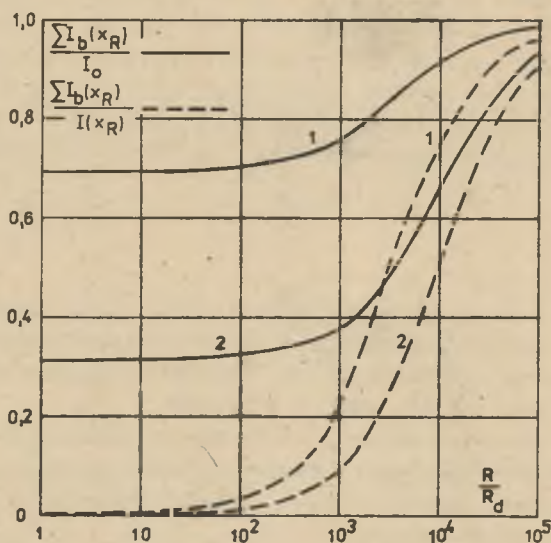
Dla zilustrowania zależności (12) przyjęto sytuację przedstawioną na rys. 4 i rys. 5 ($x_1 = 1$; $x_R = 0,51$) i obliczono, zgodnie z wyrażeniem (7), sumaryczną wartość prądów błędzących w punkcie x_R :

$$\sum I_b(x_R) = I_0 - I_R \quad (13)$$

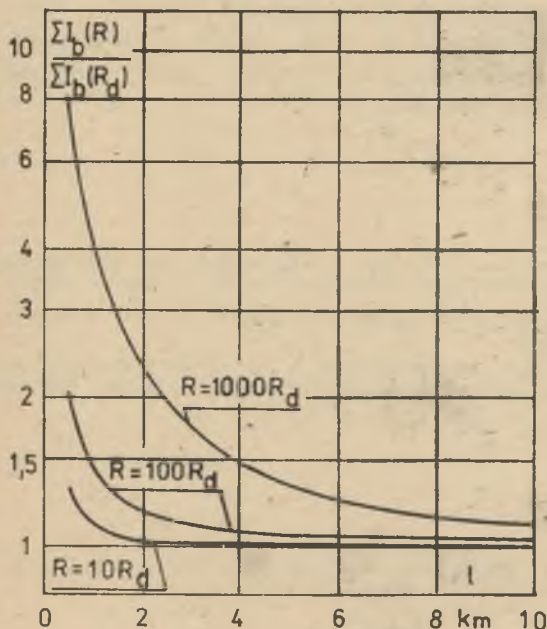
Zależność (13) przedstawiono wykreślnie na rys. 7.

Rezystancja uszkodzonego złącza podana została w jednostkach względnych, przy czym jako rezystancję odniesienia przyjęto wartość dopuszczalnej rezystancji złącza podłużnego R_d , równą rezystancji dwóch metrów szyn [2].

Dodatkowo, linią przerywaną wykreślono zależność sumarycznych prądów błędzących, odniesioną do wartości prądu, jaki płynąłby w szynach w punkcie x_R , gdyby one posiadały złącze podłużne wykonane zgodnie z wymaganiami normy [2], tzn. dla $R = R_d$.



Rys. 7. Zależność sumarycznej wartości prądów błędzących w punkcie x_R od rezystancji pojedynczego złącza podłużnego; 1 - dla $\alpha = 0,316 \text{ km}^{-1}$, 2 - dla $\alpha = 0,141 \text{ km}^{-1}$



Rys. 8. Zależność wzrostu sumarycznej wartości prądów błędzących w następstwie zwiększonej rezystancji pojedynczego złącza podłużnego od długości linii

Wpływ zwiększonej rezystancji pojedynczego złącza podłużnego (występującej jednocześnie w obydwu tokach toru) na wzrost prądów błądzących jest różny w liniach trakcyjnych o różnej długości. Zobrazowano to na rys. 8, odnosząc sumaryczną wartość prądów błądzących w punkcie o współrzędnej x_R (rys. 6) przy złączu o rezystancji $R = \sum I_b(R)$ do tejże wartości $-\sum I_b(R_d)$ w linii o prawidłowo wykonanych złączach, tzn. przy $R = R_d$.

4. WNIOSKI

1. Zastępcza siła elektromotoryczna E , jaką należy uwzględnić przy analizie rozkładu potencjałów i rozplywu prądu w szynach posiadających przerwę, zależna jest od parametrów torów, rodzaju obciążenia i wartości prądu oraz od miejsca wystąpienia przerwy w szynach.

2. Obecność przerwy w szynach, zwłaszcza na odcinku pomiędzy stacją zasilającą a punktem przyłożenia obciążenia, powoduje zmianę rozkładu potencjałów szyn; zmianie ulegają zarówno wartości potencjałów, jak i granice stref anodowej i katodowej szyn.

3. Wartość prądów błądzących zależy od rezystancji pojedynczego złącza podłużnego szyn. W praktyce jednak odczuwalnego wzrostu prądów błądzących należy się spodziewać dopiero przy ok. 100-krotnym wzroście rezystancji pojedynczego złącza podłużnego w stosunku do rezystancji złącza wykonane prawidłowo.

4. Wpływ zwiększonej rezystancji pojedynczego złącza podłużnego (w każdym toku) na wzrost prądów błądzących jest istotniejszy w liniach krótkich. Przy długości linii $l < 1$ km spodziewać się można kilkakrotnego wzrostu prądów błądzących; w liniach o długości $l > 10$ km prądy błądzące wzrosnąć mogą o kilka do kilkunastu procent.

LITERATURA

- [1] GAWOR P.: Badania źródeł prądów błądzących i ich wpływ na zagrożenia w kopalniach ROW. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1976.
- [2] PN-66/E-05024 Ochrona podziemnych urządzeń metalowych przed korozją powodowaną prądami błądzącymi.
- [3] STRIŻEWSKI I.W.: Teoria i rachunek drenażowej i katodowej zaszczycy magistralnych trzuboprowadów od korozji błądząjącymi tokami. Moskwa 1963.

Wpłynęło do redakcji 29.V.1981 r.

Recenzent: doc. dr inż. Władysław Dziuba

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО РЕЛЬСОВОГО СТЫКА ЭЛЕКТРОТЯГИ
НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ БЛУДАЮЩИХ ТОКОВ

Р е з ю м е

Проведен теоретический анализ распределения потенциалов рельсов, а также токораспределения в рельсах электропроводной тяги в случае, когда отсутствует продольный стык в двух токах пути. Проведен теоретический анализ влияния сопротивления отдельного продольного стыка рельсов на возникновение блуждающих токов.

THE INFLUENCE OF RAIL BOND RESISTANCE OF ELECTRIC TRACTION
ON STRAY CURRENTS FORMATION

S u m m a r y

There has been carried out a theoretical analysis of rail potential distribution and current propagation in rails of electric traction in case when there is no rail bond in both rails. Also the influence of a single rail bond resistance on the formation of stray currents, has been analysed.