

Wiesław SZUMIERZ
CNTK, Warszawa

WSPÓŁDZIAŁANIE BUDOWLI LINIOWEJ Z PODŁOŻEM GÓRNICZYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono analityczne ujęcie wpływów poziomych przemieszczeń podłoża górniczego na pracę statyczną odkształcalnych budowli liniowych (tory kolejowe, rurociągi, itp.).

1. ISTOTA PROBLEMU

Każda budowla posadowiona na podłożu górniczym (podłoże podlegające deformacji w obszarze wpływów niecki górniczej) ingeruje bezpośrednio w przebieg procesu jego deformacji, ograniczając swobodę przemieszczeń cząstek gruntu w pewnym obszarze jej oddziaływania. To współdziałanie budowli z deformującym się górniczo podłożem ma dla niej samej negatywne skutki. Budowla narażona jest bowiem na działanie poziomych sił tarcia od ruchów poziomych gruntu (składowa u , rys. 1) oraz pionowych sił pochodzących od wygięć podłoża (składowa w , rys. 1). Siły te, tworząc samorzównoważone układy oddziaływań na styku budowli z ruchomym podłożem, obciążają dodatkowo, oprócz obciążeń programowych, daną budowlę. Zmieniające się w ten sposób warunki pracy statycznej budowli prowadzą do powstania w niej dodatkowych sił wewnętrznych, przemieszczeń i odkształceń, które łącznie z wpływami od obciążeń programowych mogą doprowadzić do stanu zagrożenia wytrzymałości lub stateczności budowli, albo do ograniczenia jej funkcji użytkowych.

Obiekty związane z drogą kolejową, zlokalizowane na terenach górniczych, dzieli się na zwarte i liniowe (w zależności od kształtu rzutu poziomego) oraz na sztywne i odkształcalne (w zależności od zdolności do odkształcania się). Typowym przykładem obiektu zwartego, o ograniczonych wymiarach pola podstawy, jest budynek, przyczółek mostowy itp., natomiast obiektu liniowego, którego długość znacznie przekracza wymiary przekroju poprzecznego - na przykład tor kolejowy, przewód wodociągowy, kabel, itp. Obiekty zwarte mogą być, w zależności od ich konstrukcji, sztywne lub odkształcalne. Natomiast obiekty liniowe, stanowiące podstawową grupę wszystkich obiektów kolejowych zlokalizowanych na terenach górniczych, zalicza się z reguły do odkształcalnych.

Na rysunku 1 pokazano ogólny przypadek usytuowania toru kolejowego, budowli wybitnie liniowej, na zboczu niecki. W takim przypadku tor podlega: wpływowi składowej u_1 , wywołującej odkształcenia i siły osiowe w szynach, wpływom poprzecznych składowych v_1 i w powodujących zginanie toru odpowiednio w płaszczyźnie poziomej i pionowej oraz skręcaniu, wywołanym skręceniem geodezyjnym terenu na zboczu niecki.

Ze względu na proporcje wymiarów kształtu, rozpatrywany tor, wykazujący cechy ustroju wiotkiego (mała sztywność poprzeczna i skrętna), będzie się odkształcał w zasadzie biernie w ślad za deformującym się podłożem, w kierunku poprzecznym i skrętnym względem jego osi, bez istotnych zmian w układzie sił wewnętrznych. Natomiast w kierunku osiowym, z uwagi na znaczną sztywność podłużną EA, odkształcenia toru nie będą nadążać w tym samym stopniu, co jego odkształcenia poprzeczne i skrętne za zmianami poziomych deformacji podłoża. Wywoła to dość duże przyrosty sił podłużnych w torze, których uwzględnienie, wobec wymaganej wytrzymałości i stateczności toru, jest nader istotne. Niebezpieczne są zwłaszcza dodatkowe siły ściskające powstające w torze od spełzań podłoża w części wklęsłej zbocza niecki. Siły te bowiem, łącznie z siłami wywołanymi przez zmiany temperatury szyn i oddziaływania taboru, mogą spowodować lokalną utratę stateczności toru. Jak znaczne wartości osiągają czasem dodatkowe siły ściskające od wpływów górniczych, może świadczyć fakt, że do wyboczeń torów, a także rozjazdów dochodzi również w okresach zimowych, a więc w czasie występowania temperatur ujemnych.

Tak więc podstawowym problemem statycznym, jaki powstaje przy badaniu wpływów oddziaływań podłoża górniczego na tor kolejowy, jest określenie wartości i rozkładu poziomych jednostkowych sił kontaktowych t [kN/m], przekazywanych na ramę torową przez podsypkę przemieszczającą się poziomo na zboczu niecki górniczej i wywołanych nimi dodatkowych sił podłużnych w torze. W rzeczywistych warunkach pracy linii, wskutek wpływu dynamicznego oddziaływania taboru na tor, dochodzi do pewnego rozładowania sił kontaktowych wywołanych poziomymi ruchami górniczymi podłoża i tym samym do redukcji siły podłużnej określonej dla warunków statycznych.

Celem niniejszej pracy jest analityczne ujęcie wpływów poziomych przemieszczeń podłoża górniczego na pracę statyczną odkształcalnych budowli liniowych, za jakie uważa się tory kolejowe. W analizie uwzględnia się zarówno statyczne, jak i dynamiczne warunki pracy toru, współdziałającego z odkształcającym się podłożem górniczym w obrębie wpływów zbocza niecki.

2. MODEL WSPÓLDZIAŁANIA TORU Z DEFORMUJĄCYM SIĘ POZIOMO PODŁOŻEM

2.1. Warunki statyczne

Analizę wpływu poziomych przemieszczeń gruntu, występujących na stacjonarnym zboczu niecki górniczej, na pracę statyczną budowli liniowej nie-

skończenie długiej (rys. 2) przeprowadza się na przykładzie toru bezстыkowego (ustrój konstrukcyjnie ciągły na całej długości). Przemieszczenia podłoża górniczego wymuszające przemieszczenia toru opisano w przybliżeniu funkcją:

$$u_1 = \frac{u_{1\max}}{2} (1 + \cos \pi \xi) \quad (1)$$

gdzie:

$$u_{1\max} = u_{\max} \cdot \sin \alpha_0 \quad (\text{por. rys. 1}),$$

$$\xi = \frac{x_1}{r_1}, \quad r_1 = r / \sin \alpha_0$$

$r = H / \operatorname{tg} \beta_1$ - promień zasięgu wpływów głównych.

Rozpatrywana budowla torowa, o sztywności podłużnej EA, współpracując z deformującym się poziomo podłożem podsypkowym, ogranicza tym samym swobodę jego przemieszczeń (rys. 2b). Wskutek postaciowych odkształceń warstwy podsypkowej pojawiają się, wzdłuż linii styku toru z podłożem, poziome oddziaływania kontaktowe t , które - stanowiąc obciążenie zewnętrzne dla toru - wywołują w nim siły wewnętrzne podłużne N oraz sprężyste przemieszczenia osiowe \bar{u} jego przekrojów, zgodne co do kierunku i zwrotu z przemieszczeniami podłoża \bar{u}_1 . Wykres wymuszonych przemieszczeń \bar{u} , odwzorowujący w przybliżeniu rzeczywisty ich rozkład wzdłuż toru, przedstawiono schematycznie na rysunku 2a.

Wielkość oddziaływań t (rys. 2c) zależy wprost od wartości przemieszczeń podłoża i toru oraz od właściwości fizykomechanicznych podsypki i nie może przekroczyć pewnej wartości granicznej t_g , którą oblicza się z warunku wytrzymałości gruntu na ścinanie:

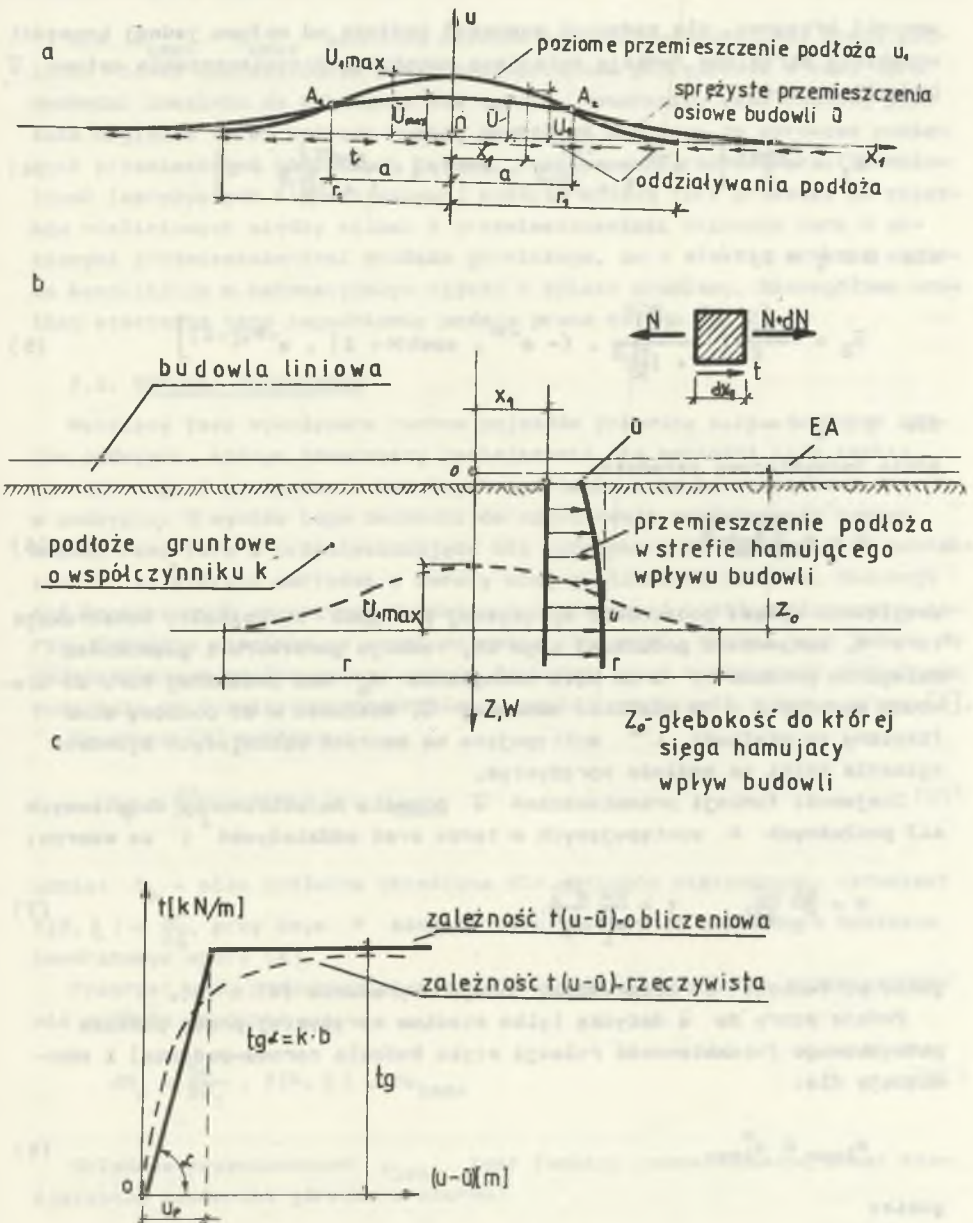
$$t = k \cdot b \cdot (u_1 - \bar{u}), \quad \text{dla } u_1 - \bar{u} \leq u_p \quad (2)$$

gdzie: $u_p = t_g / k \cdot b$ oznacza wartość względnego przemieszczenia sygnalizującą stan graniczny pracy podsypki;

$$\text{dla } u_1 - \bar{u} \geq u_p, \quad t = t_g. \quad (3)$$

Jak wynika z rysunku 2, analizę mechaniki współdziałania toru z deformującym się podłożem przeprowadza się na podstawie wspólnego schematu statycznego (modelu), w którym jest reprezentowany zarówno tor, jak i podłoże.

Uwzględniając stronę statyczną (warunek równowagi elementu budowli - por. rys. 2b), geometryczną (związek przemieszczeń i odkształceń) i fizyczną (związek odkształceń i naprężeń) rozpatrywanego zagadnienia oraz



Ryc. 2. Stan poziomych przemieszczeń u_1 podłoża i sprężystych przemieszczeń osiowych \bar{u} przekrojów budowli liniowej oraz funkcja oddziaływań t
 Fig. 2. Field of horizontal ground displacements u_1 and of elastic axial displacements \bar{u} of cross-sections belonging to a linear structure, and the reaction function t

warunki brzegowe, dla zadanych wymuszeń podłoża od wpływu jednej krawędzi wyrobiska określono funkcje opisujące sprężyste przemieszczenia osiowe \bar{u} budowli torowej:

$$\bar{u}_1 = \frac{u_{1\max}}{2} \left[-e^{-\chi} \frac{\left(\frac{\pi}{\chi}\right)^2}{1 + \left(\frac{\pi}{\chi}\right)^2} \cdot \cosh \chi \xi + \frac{\cos \pi \xi}{1 + \left(\frac{\pi}{\chi}\right)^2} + 1 \right] \quad (4)$$

dla $0 \leq \xi \leq 1$;

$$\bar{u}_2 = \frac{u_{1\max}}{2} \left[\frac{\left(\frac{\pi}{\chi}\right)^2}{1 + \left(\frac{\pi}{\chi}\right)^2} \cdot (-e^{-\chi} \cdot \cosh \chi + 1) \cdot e^{-\chi(\xi-1)} \right] \quad (5)$$

dla $1 \leq \xi < \infty$;

gdzie bezwymiarowy parametr:

$$\chi = r_1 \sqrt{\frac{k \cdot b}{EA}} \quad (6)$$

uwzględnia wpływ: podatności sprężystej podsypki k , kształtu konstrukcji toru b , sztywności podłużnej szyn EA , rodzaju górotworu i głębokości zalegania pokładu r oraz kąta nachylenia α_0 osi podłużnej toru do krawędzi wyrobiska - na wielkość zmiennej \bar{u} . Wielkość χ ma podobny sens fizyczny co wielkość L^{-1} występująca we wzorach opisujących zjawisko zginania belki na podłożu sprężystym.

Znajomość funkcji przemieszczeń \bar{u} pozwala na obliczenie dodatkowych sił podłużnych N występujących w torze oraz oddziaływań t ze wzorów:

$$N = \frac{EA}{r_1} \frac{d\bar{u}}{d\xi}, \quad t = \frac{EA}{r_1^2} \frac{d^2\bar{u}}{d\xi^2} \quad (7)$$

gdzie za funkcję \bar{u} podstawiamy kolejno wyrażenia (4) i (5).

Podane wzory na \bar{u} dotyczą tylko stadium sprężystej pracy podłoża podsypkowego (niezmiennosc relacji styku budowla torowa-podłoże) i obowiązują dla:

$$u_{1\max} \leq u_{1\max}^s \quad (8)$$

gdzie:

$$u_{1\max}^s = \frac{u_p \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi}{\chi}\right)^2\right]}{0,5 \cdot \left(\frac{\pi}{\chi}\right)^2 \cdot (1 + e^{-\chi})} \quad (9)$$

jest funkcję parametrów χ i u_p .

Dla $u_{1\max} > u_{1\max}^*$ zachodzi stadium sprężysto-plastycznej pracy podłoża. Między odkształceniowym postaciowo podłożem podseypkowym a ramą toru dochodzi lokalnie do pokonania sił tarcia. Towarzyszy temu poślizg podłoża względem toru, którego zasięg powiększa się wraz ze wzrostem poziomych przemieszczeń górniczych terenu. Występowanie różnych stref oddziaływań (sprężystych i plastycznych) podłoża wzdłuż toru prowadzi do związków nieliniowych między siłami i przemieszczeniami osiowymi toru a poziomymi przemieszczeniami podłoża górniczego, co w efekcie stwarza znaczne komplikację w matematycznym ujęciu i opisie problemu. Szczegółową analizę statyczną tego zagadnienia podają prace autora [1, 2].

2.2. Warunki dynamiczne

Wstrząsy toru wywoływane ruchem pojazdów prowadzą m.in. do drgań ziaren podseypki, którym towarzyszy zmniejszanie się wartości kąta tarcia wewnętrznego i wystąpienie lokalnych poślizgów oraz przemieszczeń ziaren w podseypce. W wyniku tego dochodzi do częściowego rozładowania napięć między ramą toru a przemieszczającą się podseypką i do redukcji sił kontaktowych t , których wartości i zwroty ulegają lokalnie zmianom. Redukcji sił kontaktowych towarzyszy redukcja przemieszczeń i sił podłużnych w torze. Omówione zjawisko, z uwagi na swoją złożoność, trudne jest jednak do jednoznacznego analitycznego opisu. Zachodzi zatem konieczność globalnego podejścia do rozwiązywanego problemu, jakie przedstawił autor w pracy [3].

Ze wzoru (7) wynika:

$$N_s = \frac{EA}{2r_1} \cdot f(\chi, \xi) \cdot u_{1\max} \quad (10)$$

gdzie: N_s - siła podłużna określona dla warunków statycznych, natomiast $f(\chi, \xi) = \frac{dF}{d\xi}$, przy czym F oznacza tutaj wyrażenie zapisane w nawiasie kwadratowym wzoru (4).

Przyrost siły podłużnej statycznej, wywołany przyrostem przemieszczenia podłoża, wynosi:

$$dN_s = \frac{EA}{2r_1} \cdot f(\chi, \xi) \cdot du_{1\max} \quad (11)$$

Składowa przemieszczeń $u_{1\max}$ jest funkcją czasu, opisaną przez specjalistów mechaniki górotworu wzorem:

$$u_{1\max} = u_{1\max}^k (1 - e^{-ct}), \quad (12)$$

gdzie: c [rok^{-1}] - współczynnik czasu zależny od rodzaju górotworu, przy czym c w górnośląskiej niecce węglowej waha się od 0,5 do 5,0. Mniejsze wartości c odpowiadają górotworowi o przewodzie piaskowca, gdzie mamy powolne obniżenia powierzchni terenu.

Załóży, że przyrost $du_{1\max}$, wywołujący przyrost siły dN_s , wystąpił w pewnym momencie przeszłości τ . Rozpatrując chwilę bieżącą t i uwzględniając procesy relaksacyjne zachodzące w podajcyce pod wpływem oddziaływań dynamicznych taboru, prowadzące do redukcji siły podłużnej, otrzymujemy zależność:

$$dN_d = dN_s \cdot f_1(t - \tau), \quad (13)$$

gdzie: N_d - siła podłużna odpowiadająca dynamicznym warunkom pracy toru, zaś f_1 - funkcja monotonicznie malejąca, przyjmująca dla $t = \tau$ wartość $f(0) = 1$.

Właściwościom tym czyni zadość funkcja:

$$f_1(t - \tau) = e^{-\alpha(t-\tau)} \quad (14)$$

w której współczynnik α uwzględnia wpływy wibropięzania w torze. Stosując do elementarnych efektów wyrażonych wzorem (13) zasadę superpozycji oraz uwzględniając wyrażenie (12), otrzymujemy:

$$N_d = N_s^k \cdot c \cdot \int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)} \cdot e^{-c\tau} d\tau, \quad (15)$$

gdzie: N_s^k oblicza się ze wzoru (10) po podstawieniu $u_{1\max} = u_{1\max}^k$. Siłę N_s^k można również określić z odpowiednich wykresów podanych w pracy [1].

Po wykonaniu całkowania w (15) zależność na N_d przebiera postać:

$$N_d = \delta \cdot N_s^k, \quad (16)$$

gdzie:

$$\delta = \frac{\frac{c}{\alpha}}{1 - \frac{c}{\alpha}} \cdot (e^{-ct} - e^{-\alpha t}). \quad (17)$$

Funkcyjna postać współczynnika redukcji δ opisana wzorem (17) określa przebieg zmian wielkości siły podłużnej w torze, w rzeczywistych warunkach dynamicznego oddziaływania taboru.

Z warunku

$$\frac{d\delta}{d(\alpha t)} = 0 \quad (18)$$

otrzymujemy zależność na obliczenie czasu wystąpienia ekstremalnej wartości N_{dmax} , którą przyjmuje się za podstawę analizy stateczności lokalnej toru:

$$t_{kr} = \frac{\ln \frac{c}{c-\alpha}}{c-\alpha} \quad (19)$$

Podstawiając t_{kr} do wzoru (17), otrzymujemy:

$$\delta_{max} = \frac{1 - \frac{c}{\alpha c}}{1 - \frac{c}{\alpha c}} \cdot \left[\left(\frac{c}{\alpha c} \right)^{1 - \frac{c}{\alpha c}} - \left(\frac{c}{\alpha c} \right)^{1 - \frac{1}{\alpha c}} \right] \quad (20)$$

3. OSZACOWANIE WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELU NA PODSTAWIE POMIARÓW PRZEMIESZCZEŃ OSIOWYCH TORU BEZSTYKOWEGO

W toku badań realizowanych na doświadczalnym odcinku toru bezstykowego, o długości 800 m, położonym na obszarze wpływów czynnej eksploatacji górniczej prowadzonej przez KWK "Kazimierz Juliusz" pod odcinkiem linii magistralnej Kraków-Katowice, zostały wykonane na początku lat siedemdziesiątych pomiary przemieszczeń osiowych toru i przemieszczeń górniczych podtorza przez Przedsiębiorstwo Miernictwa Górniczego w Bytomiu. Wyniki tych pomiarów przyjęto za podstawę oszacowania parametrów modelu przedstawionego w p. 2.

Dla stadium sprężystej pracy podłoża podsypkowego wymuszone przemieszczenia osiowe budowli torowej na zboczu niecki opisuje funkcja:

$$\bar{u}_{1j}^t = \delta_j \bar{u}_1 = \frac{u_{1max}}{2} \frac{\frac{c}{\alpha c}}{1 - \frac{c}{\alpha c}} (e^{-ct_j} - e^{-\alpha t_j}) \left[-e^{-\lambda} \frac{\left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)^2}{1 + \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)^2} \cosh \lambda \xi_1 + \frac{\cosh \lambda \xi_1}{1 + \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)^2} + 1 \right] \quad (21)$$

gdzie:

- 1 - wskaźnik odciętej wyróżnionej przekroju szyny,
- j - wskaźnik cyklu pomiarowego, przy czym przedział czasu t_j liczony jest od momentu rozpoczęcia eksploatacji górniczej.

Wyrażenie (21) jest zależne od trzech niezależnych parametrów: α , c , λ , których sposób oszacowania oparty na metodzie najmniejszych kwadratów przedstawiono poniżej. Pozwala ona na takie ukształtowanie - poprzez dobór odpowiednich wartości parametrów - przyjętej funkcji przybliżenia,

w naszym przypadku \bar{u}_{1j}^t , aby różnica między wartościami tej funkcji i wartościami \bar{u}_{1j}^p zmierzonymi w terenie spełniały warunek:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{u}_{1j}^t - \bar{u}_{1j}^p)^2 = F(\alpha, c, \kappa, \xi) = \min. \quad (22)$$

Parametry modelu wyznacza się z układu trzech równań nieliniowych:

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial c} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial \kappa} = 0. \quad (23)$$

Równania (23) rozwiązujemy przy wykorzystaniu emc, metodą Monte Carlo lub metodą systematycznego przeszukiwania.

3.1. Przykład obliczenia

$$n = 6, \quad m = 2$$

$$\xi_1 = (0,0 \quad 0,12 \quad 0,24 \quad 0,36 \quad 0,48 \quad 0,60),$$

$$t_j = (0,30 \quad 0,52), \quad [\text{rok}]$$

$$[\bar{u}_{1j}^p] = \begin{pmatrix} 1,6 & 1,50 & 1,30 & 1,05 & 0,70 & 0,50 \\ 3,1 & 2,90 & 2,60 & 2,00 & 1,45 & 0,95 \end{pmatrix} \quad [\text{cm}],$$

$$u_{1\max} = 4,80 \text{ cm}.$$

Dla powyższych danych z układu równań (23) otrzymujemy:

$$\alpha = 0,3194 \text{ rok}^{-1}, \quad c = 1,9192 \text{ rok}^{-1}, \quad \kappa = 9,5153.$$

Pozostałe wyniki:

$$t_{kr} = 1,121 \text{ rok}, \quad \delta_{\max} = 0,6991, \quad N_0^k = 624,5 \text{ kN}, \quad N_{d\max} = 437 \text{ kN}.$$

LITERATURA

- [1] Szumierz W.: Statyka budowli liniowych poddanych działaniu sił poziomych od pełzania podłoża górniczego. Prace GIG, Seria dodatkowa. Katowice 1980.
- [2] Szumierz W.: Wpływ poziomych deformacji górniczych podłoża na pracę budowli liniowych. Archiwum Inżynierii Łądowej. PWN, Warszawa 1976, z. 4.
- [3] Szumierz W.: Wpływ poziomych przemieszczeń podłoża górniczego na pracę toru. Drogi Kolejowe. WKiŁ, Warszawa 1987, nr 12.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Kazimierz Kłosek

Wpłynęło do Redakcji 7.05.1991 r.

INTERACTION BETWEEN LINEAR STRUCTURES AND MINING SUBSOIL

Summary

The work analytically approaches the influence that the horizontal displacements of the ground, due to mining, have on the statics of deformable linear structures, such as railway tracks and pipelines.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛИНЕЙНОЙ ПОСТРОЙКИ С ГОРНЫМ ОСНОВАНИЕМ

Резюме

В работе представлена аналитическая трактовка влияния горизонтальных перемещений горного основания на статическую работу деформируемых линейных построек (железнодорожных путей, трубопроводов и т.д.).