

Piotr GAWOR

ANALIZA ROZKŁADU POTENCJAŁÓW I PRĄDU W SZYNACH TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ
DOŁOWEJ Z LOKALNYM UZIEMIENIEM SZYN

Streszczenie. Trudne warunki pracy sieci szynowej trakcji elektrycznej przewodowej w podziemiach kopalń prowadzić mogą do sytuacji, gdy na stosunkowo krótkim odcinku następuje znaczne obniżenie rezystancji przejścia. Można zatem mówić o punktowym dodatkowym uziemieniu szyn.

W artykule przedstawiono analizę rozkładu potencjałów prądu w szynach w takiej sytuacji. Punktem wyjścia jest określenie wartości prądu spływającego z szyn do ziemi przez rezystancję lokalnego uziemienia szyn. Znając ten prąd można go potraktować jako dodatkowe obciążenie skupione i, stosując zasadę superpozycji, obliczyć rozkłady potencjałów i rozptyw prądu w szynach.

Czynnikiem decydującym o wartości prądu płynącego przez lokalne uziemienie jest wartość jego rezystancji, a także miejsce jego usytuowania wzdłuż linii trakcji. Zauważalny wpływ na rozptyw prądu w szynach mają lokalne uziemienia o rezystancji nie przekraczającej dwukrotnej wartości rezystancji charakterystycznej szyn.

1. WSTĘP

Analiza teoretyczna powstawania prądów błądzących w wyniku wpływu prądu z szyn trakcji elektrycznej przewodowej przeprowadzana jest zwykle przy założeniu jednorodności parametrów elektrycznych sieci szynowej [1], [3]. Oznacza to przyjęcie, że rezystancja wzdłużna i rezystancja przejścia na całej długości sieci szynowej rozłożone są równomiernie.

Założenie to, słuszne w odniesieniu do dobrze utrzymanych zelektryfikowanych linii kolejowych, nie zawsze jest spełnione w warunkach pracy trakcji elektrycznej w podziemiach kopalń. Torowisko dołowych linii trakcyjnych niejednokrotnie prowadzone jest w wyrobiskach o znacznym lokalnym zawadnieniu powodującym obniżenie wartości rezystancji przejścia na krótkim (w stosunku do długości całej linii) odcinku.

Innym powodem lokalnego obniżenia rezystancji przejścia może być niewłaściwe zainstalowanie (np. w zetknięciu z elementami stalowej obudowy wyrobiska) często stosowanej w kopalniach dodatkowej liny połączonej z szynami. Obydwie wymienione wyżej sytuacje wynikają z niewłaściwej eksploatacji sieci szynowej.

W dostępnej literaturze rozpatrywane były dotąd przypadki:

- sieci szynowej, której parametry elektryczne są różne, lecz o stałej wartości na dłuższych odcinkach linii [5],
- sieci szynowej z lokalną niejednorodnością rezystancji wzdłużnej [2].

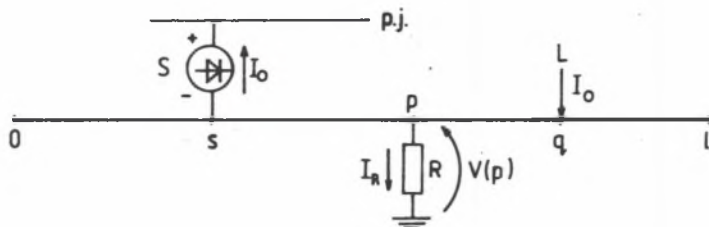
Istnieje potrzeba opisu rozkładu potencjałów i rozplywu prądu w szynach, w przypadku gdy w dowolnym punkcie linii nastąpi zmniejszenie rezystancji przejścia. Uzasadnienie potrzeby wynika ze specyfiki zjawiska powstawania źródeł prądu błędzającego w przodkach. W zjawisku tym istotną rolę odgrywa potencjał punktu sieci szynowej, w którym może nastąpić zakłócenie jednorodności rezystancji przejścia [1], [3].

W artykule przedstawiono analizę teoretyczną rozkładu potencjałów i rozplywu prądów w takiej sieci szynowej.

2. WARTOŚĆ PRĄDU PŁYNAJĄCEGO PRZEZ LOKALNE UZIEMIENIE SZYN

Rozpatrzmy linię trakcji elektrycznej przewodowej zasilaną z pojedynczej stacji prostownikowej S i obciążoną pojedynczą lokomotywą L , pobierającą prąd I_0 (rys. 1). Sieć charakteryzuje się równomiernie rozłożonymi:

- rezystancję wzdłużną r_s ,
- rezystancję przejścia r_p .



Rys. 1. Rysunek poglądowy linii trakcji elektrycznej przewodowej, której szyny w punkcie p uziemione są dodatkowo za pośrednictwem rezystancji R
 Fig. 1. Illustration of a electric traction, the rails of which are additionally earthed at point p due to the resistance R

Założmy, że w dowolnym punkcie o współrzędnej p szyny połączone są z ziemią dodatkowo (oprócz istniejącej, rozłożonej równomiernie rezystancji przejścia r_p) za pośrednictwem rezystancji R . Wartość potencjału szyn w punkcie p oznaczymy przez $V(p)$, zaś prąd płynący przez rezystancję R przez I_R . Pozostałe oznaczenia wynikają z rys. 1. Wartość szukanego prądu I_R obliczyć można stosując np. zasadę Thevenina. I tak prąd I_R wyrazić można za pomocą wzoru:

$$I_R = \frac{V(p)}{R + R_w} \quad (1)$$

w którym:

- $V(p)$ - potencjał szyn w punkcie p przed włączeniem rezystancji R ,
 R_w - rezystancja zastępcza sieci szynowej widziana z punktów przyłączenia rezystancji R (rezystancja wewnętrzna zastępczego generatora o napięciu $V(p)$).

Potencjał $V(p)$ szyn przed włączeniem rezystancji R wyznaczyć można posługując się wzorami opisującymi rozkład potencjałów szyn wzdłuż linii o parametrach jednostajnie rozłożonych [1]:

- na odcinku $0 \leq x \leq s$

$$V(x) = \frac{I_0 \cdot r_s}{\alpha \cdot \operatorname{sh} \alpha l} [-\operatorname{ch} \alpha(1-s) + \operatorname{ch} \alpha(1-q)] \cdot \operatorname{ch} \alpha x, \quad (2)$$

- na odcinku $s \leq x \leq q$

$$V(x) = \frac{I_0 \cdot r_s}{\alpha \cdot \operatorname{sh} \alpha l} [\operatorname{ch} \alpha(1-q) \cdot \operatorname{ch} \alpha x - \operatorname{ch} \alpha s \cdot \operatorname{ch} \alpha(1-x)], \quad (3)$$

- dla odcinka $q \leq x \leq l$

$$V(x) = \frac{I_0 \cdot r_s}{\alpha \cdot \operatorname{sh} \alpha l} [\operatorname{ch} \alpha q - \operatorname{ch} \alpha s] \cdot \operatorname{ch} \alpha(1-x). \quad (4)$$

W wyrażeniach od (2) do (4) przez α oznaczono współczynnik upływu równy:

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_s}{r_p}}, \quad \text{km}^{-1}. \quad (5)$$

Podstawiając we wzorach (3) lub (4) $x = p$ otrzymamy:

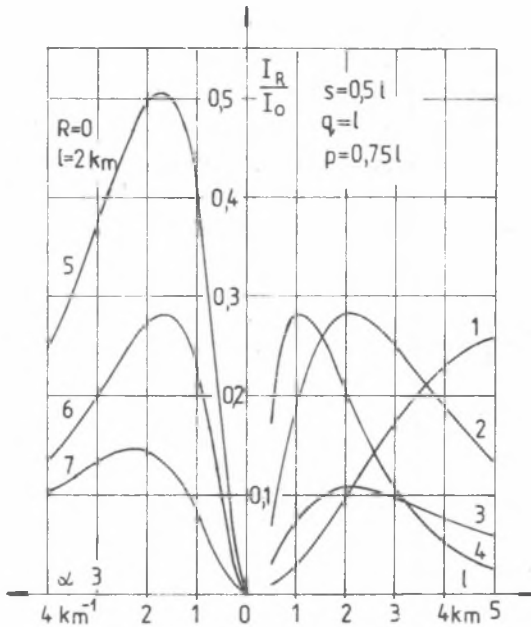
$$V(p) = \frac{I_0 \cdot r_s}{\alpha \cdot \operatorname{sh} \alpha l} [\operatorname{ch} \alpha(1-q) \cdot \operatorname{ch} \alpha p - \operatorname{ch} \alpha s \cdot \operatorname{ch} \alpha(1-p)]. \quad (6)$$

Na rezystancję R_w składają się równolegle połączone rezystancje zastępcze odcinków sieci szynowej znajdujących się po lewej (R_1) i po prawej (R_2) stronie punktu o współrzędnej p :

$$R_w = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{[r \cdot \operatorname{cth} \alpha p] \cdot [r \cdot \operatorname{cth} \alpha(1-p)]}{[r \cdot \operatorname{cth} \alpha p] + [r \cdot \operatorname{cth} \alpha(1-p)]}, \quad (7)$$

gdzie:

$$r = \sqrt{r_s r_p} - \text{rezystancja charakterystyczna sieci szynowej.}$$



Rys. 2. Zależność względnego prądu spływającego z szyn do ziemi przez lokalne ich uziemienie od długości linii i współczynnika upływu
 1 - $R=0$, $\alpha=0,5 \text{ km}^{-1}$, 2 - $R=0$, $\alpha=1,6 \text{ km}^{-1}$, 3 - $R=r$, $\alpha=1,4 \text{ km}^{-1}$,
 4 - $R=0$, $\alpha=3 \text{ km}^{-1}$, 5 - $s=0,25l$, $q=1$, $p=0,75l$, 6 - $s=0,5l$, $q=1$,
 $p=0,75l$, 7 - $s=0$, $q=0,75l$, $p=0,5l$

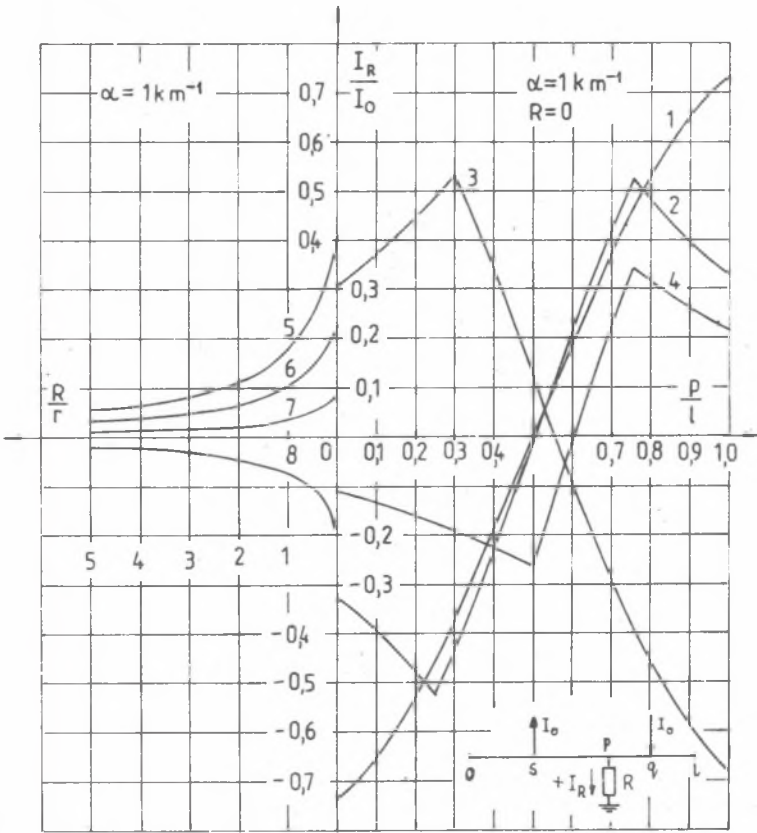
Fig. 2. Relation between the current leaking from the rails into the earth due to earthing and the length of the track and the coefficient of leakage

Wstawiając (6) i (7) do (1) i dokonując odpowiednich przekształceń, otrzymamy:

$$\frac{I_R}{I_0} = \frac{ch\alpha(1-q) \cdot ch\alpha p - ch\alpha s \cdot ch\alpha(1-p)}{\frac{R}{r} \cdot sh\alpha l + ch\alpha p \cdot ch\alpha(1-p)} \quad (8)$$

Wzór (8) obowiązuje dla sytuacji przedstawionej na rys. 1, tzn. gdy są spełnione nierówności:

$$s \leq p \leq q \quad (9)$$

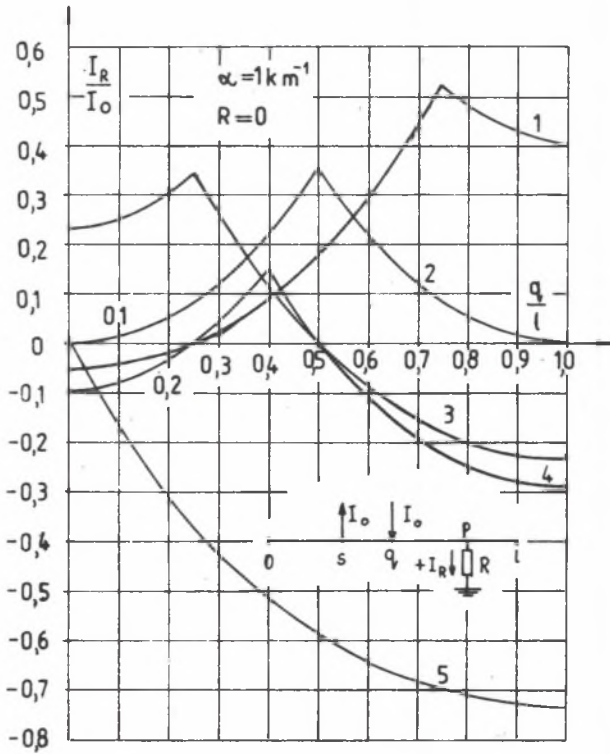


Rys. 3. Zależność względnego prądu spływającego z szyn do ziemi ($+I_R$) lub wpływającego z ziemi do szyn ($-I_R$) przez lokalne ich uziemienie od miejsca położenia uziemienia p i wartości rezystancji uziemienia R
 1 - $s=0, q=1$, 2 - $s=0,251, q=0,751$, 3 - $s=0,31, q=1$, 4 - $s=0,51, q=0,751$, 5 - $s=0,251, q=1$, 6 - $s=0,51, q=1, p=0,751$, 7 - $s=0, q=0,751, p=0,51$, 8 - $s=0,51, q=0,251, p=0,751$

Fig. 3. Dependence of the leakage of current from the rails into the earth ($+I_R$) or passing from the earth into the rails ($-I_R$) due to local earthing upon the location of the earthing p and the value of the resistance of earthing R

W sytuacji, gdy lokomotywa znajduje się po lewej stronie punktu p , wzór na potencjał $V(p)$ szyn ulega zmianie i wówczas:

$$\frac{I_R}{I_0} = \frac{ch\alpha(1-p) \cdot (ch\alpha q - ch\alpha s)}{r \cdot sh\alpha l + ch\alpha p \cdot ch\alpha(1-p)} \quad (10)$$



Rys. 4. Zależność względnego prądu spływającego z szyn do ziemi ($+I_R$) lub wpływającego z ziemi do szyn ($-I_R$) przez lokalne ich uziemienie od miejsca położenia p lokomotywy pobierającej z sieci prąd I_0 .
 1 - $s=0,25l$, $p=0,75l$, 2 - $s=0$, $p=0,5l$, 3 - $s=0,5l$, $p=0,25l$, 4 - $s=0,25l$,
 $p=0,4l$, 5 - $s=0$, $p=0$

Fig. 4. Dependence of the leakage of current from the rails into the earth ($+I_R$) or passing from the earth into the rails ($-I_R$) due to local earthing upon the location of the locomotive absorbing power I_0 from the power network

Analizując wzory (8) i (10) stwierdzamy, że wartość prądu, jaki będzie spływał z szyn do ziemi przez lokalne ich uziemienie, zależne będzie od:

- parametrów linii, tj. od współczynnika wpływu α i długości l ,
- miejsca punktowego uziemienia p i wartości rezystancji R ,
- miejsca położenia lokomotywy q .

Wpływ poszczególnych czynników na wartość prądu I_R przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4.

3. ROZKŁADY POTENCJAŁÓW SZYN Z LOKALNYM UZIEMIENIEM

Znając prąd płynący przez rezystancję lokalnego uziemienia szyn wyznaczyć można rozkład potencjałów szyn względem ziemi.

W tym celu prąd wpływający z szyn w punkcie p (lub wpływający do szyn) należy potraktować jako dodatkowe obciążenie skupione i obliczyć wypadkowy potencjał poszczególnych punktów, stosując zasadę superpozycji.

Dla sytuacji przedstawionej na rys. 1 składowa potencjału wynikająca z obciążenia sieci prądami lokomotywy i stacji zasilającej opisana jest wzorami (2), (3) i (4). Wyrażenia opisujące składową potencjału wynikającą z dodatkowego obciążenia prądem I_R będą miały postać:

- na odcinku $0 \leq x \leq p$

$$V(x) = - \frac{I_R \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha l} \text{ch} \alpha(1-p) \cdot \text{ch} \alpha x, \quad (11)$$

- na odcinku $p \leq x \leq l$

$$V'(x) = - \frac{I_R \cdot r_s}{\alpha \cdot \text{sh} \alpha l} \text{ch} \alpha p \cdot \text{ch} \alpha(1-x). \quad (12)$$

Wartość potencjału szyn w punkcie p jest oczywiście równa:

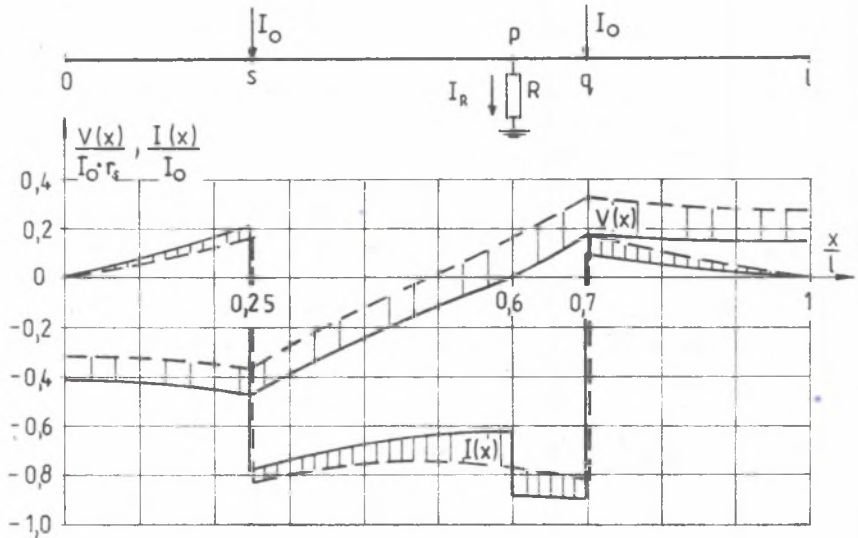
$$V(p) = I_R \cdot R. \quad (13)$$

Na rys. 5 i rys. 6 przedstawiono przykładowe rozkłady potencjałów szyn dla przypadku, gdy $R = 0$ (linie ciągłe) pokazując jednocześnie rozkłady potencjałów przy $R = \infty$, tzn. w sytuacji, gdy dodatkowe uziemienie sieci nie występuje (linie przerywane). Rozkłady potencjałów dla przypadków, gdy rezystancja uziemienia lokalnego szyn ma inne wartości (z przedziału $(0, \infty)$), mieszczą się w obszarach zakreskowanych.

4. PRĄDY W SZYNACH Z LOKALNYM UZIEMIENIEM

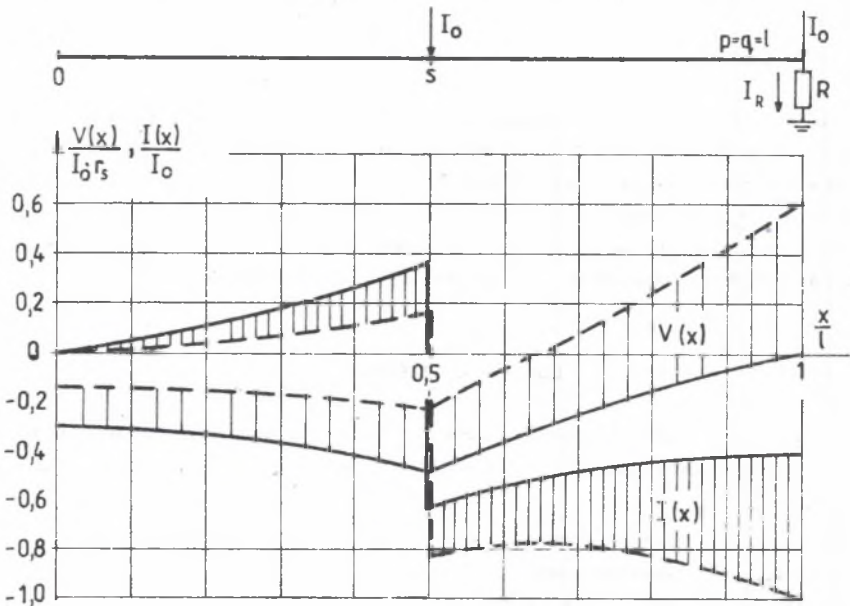
Prądy w szynach wyznaczyć można - podobnie jak rozkład potencjałów - przez nałożenie (superpozycję) wartości wywołanych trzema prądami obciążenia:

- prądem I_0 usytuowanym w punkcie q ,
- prądem $-I_0$ usytuowanym w punkcie s ,
- prądem I_R usytuowanym w punkcie p .



Rys. 5. Rozkłady potencjałów $V(x)$ i prądów w szynach $I(x)$ uziemionych dodatkowo w punkcie p przez rezystancję R , ----- $R = \infty$, ——— $R = 0$

Fig. 5. Distribution of potentials $V(x)$ and currents in rails $I(x)$ additionally earthed in the point p due to the resistance R



Rys. 6. Rozkłady potencjałów $V(x)$ i prądów w szynach $I(x)$ uziemionych dodatkowo w punkcie p przez rezystancję R , ----- $R = \infty$, ——— $R = 0$

Fig. 6. Distribution of potential $V(x)$ and currents in rails $I(x)$ additionally earthed in the point p due to the resistance R

Posługując się znanymi wzorami na prądy w szynach obciążonych pojedynczym obciążeniem skupionym [1], [4] napisać można następujące wyrażenia opisujące prądy w szynach dla przypadku przedstawionego na rys. 1 ($s \leq q \leq p$):

- odcinek $0 \leq x \leq s$

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{\operatorname{sh} \alpha l} [\operatorname{ch} \alpha(1-s) + k \cdot \operatorname{ch} \alpha(1-p) - \operatorname{ch} \alpha(1-q)] \cdot \operatorname{sh} \alpha x, \quad (14)$$

- odcinek $s \leq x \leq p$

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{\operatorname{sh} \alpha l} \left\{ [k \cdot \operatorname{ch} \alpha(1-p) - \operatorname{ch} \alpha(1-q)] \cdot \operatorname{sh} \alpha x - \operatorname{ch} \alpha s \cdot \operatorname{sh} \alpha(1-x) \right\}, \quad (15)$$

- odcinek $p \leq x \leq q$

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{-1}{\operatorname{sh} \alpha l} [(\operatorname{ch} \alpha s + k \cdot \operatorname{ch} \alpha p) \cdot \operatorname{sh} \alpha(1-x) + \operatorname{ch} \alpha(1-q) \cdot \operatorname{sh} \alpha x], \quad (16)$$

- odcinek $q \leq x \leq l$

$$\frac{I(x)}{I_0} = \frac{1}{\operatorname{sh} \alpha l} [(\operatorname{ch} \alpha q - \operatorname{ch} \alpha s - k \cdot \operatorname{ch} \alpha p) \cdot \operatorname{sh} \alpha(1-x)], \quad (17)$$

w których współczynnik k , będący stosunkiem wartości prądu płynącego przez rezystancję uziemienia I_R do wartości prądu obciążenia I_0 określony jest wyrażeniem (8).

Przykładowe rozkłady wartości prądów w szynach przedstawione zostały na rys. 5 i rys. 6. Podobnie jak dla rozkładów potencjałów wykreślono rozkłady prądów odpowiadające rezystancji uziemienia $R = 0$ (linie ciągłe) i rozkłady odpowiadające linii bez dodatkowej rezystancji uziemienia ($R = \infty$ - linie przerywane). Rozkłady wartości prądów dla przypadków, gdy rezystancja uziemienia lokalnego szyn ma inne wartości, zawarte będą wewnątrz obszarów zakreskowanych.

5. WNIOSKI

Przedstawiona analiza wpływu lokalnego uziemienia szyn na rozkład potencjałów i prądów pozwala wyciągnąć wnioski zarówno teoretyczne, jak i praktyczne. Z teoretycznego punktu widzenia uzyskano rozwiązanie przedstawionego zadania przyczyniające się do lepszego poznania zjawisk leżących u podstaw powstawania prądów błędnych w kopalniach. Zaproponowaną metodę można wykorzystać przy analizie szczególnych stanów sieci szynowej. Dotyczy to nie tylko lokalnego uziemienia szyn, na skutek niewłaściwej ich eksploatacji, ale i, przykładowo, linii z odgałęzieniami. Teoretycznie

zastępczą rezystancję szyn odcinka odgałęzionego można traktować jako lokalne uziemienie szyn głównej linii przez rezystancję o określonej wartości.

Przedstawione graficznie zależności prądu wpływającego z szyn do ziemi (lub wpływającego z ziemi do szyn) wskazują na pewne właściwości, których nie widać bezpośrednio w stosunkowo skomplikowanych formułach matematycznych. Przykładem może być występowanie ekstremum przebiegów pokazanych na rys. 2, z czego mogą wynikać wnioski odnośnie do projektowania długości linii trakcji i jej rozbudowy.

Z wniosków praktycznych na pierwszy plan wysuwa się ogólne stwierdzenie, że lokalne uziemienie wpływa na wzrost prądów błędzących. Wynika to bezpośrednio z wykresów rozkładu wartości prądów w szynach przedstawionych na rys. 5 i rys. 6. Dodatkowo sformułować można następujące wskazówki zwracające uwagę na warunki szczególnie sprzyjające wzrostowi prądów błędzących, a więc takie, którym należy poświęcić uwagę w trakcie eksploatacji linii trakcji elektrycznej:

1. Czynnikiem decydującym o wartości prądu płynącego przez lokalne uziemienie szyn jest wartość rezystancji tego uziemienia. Można przyjąć, że zauważalny wpływ na rozptył prądu w szynach mają lokalne uziemienia o rezystancji nie przekraczającej dwukrotnej wartości rezystancji charakterystycznej szyn ($R)r < 2$).

2. Lokalne uziemienia powstające na końcach linii w większym stopniu wpływają na wzrost prądów błędzących niż uziemienia powstałe w strefie środkowej linii (por. rys. 3 i rys. 4).

3. Obecność uziemienia lokalnego zmienia rozkład potencjałów szyn; w sytuacjach przedstawionych na rys. 5 i rys. 6 skróceniu uległa strefa anodowa.

LITERATURA

- [1] Gawor P.: Prądy błędzące w kopalniach wywołane pracą trakcji elektrycznej przewodowej. Seminarium elektryfikacji i automatyzacji kopalń, zeszyt 3. Skrypty uczelniane Politechniki Śląskiej nr 1125, Gliwice 1983.
- [2] Gawor P.: Wpływ rezystancji złącza podłużnego szyn trakcji elektrycznej przewodowej na powstawanie prądów błędzących. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Elektryka, z. 78, Gliwice 1982.
- [3] Herok P.: Wybrane zagadnienia prądów błędzących pochodzących od trakcji elektrycznej na dole kopalń. Materiały Konferencji naukowo-technicznej SEP nt. Wybrane zagadnienia trakcji elektrycznej w podziemiach kopalń. Rybnik 1985.
- [4] Striżewskij I.W.: Teoria i rasczot drenażnej i katodnej zaszczity magistralnych truboprowodow ot korrozii bluzhdajuszczimi tokami, Moskwa 1963.
- [5] Wojciechowski S.: Wpływ niejednorodności parametrów elektrycznych toru kolejowego na rozptył prądu i rozkład potencjału wzdłuż szyn. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, s. Elektryka z. 4, Łódź 1958.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ И ТОКА В РЕЛЬСАХ ШАХТНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ С МЕСТНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ РЕЛЬСОВ

Р е з ю м е

Трудные условия работы рельсовой сети электрической тяги в подземных выработках шахт могут проводить к ситуации когда на относительно коротком отрезке выступает значительное снижение переходного сопротивления. В этом случае можно говорить об местном добавочном заземлении рельсов. В статье представлен анализ распределения потенциалов и тока в рельсах в таком случае.

Исходной точкой является определение тока, который стекает с рельсов в землю через сопротивление местного заземления. Зная этот ток, можно считать его добавочной сосредоточенной нагрузкой и принимая метод наложения, вычислить распределение потенциалов и тока в рельсах. Величина тока стекающего по сопротивлению местного заземления зависит прежде всего от величины этого сопротивления, а также от места его расположения вдоль участка тяговой сети. Замечательное влияние на протекание тока в рельсах имеют местные заземления которых сопротивление не больше чем двухкратное характеристическое сопротивление рельсовой сети.

AN ANALYSIS OF THE POTENTIALS AND CURRENTS IN THE RAILS
OF UNDERGROUND ELECTRIC TRACTION WITH EARTHED RAILS

S u m m a r y

The difficult operating conditions of the railway net of the electrical trolley traction in mines may lead to situations when at a comparatively short track section the rails leakage resistance is considerably reduced. This might be called additional point - earthing of the rails.

This paper deals with the analysis of the potentials and currents in the rails in such a situation. The first step is to determine the value of the leaking current from the rails into the earth due to the resistance of the local earthing of rails. If this currents is know, it may be treated as additional concentrated load, and the potentials and currents in the rails can be calculated basing on the principle of superposition.

A decisive factor in the evaluation of current leaking over local earthings is the value of its resistance, as well as its place along the traction line. Local earthings with a resistance not exceeding the double value of the characteristic resistance of the rails are of noticeable influence on the currents distribution on the rails.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Machowski