

JERZY TARNOWSKI*, WAĆLAW GAWĘDZKI**, JAN SZYBKĄ*

BADANIA DYNAMICZNYCH ODKSZTAŁCENÍ RUROCIĄGÓW EKSPLOATOWANYCH NA TERENACH GÓRNICZYCH

INVESTIGATION OF DYNAMIC DEFORMATION OF PIPELINES IN MINING EXPLOITATION AREA

Streszczenie

W artykule przedstawiono fragment terenowych badań odkształceń gazociągu eksploatowanego na terenach górniczych. Sformułowano cel przeprowadzonych badań i zamieszczono charakterystykę techniczną badanego obiektu. Sprecyzowano założenia badawcze oraz scharakteryzowano zaprojektowane stanowisko i zastosowany system pomiarowy. Zbudowane tory pomiarowe zilustrowano na załączonym schemacie stanowiska badawczego. Badany gazociąg poddano statycznemu naciągowi stabilizowanemu o wartościach od 0 do 13 T, z udziałem generowanych impulsów dynamicznych. Zamieszczono przykładowe wyniki z kolejnych prób i podjęto próbę ich interpretacji. Ze względu na niestacjonarny charakter zarejestrowanych sygnałów odkształceń i przyspieszeń drgań wyznaczono widma częstotliwościowe za pomocą krótkoczasowej transformaty Fouriera *STFT*, wykorzystując w tym celu oprogramowanie Matlab.

Słowa kluczowe: gazociąg, niestabilny grunt, drgania, odkształcenia dynamiczne

Abstract

A part of the field investigation of a gas pipelines situated in mining exploitation area are presented in the paper. The objectives of tests have been formulated together with technological characteristics of the object. Test assumptions were defined and the test stand with measurement system were described. Measurement lines are illustrated in enclosed scheme of the test stand. The gas pipeline in tests have been statically tensioned with stabilised values in the range from 0 to 13T with partial action of dynamic pulses. The exemplary results of subsequent tests were included and an effort to interpret these results was undertaken. Owing to nonstationary course of recorded deformation and acceleration signals, the frequency spectrum was determined with the use of Short-Time Fourier Transform *STFT* with application of Matlab programme.

Keywords: gas pipeline, unstable terrain, vibrations, dynamic deformations

* Dr inż. Jerzy Tarnowski, dr hab. inż. Jan Szybka, prof. AGH, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

** Dr inż. Waćlaw Gawędzki, Katedra Metrologii, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Oznaczenia

$\varepsilon_x(t), \varepsilon_y(t), \varepsilon_z(t)$	– wartości kierunkowych odkształceń w kierunku osi x, y, z
$a_x(t), a_y(t), a_z(t)$	– wartości przyspieszeń drgań rurociągu w kierunku osi x, y, z
$a_{gx}(t), a_{gy}(t), a_{gz}(t)$	– wartości przyspieszeń drgań gruntu w kierunku osi x, y, z
F	– siła naciągu wstępnego rurociągu
$E_x(t, f) = STFT\{\varepsilon_x(t)\} $	– moduł transformaty odkształcenia w kierunku osi x
$A_x(t, f) = STFT\{a_x(t)\} $	– moduł transformaty przyspieszenia rurociągu w kierunku osi x
$A_{gx}(t, f) = STFT\{a_{gx}(t)\} $	– moduł transformaty przyspieszenia gruntu w kierunku osi x
$(f_{\max}, t_{\max}) = \arg\{\max_f \max_t STFT\{\}\} $	– wartości częstotliwości i czasu, dla których osiągnięta jest maksymalna wartość modułu transformaty $STFT$

1. Wstęp

Postępująca gazyfikacja kraju wymaga wielokrotnie budowy gazociągów na terenach niestabilnych. Do takich przypadków dochodzi przy lokalizacji sieci gazowych na terenach górniczych, charakteryzujących się różnymi kategoriami górniczymi. Wskutek prowadzonej eksploatacji górniczej (górnictwo węglowe, rudne, solne i skalne) dochodzi do kilkumetrowych obniżen terenu, powodujących powstanie dodatkowych obciążeń w zagłębionych w gruncie budowlach liniowych. Należą do nich gazociągi, na pobocznicach których powstają siły tarcia generujące dodatkowe naprężenia w przekrojach rur. Dodatkowym czynnikiem zmieniającym bilans obciążeń w założeniach projektowanych rurociągów jest występowanie drgań gruntu, towarzyszące eksploatacji pokładów tąpniących lub powstałych na skutek prowadzonych prac strzelniczych, drgań pochodzenia komunikacyjnego itp. Określenie dodatkowych obciążeń gazociągów zagłębionych w niestabilnym podłożu należy do bardzo skomplikowanych i trudnych problemów inżynierskich. Stosowane obliczenia mają charakter przybliżony, a próbę ich uściślenia można uzyskać w wyniku doświadczeń empirycznych. Takie próby podjęto, przeprowadzając terenowe badania gazociągów eksploatowanych na terenie górniczym kopalni KWK JAS-MOS, należącym do drugiej kategorii górniczej.

2. Cel badań

Głównym celem badań było określenie zmian odkształceń dynamicznych rurociągu eksploatowanego w niestabilnym środowisku. Jako niestabilny teren przyjęto ośrodek gruntowy górniczo-odkształcalny, charakteryzujący się znacznymi obniżeniami i występującymi drganiami o genezie wstrząsów i tąpnięć górniczych.

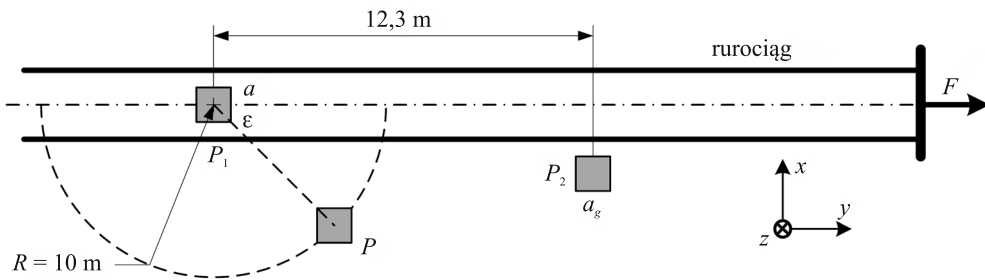
Dodatkowym celem przeprowadzonych badań było uzyskanie charakterystyk wymuszającego procesu parasejsmicznego (głównie gęstości widmowych) w celu późniejszego wykorzystania tego procesu do symulacji zjawiska oddziaływania drgań na poddany stabilizowanym obciążeniami statycznym rurociąg.

3. Lokalizacja i charakterystyka obiektu badań

Wybór miejsca badań gazociągu poprzedzono analizą poziomu awaryjności sieci gazowych oraz prognozowanych odkształceń terenów górniczych. Podwyższona liczba uszkodzeń sieci gazowych w rejonie Gogołowej (Rybnicki Okręg Węglowy) oraz tragiczny wypadek spowodowany pęknięciem rur były bezpośrednią przyczyną wyboru miejsca badań na gazociągu należącym do Zakładu Gazowniczego w Świerklanach. Pod wybranym do badań odcinkiem gazociągu kontynuowano eksploatację węgla kamiennego przez KWK Jastrzębie–Moszczenica, a deformowany grunt na powierzchni był kwalifikowany do terenów drugiej kategorii górniczej. Według danych z KWK JAS-MOS wartości odkształceń poziomych gruntu wynosiły $\varepsilon = 1,52$ mm/m, nachylenie terenu $T = 2,54$ mm/m oraz promień krzywizny terenu $R \gg 12$ km. Maksymalne obniżenie terenu wynosiło 1106 mm. W ciągu ostatnich dwóch lat obszar poligonu poddany był dodatkowo oddziaływaniom wstrząsów pochodzenia górniczego, których energia osiągała wartości $E = 5,7 \times 10^5$ J.

Eksploatacja węgla prowadzona jest na głębokości 793 m, systemem na zawał, a miąższość wybieranych pokładów mieści się w granicach od 1,6 do 3,5 m. Położenie gazociągu dobrano jako prostopadłe do izolinii osiadań powstającej niecki, powodujące powstanie maksymalnych wartości odkształceń gazociągu. Gazociąg zbudowany był z rur stalowych R350 o średnicy 50 mm i grubości ścianki około 3,8 mm. Zagłębienie gazociągu wynosiło około 0,8 m. Głębokość wykopu pod budowany gazociąg wynosiła 1,0 m, a szerokość około 0,25 m. Gazociąg nie posiadał systemu kompensacji ruchów podłoża i zgodnie z obowiązującymi normami znajdował się w obrysie piaskowej o średniej grubości 0,1 m. Wiek gazociągu można określić na około sześć lat, a długość prostego odcinka badanego gazociągu (od załomu do załomu) wynosiła około 28 m. Podłoże gazociągu stanowił piasek gliniasty, którego ciężar właściwy wynosił $\gamma = 1,82 \times 10^{-2}$ MN/m³. Badany gazociąg wchodzi w skład sieci gazowej, na której w ciągu ostatnich trzech lat zarejestrowano około 30 awarii, w tym były to pęknięcia gazociągu, awarie przyłączy domowych oraz rozszczelnień kompensatorów.

W pomiarach odkształceń statycznych gazociągu punkt pomiarowy stanowił układ czujników tensometrycznych, umożliwiający pomiar składowych obciążenia w postaci sił osiowych, momentów gnących i skręcających oraz temperatury rury. Punkt pomiarowy P_1 w badaniach dynamicznych gazociągu stanowiły naklejone na rurze czujniki tensometryczne do pomiaru składowych odkształceń oraz bezpośrednio przy nich umocowane akcelerometry mierzące składowe przyspieszenia kierunkowe gazociągu. Bezpośrednio nad odkrytym gazociągiem, na krawędzi wykopu, umiejscowiono akcelerometr do pomiaru składowych przyspieszenia kierunkowego gruntu. Schemat stanowiska badawczego oraz rozmieszczenie aparatury badawczej na odkrytym gazociągu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego i rozmieszczenia czujników na gazociągu (układ osi kierunkowych odpowiedni dla rzutu z góry)

Fig. 1. The scheme of the test stand and dislocation of sensors over the gas pipeline (arrangement of direction axes the proper upper view)

4. Charakterystyka metodyki badań i systemu pomiarowego

W celu określenia wpływu dynamicznych oddziaływań gruntu na odkształcenia rurociągów zbudowano terenowe stanowisko badawcze umożliwiające pomiar odkształceń i drgań posadowionego w gruncie rurociągu gazowego o średnicy $\Phi 50$ poddanego działaniu wymuszonych drgań gruntu. Założono, że fale parasejsmiczne pochodzenia górniczego symulowane będą na stanowisku poprzez wywoływanie uderów gruntu za pomocą zrzucanych ciężarów z określonej wysokości i w ustalonej odległości od rurociągu. Taki sposób zadawania uderów umożliwia również w miarę prosty sposób określanie ich energii, przy założeniu, że energia kinetyczna w chwili uderzenia o ziemię jest równa energii potencjalnej ciężaru umieszczonego na znanej wysokości. Na stanowisku przewidziano dodatkowo możliwość wywoływania statycznego, osiowego obciążenia rurociągu przez mechanizm zadawania siły rozciągającej F . Umożliwia on symulację zmian obciążenia rurociągu wskutek obniżen i drgań terenu o określonej kategorii górniczej.

Do badań zaprojektowano system pomiarowy umożliwiający trójosiowy pomiar odkształceń i przyspieszeń drgań rurociągu, przyspieszeń drgań gruntu, a także siły F naciągu rurociągu. Na rys. 1 zdefiniowano położenie układu współrzędnych w odniesieniu do osi rurociągu, oś z skierowana jest prostopadle do osi rurociągu i prostopadle do powierzchni ziemi, oś x skierowana jest prostopadle do osi rurociągu i równoległe do powierzchni ziemi, natomiast oś y skierowana jest zgodnie z osią rurociągu.

Pomiar odkształceń realizowany jest za pomocą czujników tensometrycznych, naklepanych na gazociąg w punkcie pomiarowym P_1 i połączonych w zespoły mostków tensometrycznych w celu wyznaczania wartości kierunkowych odkształceń $\epsilon_x(t)$, $\epsilon_y(t)$, $\epsilon_z(t)$, powstających w przekroju rurociągu. Do pomiaru odkształceń w każdej z osi zastosowano pełny mostek tensometryczny [4], w którym umieszczono po 4 tensometry w taki sposób, aby sygnał napięciowy mostka był wrażliwy na mierzoną składową odkształcenia, a eliminował wpływ niemierzonych składowych sił i momentów oraz temperatury. Mostki tensometryczne podłączone zostały do aparatury pomiarowej działającej na zasadzie modulacji amplitudy, co zapewnia eliminację zakłóceń pochodzenia przemysłowego i umożliwia pomiar odkształceń

statycznych i dynamicznych w zakresie częstotliwościowym do 1,5 kHz oraz ich rejestrację na dysku komputera.

Pomiar przyspieszeń drgań rurociągu $a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$ oraz gruntu $a_{gx}(t)$, $a_{gy}(t)$, $a_{gz}(t)$ realizowany jest za pomocą akcelerometrów z przetwornikiem pojemnościowym przyspieszenia na sygnał napięcia. Jeden trójosiowy akcelerometr umieszczony jest na rurociągu w punkcie P_1 pomiaru odkształceń, natomiast drugi akcelerometr trójosiowy zamontowano w punkcie pomiarowym P_2 w pobliżu rurociągu i służy on do pomiaru przyspieszeń kierunkowych drgań gruntu. Wyjściowe sygnały napięciowe z czujników rejestrowane są w kanałach przeznaczonych do pomiarów napięć tej samej aparatury, która współpracuje z mostkami tensometrycznymi, dzięki czemu uzyskano pełną synchronizację czasową zapisu mierzonych odkształceń i przyspieszeń we wszystkich kanałach.

Ze względu na nieprzewidywalne w czasie występowanie wstrząsów górniczych, wywoływano w trakcie eksperymentu drgania gruntu o charakterze impulsowym, które można interpretować jako fale parasejsmiczne pochodzenia górniczego. Tak postawione zadanie zrealizowano, zrzucając w zadanej odległości od osi rurociągu, z wysokości 3 m ciężar 12 kN. Eksperymenty przeprowadzono, uwzględniając występujący skutek obniżenia terenu drugiej kategorii górniczej, quasi-statyczny charakter obciążenia gazociągu w warunkach naturalnych, symulując obciążenia statyczne rurociągu przez osiowy naciąg rurociągu siłą F , o różnie ustalonej wartości, z jednoczesnym zadawaniem zewnętrznych wymuszeń dynamicznych [1].

W trakcie eksperymentu w punkcie P zadawane były wymuszenia udarowe, przy czym położenie tego punktu ulegało zmianie wzdłuż okręgu o promieniu 10 m i o środku w punkcie pomiarowym P_1 (rys. 1). Zmiana położenia punktu P umożliwia zmianę miejsca oddziaływania udaru względem osi rurociągu, jak również odległości punktu P_2 względem punktu P przy niezmienniej odległości punktu P_1 względem P . W wyniku oddziaływania wymuszonych drgań na podłoże otaczające rurociąg na tle obciążeń statycznych rurociągu zmierzono i zarejestrowano sygnały dynamicznych odkształceń rurociągu oraz przyspieszeń drgań gruntu i gazociągu. Na rys. 2a i 3a pokazano przykładowe sygnały odkształcenia rurociągu $\varepsilon_x(t)$, przyspieszenia drgań rurociągu $a_x(t)$ oraz przyspieszenia drgań gruntu $a_{gx}(t)$ zarejestrowane w osi x dla przypadków: bez naciągu statycznego rurociągu $F = 0T$ oraz dla siły naciągu statycznego rurociągu $F = 10T$.

5. Analiza zarejestrowanych sygnałów

Ze względu na niestacjonarny charakter zarejestrowanych sygnałów odkształceń i przyspieszeń drgań wyznaczono widma częstotliwościowe za pomocą krótkoczasowej transformaty Fouriera $STFT$ ze standardowym oknem Hanninga, wykorzystując w tym celu oprogramowanie Matlab & Simulink [5, 6]. Sygnały zostały wstępnie poddane operacji odfiltrowania zakłóceń i usunięcia składowej stałej. Przyjęto następujący sposób oznaczeń modułów transformat sygnałów odkształceń $\varepsilon_x(t)$ i przyspieszeń $a_x(t)$ rurociągu oraz przyspieszeń drgań gruntu $a_{gx}(t)$ w kierunku osi x :

$$E_x(t, f) = |STFT\{\varepsilon_x(t)\}| \quad A_x(t, f) = |STFT\{a_x(t)\}| \quad A_{gx}(t, f) = |STFT\{a_{gx}(t)\}| \quad (1)$$

W tabeli 1 zestawiono wartości częstotliwości f_{\max} oraz czasu t_{\max} , dla których osiągnięta jest maksymalna wartość modułu transformaty $STFT$ sygnałów $\epsilon(t)$, $a(t)$ oraz $a_g(t)$ zgodnie z oznaczeniami (1), z uwzględnieniem indeksów x , y i z , zgodnie z kierunkami przyjętego układu współrzędnych zdefiniowanym na rys. 1:

$$(f_{\max}, t_{\max}) = \arg \{ \max_f \max_t |STFT\{\cdot\}| \} \quad (2)$$

Tabela 1

Zestawienie wartości częstotliwości f_{\max} oraz czasu t_{\max} , dla których osiągnięte są maksymalne wartości modułu transformat $STFT$ zgodnie z (2) z uwzględnieniem (1).

Sygnał	$F = 0T$			$F = 2T$			$F = 10T$			$F = 13T$		
	f_{\max} [Hz]	t_{\max} [s]	max	f_{\max} [Hz]	t_{\max} [s]	max	f_{\max} [Hz]	t_{\max} [s]	max	f_{\max} [Hz]	t_{\max} [s]	max
E_x [ppm]	29,0	1,71	0,64	29,3	2,21	1,30	31,9	1,67	0,19	32,1	1,27	0,34
A_x [m/s^2]	28,9	1,71	0,44	29,3	2,23	0,92	32,0	1,67	0,20	31,7	1,27	0,33
A_{gx} [m/s^2]	18,2	1,61	0,16	19,4	2,17	0,12	18,9	1,57	0,09	17,0	1,25	0,16
E_y [ppm]	16,6	1,63	0,83	16,8	2,15	1,0	10,6	1,59	0,64	16,2	1,25	1,0
A_y [m/s^2]	27,7	1,59	0,026	30,2	2,21	0,064	13,1	1,65	0,026	32,7	1,31	0,028
A_{gy} [m/s^2]	20,9	1,59	0,18	21,7	2,17	0,17	17,7	1,63	0,070	17,3	1,27	0,20
E_z [ppm]	16,7	1,63	0,47	30,6	2,31	0,70	20,1	1,55	0,15	33,5	1,37	0,41
A_z [m/s^2]	29,8	1,73	0,26	30,5	2,29	0,63	20,5	1,55	0,077	33,5	1,37	0,46
A_{gz} [m/s^2]	18,5	1,61	0,14	15,1	2,15	0,10	19,2	1,55	0,070	18,8	1,25	0,10

Na podstawie wyników symulacji zestawionych w tab. 1 można zauważyć, że maksymalne wartości modułów transformat przyspieszeń drgań gruntu A_{gx} , A_{gy} , i A_{gz} dla wyróżnionych kierunków x , y i z zawierają się w zakresie:

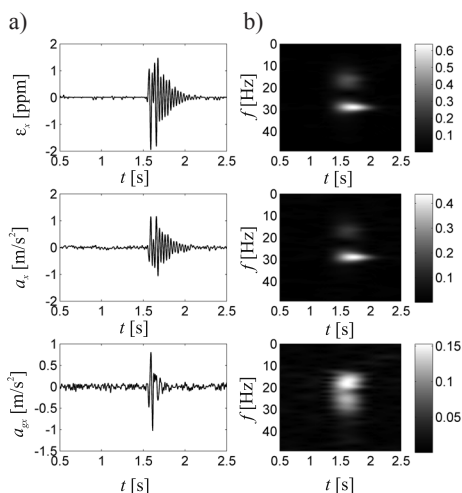
- $A_{gx} \in (0,09-0,16)$ i są osiągnięte dla $f_{\max} \in (17,0\text{Hz}-19,4\text{Hz})$,
- $A_{gy} \in (0,07-0,20)$ i są osiągnięte dla $f_{\max} \in (17,3\text{Hz}-21,7\text{Hz})$,
- $A_{gz} \in (0,07-0,14)$ i są osiągnięte dla $f_{\max} \in (15,1\text{Hz}-19,2\text{Hz})$,

Przedziały zmienności maksymalnych wartości przyspieszeń drgań gruntu A_g i częstotliwości f_{\max} uwarunkowane są kierunkiem jego działania względem osi rurociągu oraz zmianą warunków dla przeprowadzanych doświadczeń. W trakcie przeprowadzania kolejnych eksperymentów dla różnych wartości sił naciągu statycznego F rurociągu z impulsowo wymu-

szanymi drganiami parasejsmicznymi gruntu, sposób zrzucania ciężaru oraz jego ułożenie względem gruntu w trakcie uderzenia ma charakter losowy. Dodatkowo pojawia się również efekt „utwardzania” gruntu w miejscu upadku ciężaru, a warunki badań wymagają zachowania stałego miejsca działania wymuszenia drgań w trakcie serii pomiarów. Ponieważ wywoływane podczas eksperymentów przyspieszenia drgań gruntu stanowią wymuszenie dla rurociągu, to niewielka zmiana wartości jego parametrów (amplitudy A_g oraz częstotliwości f_{\max}) dla kolejnych doświadczeń nie ma istotnego znaczenia, gdyż i tak wyrażona poprzez sygnały odkształceń $\varepsilon(t)$ i przyspieszeń drgań $a(t)$ reakcja rurociągu (z uwzględnieniem indeksów dla kierunków x , y i z (rys. 1)) odnoszona jest do aktualnych, mierzonych w trakcie doświadczenia wartości parametrów drgań wymuszających gruntu.

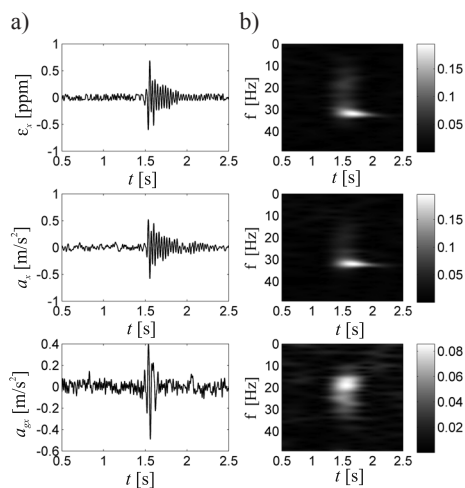
Przykłady czasowych przebiegów odkształceń rurociągu ε_x , przyspieszeń drgań rurociągu a_x oraz przyspieszeń drgań gruntu a_{gx} zarejestrowanych przy wartości siły naciągu $F = 0$ w kierunku osi x , przedstawiono na rys. 2a i odpowiadające im moduły transformat $STFT$ przedstawiono odpowiednio na rys. 2b, natomiast przy wartości siły naciągu $F = 10T$ odpowiednio na rys. 3a i 3b.

Obrazy modułów transformat $STFT$ w postaci trójwymiarowej przy wartości siły naciągu $F = 0$ w kierunku osi x , przedstawiono na rys. 4, a przy wartości siły naciągu $F = 10T$ w kierunku osi x , przedstawiono na rys. 5.



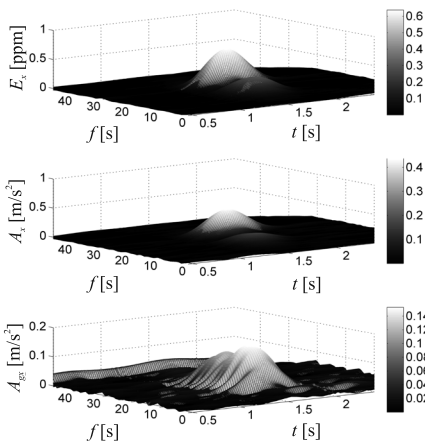
Rys. 2. Przykładowe sygnały zarejestrowane w kierunku osi x bez statycznego naciągu rurociągu $F = 0T$: a) przebiegi czasowe b) moduły transformat $STFT$

Fig. 2. Exemplary signals recorded in x direction without static tension of the pipeline $F = 0T$: a) time variation, b) modules of $STFT$ transforms



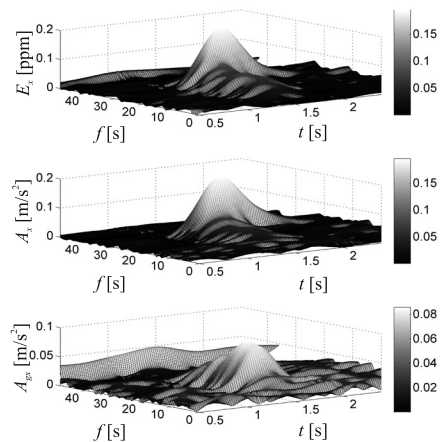
Rys. 3. Przykładowe sygnały zarejestrowane w kierunku osi x dla siły naciągu statycznego rurociągu $F = 10T$: a) przebiegi czasowe, b) moduły transformat $STFT$ sygnałów

Fig. 3. Exemplary signals recorded in x direction with static tension of the pipeline $F = 10T$: a) time variation, b) modules of $STFT$ transforms



Rys. 4. Moduły transformat *STFT* bez naciągu statycznego rurociągu $F = 0T$

Fig. 4. Modules of *STFT* transforms without static tension of the pipeline $F = 0T$



Rys. 5. Moduły transformat *STFT* dla siły naciągu statycznego rurociągu $F = 10T$

Fig. 5. Modules of *STFT* transforms with static tension of the pipeline $F = 10T$

Jak można zaobserwować na rys. 2–5 widmo częstotliwościowe wymuszających drgań gruntu jest stosunkowo szerokie, obejmuje zakres od 15 Hz do 32 Hz, szczególnie dobrze jest to widoczne na rys. 2b i 3b w postaci „rozmycia” obrazu modułu transformaty A_{gx} sygnału w podanym zakresie częstotliwości. Na obrazach tych można wyraźnie zaobserwować występujące maksima w otoczeniu dwóch częstotliwości, 18 Hz i 28 Hz, przy czym większe wartości modułów transformat występują dla niższej z częstotliwości. Natomiast w tab. 1 zestawiono jedynie wartości częstotliwości f_{max} , dla których osiągnięte są maksymalne wartości modułów transformaty *STFT* mierzonych sygnałów zgodnie z (1) i (2). Jak łatwo można zauważyć, reakcja rurociągu wyrażona poprzez wartości częstotliwości f_{max} dla maksymalnych wartości modułów transformat sygnałów odkształceń E_x i przyspieszeń drgań A_x nie zawsze pokrywa się z wartościami f_{max} dla sygnałów wymuszających A_{gx} . Przykładowo dla osi x , niezależnie od wartości siły F naciągu statycznego rurociągu, maksymalne wartości modułów transformat sygnałów odkształcenia E_x i przyspieszeń drgań A_x osiągnięte są dla częstotliwości f_{max} przyjmujących wartości w zakresie $f_{max} \in (28,9 \text{ Hz} - 31,9 \text{ Hz})$, podczas gdy maksymalne wartości modułów transformaty wymuszającego sygnału drgań gruntu A_{gx} są osiągnięte dla $f_{max} \in (17,0 \text{ Hz} - 19,4 \text{ Hz})$. Podobny efekt występuje również dla osi z i dla sił naciągu statycznego $F = 2T$ i $F = 13T$. Taki sposób reakcji rurociągu należy tłumaczyć właściwościami rezonansowymi układu mechanicznego rurociąg posadowiony w gruncie–grunt, bowiem maksymalne wartości odkształceń E_x i przyspieszeń drgań rurociągu A_x występują dla częstotliwości wymuszających drgań gruntu, dla których wcale nie są osiągnięte maksymalne wartości jego przyspieszeń A_{gx} .

Występowaniem zjawiska rezonansu można również tłumaczyć wyrażoną przez przyspieszenia drgań A_x i A_z reakcję rurociągu, których wartości są większe niż wartości wywołujących je przyspieszeń drgań gruntu A_{gx} i A_{gz} , niezależnie od wartości siły naciągu statycznego F . Efekt ten występuje dla osi x i z z prostopadłych względem osi rurociągu, natomiast nie

występuje dla osi y , zgodnej z osią rurociągu, gdyż wytrzymałość na zginanie rurociągu jest wielokrotnie mniejsza niż wytrzymałość rurociągu na rozciąganie i ściskanie.

6. Wnioski

Zastosowanie czasowo-częstotliwościowej transformaty Fouriera *STFT* stwarza możliwość analizy niestacjonarnych sygnałów opisujących parasejsmiczne oddziaływanie drgań gruntu na posadowiony w nim rurociąg. Jest to szczególnie istotne ze względu na możliwość wyznaczania częstotliwości rezonansowych liniowego obiektu budowlanego, jaki stanowi rurociąg ułożony w gruncie. Rezonansowe właściwości budowli decydują o sposobie przenoszenia energii na konstrukcje rurociągów, wzmacnianiu lub osłabianiu efektów szkodliwych oddziaływań parasejsmicznych. Dodatkowym czynnikiem jest statyczny naciąg rurociągu spowodowany powstającymi w wyniku ruchów podłoża siłami tarcia, w istotny sposób zaburzającymi sumaryczny bilans jego obciążeń.

Przedstawione w artykule wyniki eksperymentów symulacyjnych potwierdzają poprawność zaproponowanej metody analizy odkształceń i drgań rurociągu wywołanych drganiami parasejsmicznymi gruntu. Umożliwia ona wyznaczanie wartości maksymalnych w sygnałach drgań i odkształceń rurociągu wywołanych falami parasejsmicznymi.

Literatura

- [1] Tarnowski J. i in., *Optymalizacja metod obliczeniowych oraz modernizacja technologii budowy i systemu eksploatacji sieci gazowych na terenach szkód górniczych w aspekcie bezpieczeństwa użytkowania*, Sprawozdanie z Projektu Badawczego KBN Nr 9T12A04812, AGH, Kraków 2000.
- [2] Dulńska J., *Odpowiedź dynamiczna budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenie parasejsmiczne pochodzenia górniczego*, Monografia 338, seria: Inżynieria Łądowa, Politechnika Krakowska, 2006, 178.
- [3] Gawędzki W., *Analiza wpływu drgań gruntu na odkształcenia rurociągów w warunkach ich dodatkowego obciążenia statycznego*, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, vol. 56, nr 8, 2010, 879-882.
- [4] Gawędzki W., Tarnowski J., *Badania wpływu drgań komunikacyjnych na obciążony gazociąg stalowy*, *Problemy Eksploatacji*, nr 3, 2009, 65-74.
- [5] Zieliński T.P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, Od teorii do zastosowań*, WKiŁ, Warszawa 2005.
- [6] MATLAB & SIMULINK for Windows – *User's Guide* The MathWorks, Inc.